

Универзитет у Београду
Машински факултет

Милица М. Петровић

Прилог развоју интелигентног
технолошког система у домену
унутрашњег транспорта базиран на
машинском учењу

ДИПЛОМСКИ (M.Sc.) РАД

Београд, 2010.

Универзитет у Београду – Машински факултет
Дипломске академске студије – 2. година
Шк.год. **2009/2010**
Модул: **Производно машинство**
Предмет: **Интелигентни технолошки системи**
Кандидат: **1076/08 Милица М. Петровић**
Ментор: **Проф. др Зоран Миљковић**

Дипломски (M.Sc.) рад

Прилог развоју интелигентног технолошког система у домену унутрашњег транспорта базиран на машинском учењу

За потребе експлоатације интелигентног мобилног робота у датом лабораторијском моделу технолошког окружења потребно је развити одговарајући подсистем за машинско учење транспортних путева материјала, обрадака и готових делова сходно пројектованим технолошким процесима. Развијени подсистем треба да изврши предикцију стања технолошких процеса у домену токова материјала, а на основу аквизиције сензорских информација и учења, интелигентни мобилни робот треба да планира и оствари оптималну путању кретања, као и да перманентно коригује претходно научене акције у циљу ефикасније експлоатације у дефинисаном радном простору технолошког окружења.

Рад обухвата решавање следећих пројектних задатака:

1. Развој и имплементацију модула за одређивање положаја мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења;
2. Развој и примену модула за планирање путање кретања мобилног робота на основу усвојеног критеријума очекиваних перформанси предметног интелигентног технолошког система (ИТС);
3. Препознавање карактеристичних објеката током манипулације деловима и њиховог транспорта до одговарајућег складишта у експерименталном окружењу, базирано на сензорским информацијама добијеним од камере;
4. Применом концепта машинске интелигенције, заснованог на систему вештачких неуронских мрежа, развити подсистем за учење и предикцију транспортних путева сходно пројектованим технолошким процесима;
5. У циљу утврђивања оправданости примењеног концепта машинске интелигенције, извршити тестирање и верификацију тачности и перформанси развијених решења интелигентног понашања мобилног робота у дефинисаном радном простору у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења.

Решењем пројектних задатака обухватити:

1. Основни циљ пројекта;
2. Теоријску поставку проблема и анализу;
3. Дефинисање функционалних захтева у домену решавања проблема унутрашњег транспорта базираног на машинском учењу интелигентних мобилних робота;
4. Детаљан опис развијених решења;
5. Тестирање и верификовање перформанси експерименталних и симулационих решења;
6. Дискусију остварених резултата и закључак.

Напомене:

1. Емпиријске податке прикупити уз асистенцију предметних наставника и сарадника;
2. Сва софтверска решења имплементирати у *Matlab*[®] окружењу;
3. Применом концепта машинског учења изабрати одговарајуће архитектуре вештачких неуронских мрежа са простирањем сигнала унапред;
4. Обучавање вештачких неуронских мрежа извршити у оквиру софтверског пакета *Matlab - Neural Network Toolbox*;
5. Анализирати моделе и генерисана решења;
6. Имплементирати два најбоља решења на моделу мобилног робота, тестирати изабрана решења и дискутовати „излазе“;
7. Изабрати оптимално решење проблема унутрашњег транспорта у оквиру разматраног ИТС;
8. Сва питања, сугестије и евентуалне проблеме предочити у директном контакту са предметним наставницима проф. др Зораном Миљковићем и проф. др Бојаном Бабићем и путем електронске поште на zmiljkovic@mas.bg.ac.rs и bbabic@mas.bg.ac.rs, као и у разговору са сарадницима у настави др Божицом Бојовић и Најданом Вуковићем и на е-пошту: bbojovic@mas.bg.ac.rs и nvukovic@mas.bg.ac.rs.

Датум издавања задатка: **15.03. 2010.**

Рок завршетка задатка: **15.06.2010.**

Предметни наставници:



Проф. др Зоран Миљковић и

Проф. др Бојан Бабић

*„Пут од хиљаду миља почиње једним
обичним кораком” – Конфуције*

Милица Петровић¹

Резиме

У дипломском раду је представљен метод за роботизовани унутрашњи транспорт материјала у постојећем производном окружењу. Метод комбинује примену алгоритама за генерисање путања кретања интелигентног мобилног робота базираних на теорији графова и вештачких неуронских мрежа за предикцију стања технолошког процеса и машинско учење транспортних путева материјала сходно пројектованим технолошким процесима. Симулација технолошког процеса у циљу добијања неопходних временских параметара, обучавање вештачких неуронских мрежа, као и реализација управљачког кода извршена је у софтверском пакету Matlab. Експериментални резултати на систему мобилног робота Khepera II потврђују ефикасност и практичну употребљивост развијеног метода.

Кључне речи: *интелигентни технолошки системи, интелигентни мобилни робот, вештачке неуронске мреже, A* алгоритам.*

¹ **Милица Петровић 1076/08**, Универзитет у Београду – Машински факултет, студент друге године
Дипломских академских студија.
Е-пошта: milicapetrovic351@yahoo.com

Садржај

Садржај	6
Номенклатура.....	8
Списак слика	10
Списак табела	11
1. Увод.....	12
2. Аксиоматска теорија пројектовања у домену унутрашњег транспорта материјала	14
3. Развој и имплементација модула за одређивање положаја мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења.....	16
3.1 Развој модела кретања мобилног робота	16
3.2 Имплементација модела кретања мобилног робота	17
4. Развој и примена модула за планирање путање кретања мобилног робота на основу усвојеног критеријума очекиваних перформанси предметног интелигентног технолошког система.....	19
4.1 Осврт на теорију пројектовања технолошких система	19
4.2 Осврт на основне појмове теорије графова	22
4.3 Анализа транспортних токова материјала у производно-монтажном погону	24
4.4 Алгоритми за планирање путање мобилног робота	29
4.4.1 Алгоритам за одређивање оптималне путање кретања мобилног робота - А* алгоритам претраживања.....	29
4.4.2 Алгоритам за одређивање редоследа чворова по приоритету које робот посећује при транспорту делова#1-4 на машине за прву операцију - АЛГОРИТАМ#1.....	34
4.4.2 Примена алгоритма за одређивање редоследа чворова по приоритету при планирању путање кретања мобилног робота сходно технолошком поступку – АЛГОРИТАМ#2	36
5. Развој подсистема за учење и предикцију транспортних путева сходно пројектованим технолошким процесима, применом концепта машинске интелигенције заснованог на систему вештачких неуронских мрежа.....	39
5.1 Статистичке методе за моделирање стохастичких процеса	40
5.2 Концепт вештачких неуронских мрежа у производним технологијама	42
5.3 Примена вештачких неуронских мрежа за учење и предикцију транспортних путева.....	43

6. Тестирање и верификација тачности и перформанси развијених експерименталних и симулационих решења интелигентног понашања мобилног робота у дефинисаном радном простору у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења	48
6.1 Експеримент 1: Праћење генерисане путање кретања	49
6.2 Експеримент 2: Праћење путање генерисане као резултат машинског учења мобилног робота применом ВНМ	52
7. Закључак и правци будућих истраживања	55
8. Литература.....	57
9. Прилог.....	59
9.1 Прилог А: Код у <i>Matlab</i> софтверском пакету за управљање кретањем мобилног робота при реализацији експеримента 1.....	59
9.2 Прилог Б: Код у <i>Matlab</i> софтверском пакету за управљање кретањем мобилног робота при реализацији експеримента 2	61
9.3 Прилог В: Код у <i>Matlab</i> софтверском пакету за обучавање вештачких неуронских мрежа.....	63

Номенклатура

ФЗ – функционални захтеви

ПП – параметри пројектовања

x_t – вектор стања система

$u(t)$ – вектор управљања

x' – компонента x вектора стања система у тренутку t'

y' – компонента y вектора стања система у тренутку t'

θ' – компонента θ вектора стања система у тренутку t'

x – компонента x вектора стања система у тренутку t

y – компонента y вектора стања система у тренутку t

θ – компонента θ вектора стања система у тренутку t

Δs – прираштај лучне координате

$\Delta \theta$ – прираштај угла ротације

$\Delta s_d, \Delta s_l$ – пређени пут десног и левог точка

x_z – жељена (захтевана) координата x

y_z – жељена (захтевана) координата y

θ_z – жељена (захтевана) координата θ

x – стварна (остварена) координата x

y – стварна (остварена) координата y

θ – стварна (остварена) координата θ

V_d, V_l – брзине десног и левог точка мобилног робота

$encl, encl$ – читавања десног и левог енкодера

M – вектор машина

D – вектор делова

M_{DM} – квантитативна матрица међузависности делови-машине

T_{DM} – матрица времена обраде делова на машинама

G – граф, уређени пар (V, E)

V – чворови графа G

E – гране графа G

$V(G)$ – скуп чворова графа G

$E(G)$ – скуп грана графа G

r_{ij} – растојање између чворова V_i и V_j

A – матрица суседства графа

a_{ij} – број грана које полазе из чвора V_i , а завршавају се у чвору V_j

R – матрица растојања графа

M_{DMS} – матрица међузависности делови-машине-складишта

A^* – алгоритам претраживања

n – број чвора A^* алгоритма

h – процена најкраћег пута дефинисаног Еуклидском нормом од задатог циљног до посматраног чвора дискретизованог окружења

g – цена помераја, представља пређени пут између два суседна чвора

R_z – вектор растојања између стартног чвора и машина које делови посећују у првој операцији

$f(x)$ – функција густине вероватноће

m – средња вредност случајне променљиве x

σ^2 – варијанса случајне променљиве x

σ – стандардна девијација случајне променљиве x

T_s – матрица времена обраде на машинама генерисана униформном расподелом

R_{TS} – матрица времена кретања робота генерисана униформном расподелом

η – параметар учења вештачке неуронске мреже

Списак слика

Слика 2.1: Хијерархијска структура функционалних захтева.....	14
Слика 2.2: Хијерархијска структура параметара пројектовања	15
Слика 3.1: Два узастопна положаја мобилног робота у тренуцима t и t'	16
Слика 3.2: Блок дијаграм структуре модула за управљање положајем мобилног робота.....	17
Слика 4.1: Оријентисан (усмерен) граф на примеру кретања дела#1.....	22
Слика 4.2: Неоријентисан (неусмерен) граф на примеру кретања дела#3.....	22
Слика 4.3: Пример графа типа стабла (дрвета).....	23
Слика 4.4: Графички приказ лабораторијског модела технолошког окружења.....	25
Слика 4.5: Шема кретања дела#1	25
Слика 4.6: Шема кретања дела#2	25
Слика 4.7: Шема кретања дела#3	26
Слика 4.8: Шема кретања дела#4.....	26
Слика 4.9: Пиксели у облику тачке на примеру осмоспојивог окружења	30
Слика 4.10: Пиксели у облику квадрата на примеру осмоспојивог окружења.....	30
Слика 4.11: Дискретизовано окружење са координатама стартног, циљног и пиксела за препреке.....	31
Слика 4.12: Мапа пиксела дискретизованог окружења	32
Слика 4.13: Графички приказ алгорита претраживања.....	35
Слика 5.1: Густина вероварноће униформне расподеле.....	40
Слика 5.2: Униформна расподела временских параметара обрадног процеса.....	41
Слика 5.3: Хистограм расподеле времена трајања технолошких операција	42
Слика 5.4: Архитектура вештачке неуронске мреже	47
Слика 6.1: Основни прозор графичког корисничког интерфејса.....	48
Слика 6.2: Прозор за управљање кретањем мобилног робота <i>Khepera II</i>	49
Слика 6.3: Упоредни приказ жељене и остварене путање кретања мобилног робота.....	50
Слика 6.4: Графички приказ кретања мобилног робота у софтверском окружењу <i>Matlab</i> ..	50
Слика 6.5: Кретање мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења - експеримент 1	51
Слика 6.6: Графички приказ кретања мобилног робота у софтверском окружењу <i>Matlab</i> ..	52
Слика 6.7: Пример генерисања шестог чвора у експерименту 2	53
Слика 6.8: Пример генерисања седмог чвора у експерименту 2.....	53
Слика 6.9: Кретање мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења - експеримент 2.....	54

Списак табела

Табела 4.1: Списак машина у погону.....	20
Табела 4.2: Списак репрезентативних делова.....	20
Табела 4.3: Репрезентативни делови и машине на којима се делови обрађују.....	21
Табела 4.4: Репрезентативни делови и машине на којима се делови обрађују са трајањем технолошких операција у секундама	21
Табела 4.5: Редни број, ознака и опис чворова	25
Табела 4.6: Матрица репрезентативних делова са чворовима које они посећују	26
Табела 4.7: Матрица растојања између чворова	27
Табела 4.8: Пример рачунања вредности параметра $f(n)$ за чворове (4,4), (3,3), (2,2), (2,1)	32
Табела 4.9: Алгоритам A^*	32
Табела 4.10: Алгоритам#1 за одређивање редоследа чворова према минималном растојању као приоритету претраживања.....	34
Табела 4.11: Минималне вредности растојања по нивоима графа	35
Табела 4.12: Алгоритам#2 за одређивање редоследа чворова при планирању путање кретања мобилног робота	37
Табела 5.1: План експеримента за генерисање обучавајућих парова ВНМ	44
Табела 5.2: План експеримента за обучавање ВНМ за генерисање чворова путање $putanja_1$ на основу временских параметара	46
Табела 5.3: Резултати обучавања ВНМ за генерисање чворова путање на основу временских параметара.....	46
Табела 6.1: Координате чворова у лабораторијском моделу технолошког окружења.....	49

1. Увод

Интензиван развој крајем осамдесетих и током деведесетих година 20. века, који је дефинитивно успоставио и нову област истраживања у производном инжењерству-*Интелигентне технолошке системе*, указује на позитиван тренд у правцу остваривања нових производних технологија у 21. веку [12]. У времену када је аутоматизација производње достигла свој максимум, већа флексибилност технолошких система и задовољавање потреба глобалног тржишта остварује се новим, мултидисциплинарним приступом. Овакав приступ подразумева и примену вештачке интелигенције, као основе за развој система на бази машинског учења. Истраживање и развој нових генерација интелигентних технолошких система у домену унутрашњег транспорта материјала оријентисано је ка увођењу интелигентних мобилних робота који разумеју технолошки задатак и околину. На тај начин се искључује могућност људске грешке и повећава продуктивност целог система.

Садржај овог дипломског рада организован је у седам тематских поглавља.

Прво, уводно, поглавље даје кратак преглед истраживања у свакој од тематских целина.

У другом поглављу се дефинишу функционални захтеви и параметри пројектовања у домену интелигентног унутрашњег транспорта материјала. Декомпозиција функционалних захтева и параметара пројектовања извршена је на три хијерархијска нивоа.

Треће поглавље обухвата развој и имплементацију модула за одређивање положаја мобилног робота у расположивом лабораторијском моделу технолошког окружења. Након избора модела кретања (модел кретања на основу пређеног пута тачкова) и развоја једначина, у другом делу овог поглавља конципиран је блок дијаграм управљања са улазним и излазним величинама система.

У четвртом поглављу су приказани усвојени и развијени алгоритми за генерисање путање кретања мобилног робота. Алгоритам A^* је усвојени алгоритам на основу кога се генерише оптимална путања кретања између чворова. Други алгоритам генерише чворве путање према најкраћем растојању као критеријуму, док се трећим алгоритмом симулира технолошки процес за репрезентативне делове и генеришу временски параметари неопходни за предикцију токова материјала.

Пето поглавље је засновано на развоју система вештачких неуронских мрежа за машинско учење транспортних токова материјала у изабраном производном окружењу. Приказан је план за прикупљање обучавајућих парова ВМ, параметри који се варирају при обучавању ВМ и критеријуми за одабир најбоље ВМ са простирањем сигнала унапред.

У шестом поглављу су приказани експериментални резултати на систему мобилног робота *Кхерера II* спроведени у лабораторијском моделу технолошког окружења, у реалном времену. За потребе првог експеримента развијен је и графички кориснички интерфејс и експериментално је верификована тачност позиционирања мобилног робота. Другим експериментом се поред тачности позиционирања врши и верификација концепта предикције временских параметара технолошког процеса.

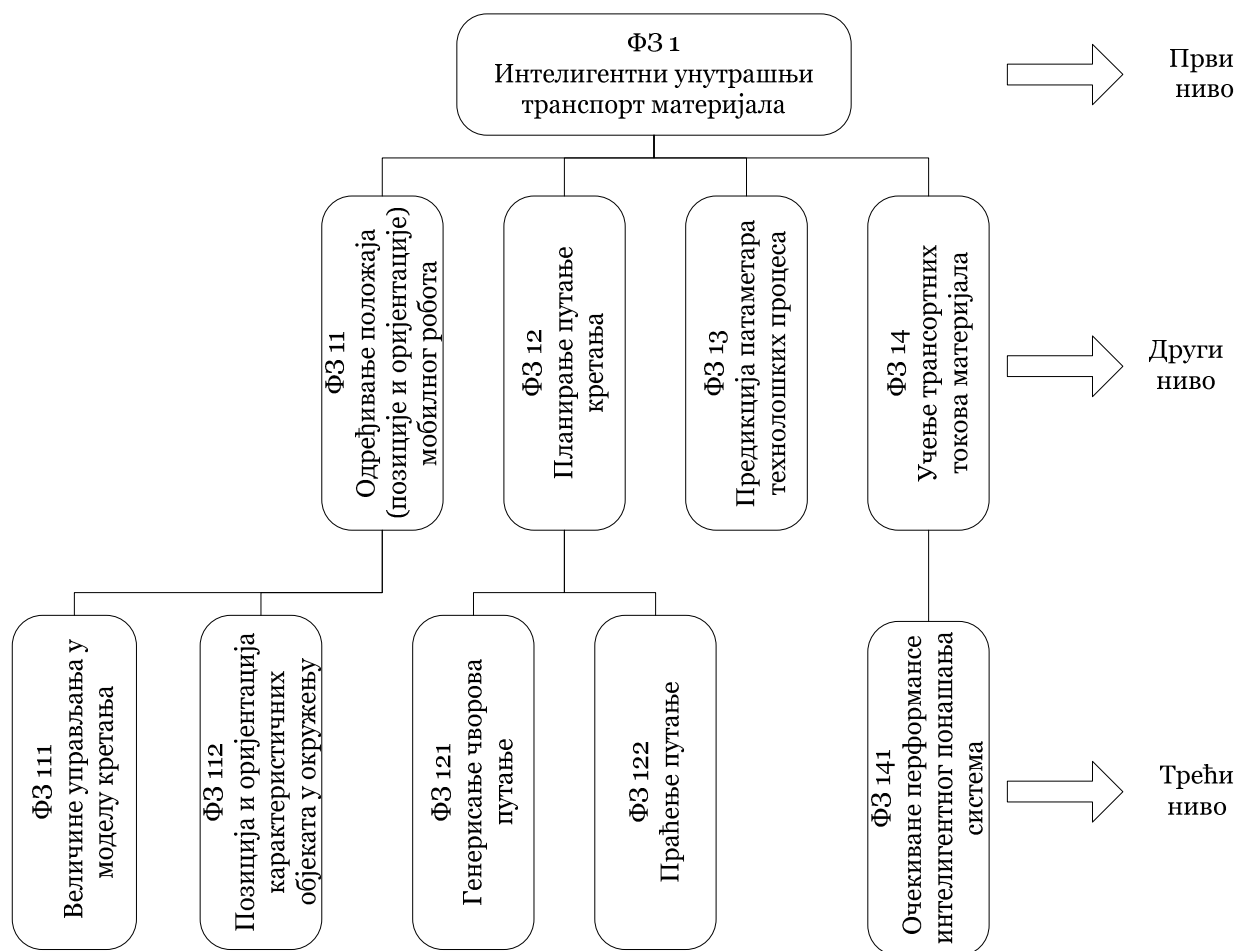
У седмом поглављу је дат закључак са основним резултатима спроведених истраживања и назначеним правцима будућих истраживања.

Након седмог поглавља, дат је садржај коришћене литературе током израде дипломског рада и прилог са кодовима имплементираним у *Matlab* софтверском пакету.

