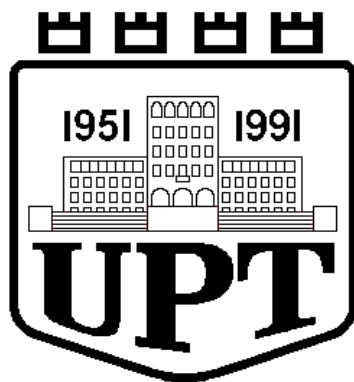




MARGARITA GJONAJ
PËR MARRJEN E GRADËS
“DOKTOR”
NË “INXHINJERI ELEKTRIKE”
DREJTIMI “AUTOMATIZIM I INDUSTRIË”

DISERTACION

LOKALIZIMI, IDENTIFIKIMI DHE NAVIGIMI NË ROBOTËT E LËVIZSHËM

Udhëheqës Shkencor
Prof.Dr. BETIM ÇIÇO

Tiranë, 2016

LOKALIZIMI, IDENTIFIKIMI DHE NAVIGIMI NË ROBOTËT E LËVIZSHËM

Disertacioni

i paraqitur në Universitetin Politeknik të Tiranës

për marrjen e gradës

“Doktor”

në

“Inxhinjerin Elektrike”

drejtimi Automatizim i Industrisë

nga

Znj. Margarita Gjonaj

2016

Udhëheqës Shkencor
Prof. Dr. BETIM ÇIÇO

Juria

I aprovuar nga

_____, Kryetari i Jurisë së Disertacionit të Doktoraturës

_____, Anëtar i Jurisë së Disertacionit të Doktoraturës

_____, Anëtar i Jurisë së Disertacionit të Doktoraturës

_____, Anëtar i Jurisë së Disertacionit të Doktoraturës

_____, Anëtar i Jurisë së Disertacionit të Doktoraturës

PËRMBAJTJA

LISTAE FIGURAVE	V
FALENDERIME	VIII
ABSTRACT	IX
ABSTRAKT	X
HYRJE	13
1.1 HYRJE	13
1.2 MOTIVACIONET	16
1.3 QËLLIMI DHE OBJEKTIVAT E KËRKIMIT	16
1.4 KONTRIBUTET	17
1.5 ARRITJET	18
1.6 ORGANIZIMI I TEZËS	18
KAPITULLI 2	19
SHIKIM MBI METODOLOGJITË E KONTROLLIT PËR ROBOTËT E LËVIZSHËM	19
2.1 HYRJE	19
2.2 PROBLEMET E KONTROLLIT NË ROBOTIN E LËVIZSHËM	20
2.3 GABIM I NDEKJES SË TRAJKTORES NË ROBOTIN E LËVIZSHËM	21
2.4 STRATEGJITË DHE METODOLOGJITË E KONTROLLIT PËR ROBOTIN E LËVIZSHËM	22
2.4.1 Kontrolli i Ndekjes së Trajektores Bazuar në Modelin Kinematik të Robotit	22
2.4.2 Kontrolli i Ndekjes së Trajektores nga Kinematika Backstepping në Dinamikën Backstepping	23
2.4.3 Rregullatorët ‘Sliding Mode’ të Ndekjes së Trajektores	23
2.4.4 Rregullatorët me Logjik ‘Fuzzy’ të Ndekjes së Trajektores	24
2.4.5 Rregullatorët Adaptive të Ndekjes së Trajektores	26
2.4.6 Rregullatorët e Ndekjes së Trajektores Bazuar në Rrjet Neural	26
2.4.7 Rregullatorët PID	27
2.4.8 Algoritma të Planifikimit të Rrugës	28
2.5 PËRMBLEDHJE	28
KAPITULLI 3	29
MODELIMI DHE SIMULIMI I ROBOTIT TË LËVIZSHËM	29
3.1 HYRJE	29
3.2 LËVIZJA E ROBOTËVE TË LËVIZSHËM ME RROTA DIFERENCIALE	29
3.2.1. Qëndrueshmëria	33
3.2.2. Manovrueshmëria	33
3.2.3. Kontrollueshmëria	34
3.3 SISTEMET KOORDINATIV	34
3.3.1 MODELI KINEMATIK I ROBOTIT TË LËVIZSHËM	35
3.3.2 Modeli i Kinematikës së Drejtë	36
3.3.3 Kufizimet Kinematike	37

3.4	MODELIMI DINAMIK I ROBOTIT TË LËVIZSHËM	39
3.4.1	Qasja Dinamike Sipas Langranzhit	39
3.5	MODELIMI I EKZEKUTUESVE	46
3.6	SIMULIMI I SISTEMIT	47
3.7	PËRMBLEDHJE	52
KAPITULLI 4		53
PROJEKTIMI I RREGULLATORIT TË NDJEKJES SË TRAJEKTORES		53
4.1	HYRJE	53
4.2	RREGULLATORI 'BACKSTEPPING'	54
4.2.1	Analizat e Qëndrueshmërisë Sipas Lyapunov	55
4.3	PROJEKTIMI I RREGULLATORIT BACKSTEPPING DUKE PËRDORUR METODËN E LIDHJES SË KUNDËRT JOLINEARE	60
4.3.2	Rezultatet në Simulink	61
4.3.3	Efektet e Shqetësimeve dhe Pasqurive të Modelit	67
4.4	KONCEPTIMI DHE PROJEKTIMI I RREGULLATORIT ME RRJET NEURAL	71
4.4.1.2	Vetitë e Rrjetit Neural	74
4.4.1.3	Trajnimi i Rrjetit Neural	75
4.4.1.4	Zhvillimi dhe Implementimi i Rrjetit Neural	77
4.4.2	Projektimi i Rregullatorit i Ndjekjes së Trajektores me Model Invers të NN	81
4.4.2.1	Derivimi i Algoritmit të të Mësuarit të NN me Model Invers	83
4.4.2.1.1	Llogaritja e Termave Derivativ të Rrjetit Neural	84
4.5	ANALIZA KRAHASUESE	85
KONCEPTIMI DHE PROJEKTIMI I RREGULLATORIT ADAPTIV I NDJEKJES SË TRAJEKTORES		91
5.1	HYRJE	91
5.2	RREGULLATORI BACK-STEPPING ADAPTIV	92
5.2.2	Llogaritja e Jacobian-it Duke Përdorur Modelin Direkt të NN	94
5.3	ANALIZAT DHE REZULTATET E SIMULIMIT	96
5.4	ANALIZA KRAHASUESE	97
5.5	KONKLUZIONE DHE ANALIZA KRAHASUESE	110
KONSIDERATA PËRFUNDIMTARE		117
6.1	HYRJE	117
6.2	PËRMBLEDHJE	117
6.3	KONKLUZIONE	118
6.4	MUNDËSI PËR HULUMTIME PËR TË ARDHMEN	119
REFERENCAT		119

LISTAE FIGURAVE

Figura 2-1. Skema e përgjithshme e kontrollit për navigimin e robotëve të lëvizshëm ...	19
Figura 3-1: Forma e një rrote konvencionale.....	31
Figura 3-2: Tipe të ndryshme të rrotave konvencionale	31
Figura 3-3: Forma skematike e një rrote Suedeze	32
Figura 3-4: Llojet e ndryshme të tipeve të lëvizjes për rrobotët e lëvizshëm me rrota.....	32
Figura 3-5: Shkalla e manovrimit në robotët e lëvizshëm [2].	33
Figura 3-6: Sistemet koordinativ inercial dhe të robotit	34
Figura 3-7: Modeli i robotit të lëvizshëm me makinë diferenciale.....	36
Figura 3-8: Kufizimi nonholonomic në lëvizjen e robotit	38
Figura 3-9: Shpejtësitë e qendrës së robotit.....	40
Figura 3-10: Diagrami i trupit të lirë të robotit	43
Figura 3-13:Diagrama bllok nëSimulink që simulon pjesën mekanike të modelit të robotit	48
Figura 3-15: Bllok Diagrama në Simulink i Modeleve të Ekzekutuesve që i shtohet Modelit Mekanik.....	49
Figura 3-16: Diagrama Bllok ne Simulink e Modelit të plotë të robotit.....	49
Figura 3-17: Lëvizja e robotit në përgjigje të tensionit me të njëjtën amplitudë por me shenjë të kundërt.	50
Figura 3-18: Lëvizja e robotit në prgjigje të dy momenteve të rrotullimit negativ por jo të barabarta.....	51
Figura 3-19: Lëvizja e robotit në përgjigje të dy hyrjeve të momentit rrotullues pozitiv por jo tëbarabarta.	51
Figura4-1: Rregullatori backstepping i bazuar në kinematik.....	54
Figura4-3: Blloku i gjenerimit të trajektores në Simulink/Matlab.....	56
Figura4-4: Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y	57
Figura4-5: Gabimi i trajektores së robotit.....	57
Figura4-6: Trajektorja referencë dhe trajektorja aktuale e robotit në planin x-y.....	58
Figura4-7: Gabimi i trajektores së robotit.....	59
Figura4-8: rregullator backstepping me strukturë me lidhje të kundërt jolineare[46].....	60
Figura4-9: Bllok diagrami në Matlab Simulink për të simuluar përgjigjen e rregullatorit backstepping	61
Figura4-10:Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y	62
Figura4-11: Gabimi i trajektores së robotit.....	63
Figura4-17:Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y	63
Figura4-18: Gabimi i trajektores së robotit.....	64
Figura4-19: Përgjigjja e zhvendosjes këndore të robotit në lidhje me kohën	64
Figura4-20: Përgjigjja e zhvendosjes lineare të robotit në drejtimin-x në lidhje me kohën	65

Figura 4-21: Përgjigjja e zhvendosjes lineare të robotit në drejtimin-y në lidhje me kohën	65
Figura 4-26: Gjendjet fillestare të robotit (x, y, θ): (1, 1, dhe 0)Trajektoja referencë sinusoidale	66
Figura4-27: Gjendjet fillestare të robotit (x, y, θ): (3, 1, dhe 0) trajektorja referencësinusoidale	66
Figura4-28: Ndjekja e trajektores së robotit pa fërkime dhe pasiguri	68
Figura 4-29: Gabimi i ndjekjes së trajektores së robotit pa fërkime dhe pasiguri	68
Figura4-30: Ndjekja e trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi.....	69
Figura 4-31: Gabimi i ndjekjes së trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi	69
Figura 4-32: Ndjekja e trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi	70
Figura 4-33: Gabimi i ndjekjes së trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi	70
Figura 4-34: Modeli matematikor i një neuroni.....	71
Figura4-35: Rrjet neural me një shtresë me s neurone	72
Figura4-36: Rrjet neural me dy shtresa.....	73
Figura 4-37: Funksioni i strukturës përafruese për rrjetat neural	75
Figura4-38: Rrjet neural me dy shtresa.....	76
Figura4-39: Bllok diagram e algoritmit backpropagation.	76
Figura 4-40: Algoritmi i përgjithshëm për implementimin e një trajnuesi të rrjetit neural duke përdorur backpropagation	77
Figura4-41: Një rrjet neural me dy shtresa me dy hyrje dhe me një dalje.....	78
Figura4-42: Dalja reale e funksionit	80
Figura4-43: Dalja e rrjetit neural	80
Figura 4-45: Struktura e rregullatorit backstepping.....	81
Figura4-46: Rrjet neural me model invers.....	83
Figura4-47: Detaje të modelit invers të rrjetit neural.....	84
Figura4-66:Bllok diagram nëSimulink që simulon performancën e rregullatorit të rrjetit neural NN me model invers.....	85
Figura4-68: Krahassimi i trajektores së robotit në planin x-y midis rregullatorit me model	invers 86
Figura4-69: Përgjigjja e gabimit të shpejtësisë mes rregullatorit ‘Backstepping’ dhe rregullatorit me model invers.....	87
Figura4-70: Përgjigjja në kohë e peshave të rrjetit neural	87
Figura 5-1: Struktura e rregullatorit backstepping.....	92
Figura 5-2: Struktura e rregullatorit backstepping adaptiv bazuar në rrjet neural (NN) ..	93
Figura 5-4: Bllok diagrama në Simulink e përdorur të simuloj përgjigjen e rregullatorit që përshtat koeficientët e rregullatorit backstepping	96
Figura 5-5: Blloku me model të drejtpërdrejtë të rrjetit neural (NN)	96

Figura 5-34: Trajektorja e robotit në planin x-y,	98
Figure 5-35: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes së robotit vs. trajektoret e referencës,	
Figure 5-36: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit E_x, E_y dhe E_{th}	98
Figura 5-37: Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit,	99
Figura 5-38: Gabimet në shpejtësinë e robotit.	100
Figura5-39: Momentet rrotulluese të rrotës së djathtë dhe të majtë.	100
Figura5-40: Përgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve	101
Figura5-488: Trajektorja e robotit në planin x-y.	102
Figura5-49: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes së robotit vs. trajektoret e referencës,	103
Figura5-50: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit E_x, E_y dhe E_{th}	103
Figura5-51: Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit,	104
Figura5-52: Gabimet në shpejtësinë e robotit.	104
Figura5-53: Momentet rrotulluese të rrotës së djathtë dhe të majtë.	105
Figura5-54: Përgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve	105
Figura5-62: Trajektorja e robotit në planin x-y,	106
Figura5-63: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes	107
Figura5-64: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit E_x, E_y dhe E_{th}	107
Figura5-65: Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit.	108
Figura5-66: Gabimet në shpejtësinë e robotit.	108
Figura5-67: Momentet rrotulluese të rrotës së djathtë dhe të majtë.	109
Figura5-68: Përgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve	109
Figura 5-69: Krahasimi midis rregullatorit adaptiv me rrjet neural dhe rregullatorit backstepping.	111
Figura 5-70: Krahasimi midis rregullatorit adaptiv dhe rregullatorit backstepping.	112
Figura 5-71: Gabimet e gjendjes së robotit.	112
Figura 5-72: Rregullatori adaptiv dhe rregullatorit backstepping. Shpejtësitë e robotit	113
Figurën 5-73: Rregullatori adaptiv dhe rregullatorit backstepping. Koeficientët e rregullatorit.	113

FALENDERIME

Së pari, falenderoj përzemërsisht dhe shpreh mirënjohjen time të veçantë për udhëheqësin shkencor Prof. Dr. Betim ÇIÇO pa ndihmën dhe kontributin e të cilit nuk do të mund të mbyllej me sukses ky punim.

E falenderoj Prof. Dr. Orjon ZAVALANI dhe në cilësinë e Dekanit të Fakultetit të Inxhinjerisë Elektrike për pozitivitetin dhe mbështjen.

Falenderoj përgjegjësin e departamentit Prof.Dr. Aida SPAHIU për bashkëpunimin dhe përkrahjen e vazhdueshme.

Falenderoj gjithë kolegët e departamentit të Auromatikës për mbështjetjen e vazhdueshme .

Falenderoj familjen time e cila më ka mbështetur gjatë gjithë kohës.

Margarita Gjonaj

ABSTRACT

Localization and motion control (navigation) are two major tasks for a successful mobile robot navigation. The motion controller determines the appropriate action for the robot's actuator based on its current state in an operating environment.

In this thesis the neural network-based controller system has been designed to guide a nonholonomic wheeled mobile robot during continuous and non-continuous trajectory tracking. The problems of trajectory following and posture stabilization of the mobile robot with nonholonomic constraints are treated. For this purpose the neural network with one hidden layer is used. This neural network is trained on-line using the backpropagation optimization algorithm with an adaptive learning rate. The optimization algorithm is performed at each sample time to compute the optimal control inputs. The performance of the proposed system is investigated using a kinematic and dynamic model of the mobile robot. The structure of the controllers consists in a neural network system that controls the mobile robot actuators in order to track a desired path. Two neural networks models are used and their simulation results are presented.

The first algorithm is a control structure that makes possible the integration of a backstepping controller and a neural network (NN) computed-torque controller for a nonholonomic mobile robot. Integration of a neural network controller and the kinematic based controller gives the advantage of dealing with unmodeled and unstructured uncertainties and disturbances to the system. Results show that the proposed controller based on model invers of neural network (NN) has better performance compared to backstepping controller; this is demonstrated by better tracking the reference trajectory when we have unmodeled and unstructured uncertainties and disturbances to the system. The mean-square error method is used for tracking error and plots are shown state error of mobile robot to compare between each of the performance controllers in order to give better control results

The second proposed control algorithm is an NN-based adaptive controller which tunes the gains of the backstepping controller online according to the robot reference trajectory and its initial posture. In this method, a neural network is needed to learn the characteristics of the plant dynamics and make use of it to determine the future inputs that will minimize error performance index so as to compensate the backstepping controller gains. The proposed control algorithms have demonstrated the capability of tracking different trajectories with constant gradient (linear trajectory), continuous gradients (sinusoidal and circular) or non-continuous gradients (square).

Simulation results showed the effectiveness of the second proposed neural network control algorithm; this is demonstrated by the minimised tracking error to more than (65.22%) compared with the backstepping controller and obtained smoothness trajectory. The mean-square error method is used for tracking error to compare between each of the performance control methodologies in order to give better control results.

ABSTRAKT

Lokalizimi dhe kontrolli i lëvizjes janë dy detyrat kryesore për një lëvizje të suksesshme të robotit. Rregullatori i lëvizjes përcakton veprimet e duhura për ekzekutuesit e robotit, bazuar në gjendjen aktuale të tij në mjedisin ku ai operon.

Në disertacionin tonë kemi konceptuar dhe projektuar një sistem rregullator i bazuar në rrjetat neurale për të drejtuar një robot me rrota nonholonomic të lëvizshëm gjatë ndjekjes së trajektores së vazhdueshme dhe jo të vazhdueshme. Në punim janë trajtuar problemet e ndjekjes së trajektores dhe qëndrueshmërisë së pozicionit të një roboti të lëvizshëm me kufizime nonholonmice. Për këtë qëllim është përdorur rrjeti neural me një shtresë të fshehur. Ky rrjet neural është trajnuar 'online' duke përdorur algoritmin e optimizimit 'backpropagation' me një normë adaptive të të mësuarit. Performanca e sistemit të propozuar është shqyrtuar duke përdorur një model kinematik dhe dinamik të strukturës së robotit. Struktura e rregullatorëve konsiston në një sistem të bazuar në rrjetat neural që kontrollon ekzekutuesit e robotit të lëvizshëm në mënyrë që të gjej rrugën e dëshiruar.

Algoritmi i parë është një strukturë kontrolli që bën të mundur integrimin e një rregullatori 'backstepping' dhe një rregullatori që llogarit momentin rrotullues (computed-torque) me rrjet neural (NN) për një robot të lëvizshëm nonholonomic. Integrimi i një rregullatori me rrjet neural dhe një rregullatori bazuar në kinematik jep avantazhin e ballafaqimit me kufizimet e pamodeluara dhe të pastrukturuara dhe shqetësimeve në sistem. Rezultatet tregojnë se rregullatori i propozuar i bazuar në modelin invers të rrjetit neural (NN) ka performancë më të mirë në krahasim me rregullatorin backstepping; kjo demonstron nga ndjekja më e mirë e trajektores referencë kur kemi kufizime të pamodeluara dhe të pastrukturuara dhe me shqetësime të ardhura në sistem. Për të krahasuar performancën e kontrollit për secilin rregullator kemi përdorur metodën e katrorëve më të vegjël për gabimin e ndjekjes së trajektores dhe janë treguar grafikët e gjendjes së robotit të lëvizshëm në mënyrë që të dalin në pah rezultatet më të mira të kontrollit.

Algoritmi i dytë i kontrollit i propozuar është një rregullator adaptiv i bazuar në rrjet neural (NN) i cili përshtat koeficientët e njëjës së rregullatorit 'backstepping' 'online' bazuar në trajektoren e referimit të robotit dhe pozicionit të tij fillestar. Në këtë metodë, është i nevojshëm një rrjet neural për të mësuar karakteristikat e dinamikës së robotit duke e përdorur atë për të përcaktuar hyrjet e pasuese që do të na ndihmojnë për të minimizuar indeksin e performancës së gabimit (përmirëson treguesit e cilësië) në mënyrë që të kompensojë koeficientët e rregullatorit 'backstepping'. Algoritmet e propozuar të kontrollit kanë demonstruar aftësinë në ndjekjen e trajektoreve të ndryshme me gradient konstant (trajktore lineare), gradient të vazhdueshëm (trajktore sinusoidale dhe rrethore) ose gradient jo të vazhdueshme (trajktore katrore).

Rezultatet e simulimit nxorën në pah një efektivitet më të lartë të algoritmit të dytë të kontrollit të propozuar me rrjet neural; e demonstruar nga minimizimi i gabimit të ndjekjes së trajektores nga 44.89% për trajektoren drejtkëndore deri në 65.22% për trajektoren sinusoidale krahasuar me rregullatorin ‘backstepping’ dhe në marrjen e trajektoreve më të lëmuara. Për të krahasuar performancën e kontrollit për secilin rregullator kemi përdorur metodën e katrorëve më të vegjël për gabimin e ndjekjes së trajektores në mënyrë që të japin rezultatet më të mira të kontrollit.

KAPITULLI 1

Hyrje

1.1 Hyrje

Në përgjithësi, ka shumë përkufizime të robotëve. Në literaturën bashkohore nuk ka një përkufizim të vetëm të fjalës robot, egzistojnë shumë alterantiva të cilat mbështeten në përkufizime të ndryshme të autorëve, e varuar kjo edhe nga specialistët që i projektojnë dhe i përgatisin ato. Nga kjo pikpamje disa e shohin një robot përmes aspektit të manipulimit të sjelljeve të robotit (inteligjencës) ndërsa të tjerët janë më të shqetësuar për aftësitë riprogramuese. Kuptimi më popullor i termit 'robot' në përgjithësi lidhet me ngjashmërinë me pamjen antropomorfe (si të njeriut), siç pasqyrohet në aspektin e termave si 'krahët' robotik për saldim. Leksiku, fjala 'robot' është në fakt rrjedhim i fjalës çeke "robota", e cila e përkëthyer fjalë për fjalë do të thotë "punëtorë shërbimi" [1]. 'Robota' tregon shërbimin e detyrueshëm (dmth skllavëri) të një agjenti fizik, i cili mund të gjenerojë një lidhje inteligjente mes perceptimit dhe veprimit. Megjithatë, përcaktimi sot i robotit përfshin mundësinë e riprogramimit, aftësitë lëvizëse nëpërmjet sistemeve elektromekanike dhe elastike. Pra një robot sot është produkt i një zhvillimi shumë të lartë i një sistemi mekanik, elektrik, elektronik, automatik dhe informatik, pra është një nga ndërthurjet më komplekse dhe inteligjente e këtyre shkencave. Zhvillimi bashkohori teknologjisë ka përmirësuar shumë parametra të robotëve që i bën ato shumë të përdorshëm në shumë fusha të jetës dhe aty ku njeriu ka vështirësi të futet si edhe në fushën e shërbimeve ndaj njeriut dhe në mbështetje të individëve me probleme shëndetësore. Këto janë arsyet që sot robotët dhe robotitka kanë një zhvillim shumë të shpejtë duke u thelluar gjithmonë e më shumë drejt sistemeve inteligjente.

Nga pikpamja e lëvizshmërisë robotët mund të ndahen në dy kategori, robot fiks dhe robot të lëvizshëm. Robotët fiks(krah roboti) ngrihen në një sipërfaqe të caktuar dhe materialet sillen në hapësirën e punës pranë robotit. Një robot fiks përdoret normalisht në prodhimin në masë, si në fabrikat e makinave, për saldim apo stampim. Robotët e lëvizshëm kanë aftësinë për të lëvizur në mjedisin e tyre duke mos qënë të fiksuar në një pozicion fizik; pra, robotët e lëvizshëm mund të përkufizohen si një pajisje mekanike që kryen detyra të automatizuara. Për sa i përket mbikëqyrjes së drejtpërdrejtë nga ana e njeriut përdoren teknika të inteligjencës artificiale, duke përdorur një program të paracaktuar, apo një sërë udhëzimesh të përgjithshme[2]. Lëvizshmëria është aftësia e robotit për të lëvizur nga një vend në tjetrin në ambiente të pastrukturuara tek një objektiv i dëshiruar. Robotët e lëvizshëm mund të kategorizohen në robotë me rrota, robot gjurmimi apo robot me këmbë: robotët e lëvizshëm janë më të dobishëm se sa

robotët fiks. Robotët e lëvizshëm përdoren gjithnjë e më shumë në industri, në robotikë shërbimi, për fabrikat (p.sh. në dërgimin e komponentëve mes stacioneve të assemblerit) dhe në zonat e vështira për të hyrë, ose zona të rrezikshme sic janë hapësira kozmike, mjediset ushtarake, pastrimi i mbeturinave bërthamore dhe për përdorim personal në format e pastruesit me vakum të shtëpive dhe korrëseve të barit [2, 3, 4].

Në vitet e fundit janë kryer një numër i madh kërkimesh në lidhje me kontrollin e sistemeve të lëvizshëm autonome robotik. Kjo është e lidhur kryesisht me rritjen e zbatimit të këtyre sistemeve si në mjediset industriale dhe ato të shërbimit. Disa aplikacione tipike të sistemeve të tilla janë për shembull robotët që vendosin rregull në magazinat e automatizuara, robotët që çojnë postën në zyrë dhe robotët që përdoren në eksplorimet e thellësive. Në këto aplikime përdoren lloje të ndryshme të robotëve siç tregohet[5]. Robotët që ecin preferohen në terrene të ashpër, zakonisht në sipërfaqet e lëmuara preferohen robotët e lëvizshëm me rrota, sepse ata janë shumë më të shpejtë dhe më të shkathët. Lloje të tjera të sistemeve të tilla si mjetet ajrore apo ujore pa pilot të cilat përdoren kur ne kemi nevojë për të manovruar në hapësira tre dimensionale. Në punimin tonë ne do merremi me robotët e lëvizshëm me rrota sepse ata janë më të përdorur gjerësisht në mesin e klasës së robotëve të lëvizshëm. Kjo është për shkak të manovrimit të tyre të shpejt, rregullatorëve të tyre të thjeshtë dhe karakteristikat e kursimit të energjisë [6]. Një robot mobil me rrota është një automjet me rrota i cili është i aftë për një lëvizje autonome pa shoferë human të jashtëm, për shkak se ai është i pajisur, për lëvizjet e tij me motorët që drejtohen nga një kompjuter i vendosur në të.

Roboti i lëvizshëm me rrota me makinë diferenciale është roboti i lëvizshëm më i thjeshtë dhe më i popullarizuar që ka mekanizmin drejtues më të thjeshtë. Kjo është një platformë e pajisur me një rrotëz para dhe një çift rrotash me drejtues ko-aksiale të pasme. Secila prej këtyre rrotave drejtohet në mënyrë të pavarur nga një motor DC i cili furnizohet me energji nga një tension i kontrolluar.

Dihet se stabilizimi i robotëve të lëvizshëm me rrota nonholonomic me lëvizshmëri të kufizuar të jetë në gjendje ekuilibrit në përgjithësi është shumë e vështirë. Një punë e njohur e Brockett [7] identifikon sistemet nonholonomic si një klasë të sistemeve që nuk mund të stabilizohen nëpërmjet një lidhje të kundërt të thjeshtë. Kjo nënkupton se në problemet e kontrollit të sistemeve nonholonomic nuk mund të zbatohen metodat e teorisë së kontrollit lineare, dhe problemet e sistemeve nonholomice nuk janë të transformueshme në probleme të kontrollit lineare. Për shkak të shumësisë dhe vështirësive të tyre, të tilla probleme të kontrollit jolinearë kanë motivuar një numër të madh studiuesish që të përfshijnë teknika të ndryshme të kontrollit automatik [8]

Një vështirësi tjetër në kontrollin e robotëve të lëvizshëm nonholonomic është se në botën reale ka paqartësi në modelimin e tyre. Duke marrë në konsideratë karakteristikat e brendshme të robotëve të lëvizshëm të tilla si dinamikat e automjeteve aktuale, limitimet nga inercia dhe fuqisë së ekzekutuesve si edhe gabimet e lokalizimit, ekuacionet e tyre dinamike nuk mund të përshkruhen si një model i thjeshtuar

matematikor. Si rezultat pasiguria e sistemit është një tjetër problem dhe sfidë në këtë fushë kërkimore. Në tërësi problemet dhe sfidat e mësipërme mund të konsiderohen motivet kryesore pas këtyre kërkimeve.

Mund të themi se planifikimi standart dhe algoritmat e kontrollit të zhvilluara për manipuluesit robotik pa kufizime nuk janë më të zbatueshme [9]. Kjo ka bërë që kohët e fundit të zhvillohen kërkime në këto fusha të shoqëruar me literaturë të bollshme që kanë të bëjnë me drejtimin e planifikimit dhe algoritmat e kontrollit veçanërisht të dedikuar për modelet kinematike të veçanta të thjeshtëzuara [10].

Janë propozuar rregullatorë të ndryshëm për robotët e lëvizshëm me kufizimet nonholonomic, ku dy qasje kryesore për kontrollin e robotëve të lëvizshëm janë stabilizimi i qëndrimit dhe ndjekja e trajektores. Qëllimi i stabilizimit të qëndrimit nënkupton stabilizimin e robotit në një pikë referimi, ndërsa qëllimi i ndjekjes së trajektores është që të kemi robotë që ndjekin një trajektore referencë [11]. Kohët e fundit interesi në kontrollin e ndjekjes së trajektores të robotëve të lëvizshëm është rritur duke sjellë kontribute të ndryshme teorike dhe praktike. Qasjet e kontrollit të ndjekjes së trajektores për robotët e lëvizshëm janë ndarë kryesisht në gjashtë metoda:

1. Linearizimi i Lidhjes së Kundërt të Gjendjes
2. Kontrolli Sliding mode
3. Kontrolli Backstepping
4. Llogaritësi i Momentit Rrotullues (Computed torque)
5. Kontrolli Adaptive
6. Kontrolli Inteligjent

Në këto metoda, kur qëndrueshmëria e algoritmit të kontrollit të ndjekjes së trajektores merr në konsideratë llogaritjen e ngarkesës ‘hardware’ dhe operacionalitetin në zbatimin praktik, kontrolli ‘backstepping’ bëhet një nga metodat më të njohura [12]. Disavantazhi më i madh i kësaj metode është se ajo ka nevojë për një modelimi të saktë dhe kjo metodë nuk mund të zgjidh pasiguritë në model dhe në mjedis. Rregullatorët e rrjetit neural propozohen në këtë punë të jenë të kombinuar me rregullatorin ‘backstepping’ dhe të zgjidhen problemet që kanë të bëjnë me pasiguritë e pastrukturuara dhe të pamodeluara ose çrregullimet.

Gjatë dekadës së fundit, projektimit dhe ndertimi inxhinjerik i sistemeve të robotëve të lëvizshëm veprojnë në mënyrë konstate në mjedise komplekse, dinamike dhe të pasigurta ku ka ende sfida për të kaluar. Sistemet e tilla duhet të jenë në gjendje për të kryer detyra të shumta, dhe për këtë arsye duhet të integrojnë një shumëllojshmëri të proceseve të informacionit me njohuri intensive në nivele të ndryshme të abstraksionit që garantojnë zbatim në kohë reale, fuqi, përshtatshmëri dhe shkallëzueshmëri [13]. Metodologjitë e kontrollit konjuktiv (rrjetat neural) janë provuar të jenë një burim frymëzimi dhe udhëzimi për të tejkaluar kufizimet aktuale në rregullatorët për sisteme më komplekse dhe adaptive, dhe këto metodologji janë përdorur në sistemet me robot të lëvizshëm si demonstrues, duke shërbyer si një dëshmi e rëndësishme e konceptit për

modelet konjuktive [14, 15, 16]. Sistemet teknike konjuktive janë në gjendje të perceptojnë mjedisin si edhe të grumbullojnë njohuri dhe t'i strukturojnë këto njohuri në mënyrë të vazhdueshme. Përmirësimi i një sistemi teknik kompleks nga aftësitë njohëse mundëson sistemin për të bashkëvepruar në mjedise të hapura dhe të panjohur. Sipas përcaktimit në [17], sistemet njohëse (biologjike apo teknike) janë karakterizuar nga aftësitë e tyre të të mësuarit, përfaqësimi i aspekteve përkatëse të mjedisit dhe aftësinë për të kuptuar sjelljet e caktuara.

