

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ - Скопје  
Факултет за информатички науки и компјутерско  
инженерство



Докторски труд

---

Моделирање емоции во интеракција  
човек-робот

---

Автор:  
м-р Весна Димитријевска

Ментор:  
проф. д-р Невена Ацковска  
Коментор:  
проф. д-р Верица Бакева  
Смиљкова

Август 2021



## Декларација за авторство

Јас, м-р Весна Димитријевска, потврдувам дека во оваа докторска теза со наслов, “Моделирање емоции во интеракција човек-робот”, објавени се оригинални истражувања за кои важат следните тврдења:

- Истражувањата се изработени за време на статусот докторанд на овој Универзитет.
- Секое користење на поврзана литература е наведено согласно правилата за цитирање.
- Наведени се сите извори и личности кои директно или индиректно придонеле во тезата.
- За секој дел од истражувањата во кој учествуваат други истражувачи, наведен е нивниот придонес.

Потпис:



Датум:

Август 2021



## Благодарност

Голема благодарност до мојот ментор Невена Ацковска за залагањето да ме води во целиот процес на работа на докторатот, на стручната помош, на непрекорната соработка и значајните дискусии. Голема благодарност и до мојот коментор Верица Бакева Смиљкова за стручната помош, посветеноста во ревизија на мојата работа, како и на давањето значајни коментари и забелешки.

Благодарност до SAL (Silicon Austria Labs) за поддршката при завршување на докторската работа.

Последно, сакам да се заблагодарам на моето семејство за нивното разбирање и трпение за време на изработката на овој труд.



# Содржина

Декларација за авторство	iii
Благодарност	v
1 Вовед	1
1.1 Роботи . . . . .	1
1.1.1 Социјални работи . . . . .	3
1.2 Емоции . . . . .	4
1.2.1 Емоционални состојби . . . . .	4
1.2.2 Емоциите во човековото однесување . . . . .	5
1.3 Дефиниција на целите и хипотезите и опис на методите . . . . .	6
1.4 Краток преглед на поглавјата . . . . .	7
1.5 Придонеси на тезата . . . . .	7
2 Преглед на истражувања поврзани со емоционални работи	9
2.1 Дизајн на компјутерски модели на емоциите . . . . .	9
2.1.1 Историја на моделите на емоции . . . . .	11
2.2 Карактеристики на емоциите од перспектива на роботика . . . . .	12
2.2.1 Улога на емоциите кај роботите . . . . .	12
2.2.2 Роботски модели кои вклучуваат емоции . . . . .	14
TAME . . . . .	14
EARL . . . . .	15
Учење поттикнато од емоции во автономното роботско управување . . . . .	15
Автономен систем за експресија на однесување/емоции . . . . .	16
Систем за однесување кој користи реконструкција на емоции . . . . .	16
Експресија на емоции базирана на Скриен Марков Модел . . . . .	17
2.3 Преглед на емоционални работи . . . . .	17
2.3.1 Претставување на емоциите кај емоционалните работи . . . . .	22
2.3.2 Улогата на емоциите во моделите на однесување кај емоционалните работи . . . . .	25
Перцепција базирана на емоции . . . . .	29
Експресија базирана на емоции . . . . .	31
Одлучување базирано на емоции . . . . .	40
Учење . . . . .	42
Цел и меморија . . . . .	43
2.3.3 Анализа на роботските модели базирани на емоции кај емоционалните работи . . . . .	44
2.3.4 Евалуација на емоционалните работи . . . . .	50
2.3.5 Значењето на емоциите кај емоционалните работи . . . . .	52
2.4 Етички аспекти од примена на емоционални работи . . . . .	53

3	Стохастички роботски модел базиран на емоции	55
3.1	Перцепција на емоции . . . . .	55
3.1.1	Опис на влезни податоци . . . . .	56
3.1.2	Опис на податоците од базата . . . . .	58
3.1.3	Опис и евалуација на моделот за препознавање емоции . . . . .	59
3.2	Емоционално базирано однесување . . . . .	62
3.2.1	Поттикнувачко учење . . . . .	62
3.2.2	Опис на роботскиот модул за однесување . . . . .	68
3.3	Емоционален модул . . . . .	69
3.4	Емоционална меморија . . . . .	72
3.5	Однесување базирано на емоции . . . . .	73
3.6	Формална дефиниција на роботскиот модел . . . . .	75
4	Интеракција дете-робот: Нао како учител во интеракцијата	81
4.1	Спецификации за роботот Нао . . . . .	81
4.2	Дефиниција на апликацијата . . . . .	83
4.2.1	Дефиниција на спецификациите за слојот на донесување одлуки . . . . .	83
	Модел за одлучување . . . . .	84
	Селекција на акции . . . . .	85
	Меморија . . . . .	86
4.2.2	Дефиниција на роботски однесувања . . . . .	88
4.2.3	Евалуација на моделот . . . . .	90
4.3	Имплементација на апликацијата . . . . .	91
4.3.1	NAOqi . . . . .	92
4.3.2	Опис на апликацијата . . . . .	93
	Имплементација на процесирање видео . . . . .	97
	Имплементација на процесирање звук . . . . .	98
	Имплементација на перцепција на емоции . . . . .	102
4.4	Анализа и евалуација на модулот за донесување на одлуки . . . . .	103
4.4.1	Тестирање на функционалноста на модулот за донесување одлуки . . . . .	104
4.4.2	Анализа на влијанието на параметрите за учење . . . . .	105
4.4.3	Анализа на работата на модулот за донесување одлуки во избрани студии на случај . . . . .	110
	Прва студија на случај . . . . .	110
	Втора студија на случај . . . . .	115
	Трета студија на случај . . . . .	116
	Четврта студија на случај . . . . .	117
	Петта студија на случај . . . . .	118
	Шеста студија на случај . . . . .	121
4.4.4	Евалуација на интеракцијата . . . . .	122
4.4.5	Дискусија на резултатите . . . . .	124
A	Опис на акциите во апликацијата	135
	Библиографија	143



# СЛИКИ

1	Емоционални категории претставени во дводимензионален непрекинат простор - пример за врската меѓу емоции претставени во дискретен и непрекинат простор. . . . .	10
2	Хиерархиски подредена листа на значајни карактеристики кај емоционалните работи од наједноставната карактеристика за афекција до најсложената карактеристика за роботска автономност. . . . .	14
3	Приказ на дел од анализираните работи. . . . .	20
4	Визуелен приказ на сесии со работи. . . . .	21
5	Шематски приказ на црна кутија која претставува генерички модел на роботско однесување. . . . .	27
6	Венов дијаграм на емоционалните работи поделени во множества кои ги претставуваат дел од компонентите на генерички роботски модел на однесување каде се користат емоции. . . . .	28
1	Просечна прецизност и сензитивност по емоциски категории на класификаторите добиени со различни влезни податоци: карактеристики од фацијална експресија и карактеристики од говор, карактеристики само од фацијална експресија и карактеристики само од говор. . . . .	60
2	Категоризација на тест инстанците базирана на резултатите од класификациските модели чии влезни податоци ги вклучуваат карактеристиките од фацијална експресија и звучните карактеристики. . . . .	62
3	Графички приказ на редослед по кој се добиваат нови вредности во итеративниот процес на Q-учење. . . . .	67
4	Скриен Марков Модел за емоционалната состојба ER. . . . .	71
5	Шематски приказ на табелата $M_{positive}$ . . . . .	73
6	Графички приказ на пресликување на емоционалната состојба на роботот во бојата на лед светилките при изразување емоции. . . . .	74
7	Архитектура на предложениот роботски модел. . . . .	76
8	Дијаграм на активности на апликацијата за интеракција човек-робот. . . . .	78
1	Роботот Nao со приказ на локацијата на дел од сензорите. . . . .	82
2	Приказ на програма креирана во Choreographe преку визуелен дијаграм со која Nao кажува "Hello" [123]. . . . .	83
3	Визуелен приказ на експлицитните веројатности на премин на емоционалната состојба на лице со кое роботот е во интеракција со минимум веројатност од 0.2. . . . .	87
4	Вредности на параметрите на Скриениот Марков Модел дефиниран на Слика 4. . . . .	88
5	Прозорец во Choreographe каде е прикажан виртуелниот робот. . . . .	92
6	Шематски приказ на врските меѓу NAOqi со модулите [124]. . . . .	93
7	Приказ на структурата на датотеките во апликацијата за роботска контрола. . . . .	94

8	Класен дијаграм за роботската апликација. . . . .	96
9	Чекори во процесирање на една слика за извлекување на визуелни карактеристики. . . . .	99
10	Приказ на дел од чекорите на процесирање звучен запис. . . . .	100
11	Приказ на излезните податоци за секој чекор во симулацијата. . . . .	104
12	Визуелен приказ на функцијата $Q$ по завршување на симулацијата. . . . .	105
13	Визуелен приказ на емоционално-водената меморија на роботот по завршување на симулацијата. . . . .	106
14	Промена на $\epsilon$ во секој чекор за различни вредности на тежинскиот фактор $wd$ . . . . .	107
15	Процент на неизминати парови состојба-акција и процент на неизминати типови акции до секој чекор во случајни симулации каде се земени различни вредности на тежинскиот фактор $wd$ . . . . .	108
16	Промена на вредностите на функцијата $Q$ во секој чекор од симулациите во кои се земени различни параметри за учењето. . . . .	108
17	Промена на вредностите на функцијата $Q$ во секој чекор од симулациите во кои се земени различни вредности за параметарот $\gamma$ . . . . .	109
18	Приказ на вкупната акумулирана награда и просечната идна награда за секој чекор од 5те симулации. . . . .	111
19	Приказ на научената функција $Q$ во три различни симулации на сценариото дадено во првата студија на случај. . . . .	112
20	Приказ на емоционалната состојба на роботот во секој чекор од симулацијата со реден број 0. . . . .	113
21	Приказ на позитивната меморија (горе) и негативната меморија (долу) на крајот од симулацијата со реден број 0 по 100 чекори. . . . .	113
22	Резултати по 1000 чекори од симулацијата со реден број 0. . . . .	114
23	Резултати од втората студија на случај. . . . .	115
24	Резултати од третата студија на случај. . . . .	116
25	Вкупна награда во секој чекор за сите 5 симулации во четвртата студија на случај. . . . .	117
26	Резултати од четвртата студија на случај за симулацијата со реден број 1. . . . .	119
27	Резултати од петтата студија на случај за симулацијата со реден број 0. . . . .	120
28	Резултати од шестата студија на случај за симулацијата со реден број 0. . . . .	121
29	Распределба на оценките добиени за направените симулации во различните студии на случај. . . . .	122
30	Споредба на распределбата на оценката за интеракција добиени во симулациите со предложениот роботски модел (0) и со роботски модел кој работи на случаен начин (1) за различните студии на случај. . . . .	124
31	Споредба на распределбата на оценката за остварување на емоционалната цел добиени во симулациите со предложениот роботски модел (0) и со роботски модел кој работи на случаен начин (1) за различните студии на случај. . . . .	125

# Табели

2.1	Емоционални работи и нивната апликација. Комерцијалните работи се претставени со сива позадина. . . . .	18
2.2	Емоциските категории во категориските модели на емоции кај анализираниите работи. . . . .	24
2.3	Листа на емоционалните работи и краток опис на нивниот физички изглед. . . . .	33
2.4	Поделба на роботите кои изразуваат емоции според четири категории на физички изглед. . . . .	35
2.5	Карактеристики на емоционално базираните модели на однесување кај дел од истражените емоционални работи. . . . .	45
3.1	Листа на реченици изразени со емоција. . . . .	75
4.1	Експлицитни веројатности на премин на емоционалната состојба на лице со кое роботот е во интеракција. . . . .	87
4.2	Листа на реакции на роботот. . . . .	89
4.3	Опис на акции на роботот од тип предавање на тема „Броење“. . . . .	90
4.4	Пресметани звучни карактеристики за вториот сегмент од звучниот сигнал даден на Слика 4.10i. . . . .	102
4.5	Идеални вредности за функцијата $Q$ . . . . .	110
4.6	Краток опис на студиите на случај. . . . .	126
4.7	Краток опис на резултатите од студиите на случај. . . . .	127
A.1	Табела со акциите на роботот од тип предавање на различни теми. (Дел 1) . . . . .	135
A.2	Табела со акциите на роботот од тип предавање на различни теми. (Дел 2) . . . . .	136
A.3	Табела со акциите на роботот од тип испрашување на различни теми. (Дел 1) . . . . .	137
A.4	Табела со акциите на роботот од тип испрашување на различни теми. (Дел 2) . . . . .	138
A.5	Табела со акциите на роботот за поттикнување учење низ игра на различни теми. (Дел 1) . . . . .	139
A.6	Табела со акциите на роботот за поттикнување учење низ игра на различни теми. (Дел 2) . . . . .	140
A.7	Табела со акциите на роботот од тип слободни активности. (Дел 1)	141
A.8	Табела со акциите на роботот од тип слободни активности. (Дел 2)	142



# Кратенки

AVS	arousal-valance-stance (интензитет - обоеност - став)
PAD	pleasure - arousal - dominance (задоволство - интензитет - доминација)
CAA	Crossbar Adaptive Array (Вкрстено - адаптивна површина)
TAME	Traits, Attitudes, Moods and Emotions (Особини, ставови, расположенија и емоции)
EARL	Framework for systematic study between emotion, adaptation and reinforcement learning (Рамка за систематко проучување на емоциите, адаптацијата и поттикнувачко учење)
SOM	self-organizing maps (самоорганизирачки мапи)
HMM	Скриен Марков Модел (Hidden Markov model)
FACS	Facial Action Coding System (Систем за кодирање на акција на лице)
AU	action units (акциски единици)
SVM	Support vector machines (Машини со поддржувачки вектори)
Mexi	Machine with Emotionally extended Intelligence
HEFES	Hybrid Engine for Facial Expressions Synthesis (Хибриден мотор за синтеза на изрази на лицето)
ERWIN	Emotional Robot with Intelligent Network (Емоционален работи со интелегентна мрежа)
BMU	Best Matching Unit (Најдобрата единица на совпаѓање)
SNS	Synthetic nervous system (Синтетички невронси систем)
ASM	Active Shape Model (Модел на активни форми)
PCA	Principal component analysis (Анализа на главни компоненти)
LDA	Linear discriminant analysis (Линеарна дискриминантна анализа)
RL	Reinforcement learning (Поттикнувачко учење)
MDP	Markov Decision Process (Марков процес на одлучување)



Посветено на моето семејство ...





## Глава 1

# Вовед

Во оваа докторска работа се преплетуваат два поими од различна природа: роботи и емоции. Роботите се предмет на истражување во неколку науки како што се компјутерски науки, електротехничко и машинско инженерство, додека емоциите се изучуваат во психологија, медицина, невронаука и други научни дисциплини. Овие теми се спојуваат при изучување на емоционалните роботи, т.е. роботи кои „имаат“ емоции или роботи кои го содржат концептот на емоции. Главниот предмет на нашето истражување се токму емоционалните роботи. Вовед во поимите робот и емоција се дадени во Поглавје 1.1 и Поглавје 1.2, соодветно.

Емоциите се важни во различни аспекти на човековото однесување. Тие можат да бидат прикажани на човековиот лик, се одразуваат на човековата меморија и дури влијаат врз човековата интелигенција. Во 2005 година, Аркин изјавил дека емоциите покрај тоа што се важни параметри во основната контрола на биолошките суштества, како што се луѓето, тие се важни и за контролата на вештачките системи, како што се роботите [9]. Денес истражувачите имаат за цел да ја подобрат роботската контрола користејќи го концептот на емоции. Тезата е дека примената на емоции ќе придонесе во дизајнот на почовечки, социјални и, најважно, интелигентни суштества. Емоциите, исто така, се очекува да ја подобрат интеракцијата човек-робот, бидејќи емоциите би можеле да овозможат роботскиот одговор да биде попознат и поудобен за луѓето [9].

### 1.1 Роботи

Робот е автоматски управувана машина која е способна сама да извршува задачи преку програма со која е дефинирано роботското однесување. За разлика од компјутерските програми, роботот постои и во физичкиот свет и мора да има тело кое постои и се движи во дадената околина. Програмата каде се дефинира роботското однесување е впишана во таканаречениот контролен систем на роботот кој може да биде процесор, микроконтролер или некој друг контролер. Контролниот систем кај роботот претставува паралела на човековиот мозок. Со него се носат одлуки за однесувањето на роботот кои најчесто се базираат на информации како тековната состојба на роботот, меморијата на роботот или податоците од сензорите. Преку сензорите роботот ја „чувствува“ околината. Има сензори за растојание со кои роботот може да ги идентификува препреките, сензори за допир со кои роботот може да регистрира допир, микрофон со кој роботот може да слуша звуци од околината, како говорот на луѓето, и камера со која роботот може да ја гледа околината во која се наоѓа, меѓу другите сензори.

Едно од главните својства на роботите е способноста за движење. Роботските манипулатори имаат компоненти поставени на фиксна основа, кои пак се поврзани со останатите компоненти кои можат да се движат. Такви се роботските раце

кои имаат голема примена во фабриките при автоматско производство. Поради фиксната основа, овие работи имаат ограничен простор на движење. Од роботите кои можат слободно да се движат во околината постојат работи кои летаат, работи кои пливаат, работи кои се движат со две нозе, работи кои се движат со тркала и многу други. Постојат и хуманоидни работи кои имаат раце и нозе со кои може да се копира движењето на луѓето.

Роботите се конструирани согласно саканите функционалности. Функционалноста на роботот може да биде ограничена со дадени едноставни акции или пак роботот може да се однесува согласно јасно дефинирана задача и цел. Во првиот случај контролата на роботот ја одредува следната акција, како на пример оди право, а во вториот контролата ја одредува целта на роботот, како на пример чистење (всмукување) на дадена просторија. Да забележиме дека во вториот случај не се прецизираат чекорите или акциите за извршување на задачата.

Денес роботите стануваат дел од секојдневниот живот на луѓето и голем дел од роботите денес се дизајнирани за да можат да комуницираат со луѓето. Интеракција човек-робот е атрактивно поле на истражување кое се занимава со изучување на моделите, карактеристиките и ефектите од оваа интеракција. Dautenhahn [44] во 2007 година укажала на потребата од нови теоретски концепти и модели за подобрување во истражувањата од областа интеракција човек-робот. Во текот на годините интеракцијата на роботите со луѓето имала различни облици, а тежнењето е да се обезбеди поприродна и поудобна интеракција со луѓето. На почетокот луѓето можеле да комуницираат со роботите исклучиво преку физички допир и преку користење на влезни уреди како што се копчиња. Денес роботот може да види и разбере одредени движењата на човекот или пак да слушне и разбере одредени говорни команди. Сепак, сè уште се прават истражувања за зголемување на способноста на роботот да го разбере човековото однесување, а пред сè човековото движење и човековиот говор.

При повисок степен на интеракција, пожелно е роботот да има одредени социјални карактеристики, а роботите кои овозможуваат ваква интеракција се нарекуваат социјални работи. Според [162]: "Социјален робот е робот кој може да извршува назначени задачи, а неопходниот услов за еден робот да е социјален е способноста на роботот за интеракција со луѓе придржувајќи се до одредени социјални карактеристики и правила". Оттука, развојот на социјалните работи е тема од голем интерес во доменот на интеракција човек-робот [59]. Социјалните интеракции им овозможуваат на роботите да комуницираат и со луѓе кои не се многу компјутерски образовани. Луѓето не треба да бидат обучувани како да комуницираат со роботите, туку да се базираат на принципите при комуникација човек-човек. При градење социјални работи знаењето од интеракција меѓу човекот и човекот можат да се користат како пример за подобрување на интеракцијата човек-робот. Оваа идеја била презентирана, но не и имплементирана, од Fong [60] во 2003 година. Преземањето на методологиите од интеракција човек-човек на човек-робот треба да се направи со претпазливост бидејќи роботите не се живи суштества, па затоа моделите што се користат во интеракција човек-човек треба да се изменет и адаптираат. При креирање на социјални работи може да се користат и одредени концепти и карактеристики од истражувањата во областа на интеракција човек-компјутер. Меѓутоа, роботите не се компјутер затоа што кај роботите има отелотворување и други карактеристики кои не се својствени за компјутерите.

### 1.1.1 Социјални работи

Областа на социјална роботика ги опфаќа истражувањата за развој и дизајн на работи кои имаат социјални карактеристики и имаат социјална интеракција со луѓето. Примери за социјални карактеристики кои може да ги имаат овие работи се [24]:

- способност за водење дијалог,
- способност за учење,
- изразување емоции,
- развој на личност, итн.

Со додавање на вакви и слични карактеристики на роботите, интеракцијата човек-робот станува послична до интеракцијата човек-човек. Со социјалните карактеристики роботите стануваат поинтелигентни машини.

Потребата за социјални карактеристики кај роботите зависи од роботската апликација [60]. Кај некои работи социјалните вештини не се потребни. Еден пример е далечински управуван робот што се користи во вселената. Од друга страна, за некои работи социјалните вештини се многу важни. Социјалните карактеристики се многу пожелни во апликации каде социјалната интеракцијата човек-робот има важна улога. На пример роботите во домаќинството, како што се роботите - правосмукалки, би било пожелно да можат да водат дијалог со корисниците. Роботот може да го замоли човекот да се поттргне ако тој му пречи во работата, да му посака добар ден кога ќе го сретне или пак да го праша за следна задача.

Според [140], една поделба на социјалните работи според апликацијата на роботот вклучува:

- Роботи кои вршат различни домашни обврски,
- Роботи кои помагаат и даваат грижа за стари лица,
- Роботи кои помагаат на лица со попреченост,
- Роботи кои овозможуваат придружба и забава,
- Роботи кои едуцираат деца,
- Роботи кои информираат, продаваат или пак се водичи на јавни места.

Голем дел од апликациите на социјалните работи се посветени на помагање на разни категории на луѓе. На пример, социјалните работи можат да се користат во процеси на рехабилитација каде роботите ги мотивираат и им помагаат на луѓето да ги извршат дадените вежби за рехабилитација. Социјалните работи имаат значајна примена кај лицата, а посебно децата, со аутизам [43]. Дел од социјалните работи, како што се роботите-придружници, имаат главна задача да остваруваат социјална интеракција со луѓето. Овие работи треба да имаат палета од различни социјални карактеристики и вештини со што ќе се обезбеди пријатна интеракција прифатлива за луѓето. Покрај социјалната интеракција, социјалните работи можат да извршуваат и друга пропратна задача како едукација, правосмукување, косење на трева, чистење на прозорци од домот итн.

Социјалните работи треба да бидат внимателни, проактивни и ненаметливи. Тие треба да ја добијат довербата на луѓето. Исто така, социјалните работи треба да целат кон доверлива комуникацијата со луѓето, која треба да е што

е можно поприродна. За долгорочна интеракција човек-робот, роботот треба да е флексибилен и да може да се прилагоди на специфични лица и нивното однесување. Прилагодувањето е возможно само доколку роботот може да учи од ситуациите во реалниот свет. На пример, роботите-придружници можат да научат да ги препознаваат човековите емоции и да научат да се прилагодат на нив. Социјалните работи треба да обезбедат човекот да е задоволен и среќен, така што човекот ќе има позитивно искуство во присуството на роботот [44]. Овој концепт не е нов и е воведен во трите закони на роботиката на Асимов од 1942 година. Според првиот закон, роботот не може да повреди човечко суштество или, преку интеракцијата, не може да дозволи да му се наштети на човечко суштество. Според вториот закон, роботите не треба да предизвикуваат негативни емоции кај луѓето.

Од човечка перспектива, важно е и како луѓето ги перцепираат и одговараат на социјалните работи. Оваа интеракцијата на некој начин влијае врз луѓето, а целта е ова влијание да биде позитивно. За да може роботот да носи одлуки од кои човекот е задоволен роботот треба да може да ги препознае човечките емоции. Одлуките засновани на човечките емоции можат да ги променат перформансите на роботот и, уште повеќе, можат да ги подобрат неговите социјални вештини. Затоа меѓу социјалните карактеристики кои може да ги има кај социјалните работи е и перцепцијата на емоциите кај луѓето. Во Поглавје 1.2 даден е вовед во поимот емоции и дадени се основните карактеристики на емоциите кај луѓето.

## 1.2 Емоции

Што се емоции? До денес не постои прецизна и јасна дефиниција за емоции која е универзално прифатена. Сепак, постојат неколку дефиниции кои во моментот се користат од страна на истражувачи од областите на психологија, невронаука, социологија, медицина и компјутерски науки. Според една дефиниција, емоциите се биолошки состојби кои се поврзани со нервниот систем и кои произлегуваат од невропсихолошки промени поврзани со човекови мисли, чувства, однесување и степен на задоволство [51]. Според дефиницијата на Оксфорд емоциите се силни чувства кои произлегуваат од околината, расположението и релациите со другите [1]. Според Scherer [143], емоциите се "кратки епизоди на одговор" на оценувањето на надворешен или внатрешен настан. Друга дефиниција ги поврзува емоциите со психолошки процеси кои го изразуваат човековиот однос кон предметите, настаните, другите луѓе и кон самиот себе [2]. Според Plutchik [131] емоциите се тесно поврзани со човечките реакции на значајни настани и имаат удел врз целите и потребите на луѓето.

Во дефиницијата дадена во [161], емоциите се претставени со две компоненти. Првата компонента е внатрешна манифестација во форма на емоционална состојба, а втората е надворешна манифестација дадена преку човековото однесување [161]. Во Поглавје 1.2.1 посебно ќе дискутираме за емоционалните состојби, а во Поглавје 1.2.2 за човековото однесување предизвикано од емоциите.

### 1.2.1 Емоционални состојби

Емоционалната состојба на човекот ја претставува неговата емоција. Емоционалните состојби се нарекуваат и емоционални категории или само емоции. За полесно разбирање на емоционалните состојби, тие се категоризираат по различни критериуми. Уште повеќе, во секоја од дадените категории може да има дефинирано соодветно множество на емоционални состојби. На пример, постојат

пријатни и непријатни емоционални состојби. Тагата е непријатна емоција која се јавува кога човекот ќе изгуби некого или нешто, додека радоста е пријатна емоционална состојба која може да се јави кога човекот успеал да реализира некоја своја цел што многу ја посакува.

Според друга категоризација на емоциите постојат основни, или примарни, и сложени, или секундарни, емоции. Основни емоции се оние кои се вродени за луѓето и кои се универзални за сите луѓе, додека сложените емоции се оние кои се стекнуваат или учат. Според Ekman [49] постојат шест основни емоции кои тој ги идентификувал како емоции кои се манифестираат на сличен начин кај луѓето од различни култури. Сложените емоции претставуваат комбинација од основните и можат да имаат специфични карактеристики за луѓе кои припаѓаат на одредена култура. Пример за сложени емоции се ентузијазам, гордост, доверба и многу други. Според друг значаен истражувач по име Plutchik има осум основни емоции. За секоја основна емоција има и емоција дијаметрално спротивна на неа. Таков е примерот со парот радост - тага или пак парот гнев - страв. Паровите спротивни емоции се базираат на психолошките реакции на емоциите кај животните. Plutchik ги претставил категориите на емоции во таканаречено „Тркало на емоции“ (Wheel of Emotions) [130]. На „Тркалото на емоции“ се претставени 32 различни категории на емоции, од кои покрај осумте основни емоции, дадени се и дваесет и четири сложени. Во тоа тркало јасно се гледа зависноста помеѓу различните категории на емоции и нивната поврзаност. И покрај тоа што има ограничен и помал број на основни емоции, вистинскиот број на категории на емоции е многу поголем и според [72] човекот може да доживее околу 34000 различни емоции.

### 1.2.2 Емоциите во човековото однесување

Надворешната манифестација на емоциите се однесува на тоа како емоционалните состојби влијаат врз човековото однесување. При појава на емоција кај човекот може да се јават одредени физиолошки, физички и други промени [2]. Најизразени физички промени кои се случуваат поради емоциите се промени во изразот на лицето и карактеристични промени во говорот. На пример, човекот може да се смее кога е среќен или пак да го повиши тонот кога е гневен.

Експлицитното емотивно изразување преку човечки глас, говор, израз на лице, гестикација и движење на телото овозможува човечките емоции да бидат забележани во околината. Levenson тврди дека изразувањето на емоцијата на еден човек помага во комуницирањето на чувствата кон другите и исто така влијае врз однесувањето на другите [101].

Според [166] постои длабока имплицитна и неразделна врска на емоциите со различни когнитивни процеси. Како што се тврди во [163, 14], емоциите имплицитно влијаат на процесите на решавање на проблеми, донесување одлуки, мислење и перцепција на луѓето. Уште повеќе, што човекот ќе запамети и како акумулираното знаење се чува во човечката меморија зависи од емоциите [163, 14]. Емоциите се поврзани и со целите на луѓето и како резултат на тоа, емоциите се важен систем за мотивација. Додека позитивните емоции укажуваат дека сме блиску до целта, негативните емоции укажуваат дека сме далеку од целта. Негативните емоции можат да мотивираат активности со кои ќе се спречат идни непријатни настани [100].

Човечките емоции се многу важни во комуникацијата меѓу луѓето, т.е. во комуникацијата човек-човек. На пример, во комуникацијата човек - негувател

двете страни се поврзуваат преку своите емоции, како што се задоволство, изненадување или фрустрација [42]. Ова му помага на детето да научи нови вештини, како што е учење јазик. Изразувањето на емоциите има значајни импликации врз тоа како емоциите се пренесуваат во социјални ситуации со други луѓе. Теоријата на еволуција на Дарвин сугерира дека емотивните карактеристики на човековото изразување се избрани во еволуцијата, бидејќи се многу значајни за комуникација, опстанок и интелигенција воопшто [50].

### 1.3 Дефиниција на целите и хипотезите и опис на методите

Мотивирани од мултидисциплинарноста, комплексноста и од примената на емоционалните работи, нашата работа ја посветивме токму на истражување во оваа тема. Во оваа докторска дисертација поставени се две значајни цели. Првата цел е да се истражат постоечките емоционални работи и да се анализираат нивните карактеристики. Втората цел е да се дефинира нов модел на роботско однесување поддржано со емоции кој ќе овозможи социјална интеракција човек-робот. Моделот треба да овозможи роботот да може да научи како да се однесува во интеракција со некое лице со цел да ја подобри емоцијата која ја има лицето со кое роботот е во интеракција. Моделот на однесување на роботот може да се базира на состојбата на роботот, неговата меморија, како и перцепцијата на надворешниот свет.

За остварување на првата цел да се истражат постоечките емоционални работи, треба да се направи преглед на постоечките работи и да се направи исцрпна анализа и споредба меѓу карактеристиките на постоечките емоционални работи. Посебен акцент при анализата на емоционалните работи треба да биде ставен на одговарање на следните прашања:

- Какво е влијанието на емоциите врз роботите и нивното однесување?
- Кои се апликациите на емоционалните работи?
- Како се претставени емоциите кај емоционалните работи?
- Како се вклучени моделите на емоции во роботските модели на емоционалните работи?
- Кои се придобивките од примената на концептот на емоции кај роботите?

За остварување на втората цел во оваа докторската работа првата задача е да се предложи роботски модел за емоционален робот. Втората задача е да се имплементира предложениот модел во пример роботска апликација за роботот Нао. Дефинираниот модел треба да се опише детално и да се специфицираат неговите карактеристики, а потоа моделот треба да се имплементира во роботската апликација која ќе се евалуира. Основното барање за новиот роботски модел е тој да овозможи удобна интеракција човек-робот во која човекот ќе има позитивно искуство. За остварување на ова барање ние во моделот ќе го користиме концептот на емоции од повеќе аспекти, меѓу кои и во процесот на учење.

Главните хипотези кои се однесуваат на роботскиот модел се:

#### Хипотеза 1

Може да се дефинира нов роботски модел за однесување во кој концептот на емоции е вклучен во различни аспекти од моделот, така што роботот ќе може да учи како да се однесува со цел притоа да го зголеми задоволството или емоцијата која се јавува кај луѓето со кои роботот е во интеракција.

## Хипотеза 2

Дефинираниот роботски модел може да се примени во апликација човек-робот во која роботот успешно ја остварува примарната цел човекот да има позитивно емоционално искуство во интеракцијата.

Во овој научен труд ќе бидат користени следните научни методи: истражување, моделирање, програмирање, експериментирање и анализа. Истражувани ќе бидат научни откритија и резултати од научни трудови на тема емоционални работи. Ќе биде креиран модел на роботско однесување, кој ќе се имплементира, т.е. програмира, во една пример апликација. Ќе бидат дефинирани експерименти за евалуација на моделот кои ќе бидат спроведени во симулациска околина. Последно, резултатите од експериментите ќе бидат анализирани за што ќе бидат воведени и квалитативни мерки. За да се изведат заклучоците од резултатите ќе се користат методи за анализа и визуелизација на податоци и индуктивни методи.

## 1.4 Краток преглед на поглавјата

Во ова поглавје даваме краток опис на содржината на секоја глава посебно.

Во Глава 2 даден е преглед на досегашните истражувања поврзани со емоционални работи. Поконкретно, даден е преглед на моделите на емоции, дадени се карактеристиките на емоциите при примена во роботика и даден е вовед во етичките аспекти при примена на емоционалните работи. Главен фокус во оваа глава е ставен на исцрпното резиме на постоечки емоционални работи и анализа на нивните карактеристики кое е дадено во Поглавје 2.3.

Во Глава 3 формално е дефиниран нов модел на роботско однесување кој се базира на емоции. Во овој дел подетално се опишани оние компоненти од предложениот модел кои се генерички и кои можат да се применат во разни апликации. На пример, тука се опишани моделот за перцепција на емоции, емоционално-базираното однесување, емоционалниот модул и емоционалната меморија.

Глава 4 е посветена на едукативната апликација за деца имплементирана за роботот Nao, во која роботот има улога на учител, а која е базирана на предложениот модел на роботско однесување. Во оваа глава дадени се деталите за дефиниција и имплементација на оваа апликација. Потоа, во Поглавје 4.4 предложениот роботски модел на однесување е евалуиран преку спроведување на разни експерименти. На крајот на овој дел сумирани се резултатите од анализата на моделот.

Заклучоците и насоките за можно проширување на истражувањата се дадени на крајот од трудот. Во прилог на овој труд, во Додаток А, даден е детален опис на акциите на роботот имплементирани во апликацијата на Nao како учител во интеракција дете-робот.

## 1.5 Придонеси на тезата

Главни придонеси на тезата се:

1. Направена е екстензивна анализа на истражувањата кои вклучуваат емоции и работи. Даден е голем придонес кон резимирање и класифицирање на досегашните истражувања за емоционални работи од различни аспекти: улога на емоциите, значењето на емоциите, дефинирање на роботски модели базирани на емоции и нивна евалуација.

2. Креиран и евалуиран е класификатор за препознавање на човекови емоции базиран на визуелни и звучни податоци.
3. Предложен е роботски модел на однесување кој се базира на емоции и чија примарна цел е роботот да има позитивен ефект врз емоциите на човекот со кој е во интеракција.
4. Креирана е апликација за роботот Nao која се основа на предложениот роботски модел на однесување.
5. Креираната апликација е тестирана и анализирани се карактеристиките на предложениот роботски модел на однесување.

Главниот практичен придонес во оваа докторска дисертација е дефинирањето на предлог модел за роботско однесување кој може да се имплементира во најразлични апликации кај роботи со најразличен изглед и најразлична цел. Иако овој модел најчесто се применува кај социјалните роботи, во иднина моделот може да се користи и кај други роботи кои се во интеракција со луѓе. Од аспект на идните насоки на истражување, истражувањето изложено во овој труд претставува добра подлога за развој на посложени модели за роботско однесување.



## Глава 2

# Преглед на истражувања поврзани со емоционални работи

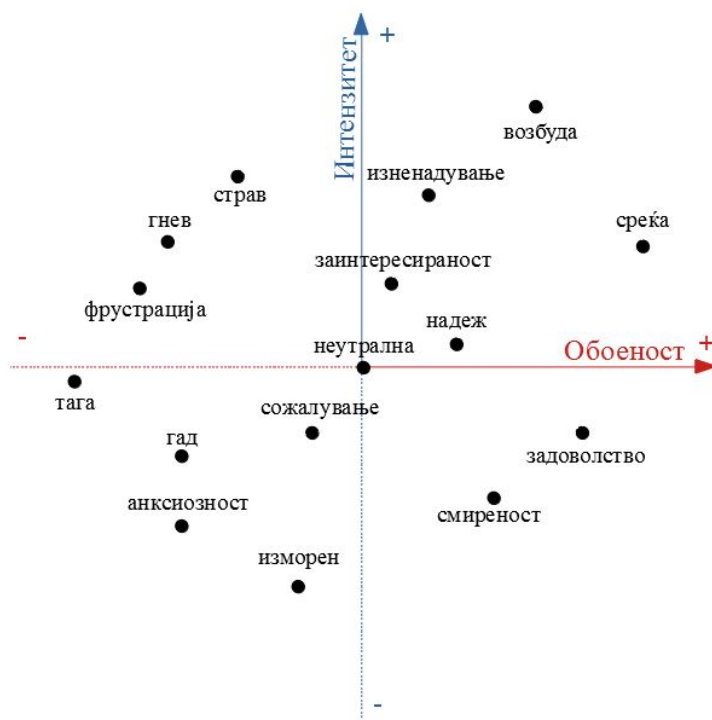
Историски гледано, прво се развивани компјутерски модели за емоциите кои можат да се користат во развој на паметен софтвер. Потоа, со развојот на роботиката и растот на популацијата на работи, моделите на емоции стануваат дел и од роботските системи. Примената на концептот на емоции кај роботите води до креирање на таканаречените емоционални работи. Во Поглавје 2.1 ќе бидат прикажани резултатите од анализата на моделите на емоции, а во Поглавје 2.2 ќе бидат претставени карактеристиките на моделите на емоции во роботиката. Поглавје 2.3 ќе биде посветена на преглед на досегашните истражувања за емоционални работи. Последно, во Поглавје 2.4 се дадени етичките аспекти од примената на емоционалните работи.

### 2.1 Дизајн на компјутерски модели на емоциите

Иако нема еднозначна дефиниција на емоциите, тие се моделираат користејќи математички јазик за да можат да бидат претставени во еден компјутерски систем. Имајќи ги предвид начините на кои може да се опише емоционалната состојба на човекот наведени во Поглавје 1.2.1, во компјутерските науки, емоцијата може да биде претставена во дискретен или во непрекинат простор.

Емоцијата претставена во дискретен простор може да се опише со множество од емоции или емоционални категории. Имајќи предвид дека постојат огромен број на емоционални состојби кај човекот, во моделите на емоции кои се користат во компјутерските модели најчесто се избира подмножество од емоционални категории кои би биле корисни во дадената апликација. Најчесто предност се дава на основните емоции, имајќи предвид дека овие се дефинирани како вродени кај луѓето. Дискретниот простор на Екман содржи шест основни емоции: гнев, гад, страв, среќа, тага и изненадување [49].

Емоцијата може да се претстави како област во повеќе-димензионален непрекинат простор. Најпопуларниот непрекинат простор за претставување на емоции, предложен од Breazeal [26], е тродимензионален простор наречен интензитет - обоеност - став (arousal-valance-stance, AVS). Интензитетот на емоцијата се однесува на енергијата на чувството на емоцијата и може да има вредност во двата поларности: мал и голем. Обоеноста е поврзана со бојата на емоцијата која може да биде негативна или позитивна. Последната димензија именувана став има две крајности, отворен и затворен став, што го определуваат степенот на изразување на емоцијата од човекот кон околината. Друг често користен простор на емоции е просторот наречен задоволство - интензитет - доминација (pleasure - arousal - dominance, PAD) развиен од Mehrabian and Russell [105]. Со користење на моделите AVS или PAD може да биде претставена широка палета на емоции со само три



Слика 1: Емоционални категории претставени во дводимензионален непрекинат простор - пример за врската меѓу емоции претставени во дискретен и непрекинат простор.

вредности дефинирани за секоја од трите димензии. За поедноставни апликации, може да се користат и дводимензионални и едnodимензионални простори за претставување на емоционалната состојба. Еден пример е простор со димензии: интензитет и обоеност. Сликovитo ваков простор е даден на Слика 1.

Постои директна поврзаност меѓу емоциите претставени во непрекинат простор и оние претставени во дискретен простор. Секоја точка во непрекинатиот просторот може да биде пресликана во една емоционална категорија од дискретниот простор на емоции. На пример, координатниот почеток на тродимензионалниот простор може да ја претставува неутрална емоција. Категоријата наречена неутралната емоција се однесува на ситуацијата кога нема присуство на ниту една емоција. Едно можно пресликување на емоционалните категории во простор со димензии, обоеност и интензитет е дадено на Слика 1. На пример, дел од точките со позитивна обоеност и мал интензитет се пресликуваат во емоционалната категорија смиреност. Во десната страна на координатниот систем дадени се позитивните емоции меѓу кои се оние со голем и мал интензитет како што се среќа и задоволство. Овие емоции се наоѓаат во горниот и долниот дел од системот, соодветно. На сличен начин дадени се негативните емоции со голем интензитет, како гнев, и со мал интензитет, како тага. Да забележиме дека пресликувањето не е еднозначно имајќи ја предвид природата на емоциите.

Двата начини на претставување на емоционална состојба имаат и предности и недостатоци. Дискретниот простор на емоции е поедноставен, полесен за имплементација и еднозначен. Сепак, во дискретен простор не може да се претстави ситуација во која има симбиоза од повеќе емоции што е карактеристична ситуација кај луѓето. На пример, човек може да биде и тажен и гневен истовремено. Еден начин на справување со повеќе значноста на емоционалната

состојба е секогаш да биде претставена само онаа емоција која е најизразена или онаа со најголем интензитет. Друг начин е да се овозможи претставување на подмножество од повеќе емоционални состојби, каде за секоја емоција има доделено соодветна тежина или интензитет. Повеќезначната емоционална состојба е предизвик и кај непрекинатиот простор на емоции. Во оваа смисла, димензиите на просторот на емоции треба да бидат добро дефинирани за да може со нив да се претстави палетата од различни емоционални состојби и мешавини од емоционални состојби. Предноста на непрекинатиот простор е токму можноста за претставување на огромна палета на состојби. Сепак, голем предизвик е да се направи добро пресликување на состојбите од непрекинатиот простор во емоционални категории од дискретниот простор кои се познати и јасни за луѓето.

Во случај кога треба да се претстават поголем број на категории на емоции, категориското претставување на емоциите не е најдобар начин за опишување на емоционалната состојба. Во оваа ситуација попогодно би било непрекинато претставување што ќе овозможи да се претстават и покомплексни состојби и ќе овозможи едноставно да се претстави неутралната емоција.

### 2.1.1 Историја на моделите на емоции

Во 1960 година, Mowrer ги вклучи емоциите во модел за учење. Тој ја подобрува класичната техника на условувано учење која се заснова на асоцијациите стимулација - одговор (stimulus - response) така што емоциите ги поврза со стимулацијата [120]. Друг пример од 1982 година, е архитектурата наречена „Вкрстено - адаптивна површина“ (Crossbar Adaptive Array, CAA) [21] која го решава проблемот на задоцнета афирмација. Во овој предлог е воведен концептот на евалуација на емоционалната состојба. Некои состојби се евалуирани априори со позитивна и/или негативна емоционална состојба и овие вредности се пропагирани до сите други состојби додека роботот во симулација ја истражува својата околина [22]. Во посовремени истражувања, емоциите наоѓаат примена и во методи за машинско учење и вештачка интелигенција. На пример, архитектурата на невронска мрежа претставена во [7, 6] ги интегрира учењето и емоциите така што е дефинирано само-набљудувачко учење. Невронската мрежа се користи за развој на посакуваниот фенотип од хиерархија на структуриран геном. Фенотипот има способност да еволуира во архитектура со интегрирани емоции.

Истражувањата каде се воведени компјутерски модели на емоции го отворија патот во примената на овие модели кај комплексни системи како што се роботите. Некои истражувачи во минатото укажале на потенцијалот на емоциите кај роботите. Уште во 1981 година, во [147], Slomon објаснил зошто роботите треба да имаат емоции и посочил дека прашањето не е дали роботите ќе имаат емоции, туку каков вид на емотивни карактеристики ќе имаат. Во 2005, Аркин посочил дека емоциите се значајни параметри во контролата на роботите [9].

Во пракса, потенцијалот на емоциите е уште повеќе забележан по 1990-тите кога се создадени пресметковни модели за вештачки емоции [26]. Овие и други модели на емоции се користеле кај таканаречени вештачки агенти, а потоа и кај роботски системи кои поддржуваат емоции. Емоциите кај вештачките агенти и роботите се нарекуваат вештачки емоции, со што се прави јасна разлика со вистинските емоции кои се јавуваат кај биолошките суштества и кои имаат различна природа. Во оваа докторска тема ќе го користиме поимот на емоции и за емоциите кај роботите и за емоциите кај луѓето, притоа подразбирајќи дека станува збор за вештачки емоции кога тие се поврзани со емоции кај роботите. Интересно, моделите на (вештачки) емоции кои се користат за апликации кај вештачките агенти и

за роботските апликации најчесто се инспирирани од биолошки суштества. Емоционалните модели инспирирани од биолошките карактеристики на различни живи организми можат да се користат во различни популации на работи [9].

Една понова перспектива на емоционалните модели е дадена во работата на компанијата за електроника Emoshare. Тие развиваат таканаречен "емоционален чип" кој треба да ги процесира емоциите на сличен начин како и луѓето [125].

## 2.2 Карактеристики на емоциите од перспектива на роботика

### 2.2.1 Улога на емоциите кај роботите

Важноста на емоциите кај луѓето и нивната примена во различни процеси навестува дека постојат многу можности за употреба на емоциите кај емоционалните работи. Во суштина постои тенденција роботите, а посебно хуманоидните работи, да го копираат однесувањето на луѓето, а со тоа и да ги симулираат својствата на човековите емоции. Некои истражувачи сметаат дека емоциите се клучни за креирање на интелигентни работи [111, 163]. Според зборовите на Minsky: "Прашањето не е дали интелигентните машини можат да имаат какви било емоции, туку дали машините можат да бидат интелигентни без никакви емоции" [111].

Покрај интелигенција, емоционалните работи може да имаат некои карактеристики што неемоционалните работи ги немаат. Scheutz [145] предложил 12 потенцијални улоги за емоциите кај вештачките агенти, меѓу кои се: избор на акција, адаптација, управување со целите, контрола на меморија, интеграција на сензори, себе-моделирање, мотивација итн. За роботите, оваа листа може и да се прошири имајќи ги предвид специфичностите на роботските системи и нивните апликации. Тука ќе издвоиме дел од позначајните улоги на емоциите кај роботите кои биле идентификувани во повеќе различни трудови.

Според [159] емоциите кај роботите имаат два аспекти на нивната примена. Емоциите можат да се користат како носечка врска помеѓу надворешната околина и внатрешната состојба на роботот [99], а од друга страна емоциите можат да бидат вклучени како дел од механизмот за оценување или евалуација при процесот на учење на роботот.

Како врска меѓу внатрешната и надворешната околина емоциите можат да ја олеснат интеракцијата човек-робот бидејќи емоциите носат значајни информации од роботот кон околината и бидејќи емоциите можат да го одразат влијанието на различните фактори од околината врз роботот [121]. Интеракцијата човек-робот може да се направи природна и веродостојна ако при тоа се вклучени емоции [68, 9]. Изразувањето или експресијата на емоции може да биде показател за состојбата на роботот, неговите цели и намери [99]. Од друга страна, емоциите можат да играат улога во перцепцијата и процесирањето на информациите од околината на роботот, а со тоа и во претставувањето на надворешната состојба на роботот [163]. Емоциите можат да влијаат на тоа како роботот е под влијание на перцепираните податоци кои ги собира од своите сензори. Уште повеќе, емоциите можат да се користат во претставување на внатрешната состојба на роботот. Краткорочната емоционална состојба често се поистоветува со емоција, додека долгорочната емоционална состојба се нарекува расположение [29].

Другиот аспект за употреба на емоциите сугерира дека емоциите можат да се користат за адаптација на робот кон нови ситуации во околината. Освен тоа, роботите можат да учат и да се прилагодат на нови луѓе, што може да биде одлична карактеристика во интеракцијата човек-робот. Како што е наведено во

[140], со користење на емоции можат да се подобрат повеќе социјално значајни својства на роботите како што се: автономија, адаптивност, способност за учење и особини на личноста. Емоциите можат да влијаат на акциите кои ги извршуваат роботите, но и на долгорочното роботско однесување. На долг рок, роботите ги планираат следните акции паралелно со промената на нивната цел. Информацијата за емоциите, кои може да бидат присутни во внатрешната или надворешната состојба на роботот, можат да се користат во планирањето [29, 67]. Емоциите можат да бидат вклучени во механизмот на евалуација при процесот на учење на роботот [163]. Ова може да го забрза учењето кај роботот и да поттикне прилагодување и адаптација во однесувањето на роботот. На пример, емоционална повратна информација (фидбек) може да се користи за адаптација на роботот при интеракција со луѓе [9].

На највисоко ниво, улогата на емоциите кај роботите е да придонесат кон автономијата на роботот [9, 37]. Роботот е автономен ако системот може да ја оствари целта без интервенција на човек или интервенција на друг систем. Карактеристики на автономните работи се само-учење, само-контрола, само-мотивација итн. [62]. Велиме дека роботот е само-мотивиран ако има погон кој води до поставување на целите и кој води до прилагодување на целите. Крајната цел на автономен робот треба да е од хомеостатична природа, каква што е природата на емоциите. Оттука, емоциите претставуваат еден механизам кој може да доведе до комплетна автономија на роботите [37].

Покрај автономијата, ќе издвоиме и неколку други значајни карактеристики на еден робот кои можат да се подобрат користејќи емоции. Тие се дадени на Слика 2 и се подредени по нивото на комплексност. Наједноставната карактеристика е приврзаност (афекција) која на пример ја имаат роботите кои имаат емоции и ги изразуваат истите покажувајќи ја поврзаноста со луѓето или други агенти од околината. При социјална интеракција, роботот експлицитно комуницира со сите членови на околината, а ова може многу да се подобри со примена на емоции [60]. Емоциите можат да ја олеснат интеракцијата човек-робот така што информацијата за емоциите ќе се пренесува меѓу двете страни во интеракцијата, а тоа ќе влијае на самата интеракција [9]. Социјалната интеракција човек-робот наоѓа голема примена кај персоналните и сервисни работи кои вообичаено се во интеракција со луѓе кои немаат посебни вештини за користење на работи, ниту пак имаат тренинг за да ги користат [14]. Вештачката интелигенција кај машините е всушност симулација на интелигенцијата кај луѓето, а истото важи и за интелигенцијата на роботите. Интелигентните процеси вклучуваат учење, резонирање, само-корекција, итн. Традиционалната интелигентна контрола кај роботите користи низа од популарни методи за машинско учење, но го игнорира концептот на емоции. Воведувањето емоции во сите интелигентни процеси на роботот може да го реши овој проблем и да овозможи интелигентна контрола на роботите. Адаптацијата на робот во нова околина или адаптацијата на ново сценарио е исто многу значајна за роботите. Кај роботите, адаптацијата е тесно поврзана со учењето и може да се подобри со регулирање на емоциите на роботот [163]. Според Дарвин, емоциите се значаен психолошки фактор во еволуцијата на луѓето [49]. Дарвин укажал и на тоа дека емоциите кај луѓето позитивно влијаат на карактеристиките за преживување. Согласно тврдењето на Дарвин, според Arkin емоциите се тие кои овозможуваат роботот да опстане во сложениот реален свет [9].



Слика 2: Хиерархиски подредена листа на значајни карактеристики кај емоционалните роботи од наједноставната карактеристика за афекција до најсложената карактеристика за роботска автономност.

### 2.2.2 Роботски модели кои вклучуваат емоции

Денес не постои единствен роботски модел кој ги вклучува сите функционалности и аспекти на емоциите. Различни истражувања имаат направено обид да креираат погоден модел за специфична цел. Бидејќи апликацијата на емоционалните роботи е огромна и разновидна, има различни роботски модели дефинирани за однесувањето на роботските системи. Во следниот дел ќе бидат на кратко опишани неколку значајни модели кои се концептуално и теориски дефинирани во современите истражувања, но до сега само дел од нив се имплементирани во постоечки роботи.

#### TAME

Моделот на однесување базиран на афектни состојби именуван „Особини, ставови, расположенија и емоции“ (TAME, Traits, Attitudes, Moods and Emotions) е предложен од Moschkina и Arkin во 2003 [117]. Целта била да се постават основи за креирање на интелегентно роботско однесување кое ќе ја подобри интеракцијата човек-робот. Афектите на роботот се додадени во модулот наречен „Личност и Афект“ (Personality and Affect). Овој модул има четири компоненти: особини (Traits), ставови (Attitudes), расположенија (Moods) и емоции (Emotions). Овие компоненти се меѓусебно поврзани и заедно ја сочинуваат внатрешната состојба на роботот. Особините и ставовите го одредуваат карактерот на роботот, расположенијата и емоциите ги претставуваат долгорочната и краткорочната емоционална состојба на роботот, соодветно. Роботското однесување се избира врз основа на параметри на однесување кои се под влијание на внатрешната состојба на роботот дадена со модулот „Личност и афект“ и на надворешната состојба, дадена со модулот „Перцепција“. Модулот „Перцепција“ може да влијае на промените на внатрешните параметри во модулот „Личност и афект“ и на овој начин се менуваат и карактеристиките на роботот и неговата емоционална состојба, а со тоа се менува и однесувањето на роботот.

## EARL

Рамката EARL (Рамка за систематско проучување на емоциите, адаптацијата и поттикнувачко учење, Framework for systematic study between emotion, adaptation and reinforcement learning) е предложена од Broekens во 2007 [39]. Со оваа рамка се моделира врската меѓу емоциите и учењето кај емоционалните работи. Рамката EARL има четири дела: „Модул за препознавање емоции“, „Агент на поттикнувачко учење“, „Модул на вештачки емоции“ и „Модул на експресија“. Стандардните техники на поттикнувачко учење, како што е Q-учење, можат да се користат од учечкиот агент. Според оваа техника за секоја роботска акција може да се најде апроксимација на вредносната функција Q со посебен повеќеслоен перцептрон. Социјалното поттикнување, кое доаѓа од препознаените емоции на луѓето, може да се додадат во параметарот за награда кај функцијата за селекција на следната акција. Покрај тоа што емоциите можат да се користат во поттикнувањето, тие можат да се користат и како метапараметри во „Модулот за вештачки емоции“. Последно, роботските емоции можат да се користат во „Модулот за експресија“ каде тековната емоционална состојба на роботот може да биде изразена преку акциите на телото на роботот. И покрај тоа што оваа рамка е наменета за реални работи, прво истата е тестирана во симулациска околина. Резултатите покажале дека примената на социјално поттикнување го олеснува учењето на роботот, т.е. роботот побрзо може да го најде решението.

Учење поттикнато од емоции во автономното роботско управување

Целта на моделот креиран во [37] била да се моделира робот кој може да се адаптира на околината преку поттикнувачко учење. Во овој модел емоциите се користат во три различни елементи:

1. поттикнувачката функција,
2. чувствата на роботот, и
3. детекторот на настани.

Емоционалниот систем е моделиран како рекурентна мрежа која имитира поедноставена верзија на хормонскиот систем кај луѓето. Во емоционалниот систем се одредува емоционалната состојба користејќи ги како влез перцепираните сензорни податоци. Потоа, од емоционалната состојба може да се одредат доминантната емоција и чувствата на роботот. Доминантна емоција е онаа со највисок интензитет кој е поголем од претходно дефиниран праг. Во случајот кога не постои ваква емоција велиме дека доминантна емоција е неутралната. Контролерот на роботското однесување е адаптивен контролер кој има два одделни модули: „Модул на асоцијативна меморија“ и „Модул за селекција на однесување“. Во првиот се пресметува оценката за секое можно однесување, а во вториот се избира најдоброто однесување во дадената ситуација. „Модулот на асоцијативна меморија“ користи стандардни невронски мрежи за да ја пресмета оценката на однесувањата земајќи ги роботските чувствувања, кои директно зависат од емоциите, како влез во мрежата. Оваа мрежа се тренира со пропагација-назад, а за адаптација користи поттикнувачката функција пресметана од доминантната емоција. Активниот контролер е воден од настани, т.е. тој се повикува од детекторот на настани. На пример, нов настан се случува кога има промена во доминантната емоција.

### Автономен систем за експресија на однесување/емоции

Главниот концепт на системот предложен во [79] е да се креираат емоционални експресији зависно од допаминот кој се користи за да се претстави мотивацијата кај роботот. Допаминот е супстанца која е важна за изразувањето на човековите емоции, па согласно тоа во референцираниот труд е воведен поимот на вештачки допамин. Предложениот систем има три дела: „Препознавање на надворешна ситуација“, „Когнитивен модул“ и „Модул за емоционална селекција“. Првиот дел извлекува параметри значајни за определување на вредноста на допаминот на роботот од надворешната ситуација. „Когнитивниот модул“ прво ја одредува мотивација на роботот од вредноста на допаминот, а потоа ги наоѓа најдобрите кандидати за следна акција и следна емоција со примена на две одделни самоорганизирачки мапи (self-organizing maps, SOM). Мрежната архитектура на SOM овозможува повеќедимензионални податоци да се пресликуваат во дводимензионална низа од неврони, кои пак се пресликуваат во една следна акција или однесување (Мапа на однесување) и следна емоција (Мапа на емоции), соодветно. Најдобриот неврон во мапата на однесување ја определува акцијата која треба да ја изврши роботот. Од друга страна, од мапата на емоции се пресметуваат и афективните фактори кои се влез во „Модулот за емоционална селекција“ чиј излез е следната акција за експресија на емоција која треба да ја изведе роботот. „Модулот за емоционална селекција“ е имплементиран како Марков процес. Следната состојба на роботот е базирана на претходната емоционална состојба и на веројатностите за премин од една во друга состојба кои се дефинирани како дел од топологијата на Марковиот емоционален модел. Емоциите се претставени како случајни променливи со шест можни вредности кои одговараат на шесте емоции: неутрална емоција, тага, страв, гад, среќа и надеж. Со добивање на нови податоци, емоционалниот модел се менува така што се менуваат веројатностите за премин. Оттука, следната емоционална состојба на роботот се предвидува врз база на претходните емоции, а тоа влијае и на акциите за експресија на емоции.

### Систем за однесување кој користи реконструкција на емоции

Системот за однесување кој е даден во [160] е структуриран во четири модули именувани „Когниција“, „Емоција“, „Селекција на однесување“ и „Изведување на однесување“. Марковиот емоционален модел, кој се користи и во [79], се користи и тука. Единствената разлика е што тука постојат само четири емоционални состојби: радост, тага, страв и гнев. Во модулот „Когниција“ се пресметуваат четири параметри кои се поврзани со емоциите, а кои се добиени од сензорните податоци. Овој модул е имплементиран со SOM, каде дополнително е овозможено онлајн учење. Пред процесот на донесување одлука, во модулот „Емоција“, врз основа на претходната состојба се пресметува следната емоционална состојба. Тука емоциите се реконструираат користејќи ги параметрите поврзани со емоции кои се добиени извршувајќи ја претходната задача. Врз база на тековната емоција во модулот „Селекција на однесување“, имплементиран како Марков модел, се одредува распределбата на веројатност за сите можни однесувања на роботот. Во последниот модул, „Изведување на однесување“, се генерира контролниот вектор за роботот со кој се контролираат акциите кои ги извршува роботот. Врската меѓу параметрите поврзани со емоции и влезните сензорски податоци овозможуваат дополнително учење во моделот што довело до подобрување на перформансите на роботот во експеримент спроведен во симулациска околина [160].