2. Аксиоматска теорија пројектовања у домену унутрашњег транспорта материјала

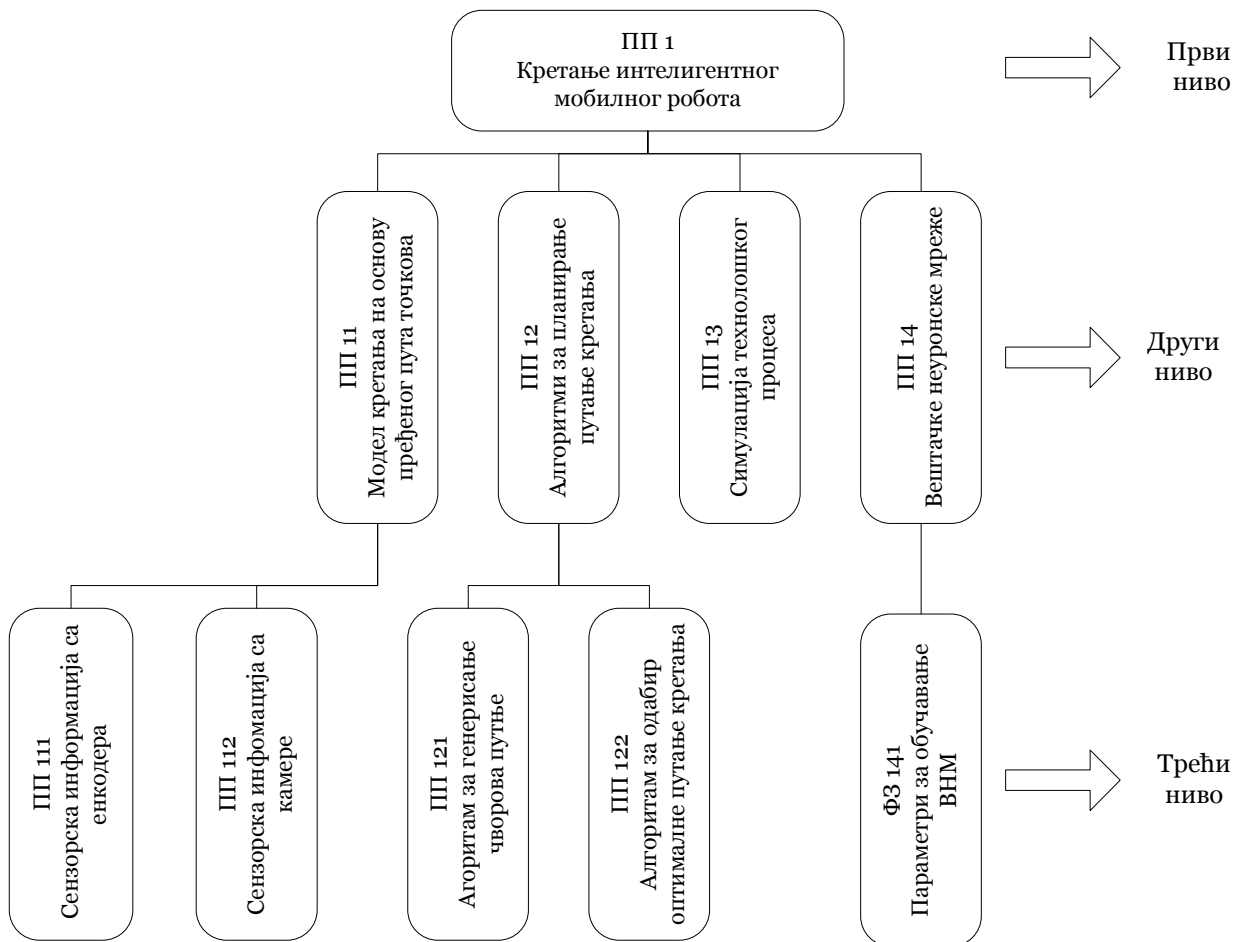
Аксиоматска теорија пројектовања представља покушај синтезе основних принципа пројектовања у различитим инжењерским областима [2]. Пројектовање подразумева непрекидно преплитање између онога *шта желимо да постигнемо* и онога *како то желимо да постигнемо* па се из тог разлога дефинишу два основна домена у процесу пројектовања: функционални и физички домен. Пројектовање, као такво, повезује ова два домена на сваком од хијерархиских нивоа процеса пројектовања. Формално, пројектовање се може дефинисати као стварање синтетизованих решења у облику производа, процеса или система који се добијају кроз пресликавање између функционалних захтева (ФЗ) у функционалном домену и параметара пројектовања (ПП) у физичком домену.

Процес пројектовања система за интелигентни унутрашњи транспорт материјала почиње успостављањем ФЗ у функционалном домену, слика 2.1, у циљу стварања физичког објекта или процеса који их задовољава.



Слика 2.1: Хијерархијска структура функционалних захтева

Након идентификације функционалних захтева, следи дефинсање параметара пројектовања помоћу којих се остварују одговарајући функционални захтеви. Декомпонована структура параметара пројектовања на три хијерархијска нивоа дата је на слици 2.2.

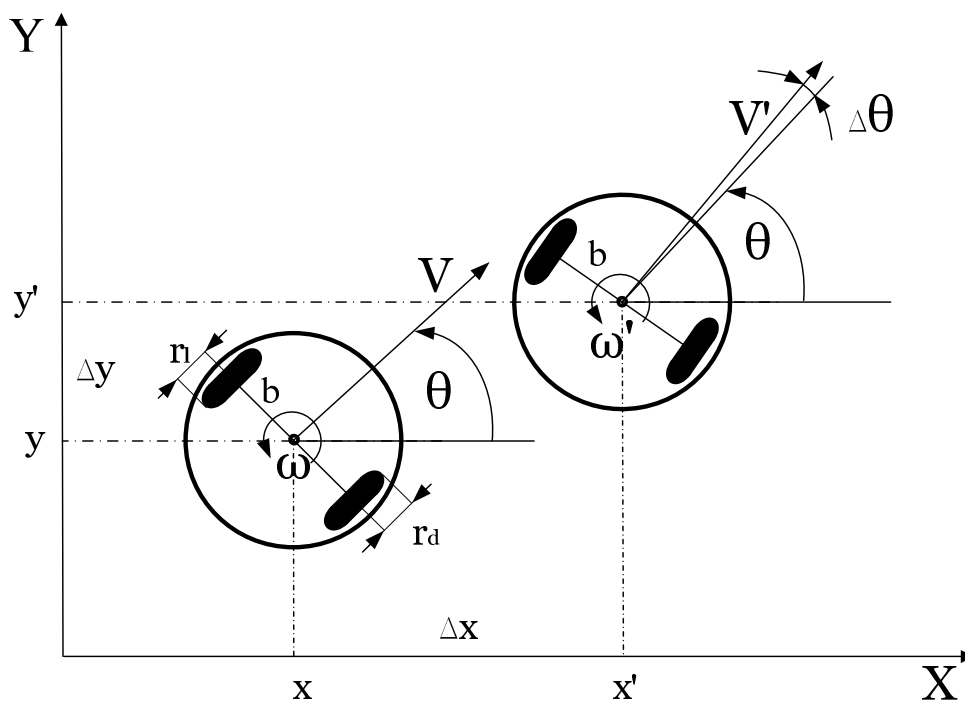


Слика 2.2: Хијерархијска структура параметара пројектовања

3. Развој и имплементација модула за одређивање положаја мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења

3.1 Развој модела кретања мобилног робота

Положај мобилног робота, при раванском кретању кроз задато технолошко окружење, одређен је вектором стања система $x_t=(x, y, \theta)$, где x и y представљају компоненте вектора које дефинишу позицију, док θ представља угао оријентације мобилног робота, мерен у односу на X -осу [15]. Позиција и оријентација мобилног робота у Декартовом координатном систему, са прираштајима компонената вектора стања, за два узастопна положаја робота у тренуцима t и t' , где је $t'>t$, приказани су на слици 3.1, при чему је мобилни робот представљен кругом. Растојање између тачкова означено је са b , док су полупречници десног и левог тачка означени са r_d и r_l , респективно.



Слика 3.1: Два узастопна положаја мобилног робота у тренуцима t и t'

Неки од модела кретања, који се могу користити за одређивање положаја мобилног робота, су:

- модел кретања на основу брзине;
- модел кретања на основу пређеног пута.

Брзински модел кретања (velocity based motion model) базира се на промени брзине центра маса и угаоне брзине, као величина за одређивање компоненти вектора стања. У овом моделу транслаторна и угаона брзина мобилног робота дефинишу вектор управљања $u(t)$, на основу кога се одређују промена позиције и оријентације током експлоатације.

За потребе овог дипломског рада, због диференцијалног погона точкова (два мотора независно покрећу сваки точак) [3], одабран је модел кретања на основу пређеног пута точкова (odometry). Овим моделом, управљање $u(t)$ је одређено пређеним путем точкова мобилног робота током дефинисаног временског интервала. Математичка формулација модела кретања мобилног робота на основу пређеног пута точкова дата је једначином (3.1):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta s \cos(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta s \sin(\theta + \Delta\theta/2) \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

где x' , y' и θ' представљају компоненте вектора стања у тренутку t' ; x , y и θ компоненте у тренутку t ; Δs прираштај лучне координате и $\Delta\theta$ прираштај угла ротације.

Ако се узме у обзир да је прираштај лучне координате дат са (3.2):

$$\Delta s = \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \quad (3.2)$$

где Δs_d и Δs_l представљају пређени пут десног и левог точка, респективно, и прираштај угла $\Delta\theta$ дат са (3.3):

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b} \quad (3.3)$$

где је b растојање између точкова, онда се једначине кретања мобилног робота могу представити на следећи начин:

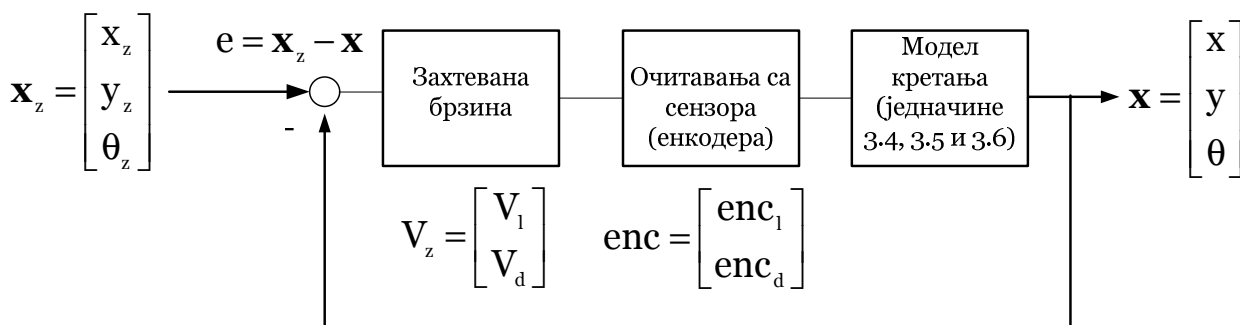
$$x' = x + \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \quad (3.4)$$

$$y' = y + \frac{\Delta s_d + \Delta s_l}{2} \sin\left(\theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b}\right) \quad (3.5)$$

$$\theta' = \theta + \frac{\Delta s_d - \Delta s_l}{2b} \quad (3.6)$$

3.2 Имплементација модела кретања мобилног робота

Структура имплементираних система за управљање кретањем мобилног робота на основу пређеног пута приказана је блок дијаграмом на слици 3.2.



Слика 3.2: Блок дијаграм структуре модула за управљање положајем мобилног робота

Величине које фигуришу на блок дијаграму су следеће:

x_z – жељена (захтевана) координата x ;
 y_z – жељена (захтевана) координата y ;
 θ_z – жељена (захтевана) координата θ ;
 x – стварна (остварена) координата x ;
 y – стварна (остварена) координата y ;
 θ – стварна (остварена) координата θ ;
 V_d, V_l – брзине десног и левог точка;
 enc_d, enc_l – читавања десног и левог енкодера;
 e – разлика жељених и остварених координата.

Компоненте вектора x_z представљају улазне величине, док компоненте вектора x представљају излазне величине затвореног система управљања и добијају се на основу одометрије (једначина модела кретања 3.4, 3.5 и 3.6). Овакав систем се одликује постојањем негативне повратне спреге на основу које је могуће утврдити вредност разлике e између жељеног и стварног положаја робота [8]. Уколико је разлика жељених и остварених координата већа од дозвољене вредности, робот наставља кретање, уз читавања вредности са енкодера и поновно рачунање остварених координата применом једначина модела кретања на основу пређеног пута, све док разлика e не буде у задатим границама.

4. Развој и примена модула за планирање путање кретања мобилног робота на основу усвојеног критеријума очекиваних перформанси предметног интелигентног технолошког система

4.1 Осврт на теорију пројектовања технолошких система

Познавање теорије пројектовања технолошких система и процеса један је од предуслова за разумевање и пројектовање интелигентних технолошких система (ИТС). Поред пројектовања нових, ова теорија је значајна и за унапређење већ постојећих технолошких система, превасходно са аспекта повећања флексибилности и продуктивности система. Један од могућих приступа унапређењу је и имплементација интелигентних агената у постојеће технолошке системе, са акцентом на њихову интеграцију у јединствени производни систем, а све у циљу повећања ефикасности, ефективности и смањења трошкова производње у предузећима, уз истовремено освајање новог тржишта и наглашени привредни раст.

Један од фактора који директно утиче на ефикасност извођења технолошких операција у погонима технолошких система је и уређење производног простора. Из литературе [12] и [13] је познато да се уређење производног простора може извршити према два критеријума:

- према првом критеријуму, размештај производне опреме врши се према врсти технолошког процеса [13], а познат је још и као функционални распоред машина алатки и производне опреме [12];
- други критеријум за размештај производне опреме је редослед технолошких операција [13], а у литератури [12] критеријум је познат као распоред машина алатки, производне опреме и радних места према производу.

У предузећу „MONTPROJEKT“², чији се layout (диспозициони план) користи као лабораторијски модел технолошког окружења, а технолошки процеси као основ за симулацију и планирање путање кретања мобилног робота, примењен је други критеријум уређења производног простора. То значи да се репроматеријал, обраци и делови кроз технолошки систем крећу секвенцијално истим путем [12].

За анализу производног тока унутар предузећа „MONTPROJEKT“, према [2], неопходни су следећи подаци о машинама (напомена: у даљем тексту се увек мисли на машине алатке) и деловима:

- број и опис машина које се користе унутар технолошког система;
- број различитих (репрезентативних) делова који се обрађују;
- величина серије за сваки део;
- технолошка путања за сваки део.

У табели 4.1 приказан је списак машина у разматраном производно-монтажном погону, а у табели 4.2 дат је списак репрезентативних делова.

² MONTPROJEKT – предузеће које се бави производњом и монтажом *Siemens AG* електро-ормана

Табела 4.1: Списак машина у погону

Машина	Опис (Тип) машине
М#1	Маказе за сечење
М#2	CNC машина за пробијање и просецање
М#3	CNC хидраулична апкант преса
М#4	Машина за исецање профила
М#5 и М#6	Стубна бушилица
М#7	Кружна тестера
М#8	Оштрилица алата
М#9	Линија за обраду делова од бакра

Табела 4.2: Списак репрезентативних делова

Део	Опис
Део#1	<i>Transport fuse</i>
Део#2	<i>Mainbusbar support</i>
Део#3	<i>Support d800</i>
Део#4	<i>Busbar 2 L1</i>

Технолошка путања за сваки део, према [2], одређена је:

- редоследом операција у виду машине потребне за извођење операције;
- временом трајања операције.

Након усвајања података о машинама и деловима, неопходно је успоставити квантитативну зависност између њих. У општем случају, ова зависност се може представити матрицом међузависности M_{DM} [11], која се на основу матрица M и D дефинише на следећи начин:

$$M = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_{NM}] \quad (4.1)$$

$$D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{ND}]' \quad (4.2)$$

$$M_{DM} = D \cdot M = \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_{ND} \end{bmatrix} [m_1 \ \dots \ m_{NM}] = \begin{bmatrix} t_{11} & \dots & t_{1j} & \dots & t_{1NM} \\ \vdots & \ddots & \dots & \dots & \vdots \\ t_{i1} & \dots & t_{ij} & \dots & t_{iNM} \\ \vdots & \dots & \dots & \ddots & \vdots \\ t_{ND1} & \dots & t_{NDj} & \dots & t_{NDNM} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

где је:

M - вектор машина;

D - вектор делова;

M_{DM} - квантитативна матрица међузависности;

ND - број различитих делова које треба обрадити;

NM - број различитих машина у погону;

t_{ij} - елемент матрице M_{DM} који има вредност 1 уколико део посећује машину и вредност 0 уколико део не посећује машину.

Репрезентативни делови и машине на којима се делови обрађују унутар дефинисаног технолошког система приказани су у табели 4.3.

Табела 4.3: Репрезентативни делови и машине на којима се делови обрађују

Делови	Машине					
	М#2	М#3	М#4	М#5/ М#6	М#7	М#9
Део#1	1	1	1	0	0	0
Део#2	0	0	0	1	1	0
Део#3	0	1	1	0	0	0
Део#4	0	0	0	0	0	1

У конкретном случају, на основу приказаних података о томе који репрезентативни део посећује коју машину, вектори машина и делова имају следећи запис:

$$M = [m_2 \ m_3 \ m_4 \ m_5 \ m_7 \ m_9] \quad (4.4)$$

$$D = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4]' \quad (4.5)$$

где је:

M - вектор машина које репрезентативни делови посећују;

D - вектор репрезентативних делова.

Матрица међузависности делови-машине M_{DM} [11], за вектор репрезентативних делова и вектор машина, које ти делови посећују, сада има следећи запис:

$$M_{DM} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

при чему је број репрезентативних делова $ND=4$, а број различитих машина у погону на којима се репрезентативни делови обрађују $NM=6$.

Ако се у успостављену матрицу међузависности делови-машине M_{DM} уместо параметра t_{ij} замени време трајања операције сваког дела на одговарајућим машинама изражено у секундама, сагласно табели 4.4, добија се матрица T_{DM} , чији је запис представљен једначином (4.7):

Табела 4.4: Репрезентативни делови и машине на којима се делови обрађују са трајањем технолошких операција у секундама

Делови	Машине					
	М#2	М#3	М#4	М#5/ М#6	М#7	М#9
Део#1	8	4	2,5	-	-	-
Део#2	-	-	-	16	12	-
Део#3	-	18	96,5	-	-	-
Део#4	-	-	-	-	-	49

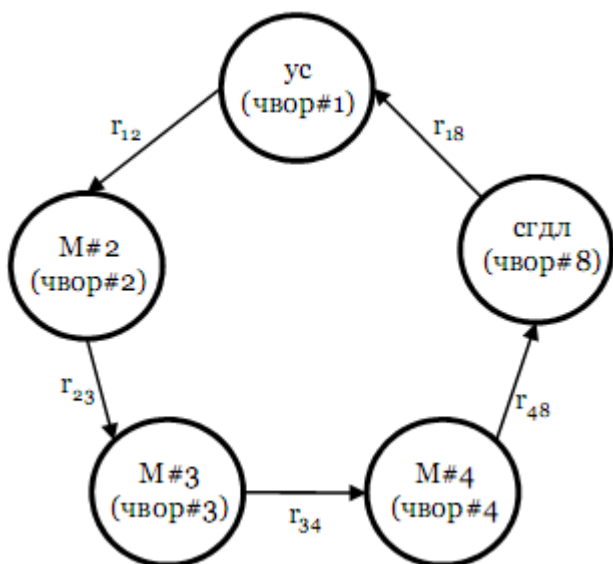
$$T_{DM} = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 2,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 12 & 0 \\ 0 & 18 & 96,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 49 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

4.2 Осврт на основне појмове теорије графова

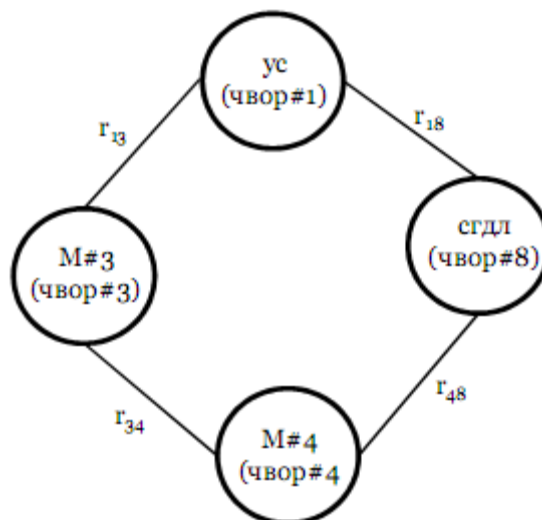
Комбинаторика са теоријом графова је област математике која је од давнина привлачила пажњу научника и нашла широке примене у проблемима различитих дисциплина. Темеље теорије графова поставио је швајцарски математичар Леонард Ојлер, 1736. године, решавањем легендарног историјског проблема „Седм мостова Кенигсберга“. Логистички проблеми, проблеми представљања саобраћајница и електричних мрежа, планирање реда летења и планирање путања кретања само су неки од проблема моделираних и решених применом теорије графова. Формално, граф се може описати дефиницијом 4.1.

Дефиниција 4.1: Граф G је уређени пар (V, E) . Елементи скупа V се зову чворови, а елементи скупа E гране графа G . За дати граф G , скуп чворова се означава са $V(G)$, а скуп грана са $E(G)$.

Уколико је грана (енг. edge) E_{ij} , која спаја чворове (енг. vertex, node) V_i и V_j графа G исто што и грана E_{ji} , која спаја чворове V_j и V_i истог графа, онда је граф G неоријентисан или неусмерен. Ако се, пак, сматра да су те две гране различите, онда је граф G оријентисан или усмерен [4]. Пример оријентисаног и неоријентисаног графа приказан је на сликама 4.1 и 4.2, респективно, где су машинама алаткама и складиштима представљени чворови, а тежински односи грана растојањима (r_{ij}) између чворова.



Слика 4.1: Оријентисан (усмерен) граф на примеру кретања дела#1



Слика 4.2: Неоријентисан (неусмерен) граф на примеру кретања дела#3

Поред поделе на оријентисане и неоријентисане, према [4], позната је и подела на следеће типове графова: пут, контура, точак и звезда. Значај за даље дефинисање, анализу и примену графова у овом раду има повезан граф типа контуре, који има све чворове степена³ 2 и при томе је почетни чвор једнак крајњем. Остали типови графова се у овом раду неће детаљније разматрати.