Kohët e fundit janë bërë shumë kërkime në lidhje me aplikimet e rrjeteve neural për kontrollin e proceseve jolineare dinamike. Këto punë janë mbështetur në dy prej aftësive më të rëndësishme të rrjeteve neural, aftësinë e tyre për të mësuar dhe performancën e tyre të mirë për përafrimin e funksioneve jolineare [18]. Këto dy aftësi janë arsyeja kryesore pse kombinohen rregullatorët e rrjetit neural me rregullatorët 'backstepping' për të rregulluar disavantazhin e tyre në këtë tezë.

1.2 Motivacionet

Me zhvillimin e robotikës në kohët moderne problemet që lidhen me lëvizshmërinë e robotëve dhe kontrollin e saj ka qenë dhe është objekt i hulumtimeve të vazhdueshme për të realizuar sisteme robotike sa më robust që lidhen me problemet themelore të parashikimit si harta, planifikimi dhe ndjekja e trajektores (probleme këto të zgjidhura me kualitet në vazhdimësi) por sigurisht në këtë fushë egzistojnë akoma probleme të hapura të cilat mund të punohet dhe hulumtohet më tej. Në këtë kuadër mund të përmendim llogaritjet shumë komplekse, vlerësime në kuadër të linearizimit dhe efekteve të tij, lidhjen që mund të egzistoj midis matjeve dhe realizimit të parametrave të robotit, zbulimin e rrugëve të padëshiruara në formën e laqeve që mund të ndodhin gjatë lëvizshmërisë së robotëve duke bërë të mundur realizimin e një konsistence topologjike në lëvizje, gjë që sot vjen edhe si rezultat i faktit që hartat e lëvizshmërisë zmadhohen nga dita në ditë siç shihet edhe nga literatura e shfletuar [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Ky ka qenë edhe një nga elementët që na ka motivuar në punën tonë kërkimore, që të realizojmë një lëvizshmëri me trajektore të lëmuara, duke ndjekur trajektoren e parashikuar dhe të dëshiruar me një gabim sa më të vogël në këtë ndjekje. Në këtë kuadër është menduar të punohet drejt një konceptimi dhe realizimi të një rregullatori adaptiv të bazuar në rrjetat neurale. Rrjetat neurale dhe algoritmat e thellë të të mësuarit po përdoren gjithnjë e më tepër duke nxjerr në pah dhe duke realizuar sisteme jo humane të cilët i pregatisin të punojnë bazuar në sistemin tonë shumë të sofistikuar mendor.

1.3 Qëllimi dhe Objektivat e Kërkimit

Qëllimi i kërkimit mbështetur edhe në atë se çfarë na ka motivuar është të konceptojmë dhe të ndërtojmë një metodologji kontrolli bazuar në rrjetin neural por të dedikuar për robotët me rrota nonholomnic të lëvizshëm. Ky sistem i ndodhur brenda

robotit ose jashtë tij bën të mundur që nëpërmjet ekzekutuesit lëvizjen e tij drejt objektivit të duhur. Në këtë kuadër qëllimi ynë do të fokusohet në :

1- Lëvizja e robotit të lëvizshëm (një model i tij) do të ndjek trajektoren lineare, trajektoret sinusoidale, katerkendeshe, edhe rrethore të dëshiruar me gabim minimal në ndjekje duke qënë një sistem i qëndrueshëm por njëkohësisht duke minimizuar kohën e e dhe distancën e ketij roboti të lëvizshëm drejt destinacionit .

2- Rritja e cilësisë nëpërmjet minimizimit të gabimeve të cilat janë përcaktuar si diferencë midis trajektores së dëshiruar (pozicionin dhe orientimin) dhe rezultatet aktuale të robotit të lëvizshëm.

3- Kontrolli i performancës së rregullatorit robust nëpërmjet shtimit të shqetësimeve.

4- Kontrolli i performancës në lidhje me përshtatshmërinë e këtij rregullatori duke ndryshuar pozicionin fillestarë të robotit.

1.4 Kontributet

Thelbi kryesor i kontributit të kësaj pune është të ndryshoj dhe të përmirësoj performancën e rregullatorëve ‘backstepping’ bazuar në kinematik duke përdorur teorinë e topologjisë së rrjeteve neural si bazë për një mësimin dhe përshtatje të sistemit me aftësitë e planifikimit të trajektoreve mjaft optimale që dëshirojmë të drejtojmë dhe të manovrojmë një robot nonholonomic me rrota të lëvizshme përmes trajektoreve të para-përcaktuara (trajektorja me gradient kostant si ajo lineare, me gradient të vazhduar si ajo rrethore dhe trajektorja katrore me gradient jo të vazhduar). Kjo është bërë duke gjetur veprimin optimale të kontrollit të momentit rrotullues që do të minimizoj gabimin e ndjekjes së trajektores (kohën e udhëtimit dhe distanca e udhëtimit) të robotit të lëvizshëm duke përdorur një algoritëm adaptiv optimizimi që punon për të zvogëluar gabimin mes trajektores së dëshiruar dhe trajektores aktuale të robotit të lëvizshëm.

Kontributet të hollësishme janë listuara më poshtë:

- Konceptimi dhe hartimi i një rregullatori adaptiv ‘backstepping’ të bazuar në rrejt neural duke përdorur përafrimin e modelit të drejtpërdrejtë në rrjetin neural të robotit i cili përmirëson shumë performancën e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping tradicionalë.
- Konceptimi dhe Projektimi i një rregullatori llogaritës të momentit rrotullues (computed torque) me rrjet neural duke përdorur përafrimin e modelit invers të rrjetit neural të robotit i cili përmirëson performancën e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping në praninë e çrregullimeve dhe të pasigurive në model.
- Analizë krahasuese e detajuar mes dy rregullatorëve tradicional të ndjekjes së trajektores dhe rregullatorëve të propozuar duke theksuar avantazhet dhe disavantazhet e secilit prej tyre.

1.5 Arritjet

Rregullatori ‘backstepping’ i bazuar në modelin invers të rrjetit neural ekzekuton ndjekjen e trajektores duke duke gjeneruar veprime optimale për kontrollin e gabimit të ndjekjes së trajektores, duke e përmirësuar atë me 16.46% kundrejt rregullatorit ‘backstepping’. Një tjetër arritje e rregullatorit ‘backstepping’ bazuar në modelin invers të rrjetit neural është përmirësimi i performancës së shpejtësisë lineare dhe këndore duke i përmirësuar ato me 73.68% për trajektoren lineare kur sistemi ka shqetësime kundrejt rregullatorit ‘backstepping’. Rezultatet e simulimit tregojnë gjithashtu se algoritmi i dytë, rregullatori adaptiv backstepping përmirëson ndjeshëm indeksin e performancës së ndjekjes së trajektores nga 44.89% për trajektoren drejtkëndore deri në 65.22% për trajektoren sinusoidale. Gjithashtu rregullatori ‘backstepping’ adaptiv ka shkurtuar kohën e mbrirjes së trajektores referencë krahasuar me rregullatorin backstepping. Trajektoreset e gjeneruara nga roboti kur përdor rregullatorin adaptiv rezultojnë më të lëmuara dhe momentet rrotulluse të rrotave të robotit janë brenda rangut të tij. Rezultatet e simulimit tregojnë efektivitetin e dy metodologjive të kontrollit të propozuara, të cilat arrijnë shkëlqyeshëm të ndjekin trajektoreset me gradient kostant si trajektorja linear, me gradient të vazhduar si ajo rrethore dhe sinusoidale dhe trajektoren me gradient jo të vazhduar në formë katrori për modelin e robotit të lëvizshëm. dhe redukton gabimin e ndjekjes së trajektores me më tepër se 50%.

1.6 Organizimi i Tezës

Pjesa e mbetur e tezës është e organizuar si mëposhtë:

Kapitulli i dytë shqyrton studimet e mëparshme në lidhje me këtë fushë. Ky kapitull në mënyrë specifike shqyrton shkurtimisht historinë e fushës dhe pasqyron lloje të ndryshme të disponueshëm të rregullatorëve të ndjekjes së trajektores për robotët e lëvizshëm

Kapitulli i tretë përshkruan modelin matematik të kinematikës dhe dinamikës së robotit nonholonomic të lëvizshëm me rrota. Gjithashtu në këtë kapitull tregohet edhe modeli i robotit të lëvizshëm i simuluar në Softin Simulink/MATLAB

Kapitulli i katërt na prezanton me algoritmin e parë të propozuar, i cili është një rregullator me lidhje të kundërt jolineare i bazuar në modelin invers të rrjetit neural. Përshkruhet përdorimi i rrjetave neural për të mësuar dinamikën e modelit të robotit të lëvizshëm. Në këtë kapitull janë paraqitur edhe rezultatet e simulimit për rregullatorin e propozuar.

Kapitulli i pestë paraqet thelbin e rregullatorit adaptiv i bazuar në modelin direkt të rrjetit neural. Në këtë kapitull është trajnuar rrjeti neural online dhe offline me model direkt të mësoj dinamikën e modelit dhe janë paraqitur rezultatet e simulimit për katër trajektore.

Së fundi, kapitulli gjashtë përmban konkluzionet e gjithë punës dhe sugjerime për punën në të ardhmen.

KAPITULLI 2

Shikim mbi Metodologjitë e Kontrollit për Robotët e Lëvizshëm

2.1 Hyrje

Ka shumë elementë të robotit të lëvizshëm që janë kritike për lëvizshmërinë, të tilla si kinematika e lëvizjes, sensorët për përcaktimin e kontekstit mjedisor të robotit dhe teknikat për ta lokalizuar atë në përputhje me hartën e tij. Skema e përgjithshme e kontrollit për navigacionin robotëve të lëvizshëm është paraqitur në figurën 2.1 [2].

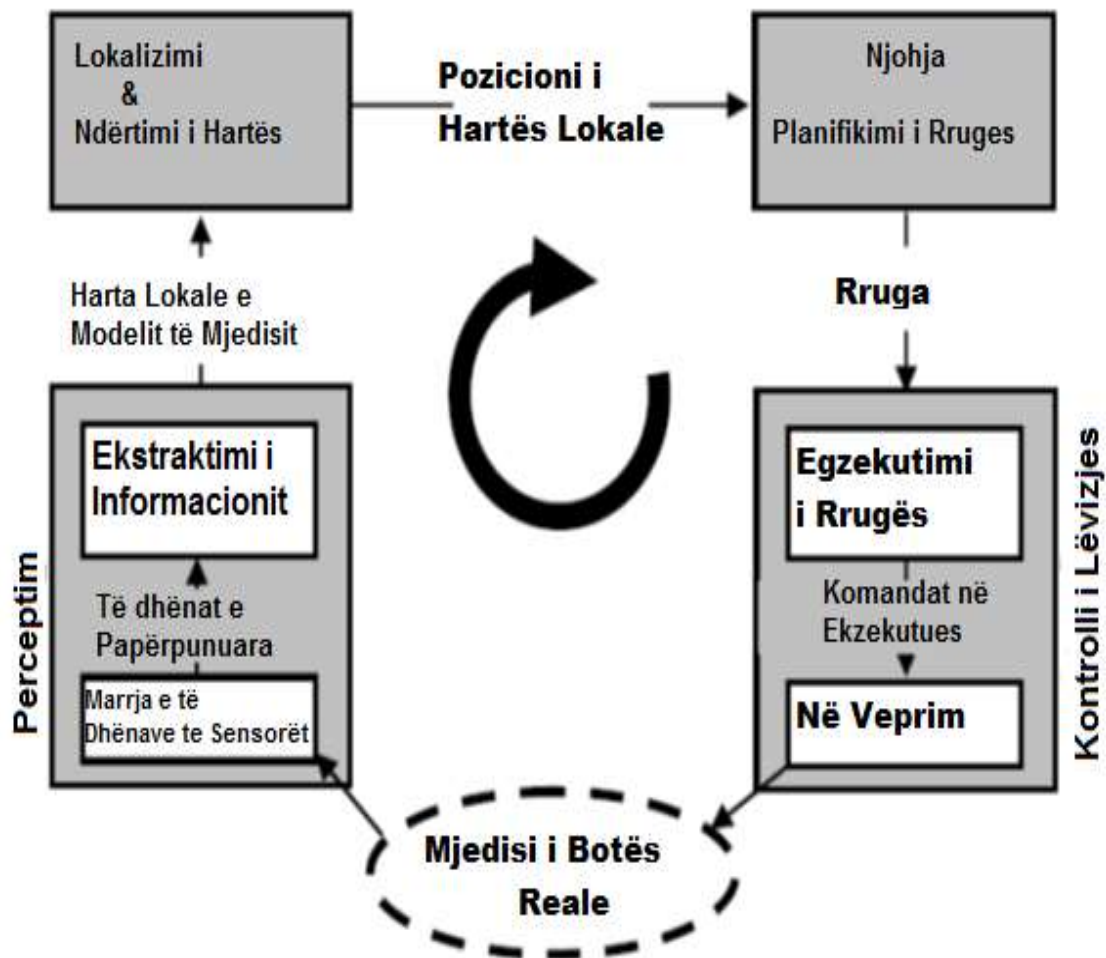


Figura 2-1. Skema e përgjithshme e kontrollit për navigimin e robotëve të lëvizshëm

Ajo përbëhet nga katër blloqe:

Perceptimi - roboti duhet të interpretojë sensorët e tij për nxjerrjen e të dhënave që kanë kuptim për të.

Lokalizimi - roboti duhet të përcaktojë pozicionin e tij në mjedis.

Aftësitë njohëse - roboti duhet të vendosë se si të veprojë për të arritur qëllimin e tij.

Kontrolli i lëvizjes - roboti duhet të rregulloj daljet e motorit të tij për të arritur trajektoren e dëshiruar.

Nëse të gjitha keto katër blloqe mund të verifikohen, navigimi i robotit do të jetë i suksesshëm [2].

2.2 Problemet e Kontrollit në Robotin e Lëvizshëm

Robotët e lëvizshëm me rrota mund të klasifikohen si sisteme nonholonomic mekanike. Problemet e kontrollit rrjedhin nga lëvizja e një roboti të lëvizshëm me rrota në një plan që ka tri shkallë lirie, ndërsa ai duhet të kontrollohet duke përdorur vetëm dy hyrje të kontrollit nën kufizimin nonholonomic. Këto probleme të kontrollit kanë tërhequr kohët e fundit vëmendje të konsiderueshme të komunitetit të kontrollit [28]. Gjatë viteve të fundit janë zhvilluar shumë metoda për të zgjidhur problemet e kontrollit të robotëve të lëvizshëm të cilat mund të klasifikohen në tri kategori:

Kategoria e parë është qasja e kontrollit bazuar në sensor për problemet e navigimit të robotëve të lëvizshëm mbi planifikimin e lëvizjes interaktive në mjedise dinamike dhe vlerësimin e lëvizjes së pengesave [29, 30, 31]. Që kur mjedisi i punës për robotët e lëvizshëm është strukturuar dhe mund të ndryshojë me kalimin e kohës, roboti duhet të përdorë sensorët e tij në bord për t'u përballuar me ndryshimet dinamike të mjedisit, ndërsa për planifikimin e duhur të lëvizjes (të tilla si parashikimi i konfigurimit mjedisor dhe vlerësimin e lëvizjes për shmangien e pengesës) ai përdor informacionin ndijor [32, 33, 34, 35].

Kategoria e dytë për problemet e navigimit të robotëve të lëvizshëm është planifikimi i rrugës. Rruga është krijuar bazuar në një hartë paraprake të mjedisit dhe përdoren algoritme të caktuara optimizimi bazuar në një kohë minimale, distancë minimale dhe indeks performance për energji minimale. Shumë metoda janë zhvilluar për të shmangur pengesat statike dhe të lëvizshme njëkohësisht, siç është paraqitur në [36, 37, 38, 39].

Kategoria e tretë për problemet e navigimit të robotëve të lëvizshëm është hartimi dhe zbatimi i kontrollit të lëvizjes që robotit të lëvizshëm i duhet për të ekzekutuar saktë rrugën e dëshiruar dhe për të minimizuar gabimin e ndjekje së trajektores.

2.3 Gabim i Ndjekjes së Trajektores në Robotin e Lëvizshëm

Planifikimi i trajektores në robotin e lëvizshëm ka për qëllim të sigurojë një rrugë optimale nga një pozicion fillestar në një pozicion objektiv [40]. Planifikimi trajektores optimale për një robot të lëvizshëm ofron një rrugë, e cila ka gabim minimal të ndjekjes së trajektores dhe distancë dhe kohë udhëtimi më të shkurtër. Gabimet në ndjekjen e trajektores së robotëve të lëvizshëm shkaktojnë përplasje me pengesat për shkak të devijimeve nga rruga e planifikuar, e cila gjithashtu bën që roboti të dështojë në përmbushjen e misionit me sukses. Ajo gjithashtu shkakton një rritje të kohës së udhëtimit si dhe të distancës së udhëtimit, për shkak të përshtatjeve të tjera të nevojshme për të kënaqur gjendjen e drjetimit të robotit. Ka tre arsye kryesore për rritjen e gabimit tek robotët e lëvizshëm.

Arsyeja e parë e kryesore për gabimin e ndjekjes është mungesa e vazhdueshmërisë në këndet e rrotullimit në rrugën e diferencialit të drejtimit të robotit të lëvizshëm. Ndryshimet e këndit të rrotullimit në pikën lidhëse të rrugës lineare dhe rrugës së lakuar, ose në një pikë moduli. Në këto pika mund të jetë e lehtë për diferencialin e drejtimit të robotit të lëvizshëm të shkëputet nga orbita e tij e vendosur për shkak të ndryshimit të shpejtë të drejtimit [41]. Prandaj, në mënyrë që të ulet gabimi i ndjekjes së trajektores, trajektorja e robotit të lëvizshëm duhet të planifikohet në mënyrë që këndi i rrotullimit të mbahet konstant nëse është e mundur.

Arsyeja e dytë për rritjen e gabimit të ndjekjes së trajektores është për shkak se këndi i vogël i rrotullimit ndërhyr në saktësinë e drejtimit të robotit të lëvizshëm. Rruga e robotit të lëvizshëm mund të ndahet në segmente të lakuar dhe në segmente në vijë të drejte. Ndërsa gabimi në ndjekjen e trajektores nuk gjenerohet në segmentet lineare, gabim i konsiderueshëm gjenerohet në segmentet e lakuar për shkak të forcave centrifugale dhe centripetale, të cilat i shkaktojnë rrëshqitje mbi sipërfaqe robotit [42].

Arsyeja e tretë kryesore për rritjen e gabimit në ndjekjen e trajektores është për shkak se këndi i rrotullimit nuk është konstant, si janë lakimet komplekse ose lakimet e rastit (p.sh. pikat e infleksionit ekzistojnë në disa pozicione) bëjnë të domosdoshëm që shpejtësitë e rrotave të robotit të lëvizshëm duhet të ndryshohen sa herë që këndi i rrotullimit dhe drejtimi i udhëtimit ndryshojnë [42, 43]. Në fakt, segmenti lineare mund të konsiderohet si një segment i lakuar me kënd rrotullimi të pafundëm. Pasi gabimi i ndjekjes së trajektores zmadhohet në segmentin e lakuar, egziston mundësia që gabimi i ndjekjes së trajektores të rritet me uljen e këndit të rrotullimit të rrugës së lakuar. Vini re se kemi një gabim relativisht të vogël në rrugën lineare. Gabim i ndjekjes së trajektores mund të reduktohet duke aplikuar metodologjitë e kontrollit.

2.4 Strategjitë dhe Metodologjitë e Kontrollit për Robotin e Lëvizshëm

Zhvillimi i sistemit të kontrollit është i nevojshëm për të garantuar sukses në ndjekjen e trajektores së dëshiruar nga roboti i lëvizshëm. Ndërsa ka një bollëk të metodologjive të kontrollit për ndjekjen e trajektores që mund të aplikohen në robotin e lëvizshëm. Qëllimi kryesor është që të kontrollojmë sistemin me kosto të ulët dhe në mënyrë efektive pa sakrifikuar fuqinë dhe besueshmërinë e rregullatorit. Dallimi në implementimin e strategjive të kontrollit të ndjekjes së trajektores varet kryesisht se si është modeluar sistemi dhe se si merret informacioni. Strategjitë e kontrollit për një sistem të tillë mund të klasifikohen në dy pjesë të dallueshme, përkatësisht një model të kontrollit linear dhe një model të kontrollit jolinear. Strategjitë e kontrollit lineare përdorin sjellje dinamike të linearizuar për një pikë të caktuar operative në varësi të modelit matematikor të sistemit të robotit të lëvizshëm. Strategjitë e kontrollit jolinear përdorin modelin dinamik të sistemit të robotit të lëvizshëm në hartimin e një rregullatori me parametra të ndryshueshëm në varësi të modelit matematikor të sistemit të robotit. Shumë studiues dhe dizenjues kanë treguar kohët e fundit një interes aktiv në zhvillimin dhe aplikimet e metodologjive të kontrollit jolineare për tri arsye kryesore [44]:

- a- Përmirësimi i sistemit ekzistues të kontrollit.
- b- Analiza e jolineariteteve të forta.
- c- Ballafaqimi me pasiguritë e modelit.

2.4.1 Kontrolli i Ndjekjes së Trajektores Bazuar në Modelin Kinematik të Robotit

Ky rregullator i ndjekjes së trajektores u propozua për herë të parë në [45]. Ky punim kryesisht propozon një rregullator të qëndrueshëm të ndjekjes së trajektores për automjete nonholonomic. Qëndrueshmëria e ligjit të kontrollit provohet nëpërmjet përdorimit të funksionit Lyapunov. Hyrjet e rregullatorit janë pozicioni dhe shpejtësitë e referencës të automjetit dhe dalja është objektivi i shpejtësive lineare dhe rrotulluese. Ligji i kontrollit i propozuar në këtë punë bazohet në modelin kinematik të makinave elektrike dhe nuk merr parasysh efektet e dinamikave të robotit. Ky rregullator nuk varet nga roboti dhe mund të aplikohet për çdo lloj roboti të lëvizshëm me zonë histerezie llogaritëse. Parametrat e duhura të rregullatorit gjenden nga linearizimi i sistemeve të ekuacioneve diferenciale dhe gjetjen e një kushti për shuarjen kritike. Nevoja për kufizimet e shpejtësisë dhe nxitimit diskutohet në vazhdim.

Për të llogaritur hyrjet e kontrollit të makinave, është supozuar se ndjekja e shpejtësisë është e përkryer. Ka tre probleme me këtë qasje: së pari, problemi i ndjekjes së shpejtësisë së përsosur nuk zbatohet në praktikë. Së dyti janë injoruar shqetësimet dhe së treti, është e nevojshme njohja e plotë e dinamikës [46]. Për të përmirësuar performancën e këtij algoritmi kontrolli të propozuar, është propozuar që rregullatorët e tjerë të përfshijnë dinamikën e makinave dhe të mund të merren me sinjalet shqetësuese.

2.4.2 Kontrolli i Ndjekjes së Trajektores nga Kinematika Backstepping në Dinamikën Backstepping

Ky punim është një zgjerim dinamik që bën të mundur integrimin e një rregullatori kinematik dhe një llogaritësi të momentit rrotullues për robotët e lëvizshëm nonholonomic, u propozua për herë të parë në [47]. Është një kombinim i rregullatorëve kinematik dhe llogaritësit të momentit rrotullues i cili zhvillohet duke përdorur backstepping dhe qëndrueshmëria garantohet duke përdorur teorinë e Lyapunov-it. Algoritmi i kontrollit i propozuar mund të aplikohet për tre problemet e lëvizjes së robotit: ndjekja e një trajektore referimi, ndjekja e rrugës dhe qëndrueshmëria rreth pozicionit të referimit.

Ky algoritëm kontrolli ofron një metodë të rigorozë që merr parasysh dinamikën e makinës specifike për të konvertuar komandën e sistemit drejtues në hyrje kontrolli për makinën aktuale. Së pari, hyrjet e kontrollit të shpejtësisë në lidhjen e kundërt janë të projektuara për sistemin kinematik drejtues që të bëjë gabimin e pozicionit asimptotikisht tëqëndrueshëm. Më pas një rregullator i llogaritjes së momentit rrotullues projektohet i tillë që shpejtësitë e robotit të lëvizshëm të konvergojnë në vlerat e shpejtësisë të dhëna në hyrje. Kjo qasje kontrolli mund të zbatohet në një klasë kusinjalet hyresë të shpejtësisë së sistemit të kontrollit kinematik janë të lëmuara (pa kercime) dhe për këtë arsye, e njëjta procedurë projektimi funksionon për të tre problemet kryesore të navigimit.

Ky ligj kontrolli i cili është i aftë të merret me tri problemet themelore të navigacionit nonholonomic dhe vlerëson dinamikën e plotë të robotit të lëvizshëm qënxirret duke përdorur qasjen backstepping. Metoda është e vlefshme për aq kohë sa hyrjet e kontrollit të shpejtësisë janë të lëmuara (pa kercime) dhe të kufizuar edhe dinamikën e robotit aktual janë të njohura plotësisht. Në fakt, njohja perfekte e parametrave të robotit të lëvizshëm është e paarrtshme. Për shembull, fërkimi është shumë i vështirë për t'u modeluar në këto sisteme. Për t'u përballur me këtë problem një rregullator i fuqishëm adaptiv duhet të projektohet në mënyrë që të mund të merret me pasiguritë dhe shqetësimet panjohura dhe të pamodeluara. Rregullatori adaptiv nuk ka nevojë për një informacion paraprak të parametrave dinamike të robotit të lëvizshëm sepse rregullatori do t'i mësojë atogjatë punës. [47].

Metoda të fuqishme kontrolli të tilla si kontrolli sliding mode dhe metodat e kontrollit adaptive dhe metoda të kontrollit inteligjent të tilla si logjika fuzzy dhe rregullatorët e rrjetit neural janë zgjidhjet e mundshme për këtë problem dhe do të shpjegohen në pjesën tjetër të këtij kapitulli.

2.4.3 Rregullatorët 'Sliding Mode' të Ndjekjes së Trajektores

Një kontroll i fuqishëm i ndjekjes së trajektore për një robot nonholonomic të lëvizshëm me rrota është propozuar në [8] dhe [48]. Një ligj kontrolli sliding mode është propozuar në këtë punë për stabilizimin asimptotikisht të robotit të lëvizshëm me një

trajektore të dëshiruar. Është treguar se kjo skemë e propozuar është e fuqishme për të kufizuar shqetësimet e jashtme.

Një vështirësi të madhe në kontrollin e robotëve të lëvizshëm nonholonomic është se në botën reale ka paqartësi në modelimin e tyre. Duke marrë në konsideratë karakteristikat e brendshme të robotëve të lëvizshëm të tilla si dinamika e motorëve aktuale, inercitë dhe kufijtë e fuqisë së ekzekutuesve dhe gabimet e lokalizimit, ekuacionet e tyre dinamike nuk mund të përshkruhen si një model i thjeshtuar matematikor.

Avantazhet e përdorimit të kontrollit sliding mode për zgjidhje përfshijnë: të qenit i shpejtë, të paturit e një përgjigje të mirë kalimtare dhe i fuqishëm në lidhje me variacionet e parametrave. Modeli dinamik i robotit është përdorur në këtë punë për të përshkruar sjelljen e tij në lidhje me shqetësimet nga kufizimet. Me anë të një metode të llogaritjes së momentit rrotullues, dinamikat gabim të robotit të lëvizshëm linearizohen dhe ligji kontrollit sliding mode zbatohet për stabilizimin e robotit drejt trajektores referencë dhe kompenson shqetësimet ekzistuese. Pra, në thelb, skema e propozuar e kontrollit përdor metodën e llogaritjes së momentit rrotullues për linearizimin me lidhje të kundërt të ekuacionit dinamik dhe teorinë sliding mode për një kontroll të fuqishëm.

Kjo skemë e propozuar kontrollit ka aftësinë për të zgjidhur problemin endjekjes së trajektores bazuar në modelimin dinamik, kur trajektorja referencë nuk është dhënë si një formë e mbyllur dhe ajo tregon se duke aplikuar kontrollin sliding mode sjellja e rregullatorit të robotit të lëvizshëm është i fuqishëm kundër gabimeve të kushteve fillestare dhe shqetësimeve të jashtme të tilla si gabime të integritit, zhurmat në sinjalin e kontrollit, gabimet në lokalizim dhe etj [8].

Problemi kryesor me këtë qasje të kontrollit është se ai përsëri ka nevojë për modelin e saktë dinamik të robot për pjesën e llogaritësit të momentit rrotullues (computed torque). Kur ne duam të bëjmë linearizimin me lidhje të kundërt të modelit jolineare dinamik të sistemit, ne duhet të dimë dinamikën e saktë të robotit. Ky disavantazh i këtij ligji kontrolli na çon në përdorimin e një rregullatori adaptive apo inteligjentë me aftësinë për të mësuar në mënyrë që ne mund të mësojmë dinamikën e robotit online pa ditur projektimin e rregullatorit. Kështu që shumë metoda të ndryshme të kontrollit adaptive dhe inteligjentë mund të përdoren për t'u marrë me këtë problem. Disa prej tyre do të shpjegohen në paragrafët e ardhshëm të këtij kapitulli.

2.4.4 Rregullatorët me Logjik 'Fuzzy' të Ndjekjes së Trajektores

Një kontroll për ndjekjen e trajektores për një robot të lëvizshëm me rrota duke përdorur kontrollin me logjikë fuzzy (FLC) është propozuar në [49], [50], [51] dhe [52]. Në [49] është propozuar një algoritëm kontrolli i bazuar në gabimet e pozicioneve të robotit të lëvizshëm që furnizojnë (rregullatorin Fuzzy) FLC, i cili gjeneron sinjale korrektimi për shpejtësinë e motorit të majtë dhe të djathtë. Strategjia e kontrollit

bazohet në profilin e shpejtësisë me lidhje të drejtë dhe sinjali i korigjimit në shpejtësi gjenerohet nga FLC sipas gabimeve të pozicionit. Simulimet dhe rezultatet eksperimentale demonstrojnë efektivitetin e algoritmit të propozuar, i cili provoi rezultatet të mira në ndjekjen e trajektores dhe tregoi fuqinë e algoritmit kundër pasigurive në modelin e sistemit.

Algoritmi i propozuar në [50] ka të bëjë me zhvillimin e një rregullatori të algoritmit fuzzy-gjenetik për robotin e lëvizshëm me rrota(WMR) me dy shkallë lirie (2-DOF).Hyrjet globale ndaj robotit të lëvizshëm me rrota (WMR), janë pozicioni referencë dhe shpejtësia referencë, të cilët janë variabla të kohës. Dalja globale e robotit të lëvizshëm me rrota (WMR) është pozicioni i tanishëm. Pozicioni i robotit të lëvizshëm me rrota (WMR)vlerësohet nga algoritmi i ‘dead-reckoning’. Algoritmi ‘dead-reckoning’ përcakton pozicionin e tanishëm të robotit të lëvizshëm me rrota (WMR) në kohë reale duke shtuar në rritje të dhëna për pozicionin aktual me atë të pozicionit të mëparshëm të periodës së kampionimit. Rregullatori i ndjekjes së trajektores bën që gabimi i pozicionit të konvergjojë në zero. Në mënyrë që të zvogëlojmë gabimin e pozicionit, është e nevojshmekompesimi i shpejtësisë në rrugën e trajektores. Për këtë arsye, është propozuar një rregullator që përdor algoritmin fuzzy-gjenetik për të dhënë kompensimin e shpejtësisë në këtë sistem. Variablat e hyrjes të dy rregullatorëve me logjikë fuzzy (FLCs) janë gabimet e pozicionit përperiodën e kampionimi. Vlerat e daljes së FLCs janë shpejtësitë e kompensuese. Algoritmet gjenetike (GAs) implementohen për të rregulluar nyjen e daljes së logjikës fuzzy.

Rregullatori në [51] paraqet një metodë të re të ndjekjes së trajektores për një robot të lëvizshëm duke kombinuar kontrollin parashikuese dhe kontrollit me logjikë fuzzy. Ndjekja e trajektores të robotëve të lëvizshëm autonome zakonisht ka karakteristika jo-lineare tëndryshimit të kohës dhe shpesh ndryshon nga zhurmat shtesë. Për të kapërcyer kohë vonesën e shkaktuar nga përgjigjja e ngadalshme e sensorëve, algoritmi i përdorim kontrollin parashikuese, i cili parashikon pozicionin dhe orientimin e robotit. Veç kësaj, kontrolli fuzzy përdoret për t'u marrë me karakteristikat jolineare të sistemit.

