



Универзитет у Београду Машински факултет

Дипломске академске студије

Модул ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ

ПРОЈЕКАТ

Оцена пројектног задатка:	Предметни наставници:	проф. др Зоран Миљковић и проф. др Бојан Бабић		
	Предметни сарадници:	др Божица Бојовић, Најдан Вуковић, дипл. маш.инж Марко Митић, дипл. маш.инж Милица Петровић, дипл. маш.инж		
Потпис наставника:	Група:			
	РБ	Презиме и име:	Бр.инд.	Потпис:
	1.	Марковић Иван	1189/09	
	2.	Нешковић Филип	312/05	
	3.	Чолић Мирослав	1188/09	
4.	Pritchett David	1036/09		

Школска година: 2010/2011.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Дипломске академске студије – 2. година

Модул: **ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО**, шк. год. 2010/2011.

Предмет: **ИНТЕЛИГЕНТНИ ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМИ (ПРО220-0131)**

Предметни наставници: **проф. др Зоран Миљковић и проф. др Бојан Бабић**

ПРОЈЕКТНИ ЗАДАТАК (1/2)

Ради успостављања унутрашњег транспорта материјала, сировина и готових делова у оквиру експерименталног модела технолошког окружења „XY” применом интелигентних мобилних робота, на мобилном роботу *LEGO Mindstorms NXT* урадити следеће:

1. Формирати конфигурацију мобилног робота;
2. Развити и имплементирати модел кретања у *Matlab* окружењу;
3. Развити и имплементирати опсервациони (сензорски) модел мобилног робота применом система вештачких неуронских мрежа;
4. Применити алгоритам Калмановог филтера у циљу одређивања положаја мобилног робота у окружењу;
5. Имплементирати A^* алгоритам претраге;
6. У експерименталном моделу технолошког окружења верификовати резултате.

За дату диспозицију технолошког окружења „XY”:

1. Развити симулациони модел у *Anylogic* окружењу;
2. На основу резултата симулације предложити нови диспозициони план технолошког окружења (задржати исте машине) и формирати „троугаону” матрицу за нови модел;
3. Упоредити два модела диспозиционог плана на основу резултата симулације и дати закључак.

Решењем пројектног задатка обухватити:

1. Основни циљ пројекта;
2. Теоријску поставку проблема и анализу;
3. Тестирати и верификовати перформансе експерименталних и симулационих решења;
4. Дискутовати резултате и дати закључак;

Напомене:

1. Пројекат ће бити позитивно оцењен ако и само ако приликом одбране пројектних задатака пројектно решење омогући несметано функционисање мобилног робота у окружењу;
2. Студенти су у обавези да на предавања и вежбе дођу припремљени јер ће у супротном коначан исход пројектних активности бити негативан;
3. Иницијатива студената у погледу предлога решења проблема, као и у погледу рада на додатним проблемима је више него пожељна, па ће стога сваки додатни рад бити узет у обзир приликом формирања завршне оцене;
4. Рокови израде појединачних пројектних целина дефинисани су планом и програмом предмета (Course Outline);
5. Сва питања, сугестије и евентуалне проблеме предочити у директном контакту са предметним наставницима, проф. др Зораном Миљковићем и проф. др Бојаном Бабићем, као и путем електронске поште на zmiljkovic@mas.bg.ac.rs, bbabic@mas.bg.ac.rs, а посебно у разговору са сарадницима у настави и на е-пошту: nvukovic@mas.bg.ac.rs, bbojovic@mas.bg.ac.rs, mmitic@mas.bg.ac.rs и mmpetrovic@mas.bg.ac.rs.

Датум издавања задатка:

Рок завршетка задатка:

Задатак издао: _____

Резиме

У овом пројекту разматра се коришћење интелигентног мобилног робота, као саставног дела интелигентног технолошког система, за послове унутрашњег транспорта материјала и алата. Такође је разматрана оптимизација датог технолошког окружења. Дефинисањем и применом теоретских основа коришћених метода развијено је концептуално решење интелигентног мобилног робота, које је конфигурисано помоћу Lego MINDSTORMS NXT пакета. Применом вештачких неуронских мрежа, хеуристичких метода и метода локализације развијен је и имплементиран управљачки систем за поменутог робота. Извођењем експеримента који је обухватао кретање мобилног робота, под реалним условима, у оквиру модела технолошког окружења доказана је применљивост развијеног и имплементираниог концепта.

Кључне речи: *интелигентни технолошки системи, интелигентни мобилни робот, вештачке неуронске мреже, А звезда алгоритам, Калманов филтер, симулација технолошких процеса.*

¹**David Pritchett 1036/09**, Универзитет у Београду - Машински факултет, студент друге године
Дипломских академских студија.

Е-пошта: david.pritchett@gmail.com

²**Филип Нешковић 312/05**, Универзитет у Београду - Машински факултет, студент друге године
Дипломских академских студија.

Е-пошта: neskovicf@gmail.com

³**Чолић Мирослав 1188/09**, Универзитет у Београду - Машински факултет, студент друге године
Дипломских академских студија.

Е-пошта: cola.car384@gmail.com

⁴**Марковић Иван 1189/09**, Универзитет у Београду - Машински факултет, студент друге године
Дипломских академских студија.

Е-пошта: ivan_markovic@rocketmail.com

Списак слика

Слика 2.1. Скица технолошког диспозиционог плана	10
Слика 2.2. Шема функционисања сонара.....	13
Слика 2.3 Шема функционисања оптичког (апсолутног) енкодера	13
Слика 2.4. Блокови и управљачка јединица LEGO Mindstorms NXT пакета	14
Слика 2.5. Серво мотор LEGO Mindstorms NXT пакета	14
Слика 2.6. Серво мотор LEGO Mindstorms NXT пакета	15
Слика 2.7. Управљачка јединица LEGO Mindstorms NXT пакета	15
Слика 2.8. Пример обучавања трослојне ВР неуронске мреже (један циклус)	17
Слика 2.9. Приказ примене Калмановог филтера на проблеме локализације ИМП-а	18
Слика 2.10. Дијаграм алгорита А звезде	19
Слика 2.11. Пример функционисања алгорита А звезде.....	20
Слика 3.1. Дијаграм плана активности рада на пројекту	22
Слика 3.2. Усвојена конфигурација мобилног робота	24
Слика 3.3. Конструкционо решење склопа задњег точка.....	24
Слика 3.4. Бочни поглед на конфигурацију мобилног робота	25
Слика 3.5. Положај светлосног сензора	26
Слика 3.6. Усвојени координатни системи: робота и апсолутни КС.....	26
Слика 0.1. Приказ положаја робота и маркера (референтних тачака) у апсолутном КС.....	28
Слика 3.8. Приказ остварене тачности ВНМ бр. 3 (плаве звезде) у односу на вредности из обучавајућег скупа (црвени кругови).....	30
Слика 3.9. Резултати обучавања ВНМ бр. 3.....	31
Слика 3.10. Графички приказ употребљеног скупа за обуку ВНМ за детектовање црних маркера.....	32
Слика 3.11. Резултати обуке ВНМ за детектовање маркера	33
Слика 3.12. Графички приказ перформанси употребљене ВНМ за детектовање маркера	34
Слика 0.2. Дијаграм тока информација ЛКФ-а.....	35
Слика 0.3. Бинарна мапа препрека технолошког окружења.....	41
Слика 4.2. Симулирана путања добијена помоћу алгорита А звезде за задату мапу препрека	43
Слика 4.3. Приказ локализације мобилног робота за почетну позицију	44
Слика 4.4 Мобилни робот у почетној позицији (40,20)	44
Слика 4.5. Приказ локализације робота непосредно после напуштања почетне позиције	45
Слика 4.6. Мобилни робот приликом кретања у првом сегменту	45
Слика 4.7. Приказ локализације пре скретања мобилног робота.....	46
Слика 4.8. Положај мобилног робота пре скретања	46

Слика 4.9. Положај мобилног робота после скретања.....	47
Слика 4.10. Приказ локализације робота на другом сегменту путање	47
Слика 4.11. Робот у циљној позицији.....	48
Слика 4.12. Приказ извршене локализације при достигнутој циљној позицији (80,20)	48
Слика 5.1. Layout производног погона предузећа „ФМП”.....	50
Слика 5.2. Симулациони модел без анализе транспортних токова	52
Слика 5.3. Симулациони модел у току симулације	53
Слика 5.4. Симулациони модел након завршене симулације	53
Слика 5.5. Симулациони модел са анализом транспортних токова.....	54
Слика 5.6. Симулациони модел са анализом транспортних токова заједно са анимацијом у току симулације.....	54
Слика 5.7. Симулациони модел са анализом транспортних токова заједно са анимацијом на крају анимације	55
Слика 5.8. Троугаона матрица међузависности активности.....	56
Слика 5.9. Нови layout технолошког окружења предузећа “ФМП”.....	56
Слика 5.10. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана.....	56
Слика 5.11. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана у току симулације заједно са анимацијом	57
Слика 5.12. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана након завршетка смене	57
Слика 5.13. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана након завршетка симулације.....	58

Списак табела

Таблица 3.1. План експеримента и остварени резултати обуке ВНМ за скретање робота.....	29
Таблица 5.1. Списак машина у производној линији	50
Таблица 5.2. Трајање технолошких поступака за израду лименки	51

Садржај

1.	Увод	9
2.	Поставка проблема.....	10
2.1.	Уводна подела.....	10
2.2.	Детаљан опис технолошког окружења и процеса који се одвијају у њему.....	10
2.3.	Опис транспортних токова	11
2.4.	Основне поставке мобилне роботике.....	12
2.5.	Поделе и принцип функционисања коришћених сензора	12
2.6.	Основни механизам функционисања и сензорика пројектоване конфигурације мобилног робота.....	14
2.7.	Теоријске поставке коришћених решења	15
2.7.1.	Вештачке неуронске мреже.....	16
2.7.2.	Примена Калмановог филтера.....	17
2.7.3.	Алгоритам претраге - А звезда.....	19
3.	Концепција решења задатог проблема	22
3.1.	Конфигурација интелигентног мобилног робота.....	23
3.2.	Модел кретања и модел перцепције интелигентног мобилног робота.....	26
3.3.	Примена ВМ-а за скретање и за детекцију реферетних тачака	28
3.4.	Карактеристике коришћеног линеаризованог Калмановог филтера	34
3.5.	Имплементација А* алгоритма.....	37
4.	Експериментални резултати	41
4.1.	Поставка експеримента.....	41
4.2.	Ток екперимента	42
5.	Развој симулационог модела у AnyLogic софтверском окружењу	50
5.1.	Опис технолошког окружења	50
5.2.	Теоријска поставка симулације.....	51
5.3.	Симулација рада технолошког система	51
5.4.	Симулациони модел без анализе транспортних токова.....	52
5.5.	Симулациони модел са анализом транспортних токова	53
5.6.	Пројектовање новог диспозиционог плана технолошког окружења.....	55
5.7.	Симулација новог диспозиционог плана технолошког окружења	56
6.	Анализа и дискусија.....	59
7.	Закључак	60
8.	Литература	61

1. Увод

У скоријој будућности конкурентност компанија увелико ће зависити од примењених техника аутоматизације. Коришћење интелигентних технолошких система и процеса (за повећање квалитета и продуктивности) представљаће главну карактеристику конкурентности на тржишту. Због овог, потребно је обучити будуће (производне) инжењере да пројектују и раде у окружењима у којима се интелигентни технолошки системи и процеси користе и унапређују. Један од већих проблема из ове области представља унутрашњи транспорт материјала, опреме и алата и његова аутоматизација.

На предмету МАС Интелигенти технолошки системи разматран је један такав систем и његово пројектовање и имплементација су били део студентског пројекта. Први део задатка групе студената обухвата развој концептуалног решења ИМР-а и његову имплементацију у дато технолошко окружење. У другом делу задатка се уз помоћ симулационих алата врши оптимизација и унапређење технолошког layout-а.

Поставка проблема као и теоријске основе коришћених метода за његово решавање су дати у другом поглављу.

У трећем поглављу описана је концепција развијеног решења за дате проблеме. На основу усвојеног плана активности представљене су све фазе пројектовања, развоја и имплементације модела кретања, модела перцепције, линеаризованог Калмановог филтера и алгоритма А звезде.

Четврто поглавље обухвата експерименталну верификацију развијеног концепта интелигентног мобилног робота. У њему су описани поставка, извођење и резултати експеримента.

Симулација датог технолошког layout-а, анализа добијених резултата и предложено унапређено технолошко окружење су описани у петом поглављу.

У шестом поглављу се налазе анализа и дискусија добијених експерименталних резултата, као и предложени кораци за даљи развој и унапређење коришћених концепата и решења.

Закључак пројекта је дат у седмом, а списак коришћене литературе у осмом поглављу.

2. Поставка проблема

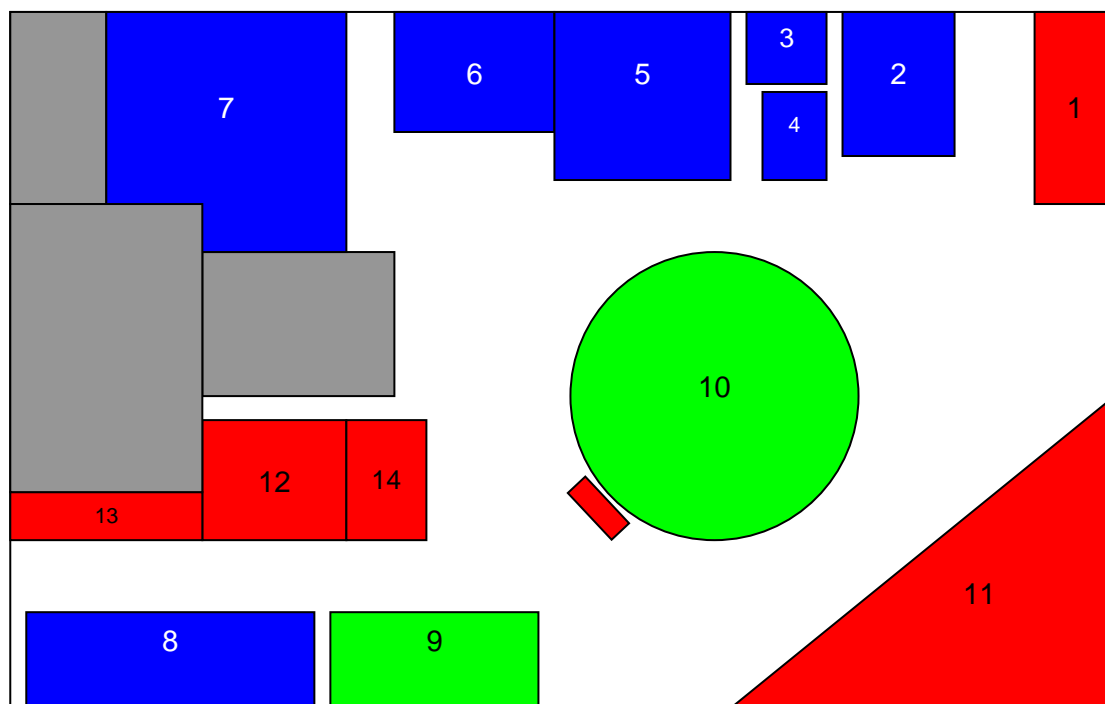
2.1. Уводна подела

Целокупна проблематика првог дела пројекта састоји се из 2 међусобно повезане целине: пројектовање концепт интелигентног мобилног робота који би заменио ручно управљаног виљушкарa у задацима унутрашњег транспорта материјала, опреме и алата за дати layout и анализе и оптимизације поменутог технолошког layout-a.

Функција интелигентног мобилног робота била би транспортовање полуфабриката са почетне локације (из складишта), кроз технолошки layout и њихово достављање на задату локацију. Анализа и оптимизација задатог технолошког layout-a вршиле би се са циљем имплементације аутономног мобилног робота у овај технолошки layout.

2.2. Детаљан опис технолошког окружења и процеса који се одвијају у њему

На основу датог технолошког поступка (лиценца од реномираног произвођача) и постојећег радног простора (зграда погона је изграђена пре него што је дефинисан layout машина) пројектован је технолошки диспозициони план, чија је скица дата на слици 2.1.



Слика 2.1. Скица технолошког диспозиционог плана

Размештај машина овог производног погона одређен је токовима материјала [1]. Његовом анализом, могуће је издвојити целине у којима су машине постављене према редоследу операција (машине 2 - 6, издвојене машине 7 и 8, слика 2.1). Код овог типа распореда једна од полазних претпоставки је линијски распоред машина, које су груписане према прописаном технолошком поступку, све са циљем смањења времена потребног за

међуоперацијски транспорт и самим тим повећање продуктивности за задати технолошки процес. Једна од мана овог типа распореда је што у случају измене технолошког процеса дати распоред неће одговарати оптималном за нови. Ово се може предупредити узимањем у обзир евентуалне измене и допуне текућег производног процеса, као и резервисање одређеног дела простора у производном погону за евентуалне измене, што је у овом случају и урађено.

Одступање од овог распореда извршено је само у случају групе монтажних столова за веће ормане (10) који су распоређени у кружном распореду ради уштеде простора и имајући на уму план путања за унутрашњи транспорт.

Овај погон има 2 производне и 1 монтажну линију. Прва производна линија обухвата обраду лимова (бушење, просецање, опсецање и савијање) од којих се састављају електро ормари. Она је састављена из следећих машина: маказе за сечење (2), CNC машина за пробијање и просецање (5), CNC хидраулична („апкант“) преса (6), машина за исецање профила (4), стубне бушилице (7), кружна тестера (7), оштрилица (3). Стубне бушилице и кружна тестера налазе се издвојене јер се мање користе у току производње. Друга производна линија обухвата обраду делова од бакра (8) и она се налази ближе монтажним линијама.

Складишта како за готове, тако и за међупроизводе размештена су у близини радних станица које их највише и користе, посебно имајући на уму монтажне радне станице (9 и 10). Осим за делове, постоје мала складишта алата и помоћног прибора која се налазе у склопу радних станица (2 - 6 и 8). Улазно складиште (1) служи за складиштење полуфабриката од лима који представљају један тип полазног материјала у овом технолошком процесу. Складишта готових производа (11 и 13) смештена су на крају производних линија (монтажне станице 9 и 10).

2.3. Опис транспортних токова

Ради уштеде времена и новца, пројектом је обухваћен развој интелигентног мобилног робота (ИМР) који би заменио виљушкаре који се користе у пословима превоза материјала, полупроизвода и готових производа у оквиру производног погона. Разлози за коришћење ИМР-а уместо класичних транспортних средстава обухватају смањење трошкова у виду (не)коришћења радника, смањење времена потребног за сам транспорт као и чињеница да се електро-ормани монтирају на палетама у овом погону, што је посебно погодно у случају коришћења робота за њихову манипулацију и транспорт.

ИМР би имао задатак да превози терет (полуфабрикату, на палетама) између две локације унутар технолошког layout-а. Утовар и истовар полуфабриката би се у почетку вршио ручно, од стране радника - оператера радне станице (почетна или крајња тачка) са могућношћу унапређења у виду аутоматизације и овог подпроцеса. Уколико би се користио већи број ИМР-а било би потребно развити управљачки систем који би у реалном времену био у стању да додели задатке транспорта тренутно слободним ИМР-а на основу њихове локације и активних захтева за унутрашњи транспорт. Било би паметно размотрити могућност унапређења самог ИМР-а са роботским хватачима са којим би могао да врши и функције палетизације/депалетизације. Додатно разматрање ове проблематике представљало би скретање са теме пројекта и даље се неће разматрати.

Најкритичнија фаза транспорта обухватала би допремање скоро готових ормана и њихових делова до линија за монтажу. Зато су линије за монтажу и њихова складишта постављени најближе унутрашњој саобраћајници по којој ће се кретати ИМР.

2.4. Основне поставке мобилне роботике

Робот је мултифункционална машина која је способна да уз репрограмирање извршава одређене задатке манипулације. Радни простор робота могуће је повећати додавањем додатних (мобилних) оса. Уколико ове осе дозвољавају роботу несметано кретање по својој непосредној околини, онда се говори о мобилним роботима. Проблеми везани за извршавање задатака манипулације и кретања у простору захтевају од робота да осим аутоматизованости поседује и одређен степен вештачке, тачније машинске интелигенције која би доносила одлуке у реалном времену и на тај начин омогућила постизање задатог циља. Како би се доносиле одговарајуће одлуке, потребно је да овај (мобилни) робот поседује релативно сложен сензорски подсистем који би својим читавањима давао роботу повратну спрегу помоћу које би он сам препознао сопствено унутрашње стање и/или присуство објеката у непосредној околини.

У наставку су дате дефиниције (индустријског) робота од стране светски признатих организација, од којих се неке баве роботиком [1]:

1. OXFORD речник - „Робот је човеколики аутомат, интелигентан и послушан, али безлична машина“.
2. WEBSTER речник - „Робот је аутоматизовани уређај који обавља функције које су обично намењене човеку“.
3. Амерички институт за роботе (PIA) - „Индустријски робот је репрограмабилни вишефункционални манипулатор пројектован да помера материјал, делове, алате или специјалне уређаје кроз различита програмирана кретања за извршавање различитих задатака“.
4. Интернационална организација за стандарде (ИСО) - „Индустријски робот је аутоматски управљана вишенаменска манипулациона машина са неколико степени слободе, која може бити фиксна или покретна, а користи се за аутоматизацију у индустрији“

2.5. Поделе и принцип функционисања коришћених сензора

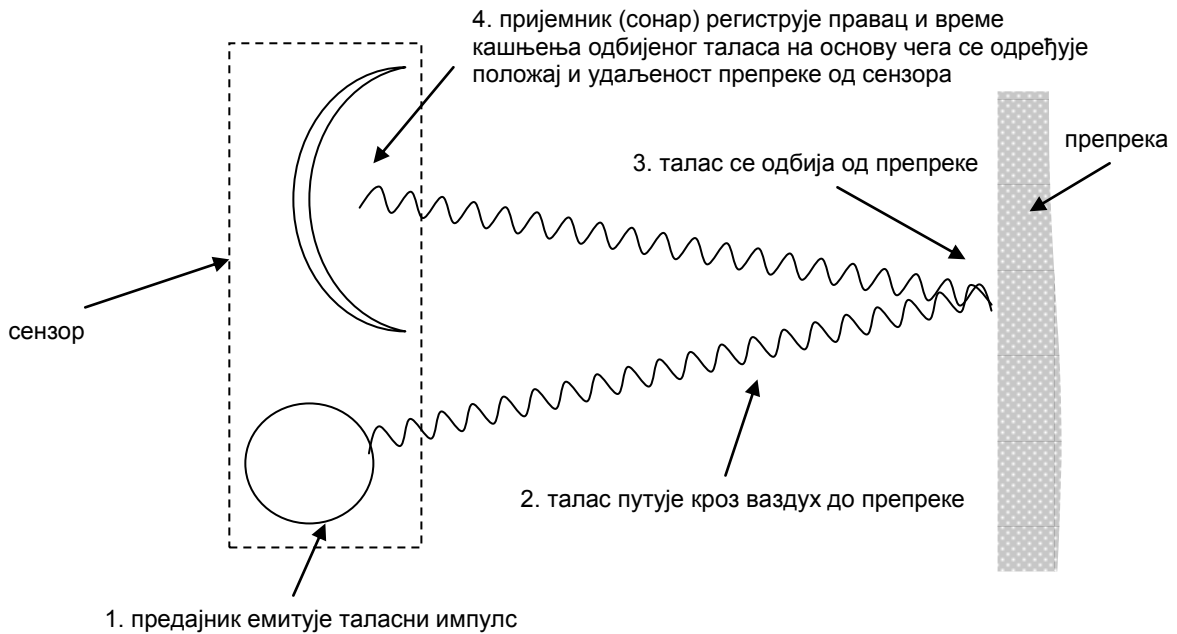
Сензори се у основи могу поделити на контактне и бесконтактне. Како су бесконтактни сензори погоднији за коришћење у проблематици везаној за мобилне роботе, само они ће се даље разматрати. Овде треба напоменути да и контактни сензори имају неке предности у односу на бесконтактне, али због саме природе задатог проблема (кретање у простору) даје се предност бесконтактним сензорима.