Појам стабла (енг. tree) представља један од најважнијих појмова у теорији графова и дат је дефиницијом 4.2.

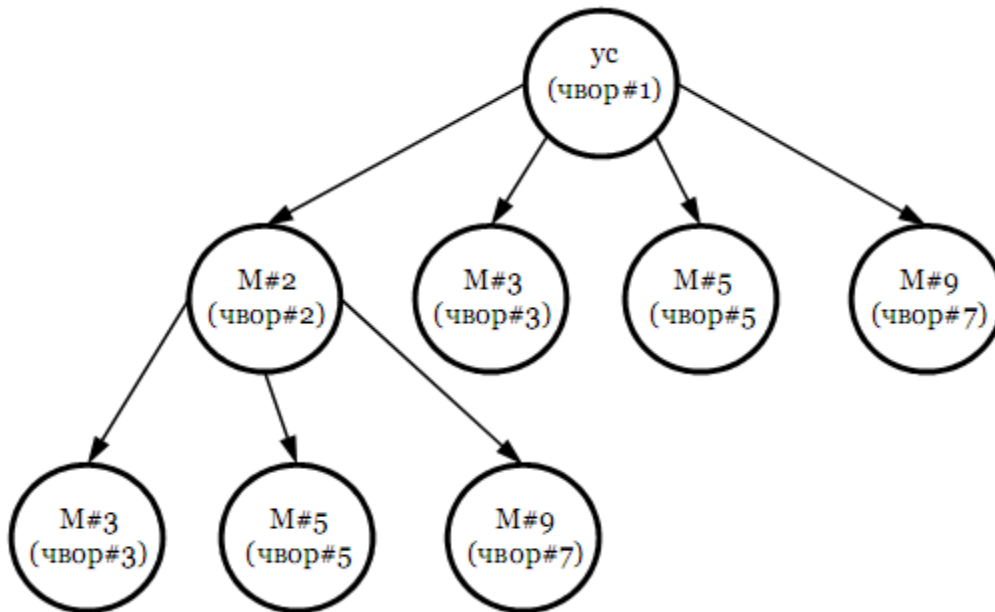
Дефиниција 4.2: Стабло је повезан граф без контура.

³ Степен чвора - број суседних чворова неком чвору зове се степен чвора

Стабло је граф у коме су свака два чвора повезана јединственим елементарним путем. Коренска стабла су посебна категорија стабала и описана су дефиницијом 4.3.

Дефиниција 4.3: Стабло у коме је један чвор посебно издвојен назива се коренско стабло, а тај чвор се назива корен стабла.

Стабло или дрво је тип директних, ацикличних графова са специјалним чвором званим корен стабла (енг. root). Корен је и једини чвор графа који не поседује долазећу грану [4]. Користећи аналогију са генеолошким појмовима, овакав тип стабла се назива и „родитељ-дете”. На слици 4.3 приказан је пример усмереног графа типа стабла, где је улазно складиште корен, а машине које робот посећује су чворови стабла.



Слика 4.3: Пример графа типа стабла (дрвета)

Графичка репрезентација графова подразумева и могућност њиховог приказивања квадратном матрицом, чији је ред једнак броју чворова графа. Елемент a_{ij} једнак је броју грана које полазе из чвора V_i , а завршавају се у чвору V_j . Ова матрица се назива матрица суседства графа. На пример, матрица суседства за граф на слици 4.1 дата је изразом 4.8.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Поред матрице суседства, графови се могу представити и матрицом растојања па се у циљу одређивања оптималне путање кретања мобилног робота, дефинише матрица растојања графа R (матрица растојања између чворова (машина и складишта) у том графу).

Дефиниција 4.4: Граф може бити представљен и квадратном матрицом $R(G)$, чији је ред једнак броју чворова графа. Елемент r_{ij} једнак је растојању између чворова V_i и V_j . Ова матрица се зове матрица растојања графа.

Матрица R је формата $(m \times m)$ и дата је квадратном схемом (4.9):

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{im} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mj} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

где је скалар r_{ij} (i,j)-ти елемент матрице R, $i, j = 1, \dots, m$.

У случају да грана повезује један исти чвор, тежински однос те гране је тада једнак нули. Ова својства призилазе из својства симетричности матрице R, која су представљена релацијама (4.10) и (4.11):

$$r_{ij} = r_{ji} \quad (4.10)$$

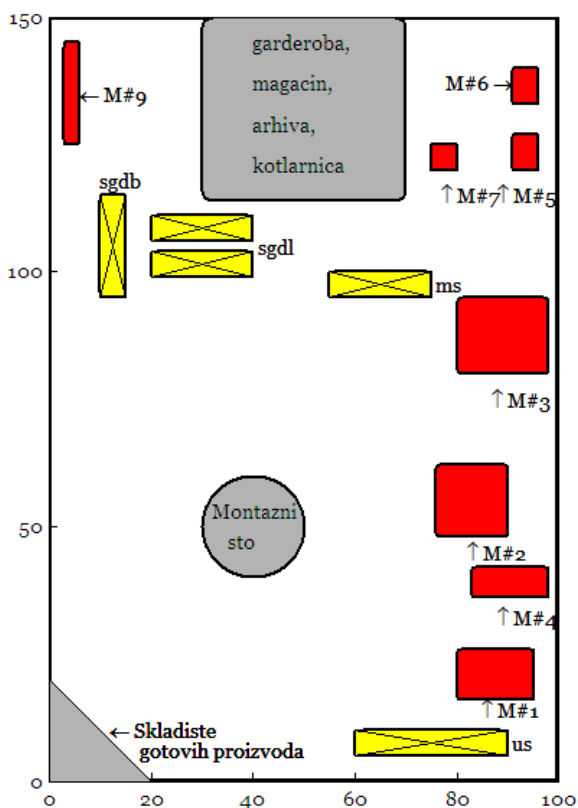
$$r_{ii} = 0; r_{jj} = 0 \quad (4.11)$$

4.3 Анализа транспортних токова материјала у производно-монтажном погону

Транспорт материјала, сировина и готових делова у производно-монтажном погону обавља се на основу пројектованих технолошких поступака за репрезентативне делове. Распоред машина алатки (M#2, M#3, M#4, M#5/M#6, M#7 и M#9), складишта (ус, сгдл, мс и сгдб - табела 4.5), монтажног стола, као и простора предвиђеног за гардеробу, магацин, архиву и котларницу у лабораторијском моделу технолошког окружења, сходно другом усвојеном критеријуму о размештају производне опреме, приказан је на слици 4.4.

Крећући се оптималном путањом од почетне до циљне тачке технолошког окружења, задатак мобилног робота је да обавља транспорт материјала. Поред транспорта обрадака са машине на машину након завршене операције, робот транспортује и репроматеријал из улазног складишта до одговарајуће машине, као и готове делове и/или обратке до одговарајућих складишта и/или монтажног стола. У табели 4.5 приказани су редни број, ознака и опис сваког чвора који робот посећује сходно технолошком поступку. Координате чворова, као и детаљан опис планирања путање кретања дати су у поглављу о експерименталним резултатима (поглавље 6).

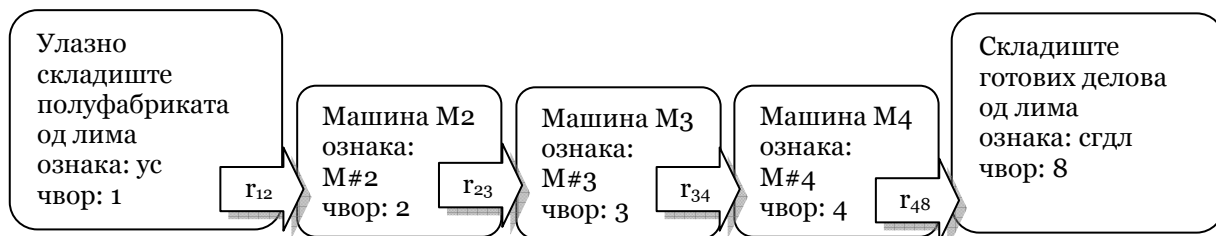
Шема кретања материјала представља графички изражен пут и смер кретања материјала кроз производни процес од сировине (полуфабриката) до готовог производа, са назначеним местима опслуживања. Шема кретања је само графички приказ „линије“ премештања материјала кроз производни процес, јер проблем кретања материјала у себи садржи и временску компоненту, што је неопходно да би се омогућила синхронизација процеса [19].



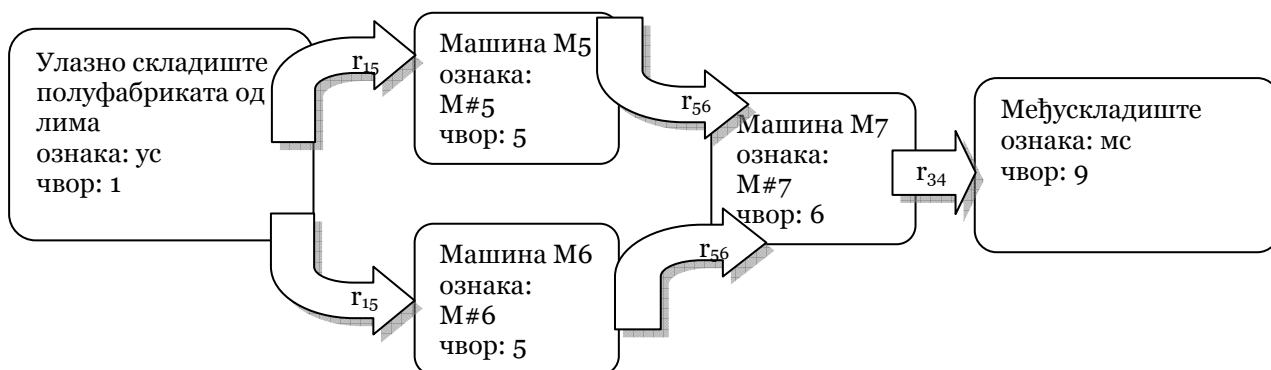
Слика 4.4: Графички приказ лабораторијског модела технолошког окружења

Рб. чвора	Ознака	Опис чвора
1	ус	Улазно складиште полуфабриката од лима
2	М#2	CNC машина за пробијање и просецање
3	М#3	CNC хидраулична апкант преса
4	М#4	Машина за исецање профила
5	М#5	Стубна бушилица
6	М#7	Кружна тестера
7	М#9	Линија за обраду делова од бакра
8	сгдл	Складиште готових делова од лима
9	мс	Међускладиште
10	сгдб	Складиште готових делова од бакра

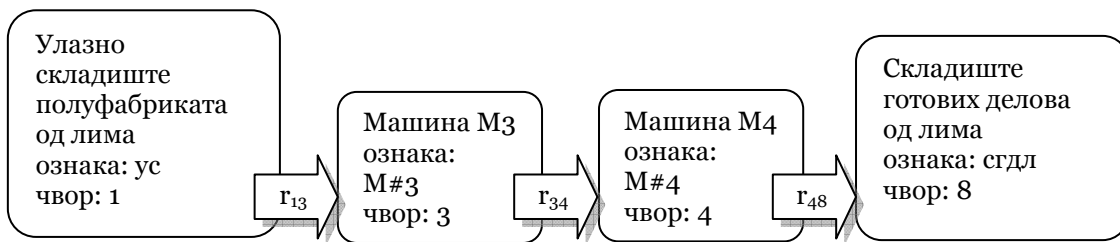
Узимајући у обзир претходно дефинисане чворове и растојања између њих, шема кретања сваког репрезентативног дела кроз производно-монтажни погон приказана је сликама 4.5 ÷ 4.8.



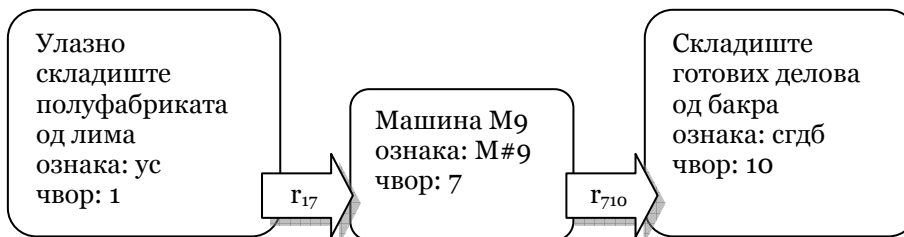
Слика 4.5: Шема кретања дела #1



Слика 4.6: Шема кретања дела #2



Слика 4.7: Шема кретања дела#3



Слика 4.8: Шема кретања дела#4

Након примене основа теорије графова за дефинисање чворова у лабораторијском моделу технолошког окружења, у циљу решавања проблема планирања путање кретања мобилног робота формира се матрица међузависности делови-машине-складишта M_{DMS} , која има запис дат табелом 4.6 и матрицом 4.12:

Табела 4.6: Матрица репрезентативних делова са чворовима које они посећују

Делови	Чворови									
	ус	М#2	М#3	М#4	М#5/ М#6	М#7	М#9	сгдб	мс	сгдл
Део#1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
Део#2	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
Део#3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1
Део#4	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

$$M_{DMS} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Узимајући у обзир једнакости дате изразима (4.10) и (4.11), матрица растојања између чворова представљена је табелом 4.7.

Табела 4.7: Матрица растојања између чворова

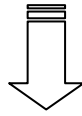
Рб. чвора	Рб. чвора									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$\Gamma_{11}=\mathbf{0}$	Γ_{12}	Γ_{13}	Γ_{14}	Γ_{15}	Γ_{16}	Γ_{17}	Γ_{18}	Γ_{19}	Γ_{110}
2	Γ_{21}	$\Gamma_{22}=\mathbf{0}$	Γ_{23}	Γ_{24}	Γ_{25}	Γ_{26}	Γ_{27}	Γ_{28}	Γ_{29}	Γ_{210}
3	Γ_{31}	Γ_{32}	$\Gamma_{33}=\mathbf{0}$	Γ_{34}	Γ_{35}	Γ_{36}	Γ_{37}	Γ_{38}	Γ_{39}	Γ_{310}
4	Γ_{41}	Γ_{42}	Γ_{43}	$\Gamma_{44}=\mathbf{0}$	Γ_{45}	Γ_{46}	Γ_{47}	Γ_{48}	Γ_{49}	Γ_{410}
5	Γ_{51}	Γ_{52}	Γ_{53}	Γ_{54}	$\Gamma_{55}=\mathbf{0}$	Γ_{56}	Γ_{57}	Γ_{58}	Γ_{59}	Γ_{510}
6	Γ_{61}	Γ_{62}	Γ_{63}	Γ_{64}	Γ_{65}	$\Gamma_{66}=\mathbf{0}$	Γ_{67}	Γ_{68}	Γ_{69}	Γ_{610}
7	Γ_{71}	Γ_{72}	Γ_{73}	Γ_{74}	Γ_{75}	Γ_{76}	$\Gamma_{77}=\mathbf{0}$	Γ_{78}	Γ_{79}	Γ_{710}
8	Γ_{81}	Γ_{82}	Γ_{83}	Γ_{84}	Γ_{85}	Γ_{86}	Γ_{87}	$\Gamma_{88}=\mathbf{0}$	Γ_{89}	Γ_{810}
9	Γ_{91}	Γ_{92}	Γ_{93}	Γ_{94}	Γ_{95}	Γ_{96}	Γ_{97}	Γ_{98}	$\Gamma_{99}=\mathbf{0}$	Γ_{910}
10	Γ_{101}	Γ_{102}	Γ_{103}	Γ_{104}	Γ_{105}	Γ_{106}	Γ_{107}	Γ_{108}	Γ_{109}	$\Gamma_{1010}=\mathbf{0}$

У конкретном примеру, на основу података о чворовима из табеле 4.7 види се да је матрица R реда (10×10) , и има следећи запис (4.13):

$$R = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \cdots & \Gamma_{1j} & \cdots & \Gamma_{110} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \Gamma_{i1} & \cdots & \Gamma_{ij} & \cdots & \Gamma_{i10} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \Gamma_{101} & \cdots & \Gamma_{10j} & \cdots & \Gamma_{1010} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Анализа редова и колона матрице R (матрица 4.13) за чвор#1 (ус), чвор#2 (М#2), чвор#3 (М#3) и чвор#8 (сгдл) обавља се у циљу генерисања матрице суседства A . Уколико, на пример, део#1, сагласно технолошком поступку, посећује чворове#1, #2, #3, #4 и #8 (ус, М#2, М#3, М#4 и сгдл), тежинска вредност члана Γ_{ij} за матрицу суседства графа је тада 1. У супротном, тежинска вредност члана Γ_{ij} , при формирању матрице A , је 0. Матрица суседства графа A (4.15) је субматрица (подматрица) дефинисане матрице растојања R (матрица 4.14) и генерише се издвајањем врста и колона које одговарају задатим чворовима, као што је и приказано.

$$R = \begin{array}{c|cccccccccc}
 & \text{yc} & \text{M\#2} & \text{M\#3} & \text{M\#4} & \text{M\#5} & \text{M\#7} & \text{M\#9} & \text{сгдл} & \text{мс} & \text{сгдб} \\
\hline
\text{yc} & 0 & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} & r_{17} & r_{18} & r_{19} & r_{110} \\
\text{M\#2} & \vdots & 0 & r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} & r_{27} & r_{28} & r_{29} & r_{210} \\
\text{M\#3} & \vdots & \vdots & 0 & r_{34} & r_{35} & r_{36} & r_{37} & r_{38} & r_{39} & r_{310} \\
\text{M\#4} & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{45} & r_{46} & r_{47} & r_{48} & r_{49} & r_{410} \\
\text{M\#5} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{56} & r_{57} & r_{58} & r_{59} & r_{510} \\
\text{M\#7} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{67} & r_{68} & r_{69} & r_{610} \\
\text{M\#9} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{78} & r_{79} & r_{710} \\
\text{сгдл} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{89} & r_{810} \\
\text{мс} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & r_{910} \\
\text{сгдб} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0
\end{array} \tag{4.14}$$



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

4.4 Алгоритми за планирање путање мобилног робота

Проблем управљања кретањем мобилног робота обухвата решавање четири фундаментална проблема: (1) изградња мапе окружења, (2) локализација, (3) планирање путање и (4) избегавање препрека, док само проблем планирања путање у основи чине два проблема: проблем генерисања путање и проблем праћења генерисане путање [17].

У литератури су познати различити алгоритми претраживања који се користе за одређивање најкраћег пута између два чвора графа. Један од алгоритама базира се на примени графа видљивих врхова (*visibility graph*), који је карактеристичан за дводимензиона окружења са полигоналним препрекама унутар њих и одликује се међусобним спајањем свих видљивих врхова препрека и почетне и циљне координате мобилног робота. За разлику од графа видљивих врхова, Воронојев дијаграм (*Voronoi diagram*) формира путање које су удаљене од препрека колико је максимално могуће, док генерализовани Воронојев дијаграм представља мрежу путања које су једнако удаљене од суседних препрека. Метода потенцијалних поља заједно са графом видљивости и Воронојевим дијаграмом припада групи *Road map* алгоритама планирања. Привлачно потенцијално поље циља и одбојно потенцијално поље препрека главна су обележја методе потенцијалних поља. Аналогно законима механике флуида и електростатике, роботу, препрекама и циљу се приписује поларитет и то тако да робот и препреке имају исти поларитет, док робот и циљ имају супротан поларитет. У таквом потенцијалном пољу робот се ка циљу креће у смеру градијента потенцијалног поља.

Једна од подела алгоритама претраживања, према [4], је следећа:

- depth-first search (алгоритам који започиње претраживање дуж једне гране графа);
- breadth-first search (алгоритам који започиње претраживање чворова на истом нивоу графа).

За статичка окружења где је мапа окружења *a priori* позната највише су у примени метод потенцијалних поља и A^* алгоритам претраживања.

4.4.1 Алгоритам за одређивање оптималне путање кретања мобилног робота - A^* алгоритам претраживања

A^* је алгоритам претраживања који проналази најкраћу путању између почетне и циљне тачке у одређеном окружењу [15]. Настаје као резултат синергијског дејства два алгоритма - Dijkstra и best-first search (BFS) алгоритма, при чему сваки од њих користи различите критеријуме претраживања. Наиме, Dijkstra алгоритам врши претраживање сходно критеријуму најкраћег пута и на основу њега дефинисане цене помераја, док BFS алгоритам користи хеуристички прихвативе процене (хеуристичке функције) за естимацију вредности цене помераја. Сходно наведеном, може се закључити да је A^* генерализован случај два посебна алгоритма. Захваљујући својству комбиновања и коришћења њихових предности алгоритам омогућује претраживања окружења за кратко време и као такав има примену у различитим областима.