### Експресија на емоции базирана на Скриен Марков Модел

Моделот за експресија на емоции презентира во [161] се фокусира само на проблемот на генерирање на роботско однесување наменето за интеракција човек-робот. Влезот во моделот се емоционалните карактеристики од фацијалната експресија на човекот со кој роботот е во интеракција. Излезот на моделот е роботско однесување кое се основа на фацијална роботска експресија и на физичко роботско однесување. Моделот содржи два пресметковни модули: „Простор на состојба на активно поле“ и „Модул на Скриен Марков модел на пренос“. Врз база на карактеристиките од експресијата кои се препознаени кај човекот, се изведува класификација во една од следните емоционални состојби: гнев, гад, страв, радост, тага, изненадување и смиреност. Класифицираната емоционална состојба е влез во „Просторот на состојба на активно поле“. Во секоја точка од активното поле, силата на секоја емоција се прилагодува врз база на новите податоци. Интензитетот на емоцијата со текот на времето ослабува, а ова е прилагодено во активното поле користејќи таканаречена функција на слабење. Потоа, во „Модул на Скриен Марков модел на пренос“ имплементирани се два стохастички процеси за преносот на емоционалната состојба и преносот на перформансите на однесувањето користејќи Скриен Марков Модел (Hidden Markov Model, НММ). НММ го пресметува планот за фацијална експресија и планот за физичко однесување на роботот. Овие планови се користат за контрола на роботските хардверски компоненти. Претставениот модел се користи во динамичка интеракција човек-робот. Двојните стохастички процеси го прават моделот поекспресивен, а со тоа и интеракцијата поприродна [161].

Во сите горенаведени роботски модели вклучен е концептот на емоција. Во најголем дел од моделите однесувањето на роботите зависи од емоциите што укажува на огромната улога на емоциите во целиот систем. Сепак, до времето на нивно анализирање, овие модели не се имплементирани на реални работи. Ова ја укажа потребата за анализа и на роботските модели кај реалните емоционални работи која е дадена во Поглавје 2.3.

## 2.3 Преглед на емоционални работи

Во овој дел од работата на докторската тема ќе биде даден преглед на досегашните научни достигнувања и резултати во истражувањата чија главна тема се емоционалните работи. Овој преглед е дел од нашата работа [46]. Тука анализирани се само емоционални работи кои постојат во реалниот свет, додека симулациските работи кои немаат тело не се анализирани. Имено, симулациските работи не се од интерес, бидејќи телото на роботот е многу значајно за физичката интеракција човек-робот. Анализирани се 35 различни емоционални работи и истите се дадени во првата колона од Табела 2.1. Третата колона во табелата ја претставува годината на првата референца за цитирање пронајдена за секој робот со цел да се опише временскиот период кога темата била испитана. Да забележиме дека дел од овие работи се предмет на истражување и до денес. Може да се забележи дека почетоците на истражувањата каде се користат емоционални работи е од околу 2000та година. Во последните години популарни се и хуманоидни емоционални работи како што се Sophia и Nadine. Овие работи по физичкиот изглед и изгледот на лицето наликуваат многу на луѓето. Sophia е првиот робот државјанин во светот и е првиот робот амбасадор за иновации во Програмата за развој на Обединетите нации [149]. Nadine се вбројува меѓу роботите кои најмногу наликуваат на луѓето. Денес Nadine работи како агент за услуги

на клиенти во AIA Singapore [11], откако претходно е „обучена“ за оваа работа. Nadine е првиот робот во светот кој работи како агент за услуги на клиенти.

Табела 2.1: Емоционални роботи и нивната апликација. Комерцијалните роботи се претставени со сива позадина.

Робот	Апликација	Година
Infanoid [92, 94]	Социјален развој и соц. интелигенција	2002
Cat [156]	Пријателска машина	1998
Sparky [141]	Нови интерфејси човек-компјутер	2002
Eddie [19]	Емоционален фацијален приказ	2006
FACE [56]	Емоционална експресија	2010
Feelix [33]	Емоционална експресија во соц. интеракција	2002
WE-4R [53, 114, 113]	Природна комуникација човек-робот	2003
Aryan [116]	Емоционално интерактивен робот	2003
Mexi [10]	Уверлива комуникација човек-робот	2005
Maggie [140]	Социјална интеракција човек-робот	2006
ROMAN [70, 152]	Интеракција човек-робот	2007
Kismet [24, 27, 25]	Креирање на социјално интелигентен робот	2000
Probo [48]	Интеракција човек-робот со деца	2016
Erwin [41]	Долгорочна интеракција човек-робот	2014
Rubi [119, 118]	Социјален робот	2005
eMuu [13, 15]	Домашен емоционален лик	2000
iCat [99, 98]	Социјално интерактивна едукација	2008
Kobian [164]	Персонални и асистивни работи	2009
Keepon [91]	Терапија и забава	2009
iRobiQ [73]	Едукација	2010
Leo [28, 30]	Забава (Играње на игра)	2004
Kaspar [76, 45]	Социјален придружник за деца	2005
Minerva [146]	Интерактивен робот: водич на тура	1999
Nao [54, 12, 55, 8, 157]	Едукација, Истражување и Забава	2005
Pepper [54, 38, 17, 40]	Персонален робот	2014
Ipal [77, 34]	Социјален робот	2014
Zenbo [165]	Паметен придружник	2016
iCub [75, 36, 138]	Дете робот	2016
Sophia [63, 149]	Социјален робот со човеколико лице	2017
Buddy [109, 5]	Придружник	2018
Forpheus [125, 3, 129]	Играч на пинг-понг	2018
3E-A18 [65]	Комуникациски робот	2018
Haru [4, 64]	Социјален робот	2018
Nadine [135]	Социјален хуманоиден робот	2019
Eva [58]	Хуманоидно роботско лице	2021

Емоционалните роботи најчесто се социјални работи, кои може да се користат за најразлични апликации. Емоционалните роботи се особено важни за едукативни апликации и апликации за забава каде што емоциите на човекот корисник играат важна улога во интеракцијата човек-робот [84]. Најзначајната примена на емоционалните роботи е да им помогнат на разни категории на луѓе. Еден пример се старите лица, кои често имаат проблеми да ги извршуваат нивните секојдневни активности, како што е на пример да ги земаат нивните лекови [77]. Овие роботи треба да имаат пријателски карактеристики и да бидат повеќе сочувствителни и

емпатични кон своите корисници. Тие треба да можат да ги препознаат емоциите на корисниците и потоа да делуваат соодветно. Овие роботи треба да формираат долгорочен однос со нивните корисници и за таа цел, тие треба да имаат своја личност и карактеристики кои зависат од нивните емоции [41].

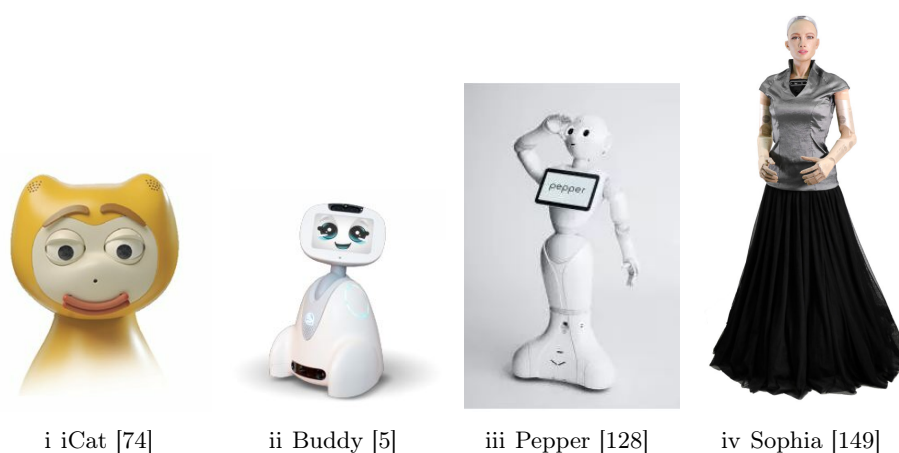
Во втората колона од Табела 2.1 дадена е главната апликација на анализираниите роботи. Историски гледано, во првите години повеќето од емоционалните роботи се создадени само за истражувачки цели, но подоцна популарни стануваат и неколку комерцијални роботи. Комерцијалните роботи означени во Табела 2.1 со сива позадина.

Од сите емоционални роботи кои се создадени за истражувачки цели, некои се создадени за подобро разбирање на луѓето и нивното однесување. Концептот на емоции првпат е споменат во истражувањето за робот Cog [31], чија цел била разбирање на сознанието за луѓето, но емоциите не биле имплементирани кај овој робот. Друг робот, наречен Infanoid [92], е создаден со цел да се разбере социјалниот развој и интелигенцијата кај луѓето. Во предложениот модел креирани се три различни фази за однесувањето на робот. Во првата фаза се добива намерата на роботот, потоа следи фазата на истражување и последна е фазата на интеракција која има социјална анотација [92].

Cat [156] и Sparky [141] се два роботи добиени како резултатот од одделни истражувања за барање на нови интерфејси за интеракцијата со луѓе. Cat е создаден како пријателска машина со изглед налик на животното мачка, додека Sparky е создаден како афективен далечински-контролиран мобилен робот.

Мала група емоционални роботи се создадени исклучиво за да ги испитуваат емоциите и нивните својства. На пример, Eddie, FACE и Felix се создадени за да го истражат емотивното изразување кај роботите, eMuu се користел за испитување на емотивните ликови, а Argan за истражување на емотивната интеракција човек-робот. Еден голем дел од истражуваниите емоционални роботи се создадени за истражување на интеракцијата човек-робот или некој друг тип на интеракција. Ова е разбирливо со оглед на големиот ефект што емоциите го имаат во комуникацијата помеѓу луѓето, т.е. во човек - човек комуникацијата. Подмножеството на роботи создадени за испитување на интеракцијата човек-робот ги вклучува следните роботи: Felix, WE-4R, Argan, Mexi, Maggie, ROMAN, Kismet, Probo, Erwin и Rubi (Табела 2.1). Голем број истражувања, водени од Брезиал, се направени со роботот Kismet. Почнувајќи од 1997 година, Брезиал и нејзиниот тим го креираат овој социјално интелигентен робот. Kismet е робот чие однесување е инспирирано од однесувањето на новородено бебе. Тој може да комуницира со своите т.н. старатели со поедноставената, природна и лице-в-лице социјална интеракција човек-робот [24]. Резултатите од истражувањата спроведени со роботот Kismet се значајни за разбирањето на социјалните карактеристики кај роботите.

Друга група на роботи која користи емоции се насочени кон специфични апликации кои се корисни за луѓето, каде што е потребна уверлива интеракција човек-робот. На пример роботот 3E-A18 е развиен за комуникација со луѓе. Главна карактеристика на овој робот е тоа што е сочувствителен робот [65]. Примери за други специфични апликации се: едукација, асистивни технологии и забава. Емоциите се вклучени во моделите на едукативни роботи како наставници за деца (iRobiQ), асистивни роботи кои можат да им помогнат на луѓето кои се на терапија (Kaspar), на лица со физичка попреченост или пак на постари лица (Keeron, Kobian) и последно во роботи кои можат да се користат за забава (Keeron, Leo). Keeron е специјално дизајниран за истражување на интеракцијата деца-робот, а неговите апликации вклучуваат апликација за забава на децата и



Слика 3: Приказ на дел од анализираните роботи.

за терапија на деца со аутизам [91]. Студијата дадена во [73] покажа дека децата ја подобриле социјалната и образовната перцепција со iRobiQ.

iCat [99] е социјален робот наменет да игра шах (Слика 2.3i). Forpheus е уште еден робот кој има специјална апликација. Името, овој робот е играч на пинг-понг кој може да игра и да се натпреварува со луѓе. Роботот може да се обиде да го разбере расположението на противникот и да го предвиди неговиот/нејзиниот следен потег [3]. Последно, Minerva е интерактивен робот кој „работи“ како водич кој има за цел да привлече повеќе луѓе, да им презентира информации и да ги води низ турата [146].

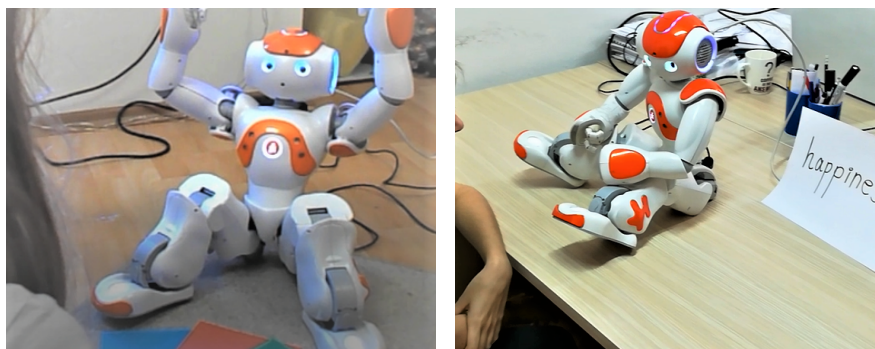
Kaspar е дизајниран да го користат деца со аутизам и други комуникациски тешкотии. Намената на овој робот е да биде социјален придружник за овие деца, со цел да им го подобри животот [76]. Kaspar се користи во разни студии кои истражуваат игри потпомогнати од роботот и терапија на децата со аутизам. Во полето на истражувањата водени со Kaspar се вклучени и темите на развојна роботика, комуникација со гестикација како и развој и учење. Денес Kaspar, како дел од проектот „Smart Project“ се користи во болници за терапија на деца со аутизам за да се стимулира социјалната интеракција и да се надминат предизвиците за интеракција [148] (Слика 2.4i). Како дел од проектот Babyrobot EU "Хоризонт 2020", Kaspar се користи како основа за создавање на робот кој може да комуницира со неколку деца во исто време. Со употреба на роботи кои имаат повторливо и предвидливо однесување, децата со аутизам би можеле да научат да ги разбираат човечките емоции [133].

Дизајнерите на Honda Research Institute, имале за цел да направат социјален робот кој ќе овозможи долготрајна интеракција човек-робот. За таа цел тие го креирале роботот Naam кој што балансира меѓу очекувањата на луѓето, физичкиот изглед на роботот, цената на роботот и функционалноста на роботот [4].

Група на истражувачки роботи во поново време се посветени на развој на социјални роботи кои ќе можат понатаму да се користат за разновидни истражувања. Такви роботи се роботите iCub и Eva кои се креирани како роботи со отворен код. iCub е хуманоиден робот висок еден метар, со изглед на дете. Овој робот е наменет за разни истражувања во вештачката интелигенција, а целта е понатаму да се користи во разни апликации во клиниките и во индустрија [75]. Eva е хуманоиден робот со човеколик изглед кој може да се користи за разни истражувања за интеракција човек-робот [58]. Дел од истражувањата спроведени со



i Сесија со Kaspar во апликации за терапија на деца со аутизам [148]



ii Сесија со Kaspar во апликации за терапија на деца со аутизам [154]      iii Сесија со Kaspar во апликации за едукација на деца [151]

Слика 4: Визуелен приказ на сесии со роботи.

овие роботи го вклучуваат концептот на емоции [36, 58]. Тука ќе ги споменеме и хуманоидните емоционални роботи Sophia и Nadine. Намената на Sophia (Слика 2.3iv) е да се користи во истражувања за разбирање на интеракцијата човек-робот, како и за апликативна примена на роботот во разни апликации кои овозможуваат услуга или забава [149]. Едно истражување, спроведено во проектот „Loving AI“, е посветено на разбирање на како роботите можат да се прилагодат на корисниците [63]. Дизајнот на Nadine има за цел да овозможи роботот да има природно однесување кое наликува на човековото однесување во најразлични секојдневни ситуации. Меѓу можните апликации на роботот Nadine се помагање на лица со посебни потреби или улога на персонален тренер кој е секогаш достапен [11].

Посебна група на роботи според нивната апликација се комерцијалните роботи. Комерцијалните роботи iRobiQ и Minerva имаат специјални апликации како едукатор и како „водич“, соодветно. Од 2008 година роботот Nao стана достапен за јавно користење. Оттогаш, Nao се користи во разни апликации, особено за забава и едукација. Емоциите како концепт се користени во дел од апликациите развиени за роботот Nao, иако овој робот нема вграден концепт на емоции. Во нашите претходни истражувања креиравме апликации на Nao насочени кон терапија за деца со аутизам [154] и образование за деца [151] (Слика 4). Perre е развиен од SoftBank во 2014 година како емотивен робот кој има вградени функции за препознавање на емоции (Слика 2.3iii). Првенствено е наменет за комерцијална употреба, но исто така се користи и за истражувања. Проектот Perre има за цел да собира и складира роботски апликации и да ги обезбедува на други

корисници. Некои од овие апликации ги користат вградените функции за емоции. На пример во [17] Perreer се користи како образовна алатка за деца. Различни образовни концепти биле имплементирани во едукативната апликација, каде што децата учат од демонстрациите на Perreer преку извршување на инструкциите и следење на лекциите.

Во последните години создадени се многу комерцијални роботи со емоции. Еден е iPal, социјален робот кој може да биде придружник за деца, постари и други лица, наставник за деца, старател за стари лица, презентер во малопродажба итн. Друг комерцијален робот е новиот паметен придружник Zenbo, кој го разви ASUS во 2016 година [165]. Може да се купи за цена од околу 600 долари. Zenbo има палета од карактеристики на паметен придружник, а меѓу нив има дел кои го користат концептот на емоции.

Во поново време се појавува и комерцијалниот робот Buddy (Слика 2.3ii) креиран од Blue Frog Robotics кој наоѓа примена како роботски придружник кој има за цел да се грижи за корисниците и да им го олесни животот [5]. Специјални апликации на роботот Buddy вклучуваат апликации за едукација, социјализација, грижа за постари лица, а можни се многу други апликации користејќи ја платформата за развој [5].

Покрај апликацијата на емоционалните роботи, предмет на интерес ни се и други карактеристики на современите емоционални роботи. Има повеќе трудови во литературата каде се резимираат наодите од областа на роботиката каде се вклучени емоциите.

На пример, резиме на моделирање на емоции за роботи е дадено во [127], а разни пристапи за вклучување на емоции во роботски модели се опишани во [32, 83]. Некои прегледи се фокусираат на анализа на само еден посебен аспект во користење на емоциите во еден роботски систем. Прегледот во [108] ги истражува темите поврзани со препознавање на емоции, додека [127, 18] се фокусира на изразувањето на емоции. Постојат истражувања каде се анализирани својствата на роботите со емоции во интеракција човек-робот [60] и во долгорочна интеракција [97].

Во продолжението во Поглавје 2.3 ќе ги претставиме карактеристиките на емоциите од три различни аспекти:

- Како емоциите се претставени кај емоционалните роботи? (Поглавје 2.3.1)
- Кои се улогите на емоциите кај емоционалните роботи? (Поглавје 2.3.2)
- Кое е значењето на емоциите врз емоционалните роботи? (Поглавје 2.3.4)

### 2.3.1 Претставување на емоциите кај емоционалните роботи

Во овој дел ќе се дискутира за претставувањето на емоциите кај сите анализирани емоционални роботи. Кај најголем дел од анализираниите роботи се користи категорискиот начин на претставување на емоции, со што емоциите се претставени преку соодветни емоциски категории или состојби. Кај неколку истражувања се користи непрекинатиот простор за претставување на емоции, меѓу кои има и такви кај се користат двата начини за претставување на емоции.

На Табелата 2.2 е дадена листа на роботи, т.е. истражувања, каде се користи категорискиот начин на претставување на емоции. За секој робот дадена е листата на емоциски категории во третата колона. Во табелата направено е подредување на истражувањата според бројот на категории на емоции кој е даден во првата колона.

Изборот на тоа кое множеството на емоциски категории ќе се користи во дадено истражување е сложено, имајќи предвид дека изборот не е единствен. Следните елементи влијаат врз изборот на емоциските категории:

- Примената на емоциите во роботскиот модел
- Физичкиот изглед на робот (тело, сензори)
- Апликацијата на робот

Бројот на емоциски категории кај анализираниите емоционални роботи е од 3 до 24. Кај најголем дел од роботите емоциите во роботскиот модел ги претставуваат емоциите кои може роботот да ги изрази. Ова е поврзано со примената на емоциите во роботска емоционална експресија. Повеќе за ова ќе биде објаснето подолу. За роботите кои имаат емоционална експресија, кои роботски категории ќе бидат земени зависи примарно од физичкиот изглед на роботот со што се поставени ограничувања во експресијата на емоциите. Освен тоа, изборот на роботски категории зависи од апликацијата на роботот и од целите дефинирани за роботот.

Моделите на емоции имплементирани кај Leo, Keeron, Aryan, iPal и eMuu користат три категории кои се различни меѓусебно. Употребата на само три емоциски категории може да се објасни со физичкиот изглед на роботите. Всушност, сите овие роботи се прилично едноставни, па тие не се толку експресивни за да можат да изразат повеќе категории на емоции. На пример, Keeron е робот кој има лик на суштество со минималистички изглед. Целта на едноставниот дизајн е да се овозможи поедноставна интеракција помеѓу роботите и децата. На пример, ваквиот дизајн може да им помогне на децата да ги разберат вниманието и емоциите на роботот [91]. Aryan е роботско лице со само осум степени на слобода кои овозможуваат движење. Тој има крути усни што оневозможува изразување на дел од основните емоции. Изборот на емоциски категории за Leo е направен според неговата апликација. Leo е програмиран да научи една игра, а потоа да ја игра заедно со човек. Емоциските категории: збунетост, беспомошност и разбирање се избрани како корисни во комуникацијата робот-човек при играњето на играта.

Емоцискиот модел имплементиран кај придружникот Zenbo користи 24 различни емоции, т.е. емоциски категории. Ова е најголем број на категории меѓу анализираниите роботи. Од основните емоции на Ekman само емоцијата среќа е вклучена во овие категории. Другите емоциски категории се внимателно одбрани земајќи предвид дека Zenbo е робот кој има изглед на дете. Како резултат на тоа, повеќето емоциски категории претставуваат позитивно обоени состојби. На пример такви се емоциите: искреност, задоволство, гордост. Од друга страна има и негативно обоени емоциски категории како: нетрпеливост, сериозност, загриженост. Една од причините зошто биле користени толку многу категории е фактот дека Zenbo е комерцијален робот-придружник кој може да се користи за најразлични апликации. Роботот Sophia може да изразува околу 15 разни емоционални експресии кои овозможуваат поприродна интеракција [149]. За таа цел покрај основните емоции, роботот може да изрази и состојба на насмеаност, намуртеност, досада и збунетост. Роботот Buddy исто така користи поголема палета од емоциски категории за да ги претстави своите емоции меѓу кои се намуртеност и нерасположение. Роботот може да биде намуртен ако корисникот на му обрнува внимание, или пак да биде нерасположен без посебна причина за тоа [5].

Табела 2.2: Емоциските категории во категориските модели на емоции кај анализираните работи.

Број	Робот	Листа на категории
3	Leo Keeron Aryan Ipal Nao[55] eMuu iCat	Збунетост, беспомошност и разбирање Задоволство, возбуда и страв Изненадување, гнев и страв Среќа, депресија и осаменост Гнев, тага и среќа Среќа, тага и гнев Среќа, тага и изненадување
4	Maggie Minerva Erwin Nao[12] Nao[157] Pepper [38] Pepper [17] Pepper [40]	Среќа, гнев, страв, тага Среќа, неутрална, тага, гнев Среќа, тага, изненадување, гнев Гнев, страв, тага, радост Среќа, тага, гнев, неутрална Радост, тага, гнев, изненадување Радост, тага, гнев и неутрална Среќа, опуштеност, тага, страв
5	Mexi iRobiQ (>5) Kaspar	Среќа, тага, гнев, страв и неутрална Среќа, изненадување, неутрална, разочарување и срам Среќа, неутрална, изненадување, тага, замислен, ...
6	Cat  FACE Feelix Eddie Eva	Задоволство, гнев, nelaгодност, невнимание, страв, изненадување Гнев, гад, страв, среќа, тага, изненадување Гнев, страв, среќа, тага, изненадување и неутрална Страв, гнев, гад, тага, среќа и изненадување Страв, гнев, гад, тага, среќа и изненадување
7	Kobian ROMAN WE-4R iCub Haru	Гнев, гад, страв, среќа, изненадување, тага и збунетост Гнев, гад, страв, среќа, тага, изненадување и неутрална Гнев, гад, страв, среќа, тага, изненадување и неутрална Гнев, гад, страв, среќа, тага, изненадување и неутрална Гнев, срам, љубопитност, кул, опуштеност, досада и восхит
8	Probo  Nao[8] Forpheus [110]	Гнев, гад, страв, среќа, тага, изненадување, неутрална, поспаност Гнев, гад, страв, среќа тага, благодарност, сочувство, љубов стрес, напнатост, возбуда, среќа, опуштеност, досада, тага и занесеност
9	Sparky  Kismet  Nao[112]	Неутрална, среќа, тага, гнев, изненадување, страв, љубопитност, нервоза, поспаност Гнев, гад, страв, радост, тага, изненадување, досада, интерес и смиреност Гнев, гад, среќа, глад, љубов, тага, страв, срам и умор
12	Buddy	среќа, тага, заљубеност, намуртеност, нерасположение, гнев, ...
>14	Sophia	насмеаност, намуртеност, среќа, страв, тага, досада, збунетост, изненадување, неутрална, ...
24	Zenbo	Искреност, среќа, задоволство, гордост, загриженост, ...

Бројот на категории кај другите емоционални работи варира помеѓу 4 и 9. Најчесто се користат некои или сите основни емоции, но понекогаш ова множество е проширено или малку модифицирано за да ги задоволи предизвиците на самата апликација. На пример, ROMAN [70], Probo [48], WE-4R [114, 113] и iCub [36] ги користат сите 6 основни емоции предложени од Ekman [49] (лутина, гад,



страв, радост, тага, изненадување). Но, тие ја користат и неутралната за претставување на состојбата каде што не е присутна ни една емоција. Kismet, покрај основните емоции, користи три дополнителни емоциски категории (досада, интерес и смиреност) [24]. Erwin [41] користи подмножество од четири од основните емоции каде што страв и гад се изоставени. Кај Kobian [164] емоциската категорија збунетост ги надополнува основните емоции.

Роботот Nao, чија цел е да овозможи попријатна долгорочна интеракција, користи емоциски категории кои се разликуваат од основните емоции [64]. Емоциите се прилагодени на неговиот физички изглед, како и на неговата апликација, и вклучуваат состојби како кул и опуштеност. Прилагодување на апликацијата на роботот е направено и за да се дефинираат емоциите кај роботот Forpheus. Имено, кај овој робот чија цел е да игра пинг-понг, се јавуваат емоции значајни за играта како стрес, возбуда и напнатост [110].

Дел од моделите на емоции кај анализираните роботите ги користат и категоријскиот и непрекинатиот простор за претставување на емоциите. ROMAN [70] и Eddie [19] користат тродимензионален простор за да претстават емоциите. Просторот AVS (интензитет - обоеност - став) е применет кај роботот ROMAN, додека просторот PAD (задоволство - интензитет - доминација) кај Eddie. Емоциите на WE-4R се дефинирани со матрица на емоции која пресликува точка од тродимензионален простор со димензии: пријатност, активација и сигурност во една од 7-те различни категории на емоции [114, 113]. Емоционалниот модел имплементиран за FACE [56] ги користи сите основни емоции во категоријскиот простор, додека во непрекинатиот простор користи само две димензии: интензитет и обоеност. Кај ICat [99, 98] дефинирани се само три категории на емоции, а во непрекинатиот простор претставување се користи само димензијата на обоеност.

Кај роботот Forpheus се користи таканаречен кружен модел на емоции [139]. Кај овој модел емоциите можат да се распределат во дводимензионален кружен простор. Во оригиналната верзија на овој модел двете димензии се интензитет и обоеност, но кај моделот имплементиран кај роботот кој игра пинг-понг се користат димензиите „Страв од пораз“ и „Надеж за победа“ [115]. Сите категории на емоции дефинирани за овој робот може да се пресликаат едноставно во дводимензионалната кружна мапа за полесно да се избере следниот потег на роботот.

Бидејќи Nao и Pepper се комерцијални работи, во различни апликации се користат различни модели. Разликата помеѓу Nao и Pepper е тоа што кај Pepper има вграден модел на емоции. Од друга страна, емоционалниот модел за Nao е имплементиран во корисничките апликации. Како што е прикажано на Табелата 2.2, [55] користи 3 емоции, [12] користи 4, додека [112] користи множество од 9 различни емоциски категории. Во [122] се користи тродимензионалниот простор дефиниран со PAD. Емоциониот модел кај Pepper во [38] ги вклучува следните четири основни емоции: радост, тага, гнев и изненадување, додека во [17] неутралната емоција се користи наместо изненадување. Како што е дадено во [40], истражувачите развиле апликација за Pepper, каде што емоциските категории среќа, опуштеност, тага и страв се проектираат во дводимензионалниот простор интензитет-обоеност.

### 2.3.2 Улогата на емоциите во моделите на однесување кај емоционалните работи

Во оваа глава дадена е анализата за тоа која е улогата на емоциите во еден модел на роботско однесување и во кои компоненти од моделот истите може да се користат.

Во нашиот претходен труд, даден во [88], презентирани е таканаречен генерички модел на роботско однесување. Врз основа на овој модел ќе се идентификуваат роботските компоненти каде може да се користат емоциите. Генеричкиот модел на роботско однесување ги содржи следните шест компоненти [88]:

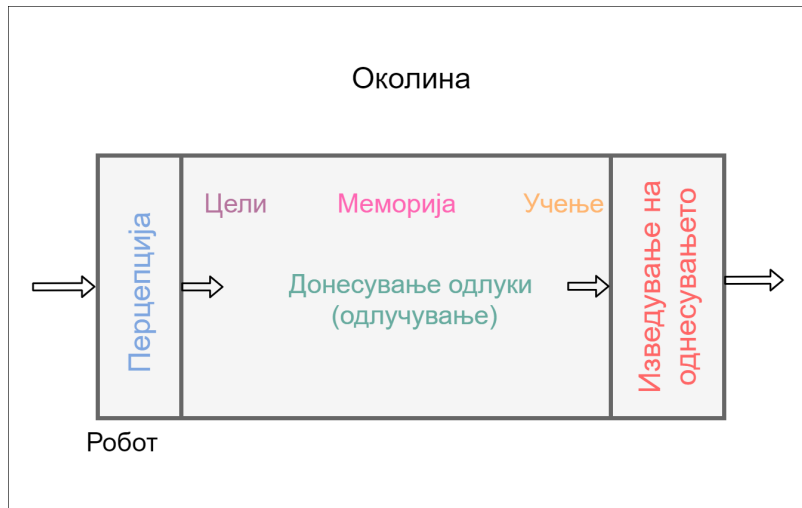
1. перцепција,
2. меморија,
3. цел,
4. донесување одлуки (одлучување),
5. учење и
6. изведување на однесувањето.

Сите овие компоненти се поврзани меѓусебно како што е прикажано на Слика 5. Делот за перцепција (1) како и делот за изведување на однесувањето (6) се лоцирани меѓу околината и „мозокот“ на роботот. Модулот за перцепција (1) ги прима податоците од околината преку сензори, ги процесира и трансформира во валидни информации. Од друга страна, акциите кои се селектираат во „мозокот“ на роботот се изведуваат користејќи го модулот за изведување на однесувањето (6). Акциите се изведуваат со помош на роботските актуатори и ефектори. Овие акции влијаат на околината, а влијаат и на луѓето со кои роботот е во интеракција. Понатаму, луѓето може да ги изразат своите емоции, а човековите емоции може потоа да бидат препознаени од роботот. Со ова се формира таканаречениот афективен круг дефиниран во [127] каде афективната информација тече меѓу роботот и човекот за време на нивната интеракција.

Мозокот на роботот, кој е дел од црната кутија на Слика 5, е процесорот во кој е вметната врска меѓу перцепцијата (1) и изведување на однесувањето (2). Значаен дел од мозокот е делот за меморија (2) во кој се чуваат сите информации потребни за работата на роботот. Кај некои работи е дефинирана целта (3) на робот, што може да се менува во текот на животниот век на роботот. Модулот за донесување на одлуки (4) се наоѓа во центарот на мозокот и има за задача да го избере најдоброто однесување на роботот имајќи ги предвид сите информации од околината, меморијата и зададените цели. Способноста на роботот да учи е овозможено со компонентата наречена модул за учење (5). Овој модул е одговорен за промена во роботскиот модел со што ќе овозможи подобрување на ефикасноста на роботот и ќе го донесе поблиску до остварување на целта.

Кога зборуваме за примена на емоциите во секоја од компонентите дефинирани во генеричкиот модел, секоја компонента може да се разгледува од перспектива на емоциите. Краток опис за можната улога на емоциите во секоја од компонентите е даден следно.

(1) Перцепција : Емоциите може да се користат во афективна перцепција на светот или при перцепција на емоции на луѓе со кои роботот е во интеракција. Емоциите рефлектираат како перцепираните информации од околината влијаат на роботот [163]. На пример, емоциите може да се користат при селекција на значајни информации. Па така, дел од информациите кои доаѓаат од околината може да се игнорираат, додека на некои може да им се даде на поголемо значење. Од друга страна, може да постои и параметар, кој одговара на валентноста (обоеноста) на емоцијата на роботот, кој што ќе се придружи до



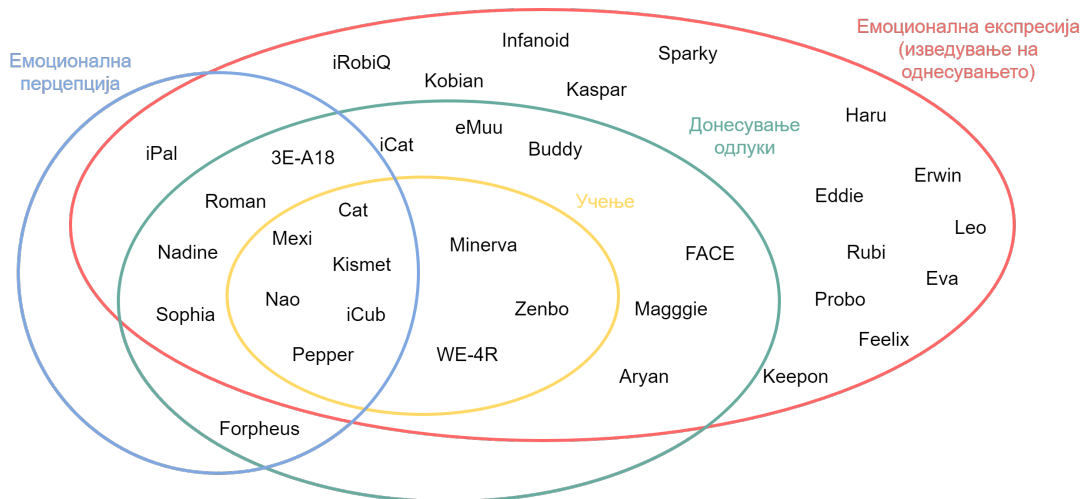
Слика 5: Шематски приказ на црна кутија која претставува генерички модел на роботско однесување.

секоја информација која е добиена од околината. Позитивна валентност може да се придружи до настани или ситуации кои довеле до позитивна емоција кај роботот, додека негативна валентност може да се придружи во секој друг случај. Од аспект на перцепција на емоции, модулот за перцепција може да перцепира емоции кај луѓе или други суштества со кој е во интеракција.

(2) Меморија: Во меморијата на еден робот може да се чува податокот за тековната емоција на роботот, податоците за емоциите на други субјекти со кои роботот комуницира, како и други податоци кои се поврзани со емоции. Емоциите можат да регулираат кои информации со текот на времето треба да останат зачувани во меморијата, а кои можат да се избришат од роботската меморија. Еден податок кој може да го има во роботската меморија е состојба на роботот. Внатрешна состојба ја претставува состојбата на роботот, а надворешна состојба се однесува на состојбата во околината. Емоциите може да се користат за претставување на роботската хомеостатична внатрешна состојба. Според [29], краткотрајната емоционална состојба се нарекува емоција, а долготрајната состојба се нарекува расположение. Да забележиме дека емоциите се основа на расположението.

(3) Цел: Роботот може да има цели од хомеостатична природа. Ваквата цел би значела дека роботот има тенденција да ја подобри својата хомеостатична внатрешна состојба која се базира на емоциите.

(4) Донесување одлуки (Одлучување): Роботите може да имаат емоционално водено однесување. Концептот на емоции може да влијае на одредени реактивни акции на роботот, но и на долгорочна селекција на роботско однесување кое содржи план од акции кои треба да се извршат во даден редослед [29]. На пример, ако роботот е среќен тогаш следната реактивна акција може да биде да се насмеа. Од друга страна роботот може да избере однесување со кое ќе се доближи до остварување на својата цел. Роботот може да донесува одлуки зависно од карактерот на роботот. Под карактер на роботот се подразбираат вродените особини на роботот или пак особини кои роботот ги стекнал во неговиот животен век.



Слика 6: Венов дијаграм на емоционалните роботи поделени во множества кои ги претставуваат дел од компонентите на генерички роботски модел на однесување каде се користат емоции.

(5) Учење: Различните методи за учење можат да бидат под влијание на емоции. Роботот може да учи од наставник користејќи го концептот на надгледувано учење, каде роботот може да учи од совет или со поттикнување од наставникот. Како пример, наставникот може да го поттикне роботот со таканаречен емоционален фидбек, кој претставува евалуација на тековната состојба на роботот или на акциите кои се претходно изведени од роботот [163, 9]. Во ваков пример учителот може да изразува емоција која зависи од тоа каква е успешноста на роботот во процесот на учење. Оваа емоција може да биде протолкувана како емоционален фидбек од страна на роботот [136]. Самоучење на роботот може да биде овозможено преку вградена евалуациска функција која може да ги евалуира емоциите на роботот [22].

(6) Изведување на однесувањето: Преку некои роботски акции директно може да се изразат емоции, додека некои акции имплицитно вклучуваат информации за емоции. Акциите со кои директно се изразуваат емоции се тесно поврзани со изразувањето на внатрешната состојба на роботот која ја сочинува и емоцијата на роботот. Од друга страна, тековната емоционална состојба на роботот може да влијае на тоа како секоја акција, која ја изведува роботот, се извршува. На пример, среќен роботот може да зборува побрзо од робот кој не е среќен. Во овој случај велиме дека емоциите се изразуваат имплицитно во однесувањето на роботот.

Фактот што различни роботи користат емоции во различни делови од генеричкиот модел на роботско однесување е прикажано со Веновиот дијаграм даден на Слика 6. Тука се прикажани три множества кои ги претставуваат главните компоненти: емоционална перцепција (1), емоционална експресија (6) и донесување одлуки (4). Бидејќи помал број на роботи од оние кои се истражувани ги применуваат емоциите во останатите три компоненти, тие не се прикажани на дијаграмот. Следно ќе биде опишано како емоциите се користат во овие компоненти кај анализираниите роботи.

### Перцепција базирана на емоции

Најчесто кај роботите, емоциите се користат при перцепцијата на емоциите кај луѓето [88]. Модулот за перцепција на емоции кај еден робот може да ги препознае емоциите изразени од луѓето со кои комуницира. Оваа карактеристика за перцепцијата е многу значајна за социјалната интеракција бидејќи овозможува роботите подобро да ги разберат луѓето. Примарната цел на модулот за перцепција на емоции е да има висока прецизност. Второто барање да се минимизира времето потребно за перцепција, особено кај социјалните работи кај кои се очекува одговор во реално време во интеракцијата човек-робот [162]. Друга посакувана карактеристика на модулот за перцепција на емоции кај робот, е тој да има поголема автономија [162]. На пример роботот да може автоматски да се прилагоди на перцепцијата, без посебни знаења и активности на корисниците. Моделите за перцепција кои се менуваат во реално време со додавање на нови информации, велеме дека се динамички. За разлика од нив статичките модели не се менуваат по креирање на моделот. Пример за статички модел е даден во [107], а за динамички во [35].

Како што е прикажано на Слика 6 кај неколку од анализираните работи имплементиран е модул за перцепција на емоции. Модулите се разликуваат по сензорите што се користат за собирање на податоците кои се користат за перцепција. За препознавање емоции што се користи во апликација која вклучува интеракција човек-робот, потребни се неинвазивни техники за добивање на податоци за околината. За тоа стандардни сензори се камера и микрофон, но се користат и други, како на пример, тактилен сензор и инфрацрвен сензор. Од друга страна, сензори кои снимаат сигнали од човековиот мозок кои се добиваат со инвазивни техники не се користат. Визуелни сигнали или слики се добиваат користејќи камера како сензор, додека звучни сигнали се добиваат со микрофони. Од сировите податоци кои се добиваат од сензорите можат да се извлечат многу значајни карактеристики кои понатаму можат да се користат за препознавање емоции. Кај разгледаните работи се користат податоците за слика, звук и притисок. Во нашето претходно истражување го споредивме користењето на визуелните и звучните податоци во моделите за класификација на емоции [89] и покажавме дека користењето на двата извори ја подобрува прецизноста.

Во најголем дел од случаите, како влезни податоци за перцепција на емоции се користат визуелни карактеристики извлечени од необработените слики. Во [150] даден е преглед на модели за афективна перцепција врз основа на одот и ставот на телото. Овие модели се во рана фаза на развој и резултатите кои се добиени се со помала точност [150]. Подобра точност се добива користејќи карактеристики на фацијалната експресија, т.е. изразите на лицето. Како резултат на тоа, кај роботските модели, овие податоци најчесто се користат за откривање на емоции на актерите во околината на роботот. Понекогаш визуелните податоци може да се комбинираат заедно со звучни податоци за да се подобри перцепцијата на емоциите. Притисокот или тактилните сензори може да се користат за да се почувствува физичката интеракција помеѓу човекот и роботот. На пример, робот Cat користи тактилен сензор во комбинација со сензор за звук и сензор за став за да ги „почувствува“ луѓето во својата околина [156]. Студијата презентирана во [8] ги покажа можностите за перцепција на емоции преку информации за физичка интеракцијата човек-робот кои се добиваат преку сензори за допир. Резултатите покажуваат дека информациите од физичката интеракција може да се користат за да се направи разлика помеѓу позитивните и негативните емоции, а и дека отфрлањето и прифаќањето може да се класифицираат врз основа на допир [8].

Во трудовите [152] и [157], роботите ROMAN и Nao ја класифицираат човечката емоција користејќи на влез визуелни човечки карактеристики. И двата работи имаат камера како сензор со која тие добиваат визуелни податоци од околина. Перцепцијата на емоции имплементирана во ROMAN го користи „Системот за кодирање на акција на лице“ (Facial Action Coding System, FACS) [152] за претставување на значајни визуелни карактеристики. Во FACS се предлага листа на таканаречени акциски единици (action units, AU) специфични за човечкото изразување на емоции на лицето. Имено, акциски единици се движења на лицето идентификувани кај луѓето. Постојат околу 46 основни акциски единици, а вкупниот број е речиси 100. Примери за акциски единици се: подигнување на образот или извлекување на краевите на усните. Во процесот дефиниран во [152], прво се откриваат позициите на некои карактеристики на лицето, како што се позициите на очите, устата, итн. Врз основа на овие позиции, се откриваат акциските единици кои се користат за класификација на емоцијата. Во [157] имплементиран е алгоритам од пет фази кој овозможува евалуација на човечката емоција. Човечкото лице е детектирано користејќи го алгоритмот Viola-Jones, а потоа се пресметуваат важни мерења на растојанијата меѓу специфични точки на лицето и за опис на движењата на мускулите на лицето. Слично како кај истражувањето со ROMAN, FACS се користи за да се дефинираат мерењата чии пресметки се користат како влез за класификација на емоции. Притоа, класите на емоции се: среќа, тага, лутина и неутрална емоција. Ова истражување има голема прецизност од над 90% за класификацијата на емоции, за разлика од [152] каде што среќата, тагата и изненадувањето се точно детектирани во само 60% во случаите.

Во едно истражување спроведено со роботот iCub креиран е роботски модел на однесување чија цел е роботот да научи да изразува емоции преку интеракција човек-робот [36]. Учењето е овозможено користејќи слика како влезен податок, врз база на која се одредува емоцијата на лицето со кое роботот е во интеракција. Имено, од сликата прво се извлекуваат најзначајните карактеристики со помош на невронска мрежа, кои потоа се користат како влез во модел на SOM од каде се одредува емоцијата [36]. Моделот на SOM го пресликува влезот во мапа поделена во кластери кои ги претставуваат седумте дефинирани емоциски категории.

Во апликацијата креирана за роботот Kismet, афективната намера на негувателот се перцепира врз основа на акустичните информации добиени од говорот [27]. За откривање на емоции на роботот Perrege, во истражувањето [17], како влезни податоци се користат аудио сигналите. Во [17] Perrege е програмиран како емпатичен робот кој може да препознае емоции и да ја користи таа информација за да го избере најдоброто однесување за време на интеракцијата што вклучува сценарија како хумор, преговори и квиз. За секој аудио сигнал снимен за време на говорот на корисникот се препознава онаа емоција која е препознаена во најголем број на сегменти на дадениот сигнал. За класификација на звучните дескриптори добиени за секој сегмент се користат „Машини со поддржувачки вектори“ (Support vector machines, SVM). Класите на емоции се: радост, тага, лутина и неутрална емоција [17]. Звучните дескриптори се вредности кои се пресметани за даден сегмент од звучните сигнали дадени во фреквенциски, амплитуден, временски или пак спектрален домен.

Mexi (Machine with Emotionally extended Intelligence) е роботска глава која има камера и микрофон како сензори и користи комбинирани податоци од изразот на лицето и говорот за да ги препознае човечките емоции [10]. За да се изберат најзначајните карактеристики за препознавање на емоциите користена е фазна логика.

Хуманоидните работи Sophia и Nadine ја перцепираат околината од повеќе аспекти. Роботот Sophia може да ги следи лицата на луѓето, може да ги препознава движењата на луѓето и нивните емоции. Модел на длабоки невронски мрежи се користи за перцепција на емоциите на луѓето врз база на изразот на лицето и боја (тоналитетот) на гласот [63]. Nadine може да ги препознае објектите во околината, а може и да препознае кое е лицето со кое е во интеракција, која е неговата позиција, што зборува, кои акции ги изведува и која е неговата емоционална состојба [135]. За таа цел користи 3D камери, веб камери и микрофон како сензори.

Поради специфичната апликација на роботот Forpheus да игра пинг-понг, во модулот наречен "Анализатор на светот" (World Analyzer) [115], се одредува тековната емоционалната состојба на соиграчот претставена во претходно дефиниранiot кружен модел на емоции. На влез се користат информации како што се статусот на играта, минатите акции во играта како и нивото на фрустрација и вештините на соиграчот [110].

Кај комерцијалните работи, Pepper [38] и iPal [77], има вграден модул за откривање на човечките емоции. Познато е дека и двата имаат различно множество сензори со кои ја набљудуваат околината. И двете имаат камера, микрофон, сензор допир и други сензори од кои се извлекуваат податоците.

Во истражувањето дадено во [8] анализирано е како треба да се дизајнира робот, каков што е Нао, опремен со тактилни сензори кој ќе дадат значајни информации за изразувањето на човечката емоција преку допир. На пример, иако Нао има 7 тактилни сензори, не е поставен сензор врз неговите раце, а студијата покажа дека рацете најчесто се допираат при изразување на емоции.

Покрај тоа што во делот за перцепцијата роботот може да ги препознава човечките емоции, емоциите можат да влијаат врз перцептивните податоци за околината добиени од сензорите [163]. Емоциите може да се користат и за да се направи селекција или означување на податоците од сензорите кои роботот ќе ги сочува или процесира. Овој концепт е применет во моделот за Kismet каде што информациите за човечката афективна намера се комбинирани со емоционалниот контекст, емоционалната состојба на робот и другите перцептивни карактеристики [27].

#### Експресија базирана на емоции

Модулот за изведување на роботското однесување е одговорен за контрола на активаторите на роботот: мотори, звучници, LED светла, дисплеи, итн. Контролата на роботот се базира на акциите кои се селектирани во „мозокот“ на робот. Влијанието на емоциите во овој модул главно доаѓа од влијанието на емоциите во изведувањето на роботските акции. Поимот емоционална експресија се користи за опишување на изведувањето на роботски акции под влијание на емоциите. Емоционалната експресија може да биде изразена преку изразот на лицето, движењето на телото, гестикациите, гласот и говорот. Бидејќи кај луѓето, изразот на лицето е најизразен начин на прикажување на емоциите, тоа се очекува и кај роботите, а особено од оние што имаат изглед сличен на човекот. Да забележиме дека роботите не треба да ги доживуваат емоциите на ист начин како луѓето. Наместо тоа роботот може да делува како да ги доживува емоциите, така што ќе ги изразува емоциите за да можат да бидат препознаени од луѓето [32]. Ова е особено значајно за социјалната интеракција човек-робот.

Во повеќето студии емоционална експресија е експлицитна. Пример за експлицитна емоционална експресија е роботската акција: насмевка, со која роботот ја

изразува својата среќа. Покрај експлицитната емоционална експресија, постои и имплицитна експресија базирана на емоции. На пример, среќен робот комуницира повеќе со деца, а несреќниот е потивок. Во овој пример, емоцијата имплицитно е вклучена во изборот на роботската акција и во интензитетот на изведување на акцијата.

Меѓу анализираните роботи, голем дел ги користат емоциите единствено во модулот за роботско однесување за емоционална експресија. Како што е прикажано на Слика 6 примери на вакви роботи се: *Feelix*, *Eddie*, *Leo*, *Kobian*, *Infanoid*, *Keeron*, *IRobiQ*, *Probo*, *Rubi*, *Sparky*, *Kaspar* и *Erwin*. Едно истражувачко прашање кое се поставува кога се моделира роботски модул за однесување е како роботот ќе ги изразува емоциите. Емоционалната експресија на еден робот главно зависи од:

- Апликацијата на роботот
- Физичкиот изглед на роботот (телото, актуаторите)
- Типот на интеракција човек-робот

Табела со краток опис на физичкиот изглед на анализираните роботи кои изразуваат емоции е дадено на Табела 2.3.

Целта на истражувачите е да го изберат најдобриот начин на кој роботот ќе изразува емоции, така што луѓето ќе можат добро да ги препознаваат изразените роботски емоции и роботите ќе бидат прифатени од луѓето. Емоционално однесување всушност треба да ја зголеми уверливоста на роботот. Емоционалната експресија може и да ја подобри невербалната комуникација човек-робот, бидејќи овозможува пренос на социјални информации од роботот кон човекот. Еден значаен проблем кој може да произлезе од емоционалното роботско однесување е порастот на приврзаноста на луѓето кон овие роботи. Ова е особено важно за децата кои можат да создадат силна врска со роботите што на долг рок претставува проблем. Овој проблем треба да се има предвид секогаш кога роботот се користи во апликации за интеракција човек-дете.

Како што може да се забележи на Табела 2.1 повеќето апликации со роботите се користат во истражувања за интеракција човек-робот или дете-робот. Дел од апликациите се фокусираат директно на емоционалната експресија како дел од самата интеракција. На пример *Felix* е создаден со цел да може да се анализира емоционалната експресија при социјална интеракција [33]. Роботите *Eddie* [19] и *FACE* [56] исто така се користени за истражување на емоционалната експресија.

Истражувачите на *FACE* се фокусираа на испитување на роботската емоционална експресија на нивниот андроид кој има пасивно тело и лице како на човек. Потрагата по нов интерфејс човек-компјутер што е мобилен, социјален и поддржува афективна комуникација, доведе до развој на мобилен телескопски робот наречен *Sparky* [141]. Овој робот изразува емоции со цел остварување на социјална интеракција со луѓето. *Sparky* [141] претставува едноставен карактер кој изразува емоции со комбинирање на овие три модалитети: израз на лице, движење и звук. За разлика од него, *Feelix*, *Eddie* и *FACE* може да изразуваат емоции само преку нивниот израз на лице. Сите горенаведени модели за емоционална експресија го користат познатиот „Систем за кодирање на акција за лице“ (*FACS*) за да ги најдат најпогодните акции за изразување на секоја од моделираните емоции. Покрај горенаведените роботи, системот *FACS* се користи и за изразување на емоции на лицето на роботот *Eva* [58].

Во моделот за експресија кај *Feelix* направена е најдобра апроксимација на акционите единици дадени во *FACS* со што се дефинираат акциите на роботот за



Табела 2.3: Листа на емоционалните работи и краток опис на нивниот физички изглед.

Робот	Физички изглед
eMuu	Голема роботска глава со едно око
3E-A18	Едноставен карактер со дисплеј за лице
Haru	Ненаметлив карактер со големи очи
Keepon	Робот со изглед на мало жолто суштество
Sparky	Едноставен мобилен карактер
Maggie	Мобилна кукла налик на девојче
iRobiQ	Возилен робот со лице налик на играчка
Zenbo	Мобилен робот налик на играчка
Buddy	Мобилен робот налик на играчка
Leo	Робот налик на животно
Cat	Мачка-робот
iCat	Мачка-робот
Probo	Милениче-робот налик на животно
Argan	Роботско лице
Eddie	Роботска глава
Mexi	Роботска глава
FACE	Живолик андроид
Erwin	Едноставна роботска глава
Kismet	Артикулирана глава
ROMAN	Хуманоидна глава
Minerva	Мобилен робот со лик налик на човек
Feelix	Поедноставен хуманоиден робот
Kobian	Хуманоиден робот со две нозе
Kaspar	Робот со лик налик на дете
iCub	Робот со лик налик на дете
Nao	Хуманоиден робот
Ipal	Хуманоиден робот
Pepper	Мобилен робот со глава и тело
Eva	Хуманоидна глава
Sophia	Хуманоиден робот
Nadine	Хуманоиден робот

изразување на сите 6 моделирани емоции. Апроксимацијата е направена имајќи предвид дека Feelix има само две веѓи и две усни кои можат да се контролираат [33]. Eddie [19] исто така го користи FACS за да ги дефинира акциите врз база на тринаесетте акциски единици дефинирани за моделираните емоции. Покрај тоа, некои карактеристики кои ги имаат животните се интегрирани во роботското однесување. За изразување на основните емоции на роботот Eva користени се само најнеопходните акциски единици дадени во FACS. Всушност избрани се 12 акциски единици кои се пресликуваат во соодветни движења на маската на лицето, а покрај нив избрани се и акциски единици за движење на очните капади, вилицата и јаболчниците [58]. Покрај тоа што за секоја од основните емоции се дефинирани соодветните роботски акции, роботот може да изрази и комбинација од основните емоции. На пример, роботот може паралелно да ги изрази емоциите среќа и изненадување.

FACE го користи системот за анимација на лице HEFES (хибриден мотор

за синтеза на изрази на лицето, Hybrid Engine for Facial Expressions Synthesis) за да ги контролира сите мотори за израз на лицето [56]. Изразите на лицето за секоја од шесте основни емоции предложени од Ekman се предефинирани според акциските единици дефинирани во FACS, но системот овозможува генерирање на нови изрази на лицето за различни емоции. FACE може да ги направи „природни“ акции користејќи 32 мотори на лицето. Секој нов израз на лицето се поврзува со точка во просторот интензитет-обоеност. Со ова се овозможува побогато изразување на емоциите на лицето. За дадена точка во просторот интензитет-обоеност се прави интерполација за да се пресметаат соодветните движења на лицето. Ако има конфликти при пресметување на движењата, тие се решаваат во модулот за анимација [56].

Сличен пристап за контрола на изразувањето на лицето се користи и во имплементацијата на роботското однесување кај роботот Eddie [19]. За дадена точка во тродимензионалниот простор PAD, кој ги вклучува димензиите задоволство, интензитет и доминација, контролорот ги враќа внатрешните координати на зглобовите за сите мотори. Пресметките се прават користејќи интерполација, имајќи предвид дека се познати внатрешните координати кои роботот треба да ги достигне за изразување на избраните 13 акциски единици [19]. Овој пристап покажа дека може да има различни роботски изрази за истата емоција. Ваквите изрази носат повеќе семантички вредни информации со што се подобрува изразувањето, т.е. експресијата, на емоциите [19]. Евалуацијата на емоционалното изразување на Eddie [19] покажа висока стапка на препознавање на емоцијата тага, но сепак другите емоции се препознаени од луѓето во најмногу 50% случаите.

Кај роботот Felix вграден е посложен контролен механизам. Попрецизно, постои директна врска помеѓу сензорските податоци од модулот за перцепција и координатите на моторите од модулот за изведување на однесувањето. На фиксни временски интервали се анализираат податоците од тактилните сензори, а потоа се доделува ниво на интензитет за секоја емоција. Моделот за активација на емоции вграден во Felix е направен врз основа на 5 правила кои ја опишуваат активацијата во различни сценарија. Моделот е имплементиран како временски конечен автомат [33]. Емоцијата со највисок интензитет е емоцијата на роботот која тој ја изразува. Анализата во [33] покажа дека лутината, среќата и тагата изразени од Felix се полесно препознаени од луѓето.

Кај социјалните емоционални работи, особено е важен физичкиот изглед на роботот бидејќи изгледот има големо влијание врз општествените очекувања во интеракцијата човек-робот. Како луѓето можат да комуницираат со роботот зависи од физичкиот дизајн на робот [60]. Студијата во [60] укажа дека "роботот мора да поседува одредена количина на човечност" за да има пријатна социјална интеракција со луѓето. Еден од најголемите предизвици за создавање емоционални работи, како што е наведено во [127], е отелотворувањето на емоциите. Нови тела, може да доведат до нови концепти за емоционално изразување. Ако го набљудуваме физичкиот изглед на роботите испитани во рамките на оваа докторска работа (Табела 2.3) може да забележиме дека постојат некои работи кои немаат човечки физички изглед. Имено, има и работи кои имаат изглед на играчки или на животни.

На пример eMuu [15] има облик на голема глава, 3E-A18 [65] е карактер со статичко тело и глава со дисплеј на лицето, Nao [4] има облик на глава со две големи очи, Spraky [141] е едноставен мобилен робот, Keeron [91] е робот со лик на суштество, Maggie [140] е робот со лик на кукла, Leo [30] и Probo се работи кои личат на животни. Како сите овие работи ги изразуваат емоциите е производ на имагинацијата, бидејќи овој вид на ликови не се присутни во реалниот живот и

ние немаме информации за тоа како треба да изразуваат емоции. Главната цел на истражувањата за емоционално изразување кај сите овие роботи е роботската експресија на емоции да биде правилно толкувана од луѓето. Во повеќето случаи за оваа цел направени се експериментални испитувања. Испитаниците во експериментите прво комуницирале со роботот, по што одговориле на прашалникот во кој се проверува колку тие умеат да ги разберат изразените емоции на роботот.