Rregullatori me logjikë fuzzy i propozuar në [52] është i bazuar në një qasje ‘backstepping’ për të siguruar stabilizimin asimptotik të pozicionit dhe orientimin e robotit rreth trajektores së dëshiruar, duke marrë parasysh kinematikën dhe dinamikën e robotit. Për të ndërtuar rregullatorin është përdorur sistemi rezultat Mamadani; me nëntë rregullat ‘if-then’ dhe qendra e masës së metodës së zonës si strategji e diffuzification ku të dhënat e momentve rrotullues dhe shpejtësitë konsiderohen si variabla linguistike.

Shumë studiues përdorin vetëm modelin kinematik (sistem drejtues), për të zgjidhur problemin e kontrollit të ndjekjes së trajektores, ku shpejtësia përdoret si hyrje kontrolli supozohet që të furnizohet nga robot i lëvizshëm, dinamikat e ekzekutuesve të të cilit neglizhohen. Prototipi real ka rrota të lëvizshme me një normë gabimi rrotulluese,

moment inercie dhe shpërndarje të masës që kontribuojnë në forcat e ushtruar mbi strukturën e automjetit duke ndikuar në saktësinë dhe manovrimin e plotë të robotit. Motivuar nga ky fakt, modeli dinamik i robotit përdoret në këtë punim për të konvertuar sistemin drejtues në automjetin aktual. Funksionet trekëndësh dhe forma-trapezoidale janë përdorur në këtë dizajn, së bashku me tre ndarëse fuzzy dhe nëntë rregulla.

2.4.5 Rregullatorët Adaptive të Ndjekjes së Trajektores

Metodat e kontrollit adaptive për ndjekjen e trajektores së një roboti të lëvizshëm me rrota janë propozuar në [53], [54], [55] dhe [56].

Në propozohet [56] rregullat për kontrollin adaptive, në nivel dinamikë, për robotët e lëvizshëm nonholonomic me parametra të panjohur dinamike. Rregullatorët adaptiv përdoren për robotët e lëvizshëm duke përdorur teknikën backstepping, për ndjekjen e një trajektore referencë dhe stabilizimin në një pozicion fiks. Për problemin e ndjekjes së trajektores rregullatori garanton konvergjencë asimptotike në zero të gabimit në ndjekjen e trajektores. Për stabilizimin, problemi është konvertuar në një problem ekuivalent të ndjekjes së trajektores, duke përdorur lidhjen e kundërt të gabimit që ndryshon me kohën, para se të aplikohet kontrolli i ndjekjes së trajektores. Rregullatori i projektuar siguron zerimin asimptotikisht të gabimit të qëndrueshmërisë. Ligjet e propozuara të kontrollit përfshijnë një limit shpejtësie /nxitimi që pengon rrota e robotit nga rrëshqitjet.

Një përshkrim i një rregullatori të thjeshtë adaptive të ndjekjes së trajektores është paraqitur në [55] duke u bazuar në modelet kinematike. Një fushë potenciale artificiale përdoret për të lëvizur roboti me rrota nën rregullator. Projektim i lehtë, konvergjencë e shpejtë, dhe përshtatshmëri në robotët e tjerë të lëvizshëm nonholonomic janë avantazhe të dukshme. Qëndrueshmëria e rregullit provohet nëpërmjet përdorimit të një funksioni Lyapunov. Një rregullator adaptive dinamikë i dyfishtë për ndjekjen e trajektores të robotët e lëvizshëm me rrota nonholonomic është paraqitur në [53]. Rregullatori është zhvilluar tërësisht në kohë diskrete dhe funksionet jolineare dinamike të robotit janë supozuar të jenë të panjohur. Një rrjet neural me funksion bazë radial Gaussian është përdorur për funksionin e përafrimit, dhe peshat e tij vlerësohen në mënyrë propabilitare në kohë reale. Në kontrast me rregullatorin ekuivalencës të sigurt adaptive të nxjerrë deri tani për robotët e lëvizshëm, ligji i propozuar i kontrollit merr parasysh vlerësimet e pasigurisë, duke çuar në përmirësimin e performancës së ndjekjes së trajektores. Metoda e propozuar është verifikuar nga simulimet realiste dhe analizat Monte Carlo.

2.4.6 Rregullatorët e Ndjekjes së Trajektores Bazuar në Rrjet Neural

Në ditët e sotme rrjetet neurale janë provuar të jenë një qasje premtuese për të zgjidhur problemet komplekse të kontrollit. Rregullatorët e rrjetit neural janë bazuar në përgjithësi në vetitë e funksionit të përafrimit dhe të aftësisë së të mësuarit të rrjetit

neural. Përdorimi i rregullatorëve të rrjetit neural për ndjekjen e trajektores së robotëve të lëvizshëm është propozuar në [46], [18] dhe [12]. Rregullatori i rrjetit neural i propozuar në [46] është i bazuar në vetitë e funksionit të përafrimit të rrjetit neural dhe mund të merret me shqetësimet kufizuese të pamodeluara dhe me dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara të robotit të lëvizshëm. Rrjeti neural është kombinuar me rregullatorin ‘backstepping’ për të mësuar dinamikat e plota të robot të lëvizshëm dhe konverton daljen e shpejtësisë së rregullatorit ‘backstepping’ në një hyrje të momentit rrotullues për makinën aktuale. Përparësia e të pasurit rrjete neural në këtë qasje është se nuk ka nevojë të dimë modelin dinamike të robotit dhe rrjeti neural do ta mësojë atë online pa njohuri paraprake të dinamikave.

Rregullatori i ndjekjes së trajektores bazuar në rrjetin neural propozuar në [12] përdor vetinë e të mësuarit të rrjetit neural për të bërë një rregullator adaptive i cili përshtat nyjat e rregullatorit ‘backstepping’. Qasja e rregullatorit të propozuar ka vetitë për të çuar shpejt gabimin e pozicionit në zero dhe për të treguar lëvizjen më të mirë të lëmuar (pa kërcime) në procesin e performancës së ndjekjes së trajektores. Ky përshkrim i qasjes së kontrollit integron rregullatorin ‘backstepping’ me rrjetat e përbërë ortogonal dhe përmirëson performancën e tij duke përdorur vetinë e të mësuarit të rrjetit neural. Një rrjet neural wavelet bazuar në rregullatorët për robotët e lëvizshëm është propozuar në [57]. Puna paraqet një skemë të kontrollit parashikues për robotët e lëvizshëm që posedojnë kompleksitete, jolinearitete dhe pasiguri. Një rrjet neural ‘back-propagation’ me shumë shtresa përdoret si model për dinamikat jolineare të robotit. Rrjeti neural ndërtohet nga dekompozimi ortogonal ‘wavelet’ për të formuar një rrjet neural wavelet që të mund të kapërcej problemet e shkaktuara nga minimizimi lokal i optimizimit. Rrjeti neural ‘wavelet’ është gjithashtu i dobishëm për të përcaktuar numrin e nyjeve të fshehura dhe vlerat fillestare të peshave.

2.4.7 Rregullatorët PID

Një rregullator adaptiv me rrjetë neural me bazë PID jolineare është zhvilluar për shpejtësinë dhe orientimin e kontrollit të ndjekjes së trajektores në robotin nonholonomic të lëvizshëm [58]. Rregullatorët PID dhe modeli i thjeshtë i linearizuar i robotit të lëvizshëm janë përdorur si një zgjidhje e thjeshtë dhe efektive për problemin e ndjekjes së trajektores në një robot të lëvizshëm [59, 60]. Strategjia e kontrollit me vetë- rregullim i PID bazuar në një model të konkluduar është propozuar për implementimin e një sistemi të kontrollit të lëvizjes që stabilizon mjetin me dy rrota dhe ndjek komandat e lëvizje referencë [61, 62].

2.4.8 Algoritma të Planifikimit të Rrugës

Përveç kësaj, një nga detyrat kryesore për robotët e lëvizshëm është që të vendos se si të planifikojnë për të arritur në pikën e synuar sipas disa standardeve optimale në mjedisin e panjohur, pjesërisht të panjohur ose të njohur duke naviguar pa përplasje. Në vitet e fundit, shumë studime mbi planifikimin e lëvizjes së robotit kanë përdorur qasje të ndryshme. Të tilla algoritmat e të mësuarit të rrjetit neural bazuar në shpjegim (RNBS), një qasje për t'i mësuar robotit detyrat e navigimit në ambjete të brendshme përmes metodës gjyko-dhe-gabo duke aplikuar RNBS në kontekstin e të mësuarit me përforsim, e cila e lejon robotin të mësojë kontrollin duke përdorur programimin dinamik siç shpjegohet në [63]. Një algoritëm i planifikimit të rrugës lokale nënjë robot të lëvizshëm bazuar në metodën deduktive të njeriut është shpjeguar në [64], dhe përdor laser të ri, një nga sistemet aktive vizive për një robot të lëvizshëm jashtë radhe. Problemi i gjenerimit të trajektoreve të lëmuara për një robot të lëvizshëm që lëvizshpejt në një mjedis kompleks u propozua në [65] duke përdorur metodat e kthesave polinomiale të zbutura. Konjuksioni (njohja) bazuar në algoritmin adaptiv të planifikimit të rrugës (AAPR) u propozua në [15] për zgjidhjen e problemeve të planifikimit të rrugës për aplikimet autonome në robotik. [21] Shpjegoi një metodë për të zgjidhur problemin e planifikimit të rrugës për robotët e lëvizshëm bazuar në 'Ant Colony Optimization Meta-Heuristic' (ACO-MH) për të gjetur rrugën më të mirë në bazë të funksioneve të caktuara me kosto. Një studim krahasues i tre algoritmeve të propozuara që përdorin hartë rrjeti shfrytëzimi të mjedisëve për të gjetur një rrugë për robotin e lëvizshëm nga starti i dhënë tek qëllimi u shpjegua në [66]. Përdorimi i dinamikës së rrjetit neural të tipit 'Hopfield' për gjenerimin e rrugës së robotit pa përplasje në kohë reale në një mjedis që ndryshon në mënyrë arbitrare është paraqitur në [67, 68]. Kjo është përdorur edhe në rrjetet neural në algoritmin për planifikimin e shumë-rrugësh në mjedisin e panjohur për robot e lëvizshëm bazuar në algoritmin gjenetik të optimizuar, siç është propozuar në [69, 70, 71, 72]. Përveç algoritmit gjenetike (GA), algoritmi 'Particle Swarm Optimization' (PSO) është përdorur gjerësisht në planifikimin e rrugës së robotit të lëvizshëm në mënyrë që të gjej rrugën optimale dhe të shmang pengesat statike ose dinamike [73, 74 75, 76].

2.5 Përmbledhje

Ky kapitull përshkruan pikat kryesore të problemeve të navigimit për robotët e lëvizshëm dhe metodat që janë zhvilluar për zgjidhjen e problemeve të kontrollit të robotët e lëvizshëm, dhe shpjegoi arsyet kryesore për rritjen e gabimit të ndjekjes së trajektores për robotët e lëvizshëm dhe shumë metoda që lidhen me këtë punë. Përveç kësaj, kapitulli prezantoi disa nga metodologjitë e rrjeteve neural për planifikimin e rrugës të robotët e lëvizshëm që kanë përdorur algoritme optimizimi, të tilla si algoritmi gjenetik dhe teknikat 'Particle Swarm Optimization'.

KAPITULLI 3

Modelimi dhe Simulimi i Robotit të Lëvizshëm

3.1 Hyrje

Ky kapitull përshkruan konceptin bazë të lëvizjes për robotët e lëvizshëm me rrota dhe shpjegon modelin kinematik dhe dinamik për robotët e lëvizshëm me rrota 'nonholonomic' nën kufizimin 'nonholonomic' të lëkundjeve të pastra dhe mungesës së rrëshqitjes. Projektimi, zhvillimi, modifikimi dhe kontrolli i sistemit mekatronik kërkon një kuptim dhe një përfaqësim të përshtatshëm të sistemit; specifikisht është i nevojshëm një "model" i sistemit. Çdo model është një idealizim i sistemit aktuale. Një sistem mekatronik apo robotik mund të përbëhet nga disa lloje të ndryshme të komponentëve, dhe është quajtur si një sistem i përzier. Në fillim duhet të përdoren procedurat analoge për modelimin e komponentëve të tillë. Në këtë mënyrë modelet përbërëse mund të integrohen në mënyrë të përshtatshme për të marrë modelin e përgjithshëm. Modelimi i një platforme roboti të lëvizshëm me makinë diferenciale përbëhet nga modelimi kinematik dhe dinamik përveç modelimit të ekzekutuesve të sistemit. Modelimi kinematik merret me marrëdhëniet gjeometrike që rregullojnë sistemin dhe studion matematikën e lëvizjes pa marrë parasysh forcat që ndikojnë. Modelimi dinamik në anën tjetër është studimi i lëvizjes, në të cilën forcat dhe energjitë modelohen dhe përfshihen. Modelimi i ekzekutuesve i nevojshëm për të gjetur lidhjen mes sinjalit të kontrollit dhe hyrjeve të sistemit mekanik. Secila pjesë e modelimit të këtij sistemi do të shpjegohet më vete gjatë gjithë këtij kapitulli. Pas gjetjes së një modeli të saktë, ne mund të simulojmë sistemin duke përdorur një paketë të përshtatshme kompjuterike. Procesi i simulimit do të shpjegohet plotësisht në një pjesë të këtij kapitulli. Hapi i parë për modelimin mekanik është të përcaktojmë sistemet koordinative të duhura për platformën robotike.

3.2 Lëvizja e Robotëve të Lëvizshëm me Rrota Diferenciale

Një robot i lëvizshëm ka nevojë që mekanizmat e lëvizjes t'i ketëtë pakufizuar në të gjithë mjedisin e tij. Megjithatë, ka një mori shumë të madhe të mënyrave për të lëvizur, dhe kështu pjesa e qasjes së një roboti për lëvizje është një aspekt i rëndësishëm i dizajnit të robotit të lëvizshëm. Mekanizmi i lëvizjes më i njohur në robotikën e lëvizshme dhe automjete të fabrikuara është rrota. Ajo mund të arrijë efikasitet të mirë dhe ka nevojë për një implementim relativisht të thjeshtë mekanik. Ndërsa dizajnimin e një roboti të lëvizshëm me rrota dhe karakteristikat kryesore kanë të bëjnë me llojin e rrotave,

rregullimin e tyre dhe sistemet e tyre të shtypjes (mekanizmat drejtues të mundshëm). Këto parametra përcaktojnë karakteristikën lëvizëse të robotit. Disa robotë janë gjithë drejtimsh[77, 78, 79]; që është, ata menjëherë mund të lëvizin në çdo drejtim përgjatë planit pa marrë parasysh orientimin e tyre rreth boshtit vertikal. Megjithatë, këto lloje të robotëve të lëvizshëm janë të rrallë, sepse ata kanë nevojë për rrota të veçanta ose struktura mekanike. Llojet e tjera të robotëve me rrota kanë një konfigurim sitë makinave, që do të thotë, ata kanë katër rrota (dy prej tyre janë të mekanizmi drejtues) [80, 81], që lejojnë një përkthim në drejtimin ballorë të mjetit dhe një rrotullim rreth një pike që varet nga këndi drejtues i rrotave. Është e lehtë për të kuptuar se këto lloje të robotëve nuk janë shumë drejtimsh; në fakt, duke menduar se rrotat nuk rrëshqasin në dyshe, një robot si makinë nuk mund të kalojë në drejtimin e tij anësorë. Robotët me dy rrota me diferencial është lloji më të popullarizuara i robotëve të lëvizshëm [82, 83, 84]; Një robot me dy rrota vihet në lëvizje nga dy motorët e pavarur me një aks rrotullimi të përpjeshëm. Megjithatë, për shkak se robotët e lëvizshëm kanë nevojë për tre pika kontakti në terren për të patur qëndrueshmëri, mund të perdoren një ose dy rrotëza pasive ose apo pika rrëshqitëse për balancimin e robotit me makinë diferenciale. Ka një gamë shumë të madhe të konfigurimeve të mundshme të rrotave kur marrim parasysh teknikat e mundshme për lëvizjen e robotit të lëvizshëm, pasi ka katër lloje kryesore të ndryshme rrotash[2]:

- a- Rrota standarte: dy gradë të lirisë; rrotullimi rreth (motorizuar) boshtit të rrotës dhe pikës së kontaktit.
- b- Rrota role: dy gradë të lirisë; Rrotullimi rreth një boshti të përbashkët të mënjauar.
- c- Rrota Suedeze: tre gradë të lirisë; rrotullimi rreth (motorizuar) boshtit të rrotës, rreth cilindrave, dhe rreth pikës së kontaktit.
- d- Top ose rrota sferike: teknikisht e vështirë realizimi.

Ne mund të kategorizojmë sistemet robot të lëvizshëm me rrota në dy kategori sipas llojit të rrotave të tyre: Rrota konvencionale dhe rrota suedeze. Për rrotën konvencionale, kontakti mes rrotës dhe në tokë është menduar të kryej një rrotullim të pastër pa kushtezim rrëshqitjeje. Kjo nënkupton se shpejtësia e pikës së kontaktit është e barabartë me zero, dhe përbërësit e kësaj shpejtësie paralele dhe pingule me planin e rrotës janë të barabarta me zero. Një formë skematike e një rrote konvencionale tregohet në figurën 3-1[2].

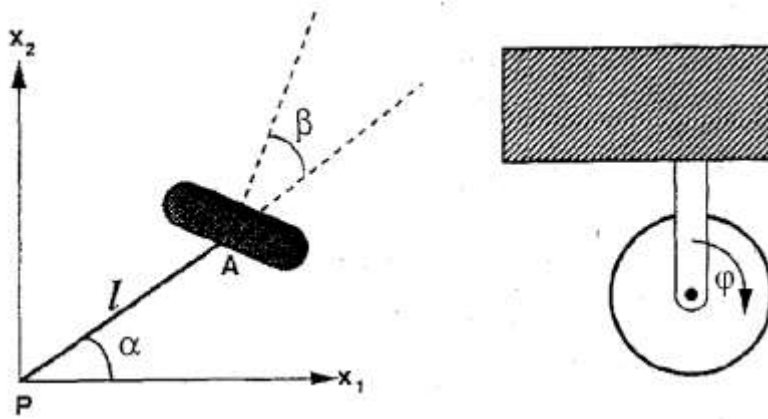


Figura 3-1: Forma e një rrote konvencionale

Ekzistojnë tri lloje të rrotave konvencionale: rrota fikse, rrota të orientuara në qendër dhe rrota të orientuara jashtë qendrës. Këto tri lloje të rrotave konvencionale janë paraqitur në figurën 3-2:

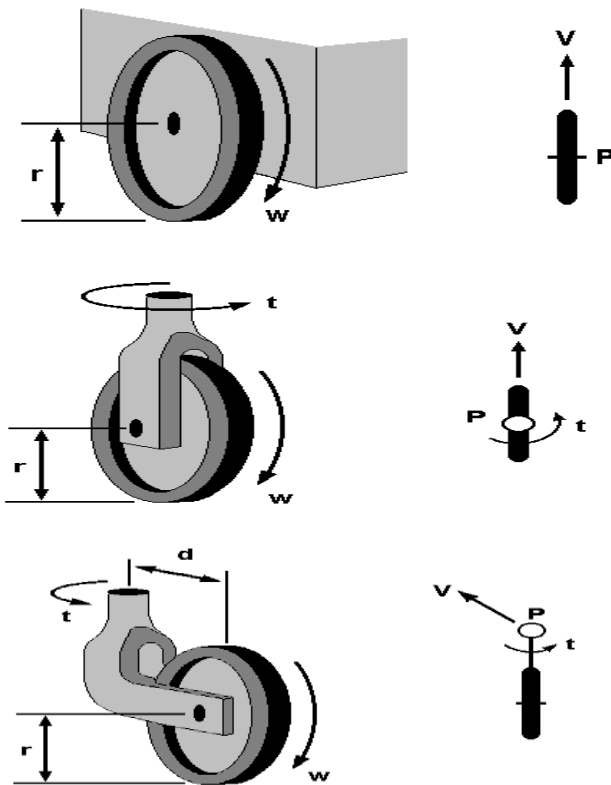


Figura 3-2: Tipe të ndryshme të rrotave konvencionale

Siç shihet nga figura 3-2, komponentja e shpejtësisë e cila është pingul me planin e rrotës është zero në gjitha llojet e mësipërme të rrotave të ndryshme konvencionale.

Për një rrotë suedeze, vetëm një komponent i shpejtësisë së pikës së kontaktit të rrotës me tokën është menduar të jetë e barabartë me zero përgjatë lëvizje. Drejtimi i

këtijkomponenti zero është arbitrar, por është e fiksuar në lidhje me orientimin e rrotes siç mund të shihet në figurën 3-3:

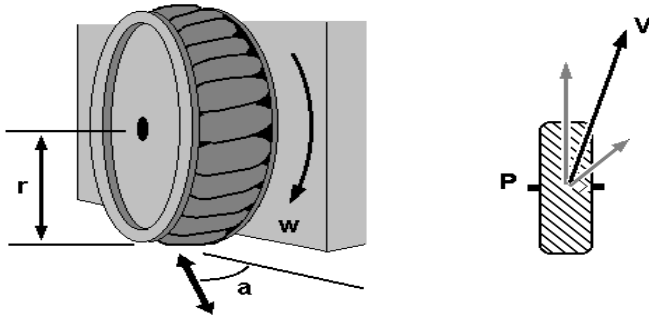


Figura 3-3: Forma skematike e një rrote Suedeze

Llojet e ndryshme të rrotave mund të përdoret në varësi të aplikimit dhe llojet e mjedisit. Çështja tjetër e rëndësishme në lidhje me robotët e lëvizshëm me rrota është lloji i tyre i lëvizjes. Robotët e lëvizshëm me rrota mund të kenë në vijim pesë lloje të sistemit të lëvizjes:

- Makinë Differenciale
- Rrota të Drejtuara: Tricikli, Bicikleta dhe Kamionçina
- Makinë Sinkrone
- Gjithë-Drejtuesh
- Drejtues Ackerman

Llojet e ndryshme të mësipërme të sistemeve lëvizëse për robotët e lëvizshëm me rrota janë paraqitur në figurën 3-4:

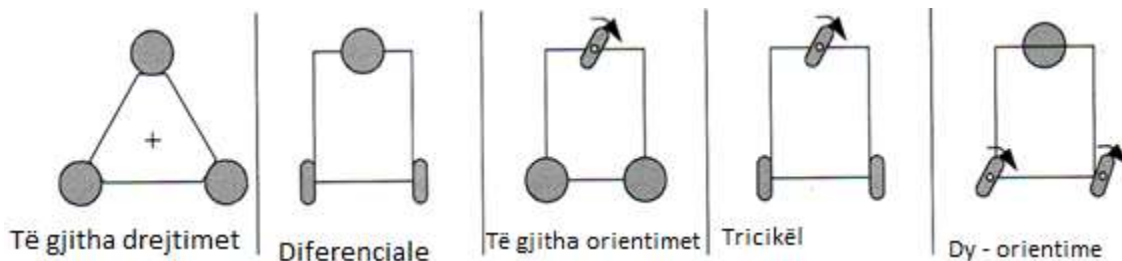


Figura 3-4: Llojet e ndryshme të tipeve të lëvizjes për rrobotët e lëvizshëm me rrota

Numri i variacioneve të konfigurimit të rrotës për robotët e lëvizshëm rrotullues është mjaft i madh. Megjithatë, ka tre karakteristika themelore në një robot që rregullohen me këto zgjedhje: qendrueshmëria, manovrimi dhe kontrollueshmëria.

3.2.1. Qëndrueshmëria

Qëndrueshmëria kërkon një numër minimal të rrotave (tre) për të garantuar ekuilibrin e qëndrueshëm, me shtimin e një kushti të rëndësishëm, që qendra e gravitetit duhet të përfshihet brenda trekëndëshit të formuar nga pikat e kontaktit me tokën të rrotave. Megjithatë, robotët me dy rrota me motor diferencial mund të arrijnë qëndrueshmërinë nëse qendra e masës është nën boshtin e rrotave [53].

3.2.2. Manovrueshmëria

Manovrimin e një roboti është një kombinim i lëvizshmërisë δ_m në dispozicion në bazë të kufizimeve kinematike të rrëshqitjes së rrotave standarde, plus shtoi edhe kontributin e lirisë nga drejtimi dhe rrëshqitja e rrotave δ_s drejtuese standarte. Këto janë paraqitur në figurën 3-5.

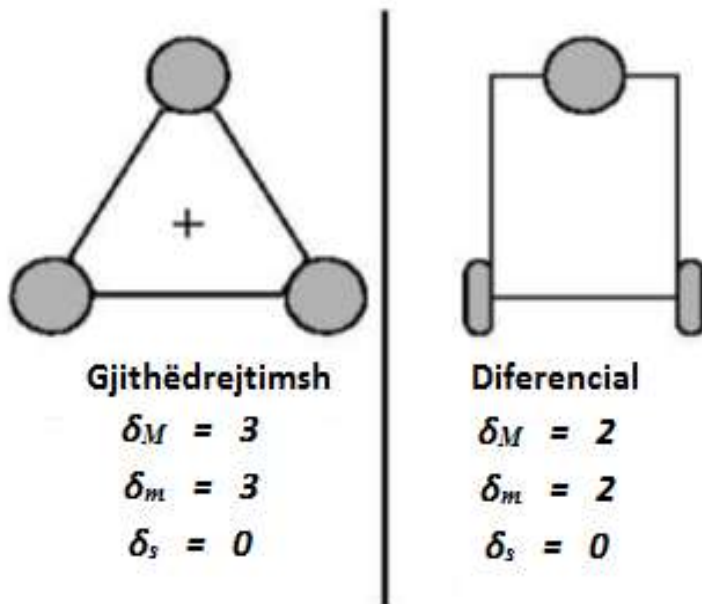


Figura 3-5: Shkalla e manovrimin në robotët e lëvizshëm [2].

Disa robotë janë shumë drejtimsh [77, 78, 79], që do të thotë se ata mund të jenë në lëvizje në çdo kohë në çdo drejtim përgjatë planit të tokës (x, y) pavarësisht nga orientimi i robotit rreth boshtit të tij vertikal. Për këtë arsye shkalla e manovrimin δ_m e robotit shumë drejtimsh të lëvizshëm është e barabartë me tre, sepse shkalla e lëvizshmërisë δ_m është e barabartë me tre dhe shkalla e aftësisë drejtuese është e barabartë me zero. Në një robot të lëvizshëm me motor me diferencial [82, 84], shkalla e manovrimin është e barabartë me dy për shkak se shkalla e lëvizshmërisë rezulton të jetë e barabartë me dy dhe shkalla e aftësisë drejtuese është e barabartë me zero.

3.2.3. Kontrollueshmëria

Ekziston zakonisht një korrelacion i anasjelltë midis kontrollueshmërisë dhe manovrimit sepse problemi i kontrollueshmërisë për sistemet e robotëve të lëvizshëm është subjekt i kufizimeve kinematike në shpejtësinë dhe në planifikimin e rrugës pa përplasje. Në një robot të lëvizshëm me motor diferencial, të dy motorët e atashuar me dy rrotat përkatëse duhet të jenë të drejtuar së bashku pikërisht në të njëjtin profil shpejtësie, e cila mund të ketë variacione konsiderueshëm të vështira midis rrotave, motorëve dhe ndryshimeve të mjedisit. Kontrolli i një roboti shumë drejtimsh për një drejtim të caktuar të udhëtimit është më i vështirë dhe shpesh më pak i saktë kur e krahasojmë me dizajnin më pak të manovrueshëm [2].

3.3 Sistemet Koordinativ

Funksioni kryesor i sistemeve koordinativ është të përfaqësojnë pozicionin e robotit. Në vijim janë përdorur dy sisteme koordinativ për modelimin e robotit të lëvizshëm dhe për qëllime kontrolli:

- Sistemi koordinativ inercial: $\{X_I, Y_I\}$ Ky është sistem koordinativ fiks në planin e robotit.
- Sistemi koordinativ i Robotit: $\{X_R, Y_R\}$ Ky është sistem koordinativ që i bashkangjitet robotit.

Të dy sistemet koordinativ të mësipërmjanë paraqitur në figurën 3-6

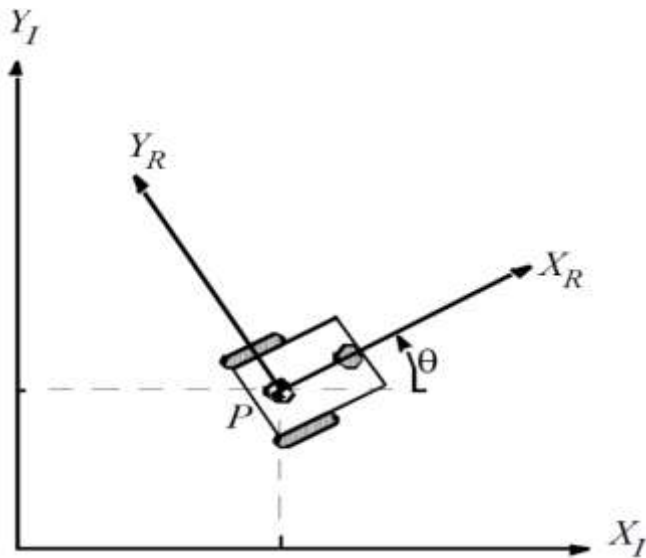


Figura 3-6: Sistemet koordinativ inercial dhe të robotit

Futja e këtyre sistemeve koordinativ është e dobishme në modelimin kinematik të robotit i cili do të shpjegohet në paragrafin tjetër. Çështje e rëndësishme që duhet të shpjegohet është lidhja në mes të këtyre dy sistemeve. Pozicioni i robotit në sistemin koordinativ inercial dhe të robotit mund të përcaktohet si më poshtë:

$$q_I = [x_I \quad y_I \quad \theta_I]^T \quad (3.1)$$

$$q_R = [x_R \quad y_R \quad \theta_R]^T \quad (3.2)$$

Hartografia në mes të këtyre dy sistemeve koordinativ është nëpërmjet transformimit standart të rrotullimit ortogonal:

$$\dot{q}_R = R(\theta)\dot{q}_I \quad (3.3)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Duke përdorur ekuacionet e mësipërme, ne kemi marrëdhënien ndërmjet shpejtësisë së robotit në sistemin koordinativ lokal dhe sistemin koordinativ inercial e cila është shumë e rëndësishme në kinematikën e robotit.

3.3.1 Modeli Kinematik i Robotit të Lëvizshëm

Kinematika është studimi më i thjeshtë i sjelljes së sistemeve mekanike. Në robotikën e lëvizshme sjellja mekanike e robotëve duhet të kuptohet, njëkohësisht si një mënyrë për të dizenuar robotë të lëvizshëm të përshtatshme për të kryer detyra dhe të jenë të aftë të gjenerojnë ‘software’ kontrolli [86, 87]. Në kushtet e lëvizjes pa marrë parasysh forcat që ndikojnë në to, studimi i matematikës së lëvizjes quhet kinematikë, dhe ajo merret me marrëdhëniet gjeometrike që kontrollojnë sistemin e robotit të lëvizshëm

Qëllimi i modelimit kinematik të robotit është për të gjetur shpejtësinë e robotit në sistemin koordinativ inercial si një funksion të shpejtësisë së rrotave dhe parametrave gjeometrike të robotit (konfigurimit të koordinatave). Me fjalë të tjera ne duam të përcaktojmë shpejtësinë e robotit $\dot{q} = [\dot{x}\dot{y}\dot{\theta}]^T$ si një funksion i shpejtësisë së rrotave $\dot{\phi}_R$ dhe $\dot{\phi}_L$ dhe parametrave gjeometrik të robotit ose ne duam të gjejmë lidhjen midis parametrave të kontrollit ($\dot{\phi}_R$ dhe $\dot{\phi}_L$) dhe sjelljes së sistemit në hapësirën e gjendjes [88, 89, 90]. Kinematika e robotit në përgjithësi ka dy analiza kryesore, një kinematik e drejtë dhe një kinematikë inverse:

- Kinematika e drejtë:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, \text{parametrat gjeometrik}) \quad (3.5)$$

- Kinematika Inverse:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} = f(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}) \quad (3.6)$$

Kinematika e drejtë e robotit të lëvizshëm me makinë diferenciale do të diskutohet në paragrafin tjetër.