Бесконтактни сензори функционишу на принципу пријема сигнала (обично у виду електромагнетног таласа) из њихове околине и његовој обради (претварање примљеног сигнала у електричну величину и обично трансформацију из временског у фреквентни домен). Најчешће се користе сензори који детектују вибрације (звук) или нивое осветљености (светлост, боје...). Неки сензори емитују сигнал и чекају да се он одбије од других површина (обично препрека које је потребно детектовати) па га онда детектују, док други пасивно (стално) региструју зрачења из околине.

За проблематику везану за мобилне роботе, најбитнији сензори су сонар, енкодер и светлосни или оптички сензор. Сонар је бесконтактни сензор који прво емитује звучни талас а затим детектује његов део сигнала који се одбио од неке површине (препреке) на основу кога одређује правац и удаљеност те површине. Енкодер представља један од унутрашњих сензора помоћу којег је могуће одредити угаоно (и линијско) одступање тренутног положаја показивача од реперне тачке. Ротациони зглобови индустријских робота најчешће имају

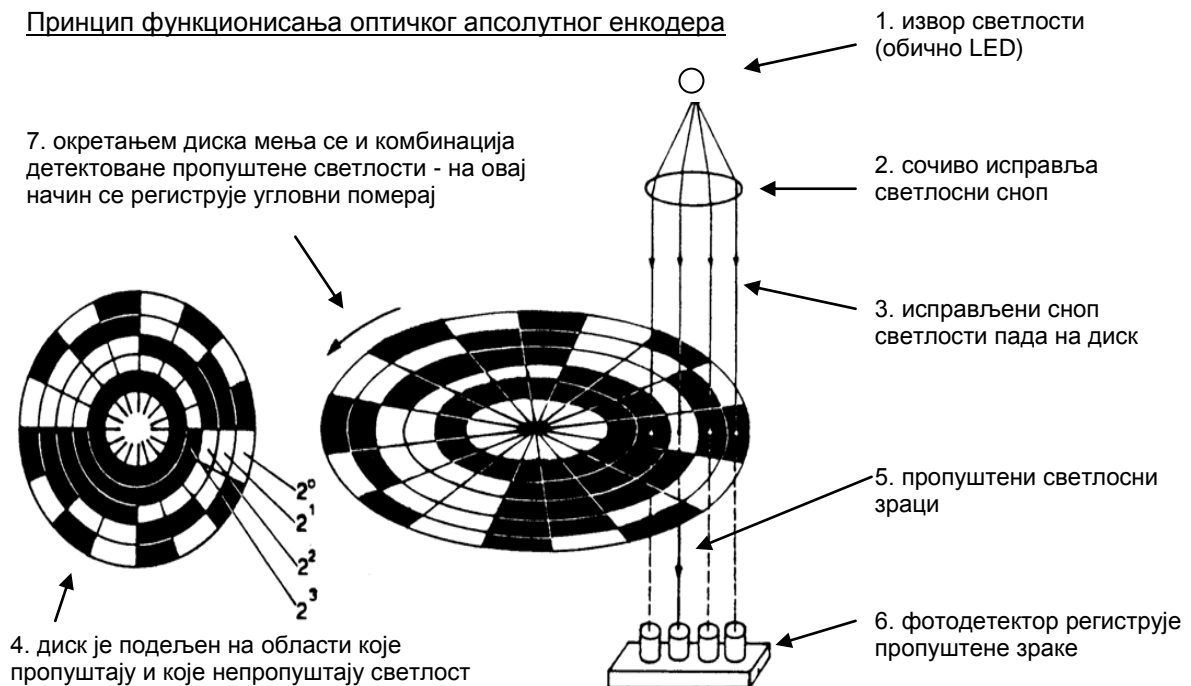
енкодере. Оптички сензор функционише слично као сонар, при чему он детектује таласну дужину одбијене светлости од циљне површине. Извор светлости може долазити или од самог сензора или од околине (најчешће сунчева светлост). У наставку су дате шеме функционисања поменутих сензора. Треба овде напоменути да је принцип функционисања светлосног сензора аналоган принципу функционисања сонара, те се неће засебно разматрати.

Принцип функционисања сонара



Слика 2.2. Шема функционисања сонара

Принцип функционисања оптичког апсолутног енкодера



Слика 2.3 Шема функционисања оптичког (апсолутног) енкодера

2.6. Основни механизам функционисања и сензорика пројектоване конфигурације мобилног робота

Разматрани проблем кретања унутар задатог производног погона одговара моделу равног кретања. Тело које се креће у овом моделу је интелигентни мобилни робот који је пројектован и конфигуриран помоћу LEGO Mindstorms NXT пакета (слика 2.4) [2]. Тело које врши равно кретање има три степена слободе, а LEGO робот поседује 2 оснажене осе (диференцијално кретање погонских тачкова) тако да се синхронизованим управљањем ове две осе може вршити равно кретање.



Слика 2.4. Блокови и управљачка јединица LEGO Mindstorms NXT пакета

Два мотора (слика 2.5) [2] које покрећу горепоменуте осе поседују енкодере помоћу којих мере пређени пут (остварену команду кретања). С обзиром да је LEGO Mindstorms NXT пакет едукативног карактера, резолуција енкодера није велика, али је сасвим задовољавајућа у овом случају. Осим интегрисаних енкодера у моторима, ради детектовања оријентационих тачака (постављених на одговарајућим местима у моделу погона) користиће се и светлосни сензор (слика 2.6) [2]. Моторе са енкодерима и светлосни сензор повезује, напаја и њима управља LEGO Mindstorms управљачка јединица (слика 2.7) [2] преко које је могуће остварити комуникацију са рачунаром (USB или Bluetooth порт).



Слика 2.5. Серво мотор LEGO Mindstorms NXT пакета



Слика 2.6. Серво мотор LEGO Mindstorms NXT пакета



Слика 2.7. Управљачка јединица LEGO Mindstorms NXT пакета

Софтвер коришћен за комуникацију и управљање LEGO Mindstorms контролера развијен је у Matlab програмском пакету и носи назив RWTH Toolbox. Он је резултат једног студентског пројекта.

Овако замишљен концепт модела интелигентног мобилног робота и његовог управљања помоћу персоналног рачунара требало би да испуни потребне услове задатог проблема у оквиру пројекта.

2.7. Теоријске поставке коришћених решења

Интелигентно понашање моделираног LEGO робота може се остварити коришћењем вештачких неуронских мрежа и програмских алгоритама за решавање задатака кретања и оријентације унутар технолошког окружења.

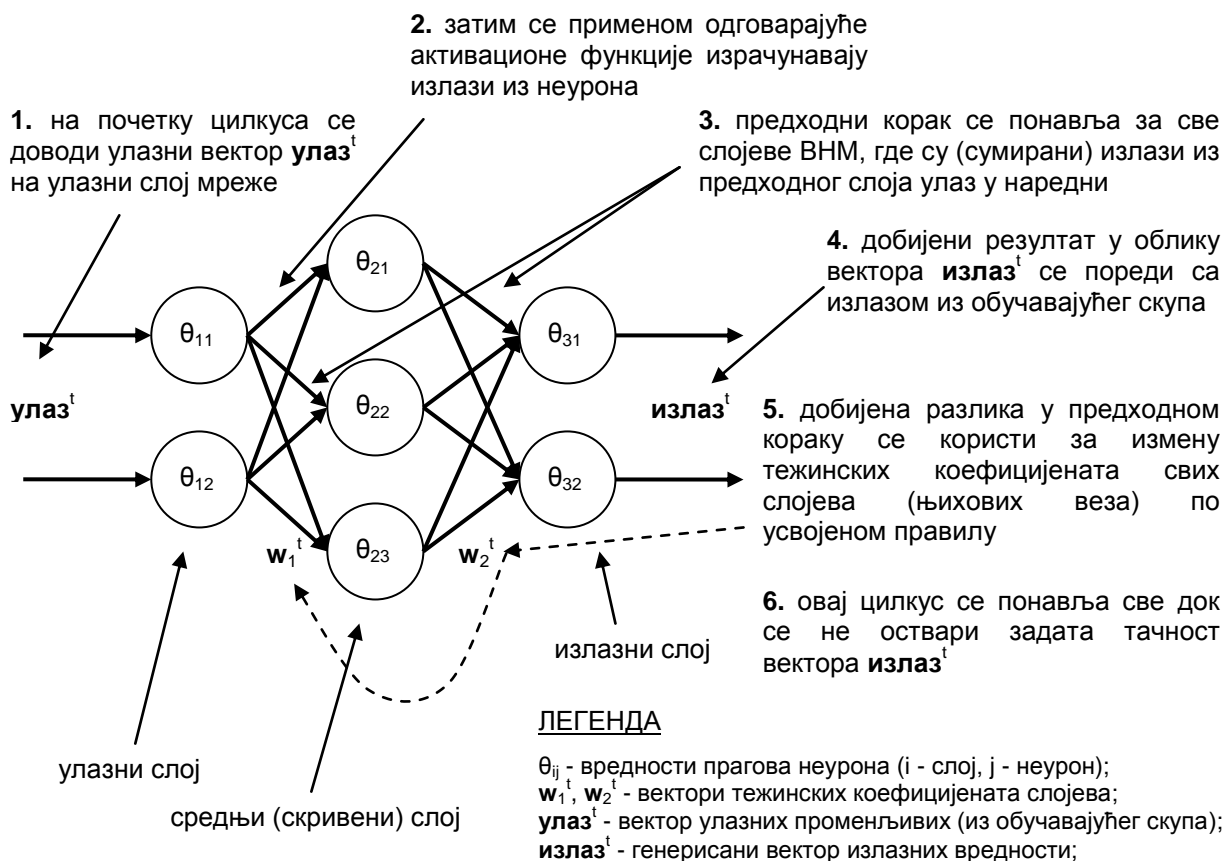
2.7.1. Вештачке неуронске мреже

Вештачке неуронске мреже (ВНМ) представљају један од основних (фундаменталних) модела вештачке (тј. машинске) интелигенције које су доста успешно примењене у пракси јер се ослањају на процесорску снагу обраде великог броја релативно једноставних математичких операција. Њихова примена увелико зависи од саме топологије пројектоване неуронске мреже, алгоритма њеног обучавања и скупа обучавајућих параметара. Приликом пројектовања ВНМ за дати проблем, потребно је узети у обзир карактеристике проблема за које се тражи решење. ВНМ су веома добри класификатори, па је са њима могуће, на релативно једноставан начин, направити механизме који ће успешно класификовати одговарајуће улазне информације, или пак давати излазне податке који одговарају дефинисаној излазној конфигурацији (апроксиматори). Механизми засновани на ВНМ су доста брзи и флексибилнији од других метода за решавање проблема класификације, попут експертских система.

Треба напоменути да је ВНМ потребно пре коришћења обучити, што за собом повлачи решавање пар додатних проблема. Наиме, потребно је обезбедити довољно велики скуп обучавајућих података, који је и довољно репрезентативан. Скуп обучавајућих података не би смео да буде превише велики, јер би се процес обучавања ВНМ продужио и у неким случајевима не би био економичан избор, са аспекта потрошеног времена за обучавање. Са друге стране потребно је дефинисати и алгоритам учења ВНМ - уколико се користи Matlab Neural Network toolbox ово обухвата дефинисање одговарајућих обучавајућих параметара: врста ВНМ, врста активационе функције, број и распоред неурона (слојеви, тј. топологија мреже), број епоха по итерацији, број итерација, параметар учења („брзина обучавања“), циљна грешка, итд. Овако дефинисана ВНМ користи скуп обучавајућих података да мења параметре саме ВНМ. То се остварује итеративним поступком који обухвата модификацију тежинских односа између неурона (јачина везе) на основу остварене тачности излазног неурона у односу на излазну вредност из обучавајућег скупа. Обучавање се сматра завршеним када се оствари први пут мања грешка излаза у односу на задату циљну грешку. (додај оверфитинг) Тада се прекида итеративни поступак и тежински односи веза неурона се не мењају, јер се сматра да су обучени за дати проблем. Неретко се дешава да са почетно дефинисаним параметрима ВНМ и алгоритмом учења није могуће обучити мрежу. У том случају потребно је редефинисати полазне параметре или проширити (заменити скуп обучавајућих података).

Принцип функционисања обуке ВНМ је приказан на примеру обучавања једне трослојне вештачке неуронске мреже (backpropagation (BP) типа) где су, ради прегледности, тежински коефицијенти веза између неурона представљени у облику вектора (слика 2.8). Вредности прага неурона као и тежинских коефицијената се пре почетка обуке додељују на основу неког правила (најчешће као псеудослучајни бројеви у оквиру задатих граница $[-1 \ 1]$). Обучавајући скуп података у садржи вредности које се прослеђују ВНМ у облику улазног вектора, и излазне податке, који се пореде са оствареном тачности излазног вектора ВНМ (израчунавање грешке ВНМ).

Обучена ВНМ се пушта у рад заменом скупа обучавајућих података са радним скупом (или скуповима). Такође је могуће да се уместо већ састављеног скупа података користе читавања са различитих сензора у реалном времену.



Слика 2.8. Пример обучавања трослојне ВР неуронске мреже (један циклус)

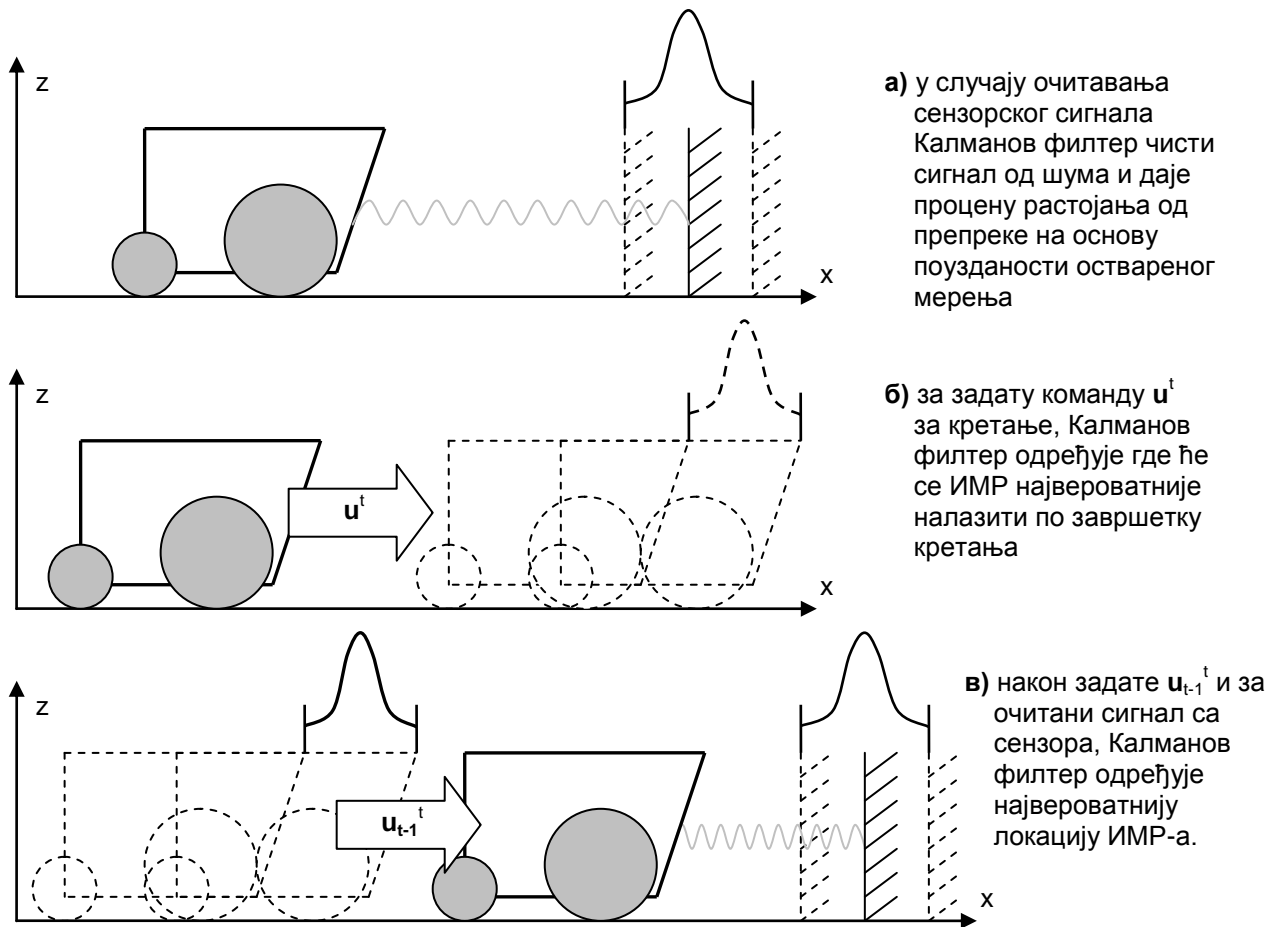
2.7.2. Примена Калмановог филтера

Несавршеност сензора и актуатора интелигентног мобилног робота генерисаће у раду грешку везану за тренутну локацију. Проблеми везани за одређивање тачне позиције и оријентације ИМП-а на основу непотпуних (нетачних) мерења сензора обухваћени су под појмом локализације [1]. Коришћењем модела кретања робота као и линеаризованог Калмановог филтера (ЛКФ) проблем локализације ИМП-а је могуће решити. Алгоритам линеаризованог Калмановог филтера представља методу којом је могуће учити и/или игнорисати грешке мерења за развијени модел кретања (у овом случају модел кретања ИМП-а). Алгоритам који је коришћен у овом пројекту представља начин за поређење предвиђене локације и оријентације ИМП-а добијене на основу модела кретања и локације и оријентације добијене на основу мерног система (сензора). У зависности од усвојеног модела перцепције, алгоритам даје највероватнији стварни положај и оријентацију ИМП-а (слика 2.9.).

Област у којој је неопходно имплементирати ЛКФ обухвата поузданост пресликавања усвојеног (пројектованог) модела стања система (представљене вектором стања система) и вредности добијених мерењем позиције и оријентације мобилног робота, као и препознавање карактеристичних тачака у оквиру технолошком окружења, тј. сигурност робота да је препознао конкретну тачку. Ова сигурност је моделирана Гаусовом расподелом и приказана је на слици 2.9. Ова примена ЛКФ решава проблематику везану за утицај шума током мерења као и нетачност самих сензора који се користе приликом мерења (слика 2.9.а).

Такође је потребно утврдити успешност извршења задате команде (представљене вектором управљања) мобилног робота (слика 2.9.б). Овде се ЛКФ користи као алат за предикцију наредног стања, на основу одређености садашњег стања. На овај начин се

решавају проблеми који потичу од несавршености актуатора (и саме механичке конструкције) који се користе за покретање мобилног робота.

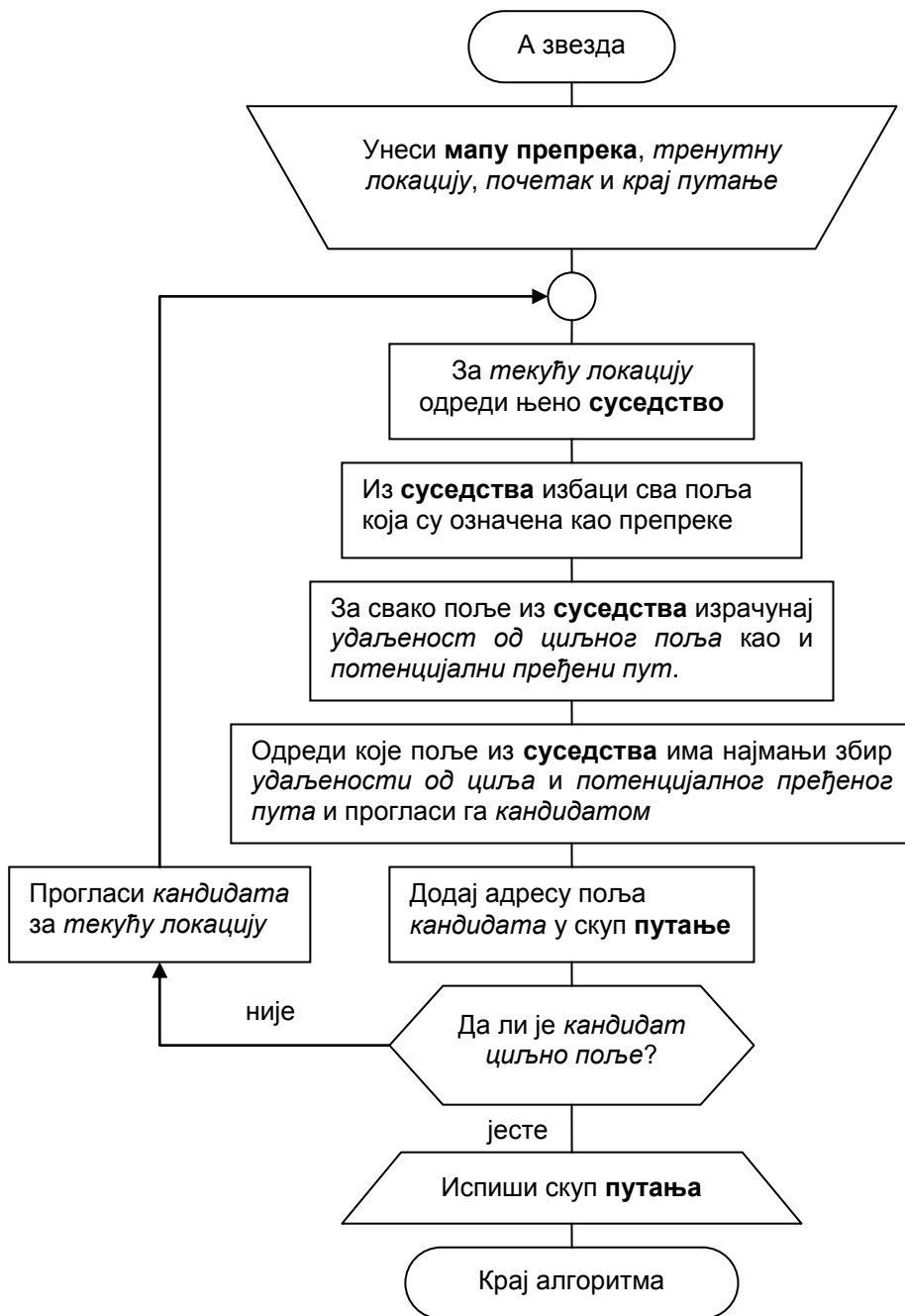


Слика 2.9. Приказ примене Калмановог филтера на проблеме локализације ИМП-а.

Сам вектор стања система није могуће у потпуности одредити, због стохастичке природе самог система, већ је могуће само (уз помоћ ЛКФ-а) предвидети, са извесном дозом сигурности, његове вредности. Како сам алгоритам ЛКФ-а користи вектор стања за своју улазну вредност, потребно је на крају сваког циклуса извршити корекцију самог ЛКФ-а. Ово има за резултат боље перформансе самог ЛКФ-а, што се директно осликава на повећану сигурност извршених команди и мерења (слика 2.9.в).

2.7.3. Алгоритам претраге - А звезда

Проблем везан за навигацију кроз производни погон (налажење путање) може се решити применом хеуристичких метода. У пројекту је коришћен А* алгоритам који је једноставнији од већине сличних алгоритама претраге и као такав погодан за примену. Принцип функционисања овог алгоритма се заснива на одређивању најближе тачке циљној тачки. Тачке које се узимају у обзир су оне тачке које су суседне тренутно разматраној тачки. Када се нађе ближа тачка, она постаје тренутна тачка и тако се циклус наставља све док се не дође до циљне тачке. Обично се тачке које су разматране (које су биле тренутна тачка) не узимају у обзир у следећим итерацијама. Све ово је представљено дијаграмом на слици 2.9.