Насоките за емоционално изразување кај роботите кои личат на луѓе, кои се познати како антропоморфни роботи, се тие да наликуваат на експресијата на емоции кај луѓето. Токму затоа кај овие роботи најчесто емоциите се изразуваат на лицето на роботот и во вербалната комуникација. Други начини на изразување може да се искористат за да се подобри експресијата на емоции [18]. Неколку примери за други начини на изразување на емоциите се: движење на телото, став на телото и гестикулации на телото.

Во следните делови накратко ќе ги опишеме карактеристиките на анализираниите роботи категоризирани според физичкиот изглед: роботи со лик на играчки, роботи со лик на животни, роботи со лик на човечка глава и хуманоидни роботи (Табела 2.4).

Табела 2.4: Поделба на роботите кои изразуваат емоции според четири категории на физички изглед.

Роботи со лик на играчки	Роботи со лик на животни	Роботи со лик на човечка глава	Хуманоидни роботи
eMuu	Cat	Erwin	Feelix
3E-A18	iCat	Minerva	Kobian
Haru	Probo	Eddie	iCub
Keepon	Leo	Aryan	Kaspar
Sparky		Mexi	Nao
Maggie		Kismet	iPal
iRobiQ		Roman	Pepper
Zenbo		FACE	Sophia
Buddy		WE-4R	Nadine
		Eva	

Роботи со лик на играчки. eMuu [13] има некои карактеристики на доенче како голема глава, големи очи и тркалезна форма. На физичкиот дизајн додадени се и една усна и една веѓа со што се овозможи емоционална експресивност. Поради својот едноставен дизајн, eMuu може да изрази само 3 емоции. Дизајнот на роботот 3E-A18 овозможува богата фацијална експресија на дисплејот, но и експресија на емоции преку звуци и движење [65]. Кеерон има и глава и тело и е малку покомплексен од eMuu. Има неколку емоционални акции кои претставуваат специјално дизајнирани движења на телото. Овие акции се изведуваат кога роботот ќе дојде во една од своите состојби: задоволство, возбуда и страв [91]. Роботот со лик на кукла е роботот Maggie [140]. Таа може да изрази емоции преку изрази на лицето, но исто така и преку движењето на телото и раката. Дури и со едноставниот физички дизајн, експерименталните резултати кај овие роботи покажаа добри резултати во однос на успешноста човекот да ги разбере изразените емоции. Резултатите за истражувањето со Кеерон покажаа дека децата над 2 години мислат дека тоа е социјален робот со кого можат да комуницираат [91]. Дури и децата со аутизам може да го разберат социјалниот

аспект на неговото однесување и забележано е дека по интеракцијата со Кеерон овие деца биле мотивирани да ги споделат своите ментални состојби со другите [91]. Експерименталните резултати покажале дека невербалните емоционални информации на Maggie се значајни за да може луѓето да ја разберат емоцијата на роботот [140]. Резултатите во студијата спроведена со Sparky [141] покажале дека испитаниците "уживаа во интеракција со Sparky". Тие го гледале роботот како милениче или како мало дете, со што Sparky ја остварил својата цел да биде социјално ангажиран со луѓето. Децата биле поактивно вклучени во интеракцијата со Sparky. Но, сите луѓе имаа позитивен впечаток од роботот Sparky, бидејќи сите го имитирале и разговарале со роботот.

Надворешниот дизајн на роботот Nao бил дефиниран со итеративен процес кој започнал инспириран од разни анимирани ликови. Дадено било ограничување да се креира робот кој не наликува целосно ниту на човек ниту на животно. Имено, значајно било да се дизајнира робот за кој луѓето нема да имаат преголеми очекувања, што би се случило кога роботот многу наликува на човек. Всушност, целта во дизајнот е креирање на робот кој ќе биде интересен за интеракција со луѓето и со тоа ќе овозможи успешна долгорочна интеракција човек-робот. Финалниот дизајн на Nao има само пет степени на слобода кои овозможуваат движење на очите и телото. Покрај тоа има и лед светилки кои се значајни за емоционалната експресија. За дефинирање на емоционалната експресија бил спроведен експеримент каде 50 луѓе глумеле различни емоции преку фацијална експресија и преку говор на тело. Ликовни уметници ги превеле овие експреси во цртежи од експреси кај роботот Nao, според што се дефинирани акциите за експресија на емоции кај роботот [4]. Евалуацијата на експресивноста на Nao покажала дека луѓето лесно можат да препознаат кога роботот ги изразува емоциите на среќа, тага и гнев [64].

iRobiQ, Zenbo и Buddy се комерцијални возилни работи кои изразуваат емоции. Првиот е поедноставен робот со дисплеј и светла на лицето кои се користат за изразување на емоции. Zenbo е посостигнат робот со топчеста форма на торзото, со врат и глава на која има екран осетлив на допир. Овој робот може да изрази 24 различни емоции главно на екранот чувствителен на допир, но емоциите се пропагираат и преку неговите движења [165]. Роботот Buddy има сличен изглед на Zenbo. Тој има мобилно торзо со кое може да се движи на три тркала, подвижен врат и глава со екран осетлив на допир. Покрај тоа има и лед светилки на главата и рамениците. Роботот ги изразува емоциите преку екранот на лицето, лед светилките и моторите на тркалата и вратот [5].

Работи со лик на животно. Два од роботите со лик на животно се работи со лик на мачка. Овие работи сепак имаат различна апликација. Роботот Cat [156] е робот кој изгледа и се однесува како мачка, а чија цел е да се биде сакан од луѓето со кои има пријателска комуникација. Врз основа на идентификуваните емоции и желби, генераторот на однесување избира едно однесување од кое зависат следните акции на моторите. Од друга страна, iCat [99] е социјален робот кој игра шах со човек. Покрај стандардната процедура за шаховска игра, однесувањето на роботот е збогатено со експресија на неговите емоции. Покрај емоциите, и расположението е вградено како елемент во моделот на iCat. Ова ги збогатило афективните способности на роботот [32]. Модулот за анимација е одговорен за однесувањето на телото на роботот iCat. Повисокиот приоритет имаат емотивните реакции, а помал имаат реакциите кои го изразуваат расположението. Експресијата на лицето за секоја од 9-те емоции е преддефинирана. Расположението на роботот зависи од обоеноста на емоционалната состојба. Степенот

на изразување на расположението се пресметува со интерполација помеѓу крајните вредности кои се предефинирани за обоеноста во негативна и позитивна насока.

Обоеноста кај iCat зависи од резултатот од играта. Имено, кога има добри резултати од играта вредноста за обоеноста е поголема, додека лошите резултати даваат помали негативни вредности за обоеноста. Доколку не се потребни емотивни реакции, роботот извршува некои предефинирани акции за неактивност. Резултатите дадени во [99] покажуваат дека емотивното однесување ја подобрува перцепцијата на корисникот за играта и дека корисниците правилно го толкуваат роботското емотивно однесување.

Бидејќи Probo [48] се користи како придружник на деца, тој има посебна карактеристика да ги изразува емоциите на лицето кое има подвижни очи, уши, уста, сурла и врат. Сензорите што ја чувствуваат физичка интеракција на човек со робот даваат информации за емоциите што роботот треба да ги изрази. На пример роботот ќе биде лут ако неговата сурла е затегната. Во овој случај, реактивното роботско однесување ги поврзува информациите од сензорот со емоциите што се изразуваат со предефинирани акции. Евалуација на експресивноста на изразите на лицето е дадена во [48]. Резултатите покажале дека испитаните лица ги препознаваат емоциите на Probo во високи 84% од случаите.

Роботи со лик на човечка глава. Постојат неколку роботи кои имаат изглед на човечко лице или глава. Сите овие изразуваат емоции со израз на лицето. Листата на овие роботи е дадена на Табела 2.4 и тие се наредени според комплексноста на нивниот физички дизајн (од наједноставниот до најсложениот дизајн).

Роботот ERWIN (Emotional Robot with Intelligent Network, Емоционален робот со интелигентна мрежа) [41] е креиран на Универзитетот во Линколн како едноставен робот со облик на глава и само шест степени на слобода. Во 2003 креиран е друг едноставен робот наречен Агуан [116] со осум степени на слобода. Тој користи фази логика за претставување на емоционалната состојба и користи множество од фази правила за пресликување на емоциите на роботот во карактеристики на неговото лице. Секое правило ја дава врската помеѓу векторот со фази компоненти дефинирани за секоја емоција и контролен вектор со вредности за секој степен на слобода [116]. На пример можни вредности за контролата на вилицата на Агуан можат да бидат: многу отворена, отворена, помалку отворена и затворена.

Дизајнот на ROMAN [70] и позицијата на сите подвижни делови на главата на овој робот се избрани врз основа 20 акциски единици кои се имплементирани во дизајнот. Избраната емоција влијае имплицитно и експлицитно врз однесувањето на роботот. Поточно, сите акции кои роботот ги извршува се прилагодени на емоциите на робот, додека емоциите експлицитно се изразуваат на лицето [70].

WE-4R е робот кој се состои од глава и торзо и има 47 степени на слобода што даваат одлични можности за изразување на емоции. Овој робот може да ги изрази своите емоции со преку изразот на лицето, но исто така и преку движења на торзото и рацете [53]. За седумте дискретни емоции однапред се генерирани шеми за емоционално изразување, а потоа од овие шеми извлечени се повеќе различни изразувања [53]. Интензитетите на основните емоции се дефинирани како променливи кои ја опишуваат разликата во интензитетот на соодветната емоција во однос на неутралната емоција. Овие интензитети се користат за да се пронајде состојбата на роботот. Генерирањето на движењето на роботот при промена од една во друга емоционална состојба е дефинирано со диференцијални

равенки. Брзината на движењата направени од страна на робот исто така зависи директно од емоцијата на роботот [53].

Покрај изразувањето на емоции преку изразот на лицето, роботите Mexi [10] и Kismet [24] ги изразуваат емоциите преку нивниот говор. Mexi [10] има 15 степени на слобода со кои се контролираат актуаторите кои овозможуваат изразување на емоциите на лицето и звучник преку кој се испушта звук обоен од емоциите. Моторниот систем на Kismet е одговорен за изведувањето на акциите на роботот под влијание на емоциите, а акциите вклучуваат анимација на лицето и експресивна вокализација [24]. Kismet има широк спектар на емоционални изрази кои се пресликани од тродимензионалниот AVS простор кој се користи за претставување на емоциите. Имено, дефинирани се прототип пози за крајните вредности на секоја од 3-те димензии. Врз основа на нив, со користење на линеарна интерполација, може да се извлечат емоционалните изрази за секоја точка во AVS просторот. Со промена на гласот на робот може да се изразат следните емоции: лутина, гад, страв, среќа, тага, изненадување и неутрална емоција. Емоционалното влијание врз моторите на Kismet може да биде и индиректно преку влијание врз модулот за селекција на однесувањето, а не само директно преку изразувањето на емоцијата.

Растојанието меѓу човек и робот при нивната интеракција влијае на можностите за емоционална експресија [18]. Растојанието зависи најмногу од апликацијата на робот. Minerva [146] е мобилен робот кој ја наоѓа својата примена како туристички водич. Растојанието меѓу луѓето и Minerva велите дека е „јавно“ според нотацијата дадена во [18]. Ова значи дека луѓето во интеракција со Minerva би можеле да бидат на растојание повеќе од 3 метри. Изразувањето на емоционалната состојба (среќа, неутрална, тажна или лута) на овој робот е овозможено со движењата на едноставното лице преку контролираните очи и уста, преку движењето на роботот во околината и преку неговиот говор. Во апликацијата на овој робот, емоционалната состојба се користи само како показател за емоционалната состојба што треба да се пренесе на лицето со кое комуницира Minerva, а тоа се разликува од другите работи кои користат емоции. На пример, ако роботот е блокиран од некоја личност, состојбата на роботот станува „лута“. Изразувањето на лутината им дава на луѓето информација за намерата на роботот, со надеж дека тоа ќе предизвика емпатија кај луѓето.

Хуманоидни работи. Наједноставниот хуманоиден робот е Felix (Табела 2.4). Главното истражувачко прашање поставено во [33] е: "Што може да ни каже многу едноставен робот за емоционалната експресија и интеракција?". Резултатите објавени во [33] покажаа дека дури и едноставен робот, каков што е Felix, кој може да изразува емоции, е добро прифатен од луѓето и луѓето најчесто можат да ја разберат неговата намера. Kobian е посложен хуманоиден робот чии емоционални изразувања се комбинација од фацијална експресија и гестикалации на телото [164]. Експерименталните резултати покажаа прецизност од околу 50% во препознавањето на точните емоции на роботот. Еден фотограф и карикатурист работеле во подобрувањето на експресивните изрази на Kobian, но резултатите не биле толку добри колку што било очекувано.

Целта на работата во [36] е да се дефинира процес со кој роботот iCub ќе може да научи да изразува емоции. За таа цел потребно е недвосмислено, еднозначно и едноставно претставување на изразувањето на секоја од емоциите. Изразувањето на емоции кои роботот треба да ги научи се базираат на модулот „emotionInterface“ со кој емоциите се пресликуваат во експресији на лицето на роботот дадени преку лед светилки [36]. Лед светилките се поставени на левата и десната веѓа

на роботот, а има и на устата. Да забележиме дека бојата на лед светилките е секогаш иста, додека се менува обликот и поставеноста на лед светилките. Оттука, фацијалната експресија на роботот се добива со селекција на лед светилки кои ќе бидат вклучени. Со процес на учење, роботот треба да научи кои лед светилки треба да се вклучат за да се изрази дадена емоција.

Kaspar е робот со изглед на човек, креиран како социјален придружник за деца [45]. Тој има статично тело со големина на дете, раце, нозе и подвижна глава која е артикулирана со маска на лицето. Дизајнот на лицето е инспириран од маските Noh кои се користат во традиционалниот јапонски театар. Тие се едноставни, но можат да изразат разни емоции ако се набљудувани од различен агол и осветлување со што се анимира маската на лицето. Слично на тоа, со користење на само неколку мотори на лицето на Kaspar и еден мотор на вратот, овој робот може да изразува различни емоции. Неговата насмевка е специјално дизајнирана така што наликува на вистинска човечка насмевка. Резултатите од истражувањето за тоа како децата, особено децата со аутизам, го доживуваат изгледот на робот покажуваат дека тој е привлечен и интересен и кај децата се однесуваат со него како со играчка. Минималистичката експресивност на Kaspar овозможува удобна социјална интеракција [45].

Naо е комерцијален робот за општа намена. Повеќе истражувања имаат за цел да дефинираат погодна емоционална експресија за роботот Naо. Ова претставува голем истражувачки предизвик поради тоа што Naо нема експресивно лице. Единствена контрола на лицето на Naо е движење на главата и промена на бојата на очите. Оттука, за изразување на емоциите кај роботот Naо потребни се други модалитети како движења на телото, допир или звучно изразување. Во трудот [55] дефинирани се емоционални пози за Naо каде се изразуваат емоциите: гнев, тага и среќа. Позите кои биле претходно развиени за виртуелен модел на човечко тело, биле прилагодени за изгледот на роботот Naо и покрај тоа што постојат разлики и несогласувања помеѓу зглобовите на Naо и човечкото тело. Изразувањето на емоции е базирано исклучиво на движење, без притоа да се користи фацијална експресија ни звук. Од првичното множество на пози избрани се најдобрите според гласовите на група од испитаници. Тестирањето покажало дека во повеќето случаи позите на роботот се класифицирани во точните емоции од страна на испитаниците. Сепак, забележано е дека во некои случаи емоцијата гнев е погрешно класифицирана во страв, среќа во изненадување и тага во страв. Апликацијата за Naо дадена во [112] ја користат деца со аутизам со цел децата да го подбрат разбирањето за емоциите. За таа цел развиени се соодветни гестови кои вклучуваат јазик на телото, звуци и бои на лед светилките за секоја различна емоција: лутина, гад, среќа, глад, љубов, тага, страв, срам и умор.

iPal и Perreг се комерцијални хуманоидни роботи кои за разлика од Naо можат да се движат на тркала што овозможува полесно движење во животната средина. Тие имаат и екран кој се користи како дополнителен интерфејс за интеракцијата со луѓето. И двата роботи имаат вграден модул или апликација за емоционално изразување. iPal може да изведува акции како реактивен одговор на емоциите на човекот (или дете) [77]. На пример, користејќи го системот за управување со емоции, iPal може да изрази среќа ако детето е среќно [34]. На сличен начин iPal реагира на депресија и осаменост. Емоционалниот систем кај iPal е значаен за програмските апликации каде што роботот има улога на пријател на детето и општо за сите апликации со социјална интеракција робот-дете. Апликацијата за изразување на емоции вградена кај роботот Perreг овозможува изразување на емоции преку промена на бојата на очите, звуците, гестовите и преку екранот [128]. На пример: Perreг има потемни очи кога е тажен, изразува среќа

со подигање на рацете и зборува со повисок тон при промена на емоцијата [38]. Специјална апликација каде Перрег може да изразува емоции е дадена во [40]. Во оваа апликација вредностите на обоеност и интензитет, кои се користат за претставување на емоции, се поделени во 4 нивоа од најниско до највисоко. За секој од шеснаесетте можни парови нивоа на обоеност и интензитет, дефинирани се акции за изразување на емоцијата кои вклучуваат контрола на 20-те степени на слобода на Перрег. Така, постојат шеснаесет акции со кои Перрег може да ја изрази сопствената емоција.

Кај роботите Sophia и Nadine, карактеристично е што нивното лице многу наликува на лице на човек. Кај обете роботи, за интеракција со луѓе, има систем за дијалог кој овозможува да го разбере говорот, а потоа и да даде соодветен одговор. Моделот на Sophia има интегрирано множество од изрази на емоции кои се интуитивни и слични на експресијата кај луѓето. Лицето на Sophia е со вештачка кожа, а дизајнот овозможува движење на устата, вилицата, веѓите, трепкање на очите, артикулација на усните, образите и вратот, како и експресивно движење на јазикот [149]. Имајќи ги овие можности во дизајнот роботот може да прикажува разни емоции преку експресија на лицето како емоции на среќа, гнев, страв, збунетост итн [149]. Nadine е пријателски робот кој може да изразува емоции преку експресија на лицето и преку разни гестукулации. Експресијата на емоции зависи и од апликацијата и од интеракцијата. Овој робот има 27 степени на слобода со кои се овозможени експресији на лицето и движења во горниот дел на телото [11]. Покрај тоа емоциите може да се изразат и во тонот и говорот [135].

#### Одлучување базирано на емоции

Кај дел од роботите се користат емоциите во процесите на одлучување за однесувањето, а некои дури имаат способност да учат (Слика 6). Листата на овие роботи ги вклучува роботите: iCat, eMuu, Aryan, Mingva, Zenbo, Mexi, итн. За некомерцијалните роботи, моделите за однесување се специјално креирани за конкретната апликација на роботот. За комерцијалните роботи постојат имплементирани функции и модули кои можат да се користат како дел од програмските апликации.

Меѓу ваквите комерцијални роботи припаѓаат и роботите Zenbo, Buddy, Nao и Perreg. Zenbo [165] има способност да учи и да се прилагоди на секој човек со кој е во интеракција. Исто така, користејќи вештачка интелигенција, може да го подобри функциите за идентификување на предмети, препознавање на членовите на семејството и разбирање на говорните команди. Има емоционален модел кој ја пресметува веројатноста да „чувствува“ одредена емоција, за секоја вештачка емоција што може да ја изрази. Овој модул може да биде дел од разни апликации заедно со други модули, како што се модули за извршување на роботските акции или визуелен модул кој е одговорен за перцепција на околината.

Роботот Buddy е дизајниран како персонален асистент кој може и да комуницира со паметни уреди во домот. Роботот може да слуша и зборува, да гледа и да презема соодветни акции. Со пријателскиот и грижлив робот целата фамилија ќе може да се чувствува добро [5]. Во поглед на емоциите, разни емоционални состојби може да предизвикаат соодветни акции. На пример, кога никој не му обрнува внимание роботот ќе биде намуртен и ќе ја изрази таа емоција [5]. Однесувањето на роботот, што вклучува кои акции роботот ќе ги изврши и како ќе ги изврши истите, зависи од внатрешната состојба на роботот која зависи од емоциите.



Интерфејсот за користење на роботите Nao и Pepper е сличен затоа што и двата се развиени од „SoftBank Robotics“. Постојат функции кои се достапни за двата работи. Еден пример на ваква функција е перцепцијата на емоции. Всушност и двата работи можат да препознаваат емоции користејќи ги фацијалните карактеристики, но само Pepper разликува емоции користејќи карактеристики и информации од човековиот говор. Функцијата за препознавање на емоции го пресметува нивото на присуство на секоја однапред дефинирана емоција, а потоа, онаа емоција со најголемо ниво е земена како доминантна емоција. Од аспект на експресија на емоции, во повеќе апликации се дефинирани роботски однесувања се кои се изразуваат емоции. Најчесто изразувањето на емоцијата кај Nao и Pepper не е дефинирано во преддефинираните функции, туку се креираат посебни рутини зависно од конкретната апликација. Можностите на однесување базирано на емоции кај овие хуманоидни работи е огромна. Прво, затоа што концептот на емоции е веќе присутен во интерфејсот со роботот, а потоа, затоа што овие работи имаат најразлична примена. Кај покомплексните апликации, овие работи можат и да го подобрат моделот на однесување и да учат од искуството. Бидејќи Pepper е следбеник на Nao, првиот има неколку карактеристики кои ги нема Nao. Pepper има своја личност, тој може да одговори соодветно во комуникацијата со луѓето зависно од нивната емоција и може да одговори соодветно на својата моментална емоција или расположение.

Роботот Sophia може да се користи за разни истражувања и академски апликации. Покрај хардверот, достапен е и софтвер развиен од Henson Robotics кој може да се користи и прилагоди за различни крајни апликации [149]. Во рамки на софтверот овозможени се модули за перцепција, како детекција на лица и детекција на говор, модули за интеракција како систем за дијалог базиран на правила и класификатор на намерата, и модули за контрола како генератор на емоции и контрола на однесување. Можностите за апликации со оваа платформа се огромни. На пример, во рамки на истражувачкиот проект „The Loving AI“ се развива софтвер за Sophia што ќе овозможи пријатна и сочувствителна интеракција [63]. Развиениот модел на однесување има модул за перцепција со кој може да се перцепираат емоциите кај луѓето. Во моделот се вклучени концептите на мотивација и емоција, преземени од системот OpenCog, во комбинација со модулот за генерирање емоции овозможен од платформата на Henson Robotics. Емоциите се користат и при селекција на акциите на роботот и во сите когнитивни процеси.

Секој некомерцијален робот има свој модел на однесување. На Табела 2.5 дадена е листа на овие работи заедно со краток опис на моделот за однесување кој е имплементиран кај нив. Во Поглавје 2.3.3 овие модели се дадени со повеќе детали. Она што е заедничко за сите модели е што секој го користи концептот на емоции. Како, и за што, емоциите се користат во моделот е специфика на моделите на секој од роботите.

Кај роботот Minerva, моделот е претставен како конечен автомат во кој емоциите претставуваат состојби, а акциите ги претставуваат врските во автоматот [146]. Кај Aruan [116] и FACE [56] дадени се правила со кои се дефинира роботското однесување. Во овие правила, емоциите се користат како параметри врз база на кои се дефинирани правилата. На пример, кај роботот iCat дадени се правила кои ги поврзуваат емоцијата, пресметката од модулот за емоции, со следните акции кои треба да ги изведе роботот, а кои се пресметани во модулот за акции [99].

Кај дел од роботите постои посебен модул посветен на емоции. Кај роботот

eMii постои таканаречен „Емоционален мотор“ [15], кај Maggie има „Емоционален Контролен систем“ [140], кај Nadine има „Афективен систем“ [135], а ROMAN [70] и WE-4R [53] содржат „Емоционален модул“. Една од задачите на овие модули е определување на емоционалната состојба на роботот. Оваа информација потоа може да се користи при донесување одлуки. Одлуките можат да се донесат како едноставен реактивен одговор на перцепцијата, или пак може да произлезат од посложен модел на роботско однесување кое има поголемо ниво на интелигенција [145]. Еден пример на реактивен одговор на робот е тој да се насмее, ако е среќен.

Реактивниот модел е имплементиран кај роботот iPal така што постои директна врска меѓу перцепцијата на роботот и акциите кој тој ги извршува [77]. Директна врска меѓу перцепцијата и акциите е имплементирана и кај роботот iCub, каде пресликувањето е овозможено со модел на поедноставна невронска мрежа [36]. Роботите Cat, Mexi и Kismet имаат посложена архитектура каде емоциите се користат и во перцепција, и во експресија и во донесувањето на одлуки (Слика 6).

Моделот на роботот Cat поддржува контрола одгоре-надолу. На највисокото ниво на контрола се одредува која е емоцијата на роботот [156]. Роботот Mexi има архитектура со 3 нивоа, меѓу кои во средината се наоѓаат роботските емоции. Во другите нивоа се користи информацијата за роботската емоција [10]. Кај роботите Forpheus [110] и Nadine [135] исто така има архитектура од три слоја, каде првиот е одговорен за перцепција, вториот за донесување на одлуки и третиот за контрола при изведување на акциите. Додека роботот Forpheus не умее да ги изразува емоциите, роботот Nadine умее и да ги изразува емоциите и да ги перцепира емоциите на лицата со кои е во интеракција. Афективната намера на негувателот на роботот влијае на однесувањето на роботот Kismet [27]. Овој робот има модел базиран на мрежа со кој е направен обид да се преслика однесувањето на човековиот нервен систем. Еден дел од мрежата, наречен „Мотивациски систем“, содржи два подсистеми: „Емоционален систем“ и „Систем на нагони“. Во емоционалниот систем се одредува емоционалната состојба на роботот, а оваа информација се пренесува низ мрежата и се користи и во другите системи од мрежата [24].

## Учење

Со помош на техниките на машинско учење, роботот може да учи. На пример, роботот може да учи како да ја перцепира околината, да учи како да се ги изведува акциите и да учи кои акции да ги изврши во дадена ситуација. Емоциите можат да бидат вклучени во процесот на роботско учење како поттикнувач на учењето, а можат да бидат вклучени и во процеси на адаптација [60].

Роботите, како на пример Maxi и Cat, „учат“ да ги перцепираат човековите емоции. Кај роботот Maxi препознавањето на емоции се прилагодува на луѓето, додека роботот Cat поддржува онлајн учење. За перцепирање на човековите емоции, роботот Mexi учи модел базиран на фази правила, со кои човечкиот природен говор се класифицира во еден од пет различни емоции [10]. Овој модел може да се прилагоди на различни соговорници на роботот, а во тој случај прецизноста на препознавањето на човековата емоција е 84% [10]. Врската меѓу сензорните податоци и емоциите се учи онлајн во моделот на роботот Cat. Учењето ја подобрува прецизноста на роботот во препознавање на човечките емоции [156].

Во [12] претставена е рамка за анализа и симулација на емоционални движења која се базира на Лабанските фактори на динамика (Laban Effort factors). Во

оваа рамка се учи врската меѓу факторите на динамика и емоциите. Анализата на Лабанските движења (Laban movement analysis) е познат метод за опис на човековото движење од каде може да се добијат дескриптори за движењата на телото на луѓето преку факторите на динамиката кои содржат информации за маса, простор, време и тек. Со комбинирање на овие фактори, емоциите гнев, страв и радост можат да се изразат и преку движењата на роботот Nao.

Како што е прикажано на Табела 2.5, концептот на учење е вклучен и во моделите на роботите WE-4R, Mexi, iCub и Kismet. Во овие примери роботите учат да ја изберат следната акција во дадена ситуација. Системот за учење е дел од емоционалниот модул кај роботот WE-4R. Овој систем овозможува роботот да научи како да се однесува користејќи ги претходните искуства [114, 113]. Во моделот на Mexi емоциите се користат како фидбек во фазата на учење [10]. Слично, кај роботот Kismet фидбекот кој се користи за учење е зависен од емоциите. Имено, фидбекот се базира на емоционалната обоеност кај роботот, што означува колку тој бил успешен во претходните акции.

Преку интеракција човек-робот кај iCub, роботот учи како да ја изразува емоцијата која ја препознал кај човекот со кој е во интеракција. Учењето се случува преку онлајн тренирање на Повеќе-нивовски перцептрон [36]. Откако роботот ќе ја препознае емоцијата на човекот, роботот ќе изведе акција со која ја изразува таа емоција, а на крај човекот ја „дава“ наградата за изведената акција преку имитација на експресијата на робот. Оваа награда ќе му помогне на роботот да научи како да изразува дадена емоција.

Има две сценарија кои овозможуваат услови за учење на роботот. Во првото сценарио, со експресија на емоциите на роботот, добросостојбата на роботот се прикажува на соговорникот (caregiver). Во второто сценарио роботот и соговорникот заземаат ред наизменично [24]. Роботот изведува акција, по што соговорникот преку својата емоција изразува колку била успешна акцијата. Ова пак го перцепира роботот и ја користи оваа информација за учење.

### Цел и меморија

Покрај, перцепцијата, извршувањето и селекцијата на однесувањето и учењето, има уште две компоненти во генеричкиот модел на роботско однесување кои можат да бидат под влијание на емоциите а тоа се: целта и меморијата [88]. Само мал дел од роботите анализирани во истражувањето ги имаат овие карактеристики.

Во еден комплексен модел на однесување, роботот може да одбере однесување кое ја зголемува веројатноста да ја оствари својата цел. Овие цели можат да бидат хомеостатични, што значи дека роботот има цел да ја подобри својата хомеостатична внатрешна состојба која е базирана на емоции [88]. Архитектурата на Kismet овозможува роботот да ја оствари целта и да одржува баланс во хомеостатичните нагони, кои зависат од емоционалната обоеност и интензитет [24]. Целта на роботот Maggie да има погодна добросостојба која произлегува од емоционалната состојба [140]. Целта на Mexi е да чувствува повеќе позитивни емоции и да ги балансира своите желби [10]. Бидејќи роботот Minerva се користи како водич, овој робот има за цел да го добие вниманието и интересот на набљудувачите [146]. Интересот на набљудувачите се заклучува врз основа на нивните емоции перцепирани од Minerva. Целта на роботот Forpheus е да го направи натпреварот во пинг-понг поинтересен. Тоа е овозможено преку поставување на соодветна цел која е дефинирана преку емоционалниот модел. Имено целта на роботот е да ја достигне емоцијата „возбуда“, која се наоѓа во горниот десен

агол на дводимензионалниот простор со димензии „Страв од пораз“ и „Надеж за победа“ [110]. Како последен пример на робот каде емоциите се вклучени во целта е роботскиот модел на iSub [36]. Имено целта на овој модел е роботот да научи да изразува емоции, па целиот модел е дефиниран во насока на остварување на зададената цел.

Меморијата на еден робот може да содржи информации за емоционалната состојба на роботот, за емоциите на луѓето или роботите со кои роботот комуницира, а може да содржи и емоционално-водени податоци. Во посложените роботски модели, состојбата на роботот зависи и од емоциите на самиот робот. Еден пример на таков робот е Buddy. Неговата внатрешна состојба е дефинирана преку емоции и желби, а истата се определува користејќи многу информации поврзани со неговата околина и со минатите интеракции [5]. Емоционално-водени податоци се податоци означени со емоцијата на роботот во моментот кога податокот е зачуван во меморија. Емоциите можат да влијаат и на тоа како податоците се чуваат во меморијата на роботот, и на тоа кои податоци се зачувуваат, а кои не [88]. Pepper е еден од роботите опфатен во истражувањето кој има одредени својства на емоционално-водена меморија. Една апликација која е прилагодена за роботот Pepper, наречена "Pepper Picture Diary", чува слики од настани поврзани со чувствата на роботот во моментот кога биле снимени сликите [38]. Ваквата меморија може да се користи за донесување одлуки на долг рок, но може и да се користи за создавање на личност кај роботот. Модул за меморија се среќава и во архитектурата на Nadine [135]. Во овој модул се чуваат информации од претходните интеракции на Nadine [135]. Имено, роботот може да го препознае лицето со кое е во интеракција преку модулот за препознавање на лице, а потоа може да се "сети" на минатите интеракции со тоа лице. Уште повеќе овој модул е под влијание на емоциите и расположението на роботот, иако детали за ова не се дадени [11].

Интеракцијата на долг рок е едно од најголемите предизвици во идните истражувањата во областа на емоционалните работи [127]. За да се овозможи интеракција на долг рок, треба да се посвети поголемо внимание во подобрување и развој на концептите како учење, адаптација и меморија. За да се овозможи децата да се врзат социјално со еден робот во интеракција на долг рок, роботите треба да можат да симулираат сложени, разновидни и динамични концепти на однесување [97]. Уште повеќе, за повозрасни деца, комплексноста и динамиката на роботското однесување треба исто така да биде поголема.

### 2.3.3 Анализа на роботските модели базирани на емоции кај емоционалните работи

Роботите Aryan, FACE и iCat имаат наједноставни модели на однесување. Aryan користи фази логика во системот за однесување. Во системот се среќаваат концептите на настани, емоции и моторни акции кои се претставени користејќи нотација на фази логика. Однесувањето на роботот се одредува според низа од дефинирани правила со кои се пресликуваат настаните во емоции, и правила со кои се пресликуваат емоциите во моторни акции [116]. Секоја емоција е претставена со фази компоненти со кои е опишано емоционалното ниво на секоја категорија на емоција. На пример, за емоцијата гнев постојат три фази компоненти кои одговараат на различни интензитети на емоцијата гнев, а тоа се: не е гневно, гневно и многу гневно.

Роботот FACE ја перцепира околината преку снимените аудио и визуелни сигнали. Во репрезентацијата на околината на роботот се идентификуваат и

Табела 2.5: Карактеристики на емоционално базираните модели на однесување кај дел од истражените емоционални работи.

Робот	Модел	Учење	Специјални карактеристики
Агуап	Архитектура базирана на фази логика	Не	-
Maggie	Архитектура со автоматско ниво и ниво на испорачлива (deliverable)	Не	цел за добросостојба
FACE	Правила базира на проекти од NASA	Не	-
eMuu	Двоинивовска архитектура	Не	-
iCat	Архитектура на игра со наизменични погези	Не	-
ROMAN	Емоционално базирана со 5 модули	Не	-
Forpheus	Емоционално базиран модел „Meta AI“	Не	Целна емоционална состојба
Nadine	Трислојна архитектура	Не	Меморија
WE-4R	Тринивовска архитектура	Систем на учење во емоционалниот модул	Личност
Minerva	Конечна машина	Поттикнувачко учење	Цел да го добијат интересот на луѓето
Cat	Архитектура со 3 компоненти	Учење на врската стимулација- желби	Емоционални цели, долготрајна меморија, личност
Mexi	Базирана на архитектурата „Nilson Triple Tower“	Учење на препознавање емоции	Цел за чувствување на позитивни емоции и балансирање на желбите
iCub	Модел на Повеќе-нивовски перцептрон	Учење за емоционална експресија	Цел за успешна емоционална експресија
Kismet	Синтетички невронски систем	Социјално учење	Цел да има хомеостатична рамнотежа

карактеристиките на социјалните актери (како што се лица) со кои роботот е во интеракција. Процесот за препознавање на карактеристиките на лицата се одвива во повеќе чекори. Прво, системот за внимание го одбира субјектот каде ќе се таргетира вниманието на роботот, а потоа системот за однесување го насочува погледот на роботот кон избраниот субјект [56]. Когнитивниот систем е оној кој вклучува концепт на емоции. Кај роботот FACE когнитивниот систем е базиран на експертен систем наречен I-CLIPS Brain кој е развиен од [56]. Според него, за различни социјални настани, постојат правила со кои се дефинираат акциите на роботот меѓу кои се и акциите за фацијална експресија. Во овој систем може да се препознае и емоционалната состојба на избраниот субјект. Покрај емоционалната состојба, може да се препознаат и посложени концепти како што е расположението.

iCat е робот чија архитектура е прилагодена за апликацијата во која роботот игра шах. Согласно правилата на играта, кај роботот е имплементиран модел на однесување каде се подразбира добро дефинирана низа од потези на роботот и другиот играч, наизменично [99]. Оваа основна архитектура е надградена со таканаречен емоционален модул. Емоционалниот модул ги добива на влез информациите за одиграните потези од роботот и другиот играч, како и тековната состојба на партијата шах. Базирано на овие информации во емоционалниот модул се идентификува една од деветте вештачки емоции, која ја претставува емоција на роботот iCat, а потоа идентификуваната емоција се користи да се пресмета обоеноста (валентноста) на емоционалната состојба на роботот. Емоционалната состојба се добива користејќи механизам на предвидување на емоцијата од разликите меѓу очекуваната и тековната ситуација на партијата по секој одигран потег [99]. Во анимацискиот модул дефинирани се строги правила за тоа како да се поврзе тековната емоционална состојба на роботот и расположението на роботот со следната акција која роботот треба да ја изведе.

Роботите ZE-A18 и Forpheus имаат имплементиран модел на однесување кој е специфичен за нивната апликација. Роботот ZE-A18 е креиран како емпатичен робот кој може и да прикажува и да препознава емоции, но и да одговара соодветно на емоциите на лицето со кое е во интеракција [65]. Специфичната апликација на овој робот е да служи како водич на јавни места или да пружа удобност на луѓе под стрес. Кај роботот кој игра пинг-понг Forpheus, моделот на однесување е базиран на систем за вештачка интелигенција за контрола на целата игра наречен „Meta AI“ [115]. Системот „Meta AI“ се состои од елемент наречен „Анализатор на светот“ кој е одговорен за перцепција на околината, „Генератор на игра“ што го претставува мозокот на роботот и „Генератор на операции“ каде се одредуваат следните потези на роботот. Користејќи го овој модел роботот може да се адаптира на различни стилови на игра и различни вештини на играчите. Како надополнување на овој модел креиран е емоционално базиран модел „Meta AI“ чија цел е и да се направи играта позабавна така што емоцијата на соиграчот ќе се доведе до некоја целна пожелна емоција [115]. Всушност, целта на моделот е да ги задржи играчите ангажирани контролирајќи ја тежината на играта имајќи ги предвид и емоциите на играчите [110]. За таа цел во модифицираниот модел на однесување во елементот „Анализатор на светот“ се одредува тековната емоција на соиграчот како точка во дводимензионален простор на емоции. Во „Генераторот на игра“ се планираат неколку погодни стратегии со кои ќе може емоцијата да се промени до целната емоција. Врз база на тоа, потоа се одредуваат следните акции на роботот. Целната емоција динамички може да се менува, а може да биде емоција како возбуда. Првичните истражувања на моделот имплементиран кај Forpheus укажуваат дека има потреба од

подобрување на дводимензионалниот модел на емоции за да одговора повеќе на специфичната апликација. Уште повеќе, треба подобро да се разбере како емоциите се менуваат меѓу секој удар, затоа што до сега емоциите се перцепираат после секој освоен поен.

Двонивовска архитектура е дефинирана за моделот на однесување кај робот еМиц. Емоционалната компонента се наоѓа во долниот дел на архитектурата, а во горниот дел се наоѓаат компонентите за резонирање кои ги вклучуваат модулот за преговарање и модулот за карактер. Во емоционалната компонента се одредува емоционалната состојба на еМиц како и емоционалните акции за фацијална експресија [15]. Системот за однесување на еМиц прво овозможува емоционално и рационално резонирање врз база на перцепцијата на тековната состојба на играта, а потоа се одбира следната акција на роботот, и на крај истата се извршува. По овие чекори, повторно се изведува емоционалното резонирање со кое се одредува емоционалната состојба на роботот која потоа се изразува. Емоционалното резонирање е базирано на делови од ОСС моделот [126]. Оригиналниот ОСС модел има 22 емоции, додека кај роботскиот систем има само 6 од нив (радост, вознемиреност, задоволување, каење, благодарност и гнев). Поради едноставноста на физичкиот изглед на роботот еМиц, овие емоции се пресликуваат во 2 основни состојби кои можат да се изразат од еМиц (позитивна и негативна состојба).

Стандардната архитектура на Maggie [140] има две нивоа на контрола: ниво на испорака (deliberative) и автоматско ниво (automatic level). Кај нивото на испорака има имплементирано вештини за извршување на задачи од повисоко ниво, додека кај автоматското ниво има имплементирано вештини за интеракција со околината. Предложената архитектура е надградена со таканаречен емоционален контролен систем кој се наоѓа меѓу двете нивоа и комуницира со нив [103]. Дел од системот, наречен систем за емоционален надзор, е одговорен за одредување на емоционалната состојба на роботот. Емоционалната состојба на роботот се користи за да се постават целите и да се алармира кога се забележува значителна промена во емоцијата на роботот. Влијанието на емоциите врз целите на роботот Maggie може да овозможи подобрување во механизмите за селекција на однесувањето. Според предложената архитектура, само во некои ситуации селекцијата на однесувањето ќе зависи директно од тековната емоција на роботот. Во повеќето случаи, селекцијата зависи од нагоните кои ги рефлектираат внатрешните потреби на роботот. Оттука, емоциите ќе влијаат на долгорочните тенденции на роботското однесување.

Моделот на роботот ROMAN се базира на емоционална контрола архитектура која е опишана во [70]. Централен дел во оваа архитектура имаат роботските нагони кои ги содржат целите на роботот како што се преживување, комуникација и истражување. Овие нагони се пресметуваат врз база на перцепираните податоци, меѓу кои се и перцепираните емоции на луѓето. Нагоните пак се користат за одредување на емоционалната состојба на роботот. Емоционалната состојба може да биде мешавина од основните емоции бидејќи за претставување на емоцијата се користи тридимензионалниот простор на емоции со димензии: интензитет, обоеност и став. Тековната емоционална состојба на роботот се пресметува во емоционалниот модул, додека акцискиот модул ја одбира следната акција користејќи ги информациите и за роботските нагони и за емоционалната состојба. На овој начин нагоните одредуваат "што" треба роботот да направи, додека емоциите одредуваат "како" [70].

Архитектурата на моделот на однесување на роботот Nadine има три слоја:

перцепција, процесирање и интеракција [11]. Во првиот слој паралелно се случуваат процеси, како препознавање на лице, емоции, говор, објекти од околината, со кои роботот го добива знаењето за околината. Во слојот за процесирање има повеќе модули, меѓу кои е и афективниот систем, кој влијае на модулот за планирање на однесувањето. Во овој слој се добиваат на излез акциите кои треба роботот да ги изврши, а кои се однесуваат на гестикулации и експресији, но и на дијалог и тон. Овие информации се процесирани во третиот слој на интеракција каде се прави директна контрола врз хардверот на роботот (мотори и звучник). Афективниот систем ги контролира емоциите на Nadine, како и нејзиниот карактер и расположение [135]. Овој систем ги користи на влез перцепираните информации за емоции, говор и поглед на соговорникот на Nadine, а излезот се користи при донесување одлуки за однесувањето на роботот.

Учењето е карактеристика на посложените модели на однесување. Ако роботот учи како да селектира акции, тогаш роботот може да изврши различна акција во иста ситуација пред и по учењето. Процесот на учење често бара искуството кое се стекнува со минати акции. Учењето може да биде водено од наставник или пак може да биде водено од самиот робот со таканаречено самоучење. Кај учењето со наставник, наставникот може да даде емоционален фидбек на роботот изразувајќи ги сопствените емоции. Емоционалниот фидбек може да се базира на тоа дали роботот успешно или точно ја избрал и извршил претходната акција [136]. При самоучењето може да се користи генеричка функција за евалуација на состојбата на роботот која зависи од емоциите на роботот. Оваа идеја е презентирана во [22].

Еден од роботите кои користат поттикнувачко учење е Minerva. Архитектурата на овој робот преставува емоционална конечна машина каде преминот од една во друга состојба се случува зависно од тековната интеракција со луѓето [146]. Конечната машина има четири состојби кои ги претставуваат четирите емоции вклучени во моделот. За да се овозможи успешна реализација на задачата на водич привлекувајќи го вниманието на луѓето се користи онлајн алгоритам за учење. Следната акција се избира така што се максимизира очекуваната награда која би ја добил роботот за извршување на истата. За таа цел се користи меморијата на роботот каде се зачувани податоци од претходните интеракции и каде се наоѓа информација за тековната состојба на роботот. Акциите кои може да ги изврши Minerva се комбинација на преддефинирани акции за фацијална експресија, движења и говорни секвенци [146].

Според [29] краткорочната емоционална состојба се нарекува емоција, а долгорочната емоционалната состојба се нарекува расположение. Однесувањето на роботот WE-4R има влијание и од емоциите и од расположението. Емоциите предизвикуваат поголема промена во кратко време, додека расположението придонесува во промена на подолго време. Архитектурата на овој робот е трислоен модел кој ги содржи рефлексите на најниско ниво, емоциите на средно ниво, додека интелигенцијата на највисоко ниво [53]. Емоционалниот модул содржи систем за учење кој му овозможува на роботот да учи, расположение кое ја претставува долгорочната емоција на роботот и динамички одговор кој е значаен за изразувањето на емоции. Системот на учење, не само што учи од искуството на роботот, туку и овозможува роботот да создаде свој карактер [114, 113]. Внатрешните фактори, меѓу кои е и карактерот на роботот, и факторите од околината, кои ги претставуваат процесирани податоци добиени од сензорите, влијаат на емоциите на роботот. Роботското однесување кај роботот WE-4R се селектира според потребите на роботот како апетит, потреба за сигурност, потреба за истражување итн. Моделот на потребите е базиран на „Хиерархијата на потребите“



на А.Н. Maslow [114, 113]. Потребите на роботот зависат и од емоциите, па затоа оваа архитектура поддржува емоционално базирано однесување.

Архитектурата на роботот Cat има три дела: дел на перцепција, емоционален модел и генератор на однесување [156]. Емоционалниот модел има реактивен дел кој овозможува директно пресликување од податоците од сензорите во роботски однесувања. Постои и друг дел во емоционалниот модел каде се случува когнитивен и емоционален процес што овозможува генерирање на емоцијата на роботот Cat [156]. Користејќи ја информацијата за емоцијата на роботот како и неговите идентификувани желби, генераторот на однесување избира однесување кое ќе биде потоа извршено. Роботот Cat има долгорочна меморија која помага во процесот на учење каде роботот ја учи каузалната врска меѓу перцепираните стимулации и желбите на робот [156]. Како резултат на учењето, роботот ќе знае дали нова перцепирана стимулација е погодна или не е погодна за него.

Роботот Mexi има исто така архитектура со 3 слоја (Nillson Triple Tower Architecture): слој за перцепција, слој за однесување и слој за акции [10]. Роботот го вклучува концептот на емоции во секое од овие нивоа. Роботот може да перцепира емоции од фацијалната експресија на човекот и од неговиот говор, роботот може да носи одлуки базирани на емоциите, и на крај роботот може да изразува емоции преку експресија на лицето и преку неговиот говор. Во системот за однесување на овој робот постои таканаречен „Мотор на емоции“ каде внатрешната состојба на роботот е претставена преку емоции и нагони, кои пак се користат како фидбек во фазата на учење [10]. Емоциите и нагоните се претставени со фази множества кои имаат пет различни вредности. Целта на роботското однесување е роботот да чувствува позитивни емоции, а да ги избегнува негативните, и да се чувствува удобно [10]. Моделот за однесување на Mexi одбира однесување со кое роботот е поблиску до својата цел, а селекцијата на однесувањето се адаптира во новите ситуации.

Моделот на однесување, чија апликација е роботот iCub да научи како да изразува на емоции, се базира на модел на Повеќе-нивовски перцептрон [36]. Влезот во овој модел е една можна акција на роботот и најдобрата единица на совпаѓање (Best Matching Unit, BMU) која се добива од SOM моделот кој се користеше за препознавање на емоции од слика. Излезот на перцептронот е предикција за наградата која роботот би ја добил по изведување на акцијата дадена во влезот. Имајќи го ова предвид, агентот пробува со која од можните акции роботот би добил најголема награда и таа ја изведува. На овој начин се прави селекција на следната акција.

Моделот за однесување на роботот Kismet се базира на концепти опишани во психологијата на развој кај бебињата. Оваа архитектура се нарекува „Синтетички невронски систем“ (Synthetic nervous system, SNS) [24, 25]. SNS е имплементиран како мрежа од елементи (јазли, неврони) кои се меѓусебно поврзани. Интеракцијата меѓу невроните во мрежата се одвива преку пораки кои се праќаат и примаат од еден до друг неврон. Невроните во мрежата се наоѓаат во шест подсистеми: „Систем за екстракција на карактеристики на ниско ниво“, „Систем за внимание“, „Систем за перцепција на високо ниво“, „Мотивациски систем“, „Систем на однесување“ и „Моторен систем“ [24]. Секој подсистем има посебна функција. Во трите подсистема од системот за перцепција се пресметува информацијата за афективната намера на негувателот кој е во интеракција со роботот, каде за влез се земаат податоците од говорот на негувателот. На пример афективната намера на негувателот може да биде одобрување или забрана. Ваквата особина на роботот Kismet е слична со способноста на бебињата да ја разберат афективната информација од говорот на негувателот, иако не го

разбираат значењето на зборовите [27]. Афективната информација се пренесува директно до емоционалниот подсистем, кој заедно со системот на нагони се дел од „Мотивацискиот систем“. Улогата на емоционалниот систем е да ја одреди целокупната емоционална состојба на роботот [24]. Во емоционалниот систем, афективната намера на негувателот се евалуира со евалуација на параметрите: интензитет, обоеност и став (AVS). Параметрите се филтрираат врз база на нивната значајност, а потоа се пресликани во деветте емоционални категории кои може да ги има роботот Kismet. Тековната емоција се определува како онаа емоционална категорија која има најголемо ниво на активација [24]. Однесувањето на Kismet е базирано на задачи. Главната одговорност на системот за однесување е врз база на значајноста на однесувањата, да го одреди следното однесување на роботот како и неговото траење. Значајноста на однесувањата зависи од внатрешните информации како роботските нагони, емоции, афективната состојба, и надворешните информации, како перцепирани информации и целта на роботот. По селекција на следното однесување, се следи колкава е успешноста на однесувањето. Ако е успешно, се праќа информација за позитивна афективна обоеност до емоционалниот систем. Во спротивно се праќа информација за негативна афективна обоеност. Оваа информација може понатаму да се користи во процеси на учење. „Моторниот систем“ е одговорен за извршување на избраното однесување кое вклучува фацијална анимација и експресивна вокализација. Архитектурата на Kismet овозможува роботот да ја оствари целта да го одржи балансот во своите хомеостатични функции кои вклучуваат социјален нагон, стимулација и замор. Активацијата на секој нагон е корелирана со обоеноста и интензитетот добиени од информацијата за емоцијата [24].

#### 2.3.4 Евалуација на емоционалните работи

Евалуацијата на емоционалните работи не е тривијална. Една методологија за евалуација на емоционалните карактеристики кај роботите е дадена во [145]. Најголем дел од експериментите се изведени во симулациска околина, а резултатите покажуваат дека емоционалната контрола има придобивки. Сепак, поголем предизвик е евалуација на емоционалните работи во реална околина. Само мал дел од истражувањата кои беа анализирани, имаат направено експерименти во реална околина.

Според Arkin постојат неколку начини на кои може да се евалуира интеракцијата човек-робот во реална околина: само-оценување, одговори со однесување и експресија, како и евалуација на перформансите на извршувањето на одредена задача [32]. Најчестиот метод за евалуација е само-оценувањето каде испитаниците даваат одговор на прашалници или пак имаат интервју каде ја оценуваат интеракцијата со роботот. Еден проблем со овој тип на евалуација е што одговорите се субјективни, а друг е што тешко може да се споредат резултатите од описните оценки меѓу различни истражувања. Пообјективен метод на евалуација е кога интеракцијата човек-робот е снимена, а потоа врз база на снимените материјали се одредуваат значајни карактеристики за интеракцијата.

Експерименти во реална околина се изведени со роботот Minerva на влезот на музејот „Smithsonian National Museum of American History“. Резултатите покажале дека однесувањето на роботот кое било водено од емоции придонело за поголем успех и напредок во извршувањето на задачите споредбено со случајот кога роботот не користел емоционална состојба [146]. Било забележано дека посетителите на музејот успеале да ги разберат промените во расположение кај Minerva и дека намерите на роботот биле јасни за посетителите [146].

Во експериментот опишан во [99], роботот iCat играл шах со испитаник - човек. Резултатите покажале дека има подобрување во перцепцијата на играта од страна на испитаниците и дека тие точно ја интерпретирале емоционалната состојба на роботот. Но, резултатите од долгорочна интеракција што траела околу пет недели биле разочарувачки. Имено, со текот на времето противникот на iCat почнувал да го губи вниманието и интересот кон роботот, па така се намалувало и влијанието на емоциите на iCat врз противникот [98].

Во играта на преговарање меѓу роботот eMuu и човек, емоциите во моделот на eMuu не го подобриле значително резултатот на противникот во играта. Од друга страна, резултатите укажале дека на испитаниците кои биле во интеракција со робот кој изразува емоции интеракцијата им била поинтересна, затоа што однесувањето на роботот било ново за нив, споредбено со случајот кога роботот не изразува емоции [13]. Во друго истражување направена е компаративна анализа на интеракција на корисник со роботот eMuu каде тој изразува и каде не изразува емоции. Ова истражување покажало дека интеракцијата со роботот била попрјатна во случајот кога роботот eMuu изразува емоции [13].

Резултатите дадени во [116] покажуваат дека моделот на роботот Aryan придонесува до поверодостојно емоционално однесување на роботот затоа што прави благи премини во движењата и затоа што роботот може да изрази повеќе емоции во исто време. Моделот имплементиран кај Kismet овозможува овој робот да има емпатија кон својот негувател, каде негувателот може да ги разбере акциите на роботот [24]. Во спроведените експерименти од интеракција човек-робот со Kismet, испитаниците го гледале Kismet како социјално суштество. Однесувањето на испитаниците било добро синхронизирано со однесувањето на роботот укажувајќи на пријатна интеракција [27].

Искуството од корисниците на роботот Zenbo покажало дека луѓето можат да имаат разиграна, пријателска и активна интеракција со роботот и дека тој може да е добар придружник за секој дом [165]. Едно експериментално истражување со роботот Caspar [76] било спроведено во домовите на децата и во училишна средина. Резултатите покажале дека роботот придонел во подобрување на комуникацијата на децата со други лица. Pepper добил главна награда на наградите „MM Research Institute Awards“ во 2015 година како прв робот со хуманоидни комуникациски карактеристики кој се користи во домовите на луѓето [128]. Во една од апликациите за роботот Pepper, роботот може да се прилагоди на културата на луѓето со кои тој е во интеракција [17]. Во експериментите спроведени во [17] два работи имале интеракција со луѓе од различни култури. Како резултат на адаптацијата на роботот, роботите по некое време почнале да изразуваат различни емоции како одговор на исти стимули.

Во рамки на проектот „Loving AI“ креиран е модел на однесување на Sophia кој треба да овозможи роботот да има интеракција со луѓето на грижлив начин, притоа имајќи ги предвид емоциите и карактеристиките на луѓето [63]. Спроведено е експериментално истражување со цел да се оцени моделот на однесување на роботот. Акцентот на истражувањето било да се евалуираат промените кај лицата со кои роботот е во интеракција пред и по интеракцијата. За таа цел група испитаници имале сесии со Sophia кои траеле меѓу 10 и 15 минути. Анализата на сесиите била правена врз база на одговори на прашалници, мерења за отчукување на срцето на испитаниците и објективна анализа на видеата од интеракцијата. Првичните резултати од истражувањето укажале дека кај испитаниците е забележано зголемување на чувството на љубов кон роботите, добро расположение и отчукувањата на срцето по интеракција со Sophia [63]. Од друга

страна не било забележано промена во интензитетот на емоциите кај испитаниците. Ова укажува на потребата за подобрување на моделот.

Роботите имаат голема примена во едукацијата на деца со аутизам затоа што децата со аутизам имаат природен афинитет кон објекти без експресија, какви што се роботите. Емоционалните роботи можат да им помогнат на децата да научат како да ги изразат своите чувства и емоции и да научат да ги разбираат емоциите на другите луѓе. Во истражувањето дадено во [112] создадена е апликација за роботот Nao која е наменета за деца со аутизам и има за цел да ја подобри способноста на децата да ги препознаваат емоциите на другите. Во нашите претходни истражувања со роботот Nao, имаме имплементирано вежби за деца со аутизам. Овие веќе беа експериментално евалуирани од осум деца. Секое од децата имаше индивидуални часови со роботот кои се повториле неколку пати. Еден резултат од истражувањето е дека со текот на времето, времетраењето на вежбите со децата се намали во споредба со времетраењето на истите вежби на првиот час [153]. Експерименти со роботот Kaspar со деца со аутизам укажуваат дека децата можат да научат одредени аспекти од социјалната интеракција, да научат некои комуникациски вештини, како и успешно да изведат одредени дефинирани едукациски и терапевтски цели [76].

Во неколку експерименти посебно е истражувана долгорочната интеракција робот-човек. Резимето дадено во [97] претставува неколку експерименти спроведени врз роботи меѓу кои се iRobiQ и Keeron, каде интеракцијата траела подолг период или пак повеќе сесии. По двенеделна интеракција со роботот iRobiQ, децата одговарале на прашалник со кој била евалуирана интеракцијата. Резултатите покажале дека роботот iRobiQ бил добро прифатен од децата во апликација за едукација и дека тоа било главно поради социјалната и емоционалната интеракција на роботот со децата [97]. По дваесет сесии со роботот Keeron, децата го гледале роботот како социјален агент. Група од деца со пречки во развојот имале петнаесет сесии со Keeron. По овие интеракции, децата имале остварено социјален контакт со роботот кое можело да се забележи по зголемиениот обем на емпатични интеракции [97]. Децата биле љубопитни за роботот Keeron и се чувствувале сигурно со него. Љубопитни биле поради неговиот изглед кој не потсетува на човек, а сигурност чувствувале најмногу поради тоа што роботот сепак не е само играчка [93].

Способноста роботот да учи од емоционален фидбек од лицето со кое е во интеракција е евалуирано во [36]. Моделот за учење имплементиран кај роботот iSub, чија цел е тој да научи да изразува емоции, покажал добри првични резултати укажувајќи на тоа дека дадениот модел успева да научи. Сепак, недостатокот на моделот е што е потребно повеќе од 100 итерации за да се заврши процесот на учење. За посакуваното онлајн учење во реално време, ова е голема бројка која се очекува да се намали со подобрување на моделот или на методот на тренирање.

### 2.3.5 Значењето на емоциите кај емоционалните роботи

Меѓу дадените емоционални роботи, само дел од нив поседуваат некоја од посакуваните карактеристики на емоционалните роботи дадени на Слика 2. Тука спаѓаат афекција, социјална интеракција човек-робот, вештачка интелигенција, прилагодување, опстанок и автономија. На пример, роботите Sparky и Feelix можат да ги изразат сопствените емоции, па оттука умеат да прикажат афекција кон корисниците. Резултатите во [31] покажуваат дека корисниците успешно

можат да ги препознаат емоциите на Феликс како гнев, тага, страв, среќа, изненадување и неутрална емоција. Роботот Cog имплементира модел на социјална интеракција човек-робот што било една од целите за креирање на овој робот [31]. WE-4R има способност да учи како да се однесува, со што се овозможува да се адаптира на новите ситуации [114, 113].