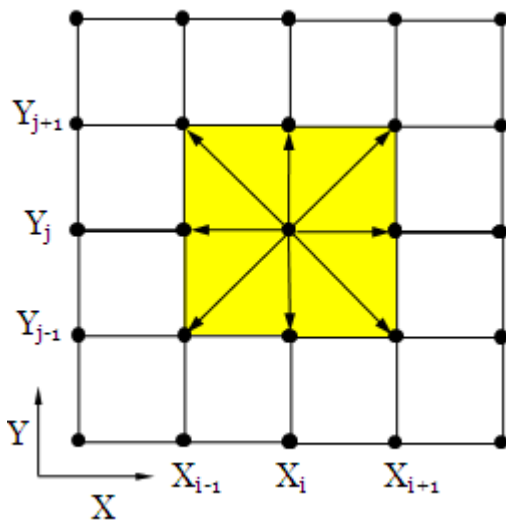
За даљу анализу A^* алгоритма неопходно је извршити дискретизацију радног окружења одговарајућим бројем пиксела, односно, превести континуални простор лабораторијског модела технолошког окружења у дискретни. То се остварује придруживањем оса X и Y Декартовог координатног система окружењу и одређивањем метрике⁴ дискретног простора ради успостављања удаљености између тачака [16], слика 4.9, или величине пиксела, слика 4.10.

⁴ метрика или функција раздаљине је функција која дефинише удаљеност између елемената неког скупа

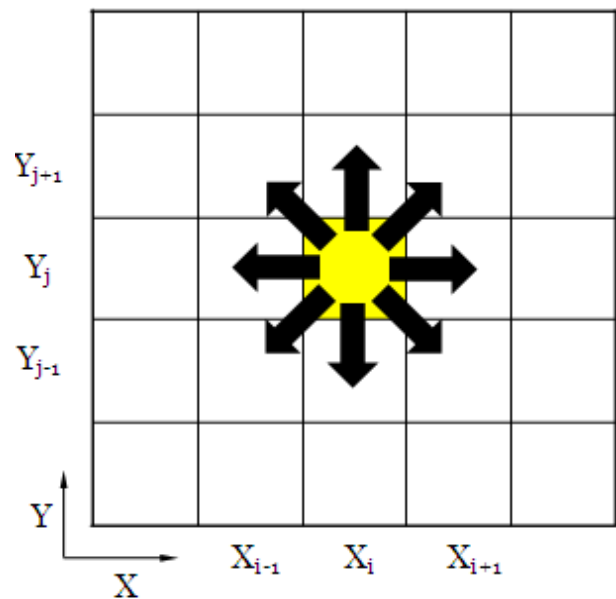
Сходно наведеном, а у зависности од могућности кретања, односно, преласка из текућег у наредни пиксел, пикселе је могуће поделити у две групе:

- четвороспојиви пиксели (кретање из текућег у наредни пиксел је могуће или само хоризонтално и вертикално, или само дијагонално);
- осмоспојиви пиксели (кретање из текућег у наредни пиксел је могуће и хоризонтално, и вертикално, а и дијагонално).

Пиксели квадратног облика, представљени на сликама 4.9 и 4.10, припадају групи осмоспојивих, што значи да је кретање у дискретном тополошком простору од текућег до наредног пиксела могуће остварити у 4 правца са по 2 смера. Тако се од пиксела са координатама (X_i, Y_j) до 4 ортогонална и 4 дијагонална суседна пиксела у окружењу може прећи на укупно 8 начина. Мапа дискретног простора дефинише позицију тачака у координатном систему и обично се представља матрично и графички - мрежом. Уколико су пиксели представљени тачком (тачка се налази у пресеку дијагонала квадрата пиксела), дефинише се растојање између тачака, а ако су пак пиксели представљени квадратом, тада је карактеристична величина димензија квадрата тј. пиксела.



Слика 4.9: Пиксели у облику тачке на примеру осмоспојивог окружења



Слика 4.10: Пиксели у облику квадрата на примеру осмоспојивог окружења

Након претходне дискретизације окружења, одабир оптималне путање кретања врши се помоћу основних параметара, према изразу (4.16):

$$f(n)=h(n)+g(n) \quad 4.16$$

где је:

n - број чвора;

h - процена најкраћег пута дефинисаног Еуклидском нормом од задатог циљног до посматраног чвора дискретизованог окружења;

g - цена помераја; представља пређени пут између два суседна чвора.

За разлику од Менхетн норме [4], где су пиксели четвороспојиви па се сходно томе кретање од тренутног до наредног пиксела остварује само хоризонтално и вертикално, предност Еуклидске норме се огледа и у могућности кретања дијагонално. Наведене норме (Еуклидска и Менхетн) су најчешће коришћене приликом реализације A^* алгоритма. Математички запис процене најкраћег пута Еуклидском нормом представљен је изразом 4.17.

$$h(n) = \sqrt{(n_x \text{ trenutno} - n_x \text{ cilja})^2 + (n_y \text{ trenutno} - n_y \text{ cilja})^2} \quad 4.17$$

Поред основних параметара, дефинишу се и препреке унутар технолошког окружења и укупни пређени пут који представља збир свих парцијалних цена помераја g у току одабира оптималне путање. У односу на тренутни чвор, цена помераја се рачуна сходно димензији пиксела за свих 8 чворова у окружењу, будући да су одабрани осмоспојиви пиксели. Додељене вредности за вертикално и хоризонтално померање разликују се од оних које се додељују у случају дијагоналног померања. На местима где је декларисана препрека практикује се да ред величине додељене вредности цене помераја буде већи, како би та препрека била искључена приликом одабира путање. Пошто је димензија пиксела 1×1 , усвојено је да вредност цене помераја за ортогонална померања буде $g(n)=1$, а за дијагонална $g(n)=1.4142$. Уколико је у питању препрека, цене помераја има вредност $g(n) = 100$ за ортогоналне пикселе и $g(n) = 141.42$ за дијагоналне пикселе, у односу на тренутни пиксел.

За пример дискретизованог окружења (5×5) на слици 4.11, са задатом почетном, циљном тачком и препрекама, матрица $h(25)$ је приказана једначином 4.18.

ЦИЉ				
			препрека	
		препрека		
	препрека			старт

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 1.4142 & 2.2361 & 3.1623 & 4.1231 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1.4142 & 2.2361 & 3.1623 & 4.1231 \\ 2 & 2.2361 & 2.8284 & 3.6056 & 4.4721 \\ 3 & 3.1623 & 3.6056 & 4.2426 & 5 \end{bmatrix} \quad 4.18$$

(5×5)

Као што се види у матрици 4.18, вредност параметра h за циљни чвор је минимална и једнака нули, док је максимална вредност параметра h управо за стартни чвор. На основу наведених параметара ($h(n)$, $g(n)$ и $predjeni_put$), израчунава се оцена најкраћег пута, од стартног до циљног чвора. Вредност параметра f добија се према изразу 4.19.

Слика 4.11: Дискретизовано окружење са координатама стартног, циљног и пиксела за препреке

$$f(n) = h(n) + g(n) + predjeni_put \quad 4.19$$

Израчунавањем и избором минималне вредности параметра f свих суседних чворова у односу на тренутни чвор, A^* алгоритам бира следећи чвор. Претходно дефинисана процедура се понавља све док се не достигне циљни чвор. На тај начин се генерише оптимална путања од почетне до циљне тачке, представљена низом одабраних чворова. Могуће је приметити да се оцена најкраћег пута од стартног до циљног чвора $f(n)$ и оцена најкраћег пута мереног од задатог циља $h(n)$ смањује како се ближи задатом циљном чвору, док се пређени пут повећава преласком из чвора у чвор. На слици 4.12 графички (стрелицама) су представљени изабрани пиксели са минималном вредношћу параметра f и тако генерисана оптимална путања кретања од почетне до циљне тачке, а табелом 4.8 пример рачунања параметра $f(n)$ за неке од чворова.

(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)
(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)
(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)
(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)
(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)

Слика 4.12: Мапа пиксела дискретизованог окружења

Табела 4.8: Пример рачунања вредности параметра $f(n)$ за чворове (4,4), (3,3), (2,2), (2,1)

$$f(4,4) = h(4,4) + g(4,4) + \text{predjeni_put}$$

$$f(4,4) = 3.6056 + 1.4 + 0 = 5.0198$$

$$f(3,3) = h(3,3) + g(3,3) + \text{predjeni_put}$$

$$f(3,3) = 2.2361 + 1.4 + 1.4 = 5.0361$$

$$f(2,2) = h(2,2) + g(2,2) + \text{predjeni_put}$$

$$f(2,2) = 1 + 1.4 + 2.8 = 5.2$$

$$f(2,1) = h(2,1) + g(2,1) + \text{predjeni_put}$$

$$f(2,1) = 0 + 1 + 4.2 = 5.2$$

У конкретном случају, овај алгоритам је коришћен за генерисање оптималне путање кретања мобилног робота унутар лабораторијског модела технолошког окружења, узимајући при томе у обзир пројектовани диспозициони план распореда машина алатки, монтажних станица и складишта [13]. Псеудокод A^* алгоритма престављен је у табели 4.9.

Табела 4.9: Алгоритам A^*

Старт (почетак)

Улазне величине:

- дефинисање карактеристика графа;
- резолуција пиксела за дискретизацију;
- дефинисање стартног чвора;
- дефинисање циљног чвора;
- дефинисање препрека;

Излазне величине:

- редослед чворова и оптимална путања кретања;

- 1: вектор put је празан;
- 2: рачунање вредности $h(n)$ помоћу Еуклидске норме;
- 3: тренутни чвор = стартни чвор;
- 4: while тренутни чвор \sim циљни чвор;
- 5: рачунати вредности $g(n)$ за све суседне чворове;
- 6: рачунати вредности $f(n)$, на основу израчунатих вредности параметара $h(n)$ и $g(n)$ за све суседне чворове тренутног чвора;
- 7: наћи суседни чвор тренутног чвора са минималном вредности параметра $f(n)$;
- 8: чвор($\min(f(n))$) = тренутни чвор;
- 9: проширити вектор put тренутним чвором;
- 10: end while

Крај

Наиме, као улазне величине алгоритма задају се карактеристике графа: број чворова и број грана, као и резолуција тј. број пиксела за дискретизацију радног простора. Поред задавања стартног и циљног пиксела, уносе се и координате (пиксели) препрека сходно

онима које постоје у лабораторијском моделу технолошког окружења. Под препрекама се подразумевају они пиксели којима робот током кретања не може физички приступити (пиксели који одговарају положајима - позицији и оријентацији машина алатки, монтажних станица, итд). На почетку рада алгоритма вектор put , који представља оптималну путању кретања, је празан вектор, вредност параметра $h(n)$ рачуна се помоћу Еуклидске норме, а текући чвор у првом кораку алгоритма постаје стартни. Вредност параметра $f(n)$ рачуна се за сваки суседни чвор, уз избор чвора са минималном вредношћу овог параметра. Тада изабрани суседни чвор са минималном вредношћу параметра постаје текући, а вектор put се њиме проширује. Приказана петља се понавља све дотле док се не стигне до циљног пиксела.

4.4.2 Алгоритам за одређивање редоследа чворова по приоритету које робот посећује при транспорту делова#1-4 на машине за прву операцију - АЛГОРИТАМ#1

У овом поглављу рада биће описан развијени алгоритам за претраживање и одабир чворова при транспорту делова#1-4 на машине за прву операцију. Генерално, критеријуми за претраживање могу бити различити (утрошак енергије, време чекања, растојање [4]), али је битно нагласити да за предметни интелигентни технолошки систем усвојени критеријум мора да буде меродаван. Обично се као критеријум меродаван за производне системе користи минимизација трошкова унутрашњег транспорта или минимизација времена кретања материјала, без обзира на начин транспорта (мануелни, AGV или интелигентним мобилним роботом). У овом случају, критеријум за одабир наредног чвора у који робот прелази из тренутног чвора је најкраће растојање између чворова.

Према подели графова наведеној у претходном поглављу рада, Алгоритам#1 припада другој групи (breadth-first search алгоритам), што значи да се у сваком кораку алгоритма врши претраживање чворова који припадају истом нивоу. Поред матрица M_{DM} , T_{DM} , M_{DMS} , R , као улазне величине алгоритма задају се и координате почетне тачке. У првом кораку алгоритма вектор редоследа чворова - r је празан. На основу матрице делови-машине-складишта M_{DMS} , познате су машине (чворови) на којима се обавља прва операција сваког од репрезентативних делова. Вектор Rz је вектор растојања између стартног чвора и машина које делови посећују у првој операцији, сагласно технолошком поступку. На основу минималне вредности вектора растојања Rz , добија се следећи циљни чвор, који у сваком следећем кораку алгоритма постаје почетни, а матрица M ажурира се уклањањем почетног чвора у сваком кораку петље. Излазне величине алгоритма су вектор r , који представља редослед чворова (машина и складишта) које робот треба да посети, као и на основу њега формиран редослед делова које робот преноси и поставља на машине.

Табела 4.10: Алгоритам#1 за одређивање редоследа чворова према минималном растојању као приоритету претраживања

Старт (почетак)

Улазне величине:

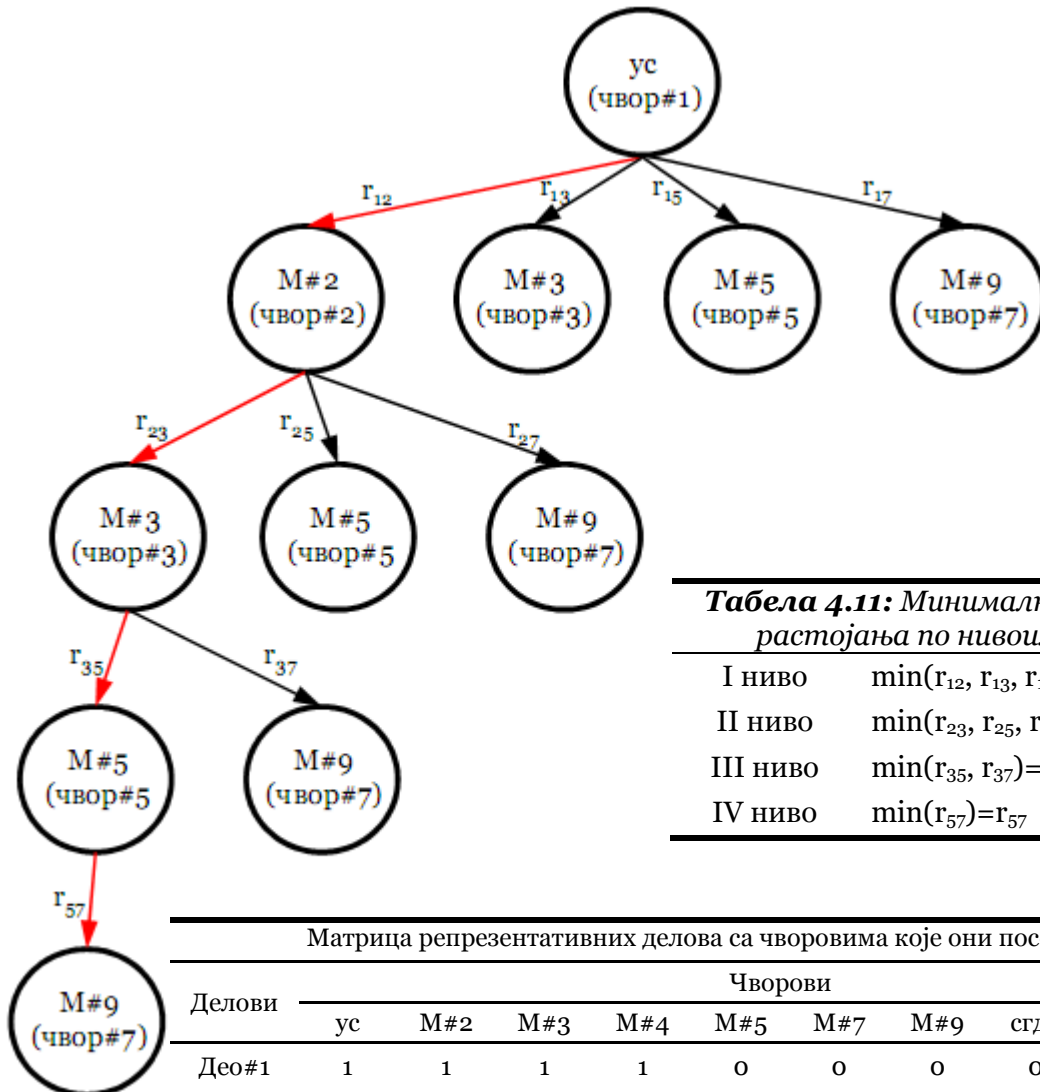
- вектор делова D ; вектор машина M ;
- матрица зависности делови машине M_{DM} ;
- матрица времена T_{DM} ;
- матрица зависности делови-машине-складишта M_{DMS} ;
- матрица растојања R између чворова;
- координате почетног чвора;

Излазне величине:

- редослед чворова (машина и складишта) које робот треба да посети - вектор r ;
- редослед делова које робот „оставља“ у чворове;

```
1: вектор  $r$  је празан;
2: for  $i = 1 : n$ , где је  $n$  број репрезентативних делова
3:     на основу матрице  $M_{DMS}$  познат је вектор машина (чворова) -  $M$  на којима се
        обавља прва операција сваког од репрезентативних делова;
4:     генерисати  $Rz$  - вектор растојања почетног од свих преосталих чворова
        датих/представљених вектором  $M$ ;
5:     проширити вектор  $r$  почетним чвором;
6:     почетни чвор = чвор( $\min(Rz)$ );
7:     уклонити из вектора  $M$  почетни чвор;
8: end for
```

Приказ скупа чворова и веза (грана) између њих приказан је на слици 4.13. Из матрице репрезентативних делова се види да је прва операција дела#1 на машини М#2, дела#2 на М#5, дела#3 на М#3 и дела#4 на М#9. Управо се ти чворови налазе на истом (другом) нивоу претраживања. Када се одабере чвор са минималним растојањем, преостали чворови формирају следећи ниво претраживања. Претходна процедура се понавља све док на нивоу не остане само један чвор.



Табела 4.11: Минималне вредности растојања по нивоима графа

I ниво	$\min(r_{12}, r_{13}, r_{15}, r_{17})=r_{12}$
II ниво	$\min(r_{23}, r_{25}, r_{27})=r_{23}$
III ниво	$\min(r_{35}, r_{37})=r_{35}$
IV ниво	$\min(r_{57})=r_{57}$

Матрица репрезентативних делова са чворовима које они посећују

Делови	Чворови								сгдб	мс	сгдл
	ус	М#2	М#3	М#4	М#5	М#7	М#9				
Део#1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	
Део#2	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	
Део#3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	
Део#4	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	

Слика 4.13: Графички приказ алгоритма претраживања

Како се материјал за израду сваког од репрезентативних делова налази у улазном складишту, то је коренски чвор алгоритма претраживања управо чвор#1 (улазно складиште). За разлику од алгоритама A^* и Dijkstra, где се поред почетног као улазне величине задају и координате циљног чвора, код Алгоритма#1 се не задају координате циљног чвора. Одабир чворова врши се на сваком нивоу графа алгоритма, на основу минималног растојања као критеријума. На тај начин се постепено претражује граф, а као резултат претраге алгоритма генеришу координате циљног чвора.

4.4.2 Примена алгоритма за одређивање редоследа чворова по приоритету при планирању путање кретања мобилног робота сходно технолошком поступку – АЛГОРИТАМ#2

Алгоритам#1 генерише пет чворова. У општем случају, први чвор може бити било који чвор дефинисан табелом 4.5. Према усвојеном технолошком поступку бира се да је први чвор улазно складиште, а остала четири су чворови (машине) које робот посећује и које се добијају на основу претраге Алгоритма#1. Као резултат претраге Алгоритма#1, на основу технолошког процеса, добија се путања кретања мобилног робота у виду редоследа машина које робот посећује ради транспорта репрезентативних делова за прву операцију. Ова путања представља улазну величину Алгоритма#2, корак 1 Алгоритма#2. Према генерисаној путањи мобилни робот се креће, а сходно трајању кретања генеришу се временски параметри, неопходни за одређивање чворова које робот треба да посети након остављања репрезентативних делова на машине за прву операцију. Ти чворови представљају даљу путању кретања робота након. Добијени временски параметри су:

- време трајања операције на машини;
- време кретања робота од машине (чвора графа) до машине (чвора графа).

Опис алгоритма за одређивање вектора готових делова и вектора машина на основу којих се, помоћу претходно наведених временских параметара, генерише путања кретања мобилног робота, приказан у тексту који следи. Приликом обављања задатка унутрашњег транспорта материјала, робот се креће од стартног до циљног чвора. Након остављања првог дела на чвор (машину) дефинисану технолошким поступком, мобилни робот наставља кретање до наредног чвора дефинисаног Алгоритмом#1. Истовремено се мери време трајања кретања робота и време трајања операције на машини на којој је део остављен. Када робот стигне у циљни чвор, пореди се време кретања са временом трајања технолошке операције, корак 6 Алгоритма#2. Уколико је време трајања технолошке операције на машини краће од времена кретања робота од стартног до циљног чвора, део је готов тј. операција на тој машини је завршена и тај део се сврстава у вектор готових делова, корак 15 Алгоритма#2. У супротном, део се сврстава у вектор делова који нису готови, корак 13 Алгоритма#2. У тренутку када робот завршава кретање од стартног до циљног чвора и стиже у циљни чвор, позната су два вектора делова и то:

- вектор готових делова (вектор делова чија је обрада на машини завршена) – `gotovi_delovi`;
- вектор делова који нису готови (вектор делова који се обрађују у тренутку приступа робота циљном чвору);

Сходно векторима делова, дефинишу се и одређују следећи вектори машина:

- вектор машина на којима су готови делови тј. машина на којима је завршена технолошка операција;
- вектор машина на којима није завршена технолошка операција.