Слика 2.10. Дијаграм алгорита А звезде

Даје се пример мапе са препрекама на којој ће се боље показати принцип рада овог алгоритма претраге (слика 2.11).

x	1	2	3	4	5	6	7
1	1,4142 (9,64)	1 (9,23)	1,4142 (9,64)	2,2361	3,1623	4,1231	5,0990
2	1 (8,64), (9,23)	8. 0 (8,23),(X)	1 (8,64), (9,23)	2	3	400	5
3	1,4142 (6,82),(8,23), (9,64)	7. 1 (7,23),(X)	1,4142 (8,23), (9,64)	2,2361	3,1623	412,31	5,0990
4	6. 2,2361 (5,82),(X)	200 (4,82),(5,41), (6,82), (8,23)	223,61 (3,82),(4,41), (5,82), (8,64)	282,84 (2,82),(3,41), (4,82)	360,56 (2,41), (3,82)	447,21 (2,82)	5,3852
5	3,1623 (5,41), (6,82)	5. 3 (4,41),(X)	4. 3,1623 (3,41),(X)	3. 3,6056 (2,41),(X)	2. 4,2426 (1,41), (X)	5 (1),(2,41)	5,8310 (1,41)
6	4,1231 (5,82)	4 (4,82), (5,41)	4,1231 (3,82), (4,41), (5,82)	4,4721 (2,82), (3,41), (4,82)	5 (1),(2,41), (3,82)	1. 5,6569 (X)	6,4031 (1)
7	5,0990	5	5,0990	5,3852	5,8310 (1,41)	6,4031 (1)	7,0711 (1,41)

ЛЕГЕНДА

	Стартно поље [6 6]
	Поља путање
	Циљно поље [2 2]
	Поље са препреком

- бројеви у пољима ван заграда представљају растојање од циљног поља (израчуната по еуклидској норми)
- растојања поља са препрекама су помножена са 100 како би их алгоритам претраге сматрао „непогодним кандидатима“
- бројеви у пољима у заградама представљају потенцијални пређени пут (дата су редоследом претраживања)
- редни бројеви у горњем левом углу поља представљају поља изабране путање (и њихов ред избора)
(X) потенцијални пређени пут није рачунат за већ изабрана поља путање

Слика 2.11. Пример функционисања алгоритма А звезде

Метода коришћена за избор наредног поља које улази у путању огледала се у провери која суседна поља имају најмањи збир растојања и потенцијалног пређеног пута. Поље које је имало овај најмањи збир („поље кандидат“) бирано је за следеће тренутно поље (локацију). На овом пољу се поново примењивао описани метод, све док се није достигло циљно поље. Адресе изабраних поља, поређане по редоследу избора, чувају се у посебном

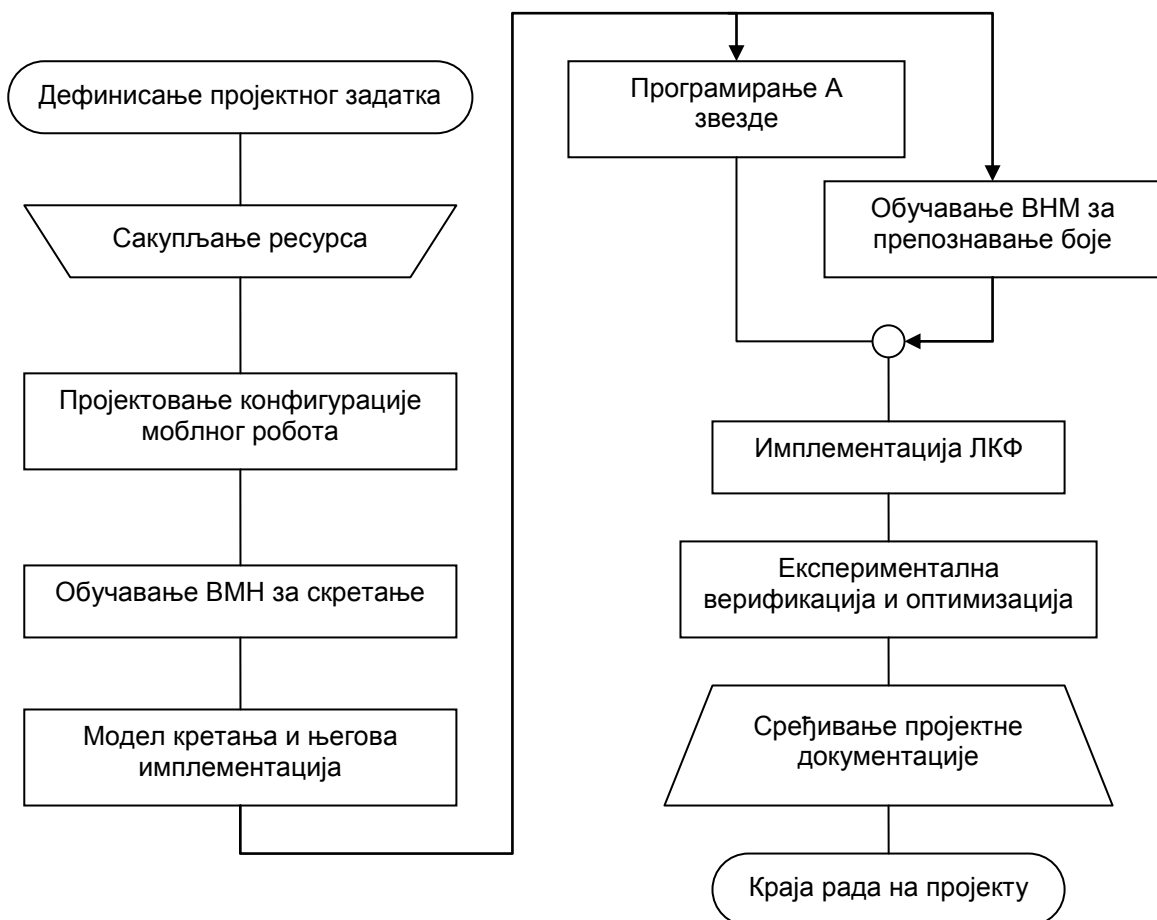
скупу који представља најкраћу путању. Треба приметити да за нека поља показаног примера (слика 2.10) није рачунат потенцијални пут. Разлог за ово је што су се та поља налазила даље од евентуалних „поља кандидата“, тј. нису им била суседна. Одређени алгоритми претраге узимају у обзир и ова поља, што резултира дужим временом прорачуна путања.

Сви алгоритми претраге представљају резултат примене теорије графова и једино раде у дискретизованом окружењу. Проблематика везана за одређивање путање уз несигурност робота у своју позицију или нетачност мапе препрека помоћу овог алгоритма се не узима у обзир. Један разлог је едукативни карактер овог пројекта (узимањем у обзир ових услова вишеструко би отежало налажење решења - одговарајућег алгоритма претраге). Други разлог узима у обзир саму поставку пројекта - ИМП-и се крећу у технолошки уређеном окружењу - интелегентом технолошком систему са високим степеном просторног уређења и дефинисаности. ЛКФ се користи како би се смањила несигурност робота у своју (остварену) позицију.

3. Концепција решења задатог проблема

Пре почетка рада на пројекту, било је потребно дефинисати етапе и фазе кроз које је требало поступно проћи како би се пројекат успешно завршио уз минималан напор и минимално потрошене ресурсе. Да би се ово постигло, било је потребно развити план активности пројекта који би разграничио и дефинисао подпроблеме које је потребно решити да би се пројекат завршио. Са оваквом концепцијом активности рада на пројекту било је много лакше распоредити дужности по члановима тима и на тај начин додатно уштедети време рада на пројекту.

На основу документа [3] као и [4] дефинисане су етапе пројекта, као и њихов редослед извршења. Прво је било потребно сакупити неопходне податке и ресурсе како би се могло почети са следећом фазом пројекта. Затим је следило конфигурисање мобилног робота. Након тога, било је потребно обучити ВМН за генерисање управљачке команде за координирану ротацију вратила мотора (скретање робота). Усвајање модела кретања и његова имплементација у програмски пакет Matlab обухватали су следећу етапу рада на пројекту. После дефинисања модела кретања следила је израда алгоритма и програма за налажење најкраће путање - А звезда. Паралелно са радом на А звезди, вршена је обука ВМН за препознавање боје. Имплементација линеарног Калмановог филтера обухватала је следећу фазу. Претпоследња фаза је била састављена из експерименталне верификације и евентуалне оптимизације како коришћеног програмског кода тако и саме конфигурације мобилног робота. Завршни корак у пројекту састојао се из сређивања пројектне документације и израде пројектног извештаја. Ово се све може представити следећим дијаграмом (слика 3.1).



Слика 3.1. Дијаграм плана активности рада на пројекту

Пре преласка на наредну фазу вршена је провера да ли је у текућем кораку нађено решење за дати подпроблем и да ли су се испунили функционални захтеви. Прелазак на следећи корак био је могућ само ако су били испуњени сви претходни услови.

3.1. Конфигурација интелигентног мобилног робота

За решавање датог проблема унутрашњег транспорта у оквиру технолошког layout-a студентима је био на располагању Lego Mindstorms NXT пакет од којег је било потребно направити конфигурацију мобилног робота која би са софтверском подршком од стране RHWT и Matlab програмских пакета формирао функционалну целину ИМП-а.

Анализом самог технолошког layout-a, његове макете, као и расположивих делова у Lego Mindstorms NXT пакету студенти су одлучили да пројектују конфигурацију мобилног робота која се креће помоћу точкова. Усвојен је концепт диференцијалног погона - два точка погоњена са сервомотором [5]. Додатни точак је постављен иза погонских и служи са регулисање равнотеже целе конструкције. Разлог за избор диференцијалног погона је у лакша имплементација у конструкцију мобилног робота и њено поједностављење. Ово додатно долази до изражаја када се узме у обзир да за формирање конфигурације мобилног робота користи едукативни Lego Mindstorms NXT пакет. Овај пакет представља одличну полазну тачку за пројектовање разних конструкција, али за налажење елегантних (механичких) решења недостају му неки елементи.

Управљачка јединица Lego Mindstorms NXT пакета, која представља везу између рачунара, на коме су одговарајући софтверски пакети, и сензора са сервомоторима, била би интегрисана у саму конструкцију ИМП-а, што би донело уштеду у виду краћих каблова и дужег трајања батерија. Приликом интегрисања управљачке јединице (УЈ) у конфигурацију ИМП-а, посебна пажња је посвећена њеном месту, јер би у случају избора неодговарајућег места сама тежина УЈ нарушавала интегритет конструкције и повећавала потрошњу струје услед додатног моментног оптерећења.

Приликом пројектовања конфигурације мобилног робота, заједно са функционалним захтевима пројекта, усвојено је коришћење светлосног сензора, као и интегрисаних енкодера у сервомоторима. Како су енкодери већ били у склопу сервомотора, није било потребно даље разматрати где да се ставе. Са друге стране, налажење најбоље локације за светлосни сензор било је од изузетног значаја за пројектовање целокупне конфигурације мобилног робота. Овај сензор је било потребно сместити на локацију где би првенствено могао да обавља своју функцију - детекцију црних тачака (маркера) у оквиру макете технолошког окружења. Такође, требало је водити рачуна о „количини шума“, у овом случају спољашње светлости, која би отежавала, или пак онемогућавала вршење мерења. На крају је било потребно узети и обзир како би локација сензора утицала на формирање модела кретања самог мобилног робота, који се користи у прорачунима везаним за модел кретања. Наиме, анализом коришћених метода током програмирања самог робота, закључено је да уколико се светлосни сензор постави у само тежиште конструкције (или што је ближе могуће), генерисаће се најмања (почетна) грешка мерења (а и управљања) мобилног робота.

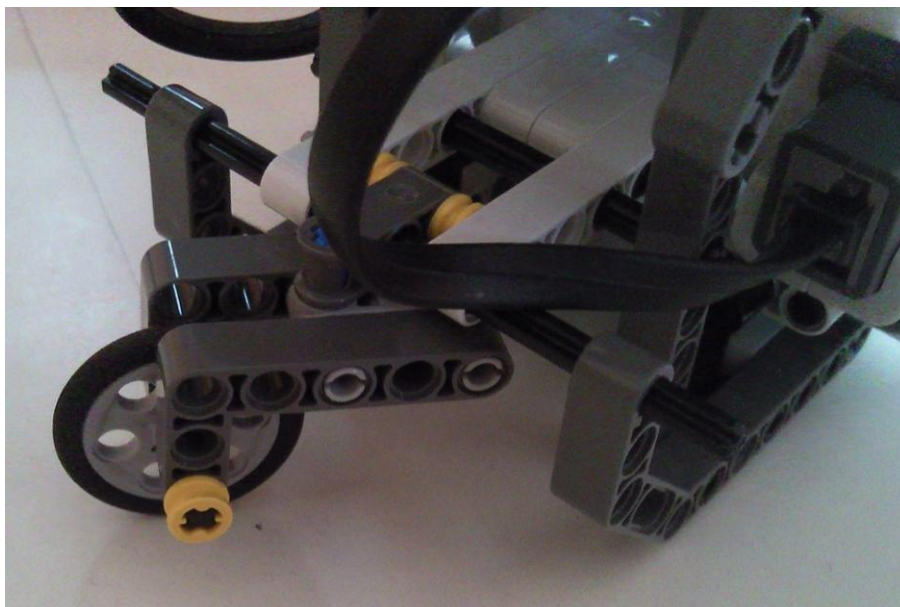
На крају конфигурисања мобилног робота, добијено је следеће решење и оно је представљено сликом 3.2.



Слика 3.2. Усвојена конфигурација мобилног робота

Пројектована конфигурација мобилног робота поседује неколико мана које могу да представљају почетну тачку за евентуална унапређења конструкције у будућности, уколико се за то буде појавила прилика.

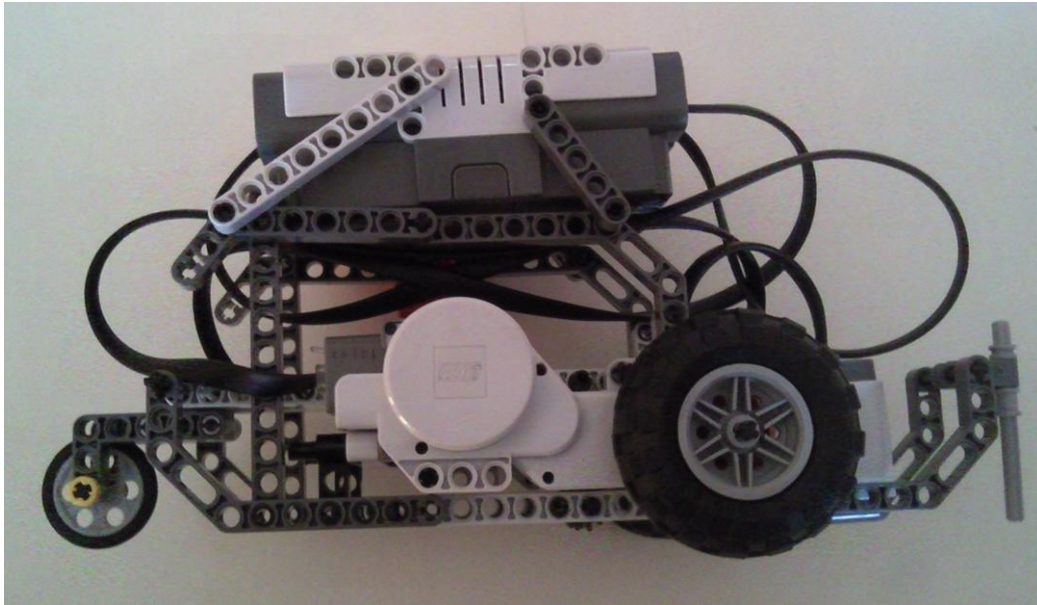
Задњи точак, који се користи за регулисање равнотеже, може се приликом оштрих скретања заглавити, јер растојање између носача задњег точка није довољно велико (слика 3.3).



Слика 3.3. Конструкционо решење склопа задњег точка

Овај проблем је могуће решити повећавањем растојања између носача, али то би повукло за собом повећање, како габарита тако и масе саме конструкције. Још једно решење би се могло огледати у подизању самих носача изнад равни окретања. На тај начин би се задњи точак могао слободно окретати свих 360° , али би се на овај начин смањио простор предвиђен за конекторе и каблове сервомотора и сензора.

Други проблем се огледа у висини на којој је постављена УЈ самог робота (слика 3.4).



Слика 3.4. Бочни поглед на конфигурацију мобилног робота

Ово решење за локацију УЈ мобилног робота је изабрано како би се са лакоћом могле мењати батерије (кутија са батеријама се налази на полеђини УЈ), али овакав избор је подигао центар масе робота и учинио га нестабилнијим при наглим (и брзим) заокретима. Овај проблем је донекле решен повећавањем растојања између погонских точкова што је резултирало бољом стабилношћу целе конструкције током кретања. Једно од могућих решења представља спуштање УЈ (жртвовање лаког приступа кутији за батерије зарад боље стабилности). Друга могућност је да се сама УЈ искористи као носећа конструкција на чијим странама би се додали модули са сервомоторима, сензорима и точком (или точковима) за стабилизацију, само што би овакав приступ доста повећао габарите самог мобилног робота и можда довео у питање кретање самог МР по макети технолошког окружења.

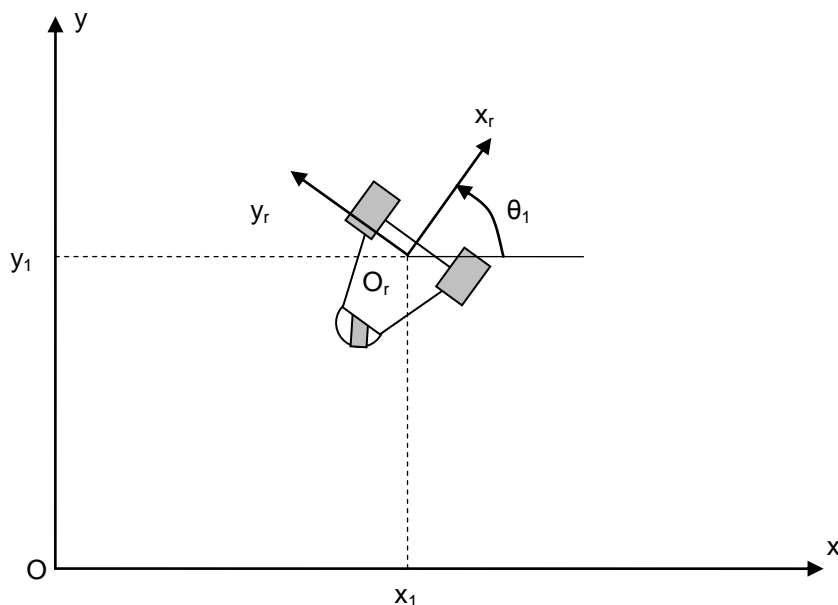
Оваквом конструкцијом мобилног робота постигнута је једна значајна предност - сензор за детектовање светлости је постављен веома близу центра масе робота, што је доста упростило кораке везане за програмирање модела перцепције (слика 3.5). Додатна погодност се огледала у томе да је сам сензор постављен веома близу подлоге (на тај начин је умногоме решен проблем елиминисања шума - рефлексије спољашње светлости од подлоге) и окружен конструкцијом која га штити од вибрација и евентуалне хаварије.



Слика 3.5. Положај светлосног сензора

3.2. Модел кретања и модел перцепције интелигентног мобилног робота

Како би се пројектованим ИМП-ом могло управљати било је потребно развити моделе кретања и перцепције који би се имплементирали у његов управљачки систем и омогућили несметано извршавање задатих команди. Са моделом кретања управљачки систем робота би био у стању да одреди где се тренутно налази (потребан услов за локализацију) као и да пошаље одговарајуће команде на сервомоторе добијене на основу интерпретације команди за кретање, које се дају у спољашњим (Декартовим) координатама. Модел перцепције обухвата дефинисање релативног положаја сензора у односу на усвојени центар ИМП-а и параметара битних за имплементацију и рад линеаризованог Калмановог филтера.



Слика 3.6. Усвојени координатни системи: робота и апсолутни КС

Како је кретање ИМП-а у суштини проблем равног кретања (слика 3.6), усвојен је следећи вектор стања система, који недвосмислено описује позицију и оријентацију ИМП-а:

$$x_t = (x, y, \theta) \quad (1)$$

где су: x - координата робота дуж x осе,
 y - координата робота дуж y осе,
 θ - угао заокретања робота око осе нормалне на xy равн, мерен од x ка y оси.

После дефинисаног вектора стања система, потребно је усвојити неки од математичких модела кретања робота. Узевши у обзир тип и тачност енкодера употребљених приликом пројектовања конфигурације ИМП-а, усвојен је математички модел кретања робота базиран на основу пређеног пута (одометријски модел), за разлику од модела кретања заснованог на промени угаоне и брзине центра маса (робота). Разлог за избор овог модела кретања лежи у томе што се користе инкрементални енкодери који су интегрисани у оквиру сервомотора. Ови енкодери су погодни за одређивање пређеног пута. Такође, управљање мобилног робота контролисањем његове брзине доста је сложеније од управљања мобилним роботом (простим задавањем дужине самог кретања).

Како робот врши равно кретање, тачније поседује три степена слободе, његов модел кретања изгледа овако:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \theta_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cdot \cos(\theta + \frac{\Delta \theta}{2}) \\ \Delta s \cdot \sin(\theta + \frac{\Delta \theta}{2}) \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

где су: x_t - координата робота дуж x осе у садашњем тренутку,
 y_t - координата робота дуж y осе у садашњем тренутку,
 θ_t - вредност угла θ у садашњем тренутку,
 x_{t-1} - координата робота дуж x осе у предходном тренутку,
 y_{t-1} - координата робота дуж y осе у предходном тренутку,
 θ_{t-1} - вредност угла θ у предходном тренутку.

Величине Δs и $\Delta \theta$ представљају промену пређеног пута и угла закретања робота које се добијају на основу следећих једначина:

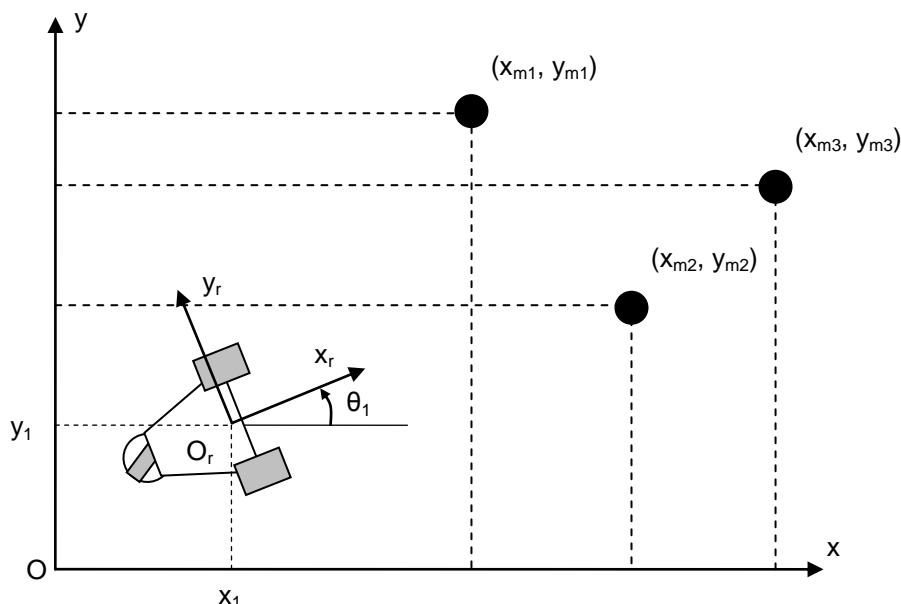
$$\Delta s = \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \quad (3)$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{b} \quad (4)$$

где су: Δs_d - пређени пут десног погонског точка,
 Δs_l - пређени пут левог погонског точка,
 b - растојање између погонских точкава.