Роботот Kismet е покомплексен интелигентен робот [24]. Со моделот на однесување на Kismet, роботот го одбира однесувањето што ќе овозможи стабилна хомеостатична внатрешна состојба. Во 2010 група на научници предводени од Lola Sanamero, креирале модел за однесување кое се базира на однесувањето на мало дете [61]. Со овој модел Nao може да изразува емоции, да детектира емоции кај луѓето, да има социјална и емоционална интеракција со луѓето, да учи од луѓето. Исто така кај овој модел има емоционално-базирана внатрешна состојба, целта на роботот е внатрешната состојба да е позитивна, искуствата на роботот се означени со добри и лоши итн. Со овој модел, Nao станал робот способен да развие емоции и да формира врски со луѓето [61]. Pepper е развиен како автономен робот кој може да се користи како социјален придружник на луѓето. Карактеристично за него е што има вграден емоционален мотор кој овозможува роботот да ги разбере чувствата на луѓето.

Идните емоционални работи треба да се стремат да поседуваат посложени карактеристики. Оттука, идните персонални и социјални работи треба да се автономни и интелигентни. Тие треба да можат да ги претстават емоциите и да се однесуваат како што им налагаат емоциите за да можат да опстојуваат успешно во околина заедно со луѓето и со други суштества и работи. Кај роботите кои имаат пореален изглед кој наликува на луѓето, како што се роботите Sophia и Nadine, поголеми се очекувања за нивното однесување [135]. Оттука кај нив се очекува да поседуваат карактеристики со кои ќе се однесуваат многу слично со однесувањето на луѓето.

## 2.4 Етички аспекти од примена на емоционални работи

Емоционалните работи се сè повеќе вклучени во секојдневниот живот на луѓето. Сепак, свеста за емоциите кај роботите може да имаат позитивно или негативно влијание врз луѓето. Ова укажува на потребата да се анализираат и етичките аспекти од примената на емоционалните работи. Една ваква анализа е дадена во нашето претходно истражување [82]. Некои примери за влијанието на роботите врз луѓето се дадени во продолжение.

Во работните средини, особено кога роботите работат со клиенти, роботите можат да го контролираат процесот на комуникација. Роботите свесни за емоции можат да контролираат дека клиентите се добро опслужени. На овој начин роботите може да бидат контролирани и подобрани. Негативниот ефект е што луѓето би можеле да почувствуваат дека се изманипулирани во интеракцијата, бидејќи роботите може да бидат програмирани да го прават она што клиентите го сакаат за ја остварат својата цел.

Некои социјални работи се користат како придружници на човекот. Ова е особено точно за стари лица и деца. Една добра карактеристика на роботот е да има позитивно влијание врз лицето со кое комуницира. За таа цел роботот не треба да предизвика страв, гнев, нервоза или некои други негативно обоени емоции кај лицата со кои е во интеракција. Еден начин да се постигне ова е робот да биде емоционален така што роботот ќе може да ги перцепира емоциите на лицето со кое е во интеракција. На тој начин ќе може роботот да го оствари

посакуваното однесување. Лошата страна на ова однесување е тоа што човекот може да создаде емоционална врска со овие работи. Емотивната свест на роботот може да предизвика создавање лажна врска помеѓу човекот и роботот. Ова може да има големо влијание врз човекот кога робот е скршен, или од некоја друга причина не може да се користи. Луѓето можат да станат многу емотивни кога губат некого или нешто за што се грижат. Оваа точка мора да се земе предвид при градење на емоционални работи свесни за емоции. Од друга страна, некои луѓе не би сакале роботите да ги декодираат, т.е. перцепираат, нивните емоции. Во овој случај во прашање е нарушување на приватноста на лицето. Како едно можно решение, треба однапред да се дефинира политика за користење на информациите добиени со перцепција на емоциите на луѓето.

Здравствената информатика е релативно нова научна област. Корисна апликација на емоционалните работи е нивна примена во болници за пациенти кои имаат тежок темперамент или во психолошки институции. Тука, интеракцијата човек-робот мора да биде отворена во смисла што човекот ќе треба да знае кои се задачите на роботот и што сè роботот може и не може да направи. Но, човекот не треба да го искористи ова знаење за свои цели. На пример, луѓето во болниците не треба да мислат дека роботот може да ги оздрави. Но, исто така, луѓето не треба да глумат дека имаат негативно обоени емоции за да имаат подобар третман од роботите.

Еден проблем што може да се појави во општеството во иднина е пронаоѓање на виновната страна во ситуација на грешка во софтверот како што е на пример погрешен модел за учење во моделот за однесување на роботот. Ако е настаната хардверска или софтверска грешка, делумно вината е на страна на инженерот кој го дизајнирал и/или креирал роботот. Меѓутоа зад ваквите грешки вклучени се многу фактори, така што инженерите не треба да бидат единствените виновници. Главното прашање тука е дали робот може да биде одговорен за грешки настанати како резултат на однесувањето на роботот. Еден робот може да биде одговорен само ако роботот е морална машина. Моралните машини носат таканаречени морални одлуки. Моралните одлуки кај роботот може да бидат водени од емоции. Затоа, ова е важна придобивка на емоциите.

Како што беше дискутирано во овој дел, во иднина емоционалните работи можат да предизвикаат и одредени непријатности. Затоа треба внимателно да се разгледаат околностите под кои емоционалните работи ќе бидат вклучени во околината на луѓето. Од социјална и етичка перспектива треба да се дефинираат упатства и насоки како треба да се однесува робот и како треба да комуницира со луѓето. Ова е клучно за да може да се креираат сè повеќе социјални работи и да се вклучат во реалната околина на луѓето, каде што навистина припаѓаат.

## Глава 3

# Стохастички роботски модел базиран на емоции

Во оваа глава ќе биде опишан роботскиот модел предложен во оваа докторска дисертација. Во следните глави ќе бидат опишани поединечни компоненти од предложениот модел кои се базирани на емоции, а формална дефиниција на моделот е дадена во Поглавје 3.6.

### 3.1 Перцепција на емоции

Перцепцијата на емоции кај живите суштества е тешка задача дури и за луѓето. Луѓето умеат да ја одредат тековната емоција на друго лице препознавајќи одредени карактеристики. Градењето на интелигентен систем кој ги препознава емоциите кај луѓето и денес претставува предизвик.

Различните начини на претставување на емоциите дадени во Поглавје 2.3.1 повлекуваат различни пристапи кон дефинирањето на систем за препознавање на емоции. Систем за препознавање емоции кој користи голем број на емоциски категории може да има мала прецизност. Ова може да се случи не само поради големиот број на категории, туку и поради тоа што разликите меѓу поголемото множество на емоции не се толку јасно изразено. Уште повеќе емоциите може да се повеќе значајни. Со цел да се овозможи поголема прецизност, системот за препознавање емоции креиран во нашето истражување, ги користи основните емоционални категории на Екман.

Од аспект на влезните сигнали, системот за препознавање на емоции дефиниран тука користи комбинација од визуелни и звучни сигнали. Податоците кои се користат на влез се временски независни, што значи дека за препознавање на емоциите во даден временски период се користат само податоците добиени во тој период. Од визуелните сигнали се пресметуваат одредени карактеристики од фацијалната експресија, а од звучните сигнали се пресметува множество од однапред дефинирани звучни карактеристики базирани на фреквенција, интензитет и темпо. Дефинирањето на карактеристиките во голема мера е под влијание на резултатите добиени од истражувањата на Екман [52] и Shcherer [143].

Екман [52] го вовеле „Системот за кодирање на акција на лице“ (FACS), со кој е покажана врската меѓу фацијалните карактеристики и емоциите. Овој систем денес се користи како рамка за екстракција на карактеристики од фацијална експресија во многу истражувања, меѓу кои се и истражувањата за емоционалните работи претставени во Глава 2 кај роботите Roman [152], Nao [157] и други. Акциските единици (AU) дефинирани со FACS даваат значајна информација за експресијата на емоциите кај луѓето. Овие единици се базираат на човековите фацијални мимики на мали временски интервали. Интервалите се

доволно кратки за да можат да се идентификуваат поединечните значајни информации, и доволно долги за да информацијата биде комплетна. Во [52] за секоја акциска единица се претставени корелациите со секоја од емоциите. Овие акциски единици се идентификувани со методот за екстракција на фацијални карактеристики. Еден популарен метод кој се користи за екстракција на карактеристики од слики на лица е „Моделот на активни форми“ (Active Shape Model, ASM) [90]. За различни параметри, кои треба да се постават на влез за овој метод, на излез се добиваат соодветните карактеристики. Во некои истражувања овој метод се користи за идентификација на акциските единици дефинирани во FACS, но ASM може да се користи и за екстракција на многу други податоци за препознавање емоции.

Паралелно со истражувањата во кои се објаснуваат врските меѓу карактеристиките на човековото лице и емоциите, правени се истражувања за идентификување на врската меѓу човековиот глас и емоциите. Едни од најзначајните истражувања се спроведени од Scherer [142, 144], во кои тој имал за цел да ги идентификува значајните звучни карактеристики за изразување емоции. Според Scherer, значајните звучни карактеристики можат да се групираат во три различни категории:

1. карактеристики базирани на фреквенција,
2. карактеристики базирани на интензитет,
3. карактеристики базирани на темпо.

Сепак, Scherer не ги дефинирал конкретните звучни карактеристики или звучни акциски единици кои се тесно поврзани со експресијата на емоции. Некои истражувања го користат фактот што има три категории на звучни карактеристики кои се значајни за препознавање емоции. На пример, во истражувањето дадено во [95], се пресметува по една вредност за секоја категорија.

### 3.1.1 Опис на влезни податоци

Во ова поглавје ќе биде даден подетален опис на влезните податоци за моделот на перцепција на емоции дефиниран во оваа докторска работа. Посебно ќе бидат разгледани податоците добиени од визуелните и звучните сигнали.

Карактеристики од фацијална експресија. Пред да се одредат карактеристиките од фацијалната експресија се наоѓаат значајните точки од лицето. Точките на лицето се наоѓаат користејќи ја алатката Luxand Face SDK [102]. Со оваа алатка се идентификуваат 65 точки на лицето кои може човекот да ги придвижи со соодветна фацијална експресија. Другите точки на лицето не се движат со човековите мимики. Во детектираните точки на лицето има точки на очите, веѓите, усните, носот, итн. Секоја точка на лицето е претставена со две координати во еден дводимензионален координатен систем. Покрај точките на лицето, алатката пресметува и други вредности кои ја одредуваат позата на лицето. Неколку примери за овие вредности се: големината на лицето, координатите на центарот на лицето и проценетите агли за ротација на лицето.

Овие сирови податоци се трансформираат пред да се користат понатаму, затоа што точките на лицето за различни слики се претставени во различни координатни системи. Имено, за целото множество точки од лицето се применуваат соодветни трансформации кои вклучуваат транслација, ротација и трансформација



на размерот. Како резултат на тоа се добиваат новите, трансформирани, координати за сите точки. Овие нови точки се дадени во координатен систем каде центарот на лицето се наоѓа во координатниот почеток, а максималната големина (висина и ширина) на координатниот систем е 1. На крајот, координатите се стандардизирани, користејќи ги средната вредност и стандардната девијација меѓу податоците од целото податочно множество. Ова овозможува податоците за точките на лицето да содржат и информација за девијацијата на координатите.

Стандардизираниите координати од точките на лицето се користат во моделот за препознавање емоции. Важно е да се нагласи дека овие податоци се различни од податоците извлечени користејќи го системот FACS. Првата разлика е тоа што овие податоци се пресметуваат само од една слика, а не од неколку слики во даден временски интервал. Понатаму, овие карактеристики не можат да се интерпретираат како акциски единици. Една карактеристика на опишаниот пристап на извлекување на карактеристики од фацијална експресија, е тоа што податоците зависат од лицето. Имено, меѓу две лица постои разлика во координатите на детектираните точки на лицето. Од друга страна, за пресметување на стандардизираниите координати кои ќе се користат за препознавање на емоции се користат само математички операции што овозможува едноставна и брза пресметка.

Карактеристики од говор. Звучните карактеристики се пресметуваат користејќи ја алатката PRAAT [20]. Дел од звучните карактеристики се базираат на интензитетот на звучниот сигнал, дел од нив се базираат на висината на тонот и дел на темпото на говор. Всушност, вклучени се сите три категории на значајни звучни карактеристики дадени во [142].

Во нашите претходни истражувања [86, 87, 85] имаме испитувано кои се значајни звучни карактеристики за препознавање на емоции и токму идентификуваните карактеристики се користат во моделот за препознавање емоции. Звучните карактеристики се пресметуваат на дадени звучни сегменти кои имаат фиксна преддефинирана должина. За секој звучен сегмент се пресметуваат вкупно 33 звучни карактеристики.

Дел од овие карактеристики се пресметуваат како глобални карактеристики на звучниот сигнал. Глобалните карактеристики се пресметуваат како статистички вредности извлечени од локалните карактеристики. Имено, се пресметуваат статистики како средна вредност, максимална вредност, минимална вредност и стандардна девијација на локалните карактеристики како висина на тон и интензитет. Покрај овие глобални карактеристики се пресметуваат и други карактеристики на звучниот сегмент како што се карактеристиките базирани на параметрите шимер и цитер кои се базираат на интензитетот или висината на тон. Да забележиме дека локалните карактеристики се пресметуваат само во оној дел на звучниот сигнал каде што има говор со што звучните делови без говор не влијаат на глобалните карактеристики. Звучните карактеристики базирани на темпо се пресметуваат познавајќи ја должината на сигналот со и без говор.

Во последната фаза, пред креирање на моделот, пресметаните звучни карактеристики и стандардизираниите координати од точките на лицето се предпроцесираат. Некомплетните вредности, што се јавуваат како резултат на неидентификувани точки на лицето или пак шум кај звучните сигнали, се отстрануваат од податочното множество.

### 3.1.2 Опис на податоците од базата

Податоците кои се користени за тренирање и тестирање на системот за препознавање на емоции доаѓаат од емоционалната база на податоци eNTREFACE [104]. Оваа база има по околу 30 видео записи од 44 лица. Секое видео трае околу 20 секунди и е аотирано со едно од шесте основни емоции: гнев, среќа, тага, изненадување, страв и гадење. На секое видео лицето е снимено како глуми една од емоциите, притоа изговарајќи една од претходно дефинираните реченици.

Бидејќи емоциите се преставени со шест различни класи на емоции, системот за препознавање на емоции претставува класификатор со кој на секој влезен сигнал треба да му се додели една од дадените класи на емоции која тој сигнал ја претставува. Посебен класификатор е креиран за секое лице одделно затоа што визуелните карактеристики во голема мера зависат од лицето. За креирање на универзален класификатор, потребно да се користат различни визуелни карактеристики кои се независни од лицето.

Секое видео, за секое лице, е поделено на големи сегменти од по 1 секунда. За секој сегмент звучните и визуелните карактеристики од лицето се пресметуваат како што е претходно објаснето. Визуелните карактеристики се пресметуваат за една од сликите дадена во големиот сегмент. Глобалните звучни карактеристики се пресметуваат за секој голем сегмент, претходно пресметувајќи ги локалните карактеристики на малите звучни сегменти на кои тој е поделен.

За секое лице има дефинирано посебна база на податоци со околу 200 податочни инстанци. Секоја база на податоци се користи за креирање на класификатор на емоции за тоа лице. Податочните инстанци од секоја база се поделени на две множества: тренирачко множество и тест множеството. Моделот се тренира користејќи го тренирачкото множество, а другото се користи за евалуација.

Секоја податочна инстанца содржи 98 вредности кои ги претставуваат 65-те визуелни карактеристики и 33-те звучни карактеристики. Бројот на карактеристики е релативно голем споредбено со бројот на инстанци во базата дефинирана за секое лице. Затоа се користи техника за намалување на димензионалноста на просторот на карактеристики и метода за селекција на карактеристиките. Направени се експерименти со следните алгоритми за селекција на карактеристики: „Селекција на најдобро множество“ (Best set selection), „Селекција напред“ (Forward selection), „Селекција наназад“ (Backward selection). Но, резултатите добиени со примена на овие методи не дадоа добри резултати. Причината за тоа е големата корелација меѓу пресметаните визуелни карактеристики, т.е. податоците за точките на лицето. За да се елиминира големата линеарна корелација меѓу податоците се користи техника која ги трансформира податоците во податоци со помала димензија. Тука направени се експерименти со следните техники: „Анализа на главни компоненти“ (Principal component analysis, PCA) и „Линеарна дискриминантна анализа“ (Linear discriminant analysis, LDA). LDA користи и информација за аотација на инстанците со емоционалната класа, за разлика од PDA. Јасно е дека трансформациите направени со LDA дадоа подобри резултати и оттука оваа техника беше користена понатаму за намалување на димензионалноста на пресметаните карактеристики. LDA се користеше посебно за различни групи од карактеристики, како што се: карактеристиките за точките на лицето од левото око, карактеристики за носот, сите карактеристики за устата, сите звучни карактеристики базирани на интензитет, итн. Вкупно беа дефинирани 14 различни категории од кои 8 за визуелните карактеристики и 6 за звучните карактеристики. Користејќи го овој пристап, трансформираните податоци содржат посебни карактеристики за носот, устата, висината на тонот, итн. LDA

овозможува генерички пристап кон добивање на трансформирани податоци без користење на дополнително знаење за податоците. Недостатокот на оваа техниката е тоа што вака добиените податоци не можат лесно да се интерпретираат. Со примената на LDA, за секое лице креирана е база на податоци која содржи 62 различни карактеристики, и тоа 40 визуелни и 20 звучни.

### 3.1.3 Опис и евалуација на моделот за препознавање емоции

Процесот на креирање на класификатор на емоции почнува со екстракција на податоците од звучниот и визуелниот сигнал. Потоа податоците се предпроцесираат и трансформираат, каде финално секој сегмент од видеата од времетраење од една секунда е претставен со 62-димензионален вектор. Класификаторот за перцепција на емоции има за задача да ја класифицира секоја вака дефинирана податочна инстанца, во една од 6-те основни емоции на Ekman.

Неколку алгоритми за класификација се тестирани во експерименталната фаза со цел да се најде најпогоден алгоритам за дадениот класификациски проблем. Експериментите за моделот се направени во програмската околина за статистички методи и графици - R [155]. Направени се тестови со следните алгоритми:

1. К најблиски соседи (K-nearest neighbour),
2. Дрва на одлучување (Decision trees),
3. Невронски мрежи (Neural networks),
4. Машини со поддржувачки вектори (SVM).

Најдобри резултати се добиени со SVM. Да забележиме дека и во други наши истражувања истиот алгоритам даде најдобри резултати при креирање на модел за регресија [47] во решавање на проблем поврзан со детекција на грешки [66, 47]. Оттука, понатаму евалуирани се подетално само моделите креирани со SVM. Направена е анализа на класификаторите добиени со различни влезни податоци. Имено, креирани се класификатори кои препознаваат емоции само од карактеристиките на фацијалната експресија и само од карактеристиките на говорот. Понатаму, креиран е и еден класификатор кој ги користи за влез и двата типови на податоци заедно. Направена е споредба меѓу нив за да се одреди со кое множество на влезни податоци се добива модел со најголема моќ за препознавање емоции.

За споредба на класификаторите ќе се користат статистичките мерки:

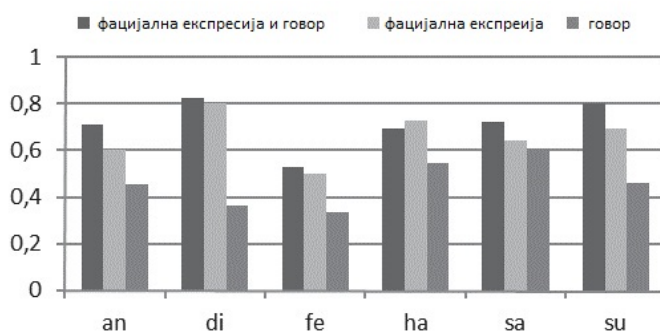
1. Прецизност (позитивна предвидувачка вредност): пропорцијата од сите позитивно препознаени случаи кои се точно идентификувани.
2. Сензитивност (вистинска позитивна стапка): пропорција од вистинските позитивни случаи кои се точно идентификувани.

Овие метрики се пресметуваат посебно за секоја емоциска категорија, па така се добива прецизност и сензитивност за гнев, гадење, страв, среќа, тага, и изненадување. На пример, прецизноста за емоцијата среќа е пропорција од бројот на сите случаи препознаени како среќа кои се анотирани навистина како среќа. Слично, сензитивност за емоцијата среќа е пропорција од бројот на случаите анотирани како среќа кои се точно препознаени како среќа.

Прецизноста и сензитивноста прво се пресметуваат за секоја инстанца од тест множеството. Потоа за секое видео од податочното множество, користејќи ги



i Просечна прецизност



ii Просечна сензитивност

Слика 1: Просечна прецизност и сензитивност по емоциски категории на класификаторите добиени со различни влезни податоци: карактеристики од фацијална експресија и карактеристики од говор, карактеристики само од фацијална експресија и карактеристики само од говор.

резултатите од класификаторот добиени за секоја инстанца од видеото, се креира распределба на веројатности за препознавање на секоја од дефинираните емоции. Оттука, за секое видео се одредува која е најверојатната емоција препознаена со класификаторот. На овој начин, препознавањето на емоции се пресметува за поголем временски интервал, во времетраење од 20тина секунди колку што во просек трае едно видео. Претпоставката е дека емоциите се премногу комплексни за да можат да се препознаат точно на помали временски интервали. Всушност, во голем дел од сликите извлечени од сегментите на видеото нема многу информација. При пресметката на најверојатната емоција, редоследот на инстанците во базата на податоци не е земена предвид. Претпоставка е дека редоследот на промената на карактеристиките на човековите мимики и звучни карактеристики е различен при изговарање на различни реченици. Имајќи ја предвид оваа претпоставка, временското подредување на инстанците не е значајно за препознавање на емоциите од видеата. Со наведената постапка, за секој класификатор за препознавање на емоции креиран за едно лице од базата на податоци, се пресметуваат статистичките мерки. Тие се пресметуваат знаејќи ги точната аотирана емоција и препознаената емоција за секое видео.

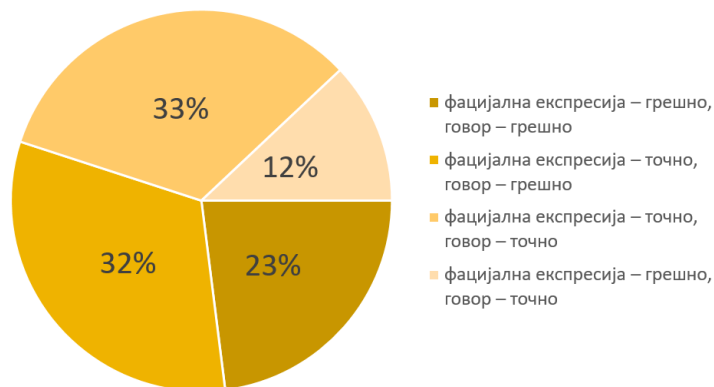
Прецизноста и сензитивноста на Слика 1 се пресметани како просечни вредности на сите класификатори креирани за секое лице од базата на податоци. Како што е очекувано, класификаторот кој користи повеќе податоци, т.е. оној базиран и на карактеристики од фацијална експресија и на карактеристики од говор, дава најдобар резултат. Во овој случај, комбинирањето на податоци од

два различни типови придонесе за подобрување на класификацискиот модел каде просечната прецизност е 71.4%. Меѓу класификаторите кои користат само еден тип на податоци, моделот базиран на карактеристики од фацијалната експресија има поголема прецизност од околу 66.2% од оној базиран на карактеристиките од говор кој има прецизност од само 46%. Ниската прецизност на класификаторот базиран само на карактеристики од говор може да е резултат на податочното множество кое не изобилува со разноликост во податоците. Од друга страна, звучните податоци имаат повеќе шум, а тука не е применет алгоритам за отстранување на шум. Покрај тоа, треба да се земе предвид дека во видеата од базата на податоци, лицата само глумат одредена емоција. Оттука, емоцијата можеби не е доволно добро изразена преку говорот, споредбено со изразот преку фацијална експресија. Уште едно објаснување на пониската прецизност на класификаторите кои користат само карактеристики од говор е изборот на звучни карактеристики кој се користи во предложениот пристап. Направената анализа на прецизноста и сензитивноста на класификаторите кои се базираат само на карактеристики на фацијална експресија и само на карактеристики од говор ни дава информации за својствата на овие класификатори. Сепак, потребни се подетални анализи користејќи повеќе различни податочни множества.

Од друга перспектива, на графиците дадени на Слика 1, дадени се прецизноста и сензитивноста за секоја емоција посебно: гнев (an), гадење (di), страв (fe), среќа (ha), тага (sa), и изненадување (su). Класификаторот кој користи само карактеристики од фацијална експресија има висока прецизност за емоциите среќа (81.3%), тага (76.1%) и гнев (74.4%). Едно објаснување е дека во карактеристиките за фацијална експресија има повеќе значајни информации за овие емоциски категории. Од друга страна, класификаторот кој користи само карактеристики од говор најдобро ја препознава емоцијата гнев. Во овој случај, и покрај тоа што прецизноста за емоцијата гнев е релативно висока, повеќе од 50% од видеата означени со емоцијата гнев се погрешно препознаени во друга емоциска категорија, т.е. класификаторот има ниска сензитивност за емоцијата гнев. Класификаторите кои користат само карактеристики од говорот имаат прецизност помала од 50% за преостанатите емоциски категории. Овие резултати потврдуваат дека користејќи ги само карактеристиките од говорот, класификаторот има лоши перформанси за сите емоции поединечно.

Стравот е емоцијата која има најмала прецизност и сензитивност во класификацијата. Имено, прецизноста за класификација на емоцијата страв е околу 40% дури и во случајот кога се користат комбинирани карактеристиките од фацијалната експресија и говорот. Истата емоција има и најмала сензитивност. Ова може да сугерира дека нема доволно информација за оваа емоција во извлечените карактеристики или дека самата емоција потешко се разликува од другите во дадената база на податоци. Друга емоционална категорија со пониска прецизност е емоцијата гадење, но во овој случај грешките во препознавање на емоцијата гадење се помали имајќи предвид дека сензитивноста на класификаторот е околу 80%. Сензитивноста на класификаторите за емоцијата гадење е поголема од сензитивноста за сите други емоции во случаите кога се користат карактеристиките од фацијалната експресија. Ова укажува дека постојат некои карактеристики од фацијалната експресија кои можат да се поврзат само со емоцијата гадење. Друга емоција која има висока сензитивност кога се користат карактеристиките од фацијалната експресија е изненадувањето. Во случајот кога се користат карактеристиките од говорот најголема сензитивност има емоцијата тага. Имено, околу 60% од видеата означени со тага се точно препознаени од класификаторот.

Анализирајќи ги графиците на Слика 1 може да се забележи дека некои



Слика 2: Категоризација на тест инстанците базирана на резултатите од класификациските модели чии влезни податоци ги вклучуваат карактеристиките од фацијална експресија и звучните карактеристики.

емоции подобро се класифицираат само од карактеристиките на говорот, а други само од карактеристиките на фацијалната експресија. За подобра споредба меѓу класификаторите од двата типа кои ги користат двата различни извори на податоци (карактеристики од фацијалната експресија и од говорот) креиран е графикот даден на Слика 2. Тука се дадени процентите на податочни инстанци кои се точно или грешно класифицирани од класификаторите кои ги користат различните извори на податоци. Може да се види дека кај 23% од инстанците погрешна е класификацијата и со двата класификатори кои имаат различни извори на податоци. Најголем дел од инстанците (33%) точно се класифицирани од двата типови на класификатори, а во слично толкав процент (32%) од инстанците класификацијата е точна само во случајот кога се користат карактеристики од фацијалната експресија.

Направената анализа на класификатори кои се базираат посебно на двата различни извори на влезни податоци укажува дека со комбинација на двата извори на податоци може да се добие подобар класификатор. Класификаторот кој ги користи и двата извора, кој е предложен тука, навистина дава подобри перформанси од оние кои користат само еден извор на податоци. Овој класификатор ги користи излезите од SVM-класификаторите кои се базираат само на карактеристики од фацијалната експресија и само на карактеристики од говорот. Потоа, за секое видео се одредува најверојатната емоција каде иста тежина им се дава на резултатите добиени од двата типа на класификатори. Во просек прецизноста на класификаторот е 71.4%. Уште подобри перформанси може да се добијат ако се користат информациите за значајноста на карактеристиките при препознавањето на секоја емоција. Сепак, ова не е предмет на понатамошно истражување, затоа што добиениот модел дава доволно добри перформанси за нашите потреби.

## 3.2 Емоционално базирано однесување

### 3.2.1 Поттикнувачко учење

Во машинското учење, покрај парадигмите на надгледувано и ненадгледувано учење, постои и таканаречено поттикнувачко учење (Reinforcement learning, RL). Парадигмата на поттикнувачко учење е инспирирана од бихевиористичката психологија која се однесува на тоа како дете учи нова задача [137]. Имено, кога дете

учи нова задача тој добива позитивен фидбек ако успешно ја изврши задачата, или пак добива негативен ако не успее да ја изврши задачата. На сличен начин, во пристапот на поттикнувачко учење се користи концептот на награда како поттик за интелигентниот агент да научи како да се однесува во својата околина. Имено, агентот постојано е во интеракција со околината и тој добива награда или казна, зависно од тоа како се однесува. Целта на поттикнувачкото учење е интелигентните агенти да научат да ги избираат акциите така што ќе ја максимизираат вкупната награда, или минимизираат вкупната казна, која ќе ја добијат во својот „живот“. Главната карактеристика на поттикнувачкото учење е што овозможува агентот да научи како да се однесува без тоа да е експлицитно зададено. Учењето се базира на знаењето кое агентот го стекнува во своето искуство или пак кое може да се добие со симулација. Токму поради оваа карактеристика, однесувањето на роботот базирано на емоции моделирано во оваа докторска работа се базира на оваа парадигма.

Математичката рамка за проблемот кој го решава поттикнувачко учење може да се дефинира преку Марков процес на одлучување (Markov Decision Process, MDP). Марковиот процес на одлучување е случаен (стохастички) процес за контрола во дискретно време. Следно, ќе дадеме краток вовед за случајните процеси.

Велиме дека  $\{X_t, t \in T\}$  е случаен процес, ако  $X_t$  е случајна променлива дефинирана на даден простор на веројатност  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  за секој  $t \in T$  [167], а параметарското множество  $T$  не е празно. Посебен тип на случаен процес е Марковиот процес, кој го задоволува таканареченото Марково својство дадено со следното равенство [167]:

$$P\{X_{t_n} < x_n | X_{t_{n-1}} = x_{n-1}, \dots, X_{t_1} = x_1\} = P\{X_{t_n} < x_n | X_{t_{n-1}} = x_{n-1}\} \quad (3.1)$$

Равенството (3.1) важи за секој избор вредности  $x_1, x_2, \dots, x_n$  на случајната променлива и вредности на параметарот  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , каде  $n \geq 3$  и  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ . Кај процесите кои го исполнуваат Марковото својство важи дека ако е позната вредноста  $x_{n-1}$  на процесот во моментот  $t_{n-1}$ , тогаш распределбата на  $X_{t_n}$  не зависи од вредностите на процесот пред моментот  $t_{n-1}$ . Кај случајни процеси со дискретно време (discrete-time stochastic process), промените се случуваат во дискретни моменти. Во овој случај, параметарското множество  $T$  е дискретно, па случајниот процес може да се претстави со  $\{X_n, n \in \mathbb{N}\}$ . Марковото својство кај случајните процеси со дискретно параметарско множество е дадено со следното равенство:

$$P\{X_n < x_n | X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_1 = x_1\} = P\{X_n < x_n | X_{n-1} = x_{n-1}\} \quad (3.2)$$

Зависно од природата на случајните променливи  $X_t$  кои влегуваат во процесот  $\{X_t, t \in T\}$ , процесот може да биде дискретен или апсолутно непрекинат. Многу популарен тип на процеси се случајните процеси со дискретна распределба и со дискретно параметарско множество кои се нарекуваат вериги на Марков. Посебен случај на веригите на Марков се конечните вериги на Марков кои имаат конечно множество вредности на случајната променлива. Со веригите на Марков можат да се опишат процеси во природата кои го опишуваат функционирањето на разни физички системи кои имаат дискретно множество состојби, каде промените се случуваат во дискретни моменти на време и каде веројатноста во даден

момент  $t_n$  системот да се најде во некоја состојба зависи само од тоа во која состојба системот бил во непосредно претходниот момент  $t_{n-1}$  [167]. Како примери за овие физички системи се биолошки системи, технички системи, општествени системи, и многу други меѓу кои и роботски системи. Во контекст на овие системи,  $X_n$  ја означува состојбата на системот која се појавила во  $n$ -тата промена. Нека множеството вредности на случајната променлива  $X_n, n \in \mathbb{N}$  е дадено со множеството вредности  $\{1, 2, 3, \dots\}$ . Тогаш, Марковото својство кај процесите претставени како вериги на Марков е дадено со следното равенство (3.3) кое важи за секое  $n \in \mathbb{N}, n \geq 3$  и произволен избор на  $k_1, \dots, k_{n-2}, i, j \in \{1, 2, \dots\}$ .  $P(i, j)^{(n)}$  е пресликување, со кое се означува веројатноста на премин од состојба  $i$  во состојба  $j$  во  $n$ -тиот момент на промена. Кај системите претставени преку конечни вериги на Марков, системот може да има една од  $s$ -те состојби, а множеството вредности на состојбата на системот е дадено со  $\{1, 2, 3, \dots, s\}$ .

$$P\{X_n = j | X_{n-1} = i, X_{n-2} = k_{n-2}, \dots, X_1 = k_1\} = P\{X_n = j | X_{n-1} = i\} = P(i, j)^{(n)} \quad (3.3)$$

Имајќи предвид дека со пресликувањето  $P(i, j)^{(n)}$  е претставена веројатност, за валидно пресликување потребно е да важат следните својства:

$$0 \leq P(i, j)^{(n)} \leq 1, i, j \in \{1, 2, \dots, s\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^s P(i, j)^{(1)} = 1, i \in \{1, 2, \dots, s\} \quad (3.5)$$

Во случајот кога пресликувањето  $P(i, j)^{(n)}$  не зависи од  $n$ , т.е. веројатноста на премин од една состојба во друга не зависи од моментот кога се случила промената, велиме дека станува збор за хомогена верига на Марков. Во овој случај  $P(i, j)^{(n)} = P(i, j), \forall n$ , па пресликувањето  $P(i, j)$  може да се претстави во матрична форма која се нарекува матрица на веројатности на премин за еден чекор. Понатаму во текстот кога зборуваме за Маркова верига всушност ќе зборуваме за хомогена Маркова верига, освен ако не е наведено поинаку.

Марковиот процес на одлучување е и контролен процес. Преку контролни процеси можат да се опишат процесите на разни динамички системи, каков што е и роботскиот систем. При оптимална контрола на еден динамички систем, целта е да се дефинираат контролните променливи во текот на времето така што објективната функција е оптимална. На пример, објективната функција може да биде да се минимизира цената за извршување на задачата на системот. Контролни променливи можат да бидат акциите кои треба системот да ги изврши. На овој начин, целта е да се дефинираат акциите кои треба да ги изврши системот во текот на времето така што објективната функција да е оптимална.

Марковиот процес на одлучување претставува проширување на Маркова верига, во која се вклучени и променливи кои ги опишуваат акциите во системот, како и наградите на системот врз чија основа се базира оптимизацијата на контролниот процес. Формално, Марковиот процес на одлучување е подредена четворка од  $(S, A, P_a, R_a)$ , каде:

1.  $S$  е множество состојби
2.  $A$  е множество акции
3.  $P_a(s, s')$  е веројатност дека изведувањето на акцијата  $a$  во состојба  $s$  во време  $t$  ќе доведе до премин во состојба  $s'$  во време  $t + 1$



4.  $R_a(s, s')$  е непосредната награда која се добива по премин од состојба  $s$ , во состојба  $s'$  по изведување на акцијата  $a$

Затоа што кај Марковиот процес на одлучување временските моменти од процесот се дискретни, вредностите од параметарското множество може да се означат со  $t$ , каде  $t \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ . Имајќи ја во предвид оваа нотација, состојбата во време  $t$  се означува со  $s_t$ , а акцијата изведена во време  $t$  со  $a_t$ . Во динамички систем, како што е роботскиот систем, контролата ја има агентот, т.е. роботот. Велиме дека во процесот на одлучување агентот ги донесува одлуките. Во даден временски момент, процесот се наоѓа во состојба  $s$ , а агентот за донесување одлуки избира акција  $a$ . Процесот одговара така што во следниот временски момент процесот се наоѓа во состојба  $s'$  и притоа агентот добива соодветна награда за изборот на акцијата  $a$  во состојба  $s$  дадена со  $R_a(s, s')$ . Следната состојба  $s'$  зависи од тековната состојба  $s$  и од избраната акција  $a$ , но за дадени  $s$  и  $a$  следната состојба условно не зависи од сите претходни состојби и акции. Оттука, преминот на состојби го задоволува Марковото својство, поради што велиме дека процесот има меморија од прв ред.

Целта на Марковиот процес на одлучување е да се најде добра политика за донесување одлуки со која агентот ги избира акциите. Поради Марковото својство, политиката за одлучување  $\pi$  се дефинира како функција само од состојбата. Со оваа функција состојбата се пресликува во акција која агентот треба да ја изврши ( $\pi(s)$ ). Со вака дефинирана политика, одлуката не зависи од историјата, ако е позната тековната состојба. Објективната функција која треба да се оптимизира во процесот на одлучување е поврзана со наградите. Имено, целта на Марковиот процес на одлучување е да се избере политика која ќе ја максимизира очекуваната вкупна сума од награди која ќе ја добие агентот. Формално, вкупната сума од награди на агентот се дефинира со формулата (3.6).

$$\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R_{a_t}(s_t, s_{t+1}) \quad (3.6)$$

Параметарот  $\gamma$  е тежински фактор за значајноста на наградата. Помала вредност на параметарот овозможува поскоро да се изведат акциите и да не се одложуваат на неопределено. При тоа акцијата која се изведува во чекорот  $t$  се добива од дадената политика  $\pi$ , а распределбата на веројатностите за премин од состојба  $s_t$  во  $s_{t+1}$  по изведување на акцијата  $a_t$  е дадена со  $P_{a_t}(s_t, s_{t+1})$ . Политиката која ја максимизира очекуваната вкупна сума на награди се нарекува оптимална политика и се означува со  $\pi^*$ . Еден Марков процес на одлучување може да има повеќе оптимални политики.

Агентот е постојано во интеракција со околината и со посетување на некоја состојба и извршување на некоја акција, агентот добива соодветна награда. Оттука, во даден момент, агентот ја знае само тековната награда, но има информација и за сите претходно добиени награди. Сепак, во даден момент агентот не ги знае наградите кои би ги добил во иднина. За да може агентот да ја избере најдобрата акција за дадена политика  $\pi$ , се дефинира вредносна функција за секоја состојба  $V^\pi(s)$ . Вредносната функција се дефинира како очекувана награда која ќе ја земе агентот во иднина со изведување на акциите следејќи ја политиката  $\pi$ , ако тековно агентот се наоѓа во состојба  $s$ . Вредносната функција ја определува подобноста на секоја состојба.

За даден Марков процес на одлучување, може да се дефинираат следните проблеми:

1. Проблем на предвидување: Да се научи вредносната функција  $V^\pi(s)$  за дадена политика  $\pi$ .
2. Проблем на контрола: Да се најде оптимална политика  $\pi^*$  со која се максимизира очекуваната награда.

Постои тесна врска меѓу овие два проблеми. Имено, ако се реши проблемот на предвидување тогаш, оптималната политика може да се дефинира како политика според која во дадена состојба  $s$  агентот ќе ја изведе онаа акција која ќе ја максимизира оптимизациската функција која зависи од непосредно следната награда која ќе ја добие агентот и вредносната функција на следната состојба во која ќе премине агентот по изведување на акцијата. Во општ случај, политиката  $\pi$  може да биде детерминистичка или стохастичка. Кај детерминистичката политика  $\pi(s) = a, a \in A$ , т.е. следната акција која агентот треба да ја изведе според политиката  $\pi$  е точно детерминирана. Од друга страна, кај стохастичката политика  $\pi$  претставува случајна променлива.

И двата дадени проблеми, проблемот на предвидување и проблемот на контрола, можат да се решат користејќи го методот на поттикнувачко учење. Кај поттикнувачкото учење, моделот на процесот не е познат, па веројатностите за премин меѓу состојбите  $P_a(s, s')$  и наградите  $R_a(s, s')$  не се експлицитно зададени. Наместо тоа, веројатностите можат да се определат експериментално со (на пример) симулатор кој може да го симулира агентот во околината. На пример, со симулаторот може да се одреди следната состојба и непосредната награда по секоја извршена акција на агентот. Доволно е со симулаторот да може да се одреди само еден следен чекор. Да забележиме дека состојбите и наградите можат да бидат и стохастички, што значи дека можат да претставуваат и случајни променливи.

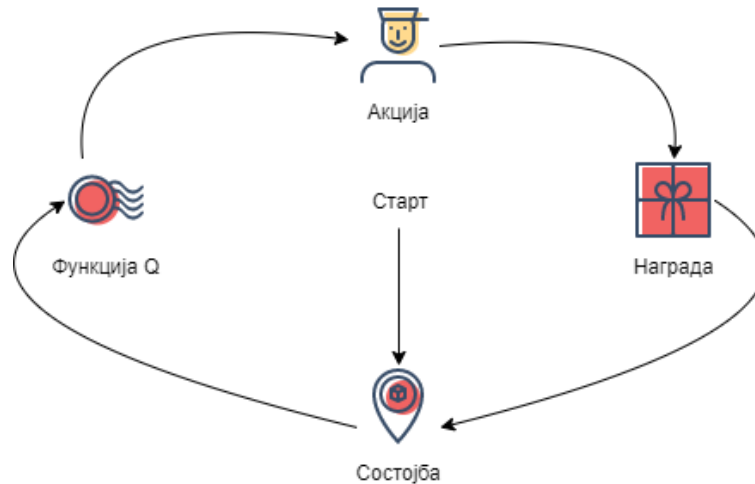
Како моќен алгоритам за поттикнувачко учење, ние ќе го користиме алгоритмот  $Q$ -учење. Овој алгоритам може да се користи во случајот кога премините се случуваат со одредена веројатност и кога наградите се случајни променливи. Во основата на овој алгоритам е да се научи пресликувањето  $Q$  што претставува функција од дадена акција ( $a$ ) и дадена состојба ( $s$ ). Имено,  $Q^\pi(a, s)$  ја претставува очекуваната вкупна награда која агентот ќе ја добие во иднина ако тој е во состојба  $s$ , следно ќе ја изврши акцијата  $a$  и понатаму ќе ја следи политиката  $\pi$ . Формално, за дадена политика  $\pi$  и случајна променлива  $R_{a_t}$ , која ја претставува наградата која ја добива агентот во чекорот  $t$ , важи равенството (3.7).

$$Q^\pi(s, a) = E\left[\sum_{j=0}^{\infty} \gamma^j R_{a_{t+j}}(s_{t+j}, s_{t+j+1}) \mid s_t = s, a_t = a\right] \quad (3.7)$$

Да забележиме дека постои тесна поврзаност меѓу функцијата  $Q$  и вредносната функција  $V$  која е дефинирана со следното равенството (3.8), каде  $\pi(a|s)$  ја претставува веројатноста агентот да ја изведе акцијата  $a$  кога тој е во состојба  $s$ .

$$V^\pi(s) = \sum_{a \in A} \pi(a|s) Q^\pi(s, a) \quad (3.8)$$

Функцијата  $Q$ , а ниту политиката  $\pi$ , не се однапред познати, па со  $Q$ -учењето всушност експлицитно се учи  $Q$ , а имплицитно се учи политиката  $\pi$ . Имајќи предвид дека со определување на функцијата  $Q$ , може да се определи и функцијата  $V$  користејќи го равенството (3.8), со  $Q$ -учењето паралелно се решаваат проблемот на предвидување и проблемот на контрола.



Слика 3: Графички приказ на редослед по кој се добиваат нови вредности во итеративниот процес на Q-учење.

Со Q-учењето, агентот се наоѓа во почетна состојба  $s_0$  и почнува со почетни вредности за функцијата  $Q$  дадени со  $Q^0$ . Потоа, со текот на времето, агентот учи и ги ажурира вредностите на функцијата  $Q$ . Графички приказ на редоследот по кој се добиваат нови вредности во процесот на Q-учењето е даден на Слика 3. Во почетната состојба  $s_0$ , агентот избира една акција  $a_0$ , по што добива наградата  $r_0$  и доаѓа во следна состојба  $s_1$ . Потоа се ажурира пресликувањето  $Q$ , од  $Q^0$  во  $Q^1$ , користејќи го равенството во (3.9), каде  $\gamma$  е тежински фактор за наградата,  $0 < \gamma < 1$ , а  $\alpha$  е стапката на учење. Во состојба  $s_1$  агентот повторно избира следна акција  $a_1$  и добива соодветна награда  $r_1$ , по што се ажурира  $Q^2$ . Постапката се повторува итеративно во следните чекори, а за ажурирање на  $Q$  се користи равенството во (3.9).

$$Q^{t+1}(s_t, a_t) = Q^t(s_t, a_t) + \alpha[r_t + \gamma \max_{a \in A} Q^t(s_{t+1}, a) - Q^t(s_t, a_t)] \quad (3.9)$$

Да забележиме дека дадената постапка на ажурирање на функцијата  $Q$  не зависи директно од веројатностите за премин меѓу состојбите  $P_a(s, s')$  и наградите  $R_a(s, s')$ . Наместо тоа наградите и состојбите се одредуваат во секоја итерација на постапката во дадената околина. Околината може да биде симулирана или пак да биде реална околина, па во секоја итерација се добиваат конкретни вредности за добиените награди  $(r_0, r_1, \dots)$  и следните состојби  $(s_1, s_2, \dots)$ . При користење на симулатор учењето на функцијата  $Q$  ќе биде побрзо, додека учењето кое се случува во реална околина ќе биде побавно.

За избор на акциите се користи политика која се менува паралелно со промена на функцијата  $Q$ . Политиката  $\pi$  која се користи при Q-учењето е стохастичка политика, наречена  $\epsilon$  - алчна политика. При тоа,  $1 - \epsilon$  е веројатноста агентот да ја избере најпогодната акција, а  $\epsilon$  е веројатноста случајно да избере акција од останатите акции. Кога агентот се наоѓа во состојба  $s$ , најпогодната акција е онаа акција  $a \in A$  за која тековната дефиниција на  $Q$  има најголема вредност и може да се пресмета со равенството (3.10).

$$\pi(s) = a_{max}, \text{ ако } Q(s, a) \leq Q(s, a_{max}) \forall a \in A \quad (3.10)$$

Главната цел на Q-учењето е преку точно дефинирана постапка агентот да успее да ја научи најпогодната функција  $Q$  која ќе обезбеди оптимална политика

$\pi$ . Докажано е дека  $Q$ -учењето може да ја најде оптималната политика за селекција на акција за секој даден конечен Марков процес на одлучување, земајќи дека има бесконечно време за истражување и дека се користи политика која е случајна (каква што е  $\epsilon$  - алчна политика) [106]. Во случајот кога  $\epsilon$  е 0, ако наградата е негативна тогаш вредноста на  $Q(s, a)$  се намалува, па следниот пат кога агентот е во состојба  $s$  ќе има помала веројатност да ја избере истата акција  $a$ . Во спротивно, ако наградата е позитивна, следниот пат во слична ситуација агентот со уште поголема сигурност ќе ја изведе истата акција. Со ваков пристап учењето може да заглави во некоја неоптимална функција  $Q$  поради тоа што другите можности за акции не се (доволно) истражени. Позитивна вредност на  $\epsilon$  овозможува понекогаш агентот да не ја избере најпогодната акцијата, туку дека некогаш (со веројатност  $\epsilon$ ) следната ќе се избере на случаен начин и ќе овозможи агентот да бара и друго решение така што ќе истражува. Всушност, при поттикнувачко учење, изборот на акција е баланс меѓу два концепти [81]:

1. истражување на непознатите околности и
2. користење на тековното знаење.

Истражувањето овозможува агентот да пробува акции за кои не го знае исходот, а со користењето на тековното знаење агентот извршува акции за кои знае дека ќе го однесат поблиску до целта. Да забележиме дека вредноста на  $\epsilon$  може да се дефинира и како функција зависна од времето. Имено, вредноста на  $\epsilon$  може да се намалува со текот на времето, така што на почетокот агентот почесто ќе избира акција на случаен начин и ќе ги истражува опциите.

Поттикнувачкото учење може да се имплементира како онлајн учење, со што агентот постојано учи, или офлајн учење, со што агентот прво учи, а потоа само делува во околината користејќи го стекнатото знаење. Во апликација за интеракција човек-робот, посакувано е агентот, во овој случај роботот, да учи како што се однесува. Затоа тука е имплементирано онлајн поттикнувачко учење. Да забележиме дека со секоја нова итерација роботот ќе ја подобрува функцијата  $Q$  и политиката  $\pi$ .

### 3.2.2 Опис на роботскиот модул за однесување

Еден модул во роботскиот систем е одговорен за донесување одлуки, т.е. селекција на следните акции. Овој модул се базира на концептот на поттикнувачко учење, а имплементацијата е направена користејќи го алгоритмот  $Q$ -учење. Со овој алгоритам, роботот во реално време ќе учи како да се однесува учејќи ја најпогодната политиката на однесување. Како што беше претходно објаснето за таа цел постојано ќе се ажурира  $Q$ -функцијата.

За имплементација на овој алгоритам неопходно е да се дефинираат состојбите на роботот  $S$ , како и акциите кои роботот може да ги изведе  $A$ . Формално множеството состојби е дефинирано со  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_S}\}$ , каде  $N_S$  е бројот на состојби. Во множеството акции, пак, има  $N_A$  типови на акции, т.е.  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{N_A}\}$ . Со алгоритмот за учење, роботот всушност учи кој тип на акција треба да го изведе. За секој тип на акција може да се дефинираат конечен број на акции. На пример со  $A_{i,j}$  е означена  $j$ -тата акција дефинирана за типот  $A_i$ . Состојбите и акциите подетално ќе бидат дефинирани во Глава 4 каде ќе стане збор за конкретна роботска апликација. Последно треба да се дефинираат наградите кои ќе ги добива роботот по секоја изведена акција. Наградите всушност ќе зависат од емоции. Поточно, наградата која роботот ќе ја добие по изведување

на некоја акција ќе зависи од емоцијата која е перцепирана кај лицето со кое роботот е во интеракција непосредно по изведување на акцијата. Перцепцијата не емоции е имплементирана во модулот за перцепција на емоции која што се базира на карактеристики од фацијалната експресија и на карактеристики од говор. Подетално, овој модул беше дефиниран во Поглавје 3.1.

Согласно на имплементација на перцепцијата на емоции, за секоја од емоциите на Екман, се определува соодветна веројатност. Со тоа ја имаме веројатноста корисникот да чувствува гнев  $p_{an}$ , гадење  $p_{di}$ , страв  $p_{fe}$ , среќа  $p_{ha}$ , тага  $p_{sa}$  и изненадување  $p_{su}$ . Притоа важи дека сумата на овие веројатности е 1. Користејќи ја оваа информација роботот ќе може да одреди колку корисникот е задоволен со претходните акции на роботот. За таа цел, се дефинира награда  $R$  која роботот ќе ја добие, а која зависи од веројатностите пресметани во модулот за перцепција (Равенка (3.11)). Имено, наградата претставува тежинска сума од веројатностите за перцепција на секоја од емоциите на Екман, каде со  $w_e$  се претставени тежинските фактори за секоја од емоциите. Слична формулација е дефинирана во [88] со таа разлика што множеството емоции кои може да се перцепираат е различно.

$$R = \sum_{e \in \{an, di, fe, ha, sa, su\}} w_e p_e \quad (3.11)$$

При дефиницијата на тежините треба да се земе предвид обоеноста на емоциите. Емоциите среќа и изненадување се позитивно обоени емоции, додека емоциите гнев, гадење, страв и тага се негативно обоени емоции. Наградата треба да има поголема вредност ако е поголема веројатноста емоцијата на корисникот да е позитивна, затоа што тоа ќе значи дека роботот претходно извел акција која е погодна за корисникот. Обратно, наградата треба да има помала вредност ако е поголема веројатноста емоцијата на корисникот да е негативна, што означува дека не е задоволен од непосредното однесување на роботот. Затоа, тежините на позитивно обоените емоции ќе бидат поставени на 1, додека тежините на негативно обоените емоции на -1. Оттука, позитивна наградата ќе означува задоволство кај корисникот од претходната роботска акција, додека негативната ќе означува негодување. Оттука наградата на роботот по секоја извршена акција ќе може да се пресмета со формулата:

$$R = (p_{ha} + p_{su}) - (p_{an} + p_{di} + p_{fe} + p_{sa}) \quad (3.12)$$

### 3.3 Емоционален модул

Емоционалната состојба  $er_n$  на роботот во чекор  $n$ , која се разликува од емоционалната состојба препознаена кај човекот со кој роботот е во интеракција, се одредува во таканаречениот емоционален модул. Емоцијата на роботот е дефинирана како категориска променлива со три можни вредности означени со 1, 2 и 3 кои ја претставуваат обоеноста на емоцијата, т.е. важи (3.13). Вредноста 1 ја претставува негативната обоеност, 2 е неутрална обоеност и 3 е позитивна обоеност. Емоционалната состојба на роботот понатаму ќе се користи во роботскиот модел за да се овозможи емоционално однесување на роботот. Повеќе детали за ова се дадени во Поглавје 3.5.

$$er_n \in \{1, 2, 3\}, \forall n \in \mathbb{N} \quad (3.13)$$

Емоционалната состојба на роботот е дефинирана преку Скриен Марков Модел (Hidden Markov model, HMM). Нека  $\{ER_n, n \in \mathbb{N}\}$  и  $\{EP_n, n \in \mathbb{N}\}$  се случајни процеси со дискретно време со дискретно множество вредности, каде  $ER_n$  ја претставува емоционалната состојба на роботот, а  $EP_n$  ја претставува емоционалната состојба на човекот која ја препознал роботот во  $n$ -тиот чекор. Според формалната дефиниција [69], ќе велиме дека парот  $\lambda = (ER_n, EP_n)$ , каде  $n \geq 1$ , претставува Скриен Марков Модел ако:

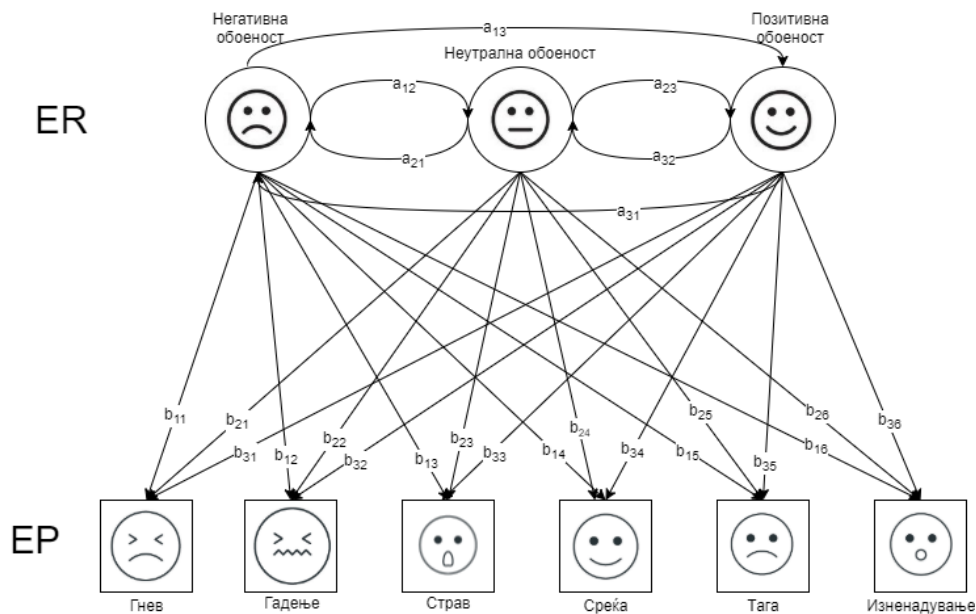
- $ER_n$  е Марков процес чие однесување е „скриено“ и не може директно да се набљудува, т.е. процесот го задоволува Марковото својство
- Распределбата на веројатности на  $EP_n$  не зависи од вредностите на  $ER$  пред  $n$ -тиот чекор, ако е позната вредноста на  $ER$  во чекорот  $n$ , т.е. задоволено е својство на независност на излезот.

Споменавме дека случајните променливи  $ER$  и  $EP$  се дискретни случајни променливи. Состојбите на случајната променлива  $ER$  се нарекуваат скриени состојби. Скриените состојби се однесуваат на можните вредности на емоционалната состојба на роботот: негативна обоеност, неутрална обоеност и позитивна обоеност. Од друга страна множеството вредности на дискретната случајна променлива  $EP$  се однесуваат на основните емоции дефинирани од Ekman, т.е. гнев, гадење, страв, среќа, тага и изненадување. Оттука важи:  $ep_n \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ . Овие вредности се нарекуваат набљудувани состојби. Во дадениот случај овие состојби можат да се набљудуваат затоа што роботот може да ги одреди емоциите на лицето со кое што зборува при процес на перцепција на емоции.

Визуелен приказ за HMM моделот кој ќе се користи за одредување на емоционалната состојба на роботот е даден на Слика 4. Во горниот ред на сликата се дадени скриените состојби на  $ER$ , а во долниот се дадени набљудуваните состојби на случајната променлива  $EP$ . Покрај нив во моделот се прикажани и параметрите  $b_{ij}$ , наречени излезни веројатности, со кои е дефинирана зависноста меѓу случајните променливи  $ER$  и  $EP$ . На пример со  $b_{36}$  е претставена веројатноста човекот да ја има емоцијата изненадување, ако роботот има позитивна емоционална обоеност. Понатаму, дадени се и веројатностите за премин од една во друга скриена состојба  $a_{ij}$ . На пример, со  $a_{23}$  се означува веројатноста за премин од состојба на неутрална обоеност во состојба на позитивна обоеност.

Покрај овие параметри во моделот дефинирани се и параметри кои ја определуваат почетната распределба на веројатности на скриените состојби  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)$ . Да забележиме дека  $\pi_1$  ја означува веројатноста процесот  $ER$  на почетокот да се најде во состојба на негативна обоеност, а на сличен начин се идентификуваат и другите параметри. Оттука важи дека  $0 \leq \pi_i \leq 1, \forall i \in \{1, 2, 3\}$ . За овие параметри треба да важи дека нивната сума е еднаква на 1 за да може истите да претставуваат распределба на веројатности. Во овој модел ќе претпоставиме дека почетната распределба на веројатности има рамномерна распределба, па затоа важи:  $\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 = 1/3$ .