3.3.2 Modeli i Kinematikës së Drejtë

Supozojmë përbërjen (setup-in) e një roboti të lëvizshëm me makinë diferenciale i cili ka dy rrota me rreze R_a të vendosura me një distancë L nga qendra e robotit siç tregohet në Figurën 3-7:

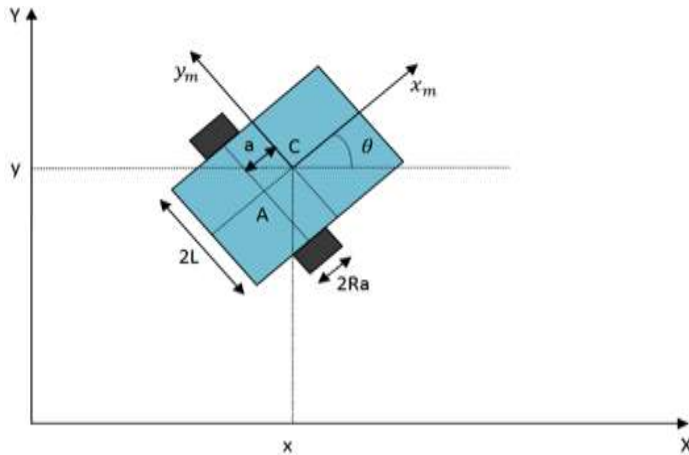


Figura 3-7: Modeli i robotit të lëvizshëm me makinë diferenciale

Shënimet e mëposhtme do të përdoren në këtë punim:

A : Ndërprerja e boshtit të simetrisë me aksin e rrotave lëvizëse

C : Qendra e masës së platformës

a : Distanca midis qendrës së masës dhe rrotave lëvizëse në drejtimin-x

L : Distanca mes secilës rrotë të makinës dhe boshtit të robotit në simetri në drejtim-y

R_a : Rrezja e secilës rrotë lëvizëse

$\dot{\phi}_R$: Shpejtësia e rrotullimit të rrotës së djathtë

$\dot{\phi}_L$: Shpejtësia e rrotullimit të rrotës së majtë

v : Shpejtësia e transferueshme (direkte) e platformës në sistemin koordinativ lokal

ω : Shpejtësia rrotulluese e platformës në sistemin koordinativ lokal dhe global

Problemi i kinematikës së drejtë mund të përshkruhet si problemi i gjetjes së funksionit të mëposhtëm:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = f(\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, L, R_a, \theta) \quad (3.7)$$

Shpejtësia e secilës rrotë në sistemin koordinativ të robotit është $R_a \dot{\phi}$, për këtë arsye shpejtësia e transferueshme (direkte) në sistemin koordinativ të robotit është shpejtësi mesatare:

$$v = R_a \frac{\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L}{2} \quad (3.8)$$

Dhe shpejtësia rrotulluese është:

$$\omega = \frac{R_a}{2L} (\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L) \quad (3.9)$$

Duke pasur parasysh se $\dot{q}_I = R(\theta)^{-1} \dot{q}_R$, modeli i plotë që është shpejtësia e robotit në sistemin koordinativ inerciale është:

$$\dot{q}_I = R(\theta)^{-1} \frac{R_a}{2} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L \\ 0 \\ \dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L \\ L \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Inversi i matricës së rrotullimit është:

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Prandaj shpejtësia e robotit në sistemin koordinativ global apo inercial është:

$$\begin{aligned} \dot{q}_I = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{R_a}{2} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L \\ 0 \\ \dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L \\ L \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_a \frac{\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L}{2} \cos(\theta) \\ R_a \frac{\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L}{2} \sin(\theta) \\ \frac{R_a}{2L} (\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Ekuacioni i mësipërm është ekuacioni i përgjithshëm i kinematikës së drejtëpër një robot të lëvizshëm me makinë diferenciale.

3.3.3 Kufizimet Kinematike

Supozimet e mëposhtme në lidhje me lëvizjen e rrotave të shkaktjnë kufizime në kinematikën e robotit:

- Lëvizja bëhet në një plan horizontal
- Pika e kontaktit midis rrotave dhe tokës
- Rrotat nuk janë të deformueshme
- Rrotullimi i pastër që do të thotë se ne kemi qendrën e castit të shpejtësisë zero në pikën e kontaktit të rrotave dhe tokës.
- Nuk ka rrëshqitje ose shkarje
- Nuk ka fërkime të rrotullimit rreth pikave të kontaktit
- Boshti drejtues është ortogonal me sipërfaqen
- Rrotat janë të lidhura me një kornizë të ngurtë (shasi)

Duke marrë parasysh supozimet e mësipërme në lidhje me lëvizjen e rrotës, roboti do të ketë një lloj të veçantë kufizimi të quajtur kufizim Nonholonomic. Një kufizim nonholonomic është një pengesë në mundësitë e shpejtësisë të një trupi. Për rastin e robotit të lëvizshëm me makinë diferenciale, ajo thjesht do të thotë se roboti mund të lëviz në disa drejtime (përpara dhe prapa), por jo në drejtime të tjerë (anash) siç është treguar në figurën 3-8:

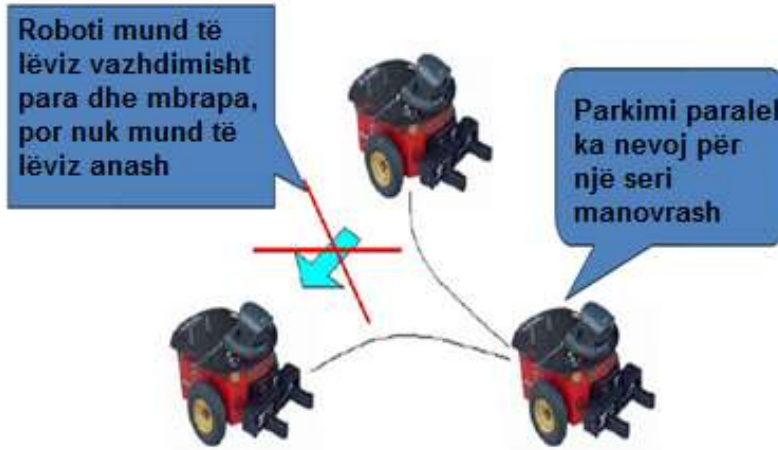


Figura 3-8: Kufizimi nonholonomic në lëvizjen e robotit

Duke pasur këto lloj pengesash në sistem do të kemi disa sfida në planifikimin e lëvizjes dhe kontrollin e sistemeve të tilla të cilat do të shpjegohen në paragrafin e algoritmit të kontrollit në këtë punim. Ekuacionet e kufizimeve nonholonomic për robotin e lëvizshëm me makinë diferenciale [2, 88, 89, 90] treguar në figurën 3-6 janë si më poshtë:

- Nuk ka kufizim në rrëshqitjen anësore:

$$\dot{y}_c \cos \theta - \dot{x}_c \sin \theta - \dot{\theta} a = 0 \quad (3.13)$$

$\dot{y}_c$ dhe $\dot{x}_c$ janë komponentet e shpejtësisë në sistemin inercial. Ky kufizim do të thotë se shpejtësia e pikës së qendrës së robotit do të jetë në drejtim të aksit të simetrisë dhe lëvizja në planin ortogonal do të jetë zero.

- Kufizimi i pastër në rrotullim:

$$\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta + L \dot{\theta} = R_a \dot{\phi}_R \quad (3.14)$$

$$\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta - L \dot{\theta} = R_a \dot{\phi}_L \quad (3.15)$$

Ky kufizim tregon se rrotat lëvizëse nuk rrëshqasin. Të tre kufizimet mund të shkruhen në formën e mëposhtme:

$$A(q) \dot{q} = 0 \quad (3.16)$$

Në të cilën :

$$A(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & a & 0 & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & L & -R_a & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & -L & 0 & -R_a \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_R \\ \dot{\phi}_L \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Përfaqësimi i mësipërm i kufizimit nonholonomic është i dobishëm kur ne duam të marrim në llogaritje në modelimin dinamik edhe kufizimet[2, 88, 89, 90]. Modelimi dinamik i sistemit që është pjesa tjetër e rëndësishme e modelimit të robotit do të diskutohet në paragrafin tjetër.

3.4 Modelimi Dinamik i Robotit të Lëvizshëm

Formulimi i ekuacioneve të lëvizjes, ose dinamika e një roboti është thelbësore në analizën, projektimin dhe kontrollin e një roboti. Modelimi dinamik në përgjithësi është studimi i lëvizjes së sistemit në të cilin janë modeluar forcat dhe kjo mund të përfshijë energjitë dhe shpejtësitë lidhur me lëvizjet. Dallimi kryesor në mes modelimit dinamik dhe kinematik është se në kinematik studiojmë lëvizjen pa marrë parasysh forcat që ndikojnë në lëvizje dhe ne vetëm merremi me marrëdhëniet gjeometrike që drejtojnë sistemin.

Një sistem i robotit të lëvizshëm ka një hapësirë konfigurimi n -dimensionale L , me koordinata të përgjithshme $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ dhe i nënshtrohet m kufizimeve që mund të përshkruhen si vijon nga ekuacioni i përgjithshëm dinamik [58, 91, 92, 93]:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (3.19)$$

Ku:

$M(q)$ është matrica e inercisë e përcaktuar simetrike pozitive

$V(q, \dot{q})$ është matrica e forcave qendërsynuese dhe Coriolis (forca fiktive)

$F(\dot{q})$ është matrica e fërkimit me sipërfaqen

$G(q)$ është vektori gravitacionale

τ_d Shënohen shqetësimet kufizuese të panjohura, duke përfshirë dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara

$B(q)$ është matrica transformimi të hyrjes

τ është vektori i hyrjes

$A^T(q)$ është matrica e lidhur me kufizimet

λ është vektori i forcave kufizuese

3.4.1 Qasja Dinamike Sipas Langranzhit

Dinamika analitike është një qasje në dinamikë e cila trajton sistemin si një i tërë që ka të bëjë me të gjitha sasit skalare si energjitë kinetike dhe potenciale të sistemit. Langranzh (1736-1813) propozoi një qasje e cila ofron një metodë të fuqishme dhe të gjithanshme për formulimin e ekuacioneve të lëvizjes për çdo sistem dinamik. Ekuacionet e Langranzhit janë ekuacionet diferenciale në të cilat në fillim merren në konsideratë energjitë e sistemit dhe puna bëhet në një cast kohe. Derivim i ekuacionit të Langranzhit

për sistemet holonomic kërkon që koordinatat e përgjithësuara të jenë të pavarura. Për një sistem nonholonomic megjithatë, duhet që numri i koordinatave të përgjithësuar të jetë më shumë se sa numri i shkallëve të lirisë, e cila vjen për shkak të kufizimeve në lëvizjen e sistemit.

Nëse ka m ekuacione kufizuese nonholonomic të formës së mëposhtme në sistem:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} dq_i + a_{jt} dt = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.20)$$

Ku a_{ij} janë funksione të koordinatave të përgjithshme, atëherë forma e përgjithshme e ekuacionit të Lagranzhit është si vijon:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^m \lambda_j a_{ji} + Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.21)$$

Ku:

$q_1, q_2, \dots, q_n$ janë koordinatat e përgjithësuara

$L = T - V$ është Lagranzh që është dallimi në mes energjisë kinetike dhe potenciale të sistemeve.

λ_j është shumëzues i Lagranzhit i cili lidh kufizimet me forcat e pengesave

Q_i Forcat jokoservative në sistem

Përveç këtyre n ekuacioneve, ne kemi m ekuacionet e kufizimeve për të zgjidhur për $(m+n)$ panjohura, dmth q 's dhe λ 's.

Hapi i parë në gjetjen e ekuacionit dinamik është të gjejmë energjitë kinetike dhe potenciale të sistemeve. Energjia potenciale e sistemit është zero për shkak se levizja është e kufizuar në tokë. Funksioni i energjisë kinetike të robotit mund të rrjedh në përputhje me shpejtësitë e treguara në Figurën 3-9:

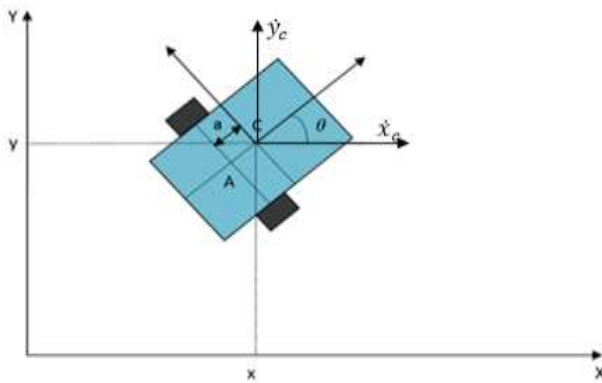


Figura 3-9: Shpejtësitë e qendrës së robotit

Për të gjetur shpejtësinë e pikës A dhe C:

$$x_c = x_A + a \cos \theta \quad (3.22)$$

$$y_c = y_A + a \sin \theta \quad (3.23)$$

Prandaj:

$$\dot{x}_c = \dot{x}_A - a \dot{\theta} \sin \theta \quad (3.24)$$

$$\dot{y}_c = \dot{y}_A + a \dot{\theta} \cos \theta \quad (3.25)$$

Shpejtësia e qendrës së robotit të rrotullimit A është:

$$v_A = \dot{x}_c \vec{i} + \dot{y}_c \vec{j} + a \dot{\theta} \sin \theta \vec{i} - a \dot{\theta} \cos \theta \vec{j} \quad (3.26)$$

$$v_A = (\dot{x}_c + a \dot{\theta} \sin \theta) \vec{i} + (\dot{y}_c - a \dot{\theta} \cos \theta) \vec{j} \quad (3.27)$$

Energjia kinetike është:

$$T = \frac{1}{2} m v_A^2 + \frac{1}{2} I_A \dot{\theta}^2 \quad (3.28)$$

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}_c^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}_c^2 + m \dot{x}_c a \dot{\theta} \sin \theta - m \dot{y}_c a \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} m a^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_A \dot{\theta}^2 \quad (3.29)$$

Nga teorema e aksit paralel mund të themi se:

$$I_c + m a^2 = I_A \quad (3.30)$$

Prandaj energjia kinetike e sistemit do të jetë:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{x}_c^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}_c^2 + \frac{1}{2}I_c\dot{\theta}^2 + ma^2\dot{\theta}^2 + m\dot{x}_ca\dot{\theta}\sin\theta - m\dot{y}_ca\dot{\theta}\cos\theta \quad (3.32)$$

Nga më sipër ekuacioni i energjisë kinetike dhe duke ditur se energjia potenciale është zero, Lagranzhi do të bëhet:

$$L = \frac{1}{2}m\dot{x}_c^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}_c^2 + \frac{1}{2}I_c\dot{\theta}^2 + ma^2\dot{\theta}^2 + m\dot{x}_ca\dot{\theta}\sin\theta - m\dot{y}_ca\dot{\theta}\cos\theta \quad (3.33)$$

Koordinatat e përgjithësuara për t'u përdorur në formulimin e Langranzhit janë si më poshtë:

$$q = [x_c, y_c, \theta] \quad (3.34)$$

$$\dot{q} = [\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\theta}] \quad (3.35)$$

Qasja hapi pas hapi për të gjetur ekuacionet dinamike duke përdorur koordinatat e përgjithshme dhe Langranzhin është si vijon:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_c} = m\dot{x}_c + ma\dot{\theta}\sin\theta \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_c} = m\dot{y}_c - ma\dot{\theta}\cos\theta \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = I_c\dot{\theta} + 2ma^2\dot{\theta} + m\dot{x}_c a \sin\theta - m\dot{y}_c a \cos\theta \quad (3.38)$$

Derivatet në kohë të tre ekuacioneve të mësipërme janë si më poshtë:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_c} \right) = m\ddot{x}_c + ma\ddot{\theta}\sin\theta + ma\dot{\theta}^2\cos\theta \quad (3.39)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}_c} \right) = m\ddot{y}_c - ma\ddot{\theta}\cos\theta + ma\dot{\theta}^2\sin\theta \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) &= I_c\ddot{\theta} + 2ma^2\ddot{\theta} + m\ddot{x}_c a \sin\theta + m\dot{x}_c \dot{\theta} \cos\theta - m\ddot{y}_c a \cos\theta \\ &\quad + m\dot{y}_c \dot{\theta} \sin\theta \end{aligned} \quad (3.41)$$

Zëvendësojmë termin e mësipërm në ekuacionete Lagranzhit dhe kemi:

$$m\ddot{x}_c + ma\ddot{\theta}\sin\theta + ma\dot{\theta}^2\cos\theta = F_x + C_1 \quad (3.46)$$

$$m\ddot{y}_c - ma\ddot{\theta}\cos\theta + ma\dot{\theta}^2\sin\theta = F_y + C_2 \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} (I_c + 2ma^2)\ddot{\theta} + m\ddot{x}_c a \sin\theta + m\dot{x}_c \dot{\theta} \cos\theta - m\ddot{y}_c a \cos\theta + m\dot{y}_c \dot{\theta} \sin\theta \\ - m\dot{x}_c a \dot{\theta} \cos\theta - m\dot{y}_c a \dot{\theta} \sin\theta = \tau + C_3 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Thjeshtojmë ekuacionet e mësipërme dhe kemi:

$$m\ddot{x}_c + ma\ddot{\theta}\sin\theta + ma\dot{\theta}^2\cos\theta = F_x + C_1 \quad (3.49)$$

$$m\ddot{y}_c - ma\ddot{\theta}\cos\theta + ma\dot{\theta}^2\sin\theta = F_y + C_2 \quad (3.50)$$

$$(I_c + 2ma^2)\ddot{\theta} + m\ddot{x}_c a \sin\theta - m\ddot{y}_c a \cos\theta = \tau + C_3 \quad (3.51)$$

Ku:

F_x është forca ekzekutuese në drejtimin-x

F_y është forca ekzekutuese në drejtimin-y

τ është momenti rrotullues i rrotullimit të ekzekutuesit në robot

C_x, C_y, C_θ janë forcat penguese në drejtimet x, y dhe θ .

Duke prezantuar ekuacionet e mësipërme në formë matricore kemi:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & m \sin \theta \\ 0 & m & -m \cos \theta \\ m \sin \theta & -m \cos \theta & I_C + 2ma^2 \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} ma\dot{\theta}^2 \cos \theta \\ ma\dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_\theta \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Ne mund të lidhim forcat në drejtimet x, y dhe θ me momentin rrotullues të ekzekutuesit në çdo rrotë sipas diagramit të trupit të lirë të robotit treguar në figurën 3-10:

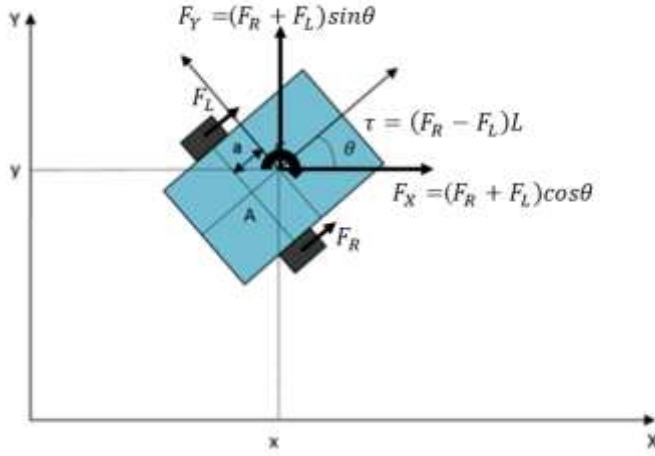


Figura 3-10: Diagrami i trupit të lirë të robotit

$$F_R = \frac{\tau_R}{R_a} \quad (3.53)$$

$$F_L = \frac{\tau_L}{R_a} \quad (3.54)$$

$$F_x = \left(\frac{\tau_R}{R_a} + \frac{\tau_L}{R_a} \right) \cos \theta = \frac{\cos \theta}{R_a} (\tau_R + \tau_L) \quad (3.55)$$

$$F_y = \left(\frac{\tau_R}{R_a} + \frac{\tau_L}{R_a} \right) \sin \theta = \frac{\sin \theta}{R_a} (\tau_R + \tau_L) \quad (3.56)$$

$$\tau = (F_R - F_L)L = \frac{L}{R_a} (\tau_R - \tau_L) \quad (3.57)$$

Sipas ekuacioneve të mësipërme, ne mund të shkruajmë matricën e forcës të hyrjes në ekuacionin dinamik të sistemit si më poshtë:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{R_a} (\tau_R + \tau_L) \\ \frac{\sin \theta}{R_a} (\tau_R + \tau_L) \\ \frac{L}{R_a} (\tau_R - \tau_L) \end{bmatrix} = \frac{1}{R_a} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ L & -L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Duke krahasuar ekuacionin e mësipërm dhe formën e përgjithshme të ekuacionit dinamik të robotit (3.19), ne kemi parametrat e mëposhtëm për sistemin e robotit të lëvizshëm me makinë diferenciale.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & m \sin \theta \\ 0 & m & -m \cos \theta \\ m \sin \theta & -m \cos \theta & I_c + 2ma^2 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m a \dot{\theta}^2 \cos \theta \\ m a \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$F(\dot{q}) = 0$ konsiderohet të jetë zero në këtë derivim

$G(q) = 0$ levizja është e kufizuar në tokë

$\tau_d = 0$ konsiderohet të jetë zero në këtë derivim

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_R \\ \tau_L \end{bmatrix}$$

$$A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ -a \end{bmatrix}$$

$$\lambda = -m(\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta) \dot{\theta}$$

$$B(q) = \frac{1}{R_a} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ L & -L \end{bmatrix}$$

Sistemi i mësipërm mund të transformohet në një përfaqësim më të përshtatshëm për qëllime kontrolli dhe simulimi. Në këtë transformim, ne jemi duke u përpjekur për të gjetur një mënyrë për të eliminuar termin kufizues nga ekuacioni. Dy matricat e mëposhtme janë përcaktuar për të bërë këtë transformim:

$$v_a(t) = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_R \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -a \sin \theta \\ \sin \theta & a \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Duke hedhur një vështrim në ekuacion e kinematikës së drejtë, mund të kuptojmë se matrica $S(q)$ është matrica e modifikuar e kinematikës së drejtë e cila ka dyterma të shpejtësisë në lidhje me distancën midis qendrës së masës së robotit dhe boshtit të rrotës. Prandaj, ne mund të shkruajmë ekuacionin e mëposhtëm për sistemin:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = S(q) v_a(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -a \sin \theta \\ \sin \theta & a \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

Lehtësisht mund të provohet se matrica $S(q)$ ka lidhjen e mëposhtme me matricën $A(q)$:

$$S^T(q) A^T(q) = 0 \quad (3.73)$$

Ekuacioni i mësipërm është i dobishëm kur ne duam të eliminojmë termin kufizues nga ekuacioni kryesorë dinamik si do ta shohim në hapin e ardhshëm. Diferenciojmë ekuacionin (3.72), kemi:

$$\ddot{q} = \dot{S}(q) v_a(t) + S(q) \dot{v}_a(t) \quad (3.74)$$

Zëvendësojmë ekuacionin (3.74) në (3.69) dhe do të marrim ekuacionin (3.75), (3.76):

$$\begin{aligned} M(q)[\dot{S}(q)v_a(t) + S(q)\dot{v}_a(t)] + V_m(q, \dot{q})S(q)v_a(t) + F(\dot{q}) + G(q) \\ + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} M(q)\dot{S}(q)v_a(t) + M(q)S(q)\dot{v}_a(t) + V_m(q, \dot{q})S(q)v_a(t) + F(\dot{q}) + G(q) \\ + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (3.76)$$

Ku:

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m\dot{\theta}\cos\theta \\ 0 & 0 & m\dot{\theta}\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Hapi tjetër për të eliminuar matricën kufizuese $A^T(q)$ është që të shumëzojmë ekuacionin (3.76) me $S^T(q)$ si më poshtë:

$$\begin{aligned} [S^T(q)M(q)S(q)]\dot{v}_a(t) + [S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V_m^T(q, \dot{q})S]v_a(t) \\ + S^T(q)F(\dot{q}) + S^T(q)G(q) + S^T(q)\tau_d \\ = S^T(q)B(q)\tau - S^T(q)A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (3.78)$$

Siç mund të shihet nga ekuacioni i mësipërm, ne kemi $S^T(q)A^T(q)$ e cila është zero në bazë të ekuacionit (3.73). Prandaj termi kufizimit është eliminuar dhe ekuacioni i ri dinamik është:

$$\begin{aligned} [S^T(q)M(q)S(q)]\dot{v}_a(t) + [S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V_m^T(q, \dot{q})S]v_a(t) \\ + S^T(q)F(\dot{q}) + S^T(q)G(q) + S^T(q)\tau_d = S^T(q)B(q)\tau \end{aligned} \quad (3.79)$$

Nga përkufizimet përkatëse të mëposhtme mund të rishkruajmë ekuacionin e mësipërm si më poshtë:

$$\bar{M}(q)\dot{v}_a(t) + \bar{V}_m(q, \dot{q})v_a(t) + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{G}(q) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (3.80)$$

$$S^T(q)M(q)S(q) = \bar{M}(q) \quad (3.81)$$

$$S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V_m^T(q, \dot{q})S = \bar{V}_m(q, \dot{q}) \quad (3.82)$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m\dot{\theta}\cos\theta \\ 0 & 0 & m\dot{\theta}\sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Matrica e re e masës $\bar{M}(q)$ do të bëhet:

$$\begin{aligned}
 \bar{M}(q) &= S^T(q)M(q)S(q) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m & 0 & m\sin\theta \\ 0 & m & -m\cos\theta \\ m\sin\theta & -m\cos\theta & I_c + 2ma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.89) \\
 &= \begin{bmatrix} m\cos\theta & m\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & I_c + ma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_c + ma^2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Ekuacioni (3.80) është ekuacioni i cili është përdorur për analizen e kontrollit dhe simulimit të robotit. Qasja e mësipërme për modelimin dinamik të robotit është përdorur në referencat [46] dhe [47].

3.5 Modelimi i Ekzekutuesve

Ekzekutuesi është një pajisje që mekanikisht drejton një sistem robotik. Ka shumë klasifikime për ekzekutuesit. Ata që veprojnë direkt në një proces (ngarkesë, platformë) janë quajtur ekzekutues procesi. Motorët e nyjave lidhëse të manipulatorët robotik janë shembujt më të mirë të ekzekutuesve të procesit. Ekzekutuesit që automatikisht përdorin sinjalet e gabimit si përgjigje nga një proces në lidhjen e kundërt për të korrigjuar funksionimin e procesit janë quajtur ndihmës ekzekutues. Në motorët e veçantë që përdorin pozicionin, shpejtësinë, dhe ndoshta matjet e momentit rrotullues dhe inductin aktual apo fushën aktuale në lidhjen e kundërt, për të zhvendosur një peshë sipas një lëvizje të caktuar, janë quajtur ndihmës ekzekutues. Në mënyrë të qartë, motorët DC të cilët përdoren për lëvizjen e sistemit të robotit të lëvizshëm me makinë diferencial janë konsideruar të jenë ndihmës ekzekutues. Nëse karakteristikat e sistemit dhe kushtet e ngarkimit janë të njohura shumë saktë dhe nëse sistemi është i qëndrueshëm, është e mundur të planifikojmë sinjalin hyrës në një motor (tensioni i inductit), në mënyrë që të marrim një përgjigje të dëshiruar (trajektoren e lëvizjes ose momentin rrotullues). Ndryshimet e parametrave, paqartësitë e modelit dhe çrregullimet e jashtme mund të prodhojnë gabime të cilat mund të reduktohen duke përdorur metodat e kontrollit me lidhje të kundërt. Në një motor DC me induct (fushë) të kontrolluar që është edhe rasti për sistemin tonë, tensioni i inductit v_a është përdorur si hyrje kontrolli duke i mbajtur kushtet në qarkun e fushës konstante. Në mënyrë të veçantë rryma e fushës i_f është supozuar të jetë konstante. Si pasojë ne kemi ekuacionet e mëposhtme për modelin e motor DC:

$$T_m = k_m i_a \quad (3.117)$$

$$v_b = k_b \omega_m \quad (3.118)$$

Ku:

ω_m është shpejtësia këndore të motorit

i_a është rryma e induktit

Parametrat k_m dhe k_b janë quajtur konstante të momentit rrotullues dhe kostante e forcës kundër elektromotore respektivisht. Vini re se me njësitë e qëndrueshme, $k_m = k_b$ në rastin e konvertimit ideal të energjisë elektrike në energji mekanike në rotorin e motorrit. Ekuacioni për qarkun e induktit të rotorit është si vijon:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + v_b \quad (3.119)$$

Ku

v_a është tensioni ushqimit për induktit

v_b është tensioni i forcës kundër elektromotore.

R_a është rezistenca e induktit të bobinës

L_a është induktiviteti në induktin e bobinës

Duhet të theksohet këtu se induktiviteti neglizhohet zakonisht.

Ekuacioni mekanik i motorit i cili përftohet duke aplikuar ligjin e dytë të Njutonit në rotor është si më poshtë:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_L - b_m \omega_m \quad (3.120)$$

Ku:

J_m është inercia e rotorit

b_m është konstantja e shuarjes ekuivalente të rotorit

T_m është momenti rrotullues i rotorit

T_L është ngarkesë e momentit rrotullues të rotorit të motor

Ekuacionet mekanike dhe elektrike të motorit DC në fushën Laplace bëhen:

$$v_a - v_b = (L_a s + R_a) i_a \quad (3.121)$$

$$T_m - T_L = (J_m s + b_m) \omega_m \quad (3.122)$$

Ekuacionet (3.121) dhe (3.122) krahas ekuacioneve (3.117) dhe (3.118) na japin modelin e motor DC i cili është përdorur për lëvizjen e sistemit dhe do të përdoren për qëllime simulimi.

3.6 Simulimi i Sistemit

Simulimi është njohur si një mjet i rëndësishëm kërkimor që nga fillimi i shekullit të 20-të dhe tani. Simulimi është një vizualizim i fuqishëm planifikimi, dhe mjet strategjik në fusha të ndryshme të kërkimit dhe zhvillimit. Simulimi gjithashtu ka një rol shumë të rëndësishëm në robotikë. Mjete të ndryshme janë përdorur për analizën kinematike dhe dinamiketë sistemeve robotike, për programimin ‘off-line’, për të hartuar algoritme të ndryshme të kontrollit, për të hartuar strukturën mekanike të robotit , për të hartuar qelizat robotike dhe linjat e prodhimit, etj. Megjithatë, një paketë e përshtatëshme

kompjuterike është e nevojshme për të bërë detyrën e simulimit për sistemet robotike. Matlab dhe Matlab Simulink janë dy software të fuqishëm të cilët janë përdorur gjerësisht në fushën e kerkimit robotik dhe i kemi përdorur ato në këtë punim për të bërë simulimet. Bllok diagramat në Simulink nga pjesë të ndryshme të modelit të robotit të cilat kanë qenë rrjedhim nga pjesët e mëparshme të këtij kapitulli janë paraqitur dhe shpjeguar veçmas në këtë paragraf.

Bllok diagrami në Simulink e modelit mekanik të robotit e cila përfshin modelet dinamike dhe kinematike është treguar në figurën 3-13:

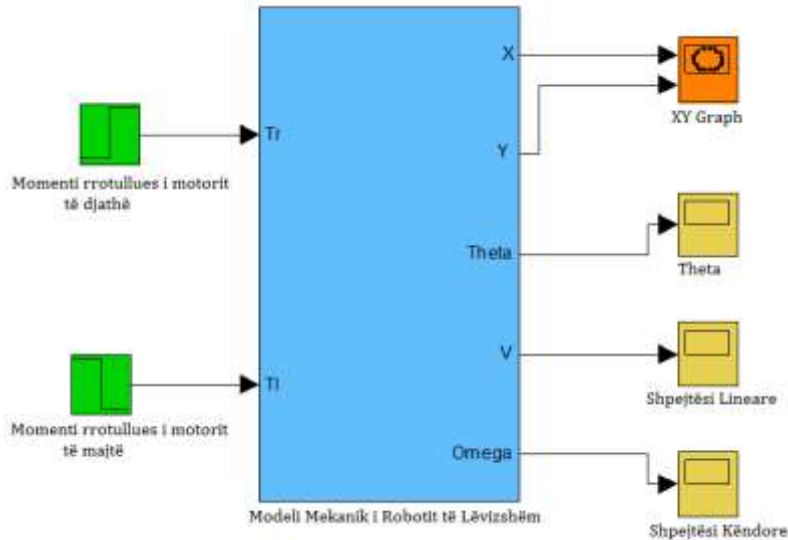


Figura 3-11:Diagrama bllok nëSimulink që simulon pjesën mekanike të modelit të robotit

Më sipër Bllok diagrami simulon modelin mekanike, pa përfshirë efektet aktuator. Ne thjesht zbatojmë momente rrotullimi të ndryshme si dalja e ekzekutuesit të rrotës së djathtë, ekzekutuesit të rrotës së majtë të modelit mekanike dhe analizojmë lëvizjen e robotit në përgjigje të këtyre momenteve rrotulluese të ndryshme.