Убацивањем једначина (3,4) у (2) и после сређивања добија се тражени модел кретања ИМП-а базираног на одометрији (5):

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \theta_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \\ \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \\ \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{b} \end{bmatrix} \quad (5)$$



Слика 3.6. Приказ положаја робота и маркера (референтних тачака) у апсолутном КС

За модел перцепције робота било је потребно дефинисати релативни положај светлосног сензора у односу на КС робота, као и положаје референтних тачака - маркера - у технолошком layout-у (слика 3.7). Како се модел перцепције користи за аквизицију података потребних за рад линеаризованог Калмановог филтера (ЛКФ) овде се неће даље разматрати, већ ће бити објашњен у склопу имплементације ЛКФ-а.

3.3. Примена ВНМ-а за скретање и за детекцију референтних тачака

Примена ВНМ у овом пројекту се огледала у обучавању две вештачке неуронске мреже. Прва вештачка неуронска мрежа је имала задатак да на основу улазног података у виду потребног угла заокретања робота да излаз у облику команде (броја) са којим би се покретали сервомотори ИМР-а. Тачније, прва ВНМ се користила као функционални апроксиматор [1]. Другу вештачку неуронску мрежу је било потребно обучити за препознавање црне боје (тј. црних референтних тачака) на основу добијених података од светлосног сензора (слика 3.5). Задатак ове ВНМ представљао је класификацију улазних података, где би излаз био у облику информације да ли улазни податак припада неком скупу и са коликим степеном корелације. Коришћењем ове ВНМ побољшане су карактеристике светлосног сензора софтверским путем.

Анализом задатака за које је потребно обучити ВНМ, одлучено је да се користе „Backpropagation“ (BP) неуронске мреже. Овај тип мрежа је детаљно објашњен на предавањима. Разлог за коришћење овог типа мрежа, је тај што су оне пројектоване за решавање проблема нелинеарног пресликавања [1] - проблематике која се налази у сржи предходно објашњених проблема (скретање робота и препознавање боја).

Коришћени тип ВР неуронске мреже поседује следеће карактеристике:

- сигнал се кроз ВНМ простире унапред,
- примењује супервизорски начин учења, тј. позната су и улазна и излазна стања система (она чине обучавајући скуп) и може се успоставити потпуна корелација између њих,
- користи сигмоинду активациону функцију, која обезбеђује успешан процес учења,
- обучавање се врши применом градијентног поступка, где се постављени циљ (захтевана тачност ВНМ) остварује минимизацијом грешке излазног вектора и
- примењује генерализовано делта правило за одређивање остварене грешке излазног вектора на основу које се модификују тежински коефицијенти (на овај начин се ВНМ адаптира, тј. учи).

Обе мреже су обучаване коришћењем Neural Network Toolbox-а, подмодула програмског пакета Matlab. У оквиру овог модула било је могуће веома лако дефинисати параметре обуке и топологију тражене ВНМ, те га је било логично користити у пројекту.

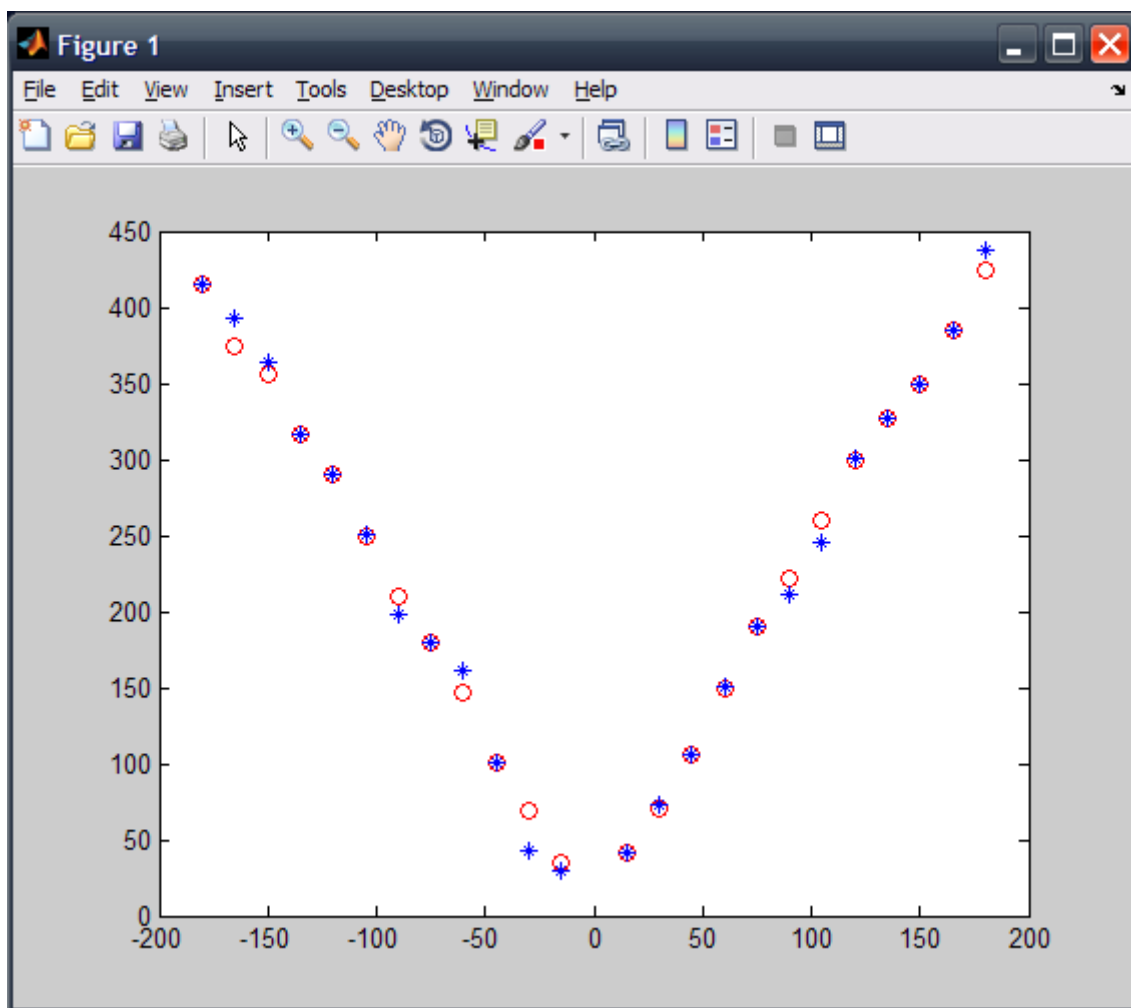
За обучавање ових мрежа прво је формиран план експеримента који је обухватао различите конфигурације ВНМ (њихову топологију, параметре учења и избор обучавајућег скупа) које је било потребно обучити. На основу добијених резултата (постигнуте тачности) бирана је најбоља ВНМ која ће се даље користити у пројекту.

У наредној табели (табела 3.1) дат је план експеримента за обуку ВНМ за скретање робота. Једини параметар који смо одлучили да мењамо је био број скривених слојева и неурона у њима. Ова одлука је донешена после једног тест-циклуса где смо за исту конфигурацију мреже мењали само параметре обуке. Анализом добијених мрежа и њихових резултата смо закључили да мењање параметара обуке веома мало утиче на постигнуте резултате. Изабрали смо тест-мрежу са најбоље оствареним резултатима и у њој мењали број и величину скривених слојева, не мењајући њене параметре обуке.

Таблица 3.1. План експеримента и остварени резултати обуке ВНМ за скретање робота			
Редни број експеримента	Број скривених слојева и неурона у њима	Остварена тачност (први пут/други пут)	Коментар
1	[5]	33,4 / 6,63	Није прошла тест валидације.
2	[7]	2,06 / 1,85	Примећена мања одступања за мале и позитивне углове скретања.
3	[9]	$6,84 \cdot 10^{-17} / 9,61 \cdot 10^{-8}$	Примећена одступања за одређене углове.
4	[11]	$0,882 / 9,29 \cdot 10^{-18}$	Велика одступања код малих углова скретања.
5	[5 7]	48,1 / 50,5	Није прошла тест валидације.
6	[7 5]	$3,24 \cdot 10^{-17} / 7,45 \cdot 10^{-15}$	Примећена мала одступања.
7	[7 7]	77,8 / 0,00348	Примећена одступања у одређеним опсезима углова скретања.
8	[5 5]	5,32 / 5,66	Нису постигнуте жељене перформансе.

Приликом избора погодне мреже, аутоматски су дисквалификоване мреже бр. 1, 2, 4, 5, 7 и 8 јер нису успеле да остваре задату тачност. Иако је мрежа бр. 4 успела да оствари тачност из другог покушаја, није узета у обзир због великих одступања за мале углове скретања (дато у коментару). Мреже које су узете у обзир - мреже бр. 3 и бр. 6 су детаљније

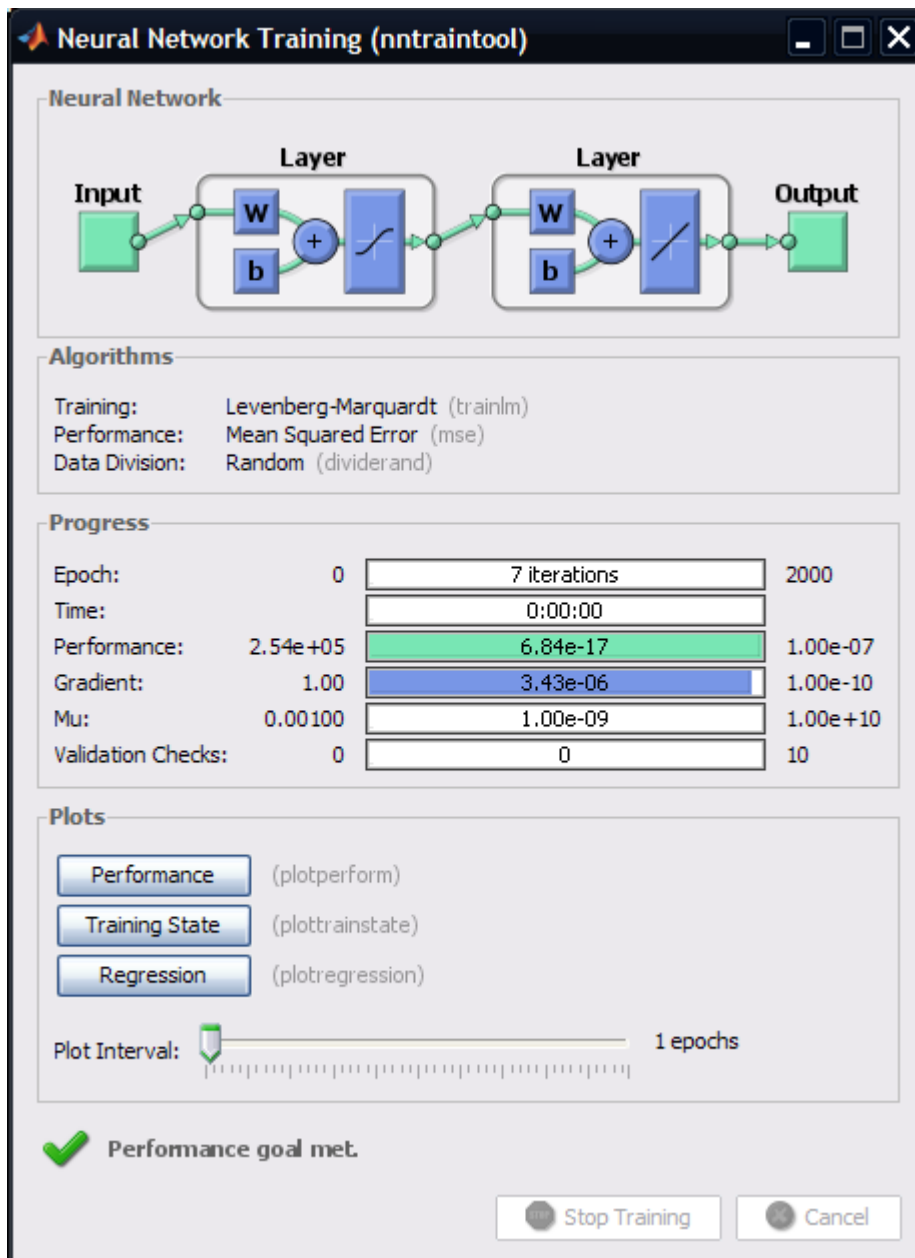
анализиране. Иако су обе имале одређена одступања мрежа бр. 3 је била униформнија и оба пута је остварила боље резултате, па је она изабрана. У наставку се дају резултати обуке ВМН бр. 3 (слика 3.8 и 3.9).



Слика 3.7. Приказ остварене тачности ВМН бр. 3 (плаве звезде) у односу на вредности из обучавајућег скупа (црвени кругови)

На слици 3.8 приказани су резултати обуке ВМН бр. 3. На њима се може видети да је ВМН, за дати обучавајући скуп података остварила добре резултате - само неколико тачака које представљају остварене резултате нису се потпуно (или делимично) поклопиле са вредностима из обучавајућег скупа. Оне тачке које одступају од задатих вредности представљају погрешно обучен пар, али имају малу дисперзију која се може занемарити ако се узме у обзир тачност саме конфигурације интелигентног мобилног робота.

Следећа слика (слика 3.9) приказује резултате обуке ВМН бр. 3 где се види који су параметри били коришћени за њену обуку (Левенберг-Маркеов метод обуке са оценом помоћу средње квадратне грешке и случајном расподелом). Обука је завршена у првој епохи (седмој итерацији) са оствареном тачношћу од $6,84 \cdot 10^{-17}$.

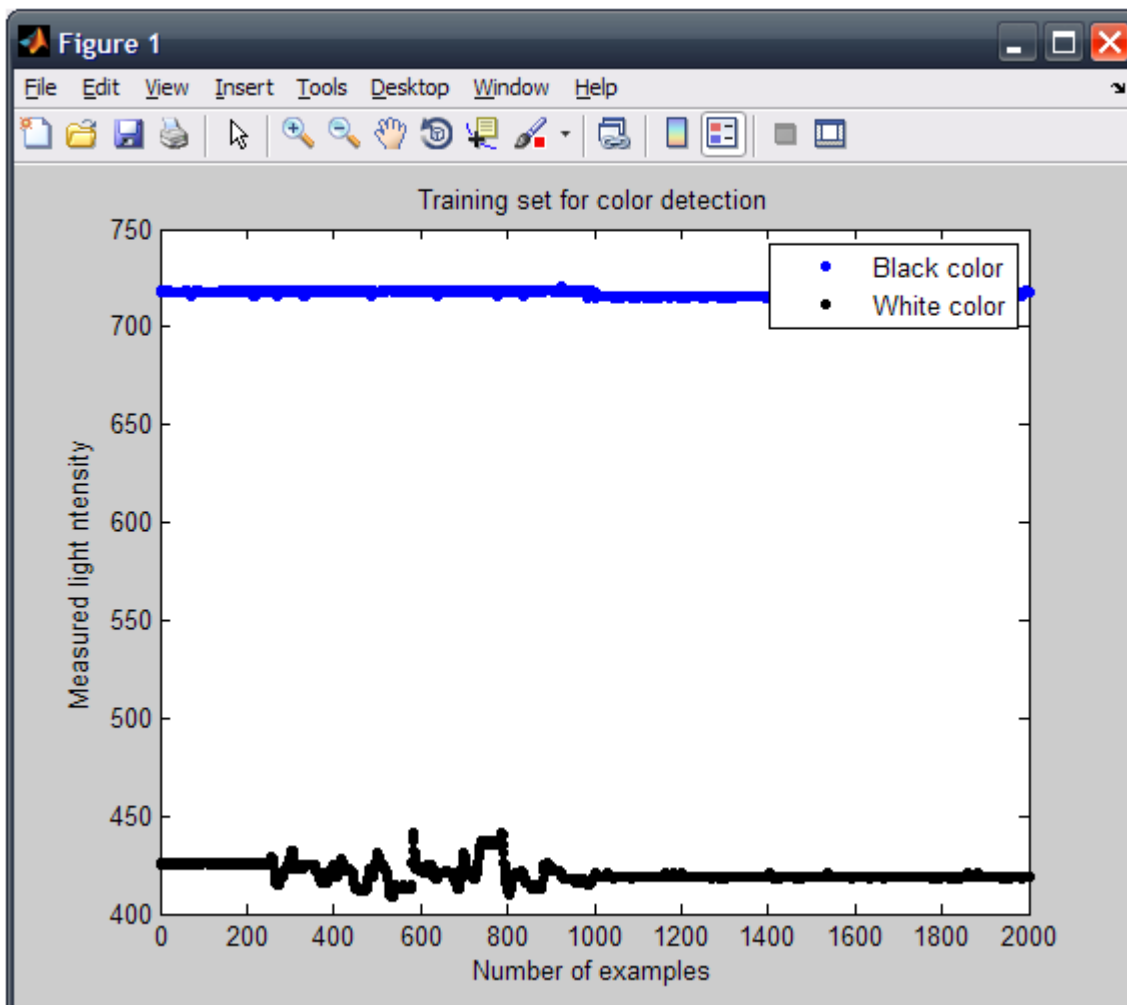


Слика 3.8. Резултати обучавања ВМ бр. 3

За обучавање ВМ за препознавање црних референтних тачака помоћу светлосног сензора било је потребно сакупити очитавања са сензора како би се формирао обучавајући скуп. Вршено је неколико мерења под различитим условима: присуство јаке (дневне) светлости или њено одсуство, различите текстуре подлоге (од које се одбија светлост са сензора) као и различити режими кретања ИМП-а - праволинијско, скретање, са и без вибрација. На овај начин је сакупљено 10 скупова регистрованих сигнала светлосног сензора (по пет за белу и црну подлогу, под различитим спољашњим условима). Након тога формиран су тест скупови посебно за белу и црну боју који су коришћени у обуци мреже за препознавање црних маркера као обучавајући скупови.

Вредност излазног вектора је скалирана у опсегу [-1,1] ради побољшања услова обучавања мреже у смислу постизања оптималног сета тежинских односа у мрежи и баланса између различитих улаза. Ова вредност се прослеђује управљачком систему на основу које он закључује да ли је детектована референтна тачка.

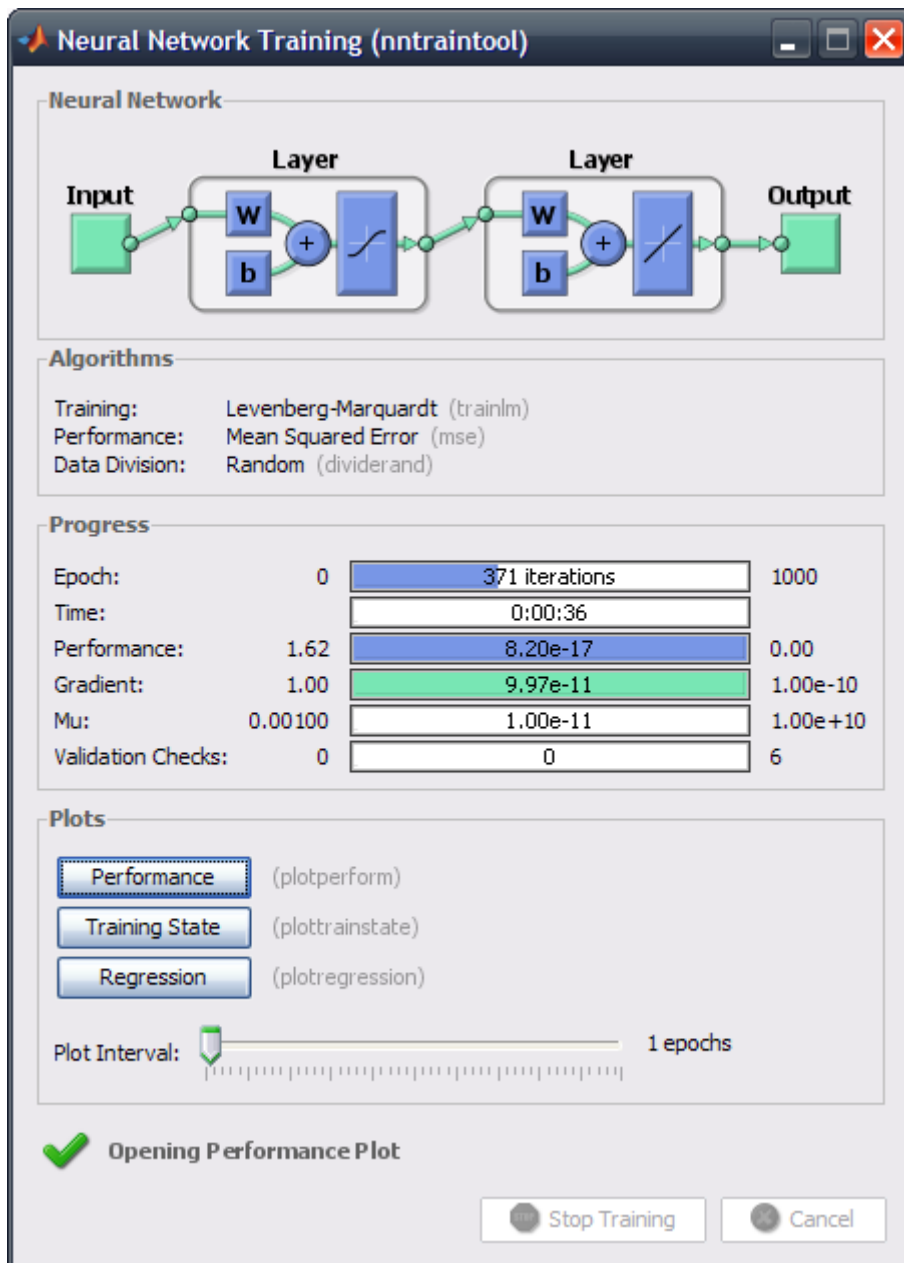
Пошто је задатак који се поставља пред ВММ релативно једноставан, одлучено је да се користи само једна конфигурација ВММ и то са једним скривеним слојем у којем се налазе 2 неурона. У наставку се дају резултати обуке (слике 3.10. - 3.12.)



Слика 3.9. Графички приказ употребљеног скупа за обуку ВММ за детектовање црних маркера

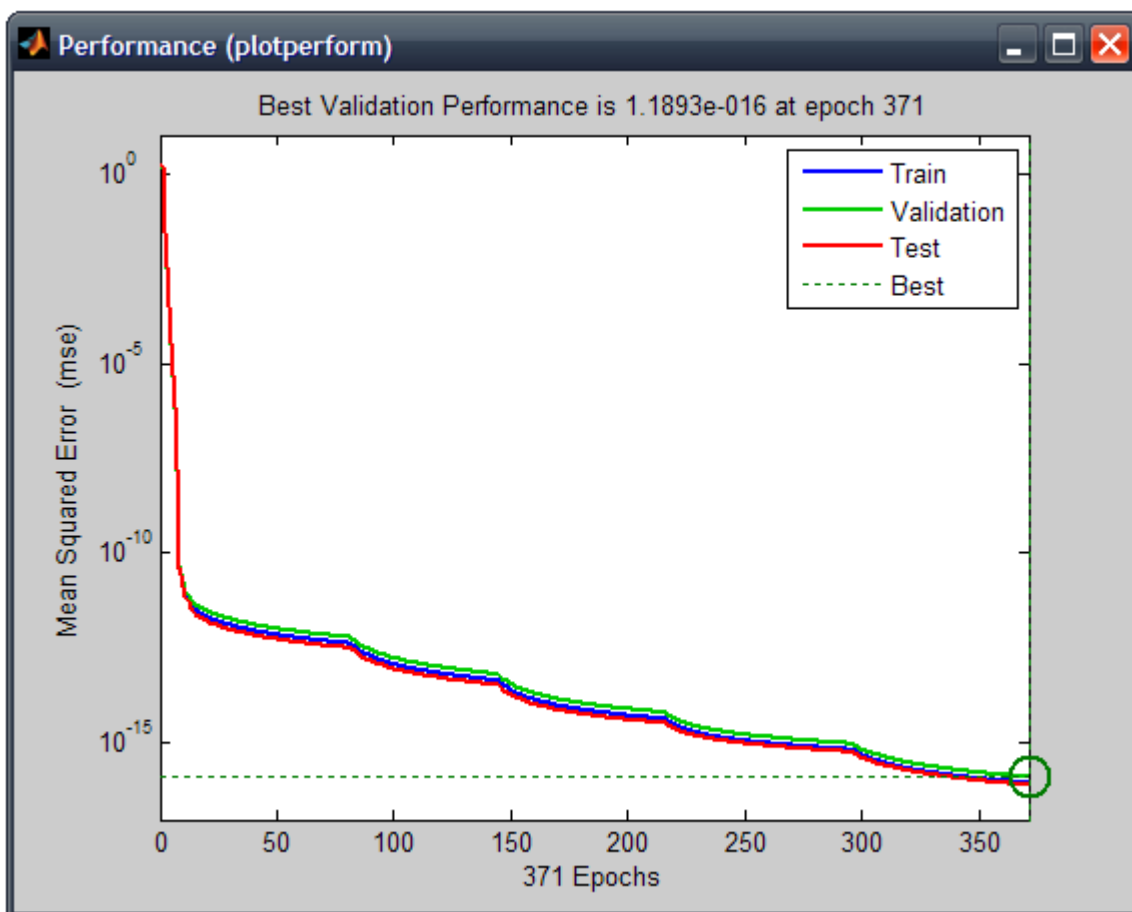
На слици 3.10 приказан је скуп обучавајућих података који је настао спајањем два репрезентативна сета података добијена читавањем сигнала са светлосног сензора под различитим условима рада и окружења. Може се приметити да за црну боју од 200 до 1000-ог податка постоје изражена одступања која су била последица поменутих услова.