Користејќи го овој модел, имајќи информација за емоцијата кај човекот препознаена од роботот, ќе може да ја одредиме емоционалната состојба на роботот и таа емоција потоа ќе биде изразена во следната акција на роботот. Со HMM моделот дефинирана е тесна поврзаност меѓу емоцијата на човекот и емоцијата на роботот. За да може да се користи овој модел за одредување на емоционалната состојба на роботот треба да се познати параметрите на моделот  $\lambda$ . Во оваа докторска работа параметрите за даден робот ќе бидат пресметани користејќи симулирани податоци. Повеќе детали за определувањето на параметрите на Скриениот Марков Модел се дадени во Глава 4.

Слика 4: Скриен Марков Модел за емоционалната состојба  $ER$ .

Според [134] еден од проблемите кои може да бидат разгледувани со НММ е проблемот на декодирање. Целта на овој проблем е да се најде најдобрата низа од скриени состојби  $ER_1, ER_2, \dots, ER_N$  за даден модел и набљудувани состојби  $EP_1, EP_2, \dots, EP_N$ , каде со  $N$  е означен бројот на чекори изведени во процесот. Решавајќи го овој проблем после  $N$  изведени чекори ќе може да се одреди најподобната низа од емоционални состојби на роботот. Во нашиот случај, доволно ни е во секој чекор да ја најдеме најподобната емоционална состојба на роботот, т.е. најверојатната скриена состојба,  $EP_n$  после секој чекор  $n$ , каде  $n = 1, 2, \dots, N$ . За таа цел ќе го користиме познатиот алгоритам Viterbi кој се користи за декодирање кај НММ. Овој алгоритам се базира на концептите на динамичко програмирање и решението се наоѓа чекор по чекор решавајќи ги сумарните вредности кои се пресметуваат во секоја итерација. Текот за изведување на овој алгоритам е даден во следниот пасус.

Во секоја итерација  $n$  од алгоритамот Viterbi се пресметуваат вредностите  $v_n(j), j \in \{1, 2, 3\}$ , каде со  $j$  е означена емоционалната состојба на роботот: 1 (негативна обоеност), 2 (неутрална обоеност) и 3 (позитивна обоеност). Вредноста  $v_n(j)$  ја претставува веројатноста дека Скриениот Марков Модел  $\lambda$  е во состојба  $j$ , откако претходно се познати првите  $n$  вредности на набљудувани состојби ( $ep_1, ep_2, \dots, ep_n$ ) и ако при тоа се земени предвид најверојатните вредности на скриените состојби во претходните чекори ( $er_1, er_2, \dots, er_{n-1}$ ) [80]. Со примена на алгоритамот Viterbi вредностите  $v_n(j)$  се пресметуваат рекурзивно со формулата дадена со Равенка (3.14). Во првата итерација  $v_1(j)$  се пресметува користејќи ја формулата во Равенка (3.15).

$$v_n(j) = \max_{i=1}^3 v_{n-1}(i) a_{ij} b_{j,ep_n} \quad (3.14)$$

$$v_1(j) = \pi_j b_{j,ep_1} \quad (3.15)$$

Откако во  $n$ -тата итерација ќе се пресметаат веројатностите  $v_n(j)$ , тогаш може да се одреди најверојатната емоционална состојба на роботот  $er_n$  како состојба за која веројатноста  $v_n(j)$  е максимална:

$$er_n = \operatorname{argmax}_{i=1}^3 v_n(i) \quad (3.16)$$

Користејќи го Viterbi алгоритмот за дадена низа од набљудувани состојби, може да се најде најверојатната низа од скриени состојби. Во емоционалниот модул алгоритмот ќе се применува по секој чекор, т.е. прво по добивање на информација на една набљудувана состојба, потоа после првите две набљудувани состојби итн., т.е. за  $N = 1, 2, \dots$ . На овој начин по секој чекор се одредува најподобната емоционална состојба на роботот  $er_n$  користејќи ја равенката (3.16). Да забележиме дека со примена на оваа постапка најподобната низа од скриени состојби не е во општ случај иста со низата која би се добила ако се познати сите набљудувани состојби одеднаш  $ep_1, ep_2, \dots, ep_n$ . Сепак, дефинираната постапка е неопходна за да може да се најде емоционалната состојба на роботот во секоја итерација. Имајќи ја предвид тековната низа од познати набљудувани состојби, со дадената постапка во секој чекор се наоѓа најподобната тековна емоционална состојба која ќе може да ја изрази роботот.

### 3.4 Емоционална меморија

Во меморијата на роботот се чуваат информации за:

1. состојба на робот
2. карактер на робот
3. емоционално зависни искуства од интеракција




Сите овие информации, на експлицитен или имплицитен начин, се под влијание на емоции. Во следните параграфи подетално ќе биде објаснето како секоја информација се чува во меморијата на роботот и како истата може да се промени.

Состојба на роботот ја вклучува тековната состојба на роботот  $s_n$  и емоционалната состојба на роботот  $er_n$  во чекорот  $n$ . Состојбата на роботот  $s_n$  е поврзана со прагматичната задача на роботот во интеракцијата. Оваа состојба на роботот се користи во роботскиот модул за однесување опишан во Поглавје 3.2.2. Состојбите на роботот кои се користат во модулот за однесување во апликацијата на роботот дадена во оваа докторска тема ќе бидат прецизно опишани во Глава 4. По изведување на секоја следна акција на роботот, состојбата на роботот  $s_n$  и емоционалната состојба на роботот  $er_n$  можат да се променат.

Карактерот на роботот се однесува на својства специфични за роботот. Имено различни роботи, кои имаат ист модел, може да имаат различен карактер кој ќе го определи нивното однесување. Во моделот на роботот, информациите кои го определуваат карактерот на роботот се запишани во меморијата. Податоците во меморијата припаѓаат во групата на податоци кои не се менуваат. Тие се поставуваат на почетокот со креирањето на роботот и во текот на целокупната активност на роботот остануваат непроменети. Во моделот на роботот дефиниран тука податоците кои го определуваат карактерот на роботот се параметрите од кои зависи однесувањето на роботот. Листата на овие параметри ги вклучува:

- Параметрите користени при дефиниција на Скриениот Марков Модел за емоционалната состојба на роботот: веројатности за премин  $a$  и излезни веројатности  $b$
- Параметрите користени при учење: тежински фактор за наградата  $\gamma$ , стапка на учење  $\alpha$  и веројатност за избор на следна акција на случаен начин  $\epsilon$



		Роботски акции						
		$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	...	$A_{i,j}$		
Емоционална состојба на робот	Негативна обременост		$m_{1,1,1}$	$m_{1,1,2}$	$m_{1,1,3}$	...	$m_{1,i,j}$	...
	Неутрална обременост		$m_{2,1,1}$	$m_{2,1,2}$	$m_{2,1,3}$	...	$m_{2,i,j}$	...
	Позитивна обременост		$m_{3,1,1}$	$m_{3,1,2}$	$m_{3,1,2}$	...	$m_{3,i,j}$	...

Слика 5: Шематски приказ на табелата  $M_{positive}$ .

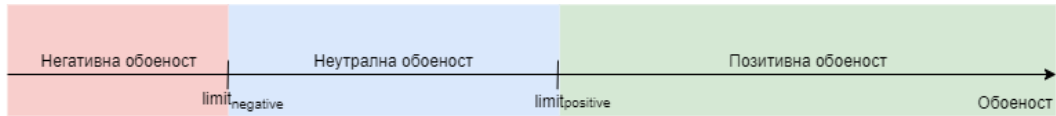
Параметрите кои го опишуваат карактерот на роботот ќе бидат дефинирани за конкретна апликација во Поглавје 4.2.1.

Последен елемент во меморијата на роботот се емоционално зависните искуства од интеракцијата. Тука се чуваат информации за тоа во која емоционална состојба бил роботот кога ја изведувал секоја од преддефинираните акции, како и дали човекот бил успешен при давање одговор на таа акција. Да забележиме дека ова не е врзано со типот на акција на роботот  $A_i, i \in \{1, 2, \dots, N_A\}$  туку со конкретната акција  $j$  од дадениот тип  $i$  означена со  $A_{i,j}$ . По изведување на секоја акција на роботот и по добивање на одговор од лицето со кое роботот е во интеракција во следниот чекор од интеракцијата, во меморијата се ажурира соодветната информација. Во меморијата се чува колку пати во досегашната интеракција роботот бил во емоционална состојба  $ER$  и ја извел акцијата  $A$ , за сите вредности на променливите  $ER$  и  $A$ . Овие податоци се чуваат во две едноставни дводимензионални табели  $M_{positive}(EP, A)$  и  $M_{negative}(EP, A)$  кои ги претставуваат искуствата поврзани со позитивен (успешен) и негативен (неуспешен) одговор од лицето од интеракцијата, соодветно. На почетокот на интеракцијата вредностите во двете табели се поставуваат на 0, а потоа секвенцијално се ажурираат. Шематски приказ на табелата  $M_{positive}$  каде се чуваат емоционално зависните искуства од интеракцијата во кои лицето имало успешен одговор е даден на Слика 5. Да забележиме дека на сличен начин е дефинирана и табелата  $M_{negative}$ .

Овој дел од меморијата се користи при селекција на следната акција која роботот треба да ја изведе. Имено, роботот ќе ја избере следната акција врз база на своето емоционално базирано искуство. Повеќе детали за модулот кој ја прави селекцијата на акциите се дадени во Поглавје 3.6. Меморијата на роботот трае само една сесија на интеракција човек-робот. При секоја следна интеракција овој дел од меморијата на роботот се брише.

### 3.5 Однесување базирано на емоции

Зависно од емоционалната состојба на роботот, истиот може да ја изрази емоцијата преку акциите кои ги изведува. Акциите зависат во голема мера од самиот хардвер на роботот и од актуаторите кои ги поседува, но и од самата апликација.



Слика 6: Графички приказ на пресликување на емоционалната состојба на роботот во бојата на лед светилките при изразување емоции.

Имајќи го предвид роботот Nao и неговиот дизајн, како и целната апликација на роботот да се користи првенствено за интеракција дете-робот, во нашата работа емоциите ќе бидат изразени преку говорот на роботот, како и преку бојата на лед светилките.

Роботот Nao е опремен со лед светилки на двете очи. Имено, секое око има 8 лед светилки распределени така што формираат круг. Лед светилките можат да светат во црвена, сина или зелена боја. Зависно од емоционалната состојба на роботот  $e_t$  поставени се едноставни правила за тоа во која боја треба да светат лед светилките. Врската меѓу емоционалната состојба на роботот и бојата на очите на роботот е дадена а Слика 6. На дадената слика трите можни вредности на емоционалната состојба на роботот се претставени на еднодимензионална оска која ја претставува обоеноста на емоцијата. Бојата во позадина на секоја прикажана емоционална состојба ја претставува бојата во која треба да светат лед светилките во таа емоционална состојба. На пример, кога роботот има позитивна обоеност на емоциите, лед светилките треба да светат во зелена боја, а кога има негативна обоеност во црвена боја.

Иако роботот Nao има вграден генератор на говор, истиот не е погоден за македонски јазик. За да може апликацијата на роботот да ја користат деца, би било пожелно говорот на роботот да е на македонски јазик. Затоа, говорот на роботот Nao во дадената апликација е дефиниран со претходно снимени звучни записи. Од сите реченици кои роботот треба да ги изговори, направена е селекција да се изберат оние реченици чија содржина е природно поврзана со некоја емоција. Овие реченици, кога тие се снимени, запазено е истите да бидат изразени со вклучена експресија на емоција. За пример може да ги погледнеме речениците дадени на Табела 3.1. Текстот „Браво“ е снимен со изразување на позитивно обоена емоција како што е среќа. Да забележиме дека овие реченици се даваат како фидбек за лицето со кое роботот е во интеракција и служат да ја збогатат интеракцијата со емоции. Сепак овие реченици не влијаат на остварување на прагматичната задача на роботот. Целта на изразување на емоциите во говорот е да се даде дополнителна информација на лицето со кое роботот е во интеракција за тоа каква е емоционалната состојба на роботот. Подетално за примената на ваков тип на фидбек од роботот е опишано во Поглавје 4.2.2.

Да забележиме дека покрај акциите поврзани со говорот и со лед светилките, роботот може да изведува и акции поврзани со движење. Сепак во овие акции не е вклучена експресија на емоции. Сите акции на роботот може да се дефинираат поспецифично зависно од апликацијата на роботот. Детали за акциите дефинирани во апликацијата креирана во оваа докторска работа ќе бидат прикажани во Глава 4.

Табела 3.1: Листа на реченици изразени со емоција.

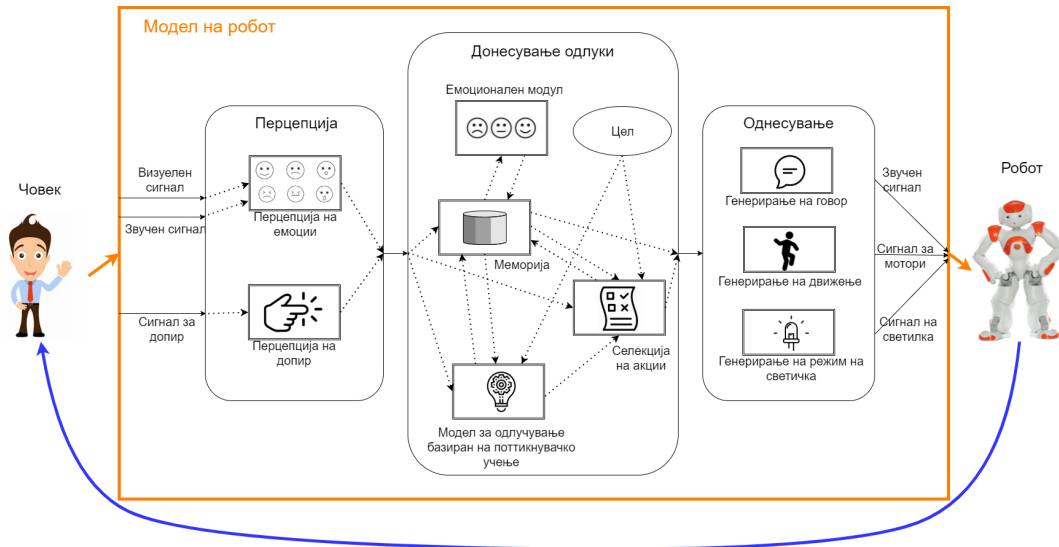
Текст	Емоционална состојба
Браво!	Позитивна обоеност
Ајде! Следен пат, можеш и подобро.	Позитивна обоеност
Ајде, продолжуваме!	Позитивна обоеност
Во ред.	Негативна обоеност
За жал ова не е точен одговор.	Негативна обоеност
Да продолжиме.	Негативна обоеност
Добро е.	Неутрална обоеност
Ова не е точно.	Неутрална обоеност
Ќе продолжиме со следната активност.	Неутрална обоеност

### 3.6 Формална дефиниција на роботскиот модел

Шематски приказ на архитектурата на предложениот модел на роботско однесување е даден на Слика 7. Моделот на роботот е прикажан во портокаловиот правоаголник. Овој модел на однесување е наменет да се користи во директна интеракција човек-робот. Влезот во моделот се сигналите со кои роботот го перцепира однесувањето на човекот, а излезот од моделот се сигналите со кои роботот ги изведува акциите. Акциите кои ги изведува роботот влијаат на целата околина, па и на човекот со кој тој е во интеракција. Имено, човекот може со своите сетила да види, слушне и почувствува што направил роботот.

Архитектурата на моделот на роботот има три слоја: „Перцепција“, „Донесување одлуки“ и „Однесување“, кои соодветствуваат на три од компонентите дефинирани во генеричкиот модел на однесување кој вклучува емоции дефиниран во Поглавје 2.3.2 и кој шематски е прикажан на Слика 5. Слоевите се дефинирани така што излезот од првиот слој „Перцепција“ е влез во вториот слој „Донесување одлуки“, додека излезот од овој слој е влез во третиот слој „Однесување“. Секој од овие слоеви ќе бидат подетално објаснети во следните пасуси.

Слојот за перцепција е одговорен за пресметување на значајни информации од перцепцијата за лицето со кое роботот е во интеракција. За таа цел, на влез се примаат визуелните сигнали, кои претставуваат слики од изгледот и однесувањето на лицето, звучни сигнали, кои претставуваат звук од говорот на лицето, и сигнали за допир, кои ја претставуваат физичката интеракција меѓу човекот и роботот. За добивање на овие сигнали, потребно е роботот да е опремен со соодветни сензори: камера за визуелните сигнали, микрофон за звучните сигнали и сензор за допир за сигналите за допир. Во овој слој има два модула со кои паралелно се процесираат влезните сигнали. Првиот модул, наречен „Перцепција на емоции“, е модулот во кој е вклучен концептот на емоции, додека другиот модул е независен од емоциите, но потребен за остварување на задачите на роботот. Модулот за перцепција на емоциите ја одредува емоционалната состојба на лицето со кое роботот е во интеракција. Детали за овој модул беа наведени во Поглавје 3.1. Овој модул користи комбинација од визуелни и звучни сигнали за да може на излез да даде информација за емоционалната состојба на лицето. Во модулот за перцепција на допир се проследуваат информациите кои се однесуваат на тоа дали имало физичка интеракција меѓу човекот и роботот. Поточно, дали човекот го допрел роботот, но исто така и каде точно, на кој дел од телото на роботот. Да забележиме дека во моделот на роботот не е вклучен модул за препознавање на говор. Со тоа роботот може само да разбере како



Слика 7: Архитектура на предложениот роботски модел.

човекот се чувствува преку перцепција на емоциите, а за да може човекот да пренесе некоја едноставна команда или информација до роботот човекот може да ја користи интеракцијата со допир. На пример, интеракцијата со допир може да се користи за човекот да одговори на дадено прашање. На овој начин допирот на роботот може да означува потврден одговор, а инаку роботот ќе добие негативен одговор. Како точно ќе се користи оваа информација ќе биде процесирано во слојот „Донесување одлуки“.

Во слојот за донесување одлуки се случува резонирањето на роботот, поточно планирањето и одлучувањето на следните чекори. Однапред зададен и непроменлив елемент во овој слој е компонентата „Цел“ каде има информации за целта на роботот. Во овој модел, целта на роботот е од една страна лицето со кое роботот е во интеракција да биде задоволен од интеракцијата, а од друга страна да биде задоволена прагматичната цел на интеракција. Прагматичната цел на интеракцијата на пример може да биде роботот успешно да ја извршува задачата на учител во интеракцијата човек-робот. Во општ случај прагматичната цел зависи од самата апликација, па подетално таа ќе биде дефинирана во Глава 4. Целта на роботот која се однесува на задоволството кај корисникот од интеракцијата е поврзана со емоционалната состојба на човекот која е перцепирана, па оттука таа претставува емоционално-базирана цел.

Информацијата за целта на роботот се користи како влез во модулите „Модел за одлучување базирано на поттикнувачко учење“ и „Селекција на акции“. Подетално првиот модул беше претставен во Поглавје 3.2.2. Влез во овој модул се информациите кои доаѓаат од слојот „Перцепција“ и се однесуваат на емоционалниот фидбек од човекот кој се користи за учењето. Емоционалниот фидбек е всушност базиран на информацијата за препознаената емоција кај човекот. Излезот од овој модул е типот на акцијата која роботот треба следно да ја изведе за да се подобри вкупната идна награда за роботот. Работата на овој модул е базирана и на тековната состојба на роботот  $s$ . Откако е познат типот на акција која роботот треба да ја изведе, конкретниот избор на следна акција се случува во модулот „Селекција на акции“ каде се избира акцијата која роботот ќе ја изведе во следниот чекор, а која припаѓа на типот на акции кои претходно бил избран во моделот за одлучување. Модулот за селекција на акциите ја прави селекцијата врз основа на целта дефинирана за апликацијата на роботот, а

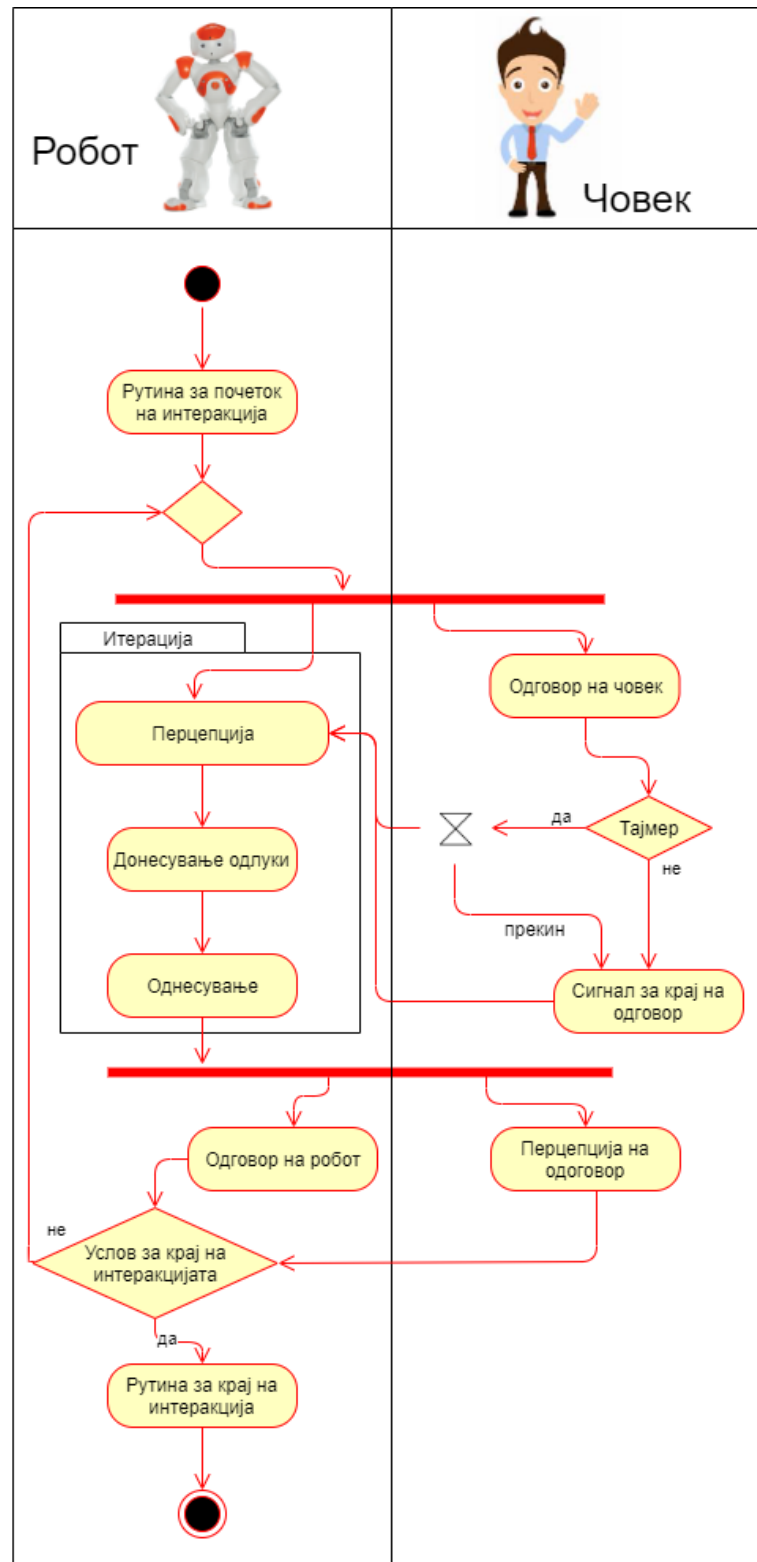
користејќи ги информациите од табелите  $M$  запишани во меморијата. По селекција на конкретната акција, соодветна трага од оваа информација се запишува во меморија каде соодветно се ажурираат табелите  $M$  дефинирани претходно во Поглавје 3.4. Прагматичната цел на роботот и процесот за селекција на акциите ќе бидат дефинирани специфично за апликацијата во Поглавје 4.2.

Покрај акцијата селектирана во модулот „Селекција на акциите“, во излезот од слојот за донесување одлуки се наоѓа и тековната емоционалната состојба  $er$  на роботот која е запишана претходно во меморијата на роботот. Одредувањето на емоционалната состојба на робот се случува во таканаречениот „Емоционален модул“ опишан во Поглавје 3.3.

Во последниот слој од моделот на роботот се генерира однесувањето на роботот. Однесувањето на роботот тука е имплементирано со три засебни модули одговорни за генерирање на говорот на роботот, генерирање на движење на роботот и генерирање на режим на светење на лед светилките на роботот. Однесувањето базирано на емоции е имплементирано како што е наведено во Поглавје 3.5 и се однесува на однесувањата на роботот поврзани со неговиот говор, како и светењето на лед светилките. Да забележиме дека емоциите не влијаат на движењата на роботот. Емоционалното влијание врз однесувањето на роботот е експлицитно. Имено, зависно од емоционалната состојба на роботот  $er$ , запишана во меморијата на роботот, роботот може да ги изведе селектираните акции од модулот за донесување одлуки на поинаков начин. На тој начин се добива и поголема разноликост во однесувањето на роботот. Модулот за однесување дава на излез конкретни информации во облик на звучен сигнал кој роботот треба да го изговори преку вграден звучник, сигнали за моторите со кои ќе се овозможи движење на роботот и сигнали за светилките со што тие ќе светат согласно саканиот режим. Сите овие сигнали стигаат до наведените излезни уреди вградени во самиот робот.

Роботскиот модел го користи концептот на емоции за перцепција, за донесување одлуки, за изведување на однесувањето, но исто така и за дефинирање на целта, во меморијата, во емоционалниот модул и при процес на учење. Оттука, во дадениот модел емоциите се користат во сите аспекти дадени во генеричкиот роботски модел дефиниран во Поглавје 2.3.2. Попрецизно, концептот на емоции се користи во модулите „Перцепција на емоции“, „Меморија“, „Цел“, „Емоционален модул“, „Модел за одлучување базиран на поттикнувачко учење“, „Генерирање на говор“ и „Генерирање на режим на светилка“ прикажани на Слика 7.

Интеракцијата меѓу роботот и човекот се изведува со еден итеративен процес. Опис на текот на една сесија на интеракција човек-робот е даден на Слика 8. Во интеракцијата посебна улога имаат роботот од една страна и човекот од друга страна. Интеракцијата почнува со рутина за почеток која ја изведува роботот. Потоа паралелно човекот одговара на рутината, додека роботот почнува со перцепција на околината, т.е. перцепција на однесувањето на човекот. По перцепцијата на роботот следи и изведувањето на активностите од другите два слоја од моделот на роботот (Слика 7). Овие активности на роботот сочинуваат една итерација на роботското однесување. По ова роботот ги изведува акциите давајќи соодветен одговор. Ако интеракцијата е завршена тогаш следно се изведува рутината за крај на интеракцијата. Интеракцијата човек-робот е завршена ако временското ограничување дадено за интеракцијата е завршена. Ако времето  $T$  го означува максималното време на интеракција, интеракцијата ќе заврши ако поминало време поголемо од  $T$ . Да забележиме дека паралелно додека роботот го дава својот одговор во интеракцијата, човекот го набљудува одговорот на роботот.



Слика 8: Дијаграм на активности на апликацијата за интеракција човек-робот.

По изведување на акциите на роботот почнува следната итерација во која на почетокот роботот врши перцепција собирајќи сигнали од активностите на човекот. Зависно од претходната акција на роботот, човекот дава соодветен одговор. Крајот на одговорот може да биде дефиниран преку тајмер или човекот треба на друг начин да даде сигнализација дека завршил со одговорот. По ова во слојот за перцепција се процесираат сигналите од активностите на човекот за време кога човекот дава одговор. Следи продолжување на итерацијата која завршува со соодветни акции на роботот.

Во следната Глава 4 ќе биде претставена апликација на роботот Nao во која Nao има улога на учител во интеракција дете-робот. Апликацијата е базирана на дијаграмот на активности даден на Слика 8, а моделот на однесување на роботот има архитектура прикажана на Слика 7.





## Глава 4

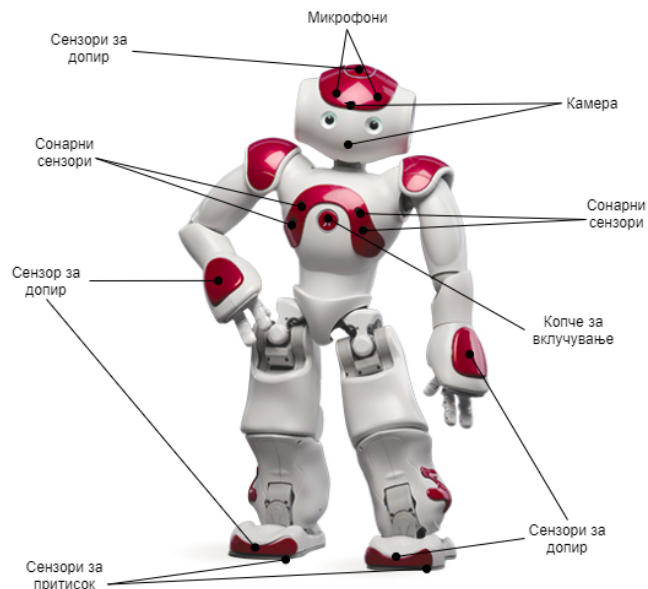
# Интеракција дете-робот: Nao како учител во интеракцијата

Во ова поглавје ќе биде опишана апликацијата за интеракција робот - дете која е креирана во рамките на оваа докторска дисертација. Апликацијата е креирана за роботот Nao и е базирана на моделот на роботско однесување опишан во Глава 3. Во следното поглавје ќе ги опишеме карактеристиките на роботот Nao. Дефиницијата и имплементацијата на апликацијата се дадени во Поглавје 4.2 и Поглавје 4.3, соодветно. Резултатите од анализата и евалуацијата на предложениот роботски модел во рамки на креираната апликација се дадени во Поглавје 4.4.

### 4.1 Спецификации за роботот Nao

Роботот Nao е робот со облик на тело на дете. Овој робот има две нозе, две раце, глава и торзо. Nao е висок околу 50cm и широк околу 27cm [123]. Опремен е со 14 мотори поставени на различни делови од телото што му овозможува движење. Имено, Nao може да ги движи нозете со моторите на зглобовите на стапалата, колената и колковите, рацете со моторите на зглобовите на дланките, лактите и рамената и може да ја движи главата со моторите на вратот. Овие мотори овозможуваат голема палета на движења, како што се одење, седнување, станување, стоење и позиционирање во различни пози и многу други движења. Покрај движењето, роботот Nao може и да зборува што е овозможено со двата звучника поставени на главата кај ушите на роботот. Роботот Nao има и повеќе лед светилки кои можат да светат во црвена, сина и зелена боја. Тие се поставени на главата, очите, ушите и стапалата.

За да може роботот да ја "чувствува" околината, тој е опремен со низа сензори (Слика 1). Nao може да слуша со помош на четири вградени микрофони поставени на главата на роботот, од кои два се напред, а два има позади. Nao има и две камери поставени на главата на роботот. Овие камери имаат резолуција до  $1280 \times 960$  пиксели при фреквенција од 30 слики во секунда. За подобро движење во околината роботот има два сонарни сензори поставени на торзото кои можат да се користат за одредување на растојанието на роботот до препреки во околината, како и сензори за притисок поставени на стапалата со кои може да се одреди рамнотежата на роботот. За интеракција со околината роботот Nao има и сензори за допир. Три сензори за допир се поставени на врвот на главата на роботот. Едниот е поставен напред, другиот назад, а последниот е поставен на средина. Овие сензори можат да регистрираат физички контакт преку регистрација на допир на соодветната локација каде е поставен сензорот. Покрај овие сензори, има и по три сензори за допир на двете раце, како и по два сензори на врвот



Слика 1: Роботот Нао со приказ на локацијата на дел од сензорите.

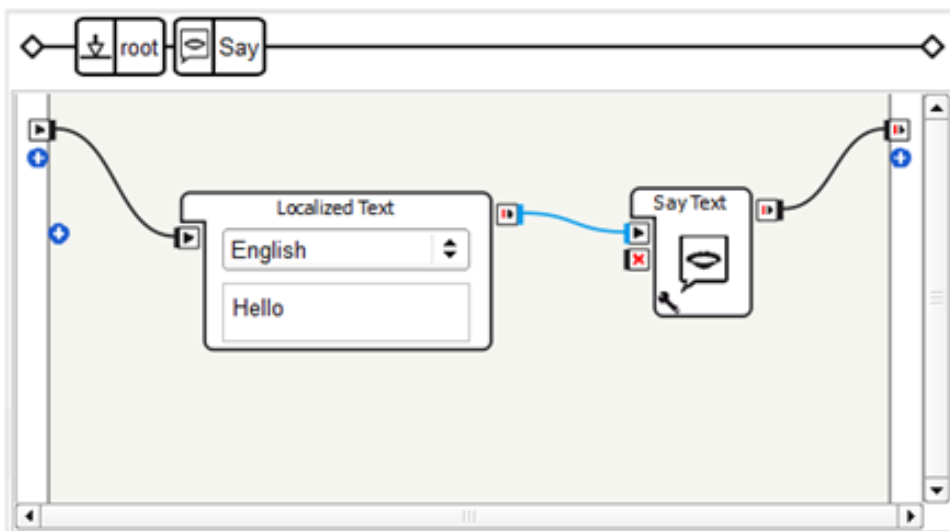
на стапалата. На градите на роботот поставено е и едно копче кое се користи за вклучување на роботот (Слика 1).

Роботот се контролира преку вграден контролер АТОМ Z530 кој се карактеризира со фреквенција на процесорот од 1.6 GHz, 1 GB РАМ меморија, 2 GB Флеш меморија и 8 GB Micro SDHC. Комуникацијата со роботот може да биде преку USB или WiFi. Главната примена на USB комуникацијата е за ажурирање на системот, додека WiFi комуникацијата се користи за комуникација на роботот со надворешен софтвер како што ќе биде опишано подолу. Роботот работи на батерии. Батериите се полнат на адаптер, а за полнење се потребни околу три часа. NAO може да се користи додека е вклучен во адаптерот, но батеријата ќе се полни само ако NAO се исклучи и се приклучи на адаптер.

Едно од најзначајните карактеристики на роботот Нао е тоа што може да се програмира. На највисоко ниво за програмирање на роботот се користи апликација Choreographer која овозможува едноставен интерфејс за контрола на роботот. Со помош на апликацијата, преку визуелен интерфејс, може да се креираат разни програми за роботот. Пример на една програма креирана во Choreographer е дадена на Слика 2. Програмата визуелно е прикажана како дијаграм од поврзани елементи (анг. Voxes) кои имаат одредена функционалност. Комуникацијата на роботот со апликацијата Choreographer се одвива преку WiFi. Во библиотеката на Choreographer се наоѓаат многубројни елементи поврзани со говор, движења, сензори, контрола на тек на програма, комуникација, лед светилки итн.

Во рамките на Choreographer, покрај стандардните функционалности, може да се додадат дополнителни или да се променат постоечките елементи во програмскиот јазик Python, со што се збогатуваат можностите за контрола на роботот. Уште повеќе Нао може да се програмира независно од Choreographer. За таа цел може да се користат програмските јазици Python и C++. Креираните програми, покрај на реалниот робот, можат да бидат тестирани и на симулациски робот.

За креирање на апликацијата за роботот Нао во оваа докторска работа ќе се користи програмскиот јазик Python2.7 и Python SDK верзија 2.1.4.13.



Слика 2: Приказ на програма креирана во Choreographer преку визуелен дијаграм со која Nao кажува "Hello" [123].

## 4.2 Дефиниција на апликацијата

Апликацијата креирана во оваа докторска работа е наменета за интеракција дете-робот. Примарната цел на роботот е детето со кое роботот е во интеракција да чувствува и покажува пожелна емотивна состојба. Оваа цел е емоционално - базирана и важи за сите апликации креирани врз база на моделот на роботот дефиниран во Глава 3.

Секундарната цел на роботот, што се однесува специфично на апликацијата, е роботот да овозможи едукација на детето со кое е во интеракција. Поспецифично едукативните цели кои може роботот да ги постигне се:

1. Запознавање со поими
2. Поттикнување на учење
3. Задржување на интерес
4. Мотивација на учителот

Првите две цели се однесуваат на тоа што учителот, во овој случај роботот, треба да го запознае ученикот со што повеќе нови поими и да му даде што повеќе нови задачи со кои ќе го поттикне ученикот да научи. Понатаму, учителот треба да го задржи вниманието на ученикот, при тоа секогаш внимавајќи колку ученикот го следи процесот на учење во интеракцијата. Последно, учителот треба да биде што повеќе мотивиран за да му го предаде знаењето на ученикот најдобро што може. Ова е поврзано со емоционалната состојба на учителот. Имено, кога учителот е среќен тогаш е повеќе мотивиран за предавање. Сите овие цели зададени на роботот како учител можат да се остварат со изведување на разни активности кои ќе бидат детално опишани во Поглавје 4.2.1.

### 4.2.1 Дефиниција на спецификациите за слојот на донесување одлуки

Во овој дел ќе ги претставиме деталите за слојот на донесување одлуки кои се специфични за креираната апликација. Во следните поглавја ќе се задржиме посебно на компонентите од овој слој.

### Модел за одлучување

За имплементација на моделот на одлучување опишан во Поглавје 3.2.2 потребно е да се дефинираат променливите во моделот. За таа цел тука ќе ги дефинираме состојбите  $S$  и типовите на акции на роботот  $A$ .

Апликацијата креирана во оваа докторска тема е поттикната од апликацијата за роботот Нао креирана во нашата претходна работа дадена во [88]. Тука ќе направиме проширување на истата идеја со што ќе се збогати апликацијата. Множеството на акции  $A$  вклучува четири различни типови на акции ( $N_A = 4$ ) кои може да ги изведе роботот по што роботот може да ја промени тековната состојба. Типовите на акции на роботот Нао се:

1.  $A_1$ : Изведи активност за предавање
2.  $A_2$ : Изведи активност за испрашување
3.  $A_3$ : Изведи активност за игра
4.  $A_4$ : Изведи слободна активност

Состојбите  $S = \{S_1, S_2, S_3\}$  на роботот се дефинирани врз основа на статусот на успехот при интеракцијата. Трите состојби на роботот се:

1.  $S_1$ : Неутрална
2.  $S_2$ : Успех
3.  $S_3$ : Неуспех

Во состојба „Неутрална“, роботот има информација дека немало активно учество од страна на детето во претходната активност од интеракцијата. Од друга страна, состојбите „успех“ и „неуспех“ означуваат дека претходната активност во интеракцијата била успешно или неуспешно спроведена. Со вака дефинираните акции и состојби, кога роботот изведува активност за игра, во следниот чекор роботот може да биде во една од состојбите зависно од реакцијата, т.е. одговорот на детето.

Во моделот за одлучување, во  $n$ -тата итерација се пресметуваат соодветно наградата која роботот ја добива роботот во претходниот чекор  $r_{n-1}$  и тековната состојба на роботот  $s_n$ . Наградата на роботот се пресметува според Равенка (3.12) каде за пресметка на наградата се користат информациите добиени од модулот за перцепција на емоции. Состојбата, пак, се пресметува согласно успешноста на интеракцијата. Откако роботот ќе изведе активност која бара одговор или акција од детето, детето дава соодветен одговор кој е перцепиран од роботот. Ако детето не дало одговор тогаш  $s_n = S_1$ , ако дало успешен одговор тогаш  $s_n = S_2$ , а ако одговорот не бил успешен важи дека  $s_n = S_3$ . Состојбата на роботот се одредува врз база на перцепцијата на роботот и е помогната од трето лице кое ја надгледува интеракцијата. Имено, откако детето ќе заврши со одговорот, третото лице му сигнализира на роботот дали детето успешно ја извело активноста. Сигнализацијата се одвива преку сензорите за допир поставени за главата на роботот, кои се процесираат во модулот за перцепција на допир (Слика 7). Попрецизно, сензорот за допир поставен во предниот дел на главата на роботот ќе означува успешен одговор од детето, сензорот во задниот дел на главата ќе означува неуспешен одговор на детето, а сензорот на средина ќе означува дека детето не дало одговор. За активностите кои не бараат одговор, на детето му се дава одредено време кое е мерено со тајмер за апсорбирање на информациите

добие ни од роботот. Состојбата на роботот ќе биде  $s_n = S_2$  ако помине времето за чекање на одговор без при тоа да биде прекинато одбројувањето на времето со сигнализација преку сензорите за допир. Имено, ако детето не е внимателно, третото лице кое ја надгледува интеракцијата ќе го активира сензорот за допир поставен во задниот дел на главата на роботот. Во ова сценарио состојбата на роботот ќе биде  $s_n = S_3$ . Текот на активностите на роботот и одговорот на детето се претставени и на дијаграмот на активности на Слика 8.

Со методот на  $Q$ -учење роботот треба да го научи пресликувањето  $Q$  во реално време. Ова ќе му овозможи на роботот да може да одреди кој тип на акција  $a_n \in A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$  треба да ја изведе во чекорот  $n$  за да се максимизира идната вкупна награда на роботот. Со секое подобрување на ова пресликување очекуваме дека во самата интеракција ќе се подобри редоследот на изведување на акциите на роботот така да детето биде задоволно. На овој начин интеракцијата ќе биде прилагодена на расположението на детето.

### Селекција на акции

Откако типот на акција  $a_n \in A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$  ќе биде одреден во модулот за одлучување, во модулот за селекција на акции се селектира една од акциите од избраниот тип. Согласно нотацијата опишана во Глава 3 се избира една од акциите  $A_{i,j}$  каде  $a_n = A_i$ .

Изборот за акцијата се прави така што ќе се одбере онаа акција со која роботот ќе биде поблиску до остарување на едукативните цели. Со оглед на тоа што целите на роботот се да го запознае детето со поими и да поттикне учење, следната акција ќе биде избрана така што во интеракцијата ќе се поминат успешно што е можно повеќе различни акции кои овозможуваат детето да се запознае со повеќе нови поими и да учи преку нови активности. Друга едукативна цел на роботот е роботот да го задржи вниманието на детето, па затоа во интеракцијата треба да се одбегнуваат оние акции за кои претходно детето не покажало интерес и не дало никаков одговор. Мотивацијата на наставникот да предава ќе биде поголема ако изведува акции кои му носат добри сеќавања. Оттука роботот ќе тежнее повеќе да ги изведува акциите кои му донеле позитивна емоционална обоеност во дотогашната интеракција.

Имајќи ги предвид опишаните цели и како истите може да се постигнат, ќе дефинираме функција која ќе ја пресметува цената  $C_{i,j}$  за изведување на секоја од акциите од избраниот тип  $i$ . Функцијата ќе зависи од информациите за тоа кои акции досега се изведени во интеракцијата, а кои ги има во меморијата  $M$ . Да забележиме дека меморијата поврзана со позитивни искуства ( $M_{positive}$ ) се однесува на искуствата кога детето било активно во интеракцијата и дало соодветен одговор на акцијата на роботот без разлика на точноста на одговорот. Меморијата ( $M_{negative}$ ) поврзана со негативен одговор на детето се однесува на ситуациите кога детето не дало никаков одговор на акцијата на роботот. Формулата за пресметување на цената на секоја акција е дефинирана со Равенка (4.1). Да забележиме дека цената на акцијата  $A_{i,j}$  се зголемува со секое нејзино изведување, па поради тоа при селекцијата на следната акција им се дава предност на нови акции кои не биле претходно изведени. Вториот член во збирот се однесува на бројот на акции кои имале неуспешен одговор од детето. Оттука, акциите за кои детето немало одговор, т.е. било незаинтересирано, имаат поголема казна. Коефициентот  $\frac{(4-k)}{4}$  зададен во формулата им дава различна тежина на акциите зависно од емоционалната состојба на роботот. Имено, тежината на акциите каде роботот имал позитивна обоеност на емоција е најмала, т.е.  $\frac{1}{4}$ , а за негативна

обоеност тежината е најголема, т.е.  $\frac{3}{4}$ . Согласно дадените тежини предност им се дава на оние акции за време на кои во изминатата интеракција роботот се чувствува позитивно.

$$C_{i,j} = \sum_{k=1}^3 \frac{(4-k)}{4} M_{positive}(k, i, j) + \sum_{k=1}^3 M_{negative}(k, i, j) \quad (4.1)$$

По пресметување на цената за сите можни акции, се одредува множеството на акции со најмала цена (Равенка (4.2)) од кое на случаен начин се избира една акција  $a_n \in A_{selection\_set}$  која ќе ја изведе роботот во чекорот  $n$ .

$$A_{selection\_set} = \{A_{i,j} | C_{i,j} \leq C_{i,k}, \forall k\} \quad (4.2)$$

### Меморија

Карактерот на роботот е вграден во меморијата на роботот. Карактерот е впишан во дел од параметрите кои се користат во моделот на роботот. Овие параметри беа претставени претходно, а во овој дел ќе ги дефинираме параметрите кои ќе се користат за карактерот на роботот во имплементираната апликација.

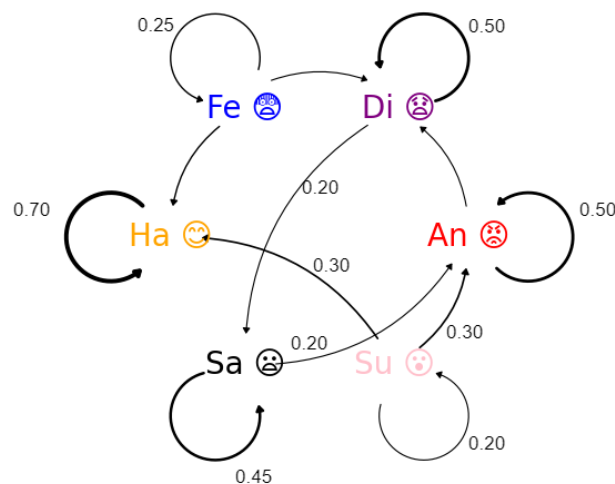
Прво ќе ги дефинираме параметрите кои се користат во Скриениот Марков Модел со кои е моделирана емоционалната состојба на роботот зависно од емоцијата препознаена кај лицето со кое роботот е во интеракција. Пресметката на параметрите  $a$  и  $b$  ќе биде изведена со алгоритмот „forward-backward“ (Baum-Welch) [16], кој претставува алгоритам за максимизација на подобност (Expectation - maximization algorithm) со кој параметрите на моделот можат да се научат од дадена низа набљудувани состојби. За таа цел ќе користиме симулирани податоци. Алгоритмот е итеративен, па во првата итерација се поставуваат почетни вредности за веројатностите  $a$  и  $b$ , а потоа во секоја итерација тие се ажурираат. Почетните вредности можат да бидат зададени експлицитно или пак да се одредат на случаен начин. Итерацијата се состои од два чекора: чекор на определување на очекувањето (E-чекор) и чекор на максимизација (M-чекор). Во E-чекорот се пресметуваат параметрите кои ја претставуваат очекуваната ситуација во итерацијата имајќи ги предвид тековните веројатности  $a$  и  $b$ , а во M-чекорот се користи новата набљудувана состојба од низата за да се направи корекција на параметрите  $a$  и  $b$ .

Симулацијата на набљудуваните состојби врз база на кои моделот ќе биде научен се однесува на симулација на емоционалните состојби на лица со кои роботот е во интеракција. За таа цел, емоционалните состојби на лицата се моделирани како хомогена Маркова верига, при што веројатностите на премин од една до друга емоционална состојба се експлицитно зададени. Истите се прикажани на Табела 4.1. За полесна визуелизација на транзициите на Слика 3 прикажани се само премините чија веројатност е најмалку 0.2. Може да се забележи дека освен за емоционалните состојби изненадување (Su) и страв (Fe), веројатноста емоцијата на лицето да не се промени е најголема. Потоа, значителна е веројатноста за премин од состојба на изненадување во состојба на среќа, како и веројатностите за премин од тага во гадење или гнев. Веројатностите за премин меѓу другите парови состојби е помала од 0.2, а детално може да се види на Табела 4.1.

Со симулација, на случаен начин, користејќи ги веројатностите на премин дадени на Табела 4.1 креирани се вкупно 30 примероци на низи од набљудувани состојби. Секоја низа има 100 елементи. Во 12 од низите, почетната состојба е среќа, во 8 почетната состојба е изненадување. Има по 1, 2, 3 и 4 примероци

Табела 4.1: Експлицитни веројатности на премин на емоционалната состојба на лице со кое роботот е во интеракција.

	An	Di	Fe	Ha	Sa	Su
An	0.5	0.2	0.1	0.05	0.1	0.05
Di	0.05	0.5	0.1	0.05	0.2	0.1
Fe	0.05	0.2	0.25	0.25	0.1	0.15
Ha	0.05	0.05	0.05	0.7	0.05	0.1
Sa	0.2	0.05	0.15	0.05	0.45	0.1
Su	0.3	0.1	0.05	0.3	0.05	0.2

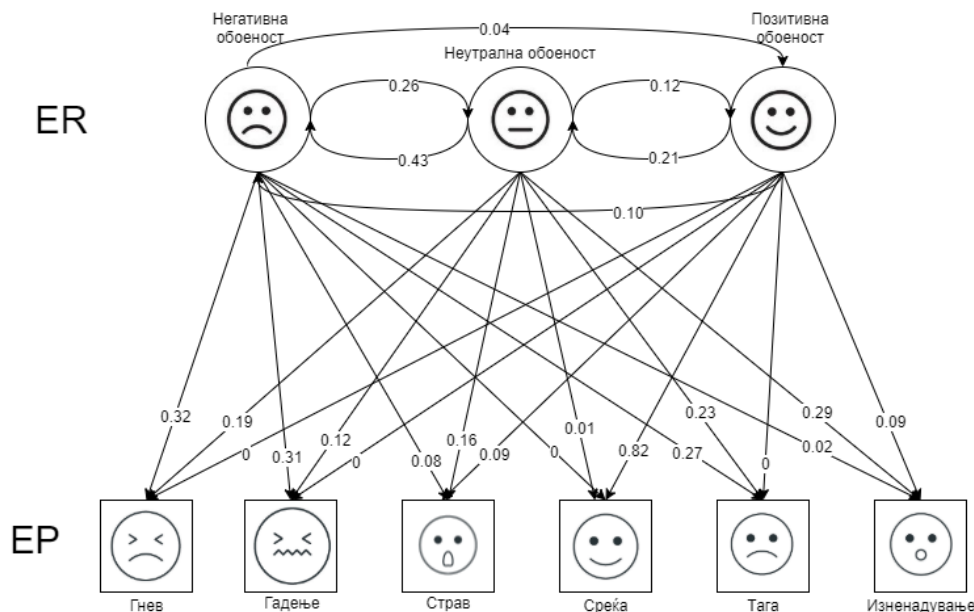


Слика 3: Визуелен приказ на експлицитните веројатности на премин на емоционалната состојба на лице со кое роботот е во интеракција со минимум веројатност од 0.2.

каде почетната состојба е гадење, гнев, страв и тага, соодветно. Овие податоци го претставуваат минатото „дискуество“ на роботот брз база на кое е изграден неговиот „карактер“.

За учење на параметрите на Скриениот Марков Модел се користи библиотеката „hmmlearn“ [71] во Python во која се имплементирани алгоритми и модели за учење на НММ. Користејќи ја библиотеката, за дефинирање на опишаниот модел се користи класата „MultinomialНММ“. За учење на параметрите во моделот се користи имплементираната функцијата "fit". При повик на функцијата се подесува и дека параметрите кои се однесуваат на веројатностите на премин и на излезните веројатности ќе бидат ажурирани со функцијата. На овој начин, користејќи ги претходно генерираните симулирани низи од набљудувани состојби, моделот е конечно научен. Потоа, истиот е зачуван во датотеки "a.txt" и "b.txt", во кој се зачувани информациите за научените параметри на моделот. Научените параметри се прикажани и визуелно на Слика 4.

Согласно научените параметри, кои го определуваат карактерот на роботот, веројатноста за премин од емоционална состојба со позитивна обоеност во истата состојба е 0.69. Слично, веројатноста за премин од состојба со негативна обоеност во состојба со негативна обоеност е 0.70, додека со веројатност од само 0.45 емоционалната состојба на роботот ќе премине од неутрална во неутрална состојба во следниот чекор. Понатаму, може да се забележи дека веројатноста



Слика 4: Вредности на параметрите на Скриениот Марков Модел дефиниран на Слика 4.

лицето да биде во состојба на гнев, гадење или тага, ако роботот имал позитивна емоционална обоеност е незначителна и близу до 0. Од друга страната со голема веројатност од 0.82 лицето биде среќно кога и роботот има позитивна обоеност.

Покрај овие параметри, во дел од карактерот се и параметрите за учење. Тука ќе дефинираме преддефинирани вредности за овие параметри. Имено, за тежинскиот фактор за наградата ќе земеме  $\gamma = 0.1$ , а за стапката на учење ќе земеме  $\alpha = 0.9$ . Вредност на  $\gamma$  блиску до 1 означува дека роботот ќе им даде поголема значајност на идните награди, а вредност блиску до 0 означува дека роботот дава поголема значајност на непосредните награди. Со дадената вредност на  $\gamma$  ќе се овозможи роботот да научи како да се однесува за да ја зголеми непосредната следна награда која треба да ја добие, т.е. ќе овозможи роботот да тежнее со секоја акција лицето со кое е во интеракција да биде задоволно, а не да чека тоа да се случи покасно во времето. На овој начин роботот е во постојан фокус да ја остварува својата цел да биде лицето задоволно од интеракцијата. Со  $\alpha = 0.9$  се овозможува учењето да е многу брзо така што пресликувањето  $Q$  ќе се менува брзо, што е спротивно на ситуацијата кога параметарот е 0, па роботот не учи ништо, т.е. вредноста на  $Q$  не се менува. При изведување на алгоритмот  $Q$ -учење, роботот ќе одбира акција на случаен начин со веројатност  $\epsilon = 0.1$ . Ова ќе му овозможи на роботот во најголем дел од случаите да ја одбере најпогодната акција, а сепак во 10% од случаите да ги истражува и другите можности за избор. Параметрите за учење ќе ги анализираме и во Поглавје 4.4. Користејќи симулации, ќе најдеме ти тестираме, а ако е потребно ќе ги промениме, дадените преддефинирани вредности за параметрите кои ќе можат да се користат во апликацијата.

#### 4.2.2 Дефиниција на роботски однесувања

За почеток и крај на интеракцијата постојат соодветни рутини кои се однесуваат на активностите на роботот. Однесувањето на роботот во рутината за почеток вклучува:



1. Нао кажува: Здраво! Јас сум Нао.
2. Нао поздравува со раката.
3. Нао кажува: Денес ќе се дружиме заедно.
4. Нао седнува.
5. Лед светилките светнуваат во зелена боја.

Рутината за крај на интеракцијата вклучува:

1. Лед светилките се исклучуваат.
2. Нао кажува: Заврши нашето денешно дружење.
3. Нао мавта со раката.
4. Нао кажува: Догледање!

Во секоја итерација од интеракцијата опишана на Слика 8, роботот дава одговор. Имено, роботот прво дава повратна информација за одговорот на детето, а потоа продолжува со изведување на избраната акција. Повратната информација за одговорот на детето е дадена во говорна форма и служи да се даде соодветен одговор на детето за неговата успешност во активностите поврзани со едукација. Овие акции служат да го поттикнат детето да биде подобро, да се задржи неговото внимание, да се задржи интересноста на интеракција, како и за роботот да прикаже емпатичност во интеракцијата. За таа цел, овие говорни активности изразуваат емоции. Имено во самиот говор генериран за говорот на роботот, емоциите се претходно соодветно одглумени. Селекцијата на реакцијата на роботот се прави врз база на тековната состојба на роботот  $s_n$ . Имено ако роботот е во состојба „Неутрална“ роботот ќе даде одговор со кој ќе се обиде да го задржи вниманието на детето. Ако роботот е во состојба „Успех“ роботот ќе даде соодветна реакција за точниот одговор, а на сличен начин ќе даде реакција за неточен одговор ако состојбата на роботот е „Неуспех“. Листата на реакции на роботот се дадени на Табела 4.2. Одглумената емоционална обоеност на дадените говорни активности претходно е дадена во Табела 3.1.

Табела 4.2: Листа на реакции на роботот.

Реакција	Обоеност	Текст
Точен одговор	Позитивна	Браво!
	Негативна	Во ред.
	Неутрална	Добро е.
Грешен одговор	Позитивна	Ајде! Следен пат, можеш и подобро.
	Негативна	За жал ова не е точен одговор.
	Неутрална	Ова не е точно
Задржување внимание	Позитивна	Ајде, продолжуваме!
	Негативна	Да продолжиме.
	Неутрална	Ќе продолжиме со следната активност.

Следно ќе бидат дефинирани акциите на роботот кои можат да бидат избрани во слојот на донесување на одлуки. За секоја од овие акции во слојот на однесување се генерира соодветен говор или звук, движење и режим на светење на лед светилките. Како што беше наведено претходно, постои хиерархиска поставеност

на акциите. Имено има различни типови на акции, а за секој тип на акции има различни специфични акции или активности кои може роботот да ги изведе. Постојат активности за предавање, испрашување, игра и слободни активности.

Иако едукацијата може да биде на различни теми, во фокусот на апликацијата имплементирана тука е областа математика. Листата на области може едноставно да се збогати. На пример може да се додадат области кои се изучуваат во прво одделение како: „светот околу нас“, „англиски јазик“, итн. Учителот „Нао“ може да се посвети на едукација за различни теми од областа математика. Темите вклучени во дадената пример апликација се:

1. Броење
2. Поголемо и помало
3. Следбеник и претходник
4. Собирање

За секоја тема се дефинирани по неколку 4 акции од различен тип. Во овој дел ќе разгледаме пример за акциите од тип предавање кои се дефинирани на тема „Броење“. Сите други акции ќе бидат дефинирани во Додаток А.

Табела 4.3: Опис на акции на роботот од тип предавање на тема „Броење“.

Број	Тип на акција	Опис
1	Говор	Јас имам една глава. Една.
	Движење/ лед	Нао ја мрда лево и десно главата.
2	Говор	Јас имам две раце. Една. Две.
	Движење/ лед	Нао ги пружа прво едната па другата рака.
3	Говор	Моите стапала можат да светат во три бои: една, две, три.
	Движење/ лед	Бојата на ушите се менува во црвена, зелена и сина боја.
4	Говор	На раката имам пет прсти: една, две, три, четири, пет.
	Движење/ лед	Нао ја пружа раката.

Да забележиме дека во описот на акциите на роботот не беше вклучен описот на режимот на светилките. Ова е затоа што режимот на светилките зависи само од емоционалната состојба на роботот, а не од типот на акцијата. Да се потсетиме дека на пример кога роботот има позитивна емоционална обоеност светилките ќе светат во зелена боја.

#### 4.2.3 Евалуација на моделот

За евалуација на моделот на роботот ќе дефинираме нумеричка оценка означена со  $P_{interaction}$  која се однесува на оценка на интеракцијата дете-робот. Оценката на интеракцијата има две компоненти кои ќе бидат опишани следно.