Ekuacionet nga (3.80) në (3.88) për modelin dinamik dhe ekuacioni (3.52) për modelin kinematik janë zbatuar në formën e funksioneve MATLAB për të simuluar modelin robot mekanik siç është treguar në figurën e mësipërme. Funksionet Matlab të modelit dinamik dhe modeli kinematik janë të përfshira në shtojcë.

Hapi tjetër është të shtojmë diagramin bllok aktuator dhe të simulojmë modelin e tyre i cili është treguar në figurën 3-15:

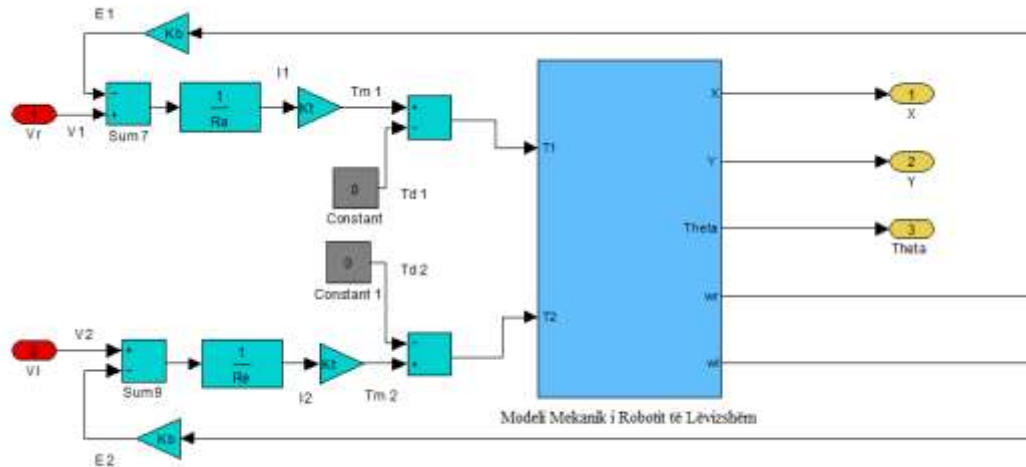


Figura 3-12: Bllok Diagrama në Simulink i Modeleve të Ekzekutuesve që i shtohet Modelit Mekanik

Ekuacionet (3.117), (3.118), (3.121) dhe (3.122) janë përdorur për të zbatuar modelet e motorit DC në çdo rrotë në MATLAB Simulink. Shtojmë modelin ekzekutues në modelin mekanik dhe ne mund të simulojmë sistemin e plotë i cili është treguar në figurën 3-16:

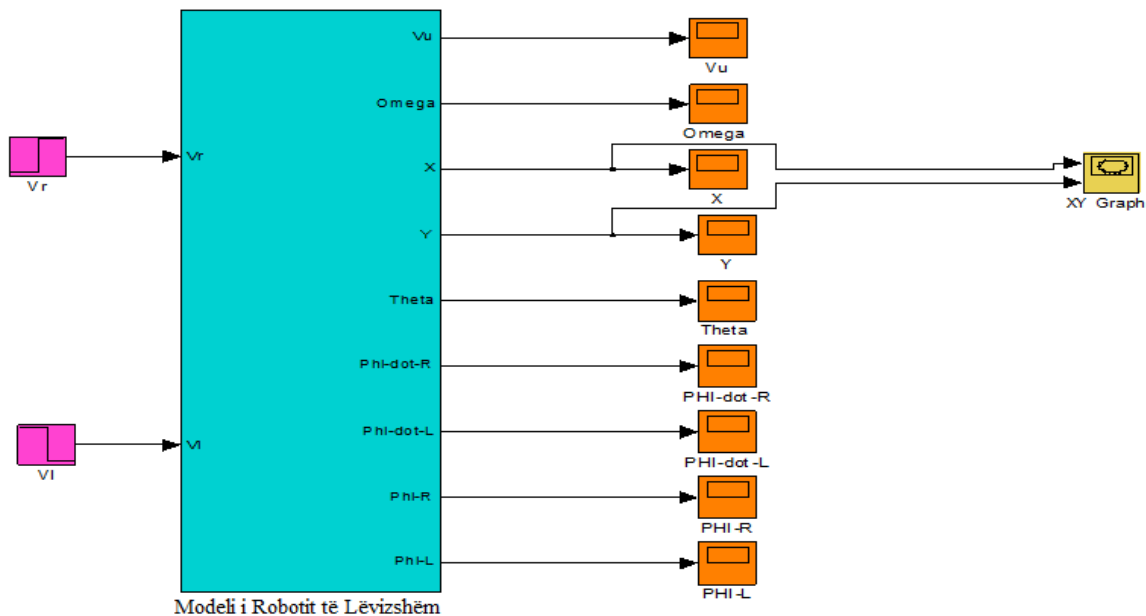


Figura 3-13: Diagrama Bllok në Simulink e Modelit të plotë të robotit.

Pas ndërtimit modeli në MATLAB Simulink ne duhet të përcaktojmë parametrat e robotit dhe të bëjmë disa teste për të verifikuar punën e modelit.

Parametrat e robotit të përdorur për të simuluar modelin janë paraqitur në tabelën 3-1:

Tabela 3-1: Parametrat e robotit të përdorur për simulim

Emri i Parametrit	Vlera e Parametrit	Përshkrimi
M	14 (KG)	Pesha e robotit me tre bateri
L	25 (cm)	Distanca midis rrotës drejtuese dhe aksit të simetrisë
a	5 (cm)	Distanca midis qendrës së masës dhe aksit të rrotës së makinës
Ra	8 (cm)	Rrezja e rrotës
I	5.5 (KG.m ²)	Momenti i masës së inercisë rreth qendër të masës
Km	0.36(N.m/A)	Kostantja e momentit rrotullues të motorit
Kb	0.35(V.s/rad)	Kostantja e forces kundra elektromotore te motorit
B	0(N.m.s)	Fërkimi viskoz
Le	0(Henry)	Induktiviteti i motorit
Re	8(ohm)	Rezistenca e induktit të motorit DC

Parametrat e mësipërme janë gjetur nga formulari i të dhënave të robotit , referenca [96]. Parametrat që kanë efekt të papërfillshëm konsiderohen të jenë zero. Pas përcaktimit të parametrave të robotit në një m-skedar, ne mund të bëjmë teste të ndryshëm për të verifikuar modelin. Testi i parë është: aplikojmë të njëjtën madhësi tensioni në amplitudë, por tensione me shenjë të kundërt për motorët e robotit. Lëvizja e robotit në përgjigje të hyrjeve të tilla është paraqitur në figurën 3-17:

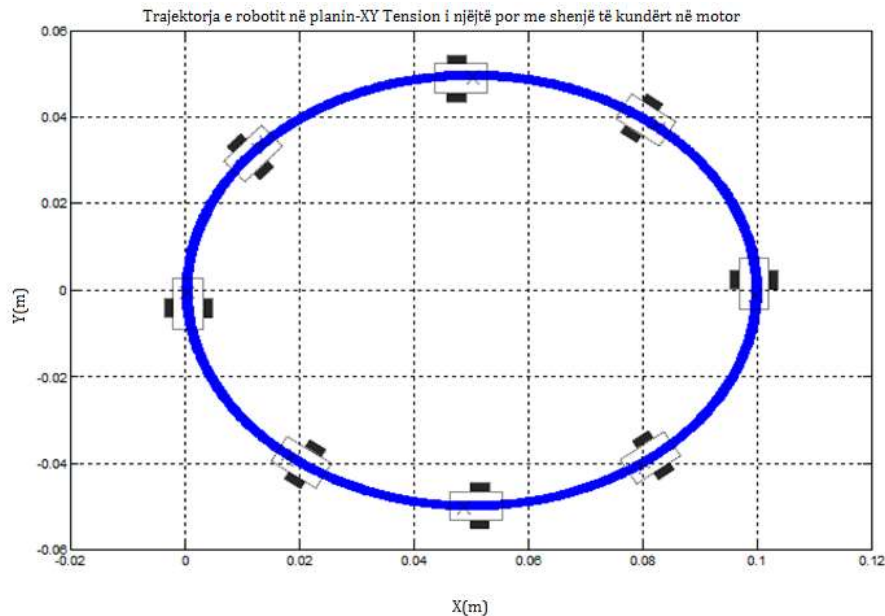


Figura 3-14: Lëvizja e robotit në përgjigje të tensionit me të njëjtën amplitudë por me shenjë të kundërt.

Siç mund të shihet nga figura 3-17, roboti do të bëjë një rreth, rreth një pike në qendër, kur kemi të barabarta momentet rrotulluese motorike por me shenjë të kundërt. Roboti është menduar që të rrotullohen rreth vetes në përgjigje të një hyrje të tillë. Arsyeja pse

bën një rreth dhe rrotullohet rreth tij shkak për këtë janë pasaktësitë midis qendrës së tij të masës dhe qendrës së rrotullimit. Testi tjetër që mund të verifikojë modelin është që të japim momente rrotullimi me të njëjtën shenjë, por jo me vlera të barabarta të roboti dhe të vezhgojmë lëvizjen. Figurat 3-18 dhe 3-19 tregojnë lëvizjen e robotit në përgjigje të të njëjtës shenjë, por jo hyrje të momentit të rrotullimit të barabarta:

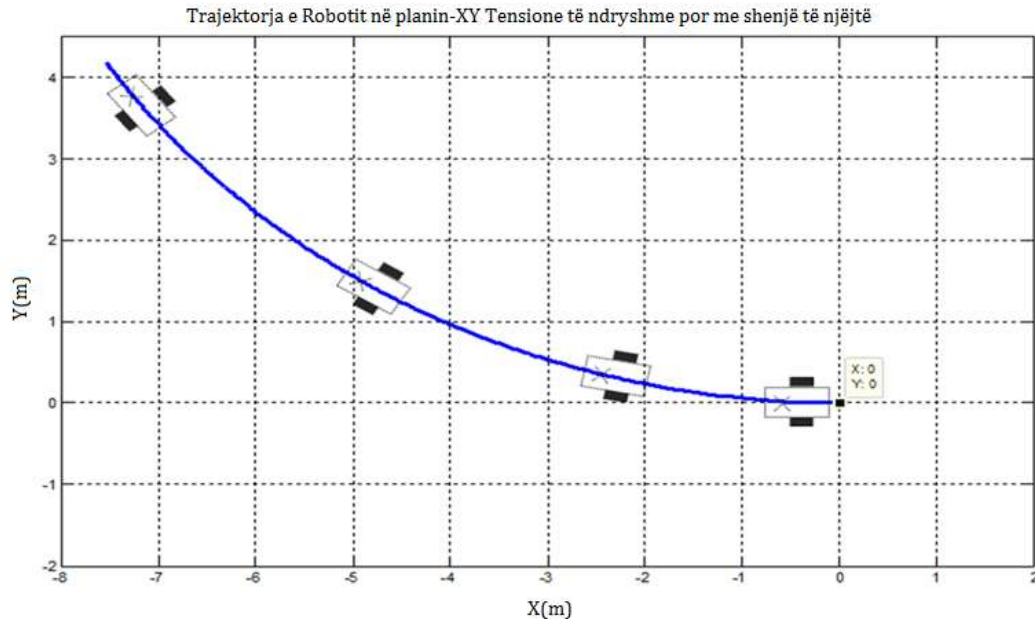


Figura 3-15: Lëvizja e robotit në përgjigje të dy momenteve të rrotullimit negativ por jo të barabarta.

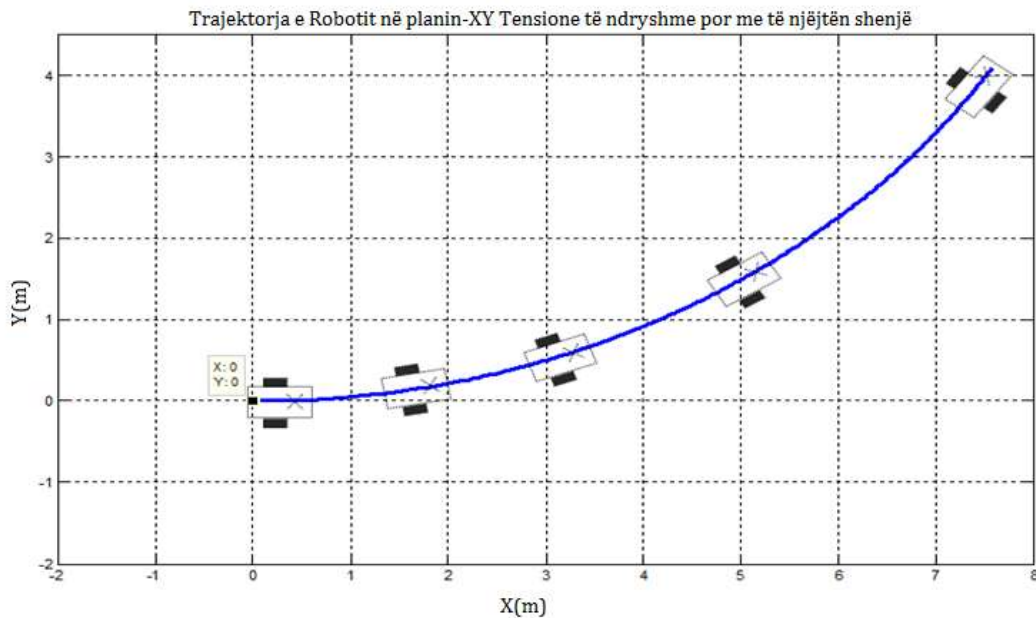


Figura 3-16: Lëvizja e robotit në përgjigje të dy hyrjeve të momentit rrotullues pozitiv por jo të barabarta.

Duke hedhur një vështrim në shifrat e mësipërme, mund të gjejmë se rezultatet e simulimit përputhen me kërkesën e një roboti të lëvizshëm me makinë diferenciale dhe modeli që marrim mund të përdoret për të kontrolluar dhe analizuar propozimet që do të bëhen në kapitujt e ardhshëm.

3.7. Përmbledhje

Ky kapitull përshkruan modelin matematik të robotit nonholonomic të lëvizshëm me rrota që varet nga analiza kinematike dhe dinamike nën kufizimin nonholonomic të rrotullimit të pastër dhe pa-rrëshqitje. Gjithashtu, këtu përshkruhet koncepti bazë i bartjes të robotit të lëvizshëm me rrota dhe karakteristikat themelore të robotit të lëvizshëm (stabiliteti, manovrimi dhe kontrollueshmëria). Në këtë kapitullit kemi përshkruar edhe modelin e ekzekutuesve të robotit të lëvizshëm dhe në fund të kapitullit kemi ndërtuar modelin në simulik të robotit duke shfytëzuar modelin kinematik, dinamik dhe modelin e ekzekutuesve të robotit.

KAPITULLI 4

Projektimi i Rregullatorit të Ndjekjes së Trajektores

4.1 Hyrje

Në literaturë problemi i ndjekjes së trajektores nonholonomice është thjeshtuar duke neglizhuar dinamikën e automjeteve dhe duke pasur parasysh vetëm sistemin drejtues. Për të llogaritur hyrjet e kontrollit të automjetit, është supozuar se ekziston një ndjekje e përsosur e shpejtësisë. Ka tre probleme me këtë qasje: së pari, supozimin e ndjekjes pefekte të shpejtësisë nuk e realizojmë dot në praktikë; së dyti, janë injoruar shqetësimet dhe më në fund, është e nevojshme njohja e plotë e dinamikës. Të dy qasjet ndryshme të kontrollit të propozuara në këtë tezë korrigjojnë këto lëshime me anë të një rregullatorit me rrjet neural NN (Neural Network). Algoritmi që do të spjegohet në këtë kapitull ofron një metodë që merr parasysh dinamikën e automjeteve për t'a konvertuar në komandat e sistemit të drejtimit në hyrje të kontrollit për automjetin aktual. Thjesht, dëshirojmë të kthejmë hyrjet e kontrollit $v(t)$ të përshkruara nga rregullatori i bazuar në kinematikë në një kontroll të momentit rrotullues $\tau(t)$ për makinën aktuale fizike. Kjo metodë lejon komandat e sistemit drejtues $v(t)$ që të konvertohen në moment rrotullues që marrin parasysh masën, fërkimin dhe parametrat e makinës aktuale. Në mënyrë që të hartohet një rregullator i tillë duhet të ndërmerren hapat në vijim: së pari, hyrjet e kontrollit të shpejtësisë në lidhjen e kundërt hartohen bazuar në një rregullator bazuar në kinematikë për të bërë gabimin e pozicionit asimptotikisht të qëndrueshëm. Më pas, një rregullator 'backstepping' llogaritet i momentit rrotullues projektohet i tillë që shpejtësitë e robotit të lëvizshëm të konvergojnë në hyrjet e dhëna të shpejtësisë nga rregullatori i bazuar në kinematik. Së fundi është konceptuar dhe projektuar neuro-rregullatori kinematik që mund të merret me shqetësimet e pamodeluara dhe dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara në robotin e lëvizshëm nonholonomic.

Problemi i ndjekjes së trajektores për një robot të lëvizshëm nonholonomic mund të përshkruhet dhe të formulohet si vijon [96, 97, 98]:

Le të jetë një trajektore refernce e përshkruar si vijon:

$$\dot{x}_r = v_r \cos \theta_r \quad (4.1)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin \theta_r \quad (4.2)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (4.3)$$

$$q_r = [x_r \quad y_r \quad \theta_r]^T \quad (4.4)$$

$$v_r = [v_r \quad \omega_r]^T \quad (4.5)$$

Me $v_r > 0$ për të gjithë t , të gjejmë një kontroll të lëmuar të shpejtësisë $v_c = f(e_p, v_r, K)$, i tillë që $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_r - q) = 0$, ku e_p , v_r dhe K janë gabimi i ndjekjes së pozicionit, vektori i shpejtësisë dhe vektori i nyjës së kontrollit respektivisht. Pastaj llogaritim hyrjet e momentit rrotullues për ekuacionin dinamik (3.80) të tillë që $v \rightarrow v_c$ si $t \rightarrow \infty$. Ky kapitull detajon hapat dhe pjesë të ndryshme të projektimit të këtij algoritmi të kontrollit.

4.2 Rregullatori ‘Backstepping’

Rregullatori ‘backstepping’ i bazuar në kinematikë për një robot të lëvizshëm nonholonomic është propozuar për herë të parë në vitin 1992 nga Kanayama [45] dhe është përdorur nga shumë studiues të tjerë në këtë fushë. Një rregull i qëndrueshëm i kontrollit të ndjekjes së trajektores për një robot të lëvizshëm nonholonomic i cili neglizhon dinamikën e automjeteve dhe është i bazuar në sistemin e drejtimit është përshkruar [45]. Në këtë sistem të kontrollit do të përdoren dy pozicione të robotit: Pozicioni referencë $q_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ dhe një pozicion aktual $q_c = [x_c \ y_c \ \theta_c]^T$. Pozicioni referencë është pozicioni që kërkohet të arrihet dhe pozicioni aktual është pozicioni i vërtetë në këtë moment. Bllok diagrama e kësaj strukture të kontrollit është treguar në figurën 4.1:

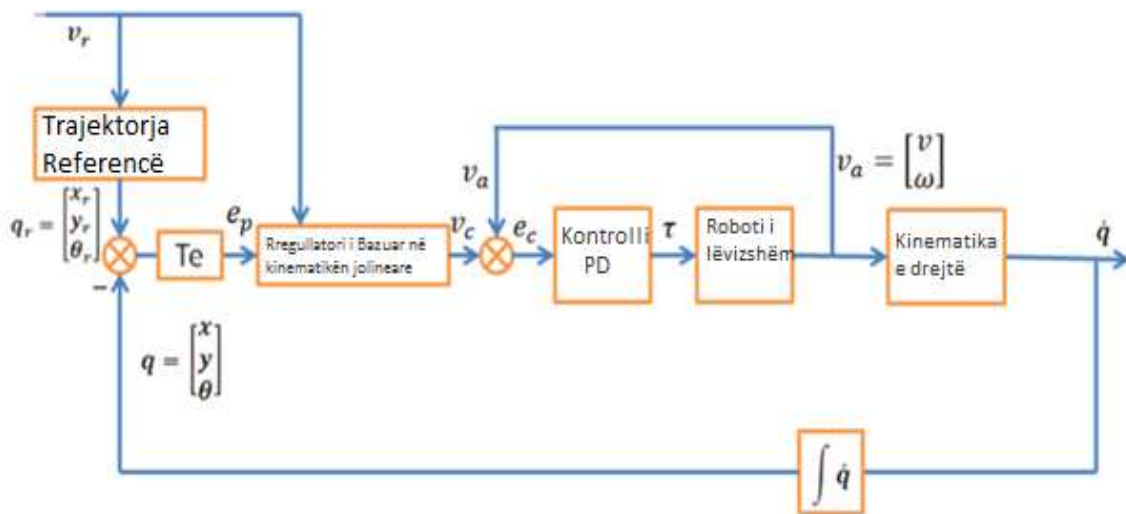


Figura4-1: Rregullatori backstepping i bazuar në kinematik

Ne përcaktojmë një pozicion gabimi ose gabimin në ndjekjen e pozicionit e_p në bazë të sistemit koordinativ lidhur me platformën e lëvizshme apo sistemin koordinativ lokal, si vijon:

$$e_p = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = T_e(q_r - q) \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}$$

Problemi i kontrollit në këtë rast do të llogaritet një rregull të kontrollit për automjetin, i cili llogaritet shpejtësitë e synuara $v_c = f(e_p, v_r, K)$ kjo e bën sistemin asimptotikisht të qëndrueshëm. Rregulli i kontrollit bazua në kinematik të propozuar është si më poshtë:

$$\begin{aligned} v_c &= \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta + K_x e_x \\ \omega_r + K_y v_r e_y + K_\theta v_r \sin e_\theta \end{bmatrix} \\ v_c &= f(e_p, v_r, K) \\ K &= (K_x, K_y, K_\theta) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ku K_x, K_y dhe K_θ janë konstante pozitive. Rregullatori PD në bllok diagramën e figurës (4-1) është një rregullator linear i cili është përgjegjës për konvertimin e shpejtësisë në dalje të rregullatorit në hyrje të momentit rrotullues për robotin. Qëndrueshmëria e rregullit të kontrollit të mësipërm do të provohet duke përdorur metodën e qëndrueshmërisë së Lyapunov-it në paragrafin tjetër.

4.2.1 Analizat e Qëndrueshmërisë Sipas Lyapunov

Analiza e qëndrueshmërisë së Lyapunov-it e rregullit të kontrollit në ekuacionin (4.7) është përshkruar si më poshtë:

Lemma 1:

Sipas ekuacionit (4.6) kemi:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \dot{e}_p = f(t, e_p) = \begin{bmatrix} \omega(e_p, q_r) e_y - v(e_p, q_r) + v_r \cos e_\theta \\ -\omega(e_p, q_r) e_x + v_r \sin e_\theta \\ \omega_r - \omega(e_p, q_r) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Provë:

Përdorim ekuacionet kinematike të robotit (3.3) dhe (3.12) dhe ekuacionin e gabimit të ndjekjes (4.6) dhe kemi:

$$e_p = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= (\dot{x}_r - \dot{x}) \cos\theta + (\dot{y}_r - \dot{y}) \sin\theta - (x_r - x) \dot{\theta} \sin\theta + (y_r - y) \dot{\theta} \cos\theta \\ &= e_y \omega - v + \dot{x}_r \cos(\theta_r - \theta) + \dot{y}_r \sin(\theta_r - \theta) \\ &= e_y \omega - v + v_r \cos e_\theta \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}\dot{e}_y &= -(\dot{x}_r - \dot{x})\sin\theta + (\dot{y}_r - \dot{y})\cos\theta - (x_r - x)\dot{\theta}\cos\theta \\ &\quad - (y_r - y)\dot{\theta}\sin\theta \\ &= -e_x\omega - \dot{x}_r\sin(\theta_r - \theta) + \dot{y}_r\cos(\theta_r - \theta) \\ &= -e_x\omega + v_r\sin e_\theta\end{aligned}\quad (4.11)$$

$$\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = \omega_r - \omega \quad (4.12)$$

Zëvendësojme v dhe ω nga $v(e_p, q_r)$ dhe $\omega(e_p, q_r)$ marrim lemmën

Propozimi 1:

Në qoftë se ne përdorim rregullin e kontrollit në ekuacionin (4.7), $e_p = 0$ është një pikë e qëndrueshme e ekuilibrit në qoftë se shpejtësis referencë $v_r > 0$.

Provë:

Le të propozojë një funksion skalar V si një funksion i Lyapunov-it kandidat për sistemin e mësipërme:

$$V = \frac{1}{2}(e_x^2 + e_y^2) + \frac{(1 - \cos(e_\theta))}{K_y} \quad (4.13)$$

Në mënyrë të qartë $V \geq 0$ dhe $V = 0$ nëse $e_p = 0$, pra më lart funksion V është një funksion i përcaktuar pozitiv.

Për qëllim të simulimit të kontrollit, ne përcaktojmë q_0 dhe q_f si pozicion i fillimit dhe pozicion i fundit i robotit dhe ne supozojmë $v_0 = v_f = 0$ për këtë rast. Forma e rrugës e cila mund të jetë çdo rrugë e tillë si një vijë e drejtë ose një sinusoidë është përcaktuar si një funksion midis komponenteve x dhe y të rrugës së robotit. Zbatimi i trajektores kubike dhe forma e rrugës është bërë përmes një funksioni MATLAB i cili është përfshirë në shtojcë dhe është përdorur në bllokun gjenerator të trajektores në Figurën 4-2 paraqitur në figurën 4 3:

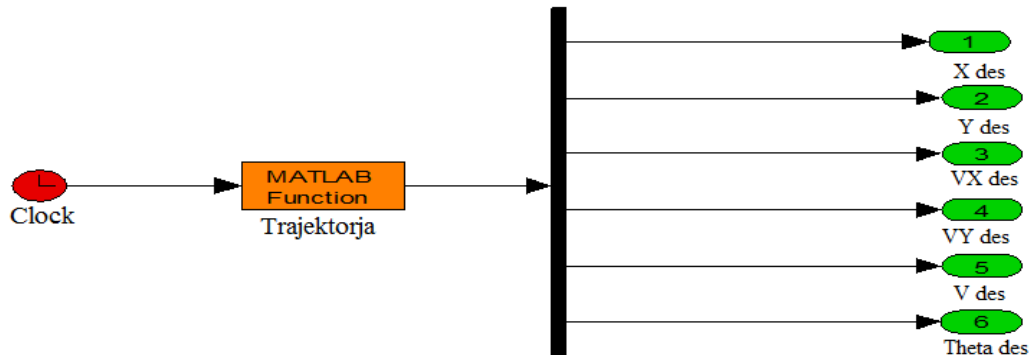


Figura4-2: Blloku i gjenerimit të trajektores në Simulink/Matlab

Duke përdorur diagramin bllok në figurën 4-2 dhe bllokun gjenerues të trajektores dhe funksionin Matlab ne mund të testojmë rregullatorin e bazuar në kinetik me trajektoreset e ndryshme referencë, pozicione të ndryshme fillestare për robotin dhe koeficientë të ndryshme të rregullatorit. Dy rezultate tipike simulimi për një ndjekje lineare janë paraqitur në Figurat 4-4 dhe 4-5:

Gjendja Fillestare e Robotit (x, y, θ) : $(1, 5, 0)$

Nyja e Rregullatorit e Bazuar ne Kinematike: $K_x = 111$ $K_y = 20$ $K_\theta = 102$

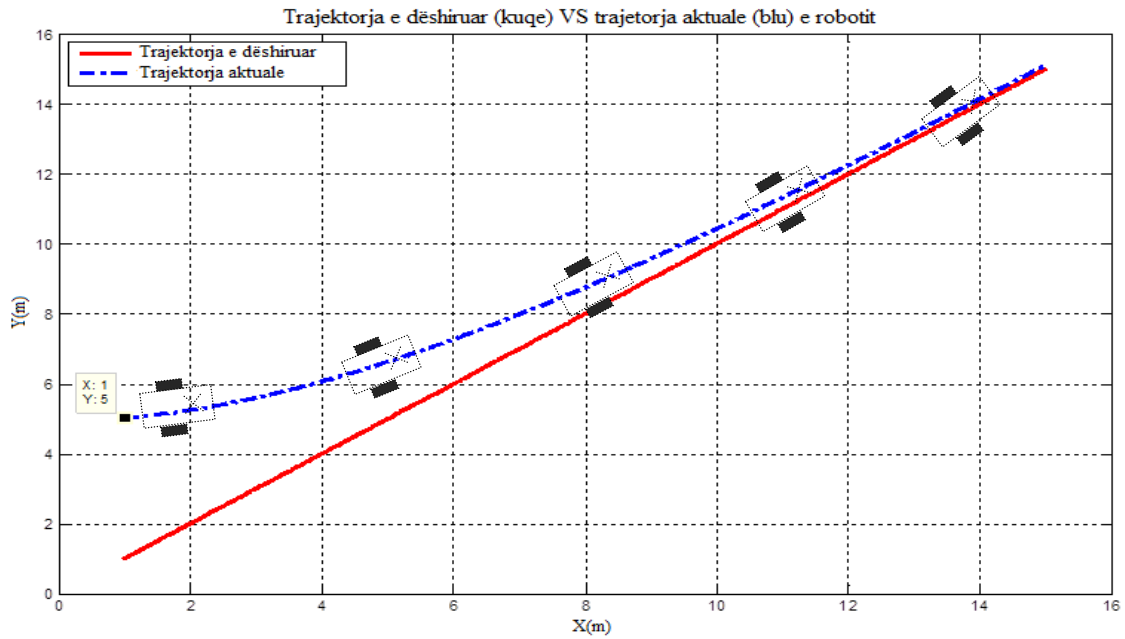


Figura4-3: Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y

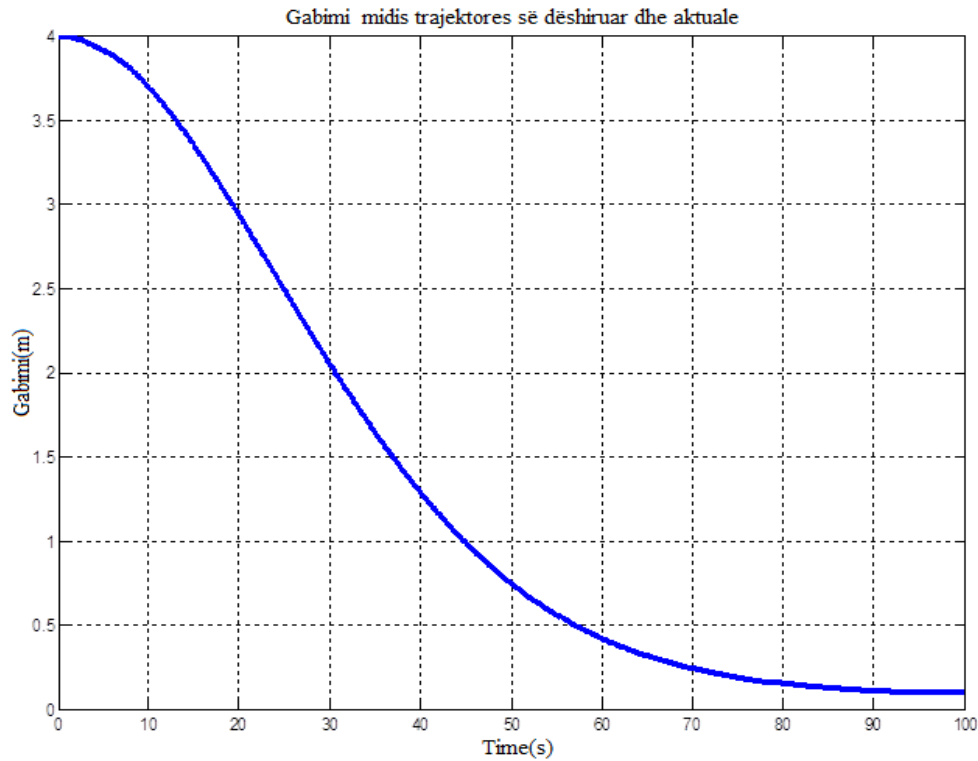


Figura4-4: Gabimi i trajektores së robotit

Figura 4-4 tregon trajektoren e robotit dhe trajektoren e referencës në planin x-y. Siç mund të shihet përgjigjja e robotit është e ngadalshme dhe gabimi i trajektores është rreth zero pas më

shumë se 100 sekonda. Gabimi i trajektores është paraqitur në figurën 4-5 llogaritet si më poshtë:

$$e_{tr} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2} \quad (4.18)$$

Koeficientët e rregullatorit bazuar në kinematik janë përshtatur të kenë përgjigje të shpejtë të ndjekjes së trajektores, por siç mund të shihet nga figura e mësipërme nuk mund të arrijmë një përgjigje të dëshiruar të ndjekjes së shpejtë të trajektores për shkak se ky algoritëm kontrolli nuk mer parasysh dinamikën e sistemit. Një përgjigje ndryshe e ndjekjes së trajektores me pozicion fillestar të robotit dhe koeficient të rregullatorit të ndryshëm tregohet në Figurat 4-6 dhe 4-7 për të sqaruar këtë performancë të rregullatorit:

Kushtete fillestare te Robotit(x, y, θ): (5, 1, 0)

Koeficiente e rregullatorit bazuar ne Kinematic : $K_x = 50$ $K_y = 10$ $K_\theta = 60$

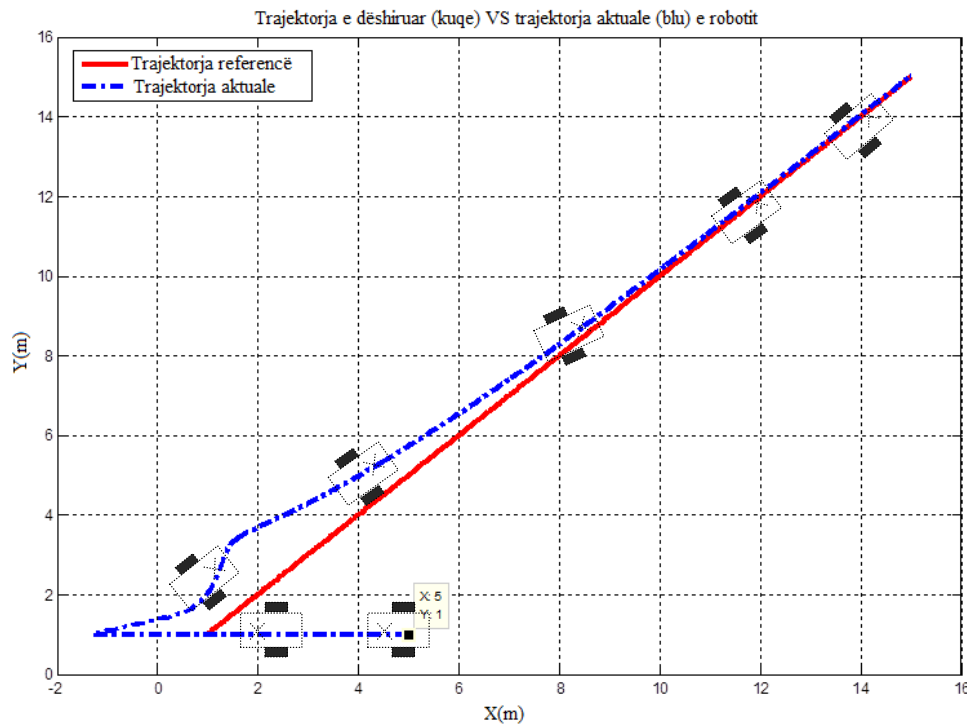


Figura4-5: Trajektorja referencë dhe trajektorja aktuale e robotit në planin x-y

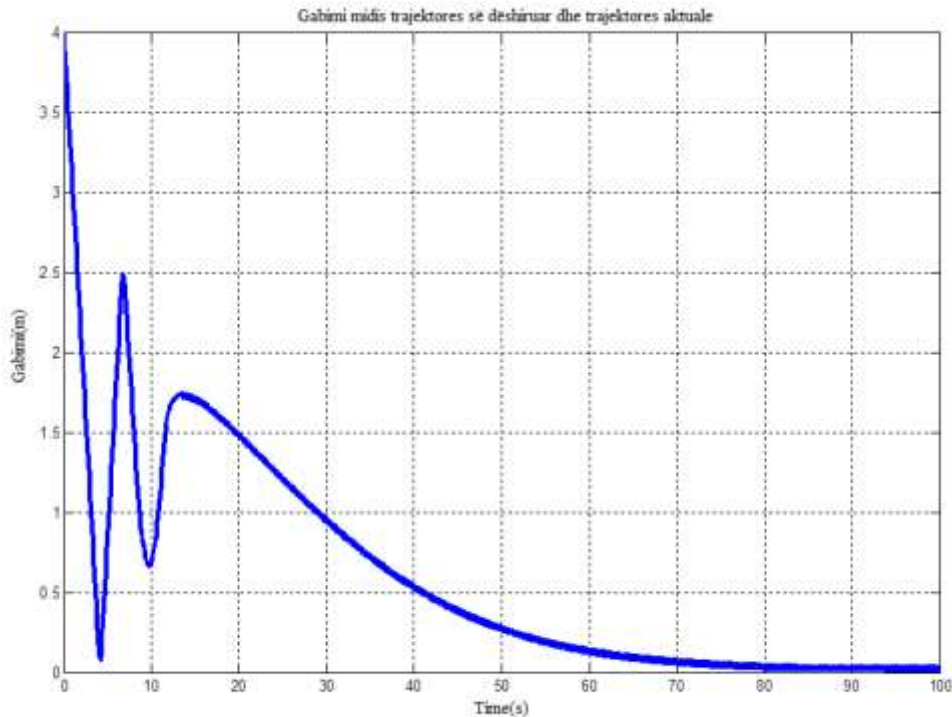


Figura4-6: Gabimi i trajektores së robotit

Konkluzione: Siç mund të shihet dhe të konkludohet nga figurat e mësipërme, duke përdorur rregullatorin e bazuar në kinematikë në fund do ta bëjë gabim zero, por përgjigja e ndjekjes së trajektores së sistemit nuk është e dëshirueshme për shkak se në disa raste ajo ka shumë luhajtje dhe në raste të tjera ajo është shumë e ngadalshme. Ka dy arsye për të mos patur një përgjigje të ndjekjes së trajektores të dëshirueshme për rregullatorin e bazuar në kinematikë. Arsyeja e parë është se ajo neglizhon dinamikën e sistemit të tilla si masa e automjeteve, momentin e inercisë dhe forcat centripetale dhe shpejtësitë centrifugale. Arsyeja e dytë është se koeficientët e rregullatorit duhet të përshtaten në përputhje me një trajektore referencë dhe pozicionin fillestar të robotit. Një grup i koeficientëve do të jetë i përshtatshëm për një trajektore referencë dhe jo të tjerat. Hapi tjetër për të përmirësuar arkitekturën e kontrollit për këtë sistem është shtimi i një rregullatori linearizimi me lidhje të kundërt jolineare të rregullatorit i bazuar në kinematik. Kjo metodë do të linearizojë dinamikën jolineare të sistemit dhe përmirëson përgjigjen e ndjekjes së trajektores. Kombinimi i rregullatorit bazuar në kinematik dhe lidhja e kundërt jolineare e bën strukturën e kontrollit një rregullator ‘backstepping’ me lidhje të kundërt jolineare i cili do të shpjegohet në paragrafin e ardhshëm.

4.3 Projektimi i Rregullatorit Backstepping Duke Përdorur Metodën e Lidhjes së Kundërt Jolineare

Paragrafi i mëparshëm ishte për zgjedhjen e një shpejtësie kontrolli $v(t)$ të përcaktuar në ekuacionin (4.7) për sistemin drejtues ose modelin kinematik të robotit. Në këtë paragraf ne dëshirojmë të konvertojmë një kontroll të përcaktuar si i tillë i $v(t)$ në një kontroll të momentit rrotullues $\tau(t)$ për platformën fizike aktuale. Siç është përmendur në kapitullin 3-të të modelimit, ekuacionet e plota të lëvizjes së platformës së lëvizshëm nonholonomic jepen nga ekuacionet (3.72) dhe (3.80) [46]:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = S(q)v(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -a\sin\theta \\ \sin\theta & a\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\bar{M}(q)\dot{v}(t) + \bar{V}_m(q, \dot{q})v(t) + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{G}(q) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (4.20)$$

Struktura e përgjithshme e kontrollit ‘backstepping’ është treguar në bllok diagramin e Figurës 4-8:

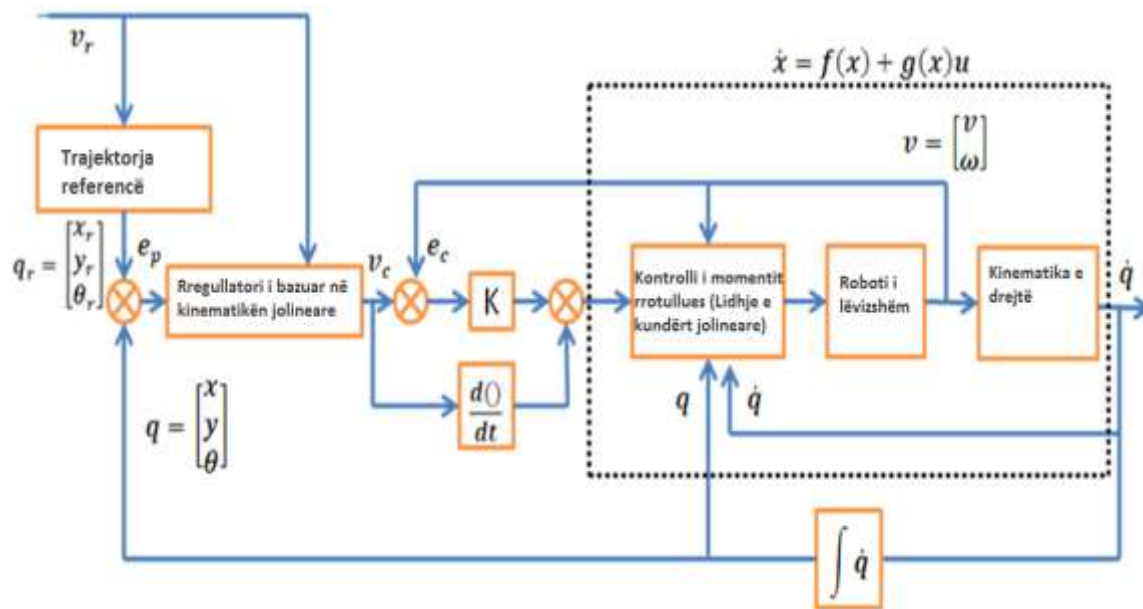


Figura4-7: rregullator backstepping me strukturë me lidhje të kundërt jolineare[46]

Qëndrueshmëria e algoritmit të kontrollit me ekuacion (4.25), do të bëhet duke përdorur analizën Lyapunov të qëndrueshmërisë në paragrafin tjetër.

4.3.2 Rezultatet në Simulink

Struktura e rregullatorit 'backstepping' është paraqitur në figurën 4-8 është përdorur për të ndërtuar bllok diagram ne Matlab Simulink për të simuluar përgjigjen e sistemit me këtë rregullator. Bllok diagrami ne Matlab Simulink për këtë strukturë të kontrollit është treguar në figurën 4 9:

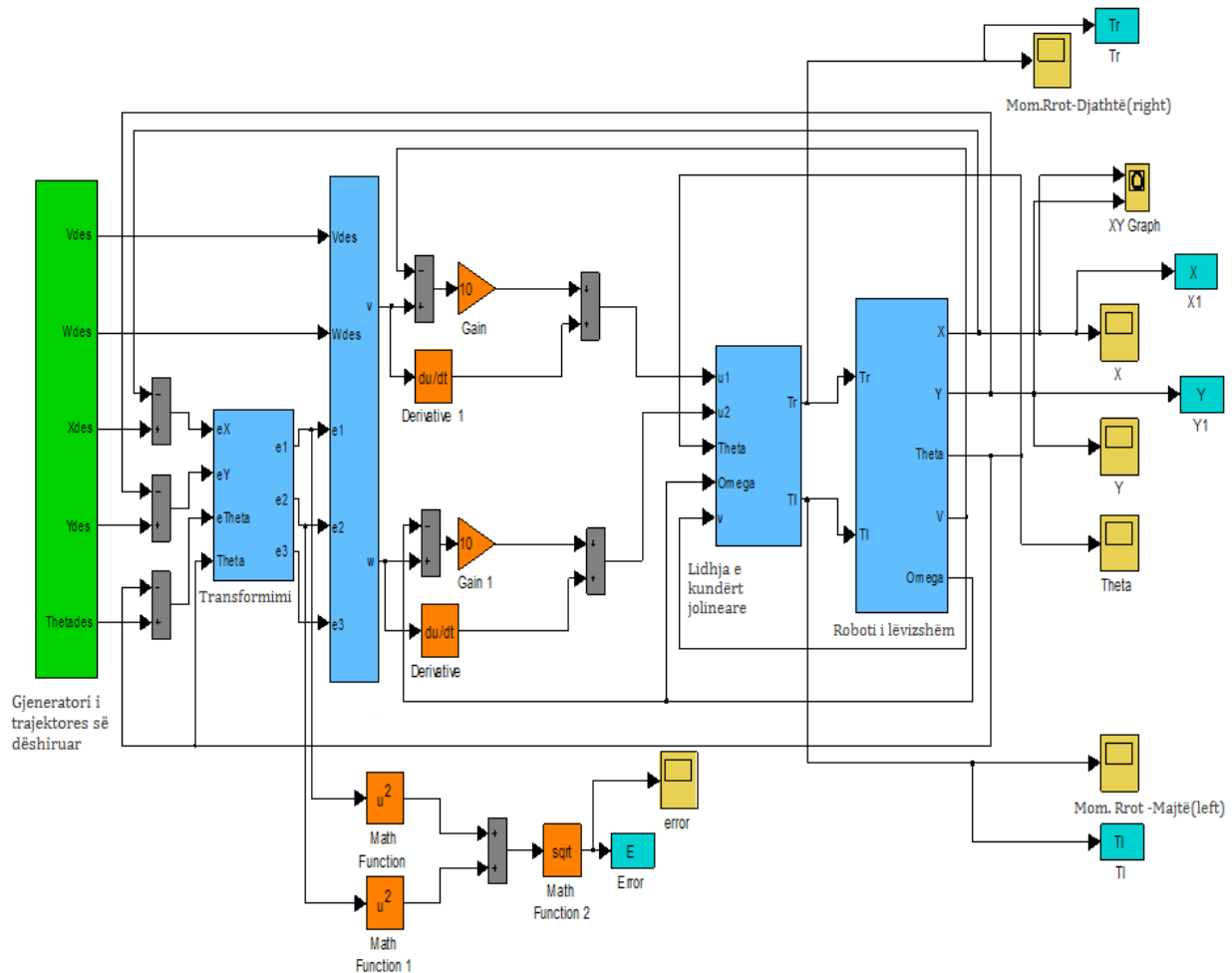


Figura4-8: Bllok diagrami në Matlab Simulink për të simuluar përgjigjen e rregullatorit backstepping

Duke përdorur bllok diagramin e mësipërm mund të testojmë përgjigjen e sistemit të trajektoreve të ndryshme të referencës me koeficient të ndryshëm të rregullatorit. Simulimi është bërë me një 'solver' me hap fiks me madhësinë e hapit prej 0.1 sekonda. Lloji solver është ode4 (Runge-Kutta). Përgjigja e ndjekjes së trajektores së robotit me pozicione të ndryshme fillestare dhe koeficientët e rregullatorit janë treguar Figurat 4-10 dhe 4-11:

Kushtet fillestare te robotit: $x = 3, y = 1.5, \theta = \frac{3\pi}{2}$

Koeficiente e rregullatorit backstepping: $k_x = 2.2, k_y = 58, k_\theta = 15, k_4 = 12$

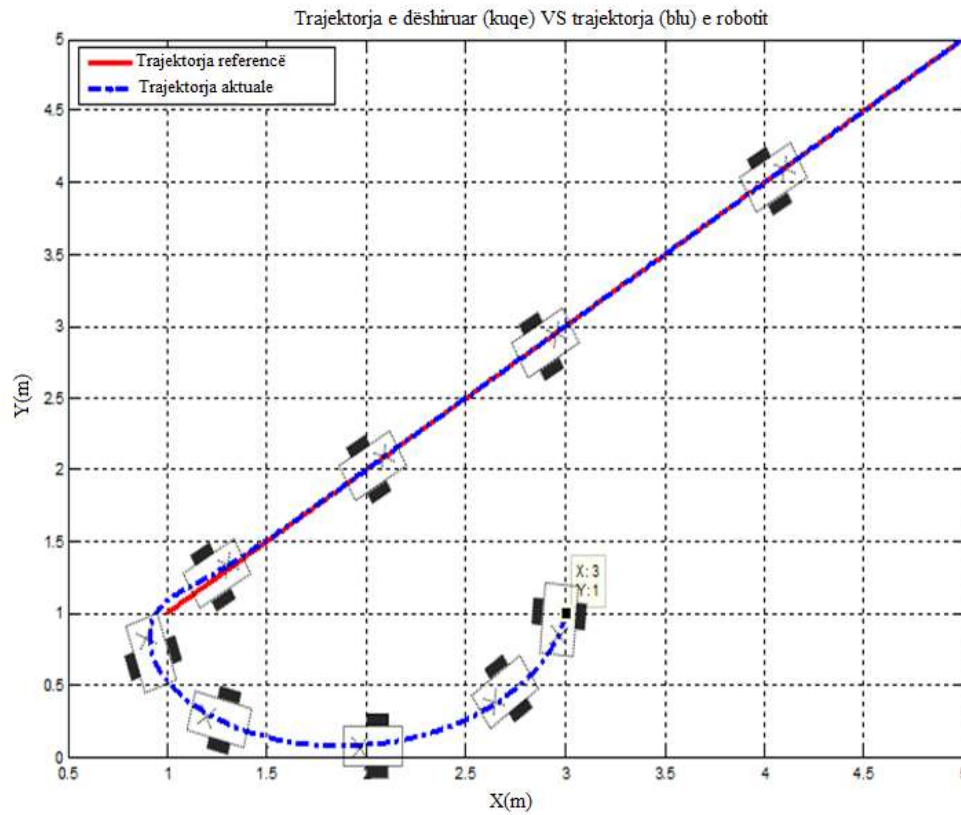


Figura4-9:Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y

Figura 4-10 tregon trajektoren e robotit kur vendndodhja e tij fillestare është larg nga trajektorja referencë. Lëvizja e robotit është për shkak të kufizimit të tij nonholonomic i cili imponon lëvizjen jo-anësore. Koeficientët e rregullatorit janë përshtatur të kenë përgjigjen e ndjekjes së trajektores më të shpejtë. Gabimi i trajektores i cili llogaritet duke përdorur ekuacionin (4.18) tregon se performancën e rregullatorit më qartë. Përgjigja e gabimit të trajektorjes së rregullatorit të mësipërm dhe rasti i pozicionit fillestar është treguar në Figurën 4-11:

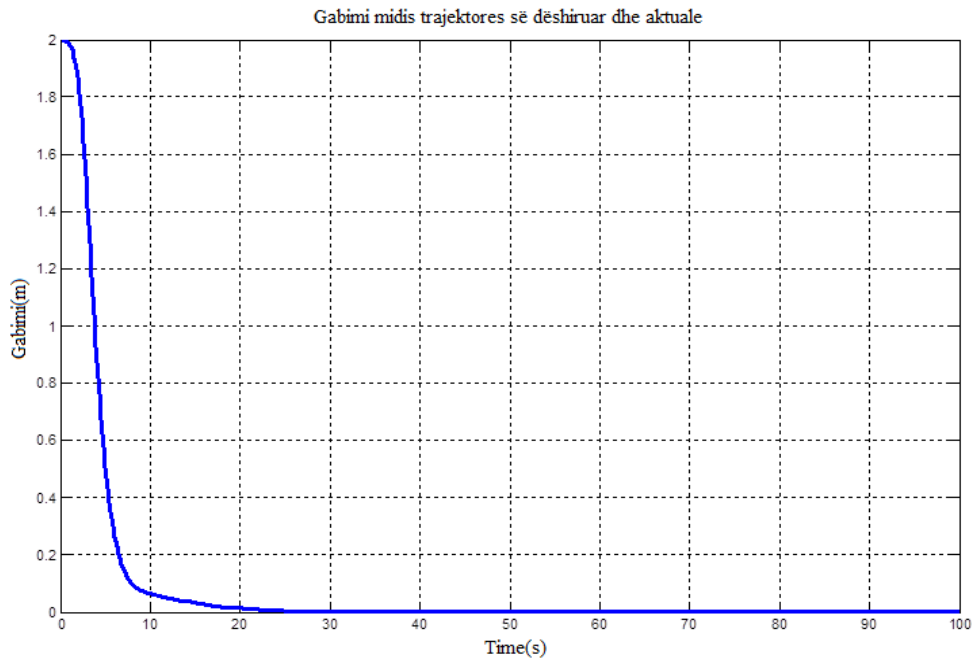


Figura4-10: Gabimi i trajektores së robotit

Kushtet fillestare te robotit: $x = 3, y = 1.5, \theta = \frac{3\pi}{2}$

Koeficiente e rregullatorit backstepping: $k_x = 2.2, k_y = 58, k_\theta = 15, k_4 = 12$

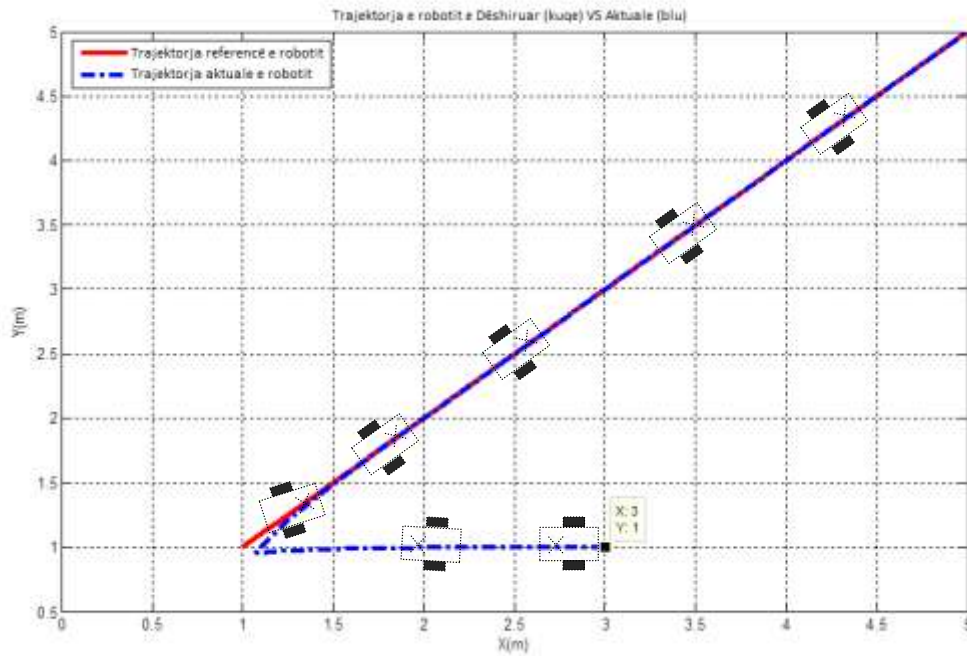


Figura4-11:Trajektorja referencë dhe aktuale e robotit në planin x-y

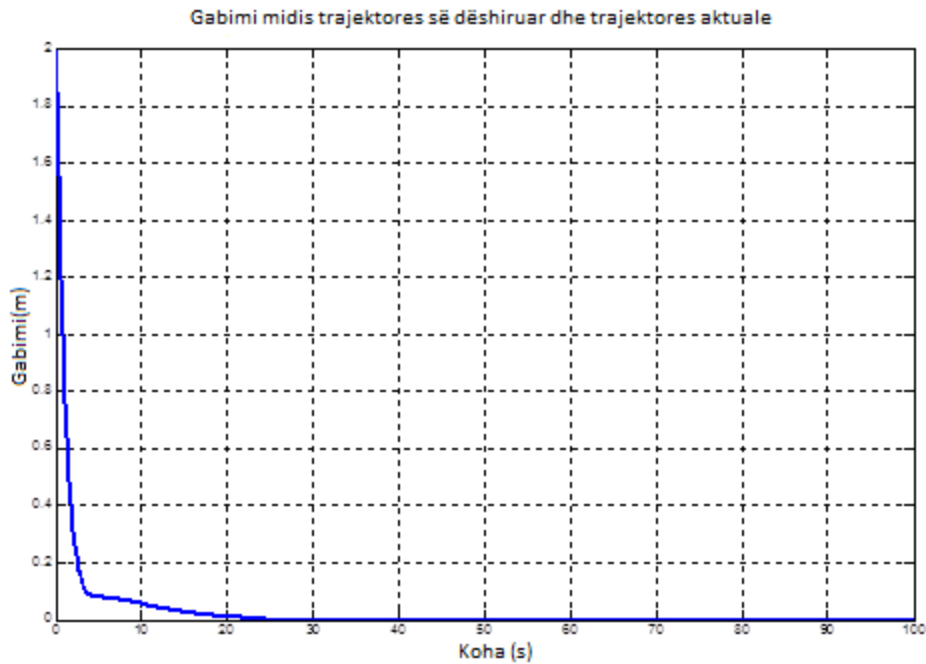


Figura4-12: Gabimi i trajektores së robotit

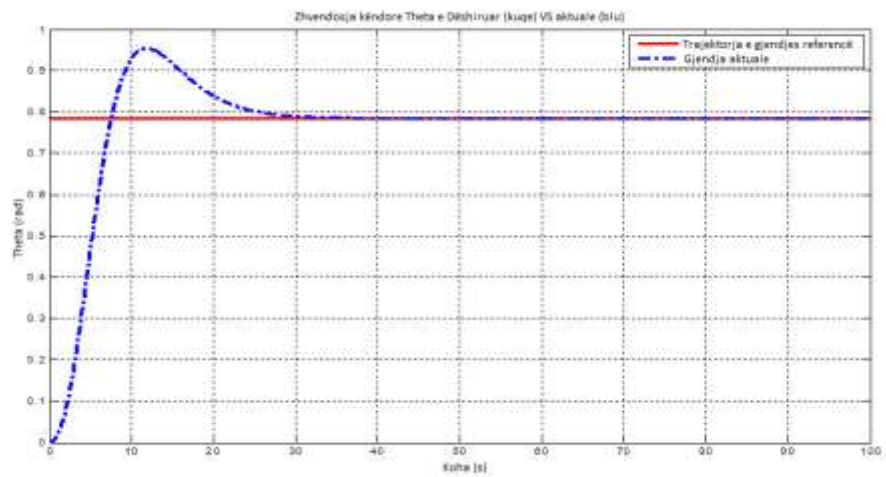


Figura4-13: Përgjigja e zhvendosjes këndore të robotit në lidhje me kohën

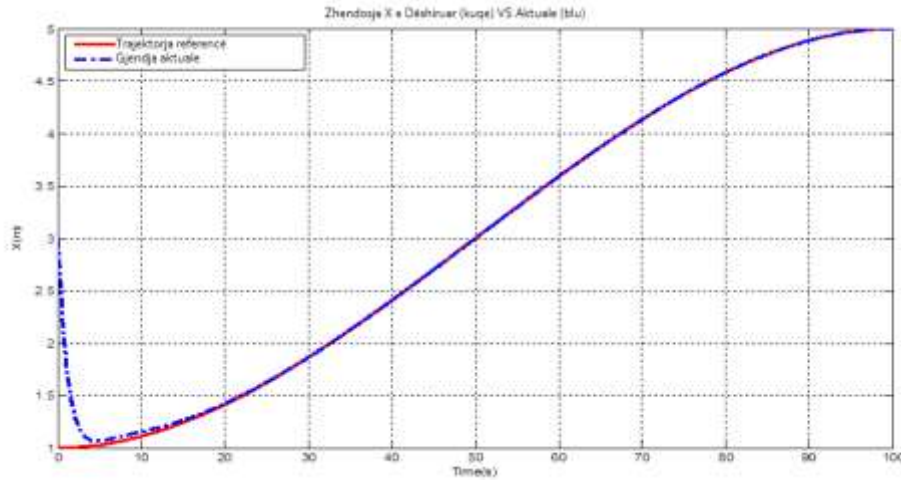


Figura4-14: Përgjigjja e zhvendosjes lineare të robotit në drejtimin-x në lidhje me kohën

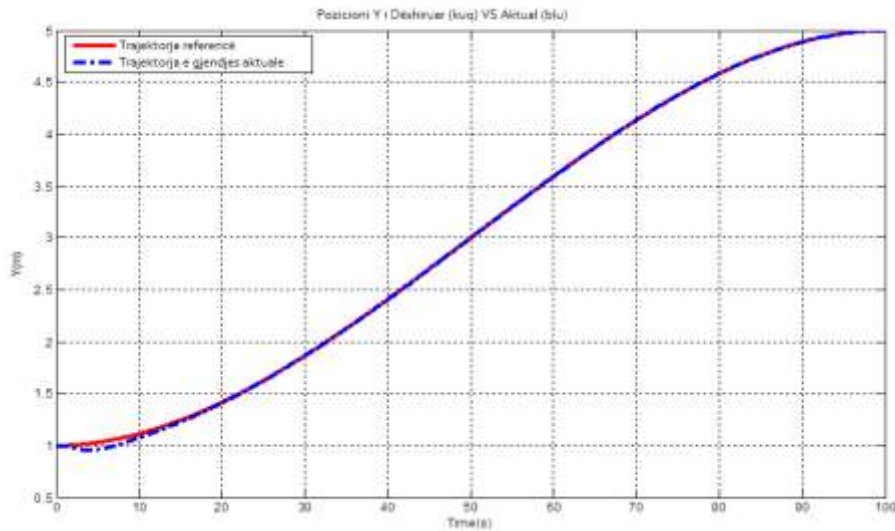


Figura 4-15: Përgjigjja e zhvendosjes lineare të robotit në drejtimin-y në lidhje me kohën

Përgjigjet e ndryshme të ndjekjes së trajektores së robotit me kushte të ndryshme fillestare dhe lloje të ndryshme të trajektoreve tregohen në figurat e mëposhtme:

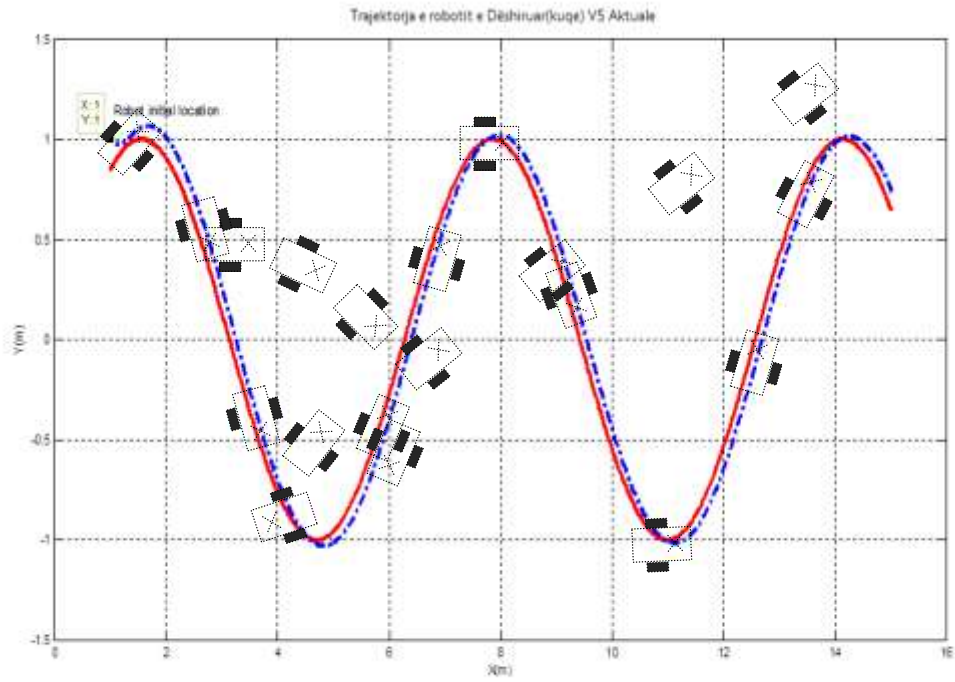


Figura 4-16: Gjendjet fillestare të robotit (x, y, θ) : (1, 1, dhe 0)Trajektoja referencë sinusoidale