Резултати обуке су приказани на следећој слици (3.11). На њој се може приметити да су коришћени исти параметри обуке као и ВММ за скретање робота (Левенберг-Маркеов метод обуке, оцена грешке помоћу средње квадратне разлике и случајно узорковање података). Остварена је тачност од $8,20 \cdot 10^{-17}$.



Слика 3.10. Резултати обуке ВММ за детектовање маркера

Перформансе обучене ВММ су приказане на слици 3.12. На овом графичком приказу може се видети да се одвијала стабилна конвергенција ка задатој тачности, без изразитих одступања. Ово се донекле може објаснити једноставном структуром ВММ (само један скривени слој са два неурона) и погодном изабраним обучавајућим скупом података.

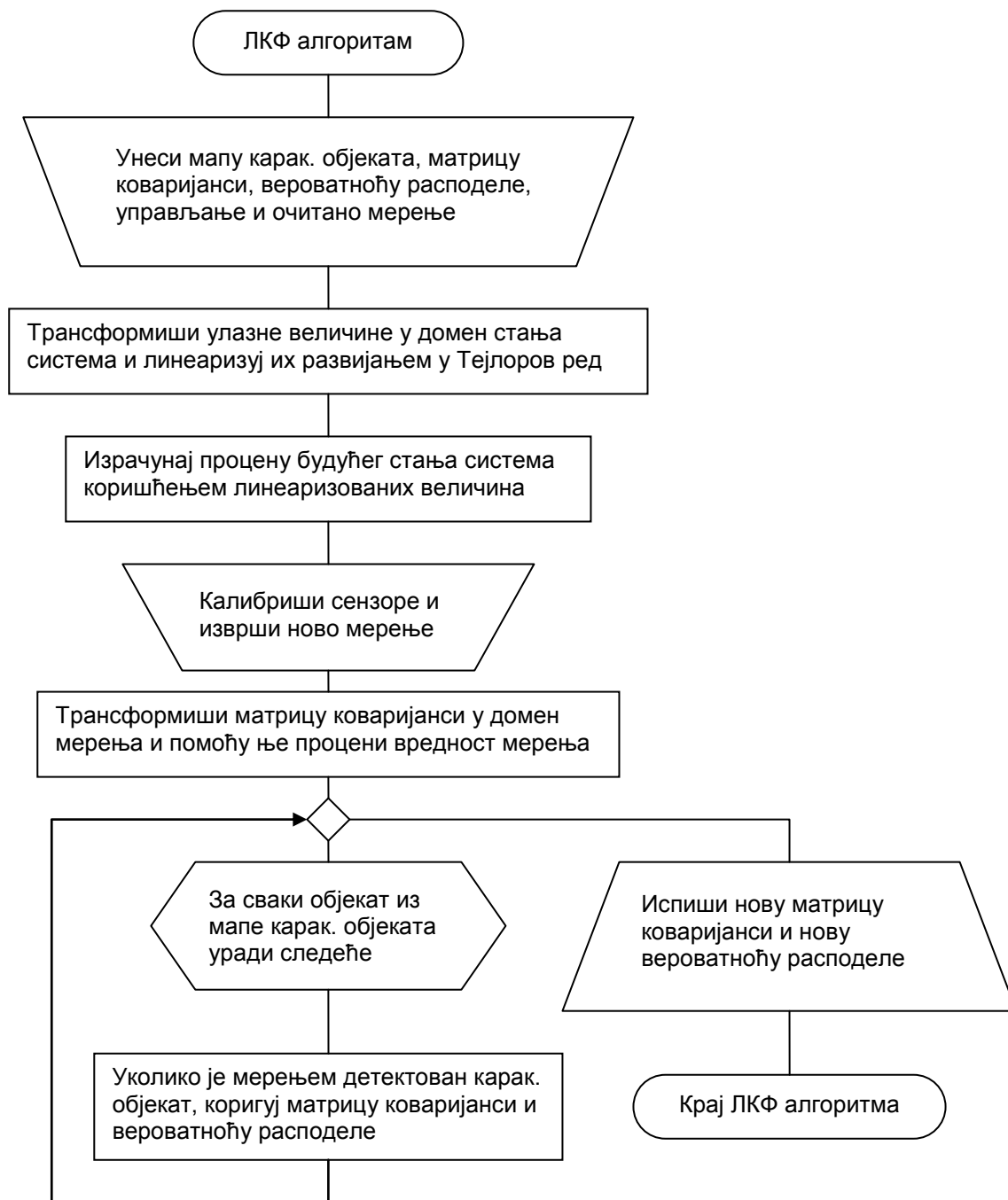


Слика 3.11. Графички приказ перформанси употребљене ВМ за детектовање маркера

3.4. Карактеристике коришћеног линеаризованог Калмановог филтера

Линеаризовани Калманов филтер (ЛКФ) је коришћен у пројекту како би се остварило оптимално управљање самог ИМР-а. Ако се узму у обзир карактеристике употребљених компоненти за конфигурисање мобилног робота (добре радне карактеристике), улога Калмановог филтера још више добија на значају.

Линеаризовање Калмановог филтера је обављено ради поједностављења потребног математичког апарата и оно је извршено у опсегу који обезбеђује несметан рад управљачког система. Још један разлог за линеаризацију КФ се огледао кроз предиктивну карактеристику ЛКФ-а. Наиме, једна од функција ЛКФ је била да предвиди остварене резултате (померај робота, тј. промену вектора стања система) на основу предходног стања система и његове сигурности (поузданости) да се ту робот налазио. Након извршеног помераја и читавања сензора вршена је корекција како тренутног положаја робота, тако и сигурности да се робот ту стварно налази. У наставку се даје дијаграм [1] помоћу којег ће се детаљније објаснити суштина и улога ЛКФ примењеног у пројектном решењу (слика 3.13).



Слика 3.12. Дијаграм тока информација ЛКФ-а

У првом кораку се уносе неопходне информације: мапа карактеристичних објеката помоћу које се врши кориговање положаја на основу детектованих маркера m (детектовање врши ВНМ објашњена у предхоном одељку), матрицу коваријанси која представља колико је робот сигуран да се налази у датој локацији Σ_{t-1} , средња вредност вероватноће расподеле положаја мобилног робота која додатно дефинише помеуту сигурност робота μ_{t-1} , управљање u (нпр. вектори жељених брзина translације и ротације, тј. пређеног пута оба погонска точка, на основу којих се покреће робот) и резултати мерења сензора, дати у облику вектора z .

У наредном кораку се управљање и средња вредност вероватноће расподеле положаја робота преводe у домен стања система (вектор x_t^t , јна. (1)) и линеаризују како би се извршила предикција будућег стања система (положаја робота).

На основу (5) и коришћењем (3,4) добијају се (Јакобијани трансформација):

$$G_t = \frac{\partial x_t^t}{\partial x_{t-1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{b\Delta\theta}{2} \cdot \sin\theta \\ 0 & 1 & \frac{b\Delta\theta}{2} \cdot \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$V_t = \frac{\partial x_t^t}{\partial u_{t-1}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) - \Delta s \cdot \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \cdot \frac{1}{4b} & \frac{1}{2} \cdot \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) + \Delta s \cdot \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \cdot \frac{1}{4b} \\ \frac{1}{2} \cdot \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) + \Delta s \cdot \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \cdot \frac{1}{4b} & \frac{1}{2} \cdot \sin(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) - \Delta s \cdot \cos(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}) \cdot \frac{1}{4b} \\ \frac{1}{2b} & -\frac{1}{2b} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Предикција будућег стања система обухвата израчунавање неколико величина. Прво је потребно моделирати грешке модела кретања (матрица M), а затим применом предходно израчунатих величина (G_t , V_t) одредити очекиване вредности матрице коваријанси и средње вредности вероватноће расподеле положаја мобилног робота ($\bar{\Sigma}_t$, $\bar{\mu}_t$). Ово је представљено следећим једначинама:

$$M_t = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\bar{\Sigma}_t = G_t \cdot \bar{\Sigma}_{t-1} \cdot G_t^t + V_t \cdot M_t \cdot V_t^t \quad (9)$$

$$\bar{\mu}_{t-1} = \mu_{t-1} + B_t^{t-1} \cdot u_t \quad (10)$$

где је B_t^{t-1} матрица трансформације вектора управљања у домен стања система.

У четвртном кораку се прво врши калибрација сензора у коју спада предвиђање вредности мерења \bar{z}_t на основу израчунате средње вредности вероватноће расподеле положаја мобилног робота и карактеристика предходно детектованог маркера (датог у мапи карактеристичних објеката) S_t . После калибрације врши се ново мерење (вектор z_t). Дају се следеће једначине које описују овај корак:

$$Q_t = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} - \text{модел шума мерења} \quad (11)$$

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_L \cdot \sin\theta - y_L \cdot \cos\theta \\ 0 & 1 & x_L \cdot \cos\theta - y_L \cdot \sin\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

где су x_L и y_L координате светлосног сензора у фрејму робота (за наш случај оне износе $[x_L \ y_L] = [8 \ 0]$ у cm),

$$H_t = \frac{\partial h(\bar{\mu}_t, m)}{\partial x} \quad (13)$$

где је x - вектор стања система из једначине (1)

$$S_t = H_t \cdot \bar{\Sigma}_t \cdot H_t^t + Q_t \quad (14)$$

Превођењем матрице коваријанси у домен мерења (14) и уз коришћење резултата мерења врши се предикција мерења, које се у наредном кораку пореди са координатама маркера датих у мапи карактеристичних објеката m . Уколико је на овај начин детектован

маркер, онда се коригују матрица коваријанси и средња вредност вероватноће расподеле положаја мобилног робота $\bar{\Sigma}_t, \bar{\mu}_t$. Ове вредности уједно представљају и излаз из овог алгоритма. Осим њих, коригује се и матрица Калмановог појачања (K_t) која представља поузданост у процену тренутног положаја мобилног робота. Следећим једначинама се описује овај корак:

$$K_t = \bar{\Sigma}_t \cdot H_t \cdot S_t^{-1} \quad (15)$$

$$\bar{\mu}_t = \mu_t + K_t \cdot (z_t - \bar{z}_t) \quad (16)$$

$$\bar{\Sigma}_t = (I - K_t \cdot H_t) \cdot \bar{\Sigma}_t \quad (17)$$

На крају се изврши додела новодобијених вредности:

$$\mu_t = \bar{\mu}_t, \quad \Sigma_t = \bar{\Sigma}_t \quad (18)$$

3.5. Имплементација A* алгоритма

Проблем одабира оптималне путање кретања интелигентног мобилног робота решен је применом A звезда алгорита претраге [5]. Његов задатак је био да на основу дате мапе препрека, тренутне локације и циљне локације одреди најкраћи пут, заобилазећи препреке, од тренутне позиције до задатог циља.

За развијање алгоритма коришћен је софтверски пакет Matlab ради компатибилности са осталим имплементираним решењима (модел кретања, перцепције, ВМ, ЛКФ). Приликом писања кода A звезде, водило се рачуна о програмерским принципима модуларног програмирања. Наиме, главни проблем (имплементација алгорита претраге) је раздвојен на мање подпроблеме, који су представљали засебне логичке целине, како би се лакше, ефективније и брже саставио целокупни програм. Коришћењем дијаграма са слике 2.9. као и дефинисани су логички блокови, усвојени формат коришћених података као и начелна правила комуникације између блокова. У наставку се даје имплементирани код са ближним објашњењима. Треба напоменути да су овде обрисана већина коментара, због прегледности. Главни програм је изведен у облику функције коју је могуће веома лако позвати.

```
function [PUTANJA predjeni_put lokacija mapa_predjenog_puta komsiluk kandidati] =
Azvezda(start,cilj,mapaP)

% Ova funkcija odredjuje najkracu putanju izmedju zadatih tacaka start i cilj i zadate
% mape prepreka mapaP
%
% Korak 1. definisanje pocetnih parametara...

mapa_prepreka=mapaP;
PUTANJA=[];
koeficijent_prepreke=500;
koeficijent_pomerenog=100;
mapa_h=dodeli_h(zeros(size(mapa_prepreka)),cilj,'e');
mapa_reljefa=mapa_h+mapa_prepreka.*koeficijent_prepreke;
nova_mapa_reljefa=mapa_reljefa;
komsiluk=[];
kandidati=[];
pomerenost_za=0;
adresa_favorita=[];
vrednost_favorita=0;
predjen_put=[1.41 1 1.41 1 1 1.41 1 1.41];
predjeno=0;

% definisanje matrice koja ce prikazivati mapu sa preprekama i predjeni put od starta do
% cilja
```

```

mapa_predjenog_puta=zeros(size(mapa_prepreka))+mapa_prepreka.*koeficijent_prepreke
mapa_predjenog_puta(start(1),start(2))=1;
mapa_predjenog_puta(cilj(1),cilj(2))=666;

lokacija=start;

```

У првом кораку се дефинишу улазне променљиве као и променљиве који се користе у петљи. Такође се израчунавају радне променљиве које представљају улаз у петљу. У оквиру ове петље алгоритам претражује суседна поља (тачке) радне тачке које испуњавају одговарајуће услове (да су најближе циљној тачки и радној тачки) све док се не дође до циља. На крају алгоритма се врши својеврстан прелаз из тренутне тачке у следећу најближу тачку циљној тачки.

```

% Korak 2. WHILE petlja...

while (lokacija(1)-cilj(1)~=0) || (lokacija(2)-cilj(2)~= 0)

% ovde se ponovo definisu neke od radnih promenljivih koji se koriste u svakom ciklusu

kandidati=[];
adrese_i_vrednosti=[];
komsiluk=[];
adresa_i_vrednosti_komsiluka=[];
vrednosti_za_proveru=[];
vrednost_favorita=0;

kandidati=okolina_tacke(nova_mapa_reljefa,lokacija);
adrese_i_vrednosti=vrati_vrednost(kandidati,nova_mapa_reljefa);
adresa_favorita=vrati_adresu(vrednost_favorita,kandidati,mapa_reljefa,0.001);

komsiluk=kandidati;

adresa_i_vrednosti_komsiluka=vrati_vrednost(komsiluk,nova_mapa_reljefa);
vrednosti_za_proveru=adresa_i_vrednosti_komsiluka(:,3)+predjen_put';
vrednost_favorita=min(vrednosti_za_proveru);

for i=1:length(vrednosti_za_proveru) % ova FOR petlja definise matricu
                                   % [adresa_favorita] u kojoj se cuvaju sve adrese
                                   % favorita

    if vrednosti_za_proveru(i) == vrednost_favorita

        adresa_favorita=[adresa_i_vrednosti_komsiluka(i,1)
                          adresa_i_vrednosti_komsiluka(i,2)];

    end %if

end %for

predjeno=predjeno+razdaljina(lokacija,adresa_favorita,'e');
mapa_predjenog_puta(lokacija(1),lokacija(2))=
    =mapa_predjenog_puta(lokacija(1),lokacija(2))+2;

nova_mapa_reljefa(adresa_favorita(1),adresa_favorita(2))=
    =nova_mapa_reljefa(adresa_favorita(1),adresa_favorita(2))+koeficijent_pomerenog;

PUTANJA=[PUTANJA; lokacija];
lokacija=adresa_favorita;

end; %while

```

Други корак обухвата пролазак кроз петљу са условом улаза (тзв. **while** петља) све док је испуњен услов за улаз у њу. Услов уласка у петљу је конципиран као провера растојања радне тачке (локације) од циљне тачке по осама x и y . Све док се радна тачка не поклопи са циљном тачком у потпуности, тј. када растојање по x и y правцу не буде једнако нули, програм ће пролазити кроз блок наредби који се налази у петљи. Последња команда у овој

петљи представља команду доделе адресе тренутне локације радне тачке (тј. положаја робота) вектору ПУТАЊА који представља излаз из ове функције.

```
% Korak 3. osvezava matricu koja prikazuje predjeni put i prepreke i dodaje ciljnu tacku
% u vektor [PUTANJA]

mapa_predjenog_puta(lokacija(1),lokacija(2))=
    =mapa_predjenog_puta(lokacija(1),lokacija(2))+2;

nova_mapa_reljefa(adresa_favorita(1),adresa_favorita(2))=
    =nova_mapa_reljefa(adresa_favorita(1),adresa_favorita(2))+koeficijent_pomerenog;

PUTANJA=[PUTANJA; lokacija];
lokacija=adresa_favorita;

% ispisivanje nadjenih vrednosti [lokacija]
lokacija % ovo ispisuje trenutnu poziciju
mapa_predjenog_puta % ovo ispisuje mapu sa preprekama i putanjom

% KRAJ FUNKCIJE
```

Последњи корак обухвата формирање матрице пређеног пута помоћу које је могуће лако визуелизовати израчунату ПУТАЊУ и одмах проценити њену употребљивост. У наставку се дају креиране програмске функције за овај програм по редоследу употребе.

```
function [mapa]=dodeli_h(mapa,krajnja_tacka,tip_norme)

[redovi kolone]=size(mapa);
i=1;
j=1;
for i=1:redovi

    for j=1:kolone
        mapa(i,j)=razdaljina(krajnja_tacka, [i j] ,tip_norme);
    end

end

% KRAJ FUNKCIJE
```

Функција `dodeli_h` служи за формирање градијентог поља који представља удаљеност сваке тачке (поља) циљне тачке по усвојеној норми. Растојање се рачуна позивом следеће функције:

```
function duzina=razdaljina(start,cilj,tip_norme)

if (size(start)==size(cilj))
    switch tip_norme
        case{'e'}
            duzina=sqrt((start(1)-cilj(1))^2+(start(2)-cilj(2))^2); %euklidsko rastojanje
        case{'m'}
            duzina=abs(start(1)-cilj(1))+abs(start(2)-cilj(2)); %menhetn rastojanje
        otherwise
            disp(' razdaljina.m -> Greska br. 2: Pogresan parametar tip_norme. '); %greska
            o izabranoj nepostojecoj normi
            return
    end
else
    disp(' razdaljina.m -> Greska br. 1: Ulazni vektori [start] i [cilj] nisu iste
        duzine. '); %greska o nekompatibilnosti vektora
    return
end

% KRAJ FUNKCIJE
```

Ова функција је осмишљена да израчунава растојање у равни за две задате тачке по задатој норми. За сада има имплементирани само две норме: еуклидску и менхетн, али јој је

код осмишљен тако да је могуће веома лако додати нове норме уколико се за тиме створи потреба. Следећа функција одређује суседне тачке задатој тачки (*okolina_tacke*):

```
function [komsiluk]=okolina_tacke(mapa,lokacija)

    komsiluk=[]; % postavljanje pocetne vrednosti

    for i=lokacija(1)-1:lokacija(1)+1    % pocetak duple petlje za upis susednih tacaka
                                        % [lokacije] u vektor [komsiluk]
        for j=lokacija(2)-1:lokacija(2)+1
            komsiluk = [komsiluk; [i,j]];
            komsiluk = setdiff(komsiluk, lokacija, 'rows'); % da ne bi [lokacija] usla u svoj
                                                            % [komsiluk]
        end
    end

    end % kraj duple petlje za upis susednih tacaka [lokacije] u vektor [komsiluk]

end

% KRAJ FUNKCIJE
```

Ова функција користи обичну дуплу **for** петљу и информацију о адреси задате тачке како би вратила адресе њој суседних тачака. Наредна функција за задате адресе тачака и одговарајуће мапе враћа вредност у тим тачкама (*vrati_vrednost*):

```
function vrednost_u_komsiluku=vrati_vrednost(komsiluk,mapa)

    redovik=0;
    kolonek=0;
    [redovik kolonek]=size(komsiluk);
    vrednost_u_mapi=0;
    vrednost=[];

    for i=1:redovik
        vrednost_u_mapi=mapa(komsiluk(i,1),komsiluk(i,2));
        vrednost(i,3)=vrednost_u_mapi;
        vrednost_u_mapi=0;
        vrednost(i,1)=komsiluk(i,1);
        vrednost(i,2)=komsiluk(i,2);
    end %if

    vrednost_u_komsiluku=vrednost;

% KRAJ FUNKCIJE
```

Функција *vrati_adresu* служи за поређење датих вредности са променљивом *vrednost* и враћа адресе вредности које се налазе унутар задате толеранције:

```
function adrese_vrednosti=vrati_adresu(vrednost,kandidati,mapa,granica_tolerancije)

[redovik kolonek]=size(kandidati);
[redoviv]=length(vrednost);
adrese_vrednosti=[];

% granica_tolerancije=0.0001; % broj koji se koristi prilikom poredjenja

for i=1:redovik
    if abs(mapa(kandidati(i,1),kandidati(i,2)) - vrednost) < granica_tolerancije
        adrese_vrednosti=[adrese_vrednosti; [kandidati(i,1),kandidati(i,2)]];
    end
end

% KRAJ FUNKCIJE
```

Коришћењем ових функција повећана је контрола тока извршавања програма као и сама прегледност написаног кода. На овај начин је извршена имплементација алгоритама А звезде као методе налажења најкраће путање за задату мапу препрека.

сматрао успешним уколико би мобилни робот достигао циљну позицију у оквиру задатих граница толеранције.