Прво, тоа е просечната оценка  $P_{emotion}$  за остварување на емоционално базираната цел во текот на интеракцијата. Оваа оценка се пресметува како просек од наградите кои ги добива роботот, дефинирани со Равенка (3.12), а кои зависат од емоцијата на детето препознаена од роботот. За оценка на перформансите на интеракцијата од аспект на едукација, по секоја завршена итерација на интеракција дете-робот, се добиваат поени. Поените се поврзани со тековната состојбата на роботот  $s_n$ . Имено, ако состојбата на роботот е  $s_1$  се добиваат нула поени, за состојба  $s_2$  се добиваат три поени, а за состојба  $s_3$  еден поен. Вкупната оценка за

едукација  $P_{education}$  на детето се пресметува како просечен број на освоени поени од претходно изведените активности.

Вкупната оценка на интеракцијата  $P_{interaction}$  се пресметува како тежинска сума на оценката за остварување на емоционалната и едукативната цел на роботот (Равенка 4.3). Во оваа работа ќе користиме фиксни вредности за тежините и тоа тежината на оценката за емоции  $w_{emotion}$  ќе биде 1, а оценката за едукација  $w_{education}$  ќе биде 0.5. Изборот на овие тежини е направен за да се избалансираат вредностите на двата типа оценки имајќи предвид дека за една итерација оценката за емоционална успешност е најмногу 1, а за едукација е меѓу 0 и 3 поени.

$$P_{interaction} = w_{emotion}P_{emotion} + w_{education}P_{education} = P_{emotion} + 0.5P_{education} \quad (4.3)$$

### 4.3 Имплементација на апликацијата

Имплементацијата на апликацијата е направена во Python, користејќи ја рамката NAOqi која се користи за програмирање на роботот NAO. Апликацијата е креирана во околината PyCharm. Креираната апликација покрај тоа што може да се изврши на самиот робот, може да се изврши на симулиран робот. Има неколку варијанти за извршување на апликацијата на симулиран робот, а тука ќе се користи симулираниот робот кој е овозможен преку апликацијата Choregraphe.

Симулираниот или виртуелниот робот се стартува преку апликацијата Choregraphe и не може да се стартува независно од оваа апликација. Во апликацијата Choregraphe може да се воспостави конекција со виртуелниот робот на соодветна IP адреса и порта. По воспоставување на конекција, во прозорецот „Robot view“ се прикажува виртуелниот робот претставен на Слика 5. Користејќи ги податоците за доделена адреса и порта, роботската апликација може да го контролира виртуелниот робот. Покрај тоа што овој робот може да се контролира на исти начин како и роботот Nao, сепак контролата на виртуелниот робот има ограничени можности. Имено, иако може да се контролира движењето, виртуелниот робот не може да зборува. Наместо да зборува, кај виртуелниот робот текстот кој треба да го изговори се прикажува на мониторот. Понатаму, кај виртуелниот робот не може да се види контролата на лед светилките. Последно, не е овозможена интеракција со симулираниот робот, па не може целосно да се контролираат елементите кои се тесно поврзани со сензорите.

За да може нашата апликација комплетно да се примени во симулациска околина, во имплементацијата е овозможено наместо сензорите од роботот да се користат сензорите и влезните уреди од компјутерот. На овој начин е овозможено тестирање на апликацијата пред истата да биде применета во интеракција дете-робот. Имено, наместо камерата на роботот, се користи камерата на компјутерот, наместо микрофонот на роботот, микрофонот на компјутерот, а наместо сензорите за допир се користат типките на тастатурата преку кои може да се прати соодветната информација.

Во следниот дел накратко ќе биде опишана рамката NAOqi и интерфејсот кој се користи за контрола на роботот Nao. Потоа во Поглавје 4.3.2 ќе биде опишана апликацијата креирана во оваа докторска работа.

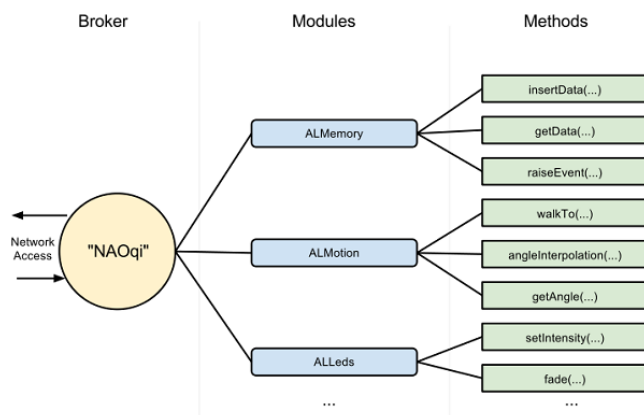


Слика 5: Прозорец во Choregraphe каде е прикажан виртуелниот робот.

#### 4.3.1 NAOqi

NAOqi кој се извршува на роботот е брокер (broker). По стартувањето, веднаш ги вчитува подесувања од фајлот „autoload.ini“. Во овој фајл се дефинирани библиотеки кои треба да се вчитаат. На пример тука се библиотеките „libalbase.so“ каде се поддржани функционалности за меморијата на роботот, или „libleds.so“ каде има функционалности за лед светилките. Имено, секоја библиотека содржи еден или повеќе модули. Во секој модул се дефинирани разни методи. Врската меѓу модулите и методите се одвива преку брокерот NAOqi. Имено, брокерот овозможува секој модул да може да најде и пристапи до било кој метод од друг модул. Уште повеќе брокерот овозможува методите на модулите да можат да се повикаат и надвор од процесот, на пример од друг процес стартуван на компјутер. Врските меѓу брокерот и модулите може да се претстават во форма на дрво и шематски се прикажани на Слика 6.

Секој модул е класа која има разни методи кои овозможуваат одредена функционалност на роботот. Модулите можат да бидат локални или далечински. Првите можат да се користат само на роботот, додека далечинските можат да се пристапат и надвор од роботот. Од друга страна далечинските модули се помалку ефикасни од локалните од аспект на меморија и брзина. При програмирање на роботот може да се креираат таканаречени прокси (проху) објекти кои се однесуваат како даден модул. При креирање на овие објекти се наведува името на модулот, но и конекцијата со роботот дадена преку IP адресата и портата во случајот кога се користи далечински модул. На пример, може да се креира прокси објект за модулот „ALTextToSpeech“ со што преку креираниот објект може да се користат сите методи дефинирани во истоимениот модул. За проширување



Слика 6: Шематски приказ на врските меѓу NAOqi со модулите [124].

на функционалноста на роботот може да се креираат нови модули. Имено, во нашата апликација е креиран нов модул кој овозможува методи за целосна контрола на роботот Nao како учител во интеракција робот-дете.

За креирање на нова апликација за роботот се користи Python SDK. Инсталацијата вклучува инсталација на Python2.7 и инсталација на e NAOqi за Python. Ова овозможува интерфејс за програмирање на роботот Nao со кој лесно може да се креираат модули кои може да ги изврши роботот. Согласно претходно опишаните врски меѓу модулите и NAOqi, пристап за користење на методите од модулите е овозможен во три едноставни чекори. Прво, во програмата треба да се импортира ALProxy, потоа се креира ALProxy за целниот модул и на крај преку креираниот прокси објект ја повикуваме саканата функција. Подолу е прикажан програмски код со кој се овозможува роботот да каже "Hello, world!" користејќи го модулот „ALTextToSpeech“ [124].

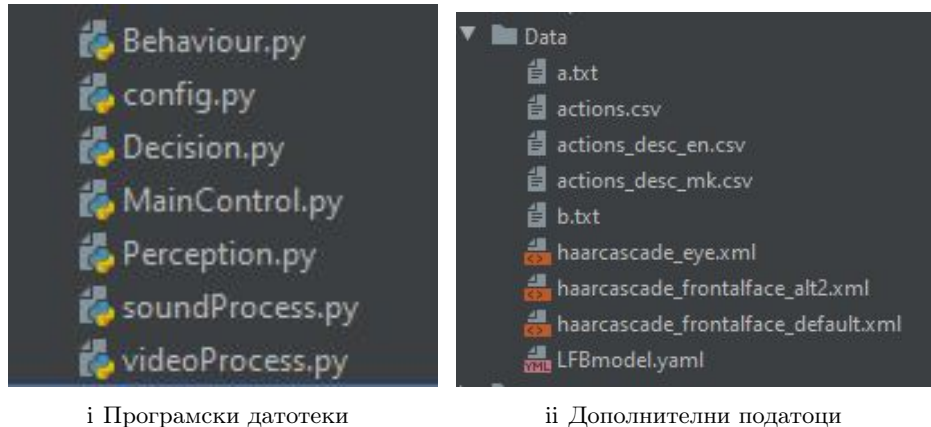
```
from naoqi import ALProxy
tts = ALProxy("ALTextToSpeech", <IP>, <Port>)
tts.say("Hello, world!")
```

Алтернативно на овој пристап може да се користи рамката qi која овозможува креирање и стартување на апликација на чија сесија можат да се вклучат разни сервиси меѓу кои и сервиси поврзани со модулите кај NAOqi. Функционалноста дадена во претходниот пример може да се добие со овој пристап со следниот код:

```
import qi
app = qi.Application(<ADDRESS>)
app.start()
almemory = app.session.service("ALTextToSpeech")
almemory.say("Hello, world!")
```

#### 4.3.2 Опис на апликацијата

Апликацијата за роботска контрола на роботот Nao е креирана во неколку програмски датотеки прикажани на Слика 7. Главната контрола се наоѓа во датотеката MainControl.py, додека во датотеката config.py се наоѓаат дефинициите за потребните поставки за извршување на апликацијата. На пример, IP адресата и портата за конекција со роботот се дефинирани како глобални променливи



i Програмски датотеки

ii Дополнителни податоци

Слика 7: Приказ на структурата на датотеките во апликацијата за роботска контрола.

во оваа датотека. Покрај нив, перцепцијата, донесувањето одлуки и однесувањето на роботот, се овозможени преку соодветни функционалности во датотеките Perception.py, Decision.py и Behaviour.py, соодветно. Останатите датотеки се однесуваат на процесирањето на видео и звучни сигнали, што се од особено значење за перцепцијата на роботот. Подетално за имплементацијата за процесирање на видео и звучни сигнали е дадено подолу во ова поглавје.

Разни податоци кои се користат како фиксни за дадената апликација се сместени во директориумот Data (Слика 7). Тука, на пример, се наоѓаат тежините за Скриениот Марков Модел со кои е опишана емоционалната состојба на роботот, како и модели кои се користат за препознавање на лице од слика. Понатаму тука се сместени и '.csv' датотеки каде се опишани сите акции кои може да ги изведе роботот. На овој начин се овозможува едноставно додавање на нови акции, како и промена или бришење на одредени роботски акции. Описот на акциите има специфичен формат кој може да биде соодветно интерпретиран од апликацијата. Имено, секоја акција е претставена како низа од чекори. Секој чекор, кој може да биде или роботско движење, говор, звук или активност на лед светилките, е опишан во претходно воспоставен текстуален формат. На пример, текстот „arm\_right\_straight“ означува чекор со кој роботот треба да ја придвижи десната рака исправајќи ја напред. Чекорите потребни да се изведе акцијата број 2 опишана во Табела 4.3 се:

1. >Jas imam dve race. Edna. Dve. (говор)
2. arm\_left\_straight (движење)
3. >Edna. (говор)
4. arm\_right\_straight (движење)
5. >Dve. (говор)
6. arm\_both\_default (движење)

Дополнително на чекорите, за секоја акција се дефинирани и типот на акција, индикатор за тоа дали акцијата бара одговор од корисникот, како и времетраење доделено за одговор (actions.csv).

Главната функција за почеток на апликацијата се наоѓа во MainControl.py. Тука е креиран брокер (од тип ALBroker) со кој се воспоставува конекцијата со

NAOqi. Понатаму се креира објект кој ја претставува апликацијата на роботот (qi.Application) и на чија сесија можат да се поврзат сервиси поврзани со постоечките модули дадени во интерфејсот. За потребите на нашата апликација се користат функционалностите од следните модули [124]:

#### ALMemory

Овозможува запишување и читање од меморијата на роботот, пристап до информации за актуаторите и сензорите на роботот, но и се користи при дистрибуција на нотификации за разни настани.

#### ALLeds

Овозможува манипулација со лед светилките на роботот.

#### ALMotion

Овозможува движење на роботот преку контрола на поединечните мотори на роботот и преку изведување на преддефинирани движења како што е одење.

#### ALRobotPosture

Овозможува движење преку промена на позата на роботот каде робот доаѓа во нова претходно дефинирана поза.

#### ALVideoRecorder

Овозможува да се сними и зачува видео запис снимен со некоја од камерите на роботот.

#### ALTextToSpeech

Овозможува роботот да зборува, изговарајќи зададен текст кој што автоматски се синтетизира.

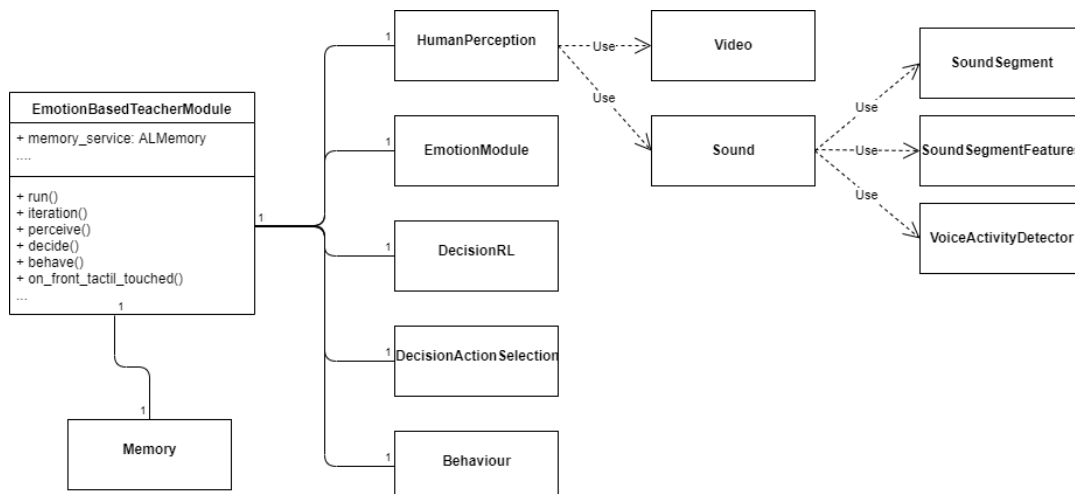
#### ALAudioPlayer

Овозможува да се прати зададен звучен запис на звучниците на роботот со што се овозможува роботот да зборува или пушта музика или нешто слично.

#### ALAudioRecorder

Овозможува да се сними и зачува аудио запис снимен со некој од микрофоните на роботот.

За апликацијата за роботот Nao создадена во рамки на оваа докторска дисертација, креиран е соодветен модул именуван EmotionBasedTeacherModule, кој што е дефиниран како класа која наследува од ALModule. Објект од оваа класа се креира во главниот дел на програмата, од кој потоа се повикува методот run() со што се стартува програмата на роботот. Текот на програмата вклучува рутина за почеток, итерации за интеракција, а завршува со рутина за крај. Ова претходно беше опишано во активностите на роботот дадени на Слика 8. Функцијата iteration() се повикува во циклус додека да помине максималното време за интеракцијата дефинирано во променливата MAX\_ITER или максималниот број на чекори во интеракцијата MAX\_STEP. И двете се дефинирани и подесени во датотеката config.py. Во функцијата iteration() се повикуваат соодветни функции кои овозможуваат изведување на потребните функционалности за перцепција, одлучување и однесување на роботот. За изведување на овие функционалности се користат објекти од неколку креирани класи кои соодветствуваат на дел од компонентите на роботскиот модел даден на Слика 7. Класниот дијаграм на роботската апликација е прикажан на Слика 8. Да забележиме дека податоците



Слика 8: Класен дијаграм за роботската апликација.

и методите во класата `EmotionBasedTeacherModule` не се комплетно дадени на сликата заради прегледност.

Класата `HumanPerception` има функционалности за перцепцијата на околината на роботот. За перцепција на човековите емоции треба претходно да се процесираат снимените видео и звучни сигнали. Ако се користи реалниот робот, се користат податоците снимени од сензорите на роботот. Во спротивно, кога се користи виртуелниот робот, се процесираат записите снимени од сензорите на компјутерот каде се тестира апликацијата. Снимањето на записите се случува додека корисникот дава одговор на акцијата на роботот. За процесирањето на визуелните и звучните сигнали, креирани се соодветно класите `Video` и `Sound`. Подетално процесирањата на овие сигнали ќе бидат објаснети во следните делови. Покрај овие сигнали, во апликацијата се процесираат и податоците добиени од сензорите за допир. Кај виртуелниот робот, наместо сензори за допир, се користат типките на тастатурата за да се даде соодветна информација. Одговорот на корисникот во секоја итерација од интеракцијата завршува или со настан поврзан со сензорите за допир, како што е допир на предниот сензор за допир, или со настан поврзан со тајмер со кој се ограничува времето на одговор со преддефинирано време за одговор за секоја претходно изведена роботска акција.

Класите `Memory`, `EmotionModule`, `DecisionRL`, `DecisionsActionSelection` содржат методи поврзани со меморијата на роботот, емоционалната состојба на роботот, моделот на поттикнувачко учење и модулот за избор на конкретната роботска акција. Сите овие класи се дефинирани во датотеката `Decision.py`. Функциите во класата `Memory` овозможуваат едноставен интерфејс преку кои може да се прочитаат или запишат одредени податоци во меморијата. Главната метода на класата `EmotionModule` е методата `find_hidden` со која се одредува најподобната емоционалната состојба на роботот, за дадени перцепирани емоции од страна на роботот за што се користи Скриениот Марков Модел. Во `DecisionRL` дефинирани се два главни методи поврзани со главните два чекори во имплементацијата на алгоритмот Q-учење. Имено, со методот `choose_action` се избира следниот тип на акција која роботот треба да ја изведе, додека методот `update_q` се користи за ажурирање на функцијата Q. Во последната класа, `DecisionsActionSelection`, дефиниран е еден метод во кој се прави селекција на конкретната роботска акција.

Во класата `Behaviour` дефинирани се три посебни методи и тоа за експресија на



емоциите (expressEmotion), за давање на одговорот на корисникот (dofeedback) и последната метода се однесува на изведување на роботските акции (dobeaviour). Роботот ги изведува акциите токму по дадениот редослед, т.е. прво роботот ја изразува својата емоција преку промена на лед светилките. Следно, роботот дава говорен фидбек на одговорот на корисникот на роботот и при тоа ја изразува својата емоција. Во последната метода се изведува следната акција избрана во модулот за селекција на акциите.

Да забележиме дека во класите се користат потребните објекти од модулите од интерфејсот на NAOqi. На пример, во класата Behaviour се користат модулите како што се ALTextToSpeech, ALLeds или ALMotion со кои се овозможува роботот да ја изведе избраната акција.

### Имплементација на процесирање видео

Во рамки на апликацијата, снимањето на видеото се случува паралелно додека корисникот е на ред да даде свој удел во интеракцијата, т.е. да даде одговор на активностите на учителот - робот. Видео записите кои се снимени и од роботот и од уредот каде се тестира апликацијата во симулациска околина се зачувуваат во AVI формат. Кај роботот се користи горната камера која се наоѓа над очите на роботот. Видеата снимени од камерата на роботот имаат резолуција 160x120 пиксели, а притоа се снимаат со брзина од 1 слика во секунда. Видеата снимени во симулациска околина се снимаат со иста фреквенција, а имаат 640x480 пиксели. Двете камери креираат видеа во боја. Без разлика од квалитетот на видеото и од брзината на семплирање, процесирањето се одвива во истите чекори. При имплементација на снимање на видео запис, во случајот кога апликацијата се изведува на самиот робот се користи модулот ALVideoRecorder. Од друга страна во симулациска околина видеата се снимаат користејќи ја библиотеката OpenCV [23] и класите VideoCapture и VideoWriter, соодветно.

Снименото видео се вчитува во сегменти од по една секунда, па од секој сегмент се презема по една слика. Да забележиме дека на сличен начин и звучниот запис снимен од интеракција ќе биде поделен на сегменти во времетраење од една секунда. Секоја слика понатаму соодветно се процесира. Целта на процесирање на сликата е да се добијат податоците кои се користат во препознавање на емоции на лицето со кое роботот е во интеракција преку неговата фацијална експресија. Во Поглавје 3.1 беше опишано кои карактеристики се користени за перцепција на емоции при креирањето на модел за класификација на емоции. Во имплементацијата за екстракција на карактеристики од фацијалната експресија која се користеше за генерирање на моделот се користеше програмскиот јазик C, како и алатката за екстракција на карактеристики Luxand Face SDK. Во имплементација на екстракцијата на карактеристиките во апликацијата робот-дете се користи програмскиот јазик Python, како и функционалностите на библиотеката OpenCV [23].

Во првиот чекор од препознавањето, се одредува позицијата на лицето на сликата. За таа цел се користи модел за препознавање на лица креиран како каскаден класификатор за детекција на објекти во библиотеката OpenCV (модел од тип cv.CascadeClassifier). Користејќи го овој модел библиотеката OpenCV овозможува палета од различни предтренирани класификатори, меѓу кои е и класификаторот за детекција на лице кој беше користен во нашата апликација. Резултатот од примената на овој детектор е прикажан на Слика 4.9ii кој што е применет на сликата дадена на Слика 4.9i. Во следниот чекор се наоѓаат значајни визуелни обележја на лицето кои за дадениот пример се прикажани

на Слика 4.9iii. Ова е имплементирано преку претходно трениран модел за детекција на фаџиални обележја [96]. Овој модел овозможува детекција на 68 обележја (точки) на лицето препознаени од слика за што на влез е потребна сликата, но и координатите добиени со претходна детекција на позицијата на лицето на сликата. Моделот е од тип `cv.face.FaceMark` што претставува основа за разни алгоритми и модели поврзани со одредување на обележја на лицето. Да забележиме дека моделот кој се користеше во оваа работа може да препознае обележја на устата, носот, очите, контурата на лицето итн.

Во следниот чекор на процесирање на слика, се прави ротација на сликата, така што лицето да биде поставено вертикално исправено на трансформираната слика (Слика 4.9iv). Ова е потребно за да се добијат посакуваните трансформирани карактеристики на лицето опишани во Поглавје 3.1.1. Аголот за кој треба сликата да се ротира се пресметува така што се одредува потребниот агол за ротација така што на трансформираната слика точките, т.е. обележјата, на носот би се наоѓале на вертикална права. На Слика 4.9v се прикажани обележјата на ротираната слика, кои во последниот чекор ќе се трансформираат во посакуваните визуелни карактеристики на лицето. Имено, координатите на точките на лицето на сликата ќе се трансформираат во координати на точките во координатниот систем даден со сино на Слика 4.9vi.

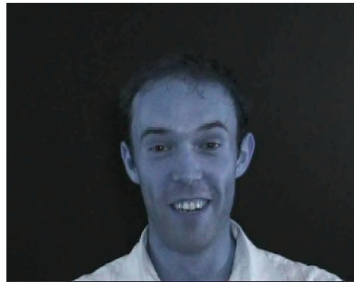
Центарот на овој координатен систем е во центарот на лицето, а растојанието од центарот на лицето до горната, долната, десната и левата граница на лицето има вредност 0.5. Вака добиените координати на точките на лицето, заедно со пресметаниот агол на ротација, ќе се користат како влез во моделот за перцепција за емоции. Оттука, за секоја слика земена од еден видео сегмент од една секунда се пресметуваат 137 визуелни карактеристики.

Сите функционалности за одредувањето на визуелните карактеристики од даден видео запис се овозможени во класата `Video`. Користејќи ја функцијата `getFeaturesVideo` објектот од оваа класа враќа податочна рамка со визуелните карактеристики за сите слики преземени од сегментите со должина од една секунда.

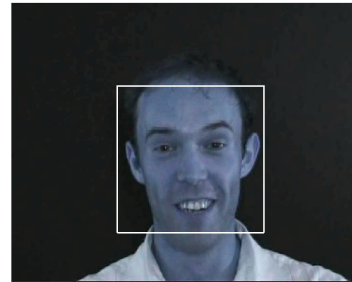
#### Имплементација на процесирање звук

Процесирањето на звук во апликацијата се базира на библиотеката `Paselmouth` [78] која што ги има функционалностите на алатката `PRAAT` за процесирање на звучни сигнали која се користеше при креирање на моделот за перцепција на емоции од звучни сигнали даден во Поглавје 3.1. Звучниот сигнал од снимениот одговор на корисникот во интеракцијата со роботот е снимен во `WAV` формат. Кога апликацијата се стартува на роботот, звукот се снима само од предниот микрофон. Фреквенцијата на зачувување на звучниот сигнал е `16000Hz`. Со истата фреквенција се снима и звучниот сигнал снимен во симулациска околина од компјутер. При имплементација на снимањето на звучен запис, во случајот кога апликацијата се изведува на самиот робот се користи модулот `ALAudioRecorder` од `paofj`, а во симулациска околина се користи библиотеката `pyaudio` [132].

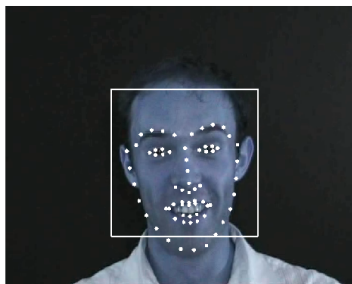
Секој звучен сигнал е прво поделен на големи сегменти од по една секунда. Потоа за секој од овие сегменти се одредуваат звучните карактеристики. Во првиот чекор при процесирање на звучниот сегмент, се определува во кој дел од звучниот сигнал има или нема говорна активност. На тој начин се определуваат оние делови од сегментот каде има говор, за да можат само во тие делови да се одредат звучните карактеристики. Да забележиме дека деловите без говор на почетокот и на крајот од снимениот звучен сигнал се игнорираат. За наоѓање на деловите со говорна активност се користи пристапот даден во [158]. Согласно



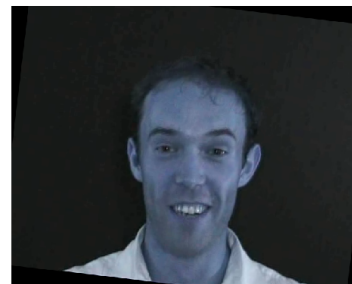
i Рамка од видео



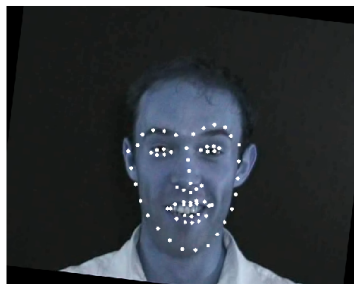
ii Детекција на лице



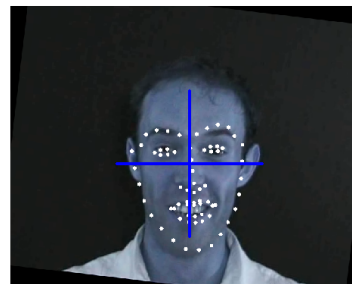
iii Детекција на обележја (точки) на лицето



iv Ротација на слика

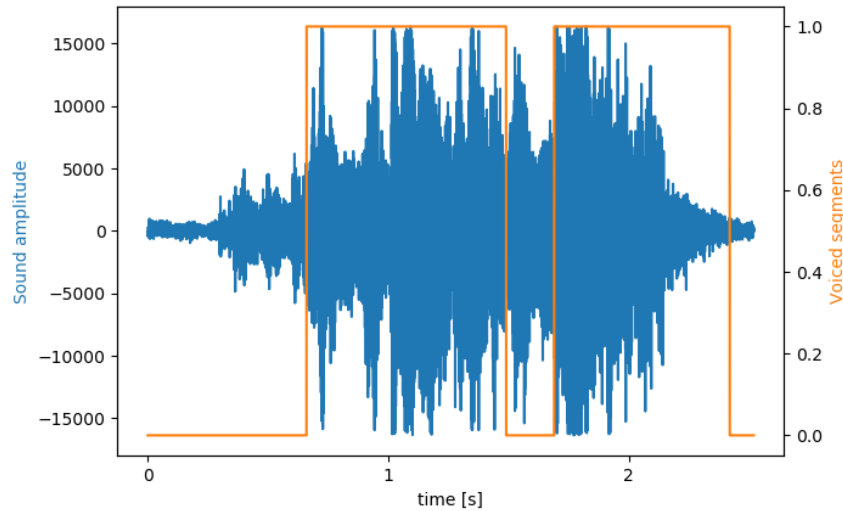


v Детекција на обележја на ротирана слика

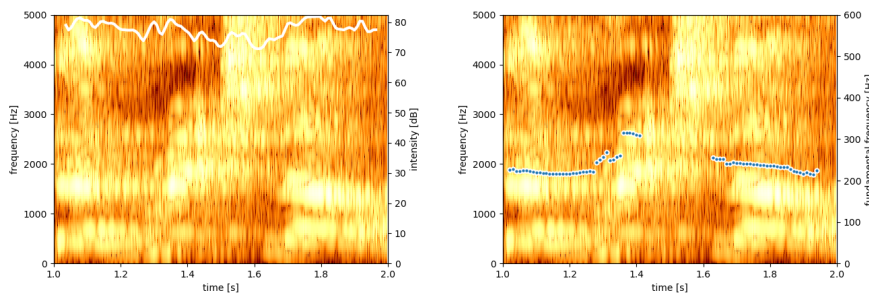


vi Координатен систем за трансформација на координатите на обележјата

Слика 9: Чекори во процесирање на една слика за извлекување на визуелни карактеристики.



i Детекција за активност на говор



ii Интензитет и спектар на звучен сегмент      iii Висина на тон и спектар на звучен сегмент

Слика 10: Приказ на дел од чекорите на процесирање звучен запис.

овој метод, се користи концептот на лизгачки прозорец во времетраење од 20ms, каде два последователни прозорци имаат заеднички дел во времетраење од 10ms. За секој прозорец се одредува соодносот меѓу енергијата во фреквентниот опсег на човечкото говорно подрачје и вкупната енергија во прозорецот. Земено е дека фреквентен опсег на човечко говорно подрачје е меѓу 300Hz и 3000Hz. Ако пресметаниот сооднос е поголем од даден преддефиниран праг кој изнесува 0.6 тогаш дадениот прозорец ќе се смета дека содржи говор. Во спротивно, прозорецот не содржи говор. За даден снимен звучен сигнал во времетраење од околу 2.5s прикажан на Слика 4.10i пронајдени се два делови каде е детектирана говорна активност. Овие делови имаат вредност 1 на портокаловата линија.

Звучниот сигнал даден на Слика 4.10i е поделен во три сегменти. Првиот сегмент е од почетокот кога е детектиран говор до првата секунда, вториот трае од првата до втората секунда и третиот сегмент го содржи делот по втората секунда до последниот момент кога е детектиран говор. Секој звучен сегмент кој содржи говор, се процесира понатаму и за него се определуваат звучните карактеристики слично како што беше дефинирано во Поглавје 3.1.1. Во оваа имплементација се користат 30 звучни карактеристики за опис на еден звучен сегмент. Следно ќе ги претставиме овие карактеристики.

Користејќи го концептот на локални карактеристики, за дадениот звучен сегмент се определуваат интензитетот и висината на тон (или основната фреквенција) на секои 5ms. Визуелен приказ за интензитетот и висината на тон, заедно со спектарот на вториот сегмент од звучниот запис даден на Слика 4.10i се дадени на Слика 4.10ii и Слика 4.10iii, соодветно. За определување на висината на тон, потребно е да се дефинираат и долната и горната граница на основна фреквенција. Имајќи предвид дека опсегот на основната фреквенција кај деца е меѓу 250Hz и 400Hz, кај возрасни жени е околу 200Hz и кај возрасни мажи е околу 125 Hz [57], ние го поставивме опсегот на основната фреквенција да е меѓу 75Hz и 400 Hz. Локалните карактеристики понатаму се нормализираат, користејќи ја информацијата за нивниот опсег, а со цел да се добијат вредности во интервалот од 0 до 1. Додека за основната фреквенцијата се користи опсегот од 75Hz и 400Hz, за интензитетот се користи опсегот од 30dB до 120dB кој го опфаќа и говорот на луѓето кога шепотат и кога зборуваат најгласно. Локалните карактеристики се пресметуваат користејќи ја библиотеката Pasmouth [78]. На пример, за добивање на карактеристиките базирани на интензитет, прво од звучниот сегмент се одредува интензитетот користејќи ја функцијата `to_intensity` која враќа објект од класата `Intensity`. Овој објект содржи низа од локални интензитети на дадениот звучен сегмент. Од овие локални карактеристики потоа се пресметуваат глобалните карактеристики на звучниот сегмент како максимална, минимална, средна вредност и стандардна девијација на локалните карактеристики пресметани за секој голем звучен сегмент. Дополнително, во оваа имплементација се пресметуваат и 25тиот, 50тиот и 75тиот перцентил, како и опсегот на интензитетот и процентот на валидни вредности на висината на тонот. Да забележиме дека статистиките се пресметуваат само за оние делови каде има говор. За звучниот сегмент даден во примерот, се користат само оние локални карактеристики пресметани во интервалите [1s,1.49s] или [1.69s,2s] каде претходно е детектиран говор.

Понатаму се пресметуваат звучни карактеристики базирани на цитер и шимер кои претставуваат мерки за меѓуциклусни варијации на основната фреквенција и амплитудата на сигналот, соодветно. Пресметката на овие мерки е овозможена во библиотеката Pasmouth [78]. Последно, се пресметуваат карактеристиките базирани на темпото на говорот. Првата карактеристика се однесува на пропорцијата на говор во звучниот сегмент, за што се користат информациите од претходно определените делови со говорна активност. Бројот на вакви делови или сегменти исто така е една карактеристика. Слично се пресметува и колку паузи има во говорот. Ќе велеме дека има пауза во говорот ако растојанието меѓу деловите со говор се подолги од 1.25 поделено со долната граница на основната фреквенција 75Hz, т.е. се подолги од 16ms. Оваа дефиниција е всушност дадена во софтверот PRAAT [20]. Последно, се одредува и соодносот на должината на овие паузи и должината на звучниот сегмент. Пресметаните звучни карактеристики за вториот сегмент даден во примерот на Слика 10 се прикажани на Табела 4.4.

Откако ќе се пресметаат сите звучни карактеристики на звучните сегменти во времетраење од една секунда, тие се користат како влез во моделот за препознавање на емоции. Сите функционалности за одредувањето на звучните карактеристики од даден звучен запис се овозможени во класата `Sound`. Користејќи ја функцијата `getFeaturesSound` објектот од оваа класа враќа податочна рамка со звучните карактеристики за сите сегменти од сигналот. За одредување на карактеристиките на еден сегмент се користи класата `SoundSegment`. Во следниот дел ќе биде опишано како е имплементирана перцепцијата на емоции.

Табела 4.4: Пресметани звучни карактеристики за вториот сегмент од звучниот сигнал даден на Слика 4.10i.

intensity_min	0.47	localJitter	0.01
intensity_max	0.57	localabsoluteJitter	7e-05
intensity_range	0.1	ppq5Jitter	0.009
intensity_mean	0.53	rapJitter	0.009
intensity_std	0.02	ddpJitter	0.02
intensity_percentile25	0.52	localShimmer	0.13
intensity_percentile50	0.53	ddaShimmer	0.19
intensity_percentile75	0.55	localdbShimmer	1.23
pitch_min	0.42	apq11Shimmer	0.12
pitch_max	0.74	apq3Shimmer	0.06
pitch_rate	0.31	voiced_ratio	0.8
pitch_mean	0.50	voice_breaks_ratio	0.2
pitch_std	0.08	voice_breaks	1
pitch_percentile25	0.44	voiced_segments	2
pitch_percentile50	0.46		
pitch_percentile75	0.51		

#### Имплементација на перцепција на емоции

Во класата `HumanPerception` имплементирани се две функции кои ја определуваат емоцијата на лицето од снименото видео и говор соодветно. Овие се користат за да се одреди емоцијата на лицето кое е во интеракција со роботот во функцијата `emotionClassification`. Оваа функција враќа распределба на веројатности  $P_{both}$  или оценка за тоа колку е веројатно лицето да има секоја од основните емоции дефинирани од Ekman: гнев, гадење, страв, среќа, тага и изненадување.

Во процесирањето на звучниот и видео записот, како што беше опишано погоре, снимените сигнали се делат на сегменти со времетраење од една секунда за кои се одредуваат звучните и визуелните карактеристики. Со претходно опишаните постапки, за еден сегмент се пресметуваат 137 визуелни карактеристики и 30 звучни карактеристики. Овие се користат како влез во креираните модели за перцепција на емоции од видео и звук, соодветно. Да забележиме дека претходно дел од визуелните карактеристиките кои се однесуваат на координатите на точките, т.е. обележјата, се стандардизираат користејќи ги сите податоци за лицето со кое роботот има интеракција. Имајќи предвид дека има мала разлика во имплементацијата на екстракцијата на звучни и визуелни карактеристики со претходната имплементација опишана во 3.1 која главно се должи на промена на програмскиот јазик од C во Python, креирани се нови модели за препознавање емоции кои се базираат на претходно опишаните.

За да може роботот доверливо да ги перцепира емоциите на лицето со кое е во интеракција, пожелно е пред интеракцијата да се направат тест снимања на лицето како тоа ги глуми секоја од основните емоции. Врз база на овие снимања може да се тренираат класификаторите за детекција на емоции од видео и од звук. Ако овој чекор не е изведен, тогаш ќе се користат моделите за препознавање на емоции тренирани претходно со базата од снимени записи eNTREFACE [104].

Користејќи ги моделите за класификација, за секој сегмент ќе се одреди распределбата на веројатност за секоја емоција. Понатаму, од сите вака добиени веројатносни распределби се избира онаа која има најмала ентропија  $H$ , т.е. за

која имаме најмала несигурност. Ентропијата на дадена распределба на веројатност  $P$ , каде  $E$  е множество од основните емоции, формално може да се претстави со следната формула:

$$H = - \sum_{e \in E} P(x = e) \log_2 \frac{1}{P(x = e)} \quad (4.4)$$

Да забележиме дека ентропијата е 0 во случајот кога веројатноста да е препознаена една од емоциите е 1, а за сите останати емоции веројатноста е 0. Од друга страна, ентропијата е најголема ако имаме рамномерна распределба на веројатност за сите емоции.

Последно, имајќи ги предвид веројатносните распределби за перцепираната емоција од видео  $P_{video}$  и звук  $P_{sound}$ , сумарната оценка за секоја од емоциите се добива како тежинска сума на веројатностите таа емоција да е перцепирана од видео сигналот и од звучниот сигнал. Потоа овие оценки се скалираат така што оценките на емоциите од интеракцијата претставуваат распределба на веројатност означена како  $P_{both}$ . Формално, финалната распределба на веројатност на препознаените емоции од интеракцијата може да се пресмета со следната формула:

$$P_{both}(x = e) = \frac{w_{video}P_{video}(x = e) + w_{sound}P_{sound}(x = e)}{\sum_{em \in E} w_{video}P_{video}(x = em) + w_{sound}P_{sound}(x = em)} \quad (4.5)$$

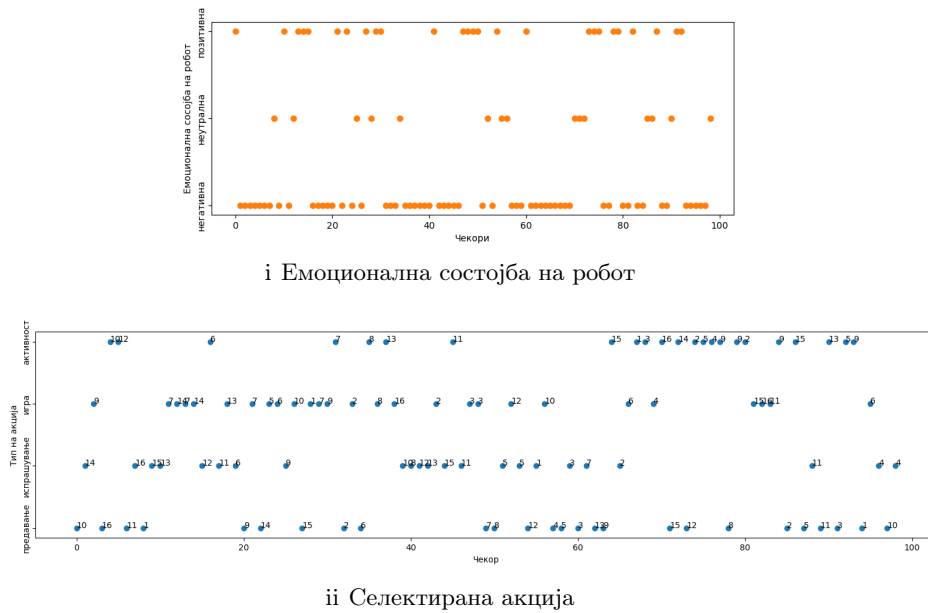
Тежините  $w_{video}$  и  $w_{sound}$  се зададени со фиксни вредности:  $w_{video} = 2$  и  $w_{sound} = 0.5$  со што поголема тежина им се дава на вредностите добиени со перцепција на емоции од видео сигнали затоа што тие покажаа подобри резултати во анализите направени претходно.

#### 4.4 Анализа и евалуација на модулот за донесување на одлуки

Во овој дел ќе бидат претставени резултатите добиени од експериментите спроведени за евалуација на претставениот роботски модел на однесување базиран на емоции. Првично, експериментите ќе бидат спроведени на симулирани податоци за да се овозможи проверка на моделот. Ќе се фокусираме на анализа и евалуација на модулот за донесување на одлуки дефиниран во предложениот роботски модел на Слика 7. Оттука, за оваа анализа нема да е од интерес работата на модулот за перцепција и однесување за кои што ќе претпоставиме дека функционираат точно и без грешка.

Целта на овој дел е да покажеме дека имплементираниот модул во апликацијата каде Нао е учител ќе функционира на начин како што беше опишано во моделот. За таа цел за влез во модулот за донесување на одлуки ќе користиме симулирани податоци. Влезните податоци се всушност податоците кои се добиваат во модулот за перцепција. Во нашиот модел има два типа на податоци кои се добиваат од перцепцијата. Имено, имаме податоци кои се добиваат од перцепција на емоции и податоци од перцепција на допир. Креиравме симулатор кој ќе може да ги генерира овие податоци за различни студии на случај.

Првиот податок се однесува на тоа кој сензор бил допрен при давањето на одговор на корисникот. Ако ниту еден сензор не е допрен, тоа се детектира со помош на тајмер. Симулаторот ќе генерира вредност која ќе претставува еден од сензорите за допир или пак тајмер. Да се потсетиме дека овој податок



Слика 11: Приказ на излезните податоци за секој чекор во симулацијата.

се однесува на одговорот на корисникот на претходно изведената акција на роботот и дека од овој податок директно зависи тековната состојба на роботот. Оттука може да се каже дека со симулаторот индиректно се симулира и состојбата на роботот. Вториот податок се однесува на распределбата на веројатност за перцепираната емоција на корисникот. Имајќи ја предвид претпоставката дека модулот за перцепција функционира без грешка, со симулаторот секогаш ќе се генерира распределба на веројатност која има веројатност 1 за точната емоција на корисникот, а 0 за другите емоции.

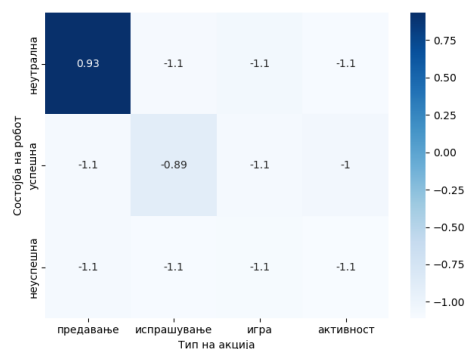
Во следните поглавја ќе ги претставиме спроведените експерименти и симулации направени со цел валидација и анализа на модулот за одлучување.

#### 4.4.1 Тестирање на функционалноста на модулот за донесување одлуки

Модулот за донесување одлуки е доста комплексен и го опфаќа модулот за одлучување базиран на поттикнувачко учење, модулот за селекција на акции, меморијата на роботот, како и емоционалниот модул. Со цел да направиме првичен тест дали модулот ги има посакуваните функционалности, ќе изведеме една симулација со 100 чекори во која податокот за емоцијата на корисникот, како и одговорот на корисникот ќе се генерира со симулаторот на случаен начин. Да забележиме дека за параметрите за учењето ќе ги користиме предефинираните почетни вредности.

Прво, ќе разгледаме дали се генерираат податоците на излез од модулот за донесување на одлуки. Излезот од модулот се емоционалната состојба на роботот која се наоѓа во меморијата и избраната акција која ја генерира модулот за селекција на акции (Слика 7). Емоционалната состојба на роботот во секој чекор од симулацијата е даден на Слика 4.11i. Да забележиме дека во симулацијата се појавуваат сите три состојби на роботот: негативна, неутрална и позитивна емоционална состојба. Ова е за очекување имајќи предвид дека оваа состојба се определува од вредностите за перцепираната емоција на корисникот кои во оваа симулација се генерираат на случаен начин. Слично, на Слика 4.11ii прикажани





Слика 12: Визуелен приказ на функцијата  $Q$  по завршување на симулацијата.

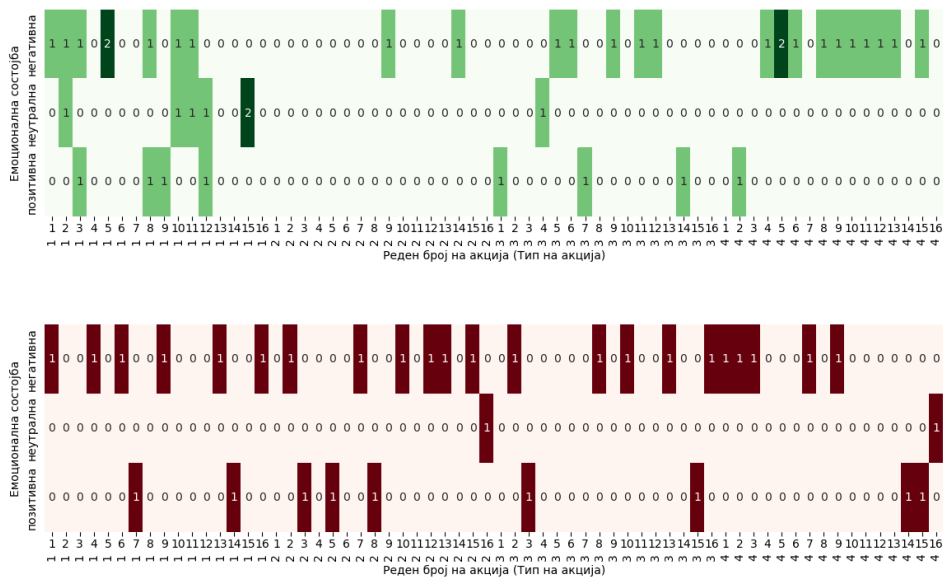
се акциите кои се селектирани во секој чекор од симулацијата. Да забележиме дека акцијата е определена со типот на акција која се одредува во модулот за одлучување базирано на поттикнувачко учење, а потоа и редниот број на акцијата од избраниот тип која се одредува во модулот за селекција на акции. На дадената слика типот на акцијата е претставен на  $y$ -оската, додека редниот број на акцијата е прикажан како лабела до секоја точка која ја претставува соодветната акција.

По секој чекор од симулацијата, се случува и соодветна промена во модулот за одлучување базиран на поттикнувачко учење каде всушност се менува функцијата  $Q$  која што роботот ја учи онлајн во интеракцијата. Функцијата  $Q$  претставува пресликување од секој пар состојба на робот и тип на акција во соодветна вредност која ја опишува подобноста на дадениот пар. По изведување на целата симулација оваа функција изгледа како што е прикажано на Слика 12. На  $x$ -оската е даден типот на акција, а на  $y$ -оската е дадена состојбата на роботот. По 100 итерации роботот научил дека кога роботот е во неутрална состојба, најпогодна следна акција е акција од тип предавање. Способноста на модулот да научи ќе се евалуира подобро во специјално дефинирани студии на случај.

Последно, во модулот за донесување одлуки по секој чекор се ажурира и емоционално водената меморија. За да потврдиме дека навистина меморијата на роботот се менува, на Слика 13 прикажано е како изгледа меморијата по завршување на симулацијата. Со зелено е претставена таканаречената позитивна меморија  $M_{positive}$ , а со црвено таканаречената негативна меморија  $M_{negative}$ . На  $x$ -оската се дадени редниот број на акцијата (вредност од 1 до 16) и типот на акција (вредност од 1 до 4). На  $y$ -оската е дадена емоционалната состојба на роботот. Ако корисникот активно учествува во интеракцијата без разлика дали дава точен или грешен одговор се ажурира  $M_{positive}$ , додека ако корисникот е неактивен се ажурира  $M_{negative}$  соодветно. Во случајната симулација може да се забележи дека нема шема за тоа со кои акции или типови на акции роботот, т.е. учителот, ќе има позитивна емоција во која состојба роботот ќе биде помотивиран за да предава. Ова е јасно затоа што симулацијата на однесувањето на детето е креирана на случаен начин.

#### 4.4.2 Анализа на влијанието на параметрите за учење

Во модулот за одлучување базиран на поттикнувачко учење параметарот  $\epsilon$  е многу значаен. Имено, во процесот на  $Q$ -учење роботот со веројатност  $\epsilon$  ќе избере да изведе одреден тип на акција на случаен начин, наместо да го избере најподобниот тип на акција. Со поголема вредност на параметарот  $\epsilon$  роботот



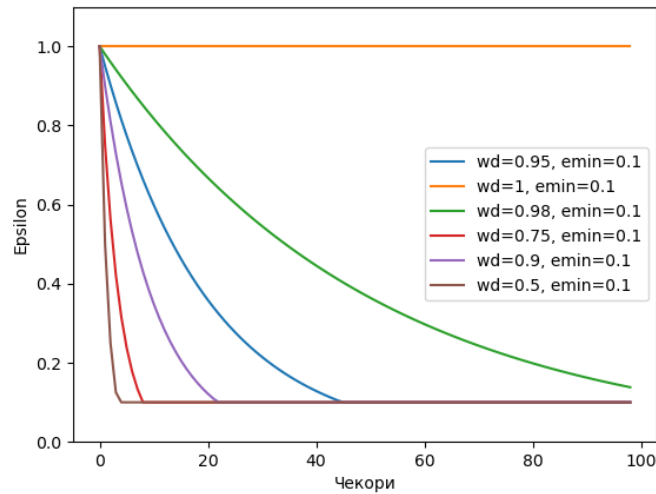
Слика 13: Визуелен приказ на емоционално-водената меморија на роботот по завршување на симулацијата.

повеќе истражува и бара нови решенија, а со помала вредност повеќе го користи знаењето за селекција на типот на акција. Преддефинираната вредност за овој параметар во нашиот модел е  $\epsilon = 0.1$ . Ова е добар параметар ако функцијата  $Q$  ни е однапред позната. Но, во нашиот случај на почетокот функцијата е иницијализирана со нулти вредности. Ова значи дека на почетокот роботот нема никакво знаење за тоа како треба да се однесува, туку во текот на интеракцијата роботот треба да научи. За да може роботот да научи во реална интеракција робот-дете пожелно е роботот што е можно побрзо да ги испита и истражи можностите.

Затоа потребна е друга стратегија во дефинирање на параметарот  $\epsilon$ . Ние ќе ја искористиме стратегијата на постепено намалување на вредноста на  $\epsilon$ . Имено, ќе земеме дека параметарот не е фиксен туку дека со изведување на секој нов чекор се менува. Промената на  $\epsilon$  е дефинирана во Равенка (4.6) каде  $emin$  ја претставува минималната дозволена вредност за  $\epsilon$ , а  $wd$  е тежински фактор таков што  $0 < wd < 1$ . Почетната вредност на параметарот е дефинирана со  $\epsilon_1 = 1$ . Големината на тежинскиот фактор одредува со која брзина ќе се намалува  $\epsilon$ .

$$\epsilon_n = \max(emin, \epsilon_{n-1} \cdot wd) \quad (4.6)$$

На Слика 14 може да се види како се менува  $\epsilon$  за различни вредности на тежинскиот фактор  $wd$  кога минималната вредност е дадена со  $emin = 0.1$ . Во случајот кога  $wd = 1$  вредноста на параметарот останува иста со почетната вредност и не се менува со текот на времето. Од друга страна, кога  $wd = 0.95$  после повеќе од 40 чекори агентот во 90% од случаите ќе ја избере најподобната акција ( $\epsilon = 0.1$ ). Од интерес за апликацијата е да тестираме после колку чекори роботот ќе успее да ги избере, барем по еднаш, секоја од типовите на акции и после колку чекори ќе успее да ги измине сите парови состојба-акција. Ова би значело дека роботот комплетно го истражил проблемот. Јасно дека ова зависи од самата интеракција и е тешко да се определи. Тука се направени случајни симулации



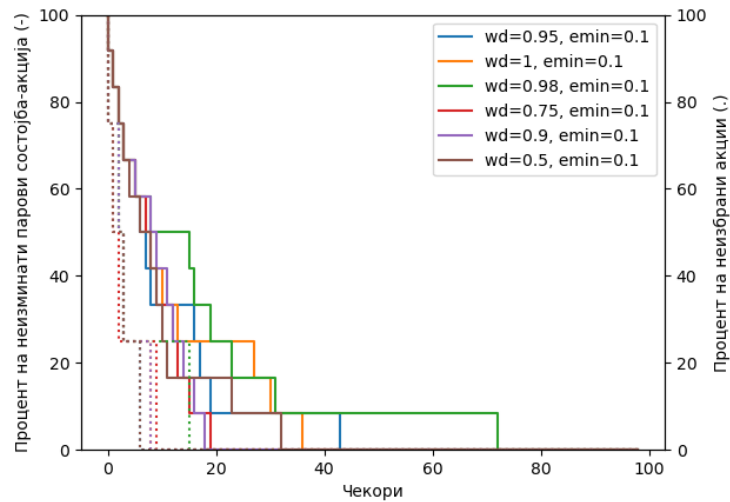
Слика 14: Промена на  $\epsilon$  во секој чекор за различни вредности на тежинскиот фактор  $wd$ .

каде емоцијата и одговорот на лицето се земаат на случаен начин. Направени се симулации каде се користени различни вредности на тежинскиот фактор  $wd$ . Резултатот од овие симулации е даден на Слика 15. Во случајот кога  $wd = 0.95$  после 40тина чекори веќе се изминати сите парови состојба-акција. Од друга страна, сите парови се изминати само после дваесетина чекори во случајот кога  $wd = 0.9$ . Да забележиме дека во нашиот случај има 12 парови состојба-акција, бидејќи има 3 можни вредности за состојбата на роботот и 4 различни типови на акции.

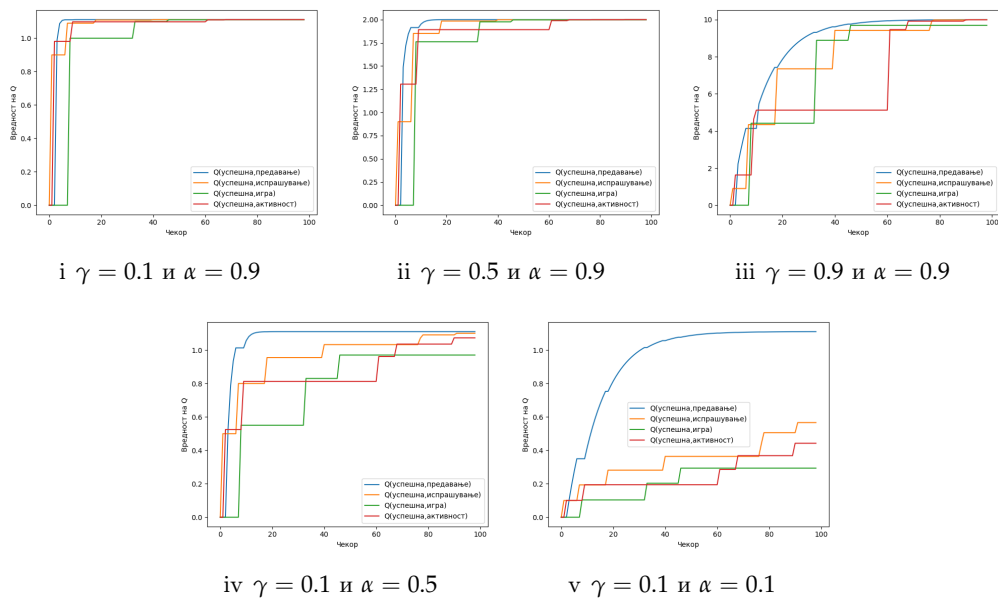
За апликацијата за Нао како учител би било пожелно што е можно поскоро да го применува наученото за да има што поголем ефект на процесот на предавање. Слично, пожелно е роботот што е можно поскоро да го истражи проблемот и да измине што е можно повеќе парови состојба-акција. Сепак финалниот избор на погодна вредност на тежинскиот фактор зависи и од брзината на учење, па затоа тоа ќе биде следно анализирано.

За да ги испитаме другите параметри за учење ќе спроведеме експеримент во кој ќе симулираме интеракција на роботот со корисник кој во секоја итерација е среќен и секогаш е успешен во давањето на одговор на активностите на роботот. Да забележиме дека во овој случај состојба на роботот, која директно зависи од одговорот на корисникот, постојано ќе биде успех. Уште повеќе во дадениот случај наградата од корисникот која се пресметува со Равенка (3.12) ќе биде постојано 1. Во едно вакво сценарио очекуваме дека роботот ќе научи дека вредноста  $Q$  за секој тип на акција конвергира кон иста вредност. Направени се неколку симулации каде се користат различни вредности за параметрите  $\gamma$  и  $\alpha$  од кои зависи процесот на учење. Во првичните симулации земено е дека тежинскиот фактор  $wd$  има вредност 0.9, почетната вредност на  $\epsilon$  е 1, а минималната вредност  $emin$  е 0.1. Резултатите од симулациите се прикажани на Слика 16.

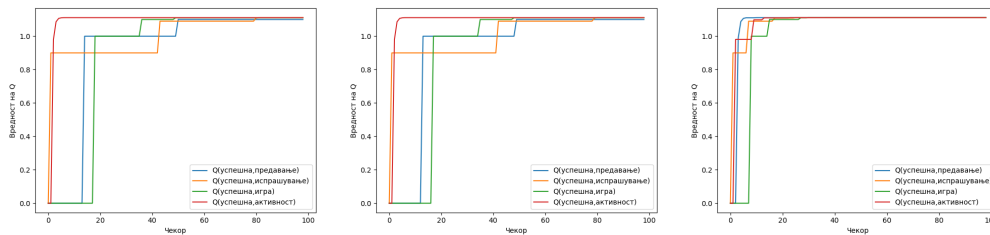
На сликата е прикажано како се менуваат вредностите на функцијата  $Q$  во текот на 100те чекори од симулацијата. Да забележиме дека во овие експерименти се менуваат само вредностите на  $Q$  за успешна состојба на роботот затоа што во разгледуваното сценарио корисникот секогаш дава успешен одговор на активностите што придонесува роботот секогаш да е во состојба на успех. На Слика



Слика 15: Процент на неизминати парови состојба-акција и процент на неизминати типови акции до секој чекор во случајни симулации каде се земени различни вредности на тежинскиот фактор  $wd$ .