Ови вектори се модификују приликом сваког кретања мобилног робота од стартног до циљног чвора. Након формирања и ажурирања вектора, циљни чвор из претходног корака Алгоритма#1 постаје стартни, а наредни чвор Алгоритма#1 постаје циљни, кораци 3 и 4 Алгоритма#2. Робот наставља кретање, уз проверу вектора готових и вектора делова који нису готови приликом стицања у сваки циљни чвор. Пошто су у питању четири репрезентативна дела, робот се креће у четири итерације до четири машине тј. до четири циљна чвора.

После транспорта и последњег репрезентативног дела на машину за прву операцију, генерисана су оба вектора делова и оба вектора машина. Од свих машина на којима су до тог тренутка делови готови, бира се она до које је растојање од тренутног чвора минимално тј.

бира се најкраће растојање између тренутне позиције робота и машине на којој је предвиђена технолошка операција завршена, корак 26 Алгоритма#2. Након кретања робота до изабране машине ради преузимања готовог дела, на основу матрице зависности делови машине M_{DM} , одређује се на којој се машини обавља следећа операција преузетог дела и сходно томе одређује следећи циљни чвор, корак 36 Алгоритма#2. Тада мобилни робот врши транспорт преузетог дела од тренутног стартног до циљног чвора, одређеног на основу матрице M_{DM} , уз поновну софтверску модификацију вектора делова и вектора машина. Вектор делова који нису готови ажурира се узимајући у обзир време кретања робота и то на следећи начин. Уколико је, за делове који нису готови, време трајања технолошке операције дужи од времена кретања робота за две операције (прву и другу), део ће и даље бити сврстан у вектор делова који нису готови, корак 40 Алгоритма#2. Ако је, пак, време трајања технолошких операција за сваки од делова који се тренутно налазе на машинама краће од збира времена кретања робота између чворова, то значи да обрада дела завршена и да се вектор готових делова ажурира (модификује) додавањем обрађених делова, корак 42 Алгоритма#2. Понављање претходно наведених акција врши се све док се не изврши складиштење првог готовог дела. Тада се робот креће до улазног складишта (ус), узима репрезентативни део који није на линији и носи га на машину за прву операцију. Псеудокод Алгоритма#2 приказан је у табели 4.12.

Табела 4.12: Алгоритам#2 за одређивање редоследа чворова при планирању путање кретања мобилног робота

Старт (почетак)

Улазне величине:

- редослед чворова (машина и складишта) које робот треба да посети - вектор r генерисан Алгоритмом#1;
- редослед делова које робот „оставља“ у чворове - генерисан Алгоритмом#1;

Изразне величине:

- редослед свих чворова који чине планирану путању кретања мобилног робота;

```

1:   $r$  - вектор који се добија као излаз Алгоритма#1;
2:  for  $i = 1 : n$ , где је  $n$  број репрезентативних делова
3:  стартни чвор =  $r(i)$ ;
4:  циљни чвор =  $r(i+1)$ ;
   кретање робота од стартног до циљног чвора;
5:      if  $i == 2$ 
6:          if  $tk_2$  (време трајања технолошке операције) >  $T_2$  (времена кретања робота)
7:              додати тренутни део у вектор делова који нису готови;
8:          else
9:              додати тренутни део у вектор готових делова;
10:         end
11:     endif
12:     if  $i == 3$ 
13:         if  $tk_3$  (време трајања технолошке операције) >  $T_3$  (времена кретања робота)
14:             додати део у вектор делова који нису готови;
15:         elseif  $tk_2$  (време трајања технолошке операције) >  $T_2 + T_3$  (збир времена кретања робота)
16:             додати тренутни део у вектор делова који нису готови;
17:         else
18:             додати тренутни део у вектор готових делова;
19:         end
20:     endif
21:     if  $i == 4$ 
22:         if  $tk_4$  (време трајања технолошке операције) >  $T_4$  (времена кретања робота)
23:             додати тренутни део у вектор делова који нису готови;
24:         elseif  $tk_3$  (време трајања технолошке операције) >  $T_3 + T_4$  (збир времена

```

```

    кретања робота)
    додати тренутни део у вектор делова који нису готови;
elseif tk2 (време трајања технолошке операције)> T2 + T3 + T4 (збир
времена кретања робота)
19: додати тренутни део у вектор делова који нису готови;
20: else
21: додати тренутни део у вектор готових делова;
    end
22: endif
23: end for
24: стартни чвор = циљни чвор;
25: while вектор делови који нису готови не буде празан вектор
    из матрице готових делова, на основу матрице R и MDM, наћи део који је на
26: машини чије је растојање до тренутне машине минимално;
27: циљни чвор = најближа машина;
28: уклонити део из матрице готових делова када робот стигне у циљни чвор;
    за делове који нису готови проверити следећи услов
29: if tk (време трајања технолошке операције)>T (времена кретања робота)
30: додати тренутни део у матрицу делова који нису готови;
31: else
32: додати тренутни део у матрицу готових делова;
33: end
34: стартни чвор = циљни чвор;
35: наћи који је део на тренутној машини до које је робот дошао;
36: наћи на ком чвору је следећа операција дела на основу матрице MDM;
37: циљни чвор = машина следеће операције;
38: уклонити део из матрице готових делова када робот стигне у циљни чвор;
    за делове који нису готови проверити следећи услов
39: if tk (време трајања технолошке операције)>T (времена кретања робота)
40: додати тренутни део у матрицу делова који нису готови;
41: elseif
42: додати тренутни део у матрицу готових делова;
43: endif
44: endwhile

```

Крај

Представљени алгоритам се користи за генерисање и повезивање временских параметара технолошког процеса и времена кретања мобилног робота у интелигентном технолошком систему. Корелација просторних и временских параметара подразумева да је за сваки репрезентативни део познат положај (позиција и оријентација) на машини, или у складишту, или на роботу уколико га робот транспортује, као и временски параметри везани за трајање операције на машини и чекање у реду (колико је времена део провео у обради на машини, колико времена чека у реду, итд). Када се заврши операција неког дела и он придружи матрици готових делова, временски параметри за тај део се бришу, уз уклањање из матрице готових делова, кораци 28 и 38 Алгоритма#2.

5. Развој подсистема за учење и предикцију транспортних путева сходно пројектованим технолошким процесима, применом концепта машинске интелигенције заснованог на систему вештачких неуронских мрежа

Планирање унутрашњег транспорта материјала (сировина и готових делова) у производним погонима металопрерађивачке индустрије представља фундаментални део планирања целе производне линије, из разлога што кретање материјала повезује све технолошке операције и директно утиче на континуалност производње [6]. Поред крутих трансфер система за транспорт, интегрисаних директно у производну линију, посебну класу система за транспорт чине они са аутономијом кретања. Примена оваквих система је релативно честа у индустрији, где трошкови централизованог конвејерског система због његове величине постају врло велики, односно већи од трошкова реализације еквивалентног транспортног система базираног на аутоматски вођеним колицима (AGV- Automatic Guided Vehicles) или интелигентним мобилним роботима. Из тог разлога, начин кретања материјала има велики значај у домену пројектовања интелигентних технолошких система и мора да се планира од самог почетка пројектовања.

Будући да се у оквиру разматраног производног система налази и технолошки систем са технолошким процесом за масовну производњу делова од лима као подсистемом, директан утицај на цену производа, поред цене сировина, има и цена транспорта. Структуру укупног технолошког времена према [1] чини и време изгубљено услед неадекватног тока материјала. Ако се узме у обзир изгубљено производно време, а технолошке анализе на пројекту [1] су показале да оно износи и до 45%, долази се до закључка да постоји изражен и нерешен проблем токова материјала тј. унутрашег транспорта конвенционалним методама транспорта – виљушкарима. Увођење интелигентних мобилних робота, као интегралне компоненте производног система, могло би да омогући решавање поменутог проблема транспорта и свођење предоченог технолошког губитка на оквире препоручених 8-12%.

Познато је да већина инжењерских процеса нису детерминистичке природе. Процеси који су значајни за постављени задатак транспорта материјала (припремака, обрадака и готових делова) са аспекта времена трајања јесу обрадни процес и процес кретања робота између дефинисаних чворова (машине и складишта). С обзиром на то да су ови процеси стохастичке природе, следи закључак да прописано време трајања одређене операције, као и време транспорта делова роботом од чвора до чвора није једнако за сваки део из групе⁵ истих репрезентативних делова. На пример, време трајања прве технолошке операције за део#1 налази се у интервалу $8s \pm t_1$, где је t_1 толеранција времена трајања прве операције, док се време кретања робота при транспорту дела#3 од чвора#3 до чвора#4 налази у интервалу $10s \pm t_2$, при чему је t_2 толеранција за време кретања робота. Трајање процеса за делове из групе је различито, а узроци су различите природе:

- услед квара машине, време обраде дела траје дуже него при номиналним условима;
- похабаност алата утиче на време трајања технолошке операције;
- квар осталих елемената производне линије утиче на дужину времена обраде и задржавање делова на појединачним машинама;

⁵ Прву групу репрезентативних делова чини серија делова#1, који се израђују према дефинисаном технолошком поступку. Аналогно, другу, трећу и четврту групу чине серије делова#2, делова#3 и делова#4, респективно.

- међуоперацијски транспорт (мануелни или аутоматизовани) утиче на укупно време трајања технолошког процеса, као и на приоритет опслуживања;
- време кретања мобилног робота од чвора до чвора се мења уколико мобилни робот добије задатак виши приоритета, или најће на статичку или динамичку препреку у окружењу, или ако се из било ког разлога креће брже или спорије;
- време опслуживања машине зависи од типа опслуживања (мануелни, аутоматизовани - роботизовани) тј. од тога да ли се машина опслужује од стране човека или робота.

Из наведених разлога, неопходно је формирати адекватан алгоритам за планирање путање који ће својом робусношћу и одговарајућом тачношћу одговорити на грешке настале услед наведених познатих, али и неочекиваних и непознатих поремећајних фактора.

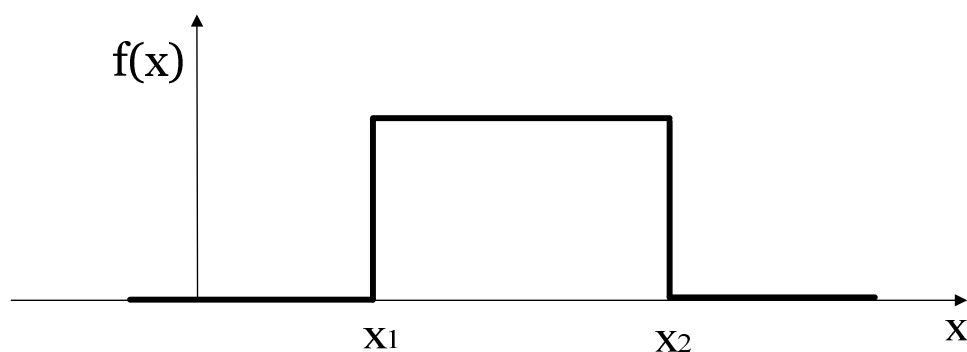
5.1 Статистичке методе за моделирање стохастичких процеса

Параметри поменутих стохастичких технолошких процеса могу се описати неком од познатих статистичких расподела (Гаусова, Поасонова, троугаона, униформна и друге). Континуална униформна расподела обухвата избор једног параметра од више могућности, од којих је за сваки подједнако вероватно да буде изаран.

Основне карактеристике функције густине вероватноће $f(x)$ униформне расподеле неке случајне променљиве x су:

- функција густине вероватноће $f(x)$, $f(x) \geq 0$, за $-\infty \leq x \leq \infty$;
- интеграцијом густине вероватноће у региону $-\infty \leq x \leq \infty$ добија се 1, $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$;
- вероватноћа да случајна променљива лежи у региону између x_1 и x_2 одређена је изразом: $P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx$;
- средња вредност случајне променљиве x , $m = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx$;
- варијанса случајне променљиве x , $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 \cdot f(x)dx$;
- стандардна девијација случајне променљиве x , σ ;

У многим случајевима густина вероватноће има константну вредност у датом интервалу $[x_1, x_2]$, док је изван тог интервала једнака нули. Одговарајућа представа ове густине вероватноће је правоугаоног облика и приказана је на слици 5.1.

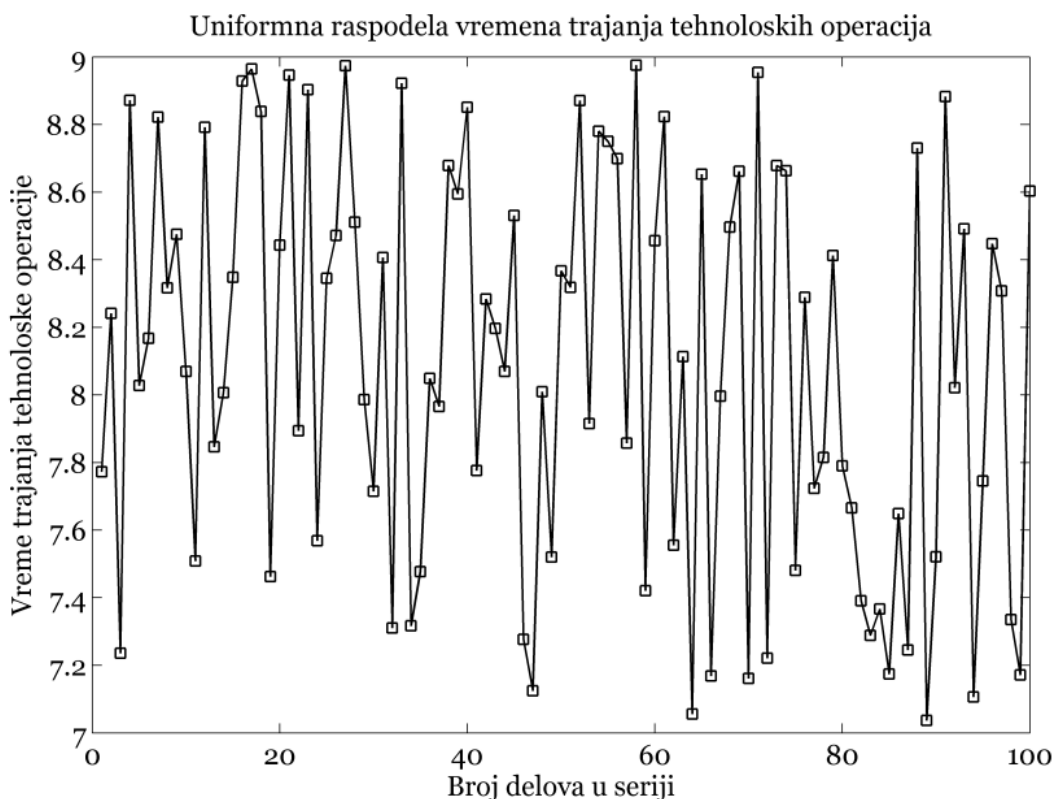


Слика 5.1: Густина вероватноће униформне расподеле

Пошто површина испод правоугаоника мора да буде једнака јединици, следи да су униформна густина вероватноће, средња вредност случајне променљиве и варијанса случајне променљиве дате следећим изразима, респективно:

- функција густине вероватноће $f(x)$, $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x_2 - x_1}; x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0; \text{остало} \end{cases}$
- средња вредност случајне променљиве x , $m = \frac{x_1 + x_2}{2}$;
- варијанса случајне променљиве x , $\sigma^2 = \frac{(x_2 - x_1)^2}{12}$;

Пример униформне расподеле времена обраде дела#1 на машини М#2 за серију од 100 комада приказан је на слици 5.2.



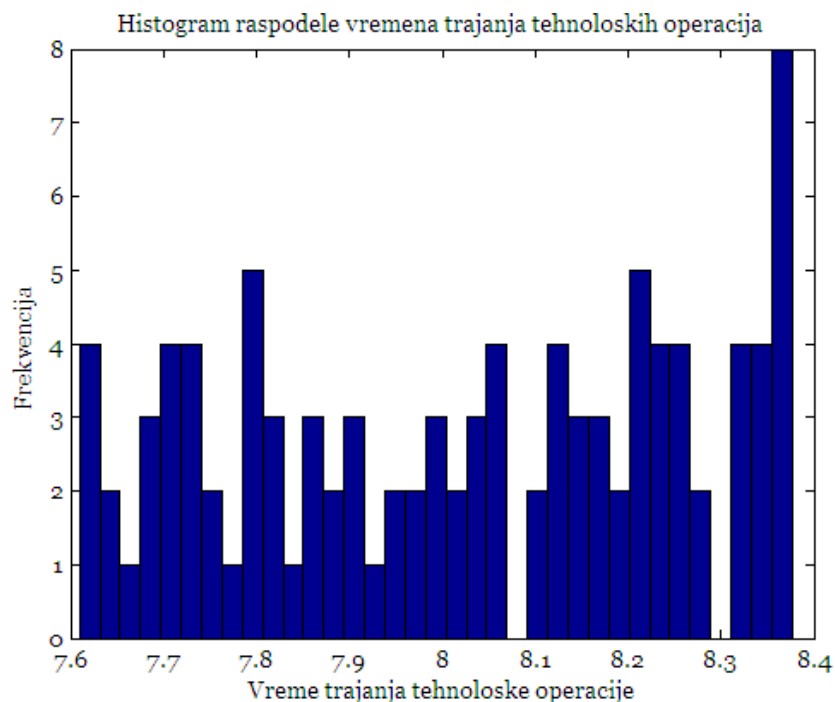
Слика 5.2: Униформна расподела временских параметара обрадног процеса

Случајна променљива униформне расподеле је време трајања обраде и њена очекивана средња вредност износи $x=8$. Како је усвојено дозвољено одступање од номиналне вредности $\pm 5\%$, следи да је интервал $[x_1, x_2]$ у коме се налази случајна променљива $[7,6, 8,4]$. Тада,

функција густине вероватноће износи: $f(x)=1/(x_2-x_1)=1/(8,4-7,6)=1,25$;

средња вредност случајне променљиве x : $m=(x_1+x_2)/2=(7,6+8,4)/2=8$;

а варијанса случајне променљиве x : $\sigma^2=(x_2-x_1)^2/12=(8,4-7,6)^2/12=0,0533$.



Слика 5.3: Хистограм расподеле времена трајања технолошких операција

На слици 5.3 приказан је хистограм униформне расподеле времена трајања технолошких операција. На основу времена обраде на машинама и времена кретања робота између чворова, према Алгоритму#2 се најпре генерише номинална путања кретања робота, а затим и остале путање настале униформном варијацијом временских параметара. На основу овако генерисаних временских параметара, оправдано се наслућује могућност примене концепта вештачке интелигенције и вештачких неуронских мрежа (ВНМ) као парадигме вештачке интелигенције, за обраду временских података и учење, а затим на основу учења генерисање транспортних путева у предметном интелигентном технолошком систему.

5.2 Концепт вештачких неуронских мрежа у производним технологијама

Поред познавања теорије пројектовања, савремен и модеран приступ пројектовању базира се на познавању и примени компјутерски интегрисаних технологија и техника вештачке интелигенције (AI-Artificial Intelligence), познатих и под називом *soft computing*⁶ технике. Данашњи развој ИТС оријентисан је на адаптивно процесирање информација [12], па је сходно томе значај вештачких неуронских мрежа у овој области најдоминантнији.

Вештачке неуронске мреже представљају универзалне апроксиматоре са могућношћу нелинеарног раздвајања. Захваљујући учењу пресликавања између улазног и излазног простора, вештачке неуронске мреже имају способност адаптивног понашања према променама [9]. Ове карактеристике омогућавају да се оне примене за решавање различитих инжењерских проблема из домена производних технологија.

У литератури се могу срести примери примене вештачких неуронских мрежа на решавање проблема из различитих области компјутерски интегрисаних технологија. Пример примене ВНМ може се наћи у пројектовању нових производа (CAD-Computer Aided Design) у складу са актуелним захтевима тржишта, а на основу постојеће геометријске и технолошке документације. Резултати у раду [18] показују како се методологија заснована на

⁶ *soft computing* чине следеће формализоване методологије: вештачке неуронске мреже, генетски алгоритми и fuzzy системи

примени ВММ користи при пројектовању производа. Рад [14] представља први покушај примене ВММ у домену планирања и управљања производњом применом компјутера (САРР-Computer Aided Process Planning) за предикцију параметара ковања у хладном стању. Foo и Takefuji су још давне 1988. године у раду [5] развили ВММ за решавање проблема терминирања. Kararthy и Suresh су у раду [7] применили ВММ у домену групе технологије за класификацију и кодирање фамилије ротационих делова.

Примена ВММ у области роботике је веома широка и то у решавању проблема кинематике, динамике, управљања, обраде сензорских информација, планирања путање [6] и других. У домену унутрашњег транспорта материјала, ВММ се могу користити за предикцију и учење транспортних путева на основу добијених временских параметара.

5.3 Примена вештачких неуронских мрежа за учење и предикцију транспортних путева

Редослед чворова и оптимална путања кретања између чворова генерише се помоћу претходно описаних алгоритама и то Алгоритмом#1 и Алгоритмом#2 редослед чворова, а алгоритмом А* оптимална путања између чворова. Редослед чворова у генерисаној путањи зависи од матрица времена кретања робота између чворова R_T (добива се експерименталним путем или на основу матрице растојања R) и матрице времена трајања технолошких операција на машинама T .