4.2. Ток екперимента

За експеримент је усвојена следећа почетна позиција:

$$x_t = (40, 20, 90^\circ) \quad (19)$$

где су координате по x и y оси дате у центиметрима, а угао оријентације у степенима. Такође је било потребно дефинисати параметре граница толерације положаја и оријентације мобилног робота:

$$\begin{aligned} d_{\max} &= 10 \text{ [cm]}, \\ d_{\min} &= 5 \text{ [cm]}, \\ \varphi_{\max} &= 15 \text{ [}^\circ\text{]} \end{aligned} \quad (20)$$

Угао φ_{\max} је за прву проверу имао вредност 10° . Коришћење ових параметара је повећало флексибилност робота и робусност његовог управљачког механизма. Затим је било потребно описати конфигурацију робота помоћу полупречника погонских тачкова (r), растојања између погонских тачкова (b) и положаја светлосног сензора у односу на фрејм робота (x_s, y_s):

$$\begin{aligned} r &= 2,8 \text{ [cm]}, \\ b &= 13 \text{ [cm]}, \\ x_s &= 8 \text{ [cm]}, \\ y_s &= 0 \text{ [cm]} \end{aligned} \quad (21)$$

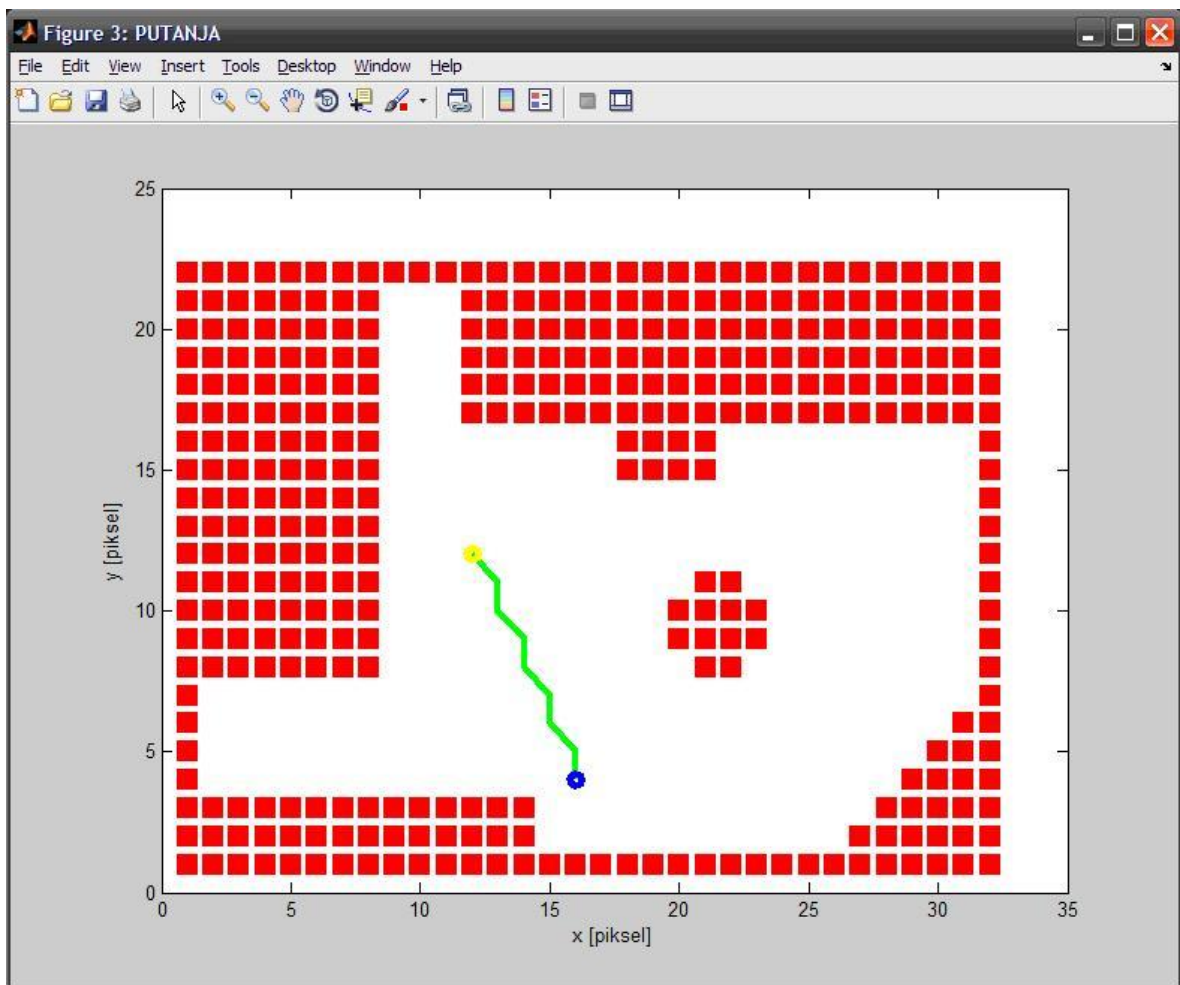
Претпоследњи корак пре покретања програма представљао је дефинисање матрица несигурности (C) и шума (Q), које користи линеаризовани Калманов филтер за корекцију положаја мобилног робота у оквиру технолошког окружења:

$$\begin{aligned} C &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \\ Q &= \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

Завршни корак поставке експеримента се огледао у дефинисању позиције и оријентације мобилног робота у технолошком окружењу као и задавање почетне и циљне тачке путање коју треба израчунати имплементирани алгоритам А звезде. Почетна тачка путање задата је као $(60, 60)$, а циљна $(80, 20)$. Уношењем ових података у програмски код, на основу А звезда алгоритма, добијена је следећа путања:

$$putanja = \begin{bmatrix} 60 & 60 \\ 65 & 55 \\ 65 & 50 \\ 70 & 45 \\ 70 & 40 \\ 75 & 35 \\ 75 & 30 \\ 80 & 25 \\ 80 & 20 \end{bmatrix} \quad (23)$$

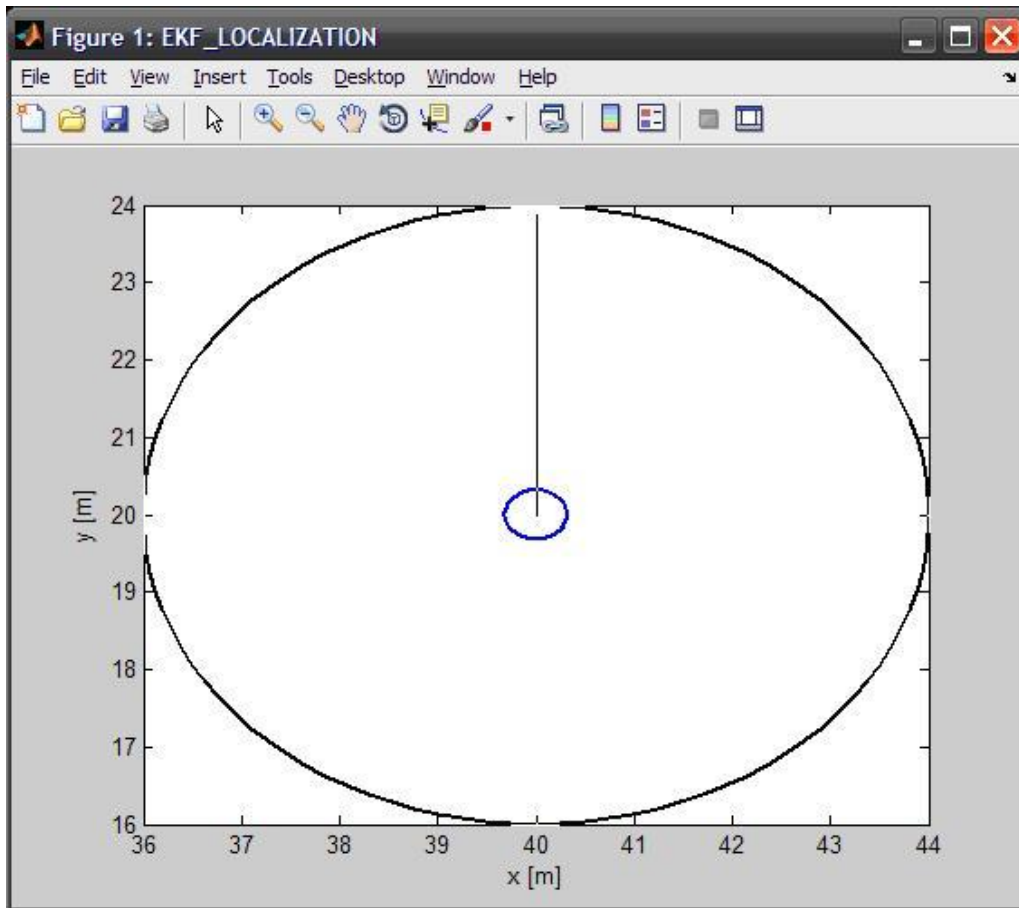
На основу добијене путање и развијене функције `crtajAzvezdu.m` формирана је слика путање (слика 4.2):



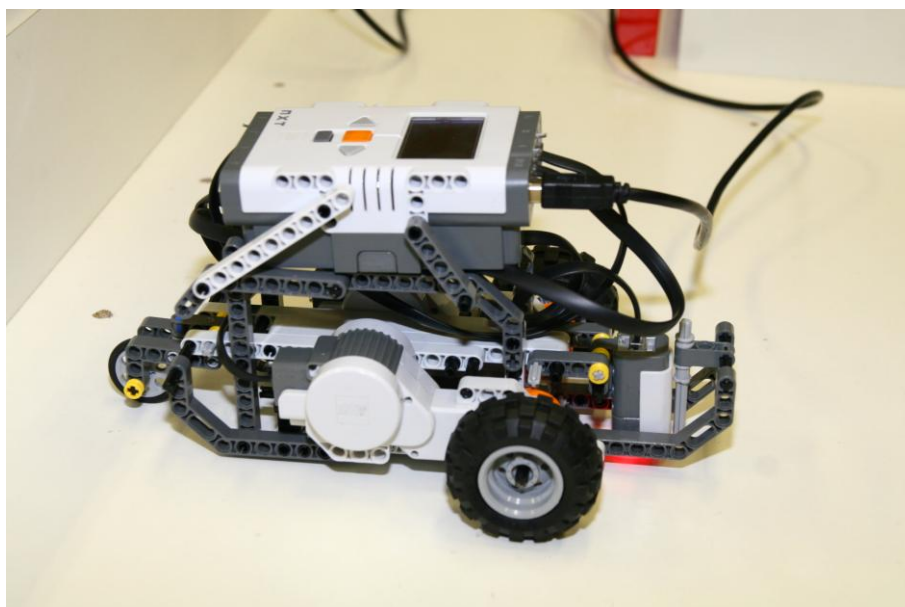
Слика 4.2. Симулирана путања добијена помоћу алгоритма А звезде за задату мапу препрека

Ова симулација је имала за циљ проверу израчунате путање како се не би десила колизија робота са машинама алаткама и границама окружења током кретања кроз окружење. Жути круг представља почетну тачку, а плави циљну. Нађена путања је приказана зеленом линијом. Црвени квадрати су поља препрека и добијају се на основу претходно дефинисане бинарне матрице препрека.

Робот је затим пуштен у рад. У наставку ће бити приказани кретање мобилног робота кроз технолошко окружење и његова сигурности у остварену позицију током кретања. Приликом провере роботове позиције на почетку кретања, систем приказује да се робот налази у задатој позицији (40,20) окренут дуж у осе (слика 4.3). На слици 4.4 је приказан тај положај у стварности.

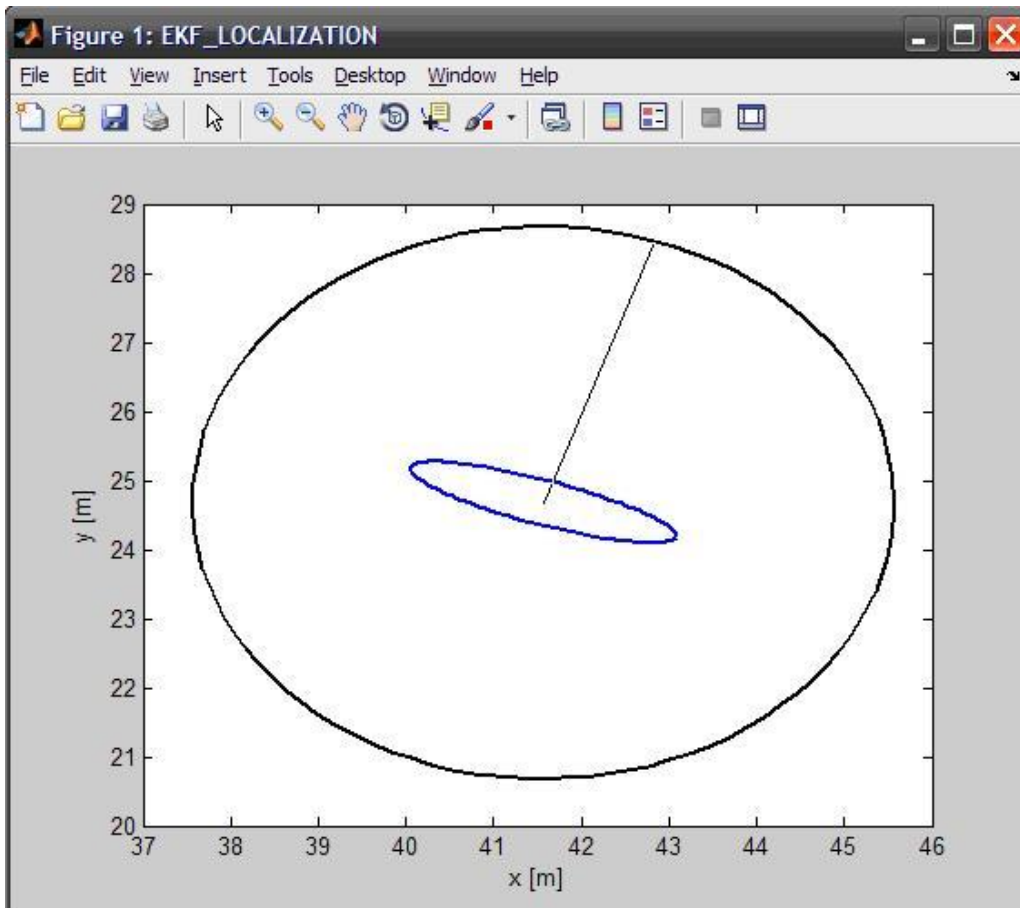


Слика 4.3. Приказ локализације мобилног робота за почетну позицију

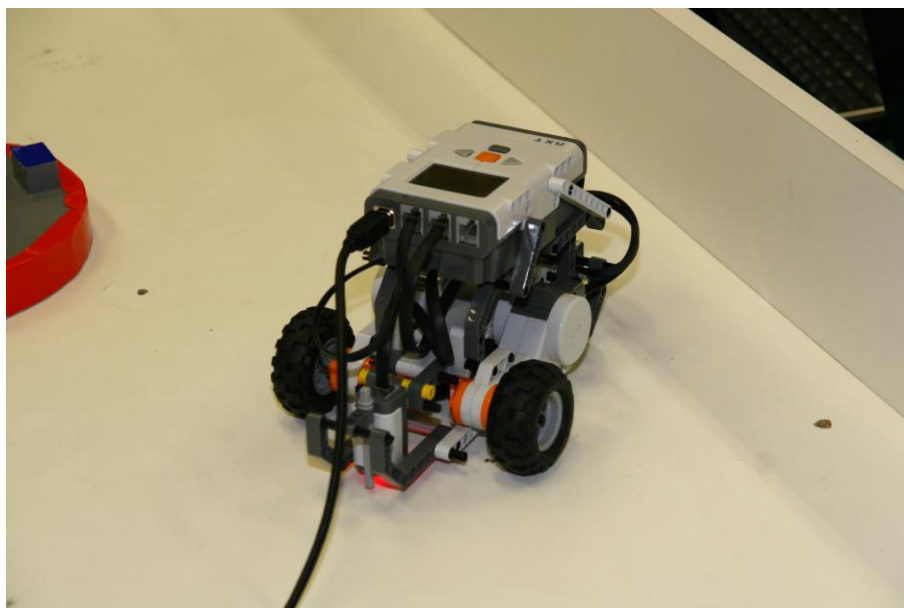


Слика 4.4 Мобилни робот у почетној позицији (40,20)

По почетку кретања мобилног робота дуж првог сегмента путање врши се поново локализација робота и њени резултати су приказани на слици 4.5. На њој се може приметити да је мобилни робот променио свој правац како би се окренуо ка стартној тачки (60,60). Положај и оријентација мобилног робота у оквиру технолошког окружења који одговарају овом тренутку су приказани на слици 4.6.

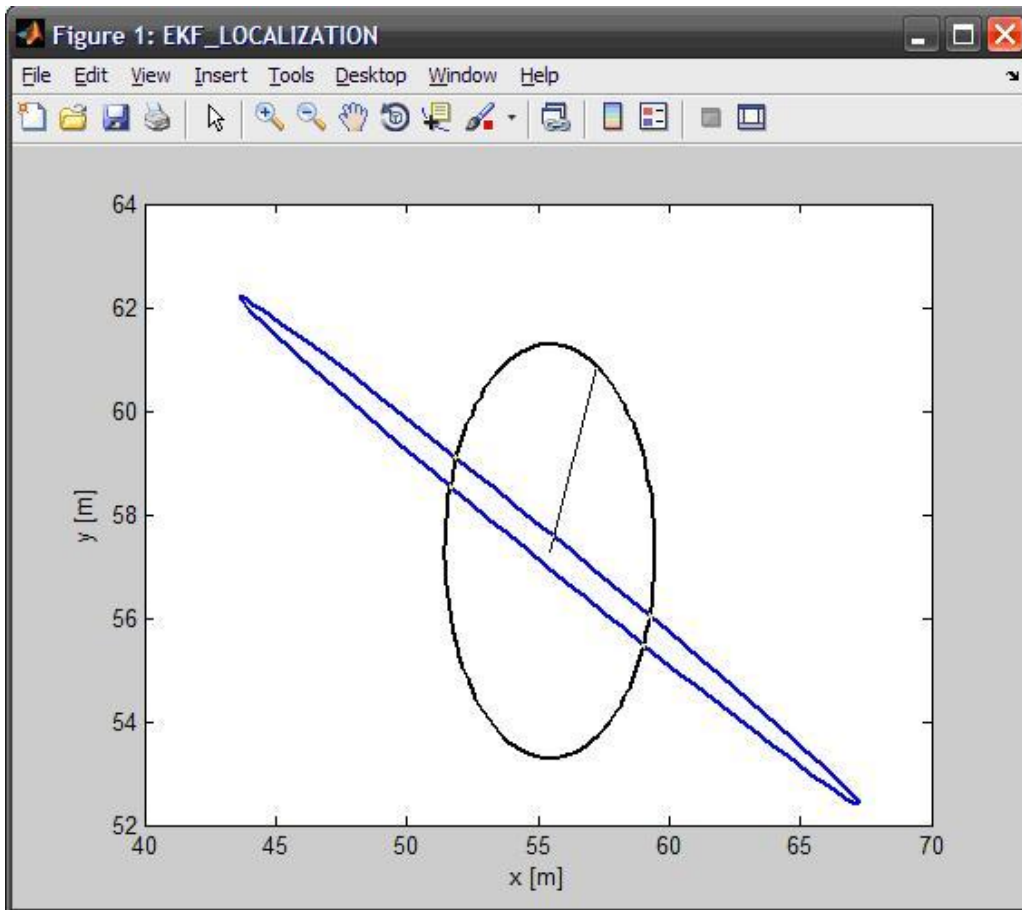


Слика 4.5. Приказ локализације робота непосредно после напуштања почетне позиције

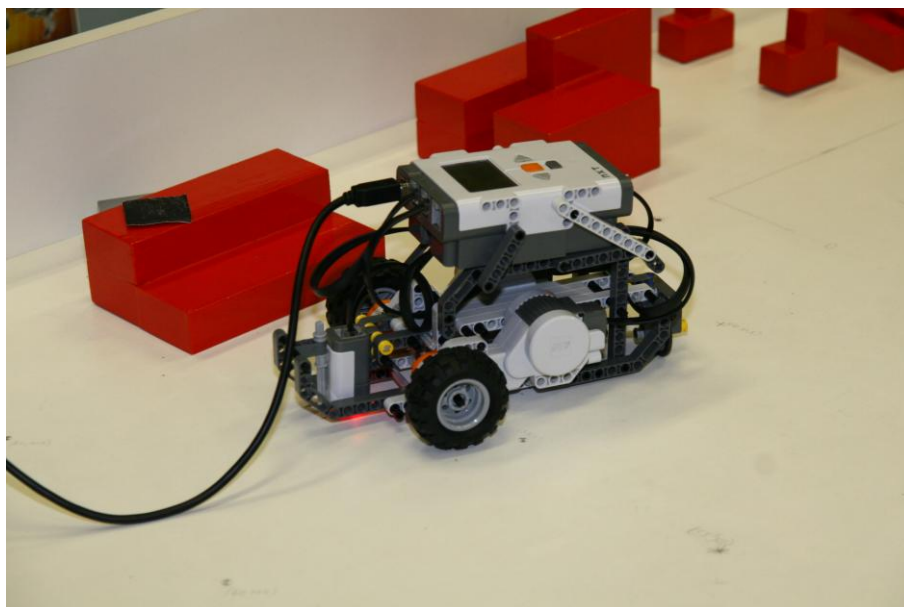


Слика 4.6. Мобилни робот приликом кретања у првом сегменту

Ради верификовања рада система било је потребно проверити рад његових подсистема (ВНМ за скретање, ЛКФ) приликом великих заокрета. У тачки (60,60) мобилни робот се окренуо за око 180° и пре овог заокрета извршена је локализација чији су резултати приказани на слици 4.7. Одговарајући положај робота пре заокрета се може видети на слици 4.8.

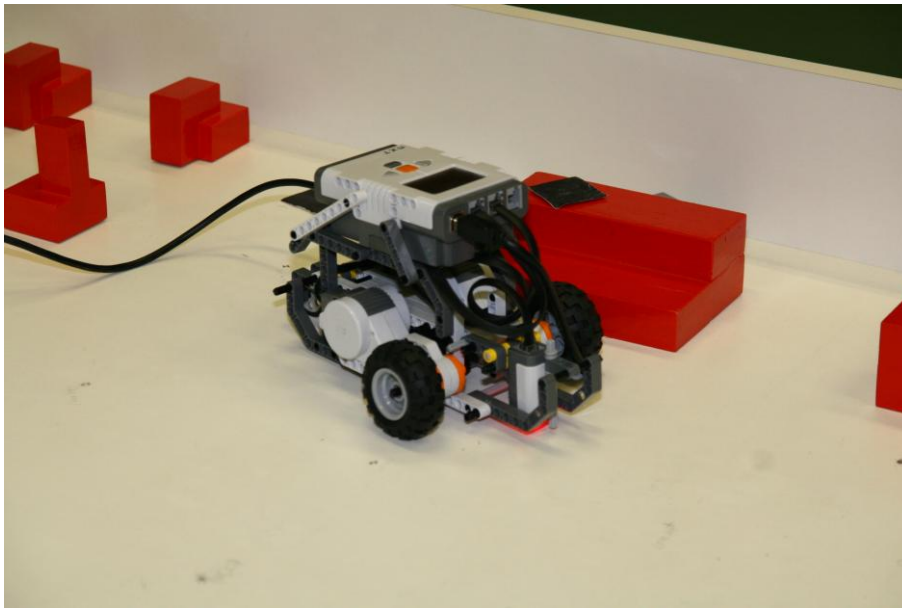


Слика 4.7. Приказ локализације пре скретања мобилног робота

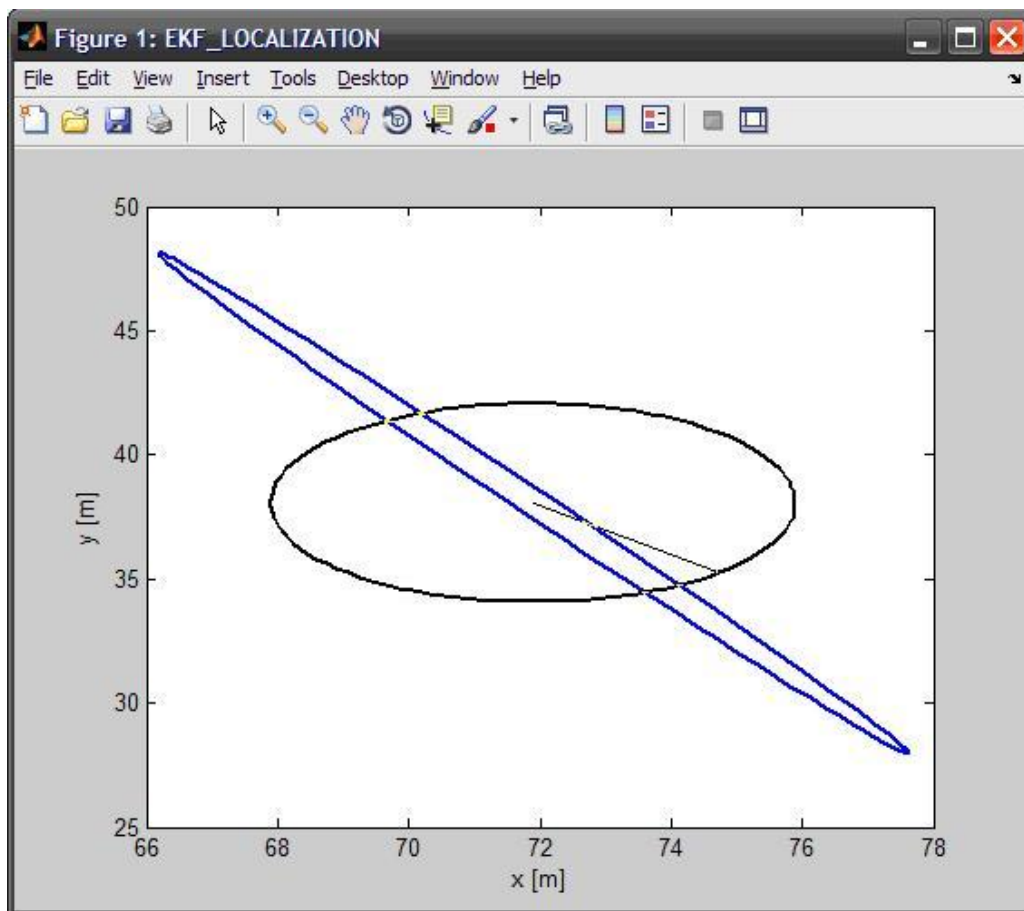


Слика 4.8. Положај мобилног робота пре скретања

Слика 4.9 представља положај робота после заокрета и почетак другог сегмента израчунате путање кроз који треба проћи како би стигао до циљне тачке. Приказ извршене локализације на другом сегменту је дат на слици 4.10.