Слика 16: Промена на вредностите на функцијата Q во секој чекор од симулациите во кои се земени различни параметри за учењето.



i  $wd = 0.5, \gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$     ii  $wd = 0.75, \gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$     iii  $wd = 0.95, \gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$

Слика 17: Промена на вредностите на функцијата  $Q$  во секој чекор од симулациите во кои се земени различни вредности за параметарот  $\gamma$ .

4.16i се прикажани промените на функцијата  $Q$  кога параметрите се поставени на претходно преддефинираните вредности, т.е. земено е дека  $\gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$ . Во останатите графици во првиот ред дадени се резултатите каде само  $\gamma$  ја менува вредноста, додека во вториот ред дадени се резултатите каде само  $\alpha$  ја менува вредноста. Може да се забележи дека за преддефинираните вредности најбрзо се постигнува конвергенција на вредностите на функцијата  $Q$  за сите типови на акции. Имено, вредностите на функцијата  $Q$  за сите типови на акции достигнува до околу 1.11. Како се зголемува  $\gamma$  така е потребно повеќе време за конвергенција на вредностите на функцијата. Овој резултат е согласно со значењето на параметарот  $\gamma$  кој се однесува на значајноста на идната награда која ќе ја добие роботот во пресметката на очекуваната идна награда. Од друга страна, за помали вредности на  $\alpha$  дури и по 100 изведени чекори, вредностите на функцијата  $Q$  за сите типови акции се разликуваат позначително помеѓу себе. Ова особено е точно за случајот кога  $\alpha = 0.1$ . Во овој случај, додека вредноста за акцијата предавање е околу 1, вредноста за останатите типови акции е околу 0.5. Овие симулирани резултати се очекувани затоа што со намалување на параметарот  $\alpha$  учењето е побавно. Резултатите добиени со симулациите во испитаното сценарио укажуваат дека преддефинираните вредности за параметрите  $\gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$  овозможуваат роботот да ја научи  $Q$  во помал број на чекори. Со овие параметри се очекува и роботот многу побрзо да се прилагоди на нови сценарија. Ова е особено важно за самата апликација каде што е многу значајно роботот што е можно побрзо да научи како да предава прилагодено на корисникот.

Користејќи ги преддефинираните вредности за  $\gamma = 0.1$  и  $\alpha = 0.9$  следно е испитано како се менува функцијата  $Q$  за различни вредности на тежинскиот фактор  $wd$ . Да забележиме дека на Слика 4.16i важи дека  $wd = 0.9$ , додека резултатите за други вредности на тежинскиот фактор се прикажани на Слика 17. Со зголемување на параметарот се скратува времето потребно за конвергенција на  $Q$ . Од друга страна, со зголемување на параметарот  $wd$  се зголемува времето потребно за роботот да го истражи просторот на решенија (Слика 16). Оттука при избор на параметарот  $wd$  треба да се направи добар баланс. Се поставува прашање дали изборот  $wd = 0.9$  е добар за нашата апликација. Ако погледнеме дека во овој случај после 20тина чекори роботот ќе користи алчна политика со веројатност од 10% (Слика 14), дека после исто толку чекори во случајот со случајната симулација сите парови состојба-акција беа изминати (Слика 15) и последно дека во ова време вредностите на  $Q$  се доволно добро научени (Слика 4.16i), за потребите на апликацијата, а и за следните симулации, ќе земеме дека  $wd = 0.9$ .

По изведените анализи прикажани во овој дел ги избравме параметрите кои ќе се користат во моделот за учење на роботот. Имено, ќе земеме дека  $\gamma = 0.1$ ,  $\alpha = 0.9$ , додека  $\epsilon$  се менува почнувајќи од почетна вредност 1 според формулата (4.6), каде  $wd = 0.9$  и  $emin = 0.1$ .

#### 4.4.3 Анализа на работата на модулот за донесување одлуки во избрани студии на случај

##### Прва студија на случај

Во ова сценарио ќе симулираме случај кога корисникот ќе биде среќен само во дадените случаи:

1. во претходниот чекор бил успешен, а во тековниот чекор е испрашуван од роботот
2. во претходниот чекор бил неуспешен, а во тековниот чекор учи од предавањата на роботот
3. во претходниот чекор бил неутрален, а во тековниот чекор игра или има слободна активност

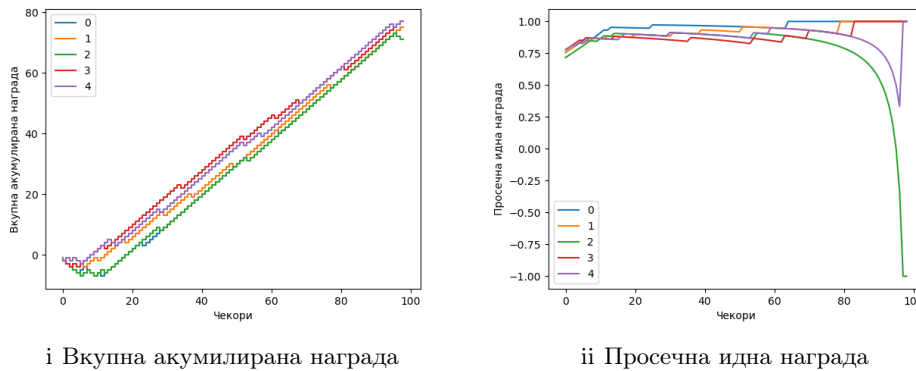
Да забележиме дека во сите други случаи во оваа сценарио корисникот ќе биде гневен. Имајќи го ова предвид наградата за роботот ќе биде 1 или -1 во случаите кога корисникот е среќен и гневен, соодветно.

За симулирање на ова сценарио одговорот на корисникот ќе се генерира на случаен начин, додека препознаената емоција на среќа или гнев ќе зависи од тековната состојба на роботот (која зависи од успешноста на корисникот во претходната итерација) и од акцијата која роботот ја извел во претходниот чекор. Имено, ако состојбата на роботот е неутрална тогаш само кога роботот избрал акција од тип игра или слободна активност кај корисникот ќе биде препознаена емоција среќа. Ако состојбата на роботот е успех, перцепираната емоција кај корисникот ќе биде среќа само ако претходната акција на роботот е од тип испрашување, а во сите други случаи емоцијата на корисникот е гнев. На сличен начин кога состојбата на роботот е неуспех, корисникот ќе има емоција среќа по акција од тип предавање, а гнев во сите други случаи. Оттука, пример за идеални вредности на пресликувањето  $Q$  кое треба роботот да го научи е дадено на Табела 4.5. Да забележиме дека вредностите на пресликувањето се скалирани така што сумата во секоја редица е 1.

Табела 4.5: Идеални вредности за функцијата  $Q$ .

	$A_1$ (предавање)	$A_2$ (испрашување)	$A_3$ (игра)	$A_4$ (активност)
$S_1$ (Неутрална)	0	0	0.5	0.5
$S_2$ (Успех)	0	1	0	0
$S_3$ (Неуспех)	1	0	0	0

Ако учењето е успешно, функцијата  $Q$  која роботот ќе ја научи треба да биде таква да оптималната политика  $\pi$  соодветствува на политиката која одговара на идеалните вредности за  $Q$  дадени во табелата. Оттука, очекуваната оптималната политика која роботот треба да ја научи е:



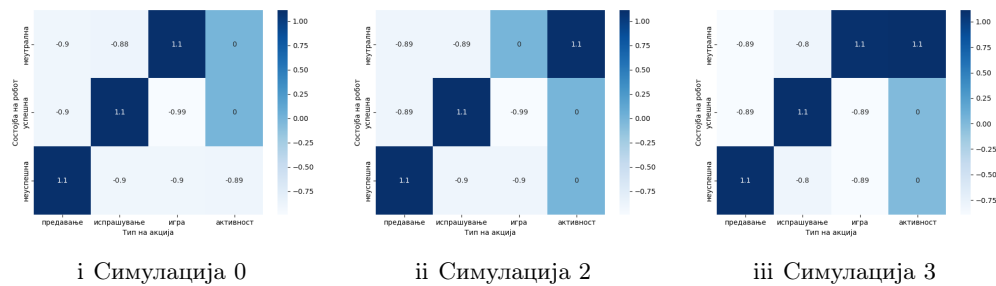
Слика 18: Приказ на вкупната акумулирана награда и просечната идна награда за секој чекор од 5те симулации.

$$\begin{aligned}
 \pi^*(S_1) &= A_3|A_4 \\
 \pi^*(S_2) &= A_2 \\
 \pi^*(S_3) &= A_1
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

Ќе го симулираме опишаното сценарио за да видиме како ќе се однесува предложениот модел на роботот и дали и за колку чекори ќе успее да ја научи функцијата  $Q$ . Покрај тоа, ќе видиме како во овој случај се однесува емоционалниот модул и што ќе биде зачувано во емоционалната меморија.

Направени се пет различни симулации, каде во секоја симулација има по 100 чекори. Прво ќе го анализираме модулот за одлучување базиран на поттикнувачко учење. За таа цел во секој чекор  $n$  од симулациите ја пресметуваме вкупната акумулирана награда која роботот ја добил до чекорот  $n$ , како и просечната идна награда која роботот ќе ја добие по чекорот  $n$  (Слика 18). На Слика 4.18i може да се забележи дека на почетокот на симулациите вкупната акумулирана награда има негативна вредност укажувајќи на тоа што корисникот во текот на првите чекори има и негативно обоена емоција. Меѓутоа, почнувајќи од околу 10тиот чекор вкупната акумулирана награда има тенденција да расте. Ова покажува дека роботскиот модел научил како да ги избира акциите за да го направи корисникот среќен со што роботот понатаму добивал позитивна награда. Од друга страна просечната идна награда после 10тиот чекор е блиску 1, која воедно е и максималната награда која може да ја добие роботот (Слика 4.18ii). Во последните чекори се забележува поголем пад на просечната идна награда кај симулациите со реден број 2 и 4 што се должи на  $\epsilon$ -алчната стратегија за селекција на типот на акција на роботот. Имено, кај овие симулации во последните чекори избрани се и акции на случаен начин кои довеле до награда во вредност од -1. Имено, по селекција на неоптималната акција корисникот има емоција гнев и дава награда -1.

Што всушност научил роботот на крајот од симулациите може подобро да се види од визуелизацијата на функција  $Q$  на крајот од симулациите. За симулациите со реден број 0, 2 и 3 функциите се дадени на Слика 19. Може да се забележи дека во сите симулации најподобниот тип на акција кога роботот е во состојба успех е испрашување, додека кога роботот е во состојба неуспех е предавање. Имено, за овие типови на акции  $Q$  има најголема вредност. Од друга страна кога роботот е во неутрална состојба може да се видат три различни



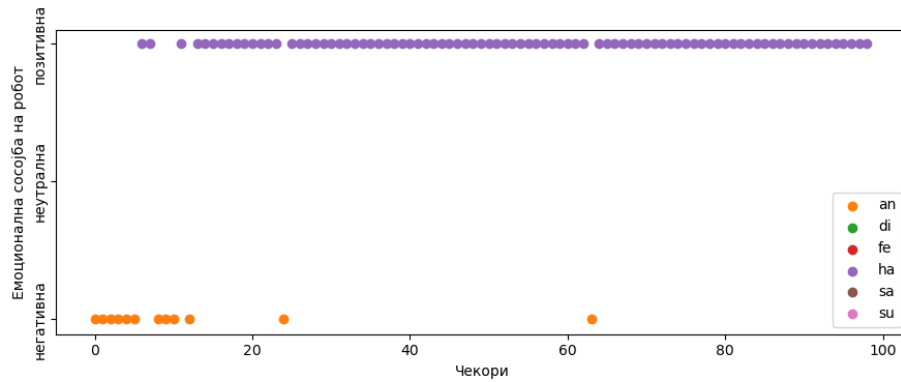
Слика 19: Приказ на научената функција  $Q$  во три различни симулации на сценариото дадено во првата студија на случај.

варијанти. Имено, кај симулацијата со реден број 0 акцијата игра има најголема вредност, кај симулација 2 акцијата активност има најголема вредност, додека кај 3тата симулација и двата типови на акции: игра и активност имаат слична вредност. Да забележиме дека со симулацијата со реден број 3 роботот научил функција  $Q$  која е најблиску до идеалното пресликување дадено на Табела 4.5. Кај другите симулации роботот научил дека кога е во неутрална состојба само една од типовите на акции игра или активност ќе даде добра награда во иднина, додека за другиот тип на акција не е истражено доволно. Различниот резултат на симулациите се должи на случајниот процес на селекција на следниот тип на акција со  $\epsilon$ -алчната политика. Меѓутоа, и покрај тоа, во изведените симулации може да се забележи дека навистина роботот ја научил оптимална политика која е согласна со очекуваната политика опишана со Равенка (4.7).

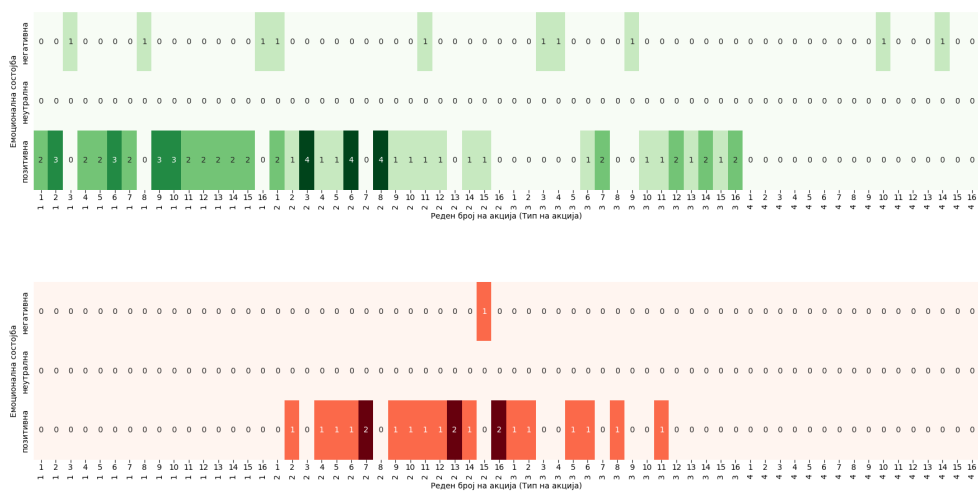
Следно ќе разгледаме како се однесува емоционалниот модул во рамки на спроведените симулации. Емоционалниот модул ја одредува емоционалната состојба на роботот кој тој ќе ја изрази при изведување на следната акција. Емоционалната состојба на роботот се пресметува врз база на Скриениот Марков Модел даден на Слика 4. На Слика 20 може да се види како се менува емоционалната состојба на роботот зависно од препознаената емоција на корисникот во секој чекор на симулацијата со реден број 0. Може да се забележи дека кога корисникот е среќен тогаш најчесто роботот има позитивна емоција. Спротивно на тоа кога корисникот има емоција гнев, роботот има негативна обоеност на емоцијата. Во ниту еден од 100те чекори не е детектирана неутралната обоеност кај роботот. Емоционалниот модул функционира согласно нашите очекувања имајќи го предвид дефинираниот модел врз база на кој се одредува емоционалната состојба на роботот.

Во овој дел ќе разгледаме како изгледа емоционалната меморија и како се користи за селекција на редниот број на акција за даден тип. За симулацијата со реден број 0, меморијата на крајот е дадена на Слика 21. Да забележиме дека во оваа симулација, по првите чекори роботот учи и истражува. Потоа роботот најчесто изведува акција од тип предавање ако е во состојба неуспех, акција од тип испрашување ако е во состојба на успех и акција од тип игра ако е во неутрална состојба (Слика 4.19i). Оттука и во емоционалната меморија може да се види дека многу ретко роботот има изведувано акции од тип слободна активност (во меморијата има најчесто 0 кај овие акции) што укажува дека до 100тата итерација не е доистражен просторот на решенија. Доколку симулацијата се продолжи на 1000 чекори ќе може да се забележи дека после повеќе од 400 чекори се зголемува вредноста на  $Q$  за неутралната состојба и за акција од тип активност (Слика 4.22i и Слика 4.22ii). Значи по доволно долго време функцијата  $Q$  е поблиску до





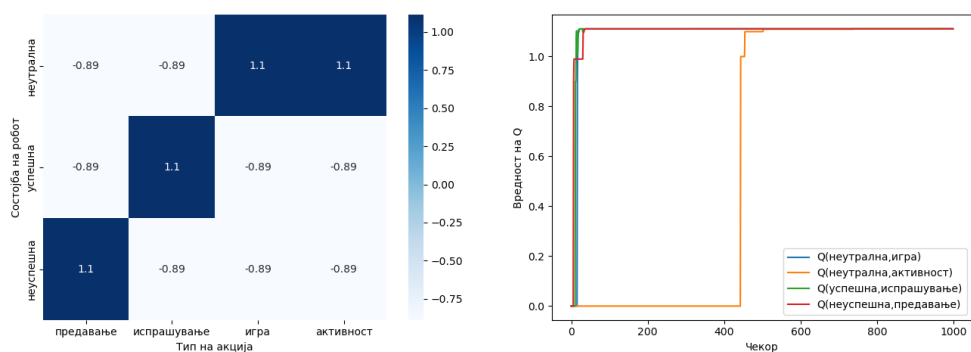
Слика 20: Приказ на емоционалната состојба на роботот во секој чекор од симулацијата со реден број 0.



Слика 21: Приказ на позитивната меморија (горе) и негативната меморија (долу) на крајот од симулацијата со реден број 0 по 100 чекори.

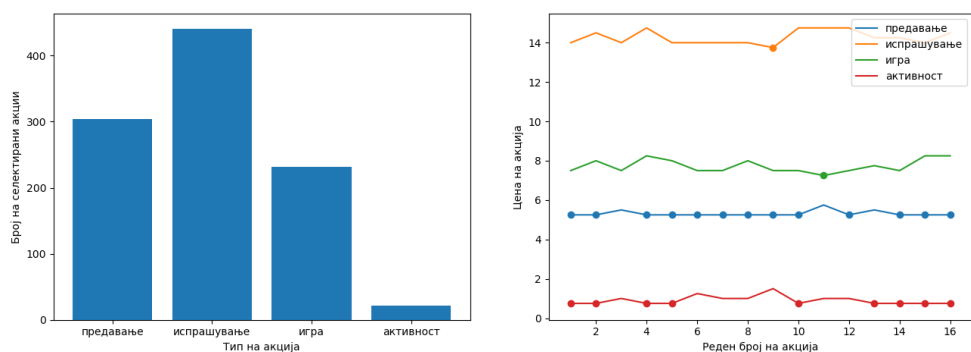
идеалната вредност на  $Q$  дадена на Табела 4.5. Сепак, во 1000 изведени чекори роботот многу почесто избирал акција од тип игра кога е во неутрална состојба, отколку што избирал акција од тип слободна активност (Слика 4.22iii). Ова се должи на тоа што сепак вредноста на функцијата  $Q$  е поголема за акцијата игра. Имено, во конкретниот случај вредноста за акција од тип игра е 1.111111, додека за акција од тип слободна активност е 1.111. Оваа мала разлика во вредноста на  $Q$  придонесува сепак роботот во неутрална состојба предност да дава на акцијата од тип игра.

Понатаму, во меморијата на роботот може да се забележи дека во најголем дел од чекорите роботот имал позитивна обоеност на емоцијата, што можеше да се види и на Слика 20. Со оглед на тоа што одговорот на корисникот во интеракцијата е симулиран на случаен начин, во меморијата соодветно се ажурираат податоците и во негативната и во позитивната меморија кои се врзани со меморирање на акциите кога корисникот бил неактивен и активен, соодветно. Еден исход од дефинираниот процес на селекција на акција е што селекцијата на акциите е рамномерна во рамките на секој тип на акција. Имено, од меморијата се гледа дека не постои некоја акција која е преферирана од роботот и која тој ја изведува



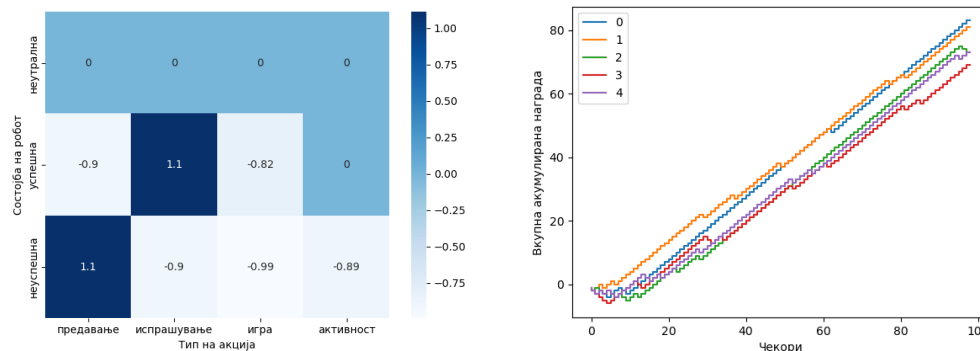
i Функција  $Q$  на крајот од симулацијата

ii Промена на вредностите на функцијата  $Q$



iii Распределба на бројот на акции iv Цена на секоја акција на крајот од селектирани од секој тип симулацијата

Слика 22: Резултати по 1000 чекори од симулацијата со реден број 0.



i Научената функција  $Q$  во симулацијата со ii Вкупна награда во секој чекор за сите 5 симулации  
 рен број 0

Слика 23: Резултати од втората студија на случај.

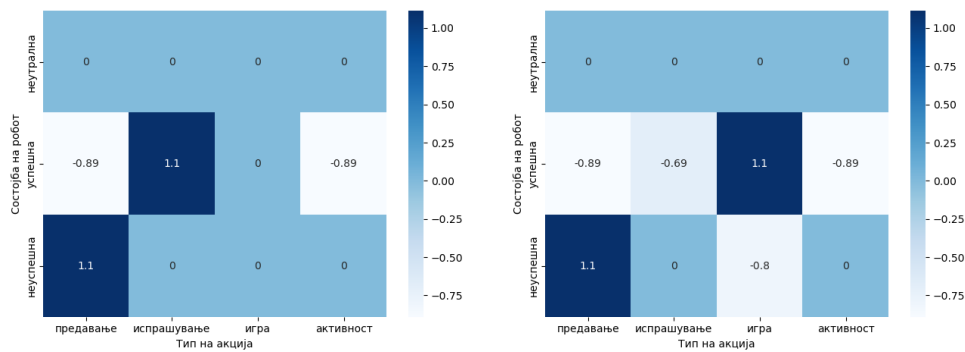
значително повеќе пати од другите. Ова се должи на начинот на кој беше дефиниран модулот за селекција на акциите каде за секоја акција се пресметува цена, а на крај се избира онаа акција со најмала цена. Акциите кои се почесто изведени имаат поголема цена, па не се селектирани во даден чекор (Равенка (4.2)).

Визуелизација на цената за секоја од 16те акции дефинирани за секој тип на акција по 1000 чекори од симулацијата со рен број 0 е дадена на Слика 4.22iv. На сликата се прикажани со точки оние акции кои би можеле да бидат селектирани во следниот чекор, затоа што истите имаат најмала цена. Селекцијата од повеќето можности се прави на случаен начин. Може да се види дека за секој тип на акција цените меѓу акциите имаат блиска вредност што се должи на рамномерниот процес на селекција на акции. Во емоционалната меморија може да се види и дека нема соодветно меморирани настани кога роботот е во неутрална состојба и изведува акција од тип предавање, т.е. вредностите во негативната меморија за овие акции е 0. Ова се должи на фактот што сите акции од тип предавање не бараат одговор од корисникот. Оттука, по овие акции роботот не може да биде во неутрална состојба што би значело дека корисникот не бил активен.

#### Втора студија на случај

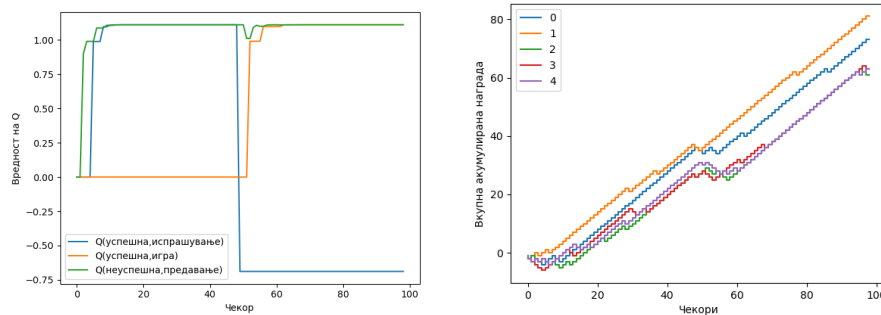
Следниот случај кој ќе го разгледаме е сличен на првиот, но тука по секоја акција на роботот ќе симулираме дека корисникот дал одговор, т.е. бил активен во интеракцијата. Имено, одговорот на корисникот во симулацијата ќе биде успешен или неуспешен, по што состојбата на роботот ќе биде успех и неуспех, соодветно.

Разликата во оваа студија и во првата студија на случај очекуваме да се види првенствено во научената функција  $Q$ , но и во емоционалната меморија. Имено, функцијата  $Q$  која роботот ја научил во ова сценарио има вредност 0 за секој пар каде состојбата на роботот е неутрална (Слика 4.23i). Слични резултатите се добиени во сите 5 симулации на овој случај, а потврда дека во сите симулации роботот успешно научил како да се однесува во ова сценарио е дадено на Слика 4.23ii каде се гледа растот на вкупната награда на роботот во текот на 100те чекори од спроведените 5 симулации. Во однос на емоционалната меморија, разликата тука ќе биде што вредностите во негативната емоционалната меморија на



i Научената функција  $Q$  во симулацијата со реден број 1 пред 50тиот чекор

ii Научената функција  $Q$  во симулацијата со реден број 1 по 100 чекори



iii Промена на функција  $Q$  за секој чекор на симулацијата со реден број 1

iv Вкупна награда во секој чекор за сите 5 чекор на симулацијата со реден број 1 симулации

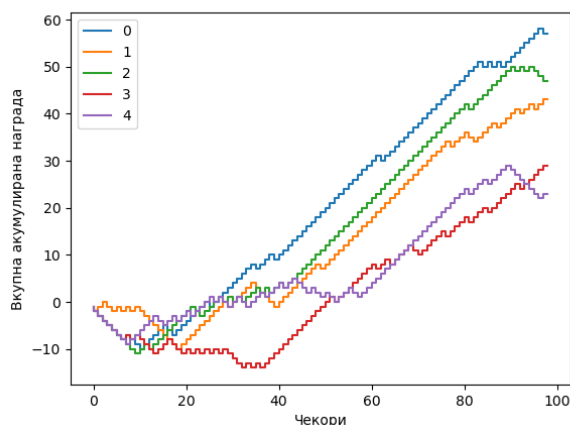
Слика 24: Резултати од третата студија на случај.

роботот ќе бидат секогаш нула. Ова се должи на фактот дека роботот никогаш не е во неутрална состојба, т.е. корисникот никогаш не бил неактивен.

### Трета студија на случај

Следно ќе го испитаме случајот кога корисникот го менува афинитетот кон одреден тип на активност со текот на времето. Имено, ќе испитаме случај како втората студија на случај, со единствена разлика што почнувајќи од 50тиот чекор корисникот нема да сака да биде испрашуван, туку ќе сака да игра во случајот кога бил успешен во претходниот чекор. Ова би значело дека од 50тиот чекор во симулацијата корисникот ќе има емоција среќа кога состојбата на роботот е успех, само ако следната акција е од тип игра. Најзначајните резултати се визуелизирани на Слика 24.

Пред 50тиот чекор моделот на роботот научил дека корисникот е среќен кога е испрашуван, а претходно бил успешен во одговорот на акцијата (Слика 4.24i). Откако, корисникот почнал да биде несреќен, т.е. гневен, во истото сценарио роботот почнал да ја учи оваа промена за на крајот по 100 чекори да ја научи функцијата  $Q$  дадена на Слика 4.24ii. Политиката која одговара на научената функција е очекуваната политика согласно промената на однесувањата на корисникот. На Слика 4.24iii може да се види како се менуваат вредностите на  $Q$  со текот на времето. Може да се забележи дека навистина брзо, по само неколку чекори, роботот ја научил промената на афинитетот на корисникот. Гледајќи ја вкупната награда за секоја од петте симулации може да се види како вкупната



Слика 25: Вкупна награда во секој чекор за сите 5 симулации во четвртата студија на случај.

награда почнува да опаѓа по 50тиот чекор, но потоа по околу десет чекори има тенденција да расте (Слика 4.24iv). Ова покажува дека моделот на роботот во даденото сценарио многу брзо се прилагодува на корисникот.

#### Четврта студија на случај

Ова сценарио е како сценариото во втората студија на случај, но со таа разлика што корисникот не е среќен секогаш кога роботот изведува акции од преферираниот тип на акции, туку корисникот е гневен кога роботот ќе изведе одредени специфични акции од тој тип. Имено, ќе земеме дека ако роботот извел акција од било кој тип со реден број 13, 14, 15 или 16, корисникот нема да биде среќен, па наградата која ќе ја добие роботот за изведување на ваква акција ќе биде -1. Знаејќи дека акциите со реден број 13, 14, 15 и 16 се однесуваат на акциите на роботот поврзани со едукативната тема собирање, велíme дека корисникот не е среќен кога наставникот, т.е. роботот, изведува активности на тема собирање (Додаток А). Да забележиме дека емоцијата на корисникот не е зависна од успешноста на корисникот да даде одговор на овие акции. Имено, одговорот на корисникот во ова сценарио ќе биде успешно или неуспешно што во симулациите ќе биде избрано на случаен начин.

Направени се пет симулации согласно дадената студија на случај. Процесот на учење може најдобро да се увиди во промената на вкупната награда во секој чекор која се добива за секоја симулација (Слика 25). Иако вкупната акумулирана награда во сите симулации има тенденција да расте, може да се види дека има периоди кога наградата која ја добива корисникот е негативна, па вкупната акумулирана награда на роботот се намалува. Ова се должи на неконзистентната емоција на корисникот во различните состојби на роботот. Имено, и покрај тоа што оптималната политика во ова сценарио е роботот да изведе акција на испрашување кога е во состојба успех и на предавање кога е во состојба неуспех, во симулацијата корисникот дава и негативна награда во дел од случаите кога ќе биде избрано да се користи оптималната политика.

Затоа што моделот на роботот многу брзо учи, што зависи од параметарот за учење каде е поставено  $\alpha = 0.9$ , вредноста на  $Q$  се ажурира многу брзо. Ова може да се види и од графикот на промената на  $Q$  во симулацијата со реден

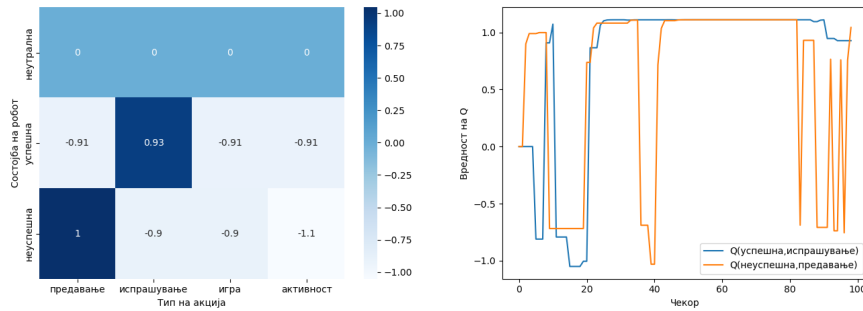
број 1 даден на Слика 4.26ii. Осцилациите се случуваат како резултат на избор на акции од тема собирање од страна на роботот. Овие акции резултираат со негативна емоција кај корисникот, па со тоа и негативна награда со која се ажурира вредноста на функцијата  $Q$  во процесот на поттикнувачко учење.

Следно се поставува прашањето зашто роботот ги избира овие акции иако тие го прават корисникот несреќен. Емоционалната меморија на роботот на крајот на 100те итерации во симулацијата со реден број 1 е прикажана визуелно на Слика 4.26iii. Може да се забележи дека во меморијата акциите кои се однесуваат на тема собирање, т.е. имаат реден број од најмалку 13, се поврзани со негативна емоција на роботот. Ова е јасно затоа што во овие случаи емоцијата на корисникот е негативна, поради што и емпатичниот наставник исто така има негативна емоционална обоеност.

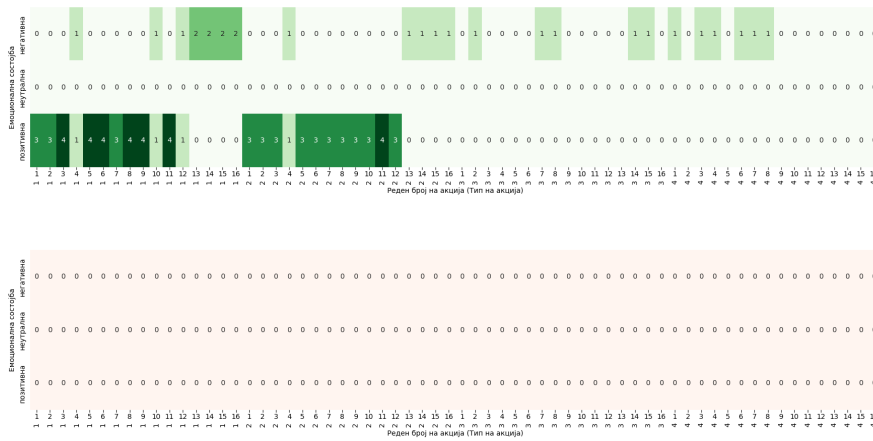
Согласно формулата за пресметување на цена за секоја акција, поголема цена се добива за акциите кога роботот имал негативно искуство споредбено со акциите кога имал позитивно искуство, за настаните регистрирани во позитивната меморија (Равенка (4.1)). Од друга страна, уделот во цената е ист ако го разгледуваме случајот со негативната меморија која ги меморира акциите кога корисникот не е активен. Во оваа студија корисникот секогаш е активен и дава одговор. На овој начин, при избор на следна акција во анализираното сценарио, предност се дава на акциите каде наставникот имал позитивно обоена емоција. Уште повеќе, согласно пресметката на цена на акциите, предност им се дава на акциите кои се поретко изведени што овозможува интеракцијата да е порамномерна во смисла на тоа роботот да прави разновидни активности. Оттука, по некое време роботот може повторно да ги избере акциите кои му носат негативна емоционална обоеност, иако таквиот избор се случува многу поретко споредбено со изборот на акции кои му носат позитивна емоционална обоеност. Ова може да се потврди во прегледот на емоционалната меморија на роботот по 100те изведени чекори во случајот на симулација со реден број 1 (Слика 4.26iii). Имено се гледа дека многу почесто има настани каде роботот избрал активности кои не се од тема собирање, т.е. почесто се избираат активностите со реден број од 1 до 12. Уште повеќе ако погледнеме колкава е цената на изведување на секоја од акциите по 100те чекори во симулацијата со реден број 1 (Слика 4.26iv) може да видиме дека цената на активностите од тип предавање на тема собирање чиј индекс е од 13 до 16 е поголема споредбено со другите. Оттука, во следниот чекор ако роботот треба да избере акција од тип предавање, би избрал да ја изведе акцијата со реден број 2 или 7 кои имаат најмала цена. Ваквата политика на селекција на акции на роботот придонесува корисникот да биде посреќен во интеракцијата затоа што роботот поретко ќе ги избира акциите кога корисникот е несреќен и на овој начин роботот го мотивира корисникот повеќе да научи во интеракцијата.

#### Петта студија на случај

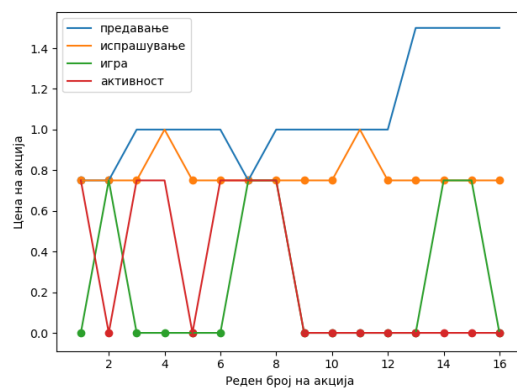
Во ова сценарио ќе симулираме дека корисникот дава неуспешни одговори само за активностите од тема собирање. Имено, во ова сценарио сè друго ќе биде согласно со сценариото опишано во втората студија на случај. Промената во симулацијата ќе биде само во одговорот на корисникот кој нема да се бира на случаен начин. Тука одговорот ќе биде успешен за сите активности кои не се од тема собирање, а неуспешен само за активностите од тема собирање.



i Вредноста на функција Q по 100 и Промената на функцијата Q во секој чекор од симулацијата

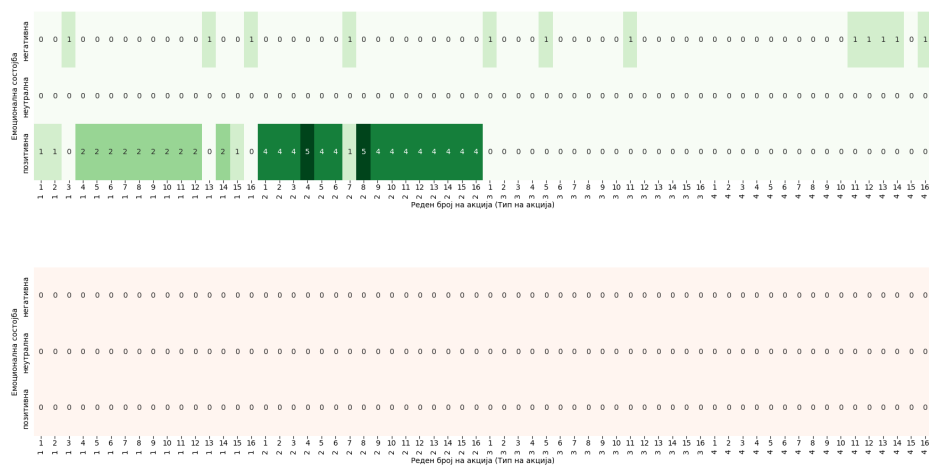


iii Емоционалната меморија на роботот по 100 чекори

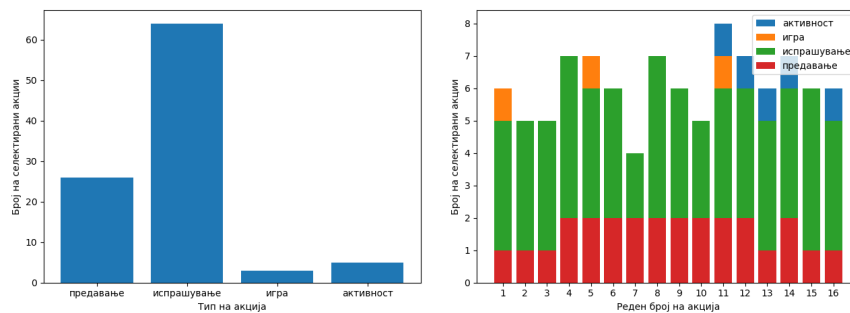


iv Цена за изведување на секоја од акциите дефинирани за секој тип акции по 100 чекори

Слика 26: Резултати од четвртата студија на случај за симулацијата со реден број 1.



### i Емоционалната меморија на роботот



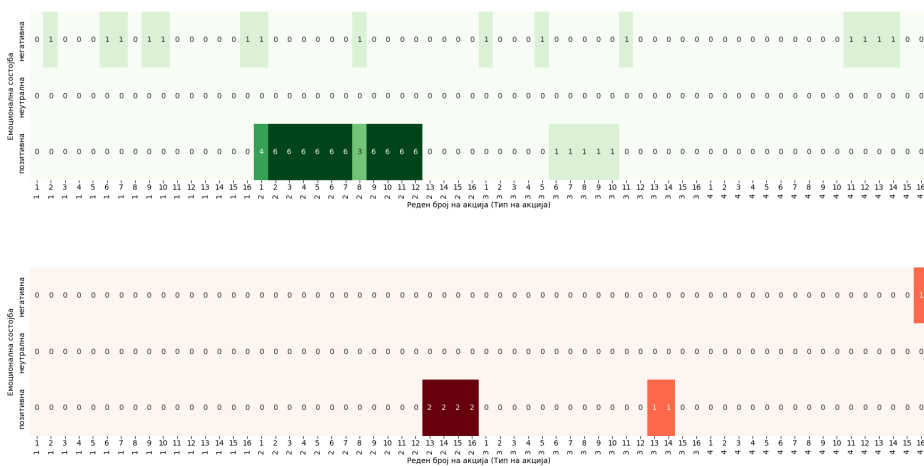
- ii Распределба на честотата на селекција на различни типови акции
- iii Распределба на честотата на селекција на акции со различен реден број

Слика 27: Резултати од петтата студија на случај за симулацијата со реден број 0.

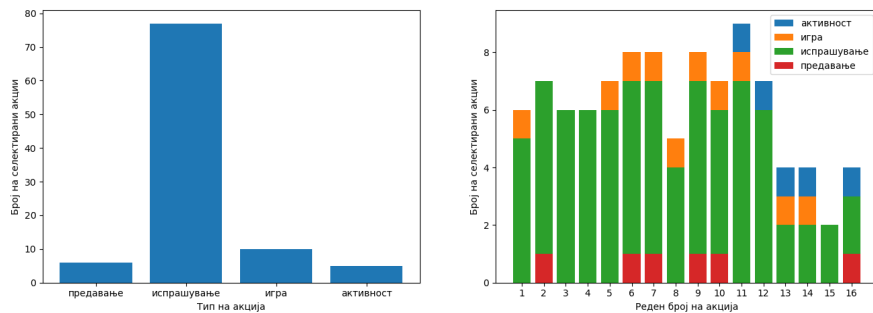
Промената во успешноста на корисникот не треба да предизвика никаква промена во процесот на учење за селекција на типот на акција. Тука ќе анализираме дали има промена во селекцијата на редниот број на акција. Имено, во позитивната емоционална меморија на роботот ќе бидат зачувани информациите за настаните и кога корисникот е успешен и кога не е успешен. Имено и во двата случаи корисникот бил активен во интеракцијата.

Со симулирање на ова сценарио пет пати ги анализиравме резултатите. Навистина, научената функција  $Q$  е согласна со оптималната политика. Уште повеќе, процесот на учење на оваа функција е сличен како во втората студија на случај. Во однос на меморијата може да се види дека акциите на тема собирање, кои имаат реден број поголем од 12, се регистрирани во позитивната меморија (претставена во зелениот график на Слика 4.27i). Оттука, во симулацијата, согласно моделот на роботот не се прави разлика меѓу активностите кога корисникот бил успешен и неуспешен. Затоа, роботот избира меѓу сите акции од избраниот тип рамномерно. Во симулацијата со реден број 0 најчесто е избрана акција од тип испрашување (Слика 4.27ii). Од друга страна, меѓу акциите од тип испрашување сите акции се избираат рамномерно (Слика 4.27iii). На овој начин моделот на роботот со слична честота избира акции каде корисникот е успешен и неуспешен.





i Емоционалната меморија на роботот



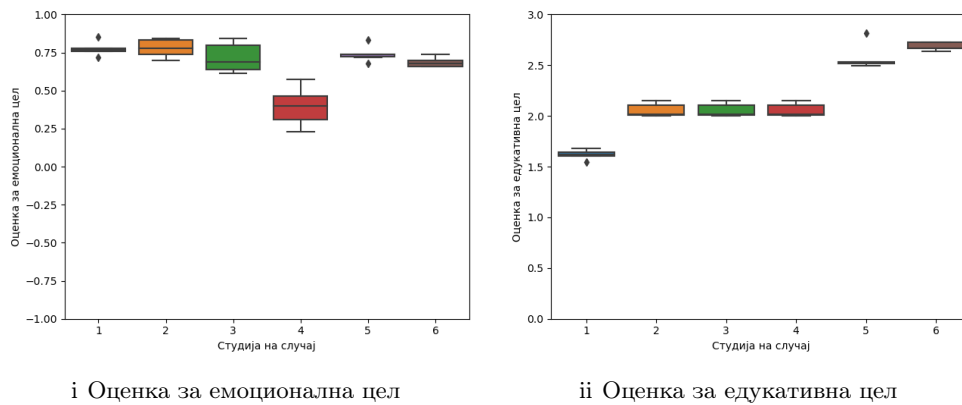
- ii Распределба на честотата на селекцијата на различни типови акции
- iii Распределба на честотата на селекцијата на акции со различен реден број

Слика 28: Резултати од шестата студија на случај за симулацијата со реден број 0.

Шеста студија на случај

Ова сценарио е слично со претходното, со единствена разлика што корисникот не е активен, т.е. не дава одговор на активностите од тема собирање (во случаите каде се бара одговор од корисникот), наместо да биде неуспешен во овие случаи како во петтата студија на случај. Оттука во овој случај роботот не може никогаш да дојде во состојба неуспех и оттука не може да научи ништо за оваа состојба.

Најзначајната разлика со претходниот случај може да се воочи од прегледот на меморијата на роботот. Имено, во оваа студија на случај информацијата за акциите кои довеле до неактивност на корисникот се запишани во негативната меморија (4.28i). Ова е согласно дефиницијата на емоционалната меморија во Поглавје 3.4. Оттука, за разлика од претходната студија на случај, моделот на роботот ќе им дава помала предност на акциите на тема собирање. Ова може да се види на Слика 4.28iii. На овој начин со предложениот модел на однесување на роботот, наставникот Нао поретко ќе ги изведува активностите на тема собирање. Со тоа роботот тежнее да го задржи вниманието кај ученикот избирајќи почесто активности во кои ученикот е активен.



Слика 29: Распределба на оценките добиени за направените симулации во различните студии на случај.

#### 4.4.4 Евалуација на интеракцијата

Претходно, за евалуација на целокупната интеракција дете-робот дефинираме вкупна оценка за интеракцијата која е дадена во Равенката (4.3). Оваа оценка е пресметана од две компоненти кои се однесуваат на тоа дали роботот ја остварил примарната емоционалната цел да го направи расположено детето и секундарната едукативна цел да го научи детето. Подетално објаснување за пресметките за оценката на интеракција е дадено во Поглавје 4.2.3. Да забележиме дека оценката на емоционалната цел има минимална вредност -1. Ова е случајот кога наградата која ја добива роботот секогаш е -1, т.е. корисникот со веројатност 1 има негативно обоена емоција. Слично, максималната вредност за оценката е 1 и се добива во случајот кога сите награди на роботот имаат вредност 1 што укажува дека корисникот има сигурно позитивна емоција. Опсегот на вредностите за едукативната цел е меѓу 0 и 3. Минималната вредност би се добила кога во секој чекор корисникот е неактивен, па роботот е во неутрална состојба. Максималната вредност 3 би се добила ако корисникот во секој е чекор успешен, па со тоа и роботот би бил во успешна состојба. На Слика 29 дадена е распределбата на компонентите на оценките за симулациите во различните студии на случај.

Согласно различните студии на случај (Табела 4.6), емоцијата на корисникот е симулирана на ист начин во сценаријата со реден број 1, 2, 5 и 6. Да забележиме дека симулацијата на емоцијата на корисникот влијае на оценката за остварување на емоционалната цел. Во сите овие случаи забележавме дека роботскиот модел многу брзо учи кој тип на акција да го избере зависно од тековната состојба на роботот користејќи го методот на поттикнувачко учење. Ова овозможи вкупната оценка за остварување на емоционалната цел на роботот да го направи корисникот среќен да е блиску до максималната и изнесува околу 0.75 (Слика 4.29i). Кај третата студија на случај имаше промена на тоа кој тип на акција го прави корисникот среќен во дадена состојба на роботот. Предложениот модел го научи ова многу бргу, па вкупната оценка за остварување на емоционалната цел е во рангот на оценките добиени кога ваква промена не се случила. Сепак забележителен е поголем опсег на вредностите што се должи на различната брзина на адаптација меѓу симулациите. Интересно е да се анализираат резултатите од четвртата студија на случај. Во овој случај имавме неконзистентно однесување на корисникот затоа што во истата роботска состојба и ист тип на акција, корисникот дава и позитивна награда (има позитивна емоција) и негативна

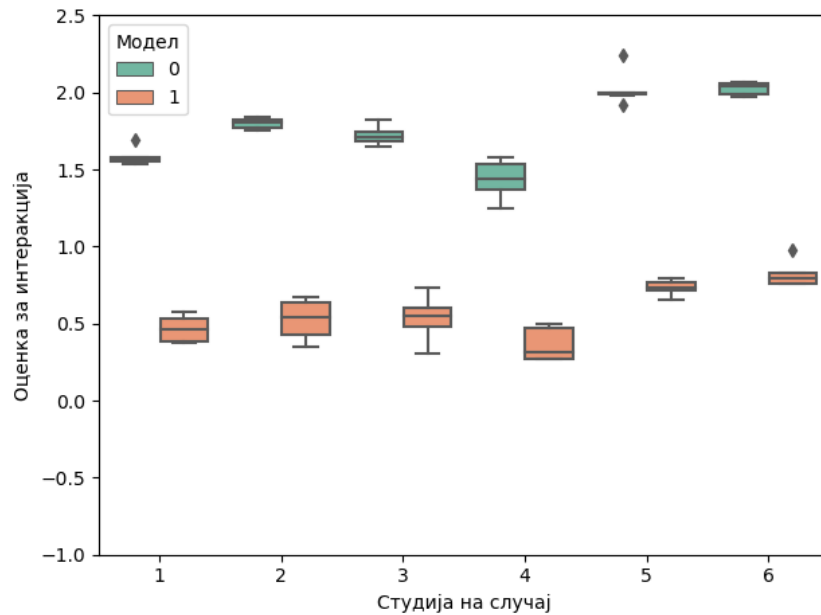
награда (има негативна емоција). Оваа неконзистентност донесе до појава на осцилации во наградите кои ги добива роботот, па вкупната оценка за емоционалната цел во овој случај е помала од останатите случаи. Ова сценарио покажува едно ограничување на моделот да потешко се справува со ситуации со ваква неконзистентност. Од друга страна покажавме дека моделот на роботот брзо се прилагодува и учи што овозможува брзо да ја адаптира функција  $Q$ , па негативната награда која роботот ја добива е краткорочна.

Оценката на едукативната цел е поврзана повеќе со симулацијата на одговорот на корисникот. Имено, од одговорот на корисникот директно зависи состојбата на роботот од што зависи оценката за едукативната цел. Имајќи предвид дека во втората, третата и четвртата студија на случај одговорот на корисникот се избира на случаен начин меѓу успешен и неуспешен, во овие сценарија забележуваме слична распределба на оценката која е околу 2. Ова е очекувано затоа што кога роботот е во состојба успех добива оценка 3, а во состојба неуспех оценка 1. Затоа што состојбата на роботот (успех или неуспех) е генерирана на случаен начин, очекувано е дека оценката е во просек 2. Во првата студија на случај корисникот може и да е неактивен, во кој случај состојбата на роботот може да е неутрална. За оваа состојба оценката за остварување на едукативната цел е 0 затоа што корисникот не учествува во интеракцијата. Оттука, јасно е дека оценката за едукативната цел во првата студија на случај е помала од другите сценарија наведени претходно.

Интересно е да се види колкава е оценката за остварување на едукативната цел во случаите пет и шест во кои всушност успешноста на корисникот не се генерира на случаен начин. Во петтата студија на случај, оценката за едукативната цел е околу 2.5 што се должи на тоа што во секој чекор од интеракцијата корисникот е успешен за што се добива оценка 3 или неуспешен за што се добива оценка 1. Затоа што корисникот е успешен во три од четири теми, а не е успешен само во темата собирање, може да се објасни големината на оценката добиена во оваа студија на случај. Во шестата студија на случај корисникот не е активен при изведување на активностите на тема собирање, а е успешен во сите други активности. Бидејќи со предложениот модел поретко се избираат активностите на тема собирање, поретко цената во еден чекор е 0. Оттука, вкупната оценка на едукативна цел во овој случај е поголема од петтата студија на случај и е блиску до максималната вредност 3.

За евалуација на предложениот роботски модел во оваа докторска работа, направена е споредба на предложениот модел со модел во кој селекцијата на типовите акции и на редниот број на акции кои роботот треба да ги изведе ќе се генерираат на случаен начин. За таа цел спроведени се по пет симулации за сите дефинирани студии на случај каде наместо предложениот модел се користи моделот кој работи на случаен начин. Споредбата на вкупната оценка за интеракција користејќи ги двата различни модели е дадена на Слика 30.

На сликата може да се види дека интеракцијата има поголема оценка за сите студии на случај кога се користи предложениот роботски модел. Поголемата оценка за интеракција најчесто се должи на поголемата оценка за остварување на примарната, т.е. емоционалната цел на роботот. Ова покажува дека нашиот модел навистина овозможува роботот да го направи корисникот порасположен во текот интеракцијата. Од друга страна, кај оценките за остварување на едукативната цел разлика меѓу моделите на однесување на роботот може да има само кај случаите пет и шест. Како што е очекувано, предложениот модел има поголема оценка во шестата студија на случај, додека слична оценка во петтиот случај.



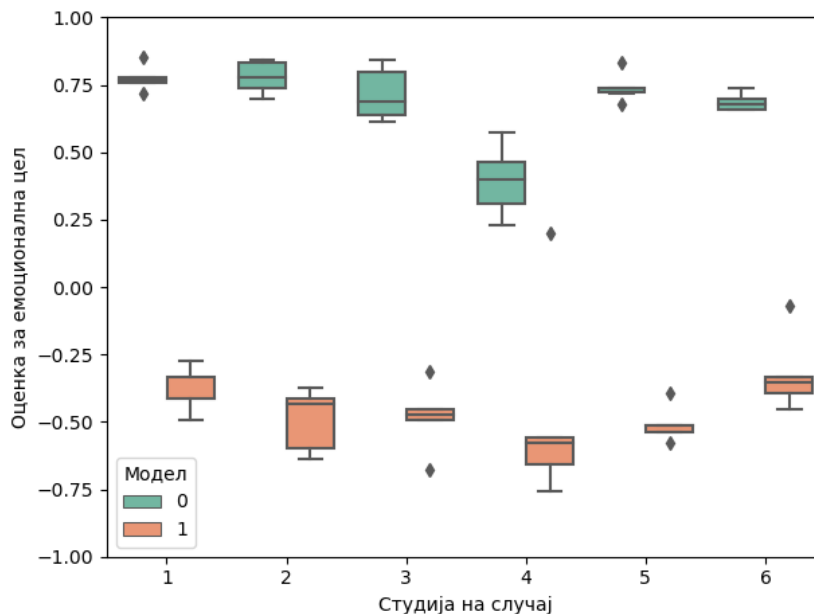
Слика 30: Споредба на распределбата на оценката за интеракција добиени во симулациите со предложениот роботски модел (0) и со роботски модел кој работи на случаен начин (1) за различните студии на случај.

Сепак во вкупната оценка за интеракција подобрувањето на интеракцијата се забележува кај сите студии на случај.

#### 4.4.5 Дискусија на резултатите

Втората хипотеза во докторска работа беше дека предложениот роботски модел може да се примени во апликација човек-робот во која примарната цел е човекот да има позитивно емоционално искуство во интеракцијата. За да ја тестираме зададената хипотеза беше дефинирана и имплементирана апликација наменета за интеракција дете-робот чија примарна цел е детето да чувствува и покажува позитивна емотивна состојба. Покрај тоа секундарната цел на роботот е интеракцијата да овозможи едукација на детето со активностите на роботот-наставник Нао. Оваа апликација е подетално опишана во Поглавје 2.3.3. Спроведовме експерименти прво во симулациска околина за да се тестира дали навистина предложениот роботски модел на однесување овозможува роботот да ги оствари зададените цели.

Од поголем интерес е дали во апликацијата роботот успешно ги остварува емоционално базираните цели што се однесуваат на емоцијата на детето. Резултатите од експериментите покажаа високи оценки за остварување на емоционалната цел во спроведените студии на случај согласно дефинираните реални сценарија (Слика 4.29i). Високата емоционална оценка на симулираните сесии со роботот се должи на тоа што предложениот роботски модел овозможува роботот да ги научи афинитетите на детето и да научи каков тип на акција ќе го расположат детето откако во претходниот чекор од интеракцијата детето било успешно или неуспешно во активността, или пак воопшто било активно. Учењето е овозможено со методот на Q-учење со кој роботот ја учи функцијата Q, а со тоа паралелно ја учи и оптималната политика што ќе овозможи во иднина корисникот да има што повеќе позитивно обоена емоција.



Слика 31: Споредба на распределбата на оценката за остварување на емоционалната цел добиени во симулациите со предложениот роботски модел (0) и со роботски модел кој работи на случаен начин (1) за различните студии на случај.

Уште повеќе, експерименталните резултати покажаа дека оценката за емоционалната цел на роботот каде е имплементиран предложениот роботски модел е поголема од експериментите каде е имплементиран роботски модел каде акциите се избираат на случаен начин (Слика 31).

Следно, ќе ги сумираме резултатите од дадените студии на случај. За таа цел прво во Табела 4.6 даден е краток опис на студиите. Сумарно заклучоците во секој од дадените студии на случај се дадени на Табела 4.7. Првите четири студии на случај овозможуваат различни сценарија кои влијаат на способноста роботот да ја научи оптималната политика на однесување. Кога има единствена политика на однесување, предложениот модел лесно и брзо ја учи оваа политика (втора студија на случај). Во првата студија на случај има две оптимални политики. Имено, во неутрална состојба, роботот може да избере да изведе акција од тип игра или слободна активност. И двете можности претставуваат две различни оптимални политики. Експериментите покажаа дека политиката која ја научил роботот е една од двете оптимални политики. Разликата се должи на случајниот процес во кој се генерирани симулациите. Од друга страна, симулациите покажаа дека после доволно долго време роботот успева да научи функција  $Q$  која е блиску до идеалната.

Резултатите од третата студија на случај покажаа дека роботот брзо се адаптира на новата оптимална политика, додека во четвртата студија на случај увидовме дека неконзистентна оптимална политика во текот на времето придонесува до брзи промени на политиката која ја научил роботот.

Перформансите на предложениот роботски модел во однос на остварувањето на секундарната цел на роботот да овозможи успешна едукација се анализирани во петтата и шестата студија на случај. Првите две едукативни подцели во апликацијата за Нао како учител беа да се овозможи детето да се запознае со што повеќе поими и да биде поттикнато да учи задавајќи му што повеќе

Табела 4.6: Краток опис на студиите на случај.

Број	Тип на опис	Опис
1	емоција	Среќен кога бил успешен и го испрашуваат, кога бил неуспешен и Нао предава и кога бил неутрален и сега игра или изведува слободна активност. Инаку бил гневен.
	успех	Случајно генериран: успешен, неуспешен, неактивен.
2	емоција	Исто како во случај 1.
	успех	Случаен меѓу успешен и неуспешен.
3	емоција	Кога бил неуспешен и неутрален исто со случај 1. Кога бил успешен бил среќен кога го испрашуваат во првите 50 чекори или кога играл во следните 50 чекори. Инаку бил гневен.
	успех	Случаен меѓу успешен и неуспешен.
4	емоција	Среќен бил кога бил успешен и го испрашуваат, кога бил неуспешен и Нао предава и кога бил неутрален и сега игра или изведува слободна активност, но само ако активноста не е на тема собирање.
	успех	Случаен меѓу успешен и неуспешен.
5	емоција	Исто како во случај 1.
	успех	Неуспешен за акциите на тема собирање, инаку е успешен.
6	емоција	Исто како во случај 1.
	успех	Неактивен за акциите на тема собирање, инаку е успешен.