Уколико би сваки члан матрица T и R_T имао константне вредности, тј. уколико би операција на машини увек трајала константно и уколико би се робот између два изабрана чвора увек кретао за исти временски интервал, путања кретања мобилног робота би увек била константна. Међутим, као што је претходно речено, технолошки процеси су стохастичке природе па из тог разлога времена трајања технолошких операција за делове из групе и времена кретања мобилног робота између чворова нису увек константна. Обично се, услед варирања, ова времена налазе у одређеним толеранцијама између горњих и доњих граничних вредности. Из тог разлога путања која се генерише није константна у сваком циклусу кретања мобилног робота.

Путање кретања и одговарајући временски параметри добијају се на основу матрица T_s и R_{T_s} . Матрица T_s , формата $(i \times j)$, генерише се помоћу униформне расподеле у односу на номиналне вредности T према следећим изразима:

$$T_1(i,j) = T(i,j) - \Delta T(i,j) \quad (5.1)$$

$$T_2(i,j) = T(i,j) + \Delta T(i,j) \quad (5.2)$$

Како је усвојено да је горње одступање једнако доњем и износи $\Delta T(i,j) = T(i,j) \cdot t/2$, заменом у једначине 5.1 и 5.2 добијају се следеће једначине:

$$T_1(i,j) = T(i,j) - T(i,j) \cdot t/2 \quad (5.3)$$

$$T_2(i,j) = T(i,j) + T(i,j) \cdot t/2 \quad (5.4)$$

$$T_s(i,j) = \text{random}(\text{'unif'}, T_1(i,j), T_2(i,j)) \quad (5.5)$$

где је:

i – број репрезентативних делова;

j – број чворова (машине и сладишта) у технолошком окружењу;

$T_1(i,j)$ – горња граница трајања времена обраде дела i на машини j ;

$T_2(i,j)$ – доња граница трајања времена обраде дела i на машини j ;
 $T(i,j)$ – номинална вредност времена обраде дела i на машини j ;
 t – толеранција; укупно дозвољено процентуално одступање времена трајања технолошке операције од номиналне вредности;
 $T_S(i,j)$ – параметар (време трајања обраде дела i на машини j); случајни број генерисан униформном расподелом у интервалу $[T_1(i,j), T_2(i,j)]$.

Аналогно се генерише и матрица времена кретања између чворова - R_{TS} формата $(j \times j)$.

$$R_{T_1}(i,j) = R_T(i,j) - \Delta R_T(i,j) \quad (5.6)$$

$$R_{T_2}(i,j) = R_T(i,j) + \Delta R_T(i,j) \quad (5.7)$$

Пошто је усвојено да је горње одступање једнако доњем и износи $\Delta R_T(i,j) = R_T(i,j) \cdot t/2$, заменом у једначине 5.6 и 5.7 добијају се следеће једначине:

$$R_{T_1}(i,j) = R_T(i,j) - R_T(i,j) \cdot t/2 \quad (5.8)$$

$$R_{T_2}(i,j) = R_T(i,j) + R_T(i,j) \cdot t/2 \quad (5.9)$$

$$R_{TS}(i,j) = \text{random}('unif', R_{T_1}(i,j), R_{T_2}(i,j)) \quad (5.10)$$

где је:

i, j – број чворова (машине и сладишта) у технолошком окружењу, $i=j$;
 $R_{T_1}(i,j)$ – горња граница трајања времена кретања робота од чвора i до чвора j ;
 $R_{T_2}(i,j)$ – доња граница трајања времена кретања робота од чвора i до чвора j ;
 $R_T(i,j)$ – номинална вредност времена кретања од чвора i до чвора j ;
 t – толеранција, укупно дозвољено процентуално одступање времена кретања робота од номиналне вредности;
 $R_{TS}(i,j)$ – параметар (време трајања кретања робота од чвора i до чвора j); случајни број генерисан униформном расподелом у интервалу $[R_{T_1}(i,j), R_{T_2}(i,j)]$.

План експеримента за прикупљање парова за обучавање вештачких неуронских мрежа приказан је у табели 5.1. Варирањем толеранције t у границама $\pm 25\%$, добијају се различите вредности горњег ($\Delta T(i,j)$) и доњег ($\Delta R_T(i,j)$) одступања чланова матрица ΔT и ΔR_T . На основу добијених одступања следи и различита горња и доња граница ($T_1(i,j)$, $T_2(i,j)$ и $R_{T_1}(i,j)$, $R_{T_2}(i,j)$), а сходно њима различите матрице T_S и R_{TS} и различити вектори $putanja_k$ и $vreme_k$. Вектор $putanja_k$ представља вектор чворова, док вектор $vreme_k$ даје времена кретања мобилног робота између чворова датих у вектору $putanja_k$.

Табела 5.1: План експеримента за генерисање обучавајућих парова ВНМ

Редни бр. експ.	Толеранција t [%]	Матрица T_S [s]	Матрица R_{TS} [s]	Пућања кретања	Време кретања
1	0	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_1	vreme_1
2	0,5	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_2	vreme_2
3	0,5	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T)$	putanja_3	vreme_3
4	0,1	$T_S = f(T)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_4	vreme_4
5	0,2	$T_S = f(T)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_5	vreme_5
6	0,2	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_6	vreme_6
7	1	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_7	vreme_7
8	1	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_8	vreme_8
9	1	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_9	vreme_9
10	1	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_10	vreme_10

11	2	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_11	vreme_11
12	2	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_12	vreme_12
13	2	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_13	vreme_13
14	2	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_14	vreme_14
15	5	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_15	vreme_15
16	10	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_16	vreme_15
17	20	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_17	vreme_17
18	30	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_18	vreme_18
19	30	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_19	vreme_19
20	30	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_20	vreme_20
21	40	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_21	vreme_21
22	40	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_22	vreme_22
23	40	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_23	vreme_23
24	40	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_24	vreme_24
25	40	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_25	vreme_25
26	50	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_26	vreme_26
27	50	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_27	vreme_27
28	50	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_28	vreme_28
29	50	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_29	vreme_29
30	50	$T_S = f(T, T \cdot t/2)$	$R_{TS} = f(R_T, R_T \cdot t/2)$	putanja_30	vreme_30

Вектори putanja_k и vreme_k имају следеће записе, респективно:

$$\text{putanja}_k = [\text{чвор}(k,1) \dots \text{чвор}(k,i) \dots \text{чвор}(k,n)]; \quad (5.11)$$

$$\text{vreme}_k = [\text{vreme}(k,1) \dots \text{vreme}(k,i) \dots \text{vreme}(k,n-1)]; \quad (5.12)$$

где је:

k – број експеримената;

putanja_k – вектор чворова које генерише Алгоритам#2;

vreme_k – вектор времена кретања робота између генерисаних чворова;

n – број чворова путање;

чвор(k, i) – i-ти чвор k-те путање;

Векторски приказ свих k (30) генерисаних путања и времена дат је изразима који следе.

$$\text{putanja}_1 = [\text{чвор}(1,1) \text{ чвор}(1,2) \text{ чвор}(1,3) \dots \text{чвор}(1,i) \dots \text{чвор}(1,n)];$$

$$\text{putanja}_2 = [\text{чвор}(2,1) \text{ чвор}(2,2) \text{ чвор}(2,3) \dots \text{чвор}(2,i) \dots \text{чвор}(2,n)];$$

$$\text{putanja}_3 = [\text{чвор}(3,1) \text{ чвор}(3,2) \text{ чвор}(3,3) \dots \text{чвор}(3,i) \dots \text{чвор}(3,n)];$$

⋮

$$\text{putanja}_{30} = [\text{чвор}(30,1) \text{ чвор}(30,2) \text{ чвор}(30,3) \dots \text{чвор}(30,i) \dots \text{чвор}(30,n)];$$

$$\text{vreme}_1 = [\text{vreme}(1,1) \text{ vreme}(1,2) \text{ vreme}(1,3) \dots \text{vreme}(1,n-1)];$$

$$\text{vreme}_2 = [\text{vreme}(2,1) \text{ vreme}(2,2) \text{ vreme}(2,3) \dots \text{vreme}(2,n-1)];$$

$$\text{vreme}_3 = [\text{vreme}(3,1) \text{ vreme}(3,2) \text{ vreme}(3,3) \dots \text{vreme}(3,n-1)];$$

⋮

$$\text{vreme}_{30} = [\text{vreme}(30,1) \text{ vreme}(30,2) \text{ vreme}(30,3) \dots \text{vreme}(30,n-1)];$$

Димензије вектора putanja_k је n, док је димензија вектора vreme_k n-1, при чему је k укупан број експеримената и може узети вредност k=1,...,30. Тако временски параметар k-те путање (vreme(k,i)) одговара времену кретања робота између чворова чвор(k,i-1) и чвор(k,i).

Како је планом експеримента предвиђено генерисање 30 различитих путања кретања, за свака два узастопна чвора исте путање (чвор(k,i-1) и чвор(k,i)) карактеристичан је један одговарајући временски параметар ($v_{\text{теме}}(k,i)$).

У циљу обучавања ВМ коришћен је *Matlab Neural Network Toolbox*, са Левенберг-Маркеовим алгоритмом учења [10] и сигмоидном активационом функцијом. ВМ има задатак да учи пресликавање између улазног скупа (чвор(k,i-1)) и излазног скупа (чвор(k,i)) на основу задатог времена $v_{\text{теме}}(k,i)$. За пример генерисања чворова путање putanja_k , где је $k=1$ и број чворова $n=10$ (n се дефинише Алгоритмом#2), табелом 5.2 приказан је план експеримента за обучавање ВМ, а табелом 5.3 резултати обучавања ВМ за генерисање чворова путање на основу временских параметара.

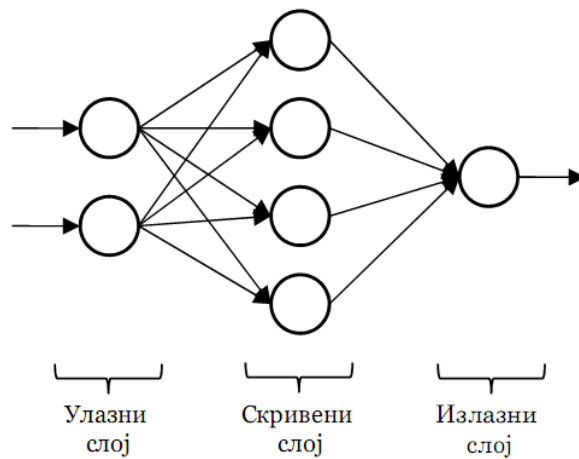
Табела 5.2: План експеримента за обучавање ВМ за генерисање чворова путање putanja_1 на основу временских параметара

Редни бр. експ.	Параметар учења	Број скривених слојева	Број неурона у првом скривеном слоју	Број неурона у другом скривеном слоју
1	0,05	1	3	-
2	0,05	1	10	-
3	0,05	2	5	10
4	0,05	2	10	20
5	0,1	1	4	-
6	0,1	2	10	20
7	0,5	1	4	-
8	0,5	2	10	20
9	0,8	1	4	-
10	0,8	2	10	20

Табела 5.3: Резултати обучавања ВМ за генерисање чворова путање на основу временских параметара

Редни бр. експ.	Број итерација	Завршен процес минимизације грешке	Остварена минимална грешка	Остварена вредност градијента	Број негативних валидација мреже
1	202	да	$1 \cdot 10^{-11}$	$2,68 \cdot 10^{-13}$	0
2	25	не	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	6
3	17	не	$1 \cdot 10^{-11}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$	6
4	14	не	$1 \cdot 10^{-7}$	$6,35 \cdot 10^{-5}$	6
5	996	да	$1 \cdot 10^{-13}$	$9,99 \cdot 10^{-11}$	0
6	77	не	$1 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	6
7	10	не	$1 \cdot 10^{-6}$	$7,11 \cdot 10^{-5}$	6
8	18	не	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	6
9	8	не	$1 \cdot 10^{-8}$	$7,14 \cdot 10^{-4}$	6
10	11	не	$1 \cdot 10^{-8}$	$3,067 \cdot 10^{-7}$	6

Коначна одлука о избору ВМ доноси се на основу анализе резултата датих у табели 5.3. Поређењем остварене минималне грешке и постигнуте вредности градијента за свих 10 експеримената закључује се да најнижу вредност грешке и градијента има ВМ са редним бројем 5. Може се уочити да је најбоље резултате показала мрежа са четири неурона у једном скривеном слоју и параметром учења $\eta=0,05$. Грешка учења износила је $1 \cdot 10^{-13}$. Архитектура вештачке неуронске мреже приказана је на слици 5.4.



Слика 5.4: Архитектура вештачке неуронске мреже

Први неурон у улазном слоју представља чвор(k,i) у коме се робот тренутно налази, док други неурон представља i -ти члан вектора $v_{\text{time}}(k,i)$ и одређује време кретања између чворова чвор($k,i-1$) и чвор(k,i). Изразни неурон генерише чвор($k,i+1$) тј. наредни чвор у који робот прелази. Симулација технолошког процеса извршена је у софтверском пакету *Matlab* ради добијања временских параметара процеса, а ВНМ-ом се на основу добијених временских параметара процесирају информације о технолошком процесу и генерише чвор у који робот прелази. На тај начин, сваки члан матрица T и R_T утиче на планирање путање и одабир сваког наредног чвора. С тим у вези треба напоменути да се не генерише једна путања коју робот прати, већ номинална путања бива абдејтована на основу симулираних података о стању процеса и времена кретања робота.

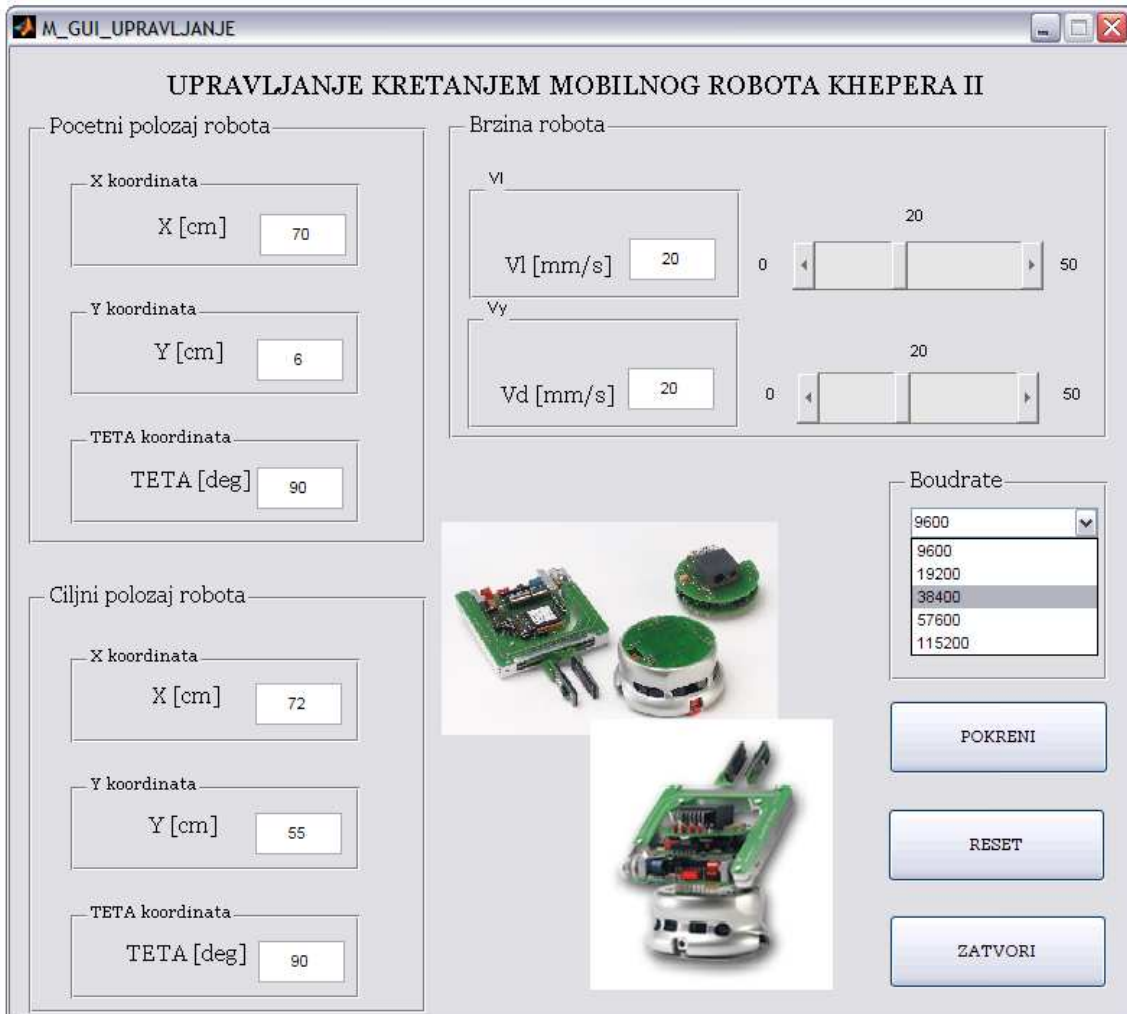
6. Тестирање и верификација тачности и перформанси развијених експерименталних и симулационих решења интелигентног понашања мобилног робота у дефинисаном радном простору у оквиру лабораторијског модела технолошког окружења

За потребе тестирања симулационих решења и у циљу верификације предложеног концепта за унутрашњи транспорт материјала интелигентним мобилним роботом извршени су два експеримента. Том приликом коришћен је мобилни робот *Khepera II*. За управљање кретањем мобилног робота развијен је софтвер у програмском пакету *Matlab*. Основни прозор графичког корисничког интерфејса (GUI - Graphical User Interface) приказан је на слици 6.1. Кликот на дугме „ПОКРЕНИ” отвара се прозор приказан на слици 6.2, у коме се врше подешавања потребних улазних параметара.



Слика 6.1: Основни прозор графичког корисничког интерфејса

Поред задавања почетог и циљног положаја мобилног робота, софтвер даје могућност задавања брзине левог и десног точка, као и одабир једне од понуђених брзина комуникације (Boudrate).



Слика 6.2: Прозор за управљање кретањем мобилног робота Khepera II

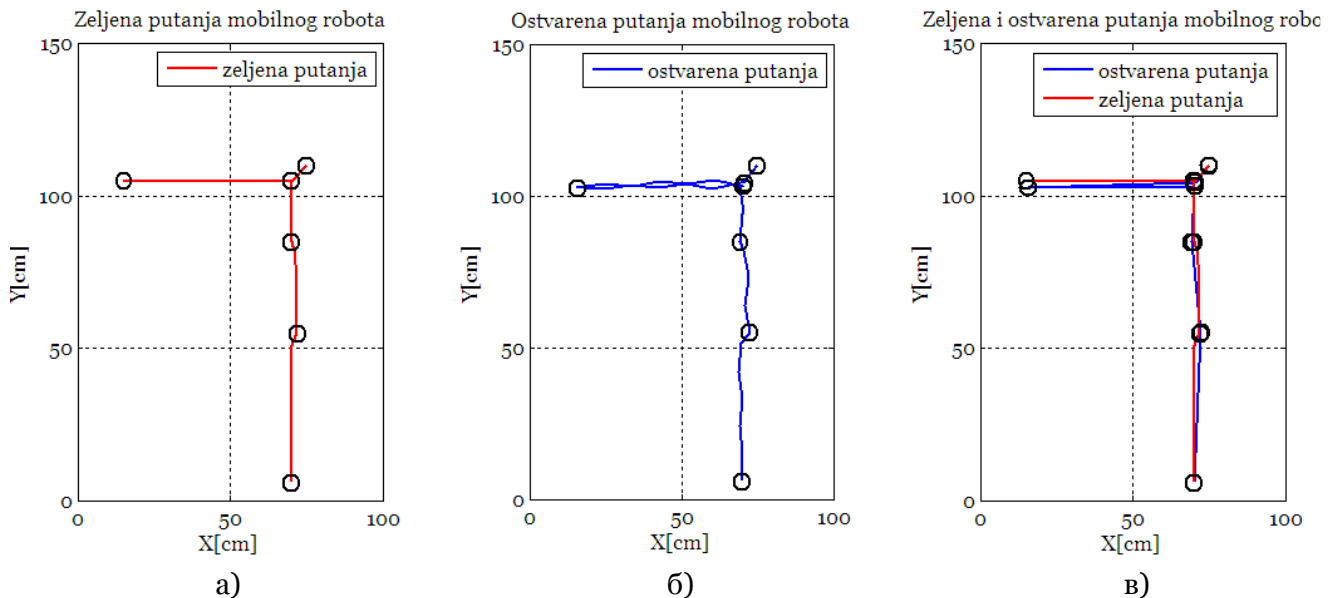
6.1 Експеримент 1: Праћење генерисане путање кретања

У овом експерименту, за задатак праћења путање, одабран је део номиналне путање кретања генерисане на основу параметара технолошког процеса. Усвојен почетни положај робота је $x_p=[70 \ 6 \ 90]$, што одговара координатама чвора#1, односно, координатама улазног складишта полуфабриката од лима, док су координате циљне тачке $x_c=[75 \ 110]$, што одговара координатама чвора#7, односно, координатама у које се позиционира робот при опслуживању стубне бушилице. Координате осталих међучворова тј. положаји у којима робот може вршити опслуживање машина и положаји у које се врши транспорт делова за које је завршена технолошка операција (координате одговарајућих складишта) дати су у табели 6.1.