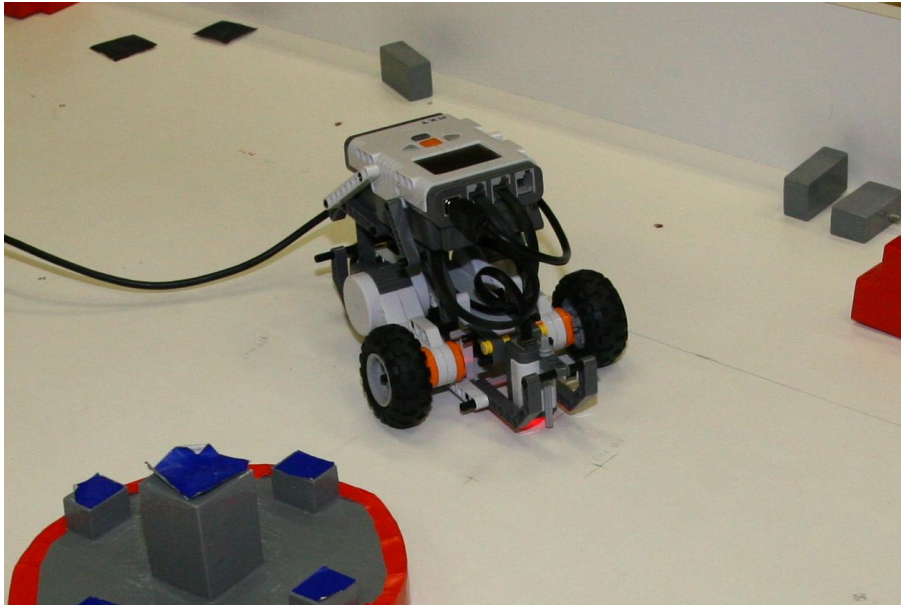


Слика 4.9. Положај мобилног робота после скретања

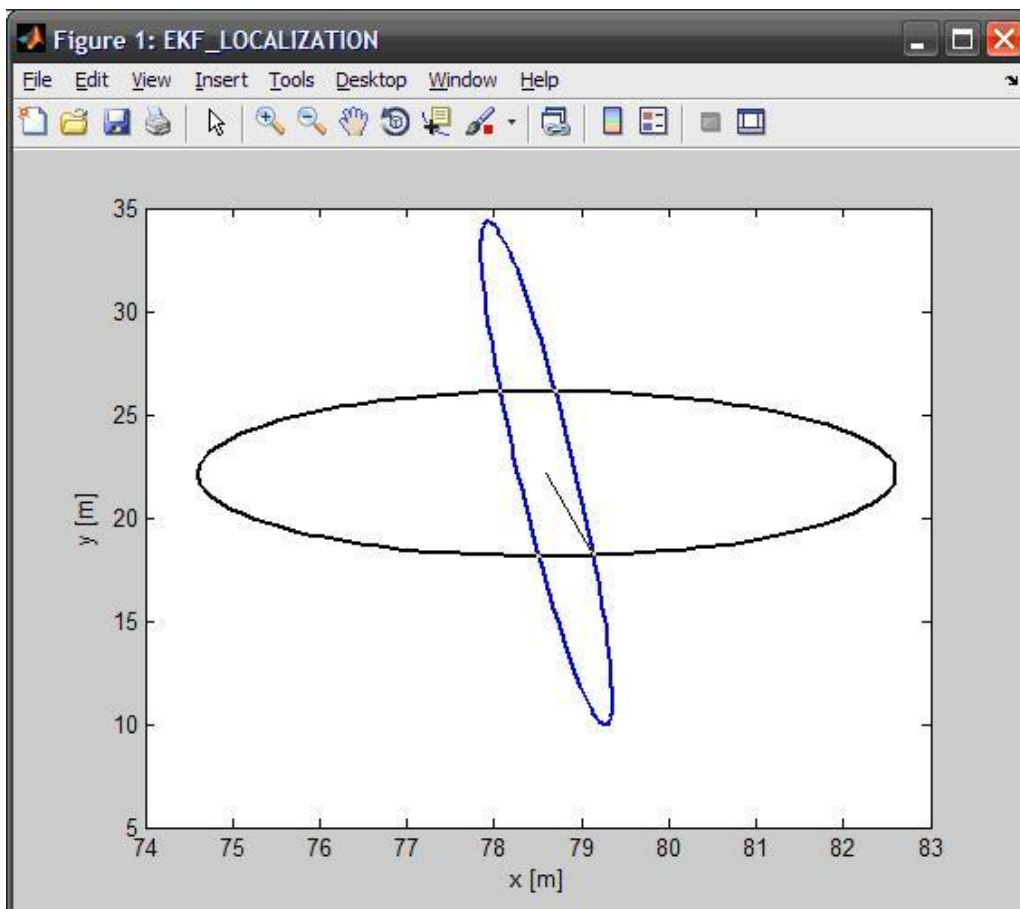


Слика 4.10. Приказ локализације робота на другом сегменту путање

Пошто је прешао други сегмент путање без колизије са монтажним столом (слика 4.11), мобилни робот се зауставио у оквиру задатих толеранција циљне тачке (80, 20). При том је извршена локализација и њени резултати се налазе на слици 4.12.



Слика 4.11. Робот у циљној позицији



Слика 4.12. Приказ извршене локализације при достигнутој циљној позицији (80,20)

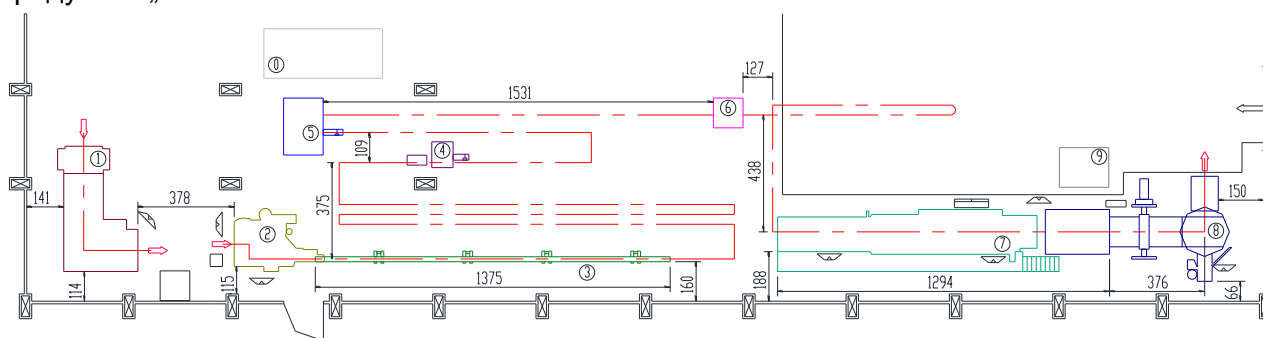
Овим експериментом је доказано да је развијени и имплементирани концепт интелигентног мобилног робота, конфигурисаног помоћу Lego Mindstorms NXT пакета, у могућности да испуни задате циљеве (праћење путање и достизање циљне позиције) у границама задатих толеранција.

5. Развој симулационог модела у AnyLogic софтверском окружењу

У овој фази пројектног задатка било је потребно развити симулациони модел постојећег диспозиционог плана погона за производњу и палетизацију лименки у предузећу „ФМП”, а након тога, на основу резултата симулације, предложити нови (унапређени) диспозициони план технолошког окружења.

5.1. Опис технолошког окружења

Предузеће „ФМП” [7] се бави производњом металне амбалаже за потребе прехранбене и хемијске индустрије. На слици 5.1 приказан је layout производног погона предузећа „ФМП”.



Слика 5.1. Layout производног погона предузећа „ФМП”

У табели 5.1 дат је списак расположивих машина у производној линији фабрике, чији layout је приказан на предходној слици (слика 5.1).

Таблица 5.1. Списак машина у производној линији		
Машина	Опис	Позиција
M1	Маказе за сечење	1
M2	Аутомат за утискивање полуреца и обликовање	2
M3	Аутомат за заваривање и пећ	3
M4	Аутомат за повијање и расецање	4
M5	Аутомат за ребрење и сужавање	5
M6	Аутомат за монтирање дна	6
M7	Палетизатор	7
M8	Машина за урезивање и улепљивање	8

Позиције 0 и 9 нису приказане у табели 5.1. Ове позиције представљају улазно складиште полуфабриката (лима) и складиште готових делова у које спадају кутије, лименке и др.

5.2. Теоријска поставка симулације

Симулација је имитација рада реалног процеса или система током времена и омогућава генерисање вештачке историје и посматрање те вештачке историје у циљу извођења закључака о радним карактеристикама система.

Понашање система које се мења током времена проучава се развијањем симулационог модела [8]. Систем се дефинише као група објеката која је уједињена како би кроз одређено међудејство испунила одговарајући задатак. Модел представља концептуални оквир који описује систем и најчешће се јавља у облику скупа математичких и логичких претпоставки или као скуп симболичких релација између ентитета.

Сврха примене симулације и моделирања је да се на моделу могу испитати потенцијалне измене на посматраном систему и какав утицај оне имају на њега. Још један разлог је много једноставније, брже и сигурније испитивање модела него реалног система.

5.3. Симулација рада технолошког система

Anylogic [9] је софтверски пакет намењен за симулацију и моделовање дискретних, континуалних и хибридних система у реалном времену, уз могућност креирања апликације. Развијен је на Java програмској платформи и поседује богату библиотеку компоненти и ентитета помоћу којих је могуће веома брзо и ефикасно направити одговарајући модел и извршити његову симулацију. Симулација тока материјала кроз производни погон обављена је у овом програмском пакету. У симулацији је обухваћена израда лименки која се производе у овом предузећу са нормираним припремним временима и временима обраде која су дефинисана технолошким поступком. У табели 5.2 је дато трајање технолошких поступака за израду лименки.

Таблица 5.2. Трајање технолошких поступака за израду лименки

Редни број	Технолошки поступак	Машина	Време трајања поступка (s)
1	Транспорт палете са лимовима од улаза у халу до маказа и спуштања	Виљушкар - бензинац	25
2	Постављање палете на машину	Виљушкар - бензинац	179
3	Отпакивање палете	Ручна манипулација	25
4	Подизање палете до вакумских сисалки	Аутоматски	25
5	Сечење припремака из табли лима	Маказе	9
6	Скидање трака са маказа и постављање на сто	Ручна манипулација	20
7	Преношење трака и пуњење шаржера	Ручна манипулација	3
8	Утискивање полуреца и обликовање (савијање)	Аутомат	2
9	Заваривање и печење споја	Аутомат и пећ	20
10	Транспорт и хлађење	Магнетни транспортер	111
11	Повијање и расецање	Аутомат	2
12	Транспорт	Магнетни транспортер	10
13	Ребрење и сужавање	Аутомат	4

14	Транспорт	Магнетни транспортер	21
15	Монтирање дна	Аутомат	2.5
16	Транспорт	Магнетни транспортер	17
17	Палетизатор	Палетизатор	64
18	Увезивање и облепивање	Машина	269
19	Одвожење палете са лименкама до врата погона	Виљушкар - бензинац	27

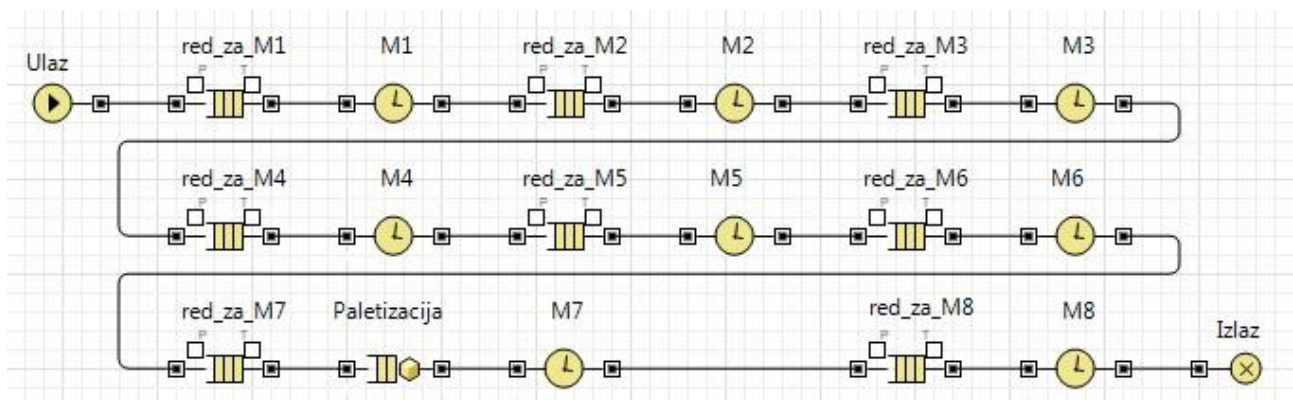
Узимајући у обзир претходну таблицу, извршена је симулација неколико модела. У првом моделу који је симулиран није узето у обзир време транспорта материјала између складишта и машина, а такође ни време транспорта делова између самих машина, тако да овај модел обухвата само време обраде.

У симулацији су коришћени следећи ентитети:

- Source – представља улаз (делови који пристижу),
- Delay – ентитет са којим је моделирана машина (време обраде),
- Queue – представља ред делова испред машине који чекају на обраду,
- Conveyor – представља конвејер, машину за унутрашњи транспорт,
- Batch – представља машину за палетизацију,
- Sink – представља излаз из модела (излазно складиште).

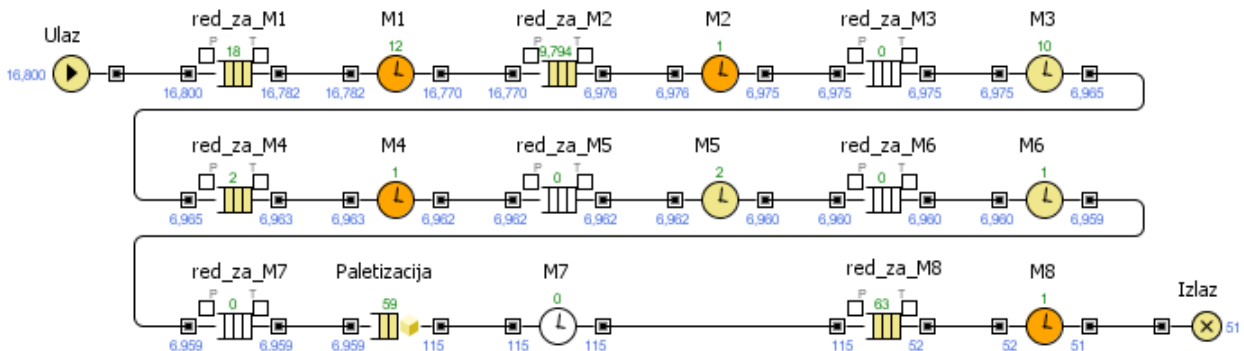
Помоћу ових ентитета било је могуће симулирати процесе дефинисане пројектним задатком. У наставку се дају изведене симулације са пропратним коментарима.

5.4. Симулациони модел без анализе транспортних токова



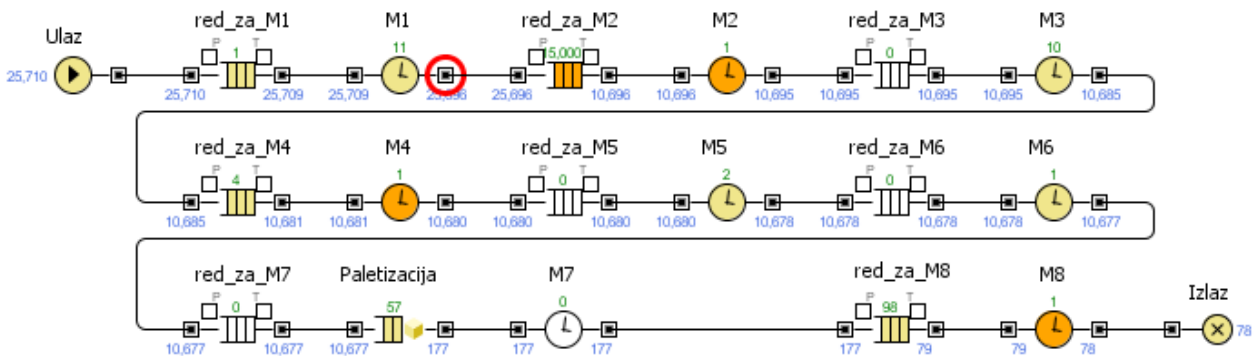
Слика 5.2. Симулациони модел без анализе транспортних токова

Симулација је тако подешена да симулира рад једне смене која траје 8 часова (28.800 sec.). Као што се на слици 5.2 види, испред сваке машине налази се ред чекања за ту машину. Машина M7 је приказана помоћу два ентитета: као палетизација лименки у скупине од по 60 комада и помоћу ентитета M7 који симулира време паковања палета.



Слика 5.3. Симулациони модел у току симулације

На слици 5.3 приказан је ток симулације кретања делова кроз погон на половини симулације (14.000 сек. од почетка симулације). На слици је приказано да је на излаз из производне линије стигла 51 палета упакованих лименки, односно да је израђено укупно 3.060 лименки (60 x 51). На линији производње уочавамо да се створио велики ред испред машине M2 од 9.794 дела, док су редови чекања испред осталих машина веома мали или их уопште нема.

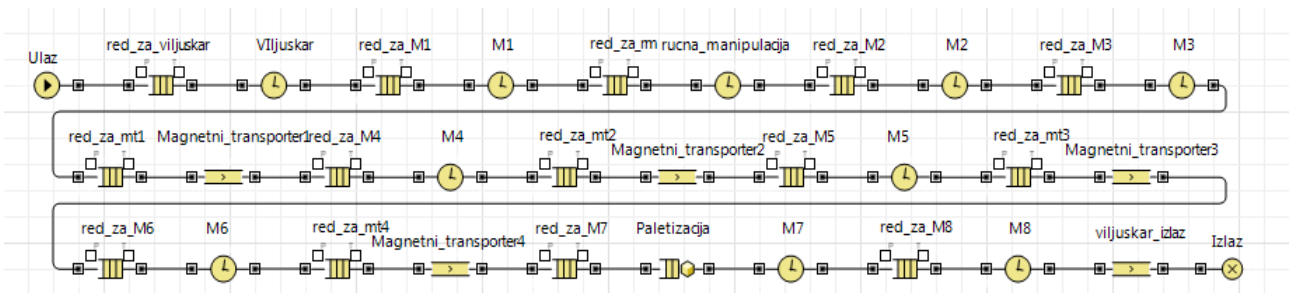


Слика 5.4. Симулациони модел након завршене симулације

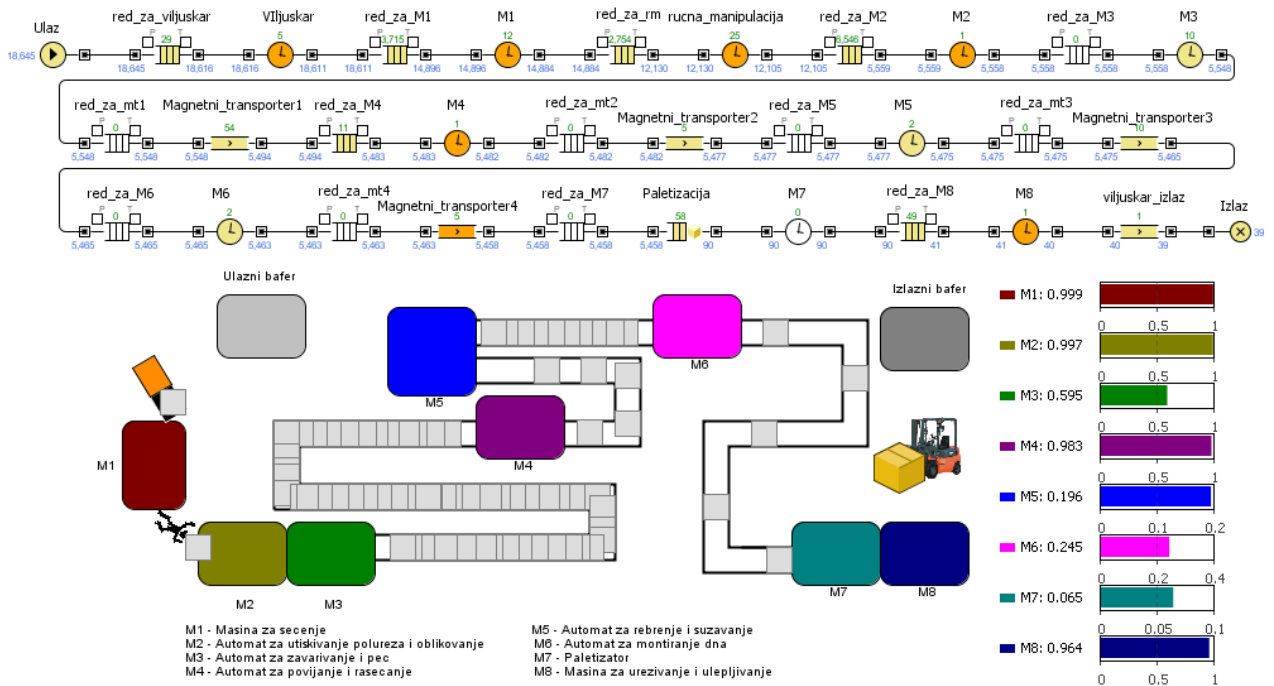
На слици 5.4 приказан је модел добијен на крају симулације, односно након 21.451 секунде од почетка рада симулације. Симулација је након овог времена аутоматски прекинута јер је досло до загушења у реду за машину M2 и поред тога што има веома кратко време обраде. Разлог настанка загушења је веома мали пројектовани капацитет машине. У тренутку прекида завршено је биле 78 палета, односно 4.680 лименки. На осталим деловима производне линије нису се појавила велика загушења.

5.5. Симулациони модел са анализом транспортних токова

Други случај симулације приказан је на слици 5.5. У овом случају узети су у обзир транспортни токови. Транспорт међу објектима представљен је конвејером, а његови параметри се постављају тако што се дефинише раздаљина између објеката између којих се врши транспорт, брзина кретања између ових објеката и растојање између делова који се преносе. Раздаљина међу објектима дефинисана је на основу цртежа Layout-а производног погона предузећа „ФМП” (слика 5.1).