различни активности. Во петтата студија на случај може да се види дека во даденото сценарио Нао рамномерно бира акција од даден тип (Слика 4.27iii). Ова овозможува разноликост во активностите спроведени од страна на роботот за едукација на детето со што роботот успешно ги остварува првите две едукативни подцели. Од друга страна, во шестата студија на случај може да се увиди дека со предложениот роботски модел се остварува едукативната цел на роботот да го задржи интересот на детето. Имено, следејќи ја тезата дека интересот на детето е голем кога детето е активно и учествува во интеракцијата, а детето губи интерес кога не е активно, резултатите од последната студија на случај покажуваат дека навистина акциите од тема собирање за кои детето нема интерес се избираат поретко од страна на роботот (Слика 4.29ii).

Имајќи ги предвид резултатите од спроведените експерименти покажавме дека навистина предложениот роботски модел функционира кон остварување на емоционално-базираната цел, но и на секундарната цел поврзана со едукација. Со тоа ја потврдуваме хипотезата дека предложениот роботски модел може да се примени во апликација човек-робот во која примарната цел е човекот со кој роботот е во интеракција да има позитивно емоционално искуство во интеракцијата.

Табела 4.7: Краток опис на резултатите од студиите на случај.

Број	Опис на резултат
1	Ако има повеќе решенија за оптималната политика, Нао научува една.
2	Нао ја научува оптималната политика кога таа е единствена.
3	Ако има промена на оптималната политика во текот на времето, Нао се прилагодува и ја научува новата политика.
4	Ако Нао добива и позитивни и негативни награди кога се однесува согласно оптималната политика, Нао брзо ја менува функцијата $Q$ што јавува осцилации во оптималната политика со текот на времето.
5	Изборот на акции од даден тип е рамномерен меѓу акциите кога корисникот е активен, под претпоставка дека роботот има иста емоционална обоеност.
6	Честотата на избор на акции од даден тип за кои корисникот не е активен, е помала од честотата на избор на акции за кои е активен, под претпоставка дека роботот има иста емоционална обоеност.





## Заклучок

Главен предмет на истражување во оваа докторска работа се емоционалните роботи. Тука спаѓаат оние роботи кои во својот модел го вклучуваат концептот на емоции, а кој што е својствен за живите суштества како што се луѓето. Денес се креираат сè повеќе социјални хуманоидни роботи, кои во сè повеќе аспекти наликуваат на луѓето, а еден од тие аспекти е вклучувањето на емоциите.

Во оваа докторска работа проблемот на вклучување емоции во еден роботски систем е разгледан прво од теориски аспект, а потоа од практичен аспект. Имено, од теориски аспект го анализираме значењето на примената на емоциите во еден роботски систем. Ние идентификувавме карактеристики кај роботите кои може да се подобрат со примена на емоции, како што се на пример афекција, вештачка интелигенција и автономија. Понатаму, претставивме неколку значајни предложени роботски модели кои вклучуваат емоции и увидовме дека не постои консензус за тоа на кој начин треба емоциите да се моделираат во еден роботски систем.

Голем дел од нашата работа беше посветен на сеопфатна анализа на постоечки емоционални роботи. Всушност, во оваа докторска работа анализирани се вкупно 35 емоционални роботи. Анализата е направена од различни аспекти. Во следниот дел на кратко ќе ги опишеме анализираниите аспекти како и најзначајните резултати од анализата.

- Прво, направен е преглед на апликациите на анализираниите емоционални роботи. Во најголем процент емоционалните роботи имаат примена во интеракција човек-робот. Седум од роботите, меѓу кои и роботите iPal, Zenbo, Perre и Sophia, се комерцијални роботи. Овие роботи можат да се користат во најразлични апликации, а за нив веќе се креирани апликации каде се користат емоциите. Поспецифични апликации каде се користат емоционалните роботи се апликации за едукација, придружба и забава, а дел од роботите како Cat и Fropeus се партнери во дадени игри. Дополнително, емоционалните роботи како Kaspar имаат значајна примена во терапија на деца со аутизам.
- Следно, анализирано е како се претставуваат емоциите кај емоционалните роботи. Кај најголем дел од роботите, емоциите се претставени на категоришки начин. Притоа, бројот на категории варира од 3 до 24 кај различните роботи, а варира и типот на селектирани категории. Изборот на категориите на емоции е тесно поврзан со апликација. Сепак, значителен дел од емоционалните роботи ги користат основните емоции дефинирани од Ekman или пак нивна модификација.
- Посебен акцент дадовме на преглед и сублимација на различните начини на кои може да се моделираат емоциите во апликациите кај 35те роботи кои беа анализирани. За таа цел дефиниравме генерички роботски модел кој ги содржи компонентите каде може да се моделираат емоциите. Овој

модел има три големи компоненти: модул за перцепција, модул за донесување одлуки и модул за извршување на однесувањето. Преостанатите компоненти кои може да бидат под влијание на емоциите се компоненти поврзани со учење, меморија и цели. Кај 34, од анализираните 35 емоционални работи, емоциите се применуваат при роботска експресија на емоции. Од друга страна, само кај 12 работи емоциите се користат во процесот на роботска перцепција каде најчесто станува збор за перцепција на емоционална експресија на луѓето со кои роботот е во интеракција. Повеќе од половина од анализираните работи ги користат емоциите за да донесат одлука за нивното однесување, а од нив само кај 9 роботот може да учи со помош на емоциите. Дел од емоционалните работи имаат емоционално-водени цели како подобрување на хомеостатичната состојба на роботот, погодна добросостојба, чувствување на повеќе позитивни емоции. Да забележиме дека сите овие цели се однесуваат на емоционалната состојба на роботот. Од друга страна, целта на роботот Minerva е да го добие интересот на набљудувачите, а целта на роботот Forpheus е да го направи натпреварот поинтересен. И во двата случаи целта на роботот е тесно поврзана со емоцијата кај лицето со кое роботот е во интеракцијата. Нашата анализа покажа дека покрај емоционалната состојба на роботот, која може да биде во меморијата на роботот, само кај роботите Perreg и Nadine се користат концепти на емоционално-водена меморија. На пример, во апликација на роботот Perreg роботот чува слики кои се поврзани со чувствата на роботот.

- Во понатамошната анализа на емоционалните работи, даден е преглед на карактеристики кои роботите можат да ги стекнат со примена на емоциите. Пример за вакви карактеристики се емпатичност, пријателство, итн. Резултатите од одредени експерименти укажуваат дека емоциите помагаат во подобрување на комуникацијата на роботите со луѓето. Овие резултати укажуваат на големото значење во примена на емоциите кај роботските модели.

Следен значаен дел од оваа докторска работа е дефинирањето на нов роботски модел базиран на емоции. Специфично за овој модел е што емоциите се моделирани во сите компоненти, претходно идентификувани во генеричкиот модел, каде може да се користат емоции. Имено, емоциите во предложениот роботски модел се користат при перцепција на емоции кај лицето со кое роботот е во интеракција и при роботска експресија на емоции. Исто така, емоциите се користат во рамки на модулот за донесување одлуки при дефиниција на емоционална состојба, емоционално - водените цели и емоционално-водена меморија. Последно, емоциите се користат во процесот на одлучување и тоа како фидбек при учење на роботското однесување и како дел од меморијата на роботот користена за селекција на акции.

Архитектурата на предложениот роботски модел (Слика 7) вклучува модул за перцепција, донесување одлуки и оценување. Новитетот во предложениот модел се наоѓа во модулот за донесување одлуки. Прво, дефинираниот модел овозможува роботот да учи во реално време при тоа користејќи го емоционалниот одговор од лицето со кое роботот е во интеракција. Учењето е овозможено со таканареченото поттикнувачко учење чија математичката рамка може да се дефинира преку Марков процес на одлучување. Алгоритмот за учење предложен во нашиот модел е Q-учење. Роботот учи како да го селектира најподобиот тип на акција кога се наоѓа во дадена состојба така што ќе се максимизира наградата која ја добива од корисникот, а која се пресметува од информацијата

за емоции перцепирани кај корисникот. Следно, во предложениот модел посебно е дефинирана емоционална состојба на роботот која што е различна од другата, функционална, состојба на роботот. Емоционалната состојба математички е опишана со Скриен Марков Модел. Попрецизно, емоционалната состојба на роботот е скриена состојба која не може да се „осети“, но која зависи од емоцијата на лицето со кое робот е во интеракција и која може да се набљудува. Оттука, во емоционалниот модул во секој чекор се наоѓа емоционалната состојба на роботот. Параметрите на Скриениот Марков Модел се добиени со примена на симулирани податоци. Овие параметри се дел од карактерот на роботот кој е запишан во меморијата и кој не се менува со текот на времето. Карактерот на роботот ги вклучува и параметрите поврзани со процесот на учење. Покрај податоците за состојбата и карактерот на роботот, во меморијата на роботот е вклучена и емоционално-зависна меморија во која се чуваат информации за историјата на интеракцијата заедно со емоционалната состојба на роботот. Како последен дел од модулот за донесување одлуки е модулот за селекција на акција во кој се избира следната акција на роботот. За селекција на акција се користат селектираниот тип на акција избран во модулот за одлучување базиран на учење и емоционално-водената меморија. При селекцијата на акцијата во предвид се земени целите на апликацијата. Примарна цел на апликација која го користи дадениот модел е емоционалната цел роботот да го расположи лицето со кое е во интеракцијата така што лицето ќе чувствува позитивни емоции во интеракцијата.

Како посебен дел од модулот за перцепција е модулот за перцепција на емоции од звучни и визуелни карактеристики кај лицето со кое роботот е во интеракција. Во оваа докторска работа даден е предлог класификациски модел за препознавање на емоции кој е базиран на алгоритмот Машини со поддржувачки вектори. Посебен модел се креира од звучни карактеристики кои се базираат на интензитет, висина на тон и темпо, а посебен модел се креира од визуелни карактеристики кои се пресметуваат од координатите на точките на лицето. Со моделите се класифицираат сегменти од звучниот и визуелниот запис, а резултатите се користат за да се класифицира целиот снимен запис за што е дефинирана соодветна постапка. Евалуацијата на моделите за класификација на емоции, изведена на позната база на податоци, покажаа дека моделите кои користат визуелни карактеристики даваат значително подобри резултати, споредбено со моделите кои користат звучни карактеристики.

Концептот на вклучување на емоциите во различни аспекти од роботскиот модел овозможува различни можности за примена на моделот. Дефинираниот модел е доволно општ за да може да се применува во различни апликации кои се базираат на интеракција човек-робот. Оттука, предложениот роботски модел претставува основа за креирање на различни апликации чиј дијаграм на активности е даден на Слика 8.

За да се анализира и тестира предложениот роботски модел креиравме пример апликација за роботот Nao во која роботот има улога на учител. Апликацијата е наменета да се користи за едукација при интеракција дете-робот. Апликацијата е креирана користејќи го програмскиот јазик Python и истата може да се изврши во симулациска и во реална околина. Специфично за апликацијата се дефинирани целите на роботот, состојбите на роботот, типовите на акции и акциите на роботот. Во апликацијата роботот има примарна емоционална цел да го расположи детето така што ќе покажува позитивна емоционална состојба. Секундарната цел во апликацијата е роботот да го едуцира детето преку изведување на различни активности за учење на различни теми. За таа цел роботот треба да го запознае детето со нови поими, да поттикнува учење, да го задржи интересот кај детето

и да остане мотивиран за да може квалитетно да предава.

Спроведени се експерименти кои ја тестираат апликацијата во симулациска околина. Ги анализиравме карактеристиките на роботскиот модел во 6 различни студии на случај. Посебен акцент во анализата е ставен на испитувањето на моќноста роботот да учи и на процесот на селекција на акциите на роботот кој зависи од емоционално-зависната меморија. Резултатите покажаа дека оценката за остварување на емоционалната цел на роботот користејќи го предложениот модел е значително поголема од оценката која би се добила кога би се користел случаен модел на донесување одлуки. Во студиите на случај каде детето има единствена оптимална политика, предложениот роботски модел брзо во десетина чекори успева да ја научи оптималната политика. Понатаму, резултатите покажаа дека роботот брзо се адаптира на промена на оптималната политика, додека неконзистентната оптимална политика води до осцилации во наградите кои ги добива роботот. Покажавме дека селекцијата на акциите на роботот е рамномерна во случај кога детето активно учествува во секој чекор од интеракцијата. Од друга страна, со предложениот роботски модел, помала е честотата на селекција на оние активности за кои роботот има информација во меморијата дека корисникот не бил активен. Ова е со цел роботот да го задржи вниманието на ученикот во интеракцијата, а истото е овозможено со помош на емоционално-водената меморија.

Во овој труд беа дефинирани две хипотези. Хипотеза 1 гласеше: „Може да се дефинира нов роботски модел за однесување во кој концептот на емоции е вклучен во различни аспекти од моделот, така што роботот ќе може да учи како да се однесува со цел притоа да го зголеми задоволството или емоцијата која се јавува кај луѓето со кои роботот е во интеракција“. Во овој труд ние дефинираме роботски модел во кој концептот на емоции се користи при перцепција на емоции, експресија на емоции, дефинирање на целите и емоционалната состојба на робот, имплементација на емоционално-базирана меморија и последно при одлучување на однесувањето при што емоциите се користат и во процесот на учење како роботот да се однесува. Резултатите од анализата на предложениот модел покажа дека навистина роботот може да научи како да се однесува за да ги оствари своите емоционално-водени цели. Втората хипотеза се однесува на тоа дека дефинираниот роботски модел може да се примени во апликација човек-робот во која роботот успешно ја остварува примарната емоционално-базирана цел. Оваа хипотеза ја потврдивме со креирање на апликација за роботот Нао во која роботот е учител во интеракција дете-робот. Резултатите покажаа дека оценката за остварување на емоционално-базирана цел на роботот во случајот кога е имплементиран предложениот роботски модел за селекција на однесувањето се поголеми од случајот кога роботот би одлучувал на случаен начин.

## Идна работа

Во следните чекори, кои претставуваат продолжение на оваа работа, ќе се работи на дополнување и подобрување на предложениот модел за роботско однесување базирано на емоции. Посебен акцент ќе биде ставен на подобрување на перформансите за перцепција на емоциите. Целта е да се добие поробустен модел за перцепција кој ќе може да се применува и кај различни лица, без претходно моделот да се прилагодува или да се тренира со видео и звучни записи од лицето со кое роботот ќе има интеракција. Друга можна насока за подобрување на моделот е да се надопolni примената на меморијата на роботот во рамки на роботско однесување. Целта ќе биде да се искористи меморијата на роботот и влијанието на емоциите во формирање на карактер на роботот кој ќе се однесува на сите активности на роботот и интеракции со различни лица.

Значајна насока за продолжување на оваа работа во иднина се однесува на евалуација на предложениот модел во реална околина. За таа цел потребно е да се спроведат експерименти каде група деца ќе можат да ја тестираат апликација креирана за роботот Нао. Целта на овие експерименти ќе биде да се евалуираат во реална околина перформансите на имплементираната апликација каде роботот Нао е во улога на учител. Ваквата евалуација бара значително време да се посвети на обезбедување околина за спроведување на експериментите и за самото спроведување на експериментите.

Во нашата визија за иднината на емоционалните работи, роботите имаат и сопствени емоции кои се определени со карактерот и искуството на роботот. Главната придобивка на емоционалните работи е нивна примена во разни апликации за интеракција со луѓе каде роботот покрај преостанатите функционалности ќе може да донесе радост кај лицата со кои е во интеракција. Оттука, значајна насока за идна работа се однесува на креирање на различни апликации каде се применува предложениот модел на роботско однесување. На пример, предложениот модел може да се имплементира и во апликации каде роботот е придружник на постари лица, деца или пак лица со посебни потреби. Навистина има голем број на апликации каде предложениот модел може да даде свој придонес.



## Додаток А

## Опис на акциите во апликацијата

Табела А.1: Табела со акциите на роботот од тип предавање на различни теми. (Дел 1)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
1	Броење	Говор	Јас имам една глава. Една.
2		Движење/лед	Нао ја мрда лево и десно главата.
		Говор	Јас имам две раце. Една. Две.
3		Движење/лед	Нао ги пружа прво едната па другата рака.
		Говор	Моите стапала можат да светат во три бои: една, две, три.
4		Движење/лед	Бојата на стапалата се менува во црвена, зелена и сина боја.
		Говор	На раката имам три прсти: една, две, три.
		Движење/лед	Нао ја пружа раката.
5	Поголемо и помало	Говор	Јас имам една глава. Но имам две раце. Јас имам повеќе раце од глави. Два е поголемо од еден.
6		Движење/лед	Нао ја покажува главата со рака. Нао ги пружа двете раце.
		Говор	Јас имам една уста. Но имам две уши. Јас имам помалку усти од уши. Еден е помало од два.
		Движење/лед	Нао ја покажува устата со рака. Нао ги покажува ушите со двете раце.
7		Говор	Еден. Моето лево стапало ќе засвети два пати. Моето десно стапало ќе засвети три пати.
		Движење/лед	Повеќе пати светеше моето десно стапало. Три е поголемо од два.
8		Говор	Левото стапало светнува црвено два пати. Десното стапало светнува црвено три пати.
		Движење/лед	Еден. Моето лево стапало ќе засвети два пати. Моето десно стапало ќе засвети три пати.
		Говор	Помалку пати светеше моето лево стапало. Два е помало од три.
		Движење/лед	Левото стапало светнува сино два пати. Десното стапало светнува сино три пати.

Табела А.2: Табела со акциите на роботот од тип предавање на различни теми. (Дел 2)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
9	Претходник и следбеник	Говор	Кога броиме, после два следи три. Еден. Два. Три. Три е следбеник на два.
10		Движење/лед	Нао ја придвижува главата горе-доле три пати.
		Говор	Да броиме до пет. Еден. Два. Три. Четири. Пет. После четири, следи пет.
11		Говор	Пет е следбеник на четири.
		Говор	Кога броиме, пред два се наоѓа еден. Еден. Два. Еден е претходник на два.
12		Движење/лед	Нао ја придвижува главата горе-доле два пати.
		Говор	Да броиме до четири. Еден. Два. Три. Четири. Три доаѓа пред четири.
13	Собирање	Говор	Три е претходник на четири.
		Говор	Моите стапала ќе светат два пати во црвена и три пати во сина боја. Да видиме колку пати вкупно ќе светат моите стапала. Пет. Два плус три е еднакво на пет.
14		Движење/лед	Стапалата на Нао светат два пати во црвена и три пати во сина боја.
		Говор	Моите стапала ќе светат еднаш во црвена и два пати во зелена боја. Да видиме колку пати вкупно ќе светат моите стапала. Три. Еден плус два е еднакво на три.
15		Движење/лед	Стапалата на Нао светат еднаш во црвена и два пати во зелена боја.
		Говор	Јас имам две раце. Ти имаш две раце. Вкупно имаме четири раце.
		Говор	Два плус два е еднакво на четири.
16		Движење/лед	Нао ги пружа напред двете раце.
		Говор	Јас имам една глава. Ти имаш една глава. Вкупно имаме две глави.
		Говор	Еден плус еден е еднакво на два.
		Движење/лед	Нао покажува со раката кон неговата глава, а потоа покажува напред кон главата на корисникот.



Табела А.3: Табела со акциите на роботот од тип испрашување на различни теми. (Дел 1)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
1	Бросње	Говор	Колку уши имаш ти? Нао покажува кон своите уши.
2		Движење/лед Говор	Колку нозе имаш ти? Нао покажува кон своите нозе.
3		Говор	Погледни ги моите стапала. Во колку бои светат моите стапала? Бојата на стапалата се менува во црвена, зелена и сина боја.
4		Движење/лед Говор	Колку прсти имаш на твојата рака?
5	Погодлемо и помало	Говор	Што има повеќе: една глава или две раце? Нао ја покажува главата со рака. Нао ги пружа двете раце.
6		Движење/лед Говор	Што има помалку: една глава или две нозе? Нао ја покажува главата со рака. Нао ги покажува нозете со двете раце.
7		Движење/лед Говор	Моето лево стапало ќе засвети два пати. Моето десно стапало ќе засвети три пати. Кое стапало засвети повеќе пати?
8		Движење/лед Говор	Левото стапало светнува црвено два пати. Десното стапало светнува црвено три пати. Моето лево стапало ќе засвети сино два пати. Моето десно стапало ќе засвети сино еднаш. Кое стапало засвети помалку пати?
		Движење/лед	Левото стапало светнува сино два пати. Десното стапало светнува сино еднаш.

Табела А.4: Табела со акциите на роботот од тип испрашување на различни теми. (Дел 2)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
9	Претходник и следбеник	Говор	Дали три е претходник на два?
10		Говор	Дали четири е следбеник на три?
11		Говор	Кој број е следбеник на еден?
12		Говор	Кој број е претходник на пет?
13	Собирање	Говор	Два плус еден е еднакво на четири. Точно?
14		Говор	Еден плус три е еднакво на четири. Точно?
15		Говор	Колку е еден плус три?
16		Говор	Колку е два плус два?

Табела А.5: Табела со акциите на роботот за поттикнување учење низ игра на различни теми. (Дел 1)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
1	Броење	Говор Движење/лед	Ајде да броиме заедно колку пати ќе ја кренам левата рака. Еден. Два. Три. Нао ја крева и спушта левата рака три пати.
2		Говор Движење/лед	Ајде да броиме заедно колку пати ќе светнат моите стапала во црвена боја. Еден. Два. Стапалата на Нао светат во следните бои последователно: црвена, зелена, сина, црвена и зелена.
3		Говор	Ајде да броиме заедно до четири. Еден. Два. Три. Четири.
4		Говор Движење/лед	Ајде да броиме заедно колку пати ќе светнат моите стапала во црвена боја. Стапалата на Нао се палаат и гасат во црвена боја пет пати.
5	Поголемо и помало	Говор Движење/лед	Јас имам пет прсти. Три е помало од пет. Ајде и ти кажи број помал од пет. Нао ја пружа левата рака.
6		Говор Движење/лед	Јас имам две раце. Четири е поголемо од два. Ајде и ти кажи број поголем од два. Нао ги пружа двете раце.
7		Говор	Сега ќе почнат да светат моите стапала. Ајде кажи дали повеќе пати ќе светат во сина или зелена боја.
8		Движење/лед Говор или зелена боја. Движење/лед	Стапалата светнуваат сино три пати, а зелено еднаш. Сега ќе почнат да светат моите стапала. Ајде кажи дали помалку пати ќе светат во црвена Стапалата светнуваат црвено четири пати, а зелено два.

Табела А.6: Табела со акциите на роботот за поттикнување учење низ игра на различни теми. (Дел 2)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
9	Претходник и следбеник	Говор	Јас имам пет години. Следната година ќе полнам шест. Шест е следбеник на пет. Колку години имаш ти, а колку ќе полиш следната година?
10		Говор	Јас имам пет години. Минатата година имав четири години. Четири е претходник на пет. Колку години имаш ти, а колку имаше минатата година?
11		Говор	Надopolни со следниот број. Еден. Два. Три.
12		Говор	Надopolни со претходниот број. Три. Два. Еден
13	Собирање	Говор	Ако моите стапала светнат три пати во црвена и три пати во сина боја, колку пати вкупно ќе светнат моите стапала? Ајде да видиме! Број колку пати вкупно ќе светат моите стапала. Вкупно моите стапла светнаа шест пати.
14		Движење/ лед Говор	Стапалата на Нао светат три пати во црвена и три пати во сина боја. Ако моите стапала светнат два пати во зелена и четири пати во сина боја, колку пати вкупно ќе светнат моите стапала? Ајде да видиме! Број колку пати вкупно ќе светат моите стапала. Вкупно моите стапла светнаа шест пати.
15		Движење/ лед Говор	Стапалата на Нао светат два пати во зелена и четири пати во сина боја. Јас имам две нозе, а и ти имаш две нозе. Ајде да изброиме заедно колку нози имаме! Еден. Два. Три. Четири. Вкупно имаме четири нозе. Два плус два е четири.
16		Движење/ лед Говор	Нао покажува прво кон левата па десната нога, па покажува напред лево и десно. Јас ќе ја кренам левата рака два пати, а десната еднаш. Ајде да изброиме заедно колку пати ќе кренам некоја рака! Еден. Два. Три. Вкупно кренав една рака три пати. Два плус еден е три. Нао ја крева левата рака два пати, а десната еднаш.

Табела А.7: Табела со акциите на роботот од тип слободни активности. (Дел 1)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
1	Бросење	Говор Движење/лед	Погледни што можам да направам. Ке повторам два пати. Ајде и ти. Нао станува и се поклонува два пати.
2		Говор Движење/лед	Ајде да слушаме музика. Ке пуштам една песна. Ајде да играме. Нао пушта музика и игра.
3		Говор	Јас не можам да скокам. Дали ти можеш да скокнеш три пати. Пробај!
4		Говор	Јас не можам да застанам на една нога. Дали ти можеш да застанеш на една нога? Пробај да застанеш! Ке бројам до два. Еден, два.
5	Поголемо и помало	Говор	Јас имам 5 години. Колку години имаш ти? Дали јас имам повеќе години од тебе?
6		Говор	Ајде да слушаме музика. Ке пуштам песна која трае помалку од два минути.
7		Говор Движење/лед	Јас ќе ја кренам раката два пати. Крени ја и ти раката повеќе пати од мене. Нао ја крева и слушта левата рака два пати.
8		Говор Движење/лед	Јас ќе ја повторам следната вежба три пати. Ајде повтори ја и ти вежбата, но помалку пати од мене. Нао станува и клеткнува три пати.

Табела А.8: Табела со акциите на роботот од тип слободни активности. (Дел 2)

Број	Тема	Тип на акција	Опис
9	Претходник и следбеник	Говор	Ајде да слушаме музика. Јас ќе ја пуштам песна која е после третата на листата. Ќе ја пуштам четвртата песна. Четири е следбеник на три. Ајде да играме.
10		Движење/Звук Говор	Нао пушта музика и игра. Ајде да слушаме музика. Јас ќе ја пуштам песна која е пред третата на листата. Ќе ја пуштам втората песна. Два е претходник на три. Ајде да играме.
11		Движење/Звук Говор	Нао пушта музика и игра. Јас ќе плеснам со рацете еднаш. Следбеник на еден е два. Ајде и ти плесни со рацете два пати.
12		Движење/лед Говор	Нао плеска со рацете. Три е претходник на четири. Јас ќе направам една вежба три пати, а ти направи ја четири пати.
13	Собирање	Движење/лед Говор	Нао ги шири рацете лево и десно, па ги става напред и тоа го повторува три пати. Ајде да направиме мала пауза. Паузата ќе заврши кога стапалата ќе светнат пет пати. Четири пати во црвена и еднаш во зелена броја. Четири плус еден е пет.
14		Движење/лед Говор	Стапалата на Нао светат четири пати во црвена и еднаш во зелена боја. Ајде да направиме мала пауза. Паузата ќе заврши кога стапалата ќе светнат четири пати, два пати во црвена и еднаш во сина броја. Два плус два е четири.
15		Движење/лед Говор	Стапалата на Нао светат два пати во црвена и два пати во сина боја. Јас ќе плеснам со рацете два пати. Ајде и ти плесни со рацете три пати. Заедно плеснавме со рацете пет пати.
16		Движење/лед Говор	Нао плеска со рацете два пати. Јас ќе ги испружам рацете три пати. Ајде и ти испружи ги рацете еднаш. Заедно ги испруживме рацете четири пати. Нао ги пружа рацете напред три пати.

## Библиографија

- [1] Accessed 2020. url: <https://www.lexico.com/definition/emotion>.
- [2] Accessed 2019. url: <https://mk.wikipedia.org/wiki/>.
- [3] About FORPHEUS. Accessed 2020. url: <https://www.omron.com/global/en/technology/information/forpheus/index.html>.
- [4] Evan Ackerman. Haru: An Experimental Social Robot From Honda Research. 2018. url: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/haru-an-experimental-social-robot-from-honda-research>.
- [5] Evan Ackerman. MEET THE MAGIC OF BUDDY. Accessed 2020. url: <https://buddytherobot.com/en/buddy-the-emotional-robot/>.
- [6] Nevena Ackovska. “System software in minimal biological systems”. in Macedonian. PhD thesis. Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, 2008.
- [7] Nevena Ackovska, Stevo Bozinovski, and Liljana Bozinovska. “Evolving an emotionbased neural control architecture”. In: Proc. IEEE Southeastcon, Huntsville, AL. 2008, pp. 404–408.
- [8] Rebecca Andreasson et al. “Affective Touch in Human-Robot Interaction: Conveying Emotion to the Nao Robot”. In: Int. Journal of Social Robotics 10 (2018), 473–491.
- [9] Ronald C. Arkin. “Moving Up the Food Chain: Motivation and Emotion in Behavior-based Robots”. In: Who Needs Emotions: The Brain Meets the Robot. Ed. by Jean-Marc Fellous and Michael A. Arbib. Oxford University Press, 2005, 245–269.
- [10] Anja Austermann et al. “Prosody based emotion recognition for MEXI”. In: Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005, pp. 1138–1144.
- [11] Evangelia Baka. MEET NADINE, ONE OF THE WORLD’S MOST HUMAN-LIKE ROBOTS. Accessed 2021. url: <https://www.vi-mm.eu/project/meet-nadine-one-of-the-worlds-most-human-like-robots/>.
- [12] Emilia I. Barakova and Tino Lourens. “Expressing and interpreting emotional movements in social games with robots”. In: Personal and Ubiquitous Computing 14 (2010), 457–467. doi: <https://doi.org/10.1007/s00779-009-0263-2>.
- [13] Christop Bartneck. “eMuu an embodied emotional character for the ambient intelligent home”. Unpublished. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, 2002.
- [14] Christoph Bartneck and Jodi Forlizzi. “A design-centered Framework for social-human interaction”. In: RO-MAN 2004. 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (IEEE Catalog No.04TH8759). 2004, 591–594. doi: [10.1109/ROMAN.2004.1374827](https://doi.org/10.1109/ROMAN.2004.1374827).
- [15] Christoph Bartneck and Michio Okada. “eMuu - An Emotional Robot”. In: Proc. of RoboFesta. Jan. 2001.

- [16] L. E. Baum. “An inequality and associated maximization technique in statistical estimation for probabilistic functions of Markov processes”. In: *Inequalities* 3 (1972), pp. 1–8.
- [17] Lucile Bechade et al. “Advanced Social Interaction with Agents”. In: Jan. 2019. Chap. *Towards Metrics of Evaluation of Pepper Robot as a Social Companion for the Elderly: 8th International Workshop on Spoken Dialog Systems*, pp. 89–101. isbn: 978-3-319-92107-5. doi: 10.1007/978-3-319-92108-2\_11.
- [18] Cindy L. Bethel and Robin R. Murphy. “Survey of Non-facial/Non-verbal Affective Expressions for Appearance-Constrained robots”. In: *IEEE Trans. on systems, man and cybernetics - Part C* 38.1 (2008), 83–92.
- [19] Ansgar Bittermann, Kolja Kuhlentz, and Martin Buss. “On the Evaluation of Emotion Expressing Robots”. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2007, pp. 2138–2143. doi: 10.1109/ROBOT.2007.363637.
- [20] Paul Boersma and David Weenink. *Praat: doing phonetics by computer*. Accessed 2015. url: <https://www.praat.org/>.
- [21] Stevo Bozinovski. “A self-learning system using secondary reinforcement”. In: *Cybernetics and System Research*. Ed. by R. Trappl. North Holland, 1982, 397–402.
- [22] Stevo Bozinovski. “Crossbar Adaptive Array: The First Connectionist Network That Solved the Delayed Reinforcement Learning Problem”. In: *Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*. Ed. by A. Dobnikar et al. Springer Verlag, 1999.
- [23] G. Bradski. “The OpenCV Library”. In: *Dr. Dobb’s Journal of Software Tools* (2000).
- [24] Cynthia Breazeal. *Designing sociable robots*. Cambridge: MIT Press, 2002.
- [25] Cynthia Breazeal. “Emotion and sociable humanoid robots”. In: *Int. J. Human-Computer Studies* 59 (2003), 119–155.
- [26] Cynthia Breazeal. “Function meets style: insights from emotion theory applied to HRI”. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 34.2 (2004), pp. 187–194. doi: 10.1109/TSMCC.2004.826270.
- [27] Cynthia Breazeal and Lijin Aryananda. “Recognition of affective communicative intent in robot-directed speech”. In: *Autonomous Robots* 12.1 (2002), pp. 83–104.
- [28] Cynthia Breazeal et al. “Effects of Nonverbal Communication on Efficiency and Robustness in Human-Robot Teamwork”. In: *International conference on intelligent robots and systems*. 2005, pp. 383–388.
- [29] Joost Broekens. “Emotion and reinforcement: affective facial expressions facilitate robot learning”. In: *Artificial Intelligence for Human Computing*. Ed. by Thomas S. Huang et al. Springer-Verlag, 2007, pp. 113–132. isbn: 978-3-540-72346-2. doi: 10.1007/978-3-540-72348-6\_6.
- [30] Andrew G. Brooks, Jesse Gray, and Guy Hoffman. “Robot’s play: interactive games with sociable machines”. In: *Computers in Entertainment* 2.3 (2004), 1–18.



- [31] Rodney A. Brooks et al. “The Cog Project: Building a Humanoid Robot”. In: *Computation for Metaphors, Analogy, and Agents*. Ed. by Chrystopher L. Nehaniv. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, pp. 52–87. isbn: 978-3-540-48834-7.
- [32] Ronald C. and Lilia Moshkina. “Affect in Human-Robot Interaction”. In: *The Oxford Handbook of Affective Computing*. Ed. by R.A. et al. Calvo. Oxford University Press, 2015.
- [33] Lola D. Cañamero. “Playing the Emotion Game with Felix”. In: *Socially Intelligent Agents: Creating Relationships with Computers and Robots*. Ed. by Kerstin Dautenhahn et al. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 69–76. isbn: 978-0-306-47373-9. doi: 10.1007/0-306-47373-9\_8.
- [34] Cathy Cassata. Can a Robot Help People Overcome Loneliness? Accessed 2018. 2017. url: [https://www.healthline.com/health-news/can-robots-help-people-overcome-loneliness\](https://www.healthline.com/health-news/can-robots-help-people-overcome-loneliness).
- [35] Danqi Chen et al. “Audio-Visual Emotion Recognition Based on a DBN Model with Constrained Asynchrony”. In: *2009 Fifth International Conference on Image and Graphics*. 2009, pp. 912–916. doi: 10.1109/ICIG.2009.120.
- [36] Nikhil Churamani et al. “iCub: Learning Emotion Expressions using Human Reward”. In: *Workshop on Bio-inspired Social Robot Learning in Home Scenarios, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Daejeon, Korea, Oct. 2016.
- [37] Sandra Clara and Gadanho Hallam. “Emotion-triggered Learning in Autonomous Robot Control”. In: *Cybernetics and Systems* 32 (June 2001). doi: 10.1080/01969720119689.
- [38] SoftBank Corp. “Pepper — the World’s First Personal Robot that Reads Emotions”. In: *New Breeze, Autumn* (2015), pp. 18–20.
- [39] Antonio Damasio. *Descartes’ Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*. Penguin Books, 2005. isbn: 978-0143036227.
- [40] Quyen Dang et al. “Encoding Cultures in Robot Emotion Representation”. In: *IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Comm*. Aug. 2017, pp. 547–552. doi: 10.1109/ROMAN.2017.8172356.
- [41] Marie Daniels. It’s ERWIN the friendly robot. Accessed 2018. 2014. url: <http://www.lincoln.ac.uk/news/2014/02/841.asp>.
- [42] Kerstin Dautenhahn. “I could be you: The phenomenological dimension of social understanding”. In: *Cybernetics and Systems* 28.5 (1997), 417–453.
- [43] Kerstin Dautenhahn. “Roles and functions of robots in human society: implications from research in autism therapy”. In: *Robotica* 21 (2003), pp. 443–452.
- [44] Kerstin Dautenhahn. “Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362.1480 (2007), pp. 679–704.
- [45] Kerstin Dautenhahn and et al. “KASPAR – a minimally expressive humanoid robot for human–robot interaction research”. In: *Applied Bionics and Biomechanics* 6.3-4 (2009), 369–397.
- [46] Vesna Dimitrievska and Nevena Ackovska. “Behavior Models of Emotion-Featured Robots: A Survey”. In: *J Intell Robot Syst* 100 (2020). Published 08 July 202, 1031–1053. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01219-8>.

- [47] Vesna Dimitrievska et al. “Statistical Methods for Degradation Estimation and Anomaly Detection in Photovoltaic Plants”. In: *Sensors* 21.11 (2021). issn: 1424-8220. doi: 10.3390/s21113733. url: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3733>.
- [48] I. Doroftei et al. “Facial expressions recognition with an emotion expressive robotic head”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 147 (2016), p. 012086. doi: 10.1088/1757-899x/147/1/012086. url: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/147/1/012086>.
- [49] Paul Ekman. “Basic emotions”. In: ed. by T. Wiesel, T. Dalgleish, and M. Power. *Handbook of Cognition and Emotion*, New York, 1999.
- [50] Paul Ekman. “Darwin’s contributions to our understanding of emotional expressions”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.1535 (2009), pp. 3449–3451.
- [51] Paul Ekman and Richard J. Davidson. *The Nature of emotion : fundamental questions*. Oxford University Press, 1994. isbn: 978-0195089448.
- [52] Paul Ekman, Wallace V. Friesen, and Joseph C. Hager. *Facial Action Coding System. Manual and Investigator’s Guide*. Salt Lake City: UT: Research Nexus, 2002.
- [53] Emotion Expression Humanoid Robot WE-4R. Accessed 2018. url: <http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/we/we-4r/index.htm>.
- [54] Emotion robotics. Accessed 2018. url: <http://www.emotion-robotics.com/>.
- [55] Mustafa Suphi Erden. “Emotional Postures for the Humanoid-Robot Nao”. In: *Int. Journal of Social Robotics* 5.4 (2013), pp. 441–456.
- [56] FACE team. Accessed 2018. url: <http://www.faceteam.it/>.
- [57] Factors Influencing Fundamental Frequency. Accessed 2020. url: <http://www.ncvs.org/ncvs/tutorials/index.html>.
- [58] Zanwar Faraj et al. “Facially expressive humanoid robotic face”. In: *HardwareX* 9 (2021), e00117. issn: 2468-0672. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00117>. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067220300262>.
- [59] David Feil-Seifer and Maja Mataric. “Human-Robot Interaction”. In: Apr. 2009, pp. 4643–4659. doi: 10.1007/978-0-387-30440-3\_274.
- [60] Terrence Fong, Illah Nourbakhsh, and Kerstin Dautenhahn. *A Survey of socially interactive robots: Concepts, Design and Applications*. Tech. rep. Technical Report CMU-RI-TR. 2002.
- [61] Doug Fridsma. *Nao, The robot able develop emotions form bond humans*. Aug. 2010.
- [62] Sandra Gadino. “Reinforcement learning in autonomous robots: an empirical investigation of the role of emotions”. PhD thesis. University of Edinburg, 1999.
- [63] Ben Goertzel et al. *Humanoid Robots as Agents of Human Consciousness Expansion*. Sept. 2017. url: [arXiv:1709.07791v1](https://arxiv.org/abs/1709.07791v1).
- [64] Randy Gomez. *Meet Haru, the Unassuming Big-Eyed Robot Helping Researchers Study Social Robotics*. 2020. url: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/honda-research-institute-haru-social-robot>.

- [65] Antuan Goodwin. onda debuts four very different robotics concepts at CES. Accessed 2018. 2018. url: <https://www.cnet.com/roadshow/news/honda-3e-robotics-concepts/>.
- [66] Christopher Gradwohl et al. "A Combined Approach for Model-Based PV Power Plant Failure Detection and Diagnostic". In: *Energies* 14.5 (2021). issn: 1996-1073. doi: 10.3390/en14051261. url: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1261>.
- [67] Erico Guizzo. Meet Pepper, Aldebaran's New Personal Robot With an "Emotion Engine". An optional note. June 2014.
- [68] Barbara Hayes-Roth. "Agents on Stage: Advancing the state of the art of AI". In: vol. 1. 1995, pp. 967–971.
- [69] Hidden $_{Markov_{model}}$ . Accessed 2021. url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hidden\\_Markov\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_Markov_model).
- [70] Jochen Hirth, Norbernt Schmitz, and Karsten Berns. "Emotional Architecture for the Humanoid Robot Head ROMAN". In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Autom.* 2007, pp. 2150–2155.
- [71] hmmlern. Accessed 2021. url: <https://hmmlern.readthedocs.io/en/stable/index.html>.
- [72] Hokuma. Plutchik's Wheel of Emotions: What is it and How to Use it in Counseling? Accessed 2017. 2017. url: <https://positivepsychologyprogram.com/emotion-wheel/>.
- [73] Eunja Hyun, Hyunmin Yoon, and Sooryun Son. "Relationships between user experiences and children's perceptions of the education robot". In: *5th ACM/IEEE Int. Conf. on HRI.* 2010, pp. 199–200.
- [74] iCat. Accessed 2020. url: <http://www.hitech-projects.com/icat>.
- [75] iCub. Accessed 2020. url: <https://icub.iit.it/>.
- [76] Impact of Kaspar. Accessed 2018. url: <http://www.herts.ac.uk/kaspar/impact-of-kaspar>.
- [77] iPal robot. Accessed 2018. url: <https://www.ipalrobot.com/>.
- [78] Yannick Jadoul, Bill Thompson, and Bart de Boer. "Introducing Parselmouth: A Python interface to Praat". In: *Journal of Phonetics* 71 (2018), pp. 1–15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2018.07.001>.
- [79] Wisanu Jitviriyaya, M. Koike, and E. Hayashi. "Emotional model for robotic system using a self-organizing map combined with Markovian model". In: *Journal of Robotics and Mechatronics* 27.5 (2015), 563–570.
- [80] Dan Jurafsky and James H. Martin. "Hidden Markov Models". In: *Speech and Language Processing.* 3rd ed. 2020. url: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/A.pdf>.
- [81] Leslie P. Kaelbling, Michael L. Littman, and Andrew W. Moore. "Reinforcement Learning: A Survey". In: *Journal of Artificial Intelligence Research* 4 (1996), 237–285. doi: [doi:10.1613/jair.301](https://doi.org/10.1613/jair.301).
- [82] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. "A Concept For Building More Humanlike Social Robots and Their Ethical Consequence". In: *International Conferences ICT Society and Human Beings. Best Paper Award.* 2014, 37 – 44.

- [83] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “A Survey of Models of Robotic Behavior for Emotional Robots”. In: *Int. Conf for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics*. 2017, pp. 158–162.
- [84] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “Emotional Agents for User Entertainment: Discussing the Underlying Assumptions”. In: *Proc. of the Int. Workshop on Affect in Interactions held in conjunction with the AC99, Annual Conf. of the EC 13 Programme*. Siena, 1999.
- [85] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “Finding Important Sound Features for Emotion Evaluation Classification”. In: *Prof. of IEEE Region 8 Conference EuroCon*. 2013.
- [86] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “Human-robot interaction based on human emotions extracted from speech”. In: *Proc. of TELFOR*. 2012, pp. 1381–1384.
- [87] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “Sound features used in emotion classification”. In: *Prof. of Int. Conf. for Informatics and Information Technology*. 2012, pp. 91–95.
- [88] Vesna Kirandziska and Nevena Ackovska. “Tendencies and Perspectives of the Emotions Usage in Robotics”. In: *Proc. of 9th Int. Conf, ICT Innovations*. 2017, pp. 154–164.
- [89] Vesna Kirandziska, Nevena Ackovska, and Ana Madevska – Bogdanova. “Comparing Emotion Recognition from Voice and Facial Data Using Time Invariant Features”. In: *Int. Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology* 10.5 (2016), pp. 737–741.
- [90] Kwangeun Ko and Kwee-Bo Sim. “Development of the Facial Feature Extraction and Emotion Recognition Method based on ASM and Baylesian Network”. In: *Proc. of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Aug. 2009, pp. 2063–2066. doi: 10.1109/FUZZY.2009.5277231.
- [91] Hideki Kozema, Marek P. Michalowski, and Cocoro Nakagawa. “Keep on A Playful Robot for Research, Therapy, and Entertainment”. In: *Int J Soc Robot* 1 (2009), 3–18.
- [92] Hideki Kozima. “Infanoid”. In: *Socially Intelligent Agents: Creating Relationships with Computers and Robots*. Ed. by Kerstin Dautenhahn et al. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 157–164. isbn: 978-0-306-47373-9. doi: 10.1007/0-306-47373-9\_19.
- [93] Hideki Kozima and Cocoro Nakagawa. “Interactive Robots as Facilitators of Childrens Social Development”. In: *Mobile Robots, Towards New Applications*. Dec. 2006, pp. 269–286. isbn: 978-3-86611-314-5. doi: 10.5772/4695.
- [94] Hideki Kozima, Cocoro Nakagawa, and Yuriko Yasuda. “Designing and observing human-robot interactions for the study of social development and it s disorders”. In: *2005 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. 2005, pp. 41–46. doi: 10.1109/CIRA.2005.1554252.
- [95] Oh-Wook Kwon et al. “Emotion recognition by speech signals”. In: *Sept*. 2003, pp. 125–128.
- [96] LBFmodel. Accessed 2021. url: <https://github.com/kurnianggoro/GSOC2017/raw/master/data/lbfmodel.yaml>.

- [97] Iolanda Leite, Carlos Martinho, and Ana Paiva. “Social Robots for Long-Term Interaction: A Survey”. In: *Int J of Soc Robotics* 5.2 (2013), 219–308.
- [98] Iolanda Leite et al. “As Time goes by: Long-term evaluation of social presence in robotic companion”. In: *Proc. of RO-MAN*. 2009, 669–674.
- [99] Iolanda Leite et al. “ICat: An affective game buddy based on anticipatory mechanisms”. In: vol. 3. 2008, pp. 1229–1232. doi: 10.1145/1402821.1402838.
- [100] Robert Levenson. “Emotions are functional, most of the time”. In: *The Nature of Emotion*. Ed. by Paul Ekman and Richard Davidson. Oxford University Press, 1994, 112–122.
- [101] Robert Levenson. “Human emotions: A functional view”. In: *The Nature of Emotion*. Ed. by Paul Ekman and Richard Davidson. Oxford University Press, 1994, 123–126.
- [102] Luxand FaceSDK. Accessed 2015. url: <https://www.luxand.com/facesdk/>.
- [103] Maria Malfaz and Miguel A. Salichs. “A new architecture for autonomous robots based on emotion”. In: *IFAC/EURON Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. 2004, pp. 805–809.
- [104] Olivier Martin et al. “The eNTERFACE’05 Audio-Visual Emotion Database”. In: *22nd International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW’06)*. 2006, pp. 8–8. doi: 10.1109/ICDEW.2006.145.
- [105] Albert Mehrabian and James A. Russell. *An approach to environmental psychology*. 1st ed. Cambridge: MIT Press, 1974.
- [106] Francisco Melo and Isabel Ribeiro. “Convergence of Q-learning with linear function approximation”. In: *2007 European Control Conference, ECC 2007 (Mar. 2007)*, pp. 2671–2678.
- [107] Angeliki Metallinou, Sungbok Lee, and Shrikanth Narayanan. “Audio-Visual Emotion Recognition Using Gaussian Mixture Models for Face and Voice”. In: *2008 Tenth IEEE International Symposium on Multimedia*. 2008, pp. 250–257. doi: 10.1109/ISM.2008.40.
- [108] Karg Michelle and et al. “Body movements for affective expression: A survey of automatic recognition and generation”. In: *IEEE Trans. on Affect. Comput.* 4.4 (2013), pp. 341–359.
- [109] Grégoire Milliez. “Buddy: A Companion Robot for the Whole Family”. In: *Mar.* 2018, pp. 40–40. isbn: 978-1-4503-5615-2. doi: 10.1145/3173386.3177839.
- [110] Mini-summary: Applying Game AI Technology to the Table Tennis Robot Forpheus. Accessed 2020. url: <https://www.junwei.ng/conference-reports/cedec2020-table-tennis-robot-forpheus/#fn:1>.
- [111] Marvin Minsky. *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Minds*. New York: Simon and Schuster, 2006.
- [112] Mohd Azfar Miskam et al. “Humanoid robot NAO as a teaching tool of emotion recognition for children with autism using the Android app”. In: *2014 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)*. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/MHS.2014.7006084.
- [113] Hiroyasu Miwa et al. “A New Mental Model for Humanoid Robots for Human Friendly Communication”. In: *Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation*. 2003, pp. 3588–3593.

- [114] Hiroyasu Miwa et al. "Introduction of the need model for humanoid robots to generate active behavior". In: IEEE/RSJ IROS. Vol. 2. Nov. 2003, pp. 1400–1406. isbn: 0-7803-7860-1. doi: 10.1109/IROS.2003.1248840.
- [115] Yuta Mizuno and Daiki Sato. Changing the Game: Measuring and Influencing Player Emotions Through Meta AI (slides). Accessed 2020. 2019. url: [http://www.jp.square-enix.com/tech/library/pdf/MetaAI\\_GDC2019.pdf](http://www.jp.square-enix.com/tech/library/pdf/MetaAI_GDC2019.pdf).
- [116] Hossein Mobahi and Shahin Ansari. "Fuzzy Perception, Emotion and Expression for Interactive Robots". In: IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 4 (Sept. 2003), pp. 3918–3923.
- [117] Lilia Moshkina and Ron Arkin. "On TAMEing robots". In: SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483). Vol. 4. 2003, pp. 3949–3959. doi: 10.1109/ICSMC.2003.1244505.
- [118] Javier Movellan et al. "The RUBI project: a progress report". In: Proc. of the ACM/IEEE Int. Conf. on HRI. Jan. 2007, pp. 333–339. doi: 10.1145/1228716.1228761.
- [119] Javier Movellan et al. "The RUBI project: Origins, principles and first steps". In: Proc. of Int. Conf. on Development and Learning. Aug. 2005, pp. 80–86. isbn: 0-7803-9226-4. doi: 10.1109/DEVLRN.2005.1490948.
- [120] Hobart Mowrer. Learning theory and behavior. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1960.
- [121] Robin R. Murphy et al. "Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots". In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 18.5 (2002), pp. 744–757. doi: 10.1109/TRA.2002.804503.
- [122] Alban Nanty and Rodolphe Gelin. "Fuzzy Controlled PAD Emotional State of a NAO Robot". In: 2013 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence. 2013, pp. 90–96. doi: 10.1109/TAAI.2013.30.
- [123] NAO Documentation. Accessed 2021. url: [http://doc.aldebaran.com/2-1/home\\_ao.html](http://doc.aldebaran.com/2-1/home_ao.html).
- [124] NAOqi Framework. Accessed 2020. url: <http://doc.aldebaran.com/1-14/dev/naoqi/index.html>.
- [125] New 'emotional' robots aim to read human feelings. Accessed 2018. 2018. url: <https://www.fin24.com/Tech/new-emotional-robots-aim-to-read-human-feelings-20180111>.
- [126] Andrew Ortony, Gerald L Clore, and Allan Collins. The cognitive structure of emotion. Cambridge university press, 1990.
- [127] Ana Paiva, Iolanda Leite, and Tiago Ribeiro. "Emotion Modeling for Social Robots". In: The Oxford Handbook of Affective Computing (2015). Ed. by Rafael Calvo et al. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199942237.001.0001.
- [128] Pepper - SoftBank Corp. Accessed 2018. url: <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/robots/pepper>.
- [129] James Pero. Omron hits CES with table-tennis bot that uses emotional recognition to tell when you get frustrated. Accessed 2020. 2020. url: <https://readsector.com/omron-hits-ces-with-table-tennis-bot-that-uses-emotional-recognition-to-tell-when-you-get-frustrated/>.

- [130] Robert Plutchik. *Emotion: A Psychoevolutionary Synthesis*. Harper and Row, New York, 1980.
- [131] Robert Plutchik. *The Emotions*. University Press of America, Lanham MD, 1991.
- [132] PyAudio. Accessed 2020. url: <https://pypi.org/project/PyAudio/>.
- [133] Uvais Qidwai, Saad Bin Abul Kashem, and Olcay Conor. “Humanoid Robot as a Teacher’s Assistant: Helping Children with Autism to Learn Social and Academic Skills”. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 98 (2019), 759–770. doi: <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01075-1>.
- [134] L. R. Rabiner. “A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition”. In: 77.2 (1989), 257–286.
- [135] Manoj Ramanathan, Nidhi Mishra, and Nadia Thalmann. “Advances in Computer Graphics”. In: Springer Nature Switzerland AG, June 2019. Chap. Nadine Humanoid Social Robotics Platform, pp. 490–496. isbn: 978-3-030-22513-1. doi: [10.1007/978-3-030-22514-8\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22514-8_49).
- [136] Rajesh P. N. Rao, Aaron P. Shon, and Andrew N. Meltzoff. “A Bayesian model of imitation in infants and robots”. In: *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals: Behavioural, Social and Communicative Dimensions*. Ed. by Chrystopher L. Nehaniv and Kerstin Dautenhahn. Cambridge University Press, 2007, pp. 217–247. doi: [10.1017/CB09780511489808.016](https://doi.org/10.1017/CB09780511489808.016).
- [137] Reinforcement Learning (RL). Accessed 2020. url: <https://www.techopedia.com/definition/32055/reinforcement-learning-rl>.
- [138] RobotCub wiki. Accessed 2020. url: [http://wiki.icub.org/wiki/Main\\_Page](http://wiki.icub.org/wiki/Main_Page).
- [139] James Russell. “A circumplex model of affect”. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 39.6 (1980), 1161–1178. doi: [10.1037/h0077714](https://doi.org/10.1037/h0077714).
- [140] Miguel Salichs, Ramon Barber, and et al. “Maggie: A Robotic Platform for Human-Robot Social Interaction”. In: *IEEE Conf. on Rob., Autom. and Mechat.* July 2006, pp. 1–7. doi: [10.1109/RAMECH.2006.252754](https://doi.org/10.1109/RAMECH.2006.252754).
- [141] Mark Scheeff et al. “Experiences with Sparky, a Social Robot”. In: *Socially Intelligent Agents: Creating Relationships with Computers and Robots*. Ed. by Kerstin Dautenhahn et al. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 173–180. isbn: 978-0-306-47373-9. doi: [10.1007/0-306-47373-9\\_21](https://doi.org/10.1007/0-306-47373-9_21).
- [142] Klaus Scherer. “Vocal affect expression: a review and a model for future research.” In: *Psychological bulletin* 99.2 (1986), pp. 143–165.
- [143] Klaus Scherer. “What are emotions? And how can they be measured?” In: *Social Science Information* 44.4 (2005), 695–729.
- [144] Klaus Scherer et al. “Vocal cues in emotion encoding and decoding”. In: *Motivation and Emotion* 15 (Jan. 1991), pp. 123–148. doi: [10.1007/BF00995674](https://doi.org/10.1007/BF00995674).
- [145] Matthias Scheutz. “Useful Roles of Emotions in Artificial Agents: A Case Study from Artificial Life.” In: *Proc. of the 19th National Conference on Artificial Intelligence*. Jan. 2004, pp. 42–48.
- [146] J. Schulte, C. Rosenberg, and S. Thrun. “Spontaneous short-term interaction with mobile robots in public places”. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. 1999, pp. 658–663.

- [147] Aaron Slowan and Monica Croucher. “Why Robots Will Have Emotions”. In: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Vol. 1. IJCAI’81. Vancouver, BC, Canada: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1981, 197–202.
- [148] SMART PROJECT: A synergy between a humanoid robot and a personal mobile device tool for children with Autism Spectrum Disorder. Accessed 2019. 2019. url: <https://smartproject.mk>.
- [149] Sophia. Accessed 2018. url: <https://www.hansonrobotics.com/sophia/>.
- [150] Benjamin Stephens-Fripp et al. “Automatic Affect Perception Based on Body Gait and Posture: A Survey”. In: Int J of Soc Robotics 9.5 (2017), 617–641.
- [151] Frosina Stojanovska et al. “Emotion-Aware Teaching Robot: Learning to Adjust to User’s Emotional State”. In: 2018, pp. 59–74.
- [152] Samuel Strupp, Norbert Schmitz, and Karsten Berns. “Visual-Based Emotion Detection for Natural Man-Machine Interaction”. In: KI 2008: Advances in Artificial Intelligence. Ed. by Andreas R. Dengel et al. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 356–363. isbn: 978-3-540-85845-4.
- [153] Ana Tanevska, Nevena Ackovska, and Vesna Kirandziska. “Assistive robotics as therapy for autistic children”. In: 13th International Conference for Electronics, Telecommunications, Automation and Informatics.
- [154] Ana Tanevska, Nevena Ackovska, and Vesna Kirandziska. “Robot-assisted therapy: considering the social and ethical aspects when working with autistic children”. In: 2016, pp. 57–60.
- [155] The R Project for Statistical Computing. Accessed 2015. url: <https://www.r-project.org/>.
- [156] Toshihiro Toshihiro et al. “Interactive pet robot with an emotion model”. In: Advanced Robotics 13.3 (1998), 225–226.
- [157] Onder Tutsoy et al. “An emotion analysis algorithm and implementation to Nao humanoid robot”. In: The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics (EPSTEM) 1 (Dec. 2017), pp. 316–330.
- [158] VAD-python. Accessed 2020. url: <https://github.com/marsbroshok/VAD-python>.
- [159] Zhiliang Wang. “Artificial psychology and artificial emotions”. In: CAAI Transactions on Intelligent Systems 1 (2006), pp. 38–43.
- [160] Shogo Watada et al. “A decision making system of robots introducing a reconstruction of emotions based on their own experiences”. In: Journal of Robotics, Networking and Artificial Life 1.1 (2014), 27–32.
- [161] Liu Xin et al. “Robot emotion and performance regulation based on HMM”. In: Int. Journal of Advanced Robotic System 10.160 (2013), pp. 1–6.
- [162] Haibin Yan, Marcelo H. Ang Jr., and Aun Neow Poo. “A Survey on Perception Methods for Human–Robot Interaction in Social Robots”. In: Int J of Soc Robotics 6.1 (2014), 85–119.
- [163] Fuping Yang and X Zhen. “Research on the Agent’s behavior decision-making based on artificial emotion”. In: Journal of Information and computational Science 8.11 (2014), pp. 2723–2722.



- 
- [164] Massimiliano Zecca and et al. “Whole body emotion expressions for KOBIAN humanoid robot - Preliminary experiments with different emotional patterns”. In: Proc. of RO-MAN. 2009, pp. 381–386. doi: 10.1109/ROMAN.2009.5326184.
- [165] Zenbo. Accessed 2018. url: <https://zenbo.asus.com/>.
- [166] Tom Ziemke and Robert Lowe. “On the Role of Emotion In Embodied Cognitive Architectures: From Organisms to Robots”. In: Cogn Comput 1 (2009), 104–117.
- [167] Магдалена Георгиева and Верица Бакева. Случајни процеси (предавања и вежби). Accessed 2016. 2007.