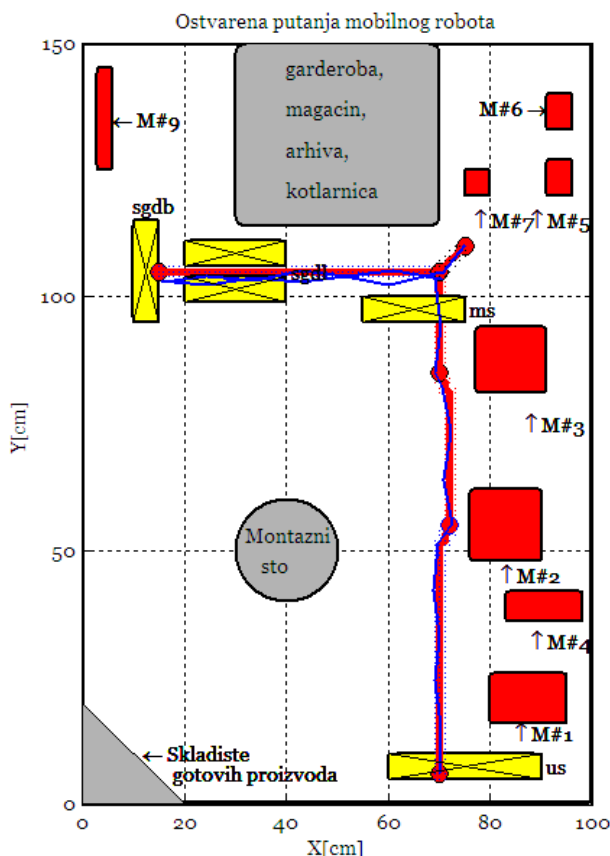
Табела 6.1: Координате чворова у лабораторијском моделу технолошког окружења

	уc	М#2	М#3	М#4	М#5	М#7	М#9	сгдл	мс	сгдб
x	70	72	70	75	70	75	15	30	50	20
y	6	55	85	40	105	110	105	105	100	105

Брзине левог и десног точка мобилног робота током кретања кроз технолошко окружење биле су једнаке и износиле су $V_1 = V_d = 20[\text{mm/s}]$. На слици 6.3 дат је упоредни приказ жељене (слика 6.3 (а)), остварене (слика 6.3 (б)) и жељене и остварене (слика 6.3 (в)) путање кретања мобилног робота. Са слике је очигледно да се жељена и остварена номинална путања кретања разликују, па се тачност позиционирања може интерпретирати преко параметара MSE и RMSE [10]. Сума квадрата свих грешака позиционирања по x координати у овом експерименту износи 16,7934 [cm], а по y координати 43,8711 [cm]. Средња квадратна грешка (MSE) позиционирања по x координати износи 0,5598 [cm], а по y координати 1,4624 [cm]. Коначно, корен средње квадратне грешке (RMSE) по x координати је 0,7482 [cm], а по y координати 1,2093 [cm].



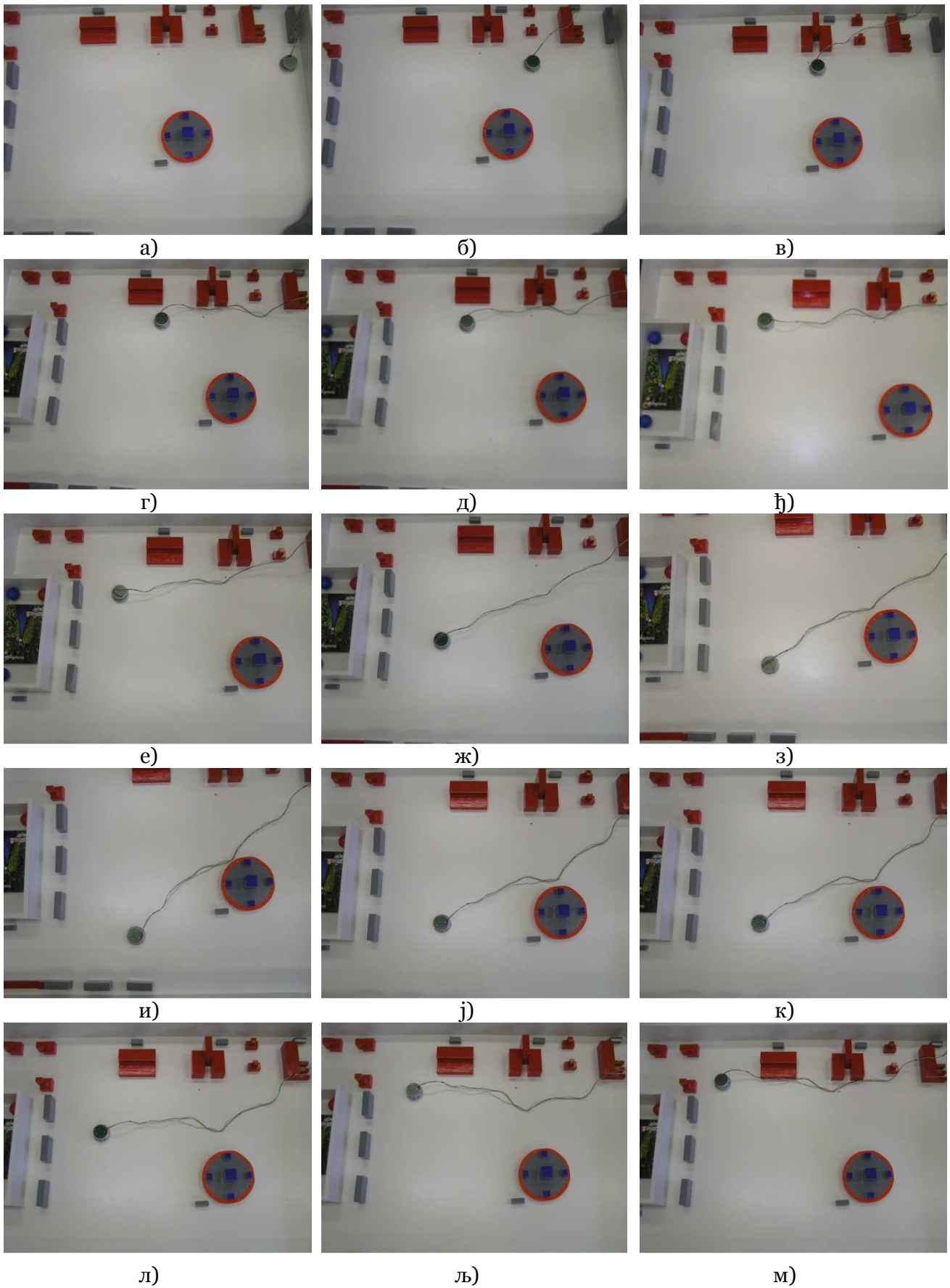
Слика 6.3: Упоредни приказ жељене и остварене путање кретања мобилног робота



На слици 6.4 црвеном линијом је приказана жељена, а плавом остварена путања кретања мобилног робота, генерисана у *Matlab* софтверском пакету, при кретању кроз лабораторијски модел технолошког окружења. Такође, дат је и распоред машина и складишта које робот посећује током транспорта материјала, при чему су машине приказане црвеним, а складишта жутим правоугаоницима.

Сликом 6.5 (а-м) приказани су остварени положаји мобилног робота током кретања у лабораторијском моделу технолошког окружења. Током кретања робот прати путању задату преко низа чворова и посећује их сходно пројектованом технолошком поступку.

Слика 6.4: Графички приказ кретања мобилног робота у софтверском окружењу *Matlab*

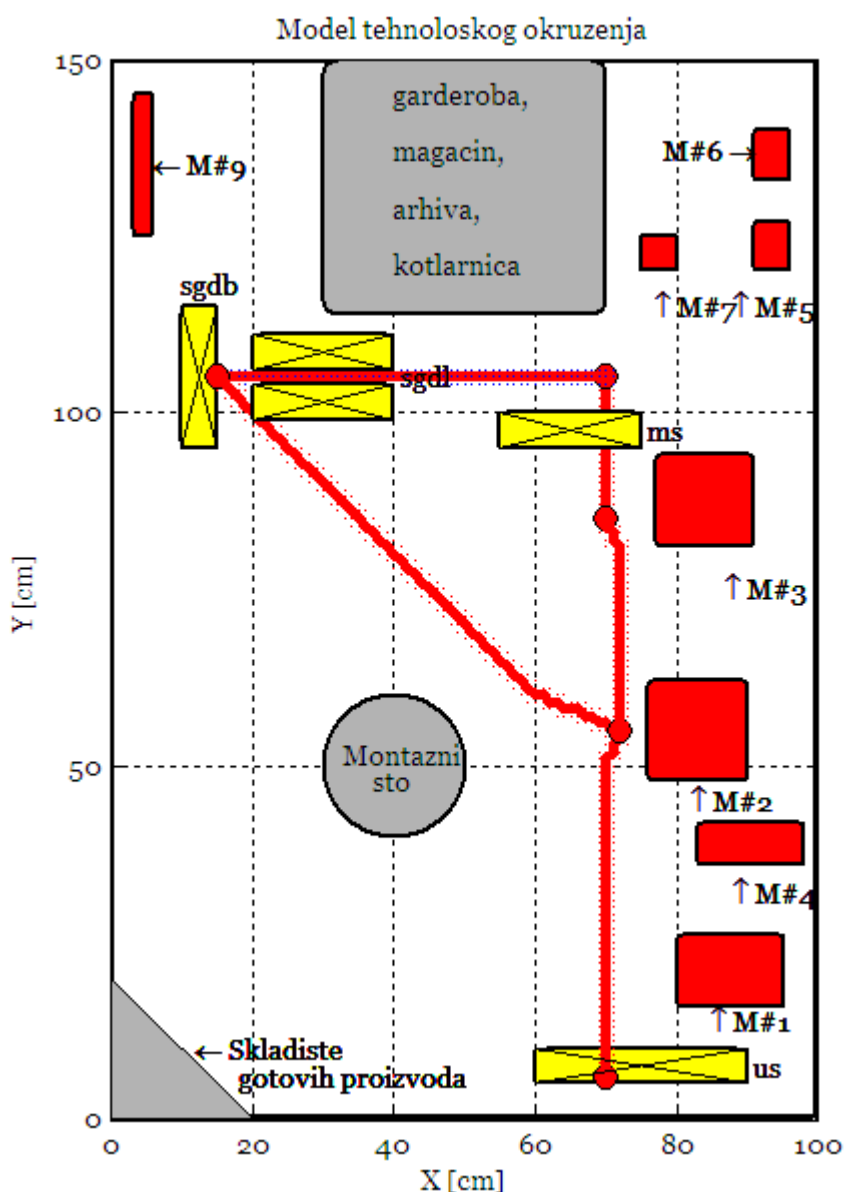


Слика 6.5: Кретање мобилног робота у лабораторјском моделу технолошког окружења - експеримент 1

6.2 Експеримент 2: Праћење путање генерисане као резултат машинског учења мобилног робота применом ВНМ

Други експеримент има за циљ да покаже примену машинског учења базираног на системима вештачких неуронских мрежа на учењу транспортних токова материјала у изабраном производном окружењу.

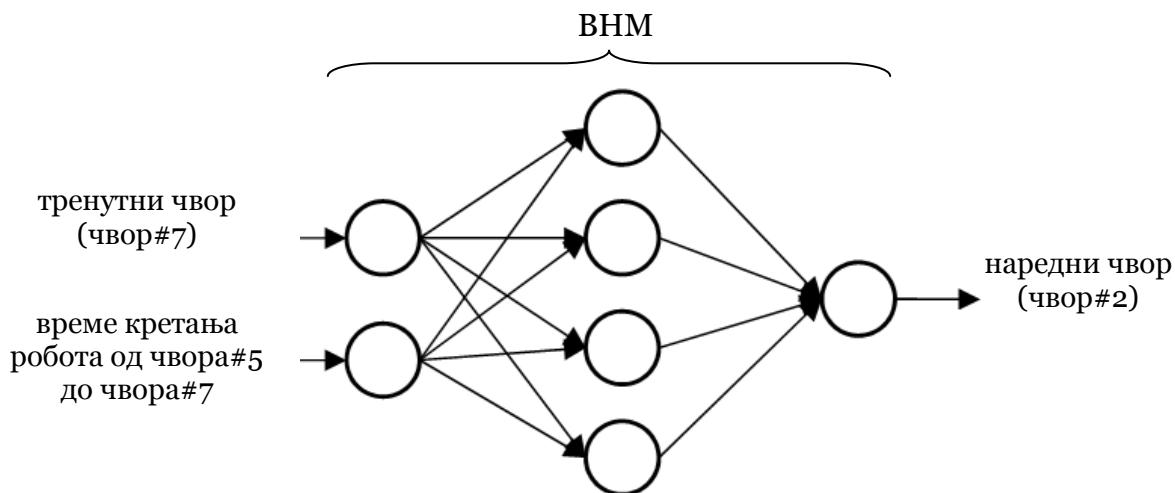
Као и у првом експерименту, почетни положај робота је $x_p = [70 \ 6 \ 90]$, што одговара координатама чвора#1, односно, координатама улазног складишта полуфабриката од лима, док координате циљне тачке биле x_c нису биле познате на самом почетку кретања и зависиле су од времена кретања робота између машина. Брзине левог и десног точка мобилног робота током кретања кроз технолошко окружење биле су једнаке и износиле су $V_1 = V_d = 30$ [mm/s]. Робот се креће до позиција у којима оставља репрезентативне делове на машине за прву операцију (чворови#2,#3,#5 и чвор#7), као што је приказано жељеном путањом на слици 6.6.



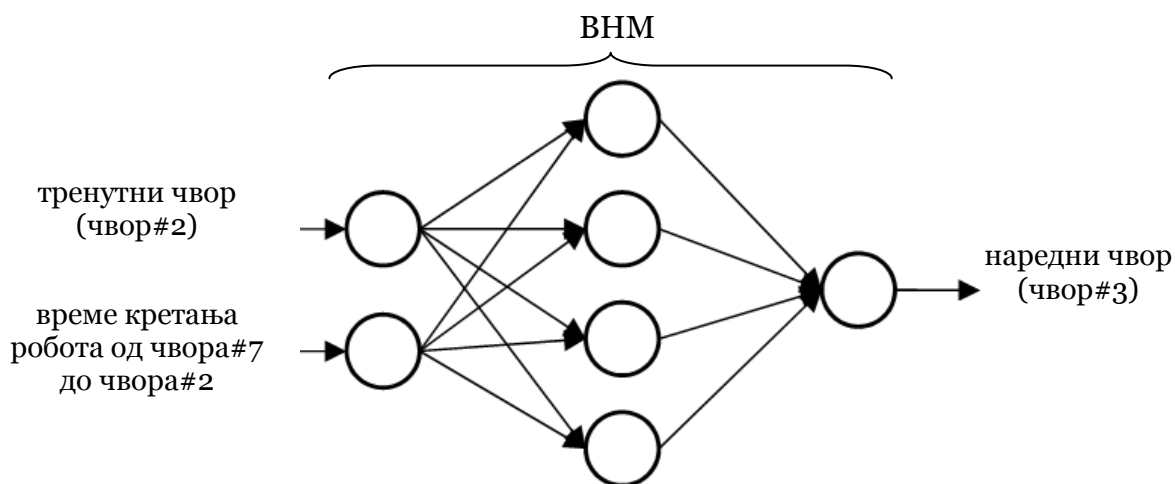
Слика 6.6: Графички приказ кретања мобилног робота у софтверском окружењу Matlab

Када се робот након транспорта последњег репрезентативног дела на машину за прву операцију нађе у чвору#7 (слика 6.9 (ж)), подаци о тренутном положају и времену се обрађују, као што је приказано на слици 6.7. На основу тренутног чвора и експериментом

добијеног времена трајања кретања робота, ВММ дају најближу машину на којој је завршена технолошка операција и тако генеришу информацију о следећој акцији робота. Тада се он креће према наредном чвору (чвор#2), према сликама 6.9 (з - к). Сада чвор#2 постаје тренутни, а време кретања робота од чвора#7 до чвора#2 меродавно за избор наредног чвора (слика 6.8). Као и у претходном случају, ВММ се генерише команда да се из чвора#2 (слика 6.9 (к)), робот креће у чвор#3 оптималном путањом генерисаном А* алгоритмом приказаном на сликама 6.9 (л-љ).



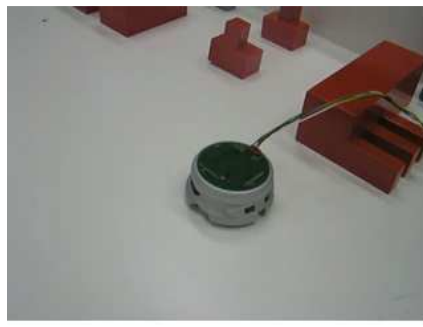
Слика 6.7: Пример генерисања шестог чвора у експерименту 2



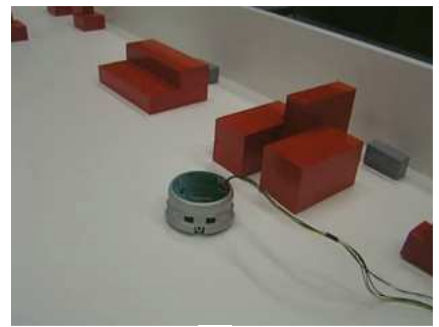
Слика 6.8: Пример генерисања седмог чвора у експерименту 2



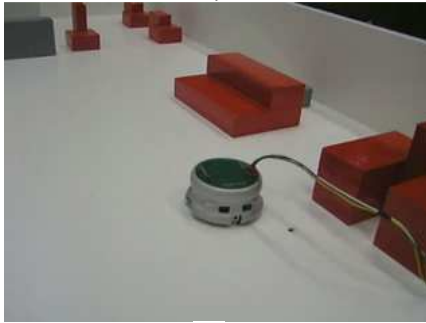
а)



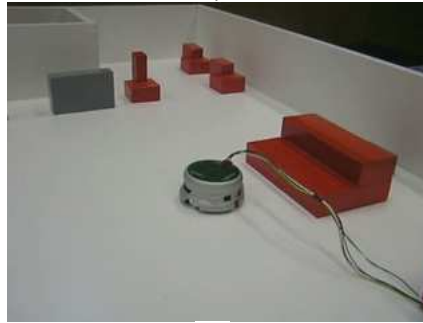
б)



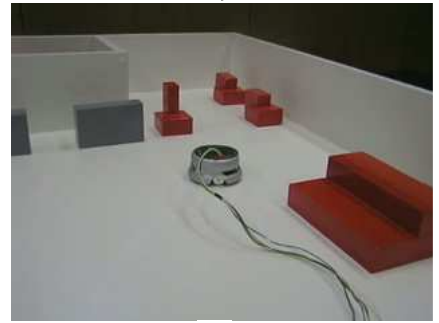
в)



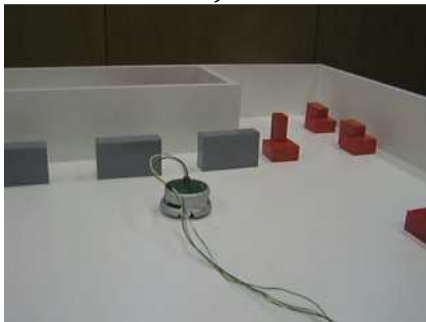
г)



д)



ђ)



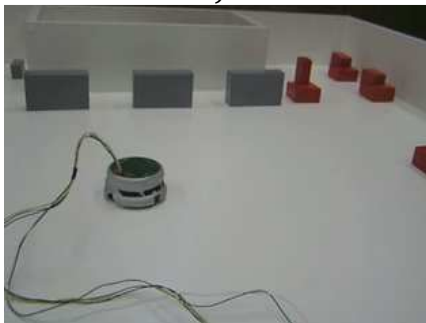
е)



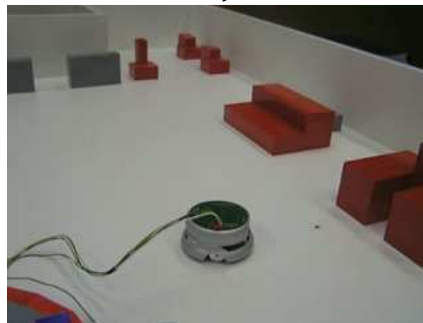
ж)



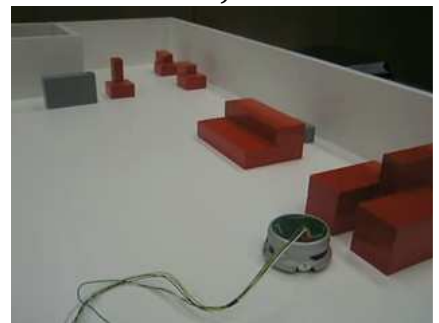
з)



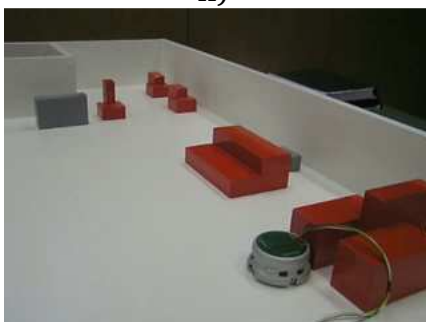
и)



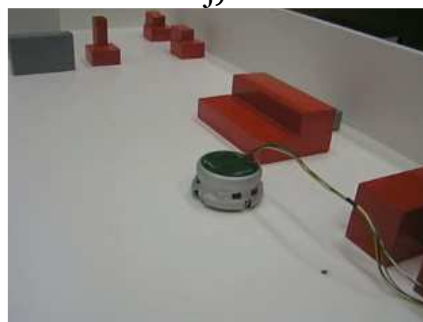
ј)



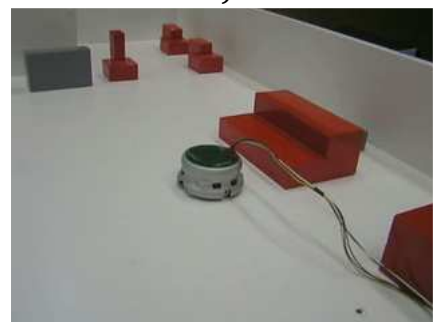
к)



л)



љ)



м)

Слика 6.9: Кретање мобилног робота у лабораторијском моделу технолошког окружења-експеримент 2

7. Закључак и правци будућих истраживања

У оквиру овог дипломског рада представљен је метод за роботизовани унутрашњи транспорт материјала у интелигентном технолошком систему. За разлику од постојећих конвенционалних видова транспорта виљушкарком, манипулација и транспорт материјала интелигентним мобилним роботом пружа предности економске, али и еколошке природе.