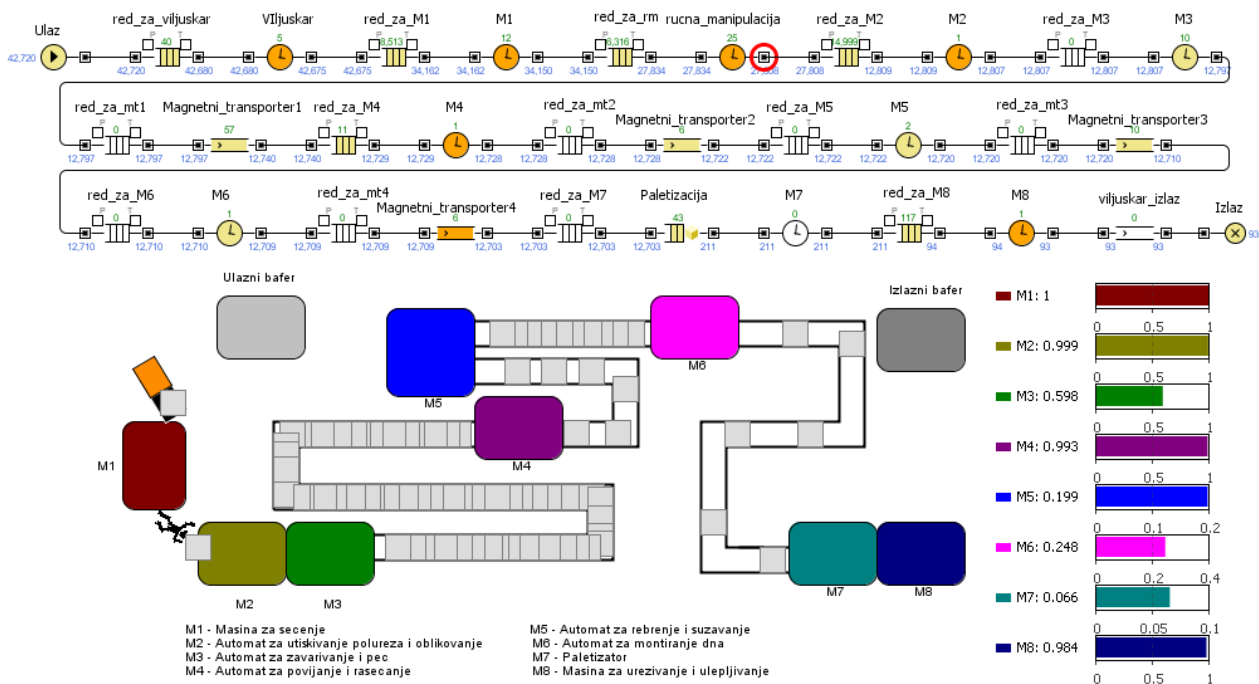


Слика 5.5. Симулациони модел са анализом транспортних токова



Слика 5.6. Симулациони модел са анализом транспортних токова заједно са анимацијом у току симулације

Са слике 5.6 се може видети да је број урађених лименки након 11.200 секунди 2.340, односно 39 палета. Може се приметити велики ред испред машине M2 који износи 6.546 лименки, који има велику тенденцију да се препуни. Такође су се формирали велики редови за чекање испред машина M1 и места за ручну манипулацију, док код осталих машина нема проблема са редовима чекања.

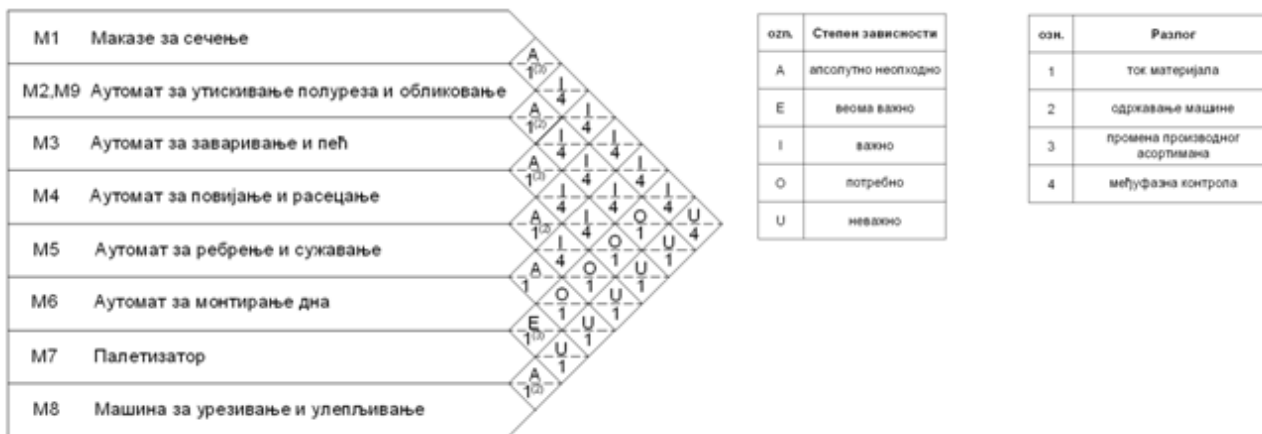


Слика 5.7. Симулациони модел са анализом транспортних токова заједно са анимацијом на крају анимације

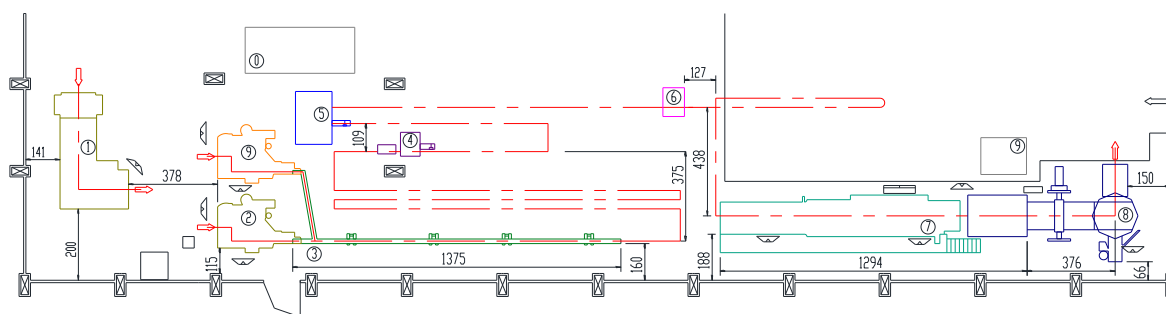
На слици 5.7 приказан је модел са анализом транспортних токова на крају симулације, односно након 25.611 секунди од почетка рада симулације. Симулација је након овог времена аутоматски прекинута, јер је дошло до очекиваног загушења у реду за чекање испред машине M2, разлог као што је предходно наведено (због малог капацитета машине). Број лименки добијених на крају симулације је 5.580, број 42.720 који је на улазу представља број лименку који је ушао у процес производње.

5.6. Пројектовање новог диспозиционог плана технолошког окружења

На основу предходних симулација и анализа технолошких окружења, пројектован је нови диспозициони план предузећа. Постојећем машинском погону је додата још једна машина типа M2, испред којих су се формирали велики редови чекања као и један робот који би заменио ручну манипулацију, приликом опслуживања две машине типа M2. Транспорт би се уместо виљушкарком обављао мобилним роботом. На слици 5.8 приказана је формирана троугласта квалитативна матрица међузависности. На њој се могу видети зависности између датих машина. На слици 5.9 је дат нови layout технолошког окружења, на којој се може видети да је додата још једна машина M9 поред машине M2. Машина M1 је померена тако да буде подједнако удаљена од машина M2 и M9 како би робот истовремено могао да их опслужује.



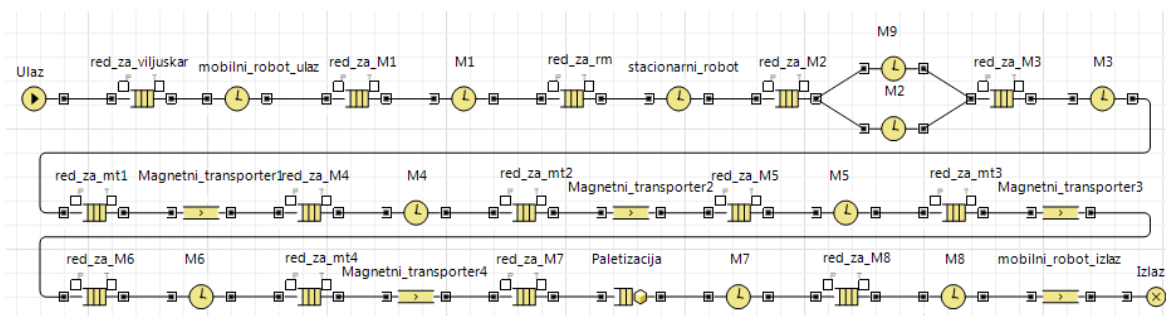
Слика 5.8. Троугаона матрица међузависности активности



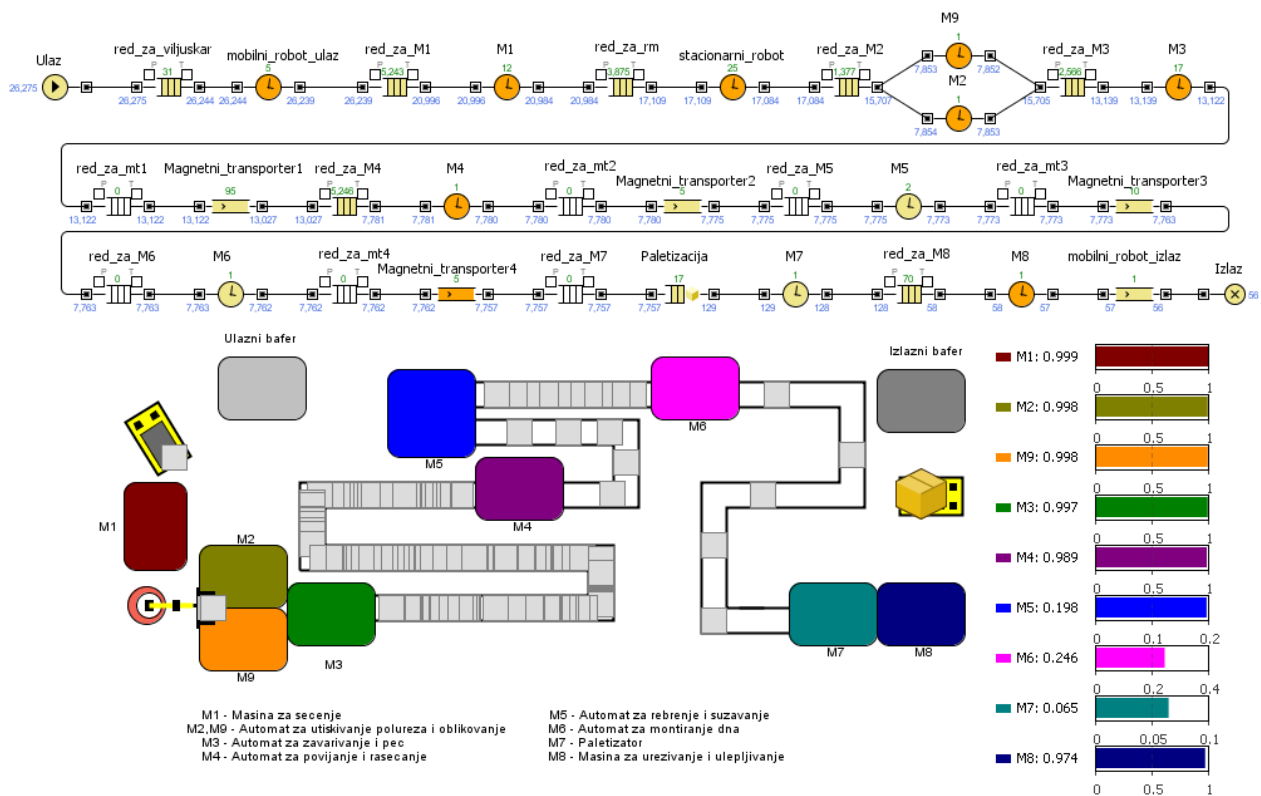
Слика 5.9. Нови layout технолошког окружења предузећа “ФМП”

5.7. Симулација новог диспозиционог плана технолошког окружења

Симулиран је рад једне смене у новом технолошком окружењу. На слици 5.10 приказан је симулациони модел новог решења диспозиционог плана.

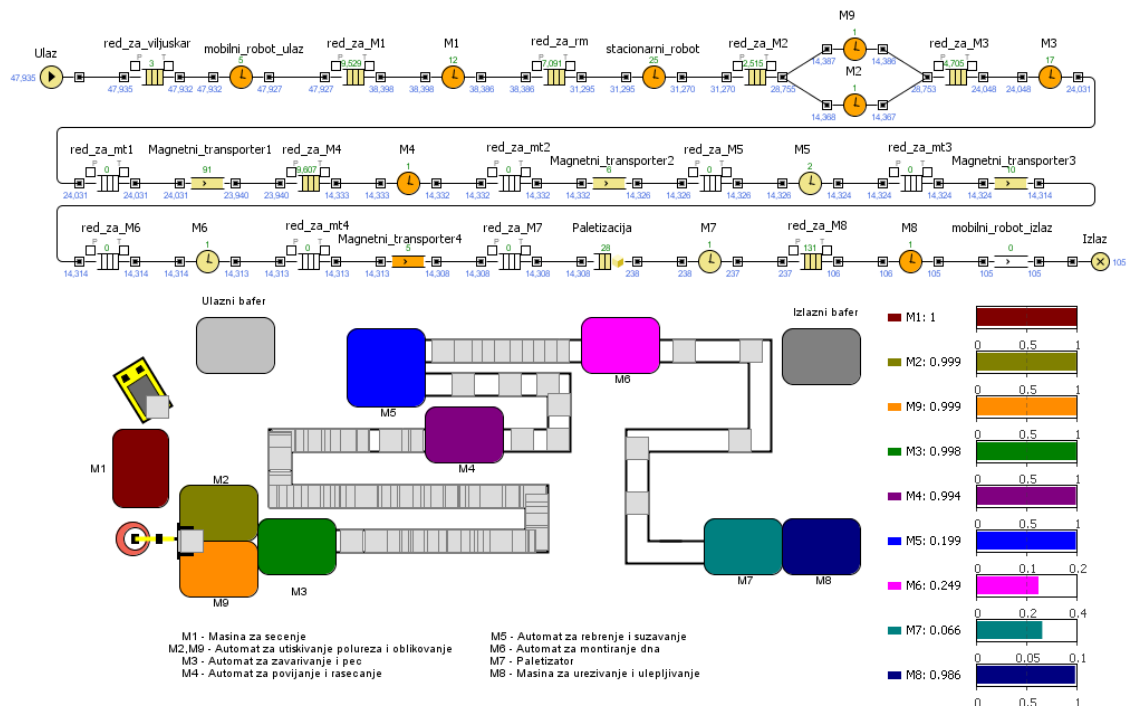


Слика 5.10. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана



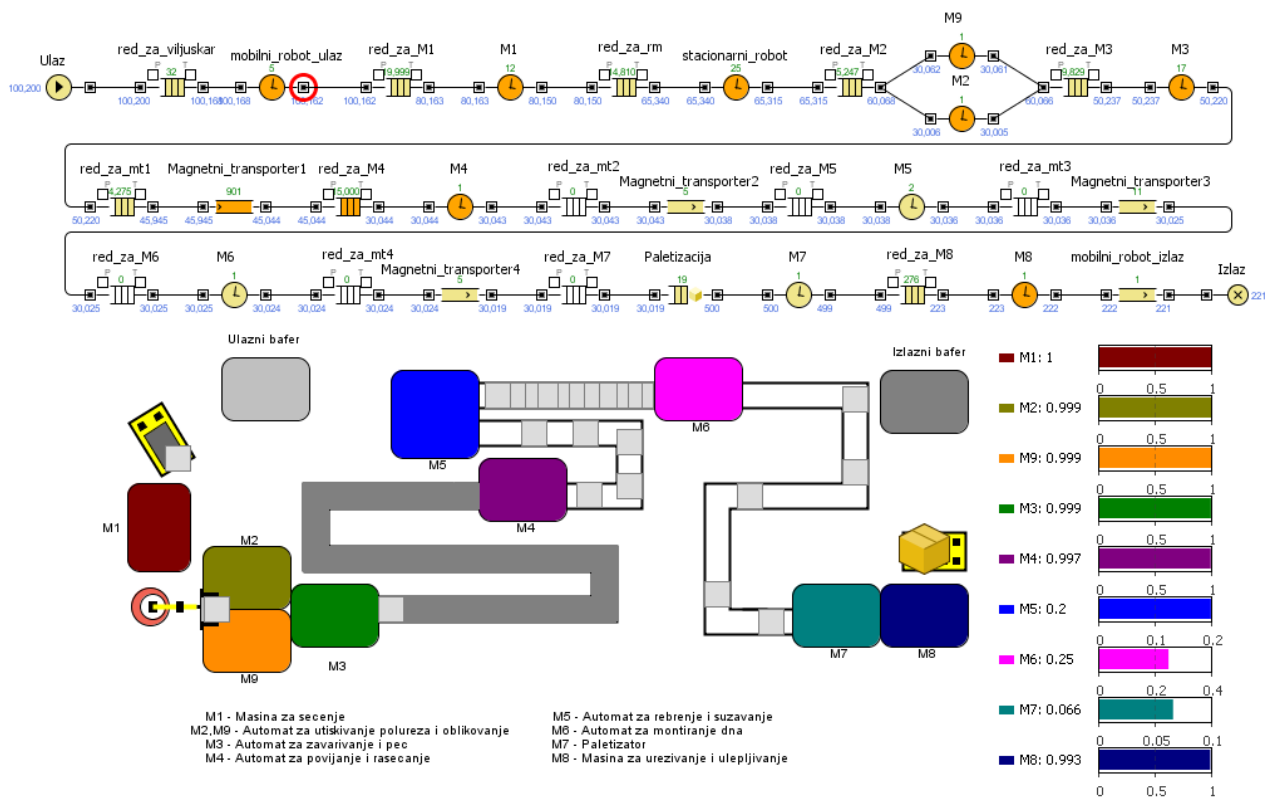
Слика 5.11. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана у току симулације заједно са анимацијом

На слици 5.11. се може видети да је број урађених лименки након 15.750 секунди 3.360, односно 56 палета. Може се приметити велики редови испред машина M1 и M4 који износе по 5.543 лименки, који имају велику тенденцију да се препуне. Код машина M2, M3 и код стационарног робота формирани су редови, док код осталих машина нема проблема у вези редова за чекање.



Слика 5.12. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана након завршетка смене

На слици 5.12 приказан је модел новог диспозиционог плана након завршетка рада смене (28.800 секунди). Добијено је 6300 лименки. Редови са тенденцијом загушења су и даље испред машина M1 и M4. Симулација је након завршетка рада једне смене настављена и она се зауставила након 60.234 секунди (слика 5.13) што значи да производни погон има могућност рада у две смене.



Слика 5.13. Симулациони модел новог решења диспозиционог плана након завршетка симулације

6. Анализа и дискусија

Узевши у обзир остварене резултате изведеног експеримента кретања мобилног робота у технолошком окружењу може се рећи да је пројектовани систем управљања успешно решио задати проблем. На основу усвојеног плана активности прво се приступило решавању дефинисаних подпроблема - развијање алгорита А звезде и имплементација модела кретања, перцепције и линеаризованог Калмановог филтера. Свако решење за подпроблеме је засебно тестирано како би се осигурала њихова функционалност и поузданост.

Применом ВНМ за функционалну апроксимацију при решавању проблема генерисања команди за окретање вратила као и класификацију ради детектовања референтних тачака искоришћене су њихове најбоље особине и вишеструко је скраћено време развоја у односу на евентуално развијене системе који их не би користили.

Имплементацијом алгорита А звезде решен је проблем налажења оптималне путање за задате параметре. Иако нису постојали велики проблеми приликом развоја програмског кода за А звезду, накнадном анализом како остварених резултата тако и перформанси током рада у реалним условима уочена је могућност примене и ВНМ у овој проблематици. Предложени приступ би се огледао у развоју ВНМ које би на основу дефинисаних препрека у технолошком окружењу и базирањем на одометријски модел кретања биле у стању да препознају одговарајуће тачке у технолошком окружењу и да између њих генеришу (део по део) оптималну путању и то у реалном времену.

Усвојени модели кретања и перцепције су адекватно имплементирани и током рада су дали очекиване резултате. Њихово унапређење би се превасходно огледало у оптимизацији програмског кода.

Коришћењем линеаризованог Калмановог филтера решен је проблем локализације мобилног робота у оквиру технолошког окружења. Његова имплементација је била донекле тешка и највероватније резултат недовољне теоријске поткованости чланова тима са референтним областима. Било би паметно размотрити могућност развоја ВНМ која би делимично, или у потпуности, вршила функцију имплементираниог Калмановог филтера. Разлог за коришћење ВНМ се огледа у томе што се оне већ користе у изради пројекта и користе релативно једноставнији математички алат него Калманов филтер. Ова тврдња се додатно појачава резултатима локализације мобилног робота током кретања који, иако су били у границама дозвољених толеранција, су оставили доста места за унапређење остварене тачности позиционирања и оријентације мобилног робота.

Коришћењем програмског пакета Anylogic извршене су симулације рада технолошког окружења предузећа „ФМП“ са циљем да се сакупе подаци на основу којих ће се вршити унапређење датог окружења. Формирано је ново технолошко окружење помоћу предложених унапређења постојећег. Симулацијом рада новог технолошког окружења и поређењем добијених резултата констатован је пораст продуктивности (побољшање перформанси).

Узимањем у обзир свега наведеног, долази се до закључка да је главни циљ овог пројекта остварен: студенти су применили стечено знање на овом предмету и уз практични самостални рад успешно имплементирали концептуално решење и доказали његову применљивост помоћу изведених експеримената и симулација.

7. Закључак

У оквиру предмета Интелигентни технолошки системи на МАС Машинског факултета Универзитета у Београду студенти су имали прилику да се упознају са концептима интелигентних технолошких система и процеса као и алатима помоћу којих се они пројектују. Студенти су кроз оба групна студентска пројекта примењивали научено градиво са предавања и успели да остваре задате циљеве:

1. Конфингурисан је интелигентни мобилни робот и помоћу експеримента показали и доказали да се он може успешно примењивати као средство унутрашњег транспорта у оквиру датог технолошког окружења и
2. Уз помоћ симулационих алата извршили анализу датог технолошког окружења и предложили кораке за његово даље унапређење. Ови кораци су имплементирани у ново технолошко окружење које је, такође симулацијом, показало извесна побољшања у односу на полазно окружење.

Применом ВМ, алгоритама претраге и ЛКФ-а студенти су коректно имплементирали усвојене моделе кретања и перцепције и све их повезали у једну функционалну целину са којом је решен дати проблем унутрашњег транспорта помоћу интелигентног мобилног робота. Коришћењем метода и техника пројектовања производних погона, поменутих на предавањима, и креирањем симулационих модела на основу датих полазних података извршена је оптимизација датог технолошког layout-а.

Резултати изведених експеримената и симулација су потврдили валидност усвојеног концепта за решавање датих проблема. Успешном навигацијом, у реалним условима, интелигентног мобилног робота кроз макету технолошког окружења доказане су: погодност конфигурације мобилног робота, пројектованог управљачког и сензорског система.

Приказани резултати у овом пројекту осликавају уложени труд и количину усвојеног градива и они не би били могући без тимског рада и тимског духа.

8. Литература

- [1] Миљковић, З., *Предавања на предмету Интелигентни технолошки системи*, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
- [2] <http://shop.lego.com>, датум последњег приступа 04.02.2011.,
- [3] документ ITS_Uputstvo-Izrada_projekta.doc,
- [4] документ ITS_10_11_Course Outline.pdf,
- [5] Bräunl, T., *Embedded Robotics - Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems*, School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, The University of Western Australia, Springer - Verlag Berlin, 2006,
- [6] Миљковић, З., *Системи вештачких неуронских мрежа у производним технологијама*, Серија монографских дела Интелигентни технолошки системи (Уредник серије: Проф. др Владимир Милачић), Књига 8, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2003.
- [7] www.fmp.rs, датум последњег приступа: 13.02.2011.
- [8] Бабић, Б., *Предавања на предмету Компјутерска симулација и вештачка интелигенција*, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2007.
- [9] www.xjtek.com, датум последњег приступа: 13.02.2011.
- [10] Милутиновић, Д., *Предавања на предмету Индустијски роботи*, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.
- [11] Петровић, П., *Предавања на предмету Мехатронски системи*, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.