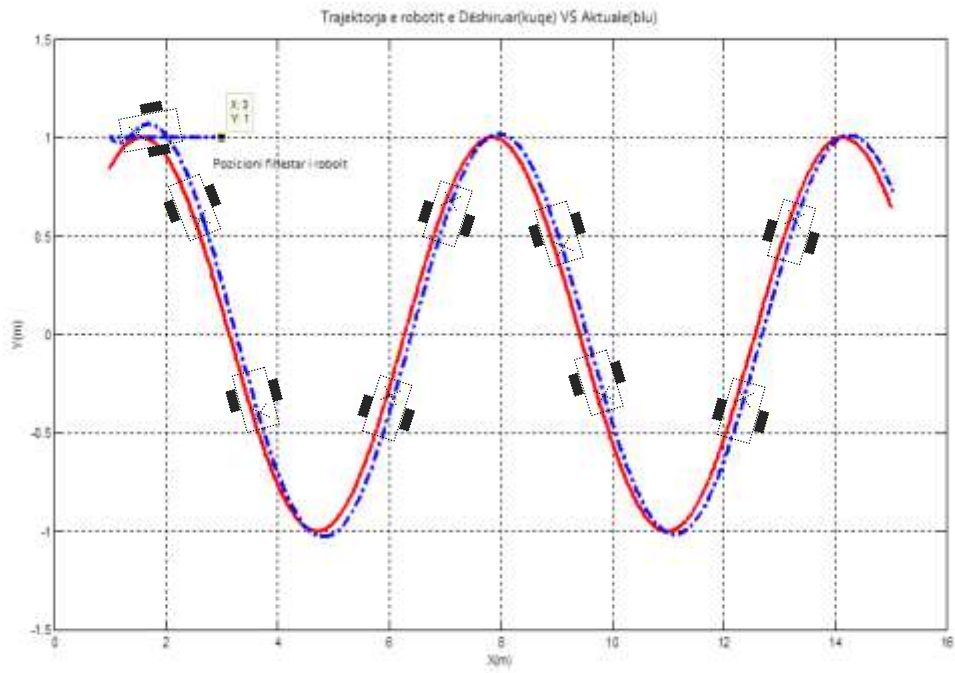


Figura4-17: Gjendjet fillestare të robotit (x, y, θ) : (3, 1, dhe 0) trajektorja referencësinusoidale

Konkluzione: Siç mund të shihet nga sa më sipër sistemi me rregullator 'backstepping' ka një përgjigje të lëmuar, pavarësisht nga kushtet fillestare dhe lloji i trajektores referencë. Disavantazhet e rregullatorit backstepping janë si më poshtë:

- Rregullatori ka nevojë për njohuri të sakta të dinamikës së sistemit
- Rregullatori nuk mund të merret shqetësimet e pastrukturuara dhe të pamodeluara
- Rregullatori ka nevojë për shumë punë dhe kohë për të përshtatur koeficientët për secilën trajektore referencë

4.3.3 Efektet e Shqetësimeve dhe Pasgurve të Modelit

Në pjesën e mëparshme ne e konsideronim kontrollin e ndjekjes së trajektores së robotit të lëvizshëm me supozimin e të paturit një model të saktë pa shqetësime. Modeli i pasaktë mund të vijë nga pasiguritë aktuale rreth robotit për shembull parametrave të panjohur të platformës ose nga zgjedhje të qëllimshme të përfaqësimit të thjeshtuar të sistemeve dinamike si modelimin e fërkimeve si lineare ose mënyra strukturore të neglizhuara në një sistem mekanik të arsyeshëm të trupit të ngurtë. Mënyra e të parit nga një pikë kontrolli pasaktësisë e modelimit mund të klasifikohen në dy lloje kryesore:

- Strukturimi i paqartësive parametrike
- Paqartësi të pastrukturuara ose dinamika të pamodeluara

Lloji i parë korrespondon me pasaktësitë në kushtet aktualisht të përfshira në model, ndërsa lloji i dytë korrespondon me pasaktësi (ose nënvlerësim) në rendin e sistemit.

Të dyja llojet e pasaktësisë së modelimit ekzistojnë në modelimin e sistemit nonholonomic të robotit të lëvizshëm. Ne kemi strukturuar paqartësitë, sepse ne nuk i njohim saktësisht të gjitha parametrat e sistemit dhe vlerat e tyre të sakta. Pasiguritë e pastrukturuara dhe të pamodeluara janë për shkak të fërkimit midis tokës dhe rrotave të robotit. Ne duam të analizojmë efektin e këtyre dy llojeve të pasigurive në sistem dhe të shohim se sa i rëndësishëm është efekti i tyre mbi performancën e sistemit të ndjekjes së trajektores.

Së pari ne analizojmë efektin e tëpaturit fërkime në sistem i cili konsiderohet në kategorinë e dinamikës së pamodeluar. Figurat 4-28 dhe 4-29 tregojnë se ndjekja e një trajektore tipike të robotit të lëvizshëm me rregullator 'backstepping' pa asnjë shqetësim, fërkime dhe pasiguri:

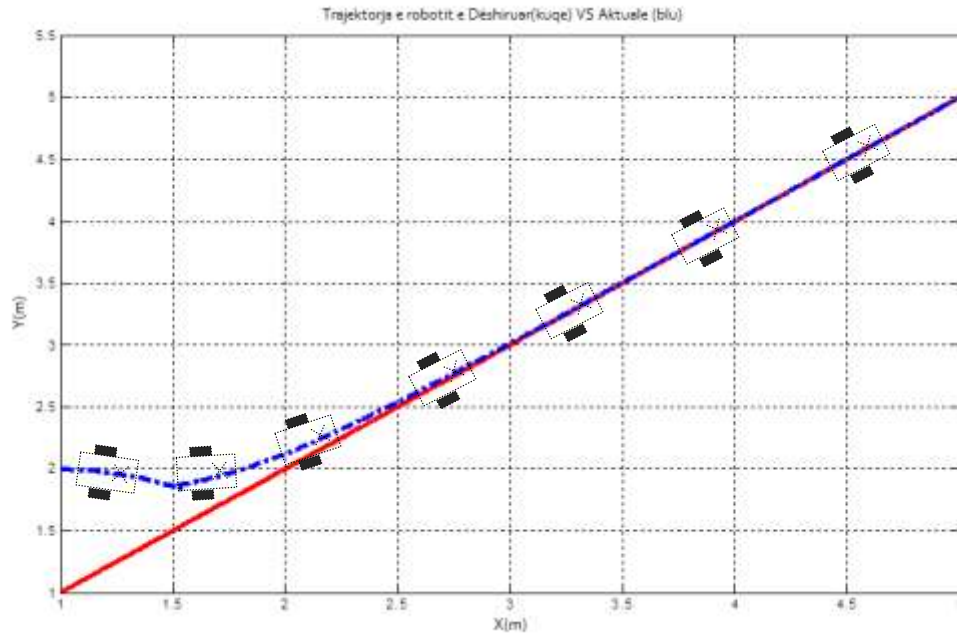


Figura4-18: Ndjekja e trajektores së robotit pa fërkime dhe pasiguri

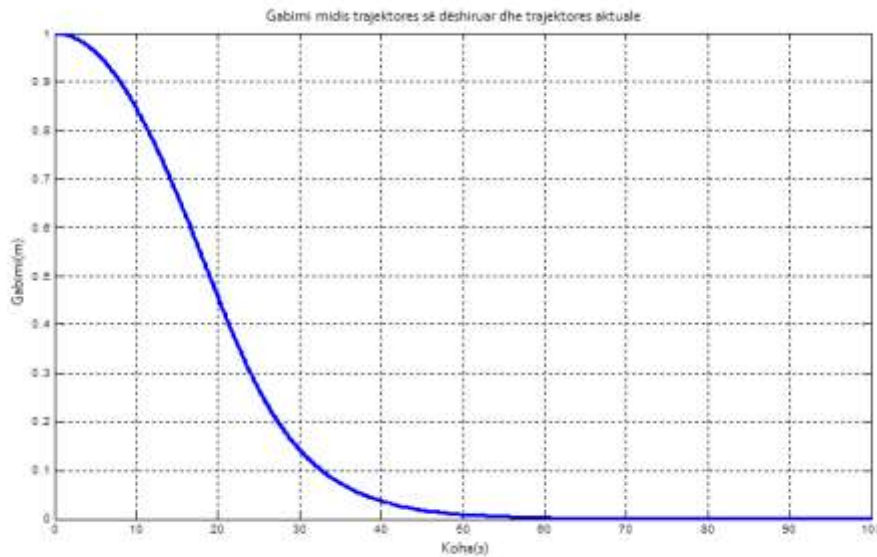


Figura 4-19: Gabimi i ndjekjes së trajektores së robotit pa fërkime dhe pasiguri

Për të analizuar efektin e fërkimit në sistem ne shtojmë momente rrotullimi të fërkimit të ndryshme të cilat janë në proporcion me koeficientin e fërkimit kinematik ndërmjet rrotës së robotit dhe të tokës në sistem dhe shikojmë rezultatin. Figurat 4-30 dhe 4-31 tregojnë ndjekjen e trajektores së robotit në ekzistencën e një momenti fërkimi prej 0.5 N.m për rrotën e djathtë dhenjë moment fërkimi prej 0.1 N.m për rrotën e majtë:

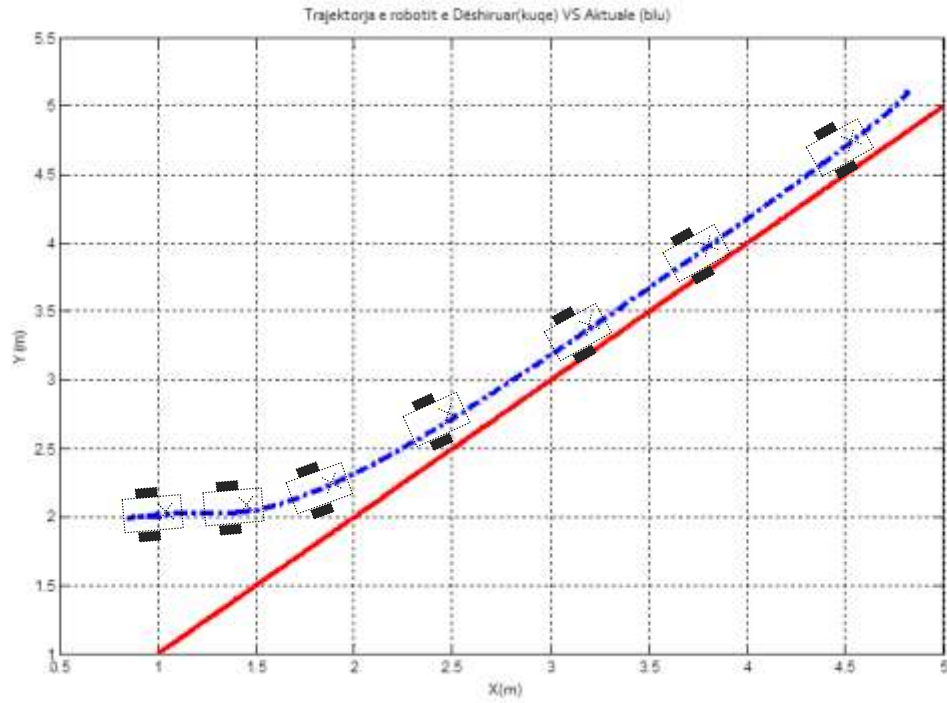


Figura4-20: Ndjekja e trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi

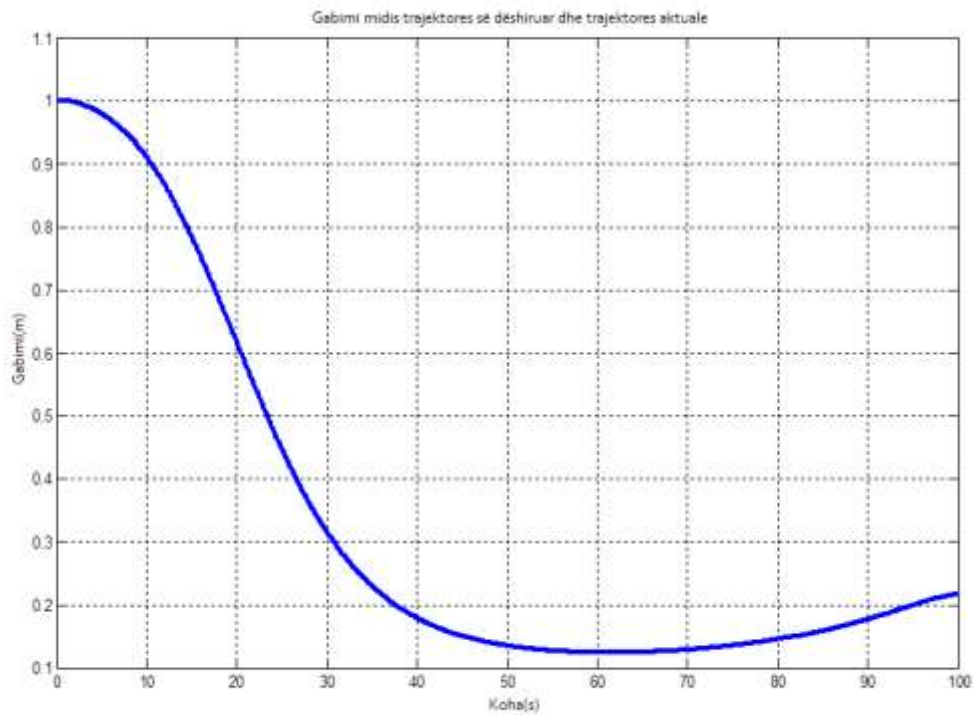


Figura 4-21: Gabimi i ndjekjes së trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi

Figurat 4-32 dhe 4-33 tregojnë ndjekjen e trajektores së robotit në ekzistencën e një momenti fërkimi prej 0.5 N.m për rrotën e majtë dhe një momenti fërkimi prej 0.1 N.m për rrotën e djathtë:

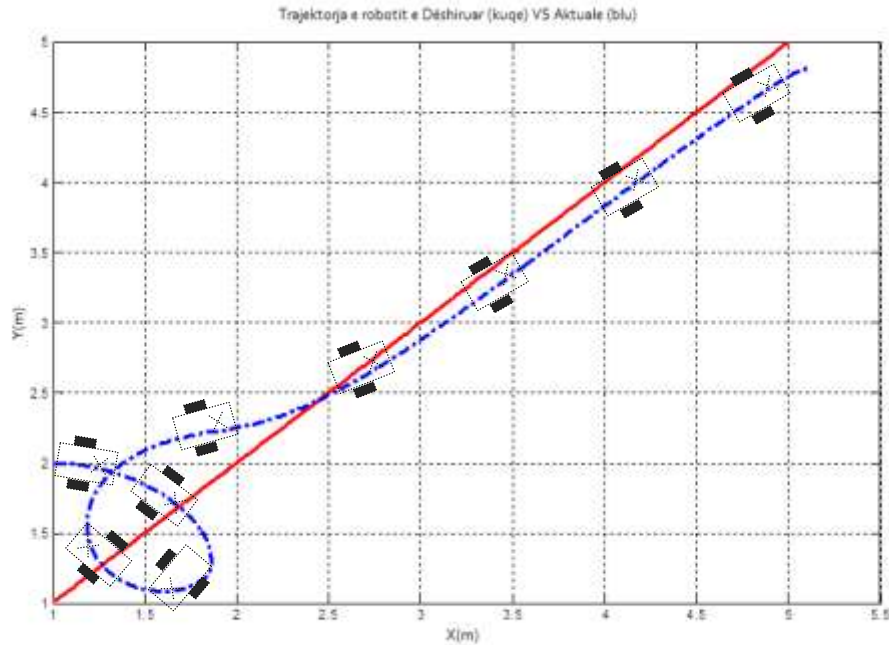


Figura 4-22: Ndjekja e trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi

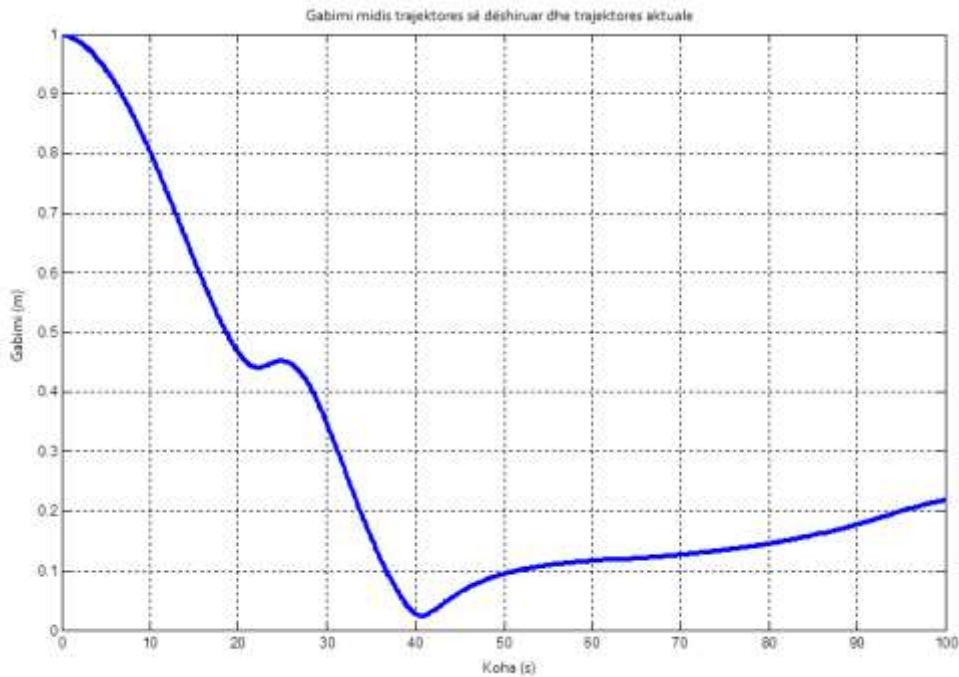


Figura 4-23: Gabimi i ndjekjes së trajektores për robotin e lëvizshëm me moment fërkimi

Siç mund të shihet nga katër figurat 4-30, 4-31, 4-32 dhe 4-33 roboti nuk mund të ketë performancën e dëshiruar në ndjekjen e trajektores në ekzistencën e fërkimit midis rrotave dhe tokës. Fërkimi në aplikimin e vërtetë nuk është konstantë dhe nuk mund të modelohet nëse roboti është menduar për të punuar në çfardollos mjedisi pune. Dy qasje të mëdha plotësuese për t'u marrë me këtë lloj modeli të pasigurive janë kontrolli robust dhe kontrolli adaptiv. Rregullatori i rrjetit neural i propozuar në paragrafin tjetër është konsideruar si një metodë kontrolli adaptive e fuqishme që do të merret me pasiguritë dhe shqetësimet e pamodeluara duke përdorur aftësitë e tij të të mësuarit dhe aftësitë e funksionit të përafrimit. Një hyrje në teorinë e kontrollit të rrjetave neural NN, zbatimi i tij në rastin e kontrollit të ndjekjes së trajektores në robotët e lëvizshëm, detajet e propozuar në rregullatorin neural 'Backstepping' do të diskutohen në paragrafët në vijim.

4.4 Konceptimi dhe Projektimi i Rregullatorit me Rrjet Neural

Para se të fillojmë për të shpjeguar detajet e projektimit të një rregullatori të rrjetit neural për ndjekjen e trajektores së këtij sistemi roboti të lëvizshëm, një përshkrim i shkurtër në rrjetat neural, i cili përfshin topologjitë e ndryshme të rrjetave neural NN, vetitë, zgjedhjen e peshës dhe trajnimin dhe zbatimin e rrjetave neural (NN) në problemet e kontrollit është paraqitur në paragrafin tjetër.

Rrjetat neural NN artificial janë modeluar në procesin biologjik për përpunimin e informacionit duke përfshirë në mënyrë specifike sistemin nervor dhe njësinë e tij themelore, neuronin. Sinjalet futen në formën e ndryshimeve të potencialit midis pjesës brenda qelizave dhe pjesës jashtë qelizave[99]. Modeli matematikor i një neuron është paraqitur në figurën 4-34:

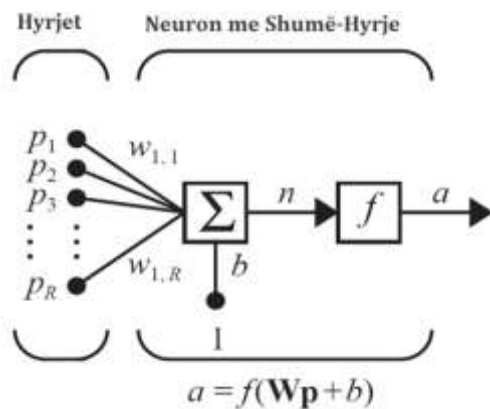


Figura 4-24: Modeli matematikor i një neuroni

Peshat e hyrjeve w_j , pragu i shkarkimit b (i quajtur edhe paragjykim(bias)), përmbledhja e hyrjeve të peshuara dhe funksioni i aktivizimit jolineare f janë paraqitur në figurën e mësipërme. Nëse hyrjet e qelizave janë n sinjalet në momentin e kohës k , $x_1(k), x_2(k), x_3(k), \dots, x_n(k)$ dhe dalja është skalari $y(k)$, ekuacioni matematikor i neuronit mund të shkruhet si më poshtë [99]:

$$y(k) = f\left(\sum_{j=1}^n w_j x_j(k) + b\right) \quad (4.48)$$

Funksionet e aktivizimit që janë zgjedhur specifikisht për aplikimin nëpërmjet disa zgjedhjeve të zakonshme janë si më poshtë:

$$\text{Pragu Linear:} \quad y = x \quad (4.49)$$

$$\text{sigmoid (kurba e logjistike):} \quad y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.50)$$

$$\text{sigmoid Simmetrik:} \quad y = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (4.51)$$

$$\text{Tangenti Hiperbolik:} \quad y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4.52)$$

Qëllimi i funksionit të aktivizimit është për të modeluar sjelljen jolineare të qelizës ku nuk ka dalje më poshtë vlerave të caktuara të argumentit. Funksionet sigmoid janë një klasë e përgjithshme e funksioneve monotonikisht jo zbritëse duke marrë vlerat e kufirit. Për shumë algoritme të trajnimit të rrjetave neurale NN përfshijnë algoritmin back-propagation, derivimi i funksionit të aktivizimit është i nevojshëm, kështu që funksioni i aktivizimit i zgjedhur duhet të jetë i diferencueshëm[99]. Figura 4-35 tregon një shtresë NN të përbërë nga sseliza:

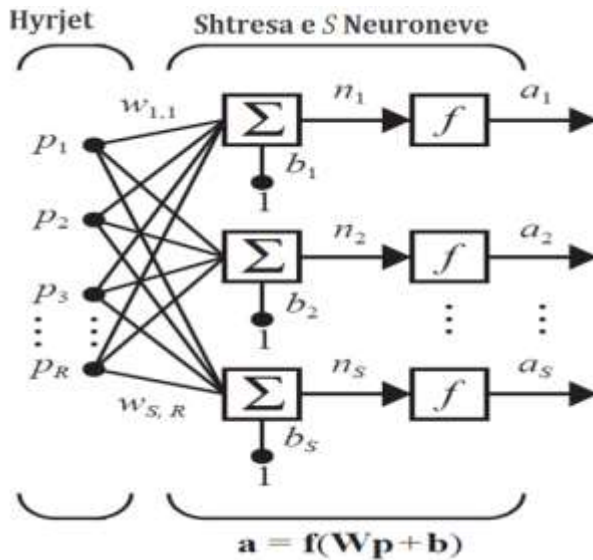


Figura4-25: Rrjet neural me një shtresë me s neurone

Ekuacioni për këtë rrjetë është dhënë nga:

$$y_l(k) = f\left(\sum_{j=1}^n w_{lj} x_j(k) + b_l\right) \quad (4.53)$$

Është e përshtatshme për të shkruar peshat dhe pragun në forma matricore dhe forma vektoriale. Duke përcaktuar matricën e peshave dhe pragjeve si

$$W^T = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{L1} & w_{L2} & \dots & w_{Ln} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$b_w = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_L \end{bmatrix}$$

Ne mund të shkruajmë vektorin e daljeve $y(t) = [y_0 \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$ si:

$$y(t) = f(W^T x + b_w) \quad (4.55)$$

Një rrjet neural medy shtresa i cili ka dy shtresa të neuroneve, me shtresën e parë që ka L neurone që furnizohen dhe një shtresë të dytë që ka m neurone, është treguar në figurën 4-36[46]:

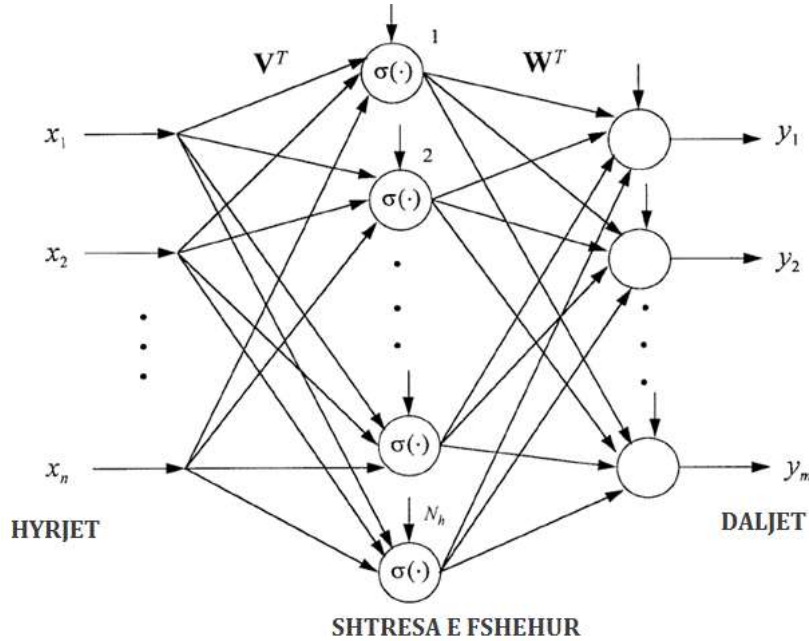


Figura4-26: Rrjet neural me dy shtresa

Shtresa e parë është quajtur shtresa e fshehur dhe shtresa e dytë është quajtur shtresa e daljes. Një rrjet neural me shtresa të shumta është quajtur një ndijor shumë shtresësh dhe fuqia e tij kompjuterike është zgjeruar në mënyrë të konsiderueshme në lidhje me rrjetin me një shtresë. Dalja e rrjetit me dy shtresa i mësipërm jepet nga ekuacioni i mëposhtëm:

$$y_i = \sigma \left(\sum_{l=1}^L w_{il} \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right) + w_{i0} \right) \quad (4.56)$$

Nëse do të përcaktojmë daljen e shtresës së fshehur si z_l atëherë ne mund të shkruajmë ekuacionin (4.56) si më poshtë:

$$z_l = \sigma \left(\sum_{j=1}^n v_{lj} x_j + v_{l0} \right) \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (4.57)$$

$$y_i = \sigma\left(\sum_{l=1}^L w_{il}z_l + w_{i0}\right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.58)$$

Dy ekuacionet emësipërme mund të shkruhen në formën e matricës si ekuacionet (4.54) dhe (4.55). Është e rëndësishme të përmendet se hyrjet e peshave të shtresës së fshehur do të përzgjidhen në mënyrë të rastësishme, ndërsa peshat e shtresës së daljeve do të përzgjidhen duke përdorur metoda të përshtatshme trajnimi. Kjo do të minimizojë kompleksitetin kompjuterik të përdorimit të rrjetave neural (NN) në aplikimet e kontrollit.

4.4.1.2 Vetitë e Rrjetit Neural

Rrjetat neural janë sisteme të shpërndarë komplekse jolineare, dhe si rezultat ata kanë një gamë të gjerë ku aplikohen. Dy nga vetitë më të rëndësishme të rrjeteve neural janë: klasifikimi (për njohjen e modelit) dhe funksioni i përafrimit. Një veti themelore në rrjetat neural (NN) në aplikimet e kontrollit me lak të mbyllur të rrjetave neural është vetia e funksionit të përafrimit universal i rrjetit neural (NN) qëka të paktën dy shtresa. Një rrjet neural me një shtresë nuk ka një aftësi universale të përafrimit të funksionit.

Teoria themelore e përafrimi universal thotë se çdo funksion i lëmuar $f(x)$ mund të përafrohet në mënyrë arbitrare nga afër në një bashkësi kompakte duke përdorur një rrjet neural me dy shtresa me peshat përkatëse. Në mënyrë të veçantë, le të jetë $f(x)$ një funksion i lëmuar i përgjithshëm. Pastaj i jepet një bashkësi kompakte S dhe një numër pozitiv ϵ_N , kështu ekziston një rrjet neural me dy shtresa i tillë që [99]:

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \epsilon \quad (4.59)$$

Me $\|\epsilon\| = \epsilon_N$ për të gjitha x në bashkësinë kompakte S , për disa shtresa mjaft të mëdha L të neuroneve të shtresës së fshehur. Vlera e quhet gabim i funksionit të përafrimit të rrjetit neural dhe kjo ul umrin e rritjeve L të neuroneve të shtresës së fshehur. Nga ana tjetër, në bashkësinë kompakte S , ashtu si S bëhet më e madhe, L e kërkuar në përgjithësi rritet përkatësisht. Rrjeti neural që vepron si një funksion përafrimi është paraqitur në figurën 4-37:

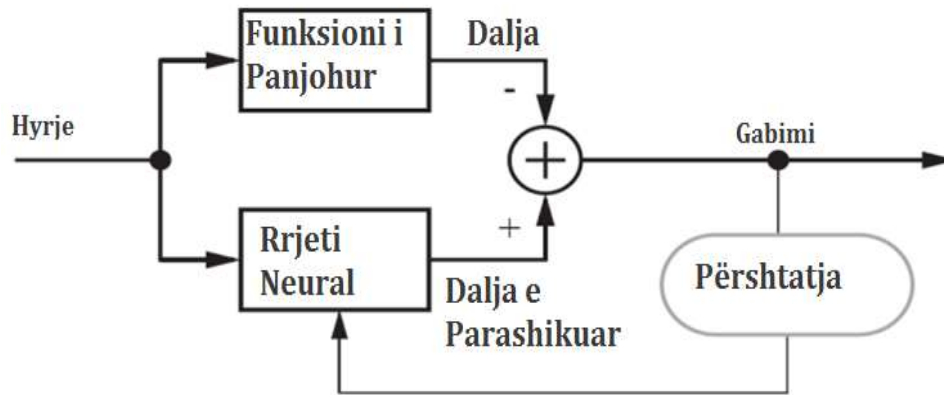


Figura 4-27: Funksioni i strukturës përafruese për rrjetat neural

Edhe pse teorema e mësipërme, thotë se ekziston një rrjet neural që përafron çdo funksion $f(x)$, duhet theksuar se kjo nuk tregon se si përcaktohen peshat e kërkuara. Kjo në fakt nuk është një detyrë e lehtë, për të përcaktuar peshat në mënyrë të tillë që një rrjet neural me të vërtetë përafron një funksion $f(x)$ të dhënë mjaft afër. Në paragrafin e ardhshëm ne do të tregojmë se si ta arrijmë këtë duke përdorur përshtatësin 'back-propagation'.