Интелигентни мобилни робот при *a priori* познатим статичким препрекама у окружењу има способност да генерише путању кретања у складу са захтевима технолошког процеса и приоритетом опслуживања машина алатки, као и да на основу претходних акција, учи оптималне транспортне путеве и редослед задатака манипулације. Из тог разлога, у овом раду посебна пажња је посвећена алгоритмима за генерисање путање, као и системима вештачких неуронских мрежа, захваљујући којима се овај систем сврстава у класу интелигентних технолошких система.

Основни резултати истраживања, спроведени у оквиру овог дипломског рада, могу се поделити у три групе:

1. Прва група обухвата одабир модела за раванско кретање мобилног робота и генерисање управљања на основу одабраног модела. Естимација пређеног пута оба точка добијена је на основу сензорских информација са енкодера и представља управљачке величине имплементираног модула за управљање положајем. Феномен као што је треће није укључен у модел управљања па се стога јавља разлика између жељене и остварене позиције мобилног робота. Иако је у обављеним експериментима корен средње квадратне грешке по x и y координати за краће путање кретања реда величине центиметра, евидентно је да се при дужим путањама вредност грешке значајно увећава. Из тог разлога, правци даљих истраживања окренути су ка увођењу додатних информација базираних на камери као сензору. Постојање сензорског модела (модела перцепције) би омогућило одређивање положаја мобилног робота у односу на карактеристичне објекте у лабораторијском моделу технолошког окружења и повећало вероватноћу успешног обављања технолошких задатака, нарочито при дужим путањама. Поред проблема локализације, за задатак манипулације делова неопходно је развити и систем препознавања, такође, на бази камере као сензора.
2. Истраживања у оквиру друге групе односе се на развијање и имплементацију алгоритама за генерисање оптималне путање кретања мобилног робота сагласно пројектованим технолошким поступцима за репрезентативне делове. Анализом алгоритама претраживања у домену мобилне роботике издвојена је и примењена група *breadth-first search* алгоритама за генерисање карактеристичних чворова и A^* алгоритам за одабир оптималне путање кретања између њих.
3. Како технолошки процес није детерминистичке природе, трећа фаза истраживања у оквиру овог дипломског рада односила се на предикцију параметара технолошког процеса и развој система за учење карактеристичних временских параметара процеса. У том циљу, извршена је оцена временских норматива технолошког процеса у реалном времену, а прописане временске норме су моделиране сагласно законима униформне расподеле. Након обучавања извршена је и експериментална верификација рада ВНМ у реалном времену и доказано је да се ова парадигма вештачке интелигенције може користити за машинско учење транспортних токова материјала и планирање путање кретања мобилног робота.

За све три групе истраживања развијени су кодови у *Matlab* софтверском пакету и то управљачки код и графички кориснички интерфејс за прву, симулација технолошког процеса за другу и обучавање и тестирање ВНМ за трећу групу истраживања. Развијени кодови имплементирани су на мобилном роботу *Khepera II*, уз експериментална тестирања у лабораторијском моделу технолошког окружења.

Концепти развоја интелигентних технолошких система у домену унутрашњег транспорта материјала много су шири него што овај дипломски рад својим садржајем обухвата. Стога се правци даљих истраживања могу груписати на следећи начин:

- истраживања у области локализације мобилног робота базирана на обради информација са камере *CMUcam2*;
- истраживања у области избегавања препрека базирана на обради информација са *IR* сензора;
- истраживања процеса манипулације делова базирана на примени хватача мобилног робота;

Поред транспорта, у разматраном интелигентном технолошком систему обавља се и задатак манипулације делова. На основу позиције и оријентације дела, добија се позиција и оријентација у којој се робот мора наћи да би након задатка транспорта извршио и постављени задатак манипулације. С обзиром на број степени слободе хватача и хардверску интеграцију са роботом, оријентација хватача при манипулацији иста је као и оријентација робота. Како је средња квадратна грешка позиционирања робота, добијена у поглављу о експерименталним резултатима, по x координати $0,5598$ [cm], а по y координати $1,4624$ [cm], додатну корекцију грешке и додатно адаптивно позиционирање се остварује на основу сензорских информација са камере.

8. Литература

- [1] Бабић, Б., Миљковић, З., Нешић, Н., *Управљање технолошким информацијама у предузећу „BUCK” – Београд, Београд, 2006.*
- [2] Бабић, Б., *Пројектовање технолошких процеса, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2004.*
- [3] Braunl, T., *Embedded Robotics, Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems, Second Edition, 2003.*
- [4] Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L., Thrun, S., *Principles of robot motion: Theory, algorithms and implementations, MIT, Cambridge, 2005.*
- [5] Foo, Y. P. S., Takefuji, Y., *Integer linear programming neural networks for job-shop scheduling, in Proc. 1988 Int. IEEE Conf. Neural Networks, vol. 2, pp. 341-348, 1988.*
- [6] Huang, S. H., Zhang, H. C., *Artificial Neural Networks in Manufacturing: Concepts, Applications, and Perspectives, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGZ – PART A, VOL. 17, NO. 2, JUNE 1994.*
- [7] Kaparathi, S., Suresh, N. C., *A neural network system for shape-based classification and coding of rotational parts, Int. J. Production Research, vol. 29, no. 9, pp. 1771-1784, 1991.*
- [8] Лазић, Д., *Предавања на предмету Аутоматско управљање, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2008.*
- [9] 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.*
- [10] Миљковић З., Александрић Д., *Вештачке неуронске мреже – Збирка решених задатака са изводима из теорије, Универзитет у Београду – Машински факултет, 2009.*
- [11] Miljković, Z., Babić, B., *Machine-Part Family Formation by Using ART-1 Simulator and FLEXY, FME Transactions (ISSN 1451-2092), New Series, Vol.33 No.3, pp. 157-162, University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering, 2005.*
- [12] Миљковић, З., Бабић, Б., *Предавања на предмету Интелигентни технолошки системи (ПРО220-0131), Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2009.*
- [13] Миљковић, З., Милановић Д., Нешић Н., Стошић Д., Милановић С., *Пројектовање производних процеса у предузећу „Монтпројект“ - Београд, Технолошко-развојни пројекат, 2004.*
- [14] Osakada, K., Yang, G. B., *Neural networks for process planning of cold forging, Annals of the CIRP, vol. 40, no. 1, pp. 243-246, 1991.*

- [15] Петровић, М., Лукић Н., Вуковић Н., Миљковић З., Мобилни робот у унутрашњем транспорту материјала интелигентног технолошког система - едукација и развој, 36. ЈУПИТЕР Конференција, 32. симпозијум НУ * РОБОТИ * ФТС, Зборник радова стр. 3.85-3.90, Београд, 2010.
- [16] Петровић, П., Предавања на предмету Мехатронски системи, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2009.
- [17] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004.
- [18] Venugopal, V., Narendran, T. T., Neural network model for design retrieval in manufacturing systems, Computers in Industry, vol. 20, pp. 11-23, 1992.
- [19] Зрнић, Ђ., Фабричка постројења, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 1990.

9. Прилог

9.1 Прилог А: Код у Matlab софтверском пакету за управљање кретањем мобилног робота при реализацији експеримента 1

```
clc; close all; clear all;
ref = kopen([0, 38400, 1])
kSetEncoders(ref)

E = 0; E2 = 0; qa = 0.4611; C = eye(3)*0; kl = 10^-3; kr = 10^-3; b = 53;
k = 1; kk = 3; n = []; m = []; y = [];
enc_old = [0 0]'; enc_old2 = [0 0]'; wp1 = []; wp2 = []; d= []; u= [];

load putanja_cm
x = [700 60 90/57.3]' %pocetni polozej mobilnog robota

for k = 1 : length(putanja_cm)-1
    Path_reduk_cm = M_A_zvezda_testing_putanja(putanja_cm(k:k+1,:))
    Path_reduk_mm = 10*Path_reduk_cm;

    for l = 1 : length(Path_reduk_mm)-1
        wp1 = Path_reduk_mm (l,:)
        wp2 = Path_reduk_mm (l+1,:)
        [d,fi,ksi] = compute_offsets(x,wp1,wp2)

        fi = round(fi);
        if fi > pi*57.3;
            fi = fi - 2*pi*57.3;
        elseif fi < -pi*57.3;
            fi = fi + 2*pi*57.3;
        end

        [n,m,Vl,Vr] = Funkcija_za_n_i_m(fi);
        fil = abs(fi)*qa;

        kSetEncoders(ref);
        speeds2 = [n*20 m*20];
        Vl = speeds2(1); % brzina levog tocka
        Vr = speeds2(2); % brzina desnog tocka
        E2 = 0;
        enc_old2 = [0 0]';

        while 1
            kSetSpeed(ref,Vl/8, Vr/8)
            enc2 = kGetEncoders(ref)
            e2 = (enc2 - enc_old2)*.0833 % u [mm]
            E2 = E2 + (abs(e2(1))+abs(e2(2)))/2
            [x,C] = Khe_odometry(x, C, e2,b,kl,kr) % x u [mm]
            enc_old2 = enc2;
            if E2 >= fil;
                kStop(ref)
                break
            end
        end
    end
end
```

```

end

kSetEncoders(ref);
speeds = [20 20];
Vl = speeds(1);
Vr = speeds(2);
E = 0;
enc_old = [0 0]';

while 2
    kSetSpeed(ref,Vl/8, Vr/8)
    enc = kGetEncoders(ref)
    e = (enc - enc_old)*.0833
    E = E + (e(1)+e(2))/2
    [x,C] = Khe_odometry(x, C, e,b,kl,kr)
    enc_old = enc;
    if E >= d;
        kStop(ref)
        break
    end
end
end
end
kStop(ref)
kclose(ref)

```

9.2 Прилог Б: Код у Matlab софтверском пакету за управљање кретањем мобилног робота при реализацији експеримента 2

```
clc; close all; clear all;

ref = kopen([0, 38400, 1])
kSetEncoders(ref)

E = 0; E2 = 0; qa = 0.4611; C = eye(3)*0; kl = 10^-3; kr = 10^-3; b = 53;
k = 1; kk = 3; n = []; m = []; y = []; TT_1 = [];
enc_old = [0 0]'; enc_old2 = [0 0]'; wp1 = []; wp2 = []; d=[]; u=[]; vreme_real
= [];

load put_dipl
load vnm_tehnosloski_proces_6
load vnm_tehnosloski_proces_7
load vnm_tehnosloski_proces_8
load vnm_tehnosloski_proces_9
load vnm_tehnosloski_proces_10
TT_1 = [TT_1; put_dipl];
putanja_cm = M_cvorovi_putanja_cm(put_dipl);

x = [700 60 90/57.3]' %pocetni polozaj mobilnog robota

for k = 1 : length(putanja_cm)-1
    putanja_cm = M_cvorovi_putanja_cm(put_dipl)
    Path_reduk_cm = M_A_zvezda_testing_putanja(putanja_cm(k:k+1,:))
    Path_reduk_mm = 10*Path_reduk_cm;
    tic
    for l = 1 : length(Path_reduk_mm)-1
        wp1 = Path_reduk_mm (l,:)
        wp2 = Path_reduk_mm (l+1,:)
        [d,fi,ksi] = compute_offsets(x,wp1,wp2)

        fi = round(fi);
        if fi > pi*57.3;
            fi = fi - 2*pi*57.3;
        elseif fi < -pi*57.3;
            fi = fi + 2*pi*57.3;
        end

        [n,m,Vl,Vr] = Funkcija_za_n_i_m(fi);
        fil = abs(fi)*qa;

        kSetEncoders(ref);
        speeds2 = [n*30 m*30];
        Vl = speeds2(1);
        Vr = speeds2(2);
        E2 = 0;
        enc_old2 = 0;
        enc_old2 = [0 0]';

        while 1
            kSetSpeed(ref,Vl/8, Vr/8) % [mm/s]
            enc2 = kGetEncoders(ref) % ocitavanje sa enkodera
            e2 = (enc2 - enc_old2)*.0833 % [mm]
            E2 = E2 + (abs(e2(1))+abs(e2(2)))/2
            [x,C] = Khe_odometry(x, C, e2,b,kl,kr) % x u [mm]
            enc_old2 = enc2;
```

```

        if E2 >= fil;
            kStop(ref)
            break
        end
    end
end

kSetEncoders(ref);
speeds = [30 30];
Vl = speeds(1);    % brzina levog tocka
Vr = speeds(2);    % brzina desnog tocka
E = 0;
enc_old = [0 0]';

while 2
    kSetSpeed(ref,Vl/8, Vr/8)
    enc = kGetEncoders(ref) % ocitavanja sa enkodera
    e = (enc - enc_old)*.0833    % [mm]
    E = E + (e(1)+e(2))/2
    [x,C] = Khe_odometry(x, C, e,b,kl,kr) % x u [mm]
    enc_old = enc;
    if E >= d;
        kStop(ref)
        break
    end
end
end
VREME = toc
vreme_real = [VREME; vreme_real]
if k == 6
    put_sim_7 = sim(vnm_tehnoloski_proces_7,[put_dipl(1,k);vreme_real(k-
1,1)])
    put_dipl(1,k+1) = round (put_sim_7(2,1))
    put_dipl
    TT_1 = [TT_1; put_dipl]
end
if k == 7
    put_sim_8 = sim(vnm_tehnoloski_proces_8,[put_dipl(1,k);vreme_real(k-
1,1)])
    put_dipl(1,k+1) = round (put_sim_8(2,1))
    put_dipl
    TT_1 = [TT_1; put_dipl]
end
if k == 8
    put_sim_9 = sim(vnm_tehnoloski_proces_9,[put_dipl(1,k);vreme_real(k-
1,1)])
    put_dipl(1,k+1) = round (put_sim_9(2,1))
    put_dipl
    TT_1 = [TT_1; put_dipl]
end
if k == 9
    put_sim_10 = sim(vnm_tehnoloski_proces_10,[put_dipl(1,k);vreme_real(k-
1,1)])
    put_dipl(1,k+1) = round (put_sim_10(2,1))
    put_dipl
    TT_1 = [TT_1; put_dipl]
end
end
kStop(ref)
kclose(ref)

```

9.3 Прилог В: Код у Matlab софтверском пакету за обучавање вештачких неуронских мрежа

```
clc; clear all; close all;

load put_31;load put_2;load put_3;load put_4;load put_5;load put_6;load put_7;
load put_8;load put_9;load put_10;load put_11;load put_12;load put_13;
load put_14;load put_15;load put_16;load put_17;load put_18;load put_19;
load put_20;load put_21;load put_22;load put_23;load put_24;load put_25;
load put_26;load put_27;load put_28;load put_29;load put_30;

load vreme_1;load vreme_2;load vreme_3;load vreme_4;load vreme_5;load vreme_6;
load vreme_7;load vreme_8;load vreme_9;load vreme_10;load vreme_11;load
vreme_12;load vreme_13;load vreme_14;load vreme_15;load vreme_16;load
vreme_17;load vreme_18;load vreme_19;load vreme_20;load vreme_21;load
vreme_22;load vreme_23;load vreme_24;load vreme_25;load vreme_26;load
vreme_27;load vreme_28;load vreme_29;load vreme_30;

VREME = [vreme_1 vreme_2 vreme_3 vreme_4 vreme_5 vreme_6 vreme_7 vreme_8 ...
vreme_9 vreme_10 vreme_11 vreme_12 vreme_13 vreme_14 vreme_15 ...
vreme_16 vreme_17 vreme_18 vreme_19 vreme_20 vreme_21 vreme_22 ...
vreme_23 vreme_24 vreme_25 vreme_26 vreme_27 vreme_28 vreme_29
vreme_30]

PUT = [put_31; put_2; put_3; put_4; put_5; put_6; put_7; put_8; put_9; ...
put_10; put_11; put_12; put_13; put_14; put_15; put_16; put_17; put_18;
put_19; put_20; put_21; put_22; put_23; put_24; put_25; put_26; ...
put_27; put_28; put_29; put_30]'

%=====
maxvreme = max(max(VREME)); minvreme = min(min(VREME));
maxput = max(max(PUT)); minput = min(min(PUT));
MIN = min(minput,minvreme);
MAX = max(maxput,maxvreme);

PUT_VREME_6 = [PUT(5,:);VREME(4,:)]
PUT_VREME_7 = [PUT(6,:);VREME(5,:)]
PUT_VREME_8 = [PUT(7,:);VREME(6,:)]
PUT_VREME_9 = [PUT(8,:);VREME(7,:)]
PUT_VREME_10 = [PUT(9,:);VREME(8,:)]

vnm_tehnosloski_proces_6 = newff([MIN MAX; MIN MAX],[4 2],{'tansig' 'purelin'})
vnm_tehnosloski_proces_7 = newff([MIN MAX; MIN MAX],[4 2],{'tansig' 'purelin'})
vnm_tehnosloski_proces_8 = newff([MIN MAX; MIN MAX],[4 2],{'tansig' 'purelin'})
vnm_tehnosloski_proces_9 = newff([MIN MAX; MIN MAX],[4 2],{'tansig' 'purelin'})
vnm_tehnosloski_proces_10 = newff([MIN MAX; MIN MAX],[4 2],{'tansig' 'purelin'})
%=====
%Parametri neuronskih mreza
%=====
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.show = 50;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.lr = 0.05;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.mc = 0.9;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.mu = 0.001;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.epochs = 1000;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.goal = 1e-6;
vnm_tehnosloski_proces_6.trainParam.max_fail = 10;

vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.show = 50;
vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.lr = 0.05;
vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.mc = 0.9;
```

```

vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.mu = 0.001;
vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.epochs = 1000;
vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.goal = 1e-6;
vnm_tehnosloski_proces_7.trainParam.max_fail = 10;

vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.show = 50;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.lr = 0.05;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.mc = 0.9;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.mu = 0.001;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.epochs = 1000;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.goal = 1e-6;
vnm_tehnosloski_proces_8.trainParam.max_fail = 10;

vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.show = 50;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.lr = 0.2;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.mc = 0.9;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.mu = 0.001;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.epochs = 1000;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.goal = 1e-6;
vnm_tehnosloski_proces_9.trainParam.max_fail = 10;

vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.show = 50;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.lr = 0.8;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.mc = 0.9;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.mu = 0.001;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.epochs = 1000;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.goal = 1e-6;
vnm_tehnosloski_proces_10.trainParam.max_fail = 10;

vnm_tehnosloski_proces_6 = train(vnm_tehnosloski_proces_6,PUT_VREME_6,PUT(5:6,:))
vnm_tehnosloski_proces_7 = train(vnm_tehnosloski_proces_7,PUT_VREME_7,PUT(6:7,:))
vnm_tehnosloski_proces_8 = train(vnm_tehnosloski_proces_8,PUT_VREME_8,PUT(7:8,:))
vnm_tehnosloski_proces_9 = train(vnm_tehnosloski_proces_9,PUT_VREME_9,PUT(8:9,:))
vnm_tehnosloski_proces_10 =
train(vnm_tehnosloski_proces_10,PUT_VREME_10,PUT(9:10,:))
%=====

put_sim_6 = sim(vnm_tehnosloski_proces_6,[PUT(5,:);VREME(4,:)])
put_sim_7 = sim(vnm_tehnosloski_proces_7,[PUT(6,:);VREME(5,:)])
put_sim_8 = sim(vnm_tehnosloski_proces_8,[PUT(7,:);VREME(6,:)])
put_sim_9 = sim(vnm_tehnosloski_proces_9,[PUT(8,:);VREME(7,:)])
put_sim_10 = sim(vnm_tehnosloski_proces_10,[PUT(9,:);VREME(8,:)])

save vnm_tehnosloski_proces_6
save vnm_tehnosloski_proces_7
save vnm_tehnosloski_proces_8
save vnm_tehnosloski_proces_9
save vnm_tehnosloski_proces_10

```