4.4.1.3 Trajnimi i Rrjetit Neural

Siç është përmendur në pjesën e mëparshme, për një rrjet neural të funksionojë si ne dëshirojmë, është e nevojshme të përcaktojmë peshat e përshtatshme dhe pragjet që sigurojnë performancën e dëshiruar. Për vite me radhë ky ka qënë një problem i veçantë për një rrjet neural me shumë shtresa, ku nuk dihej të lidhej pjesa e gabimit me peshat e shtresave të ndryshme. Sot këto probleme për pjesën më të madhe kanë gjetur zgjidhje dhe ka algoritma shumë të mira për zgjedhjen dhe përshtatjen e peshave të rrjetit neural. Algoritmi i trajnimit 'backpropagation' është një nga algoritmat më të famshëm për shkak të thjeshtësisë dhe fuqisë së tij. Derivim i kësaj metode është i bazuar në metodën e gradientit zbritës e cila nuk është përfshirë në këtë tekst. Algoritmi 'backpropagation' për një rrjet neural ka dy shtresa si tregohet në Figurën 4-38 duke përdorur funksionin e aktivizimit sigmoid shpjegohet si vijon:

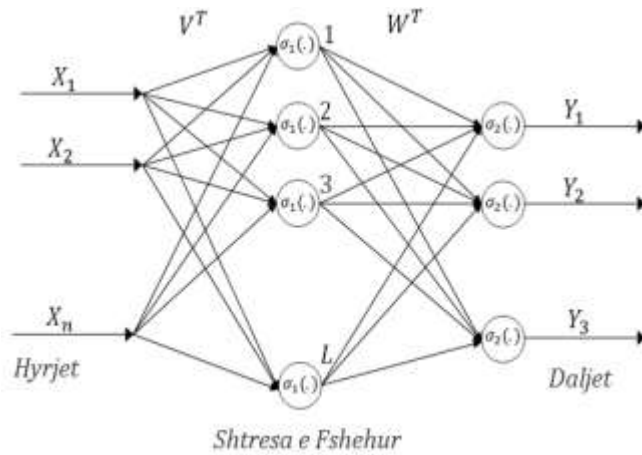


Figura4-28: Rrjet neural me dy shtresa

Në shumë aplikime rrjetat neural nuk kane funksion aktivizimi në shtresën e daljes. Atëherë thjesht ne duhet të përdorin $\delta_i^2 = e_i$ në ekuacionet për backpropagation. Formulatat dhe procedurat e përgjithshme të back-propagation janë treguar në diagramin në Figura 4-39:

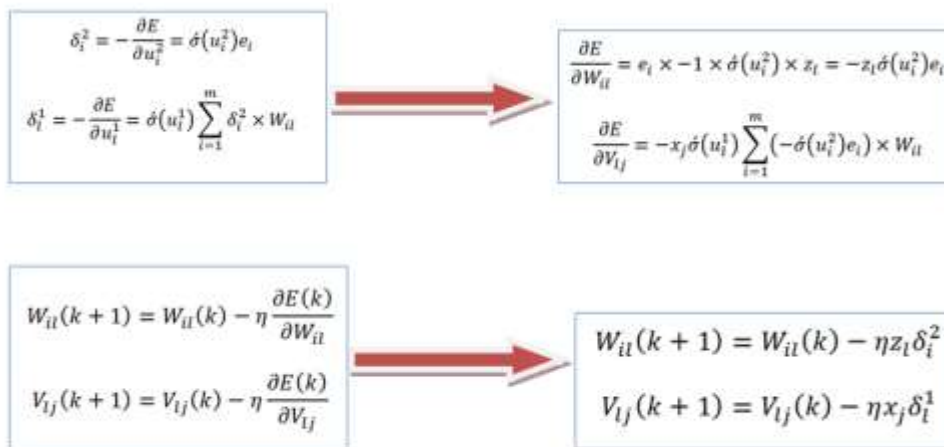


Figura4-29: Bllok diagram e algoritmit backpropagation.

Një version i përmirësuar i algoritmit të mësipërm i cili bazohet në metodën e gradientit zbritës jepet nga algoritmi i gradientit momental [99, 100]:

$$V(k+1) = \beta V(k) + \eta(1-\beta)Xe^T(k) \quad (4.88)$$

Me parametër momenti pozitiv $\beta < 1$ dhe një normë pozitive të mësuarit $\eta < 1$. β është zgjedhur përgjithësisht pranë njëshiti për shembull 0.95. Momenti shton një efekt memorie në mënyrë që rrjeti neural në fuqi përgjigjet jove të për gradientin lokal, por edhe për tendencat e fundit në sipërfaqen e gabimit. Pa momentum rrjeti mund të ngec në minimume lokale, por duke shtuar momentumin mund të ndihmojë udhëtimin e rrjetit neural përmes minimumeve lokale. Algoritmi i

mësipërm është metoda që ne përdorim për të trajnuar rrjetin neural të kërkuara në zbatimin e rregullatorit të ndjekjes së trajektores së robotit të lëvizshëm.

4.4.1.4 Zhvillimi dhe Implementimi i Rrjetit Neural

Në mënyrë që të ndërtojmë një rrjet neural për një përafrim të një funksioni me shumë hyrje dhe shumë dalje të përgjithshëm, në fillim ne duhet të kemi një algoritëm për të inicializuar rrjetin neural. Përdorim algoritmin 'backpropagation' për të trajnuar rrjetin dhe përdorim gabimin e përafëruar të rrjetit neural për të treguar performancën e tij. Algoritmi i përdorur për të ndërtuar rrjetin neural dhe implementimin e tij nëpërmjet një paketë të përshtatëshme 'software' për përafrimin e funksionit është treguar në Figura 4-40:

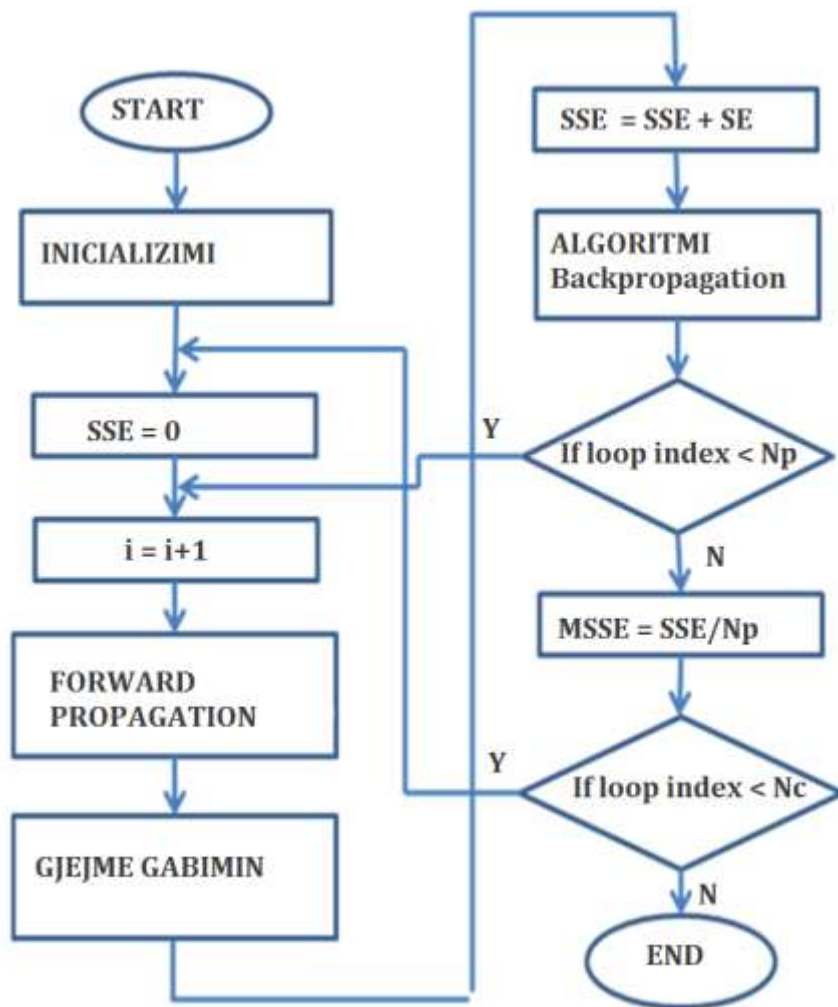


Figura 4-30: Algoritmi i përgjithshëm për implementimin e një trajnuesi të rrjetit neural duke përdorur backpropagation

Blloqet e ndryshme në blloqskemën e mësipërme janë përgjegjës për një detyrë të veçantë e cila do të shpjegohet në pjesën e mbetur të këtij paragrafi. Një rrjet neural tipik me dy hyrje dhe një dalje i cili përdor algoritmin e mësipërm për trajnim e tij është treguar nëFigurën 4-41:

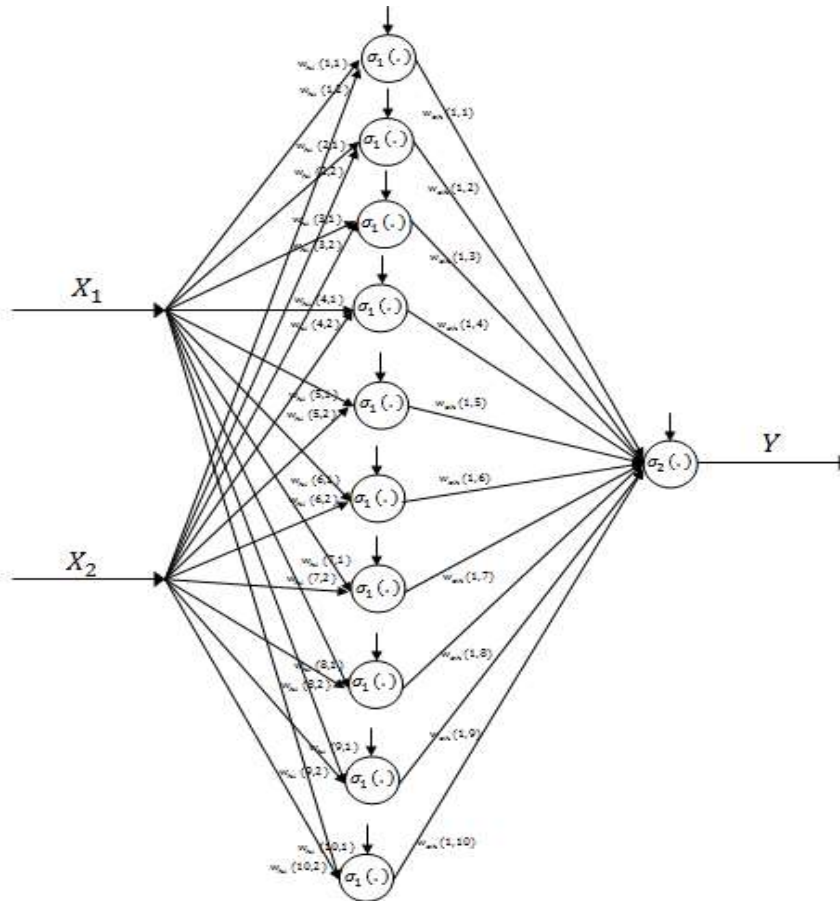


Figura4-31: Një rrjet neural me dy shtresa me dy hyrje dhe me një dalje

Siç mund të shihet nga figura 4-40, pjesa e parë e algoritmit është inicializimi i rrjetit që do të thotë të përcaktohet numri i hyrjeve, numri i daljeve, si dhe numri i neuroneve në shtresën e fshehur dhe të mësohet norma e momentumit. Terminologjia e mëposhtme është përdorur në këtë punë për të përcaktuar parametrat e ndryshëm të rrjeteve neural të zbatuar:

N_i : Numri i hyrjeve në rrjetin neural

N_o : Numri i daljeve në rrjetin neural

N_h : Numri i neuroneve në shtresën e fshehur

η : Norma e të mësuarit

β : Norma e momentumit

N_p : Numri i modeleve të të dhënave hyrëse

N_c : Numri i cikleve për të trajnuar njërrjet neural

Whi : Shtresa e fshehur për peshat e shtresës hyrëse

Woh : Shtresa e daljes për peshat e shtresës së fshehur

Pjesa tjetër e inicializimit të rrjetit është të përcaktojë funksionin e aktivizimit që do të përdoret për funksionet e shtresës së fshehur dhe shtresës së daljes. Hapi tjetër është të ndërtoj pjesën e të mësuarit dhe trajnuarit e cila përbëhet nga pjesët e mëposhtme:

- Një lak për numrin e cikleve, ne duam të përsërisim të njëjtin grup të të dhënave hyrëse për trajnimin e rrjetit dhe për të arritur gabimin e dëshiruar. Numri i përsëritjeve të këtij laku është N_c dhe indeksi i lakut është j .
- Një lak për numrin e modeleve të të dhënave që kemi në çdo cikël. Ky lak do të lexojë të gjitha të dhënat në një cikël. Numri i përsëritjeve të këtij laku është N_{pand} indeksi i lakut është i .

ekuacionet ‘forward propagation’ do të jenë si më poshtë:

$$z_l = \sigma(wh_{l1}x_1 + wh_{l1}x_1 + v_{l0}) \quad l = 1, 2, \dots, 10$$

$$Y = \sigma\left(\sum_{l=1}^L w_{oh_l}z_l + w_0\right) \quad (4.92)$$

Pas kryerjes ‘forward propagation’, ne mund të gjejmë gabimin për çdo model të dhënash në hyrje dhe të gjejmë shumën e katrorit të gabimit sipas ekuacionit:

$$SSE = \sum_{i=1}^{Np} E_p^2 \quad (4.93)$$

Np është numri i modeleve të të dhënave hyrëse në një cikël dhe E_p është gabimi i përafëruar që i korrespondon çdo modeli. Në fund të lakut të modelit të të dhënave, ne kemi një SSE për një cikël të të dhënave hyrëse. Hapi tjetër është të gjejmë katrorin e gabimit mesatare në bazë të ekuacionit të mëposhtëm:

$$MSSE = \frac{\sum_{i=1}^{Np} E_p^2}{Np} \quad (4.94)$$

Duke përfunduar lakun e cikleve të të dhënave janë bërë llogaritjet për gjithë ciklet dhe modelet dhe ne mund të kontrollojmë performancën e rrjetit duke parë në kurbën MSSE dhe krahasuar rezultatet e rrjetit neural dhe funksionit real. Kodi Matlab i cili është zhvilluar për implementimin e algoritmit të mësipërm është përfshirë në shtojcë. Një shembull i një funksioni me dy hyrje dhe një dalje përafrohet duke përdorur këtë algoritëm është si më poshtë:

Funksioni për t’u përafëruar: $f(x_1, x_2) = \sin(\pi * x_1) \cos(\pi * x_2)$

Funksioni aktivizimit: $f(x) = \frac{1-e^{-x}}{1+e^{-x}} \log - \text{sigmoid}$

Numri i shtresave të fshehura: $N_h = 10$

Shkalla e të mësuarit: $\eta = 0.1$

Shkalla momentum: $\beta = 0.95$

Numri i cikleve: $N_c = 100$

Dalja e rrjetit neural dhe dalja reale e funksionit është treguar Figurat 4-42 dhe 4-43:

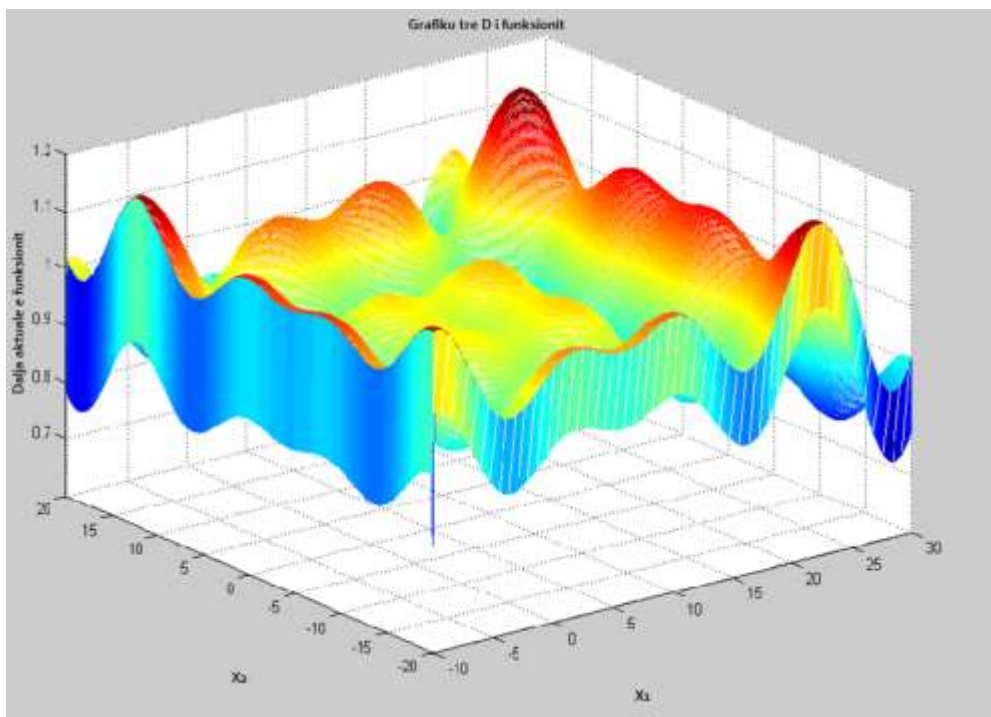


Figura4-32: Dalja reale e funksionit

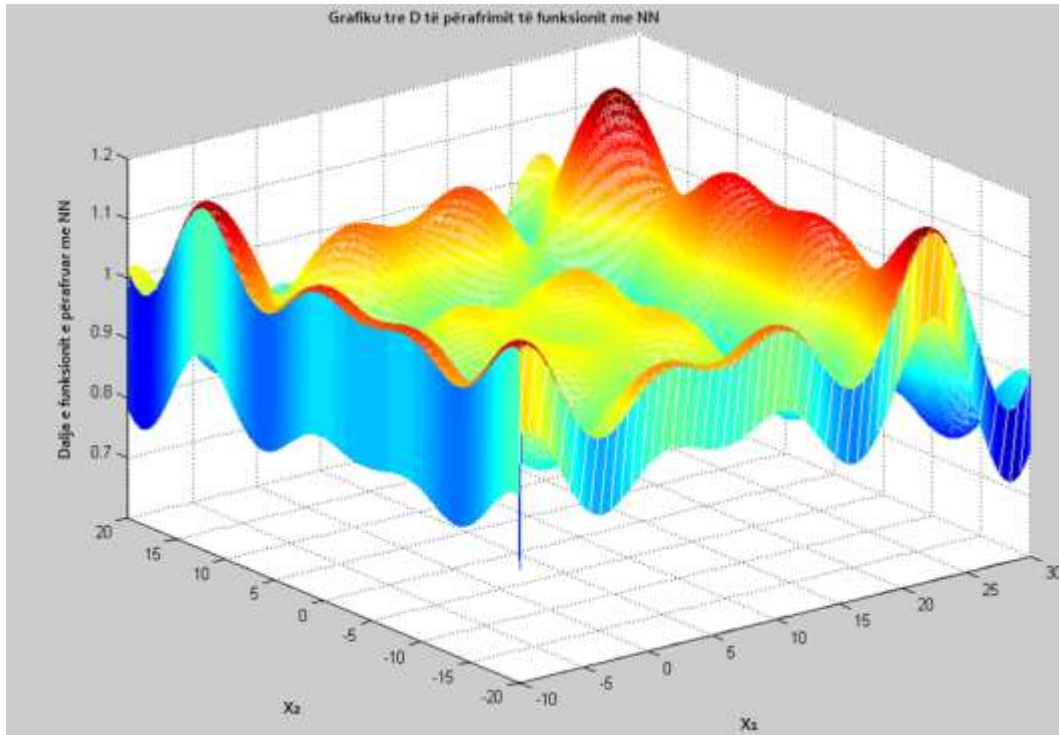


Figura4-33: Dalja e rrjetit neural

Performanca perfekte e përafrimit të algoritmit mund të shihet nga dy figurat e mësipërme. Algoritmi i implementimit të rrjetit neural mësipër do të përdoret në hartimin e rregullatorëve të cilët kanë nevojë për karakteristikat e përafrimit të një rrjeti neural. Projektimi i rregullatorëve të ndjekjes së trajektores duke përdorur rrjetet neural do të shpjegohet me detaje në seksionet e ardhshme të këtij kapitulli.

4.4.2 Projektimi i Rregullatorit i Ndjekjes së Trajektores me Model Invers të NN

Një strukturë kontrolli që integron rregullatorët ‘backstepping’ dhe një rregullator llogaritës të momentit rrotullues me rrjetit neural për robotë të lëvizshëm nonholonomic është propozuar në këtë paragraf. Ky ligj kontrolli që kombinon kinematikën dhe llogaritësin e momentit rrotullues është zhvilluar duke përdorur rregullatorin ‘backstepping’ dhe qëndrueshmëria është dëshmuar duke përdorur qasjen e Lyapunov-it. Rregullatori me rrjet neural (NN) i propozuar në këtë punë mund të merren me kufizimin e sinjaleve shqetësuese të pamodeluara dhe dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara në automjet.

Struktura e rregullatorit tradicional ‘backstepping’ është treguar në figurën 4-45 përseri, për qëllime krahasimi:

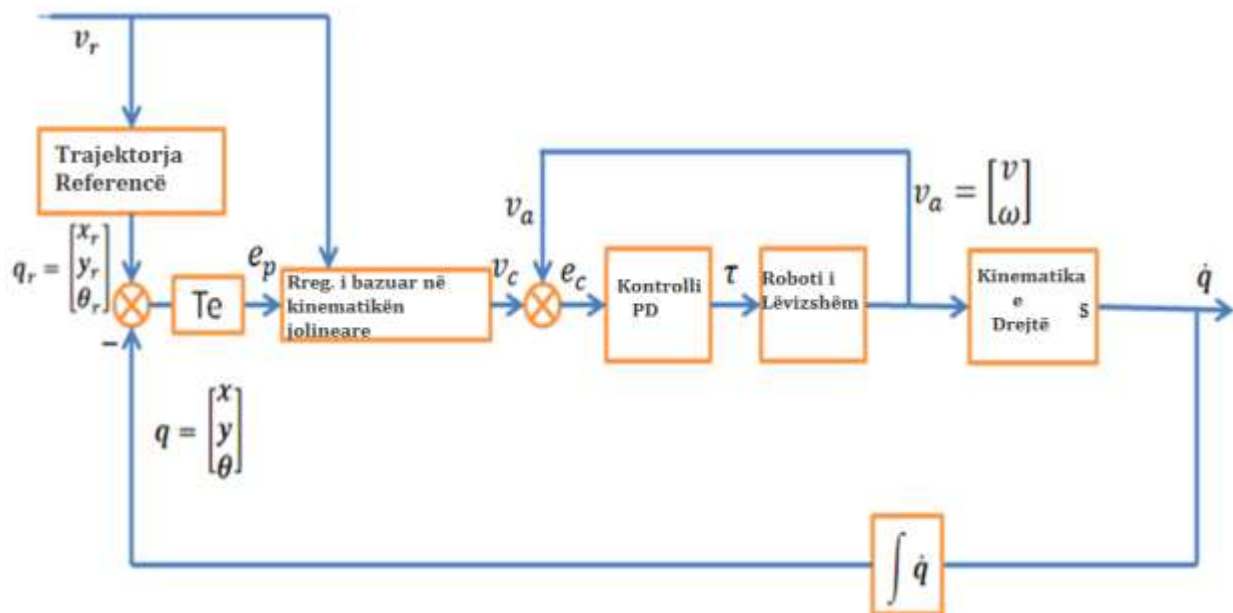


Figura 4-34: Struktura e rregullatorit backstepping.

Duke krahasuar (4-45) mund të gjejmë se në strukturën e rregullatorit me model invers të rrjetit neural të propozuar, supozohet se nuk ka njohuri në lidhje me dinamikën e robotit dhe funksioni i rrjetit neural është të mësojë dinamikat e automjeteve online dhe të rindërtoj modelin dinamik të sistemit. Prandaj, ai e konverton daljen v_c të rregullatorit të bazuar në kinematikë në një

moment rrotullues të τ të përshtatshëm për robotin pavarësisht që parametrat e panjohur dinamik apo shqetësimet e kufizuara janë të panjohura, është bërë duke përdorur rrjetin neural.

Duke pasur parasysh shpejtësinë e dëshiruar $v_c(t)$ i cili është dalje e ekuacionit të rregullatorit kinematik (4.7), gabimi i ndjekjes së trajektores do të jetë:

$$e_c = v_c - v \quad (4.89)$$

Diferencojmë ekuacionin e mësipërm dhe duke përdorur ekuacionin dinamik të robotit të lëvizshëm (3.80):

$$\dot{e}_c = \dot{v}_c - \dot{v} \quad (4.90)$$

$$\bar{M}(q)\dot{v}(t) + \bar{V}_m(q, \dot{q})v(t) + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{G}(q) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (4.91)$$

Duke shumëzuar ekuacionin (4.90) me $\bar{M}(q)$, kemi:

$$\begin{aligned} \bar{M}(q)\dot{e}_c &= \bar{M}(q)\dot{v}_c - \bar{M}(q)\dot{v} \\ &= \bar{M}(q)\dot{v}_c + \bar{V}_m(q, \dot{q})v(t) + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau}_d - \bar{B}(q)\tau \end{aligned} \quad (4.92)$$

$$\bar{M}(q)\dot{e}_c = -\bar{V}_m(q, \dot{q})e_c - \bar{B}(q)\tau + \bar{\tau}_d + f(v, v_c, \dot{v}_c) \quad (4.93)$$

Ekuacioni (4.93) është ekuacioni dinamik i robotit të lëvizshëm sa i përket shpejtësisë së ndjekjes së gabimit e_c . Funkcioni f është funksion që përmban jolinearitete të robotit të lëvizshëm.

$$f(v, v_c, \dot{v}_c) = \bar{M}(q)\dot{v}_c + \bar{V}_m(q, \dot{q})v_c(t) + \bar{F}(\dot{q}) \quad (4.94)$$

Siç mund të shihet nga ekuacioni (4.94), fëshhtë një funksion i $v, v_c, \dot{v}_c$ të cilat janë të gjitha të matshme. Ky funksion përmban të gjitha parametrat e robotit të lëvizshëm si masën, momentet e inercisë dhe koeficientin e fërkimit. Ky funksion është i njohur pjesërisht, pra një veprim i përshtatshëm kontrolli për robotin mund të shkruhet si më poshtë:

$$\bar{\tau} = \hat{f} + K_4 e_c \quad (4.95)$$

Ku K_4 është e njëjta nyje e përcaktuar si diagonale pozitive e përdorur në rregullatorët ‘backstepping’ (4.25) dhe $\hat{f}$ është një vlerësim i funksionit jolinear f të robotit dhe është dhënë nga modeli invers i rrjetit neural. Zëvendësojmë rregullin e kontrollit të mësipërme në ekuacionin (4.93) kemi:

$$\bar{M}(q)\dot{e}_c = -\bar{V}_m(q, \dot{q})e_c - \hat{f} - K_4 e_c + \bar{\tau}_d + f(v, v_c, \dot{v}_c) \quad (4.96)$$

Ne mund të përcaktojmë gabimin e përafrimit të funksion si më poshtë:

$$\tilde{f} = f - \hat{f} \quad (4.97)$$

Zëvendësojmë ekuacionin (4.76) në (4.75) dhe e thjeshtojmë atë dhe kemi:

$$\bar{M}(q)\dot{e}_c = -(\bar{V}_m(q, \dot{q}) + K_4)e_c + \tilde{f} + \bar{\tau}_d \quad (4.98)$$

Në këtë fazë problemi i projektimit të rregullatorit është se si të projektojmë matricën e nyjës K_4 dhe të vlerësimin $\tilde{f}$ në mënyrë që të dy sinjalet, sinjali i gabimit e_c dhe sinjali i kontrollit të kufizohen. Në llogaritjen e vlerësim $\hat{f}$ mund të përdoren disa metoda përfshirë edhe kontrollin adaptive. Këtu ne përdorim karakteristikat e përafruesit të funksionit të rrjetit neural të bëjë vlerësimin i cili gjithmonë mund të realizohet nisur nga ekuacioni (4.59). Çështje e rëndësishme

këtu është se ne duhet të hartojmë një rregullator në një mënyrë që të dy sinjalet, sinjali i gabimit $e_c(t)$ dhe sinjali i kontrolli të qëndrojnë të kufizuar. Derivimi i algoritmit të të mësuarit të rrjetit neural me model invers për të bërë sinjalin e gabimit $e_c(t)$ zero do të shpjegohet në detaje në seksionin tjetër.

4.4.2.1 Derivimi i Algoritmit të të Mësuarit të NN me Model Invers

Përkufizimet dhe terminologjia e mëposhtme do të përdoren për të derivuar algoritmin e të mësuarit të rregullatorit me model invers të rrjetit neural në bazë të figurës (4-41):

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\tau} = \begin{bmatrix} \bar{\tau}_1 \\ \bar{\tau}_2 \end{bmatrix} \quad (4.99)$$

$$v_a = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \hat{t} = \begin{bmatrix} \hat{t}_1 \\ \hat{t}_2 \end{bmatrix} \quad (4.100)$$

$$e_c = v_c - v = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{cv} \\ e_{c\omega} \end{bmatrix} \quad (4.101)$$

Topologjia e rrjetit neural që do të përdorim për qëllime të llogaritjes së momentit rrotullues (torque computation) është paraqitur në figurën 4-46:

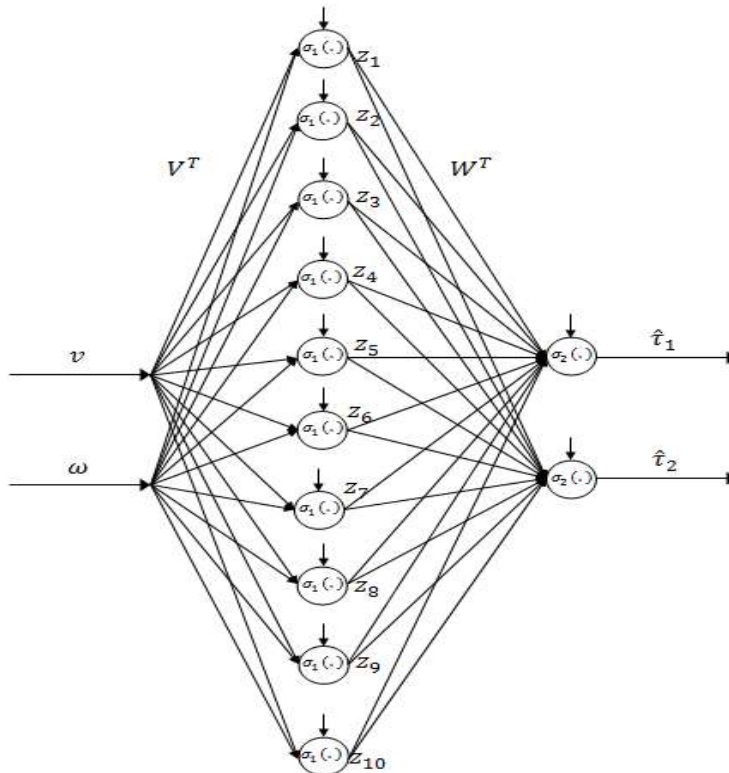


Figura4-35: Rrjet neural me model invers.

Kriteri i performancës në vijim është zgjedhur për të bërë gabimin $e_c(t)$ zero:

$$E = \frac{1}{2} (e_{cv}^2 + e_{c\omega}^2) \quad (4.102)$$

Derivati i këtij funksioni kosto në lidhje me nyjën e rrjetit neural është:

$$\frac{\partial E}{\partial W} = e_{cv} \frac{\partial e_{cv}}{\partial W} + e_{c\omega} \frac{\partial e_{c\omega}}{\partial W} = e_c^T \frac{\partial e_c}{\partial W} \quad (4.103)$$

4.4.2.1.1 Llogaritja e Termave Derivativ të Rrjetit Neural

Duke përdorur formulimin ‘backpropagation’ dhe në vijim terminologjinë e figurave, derivivatët për shtresën e dytë janë:

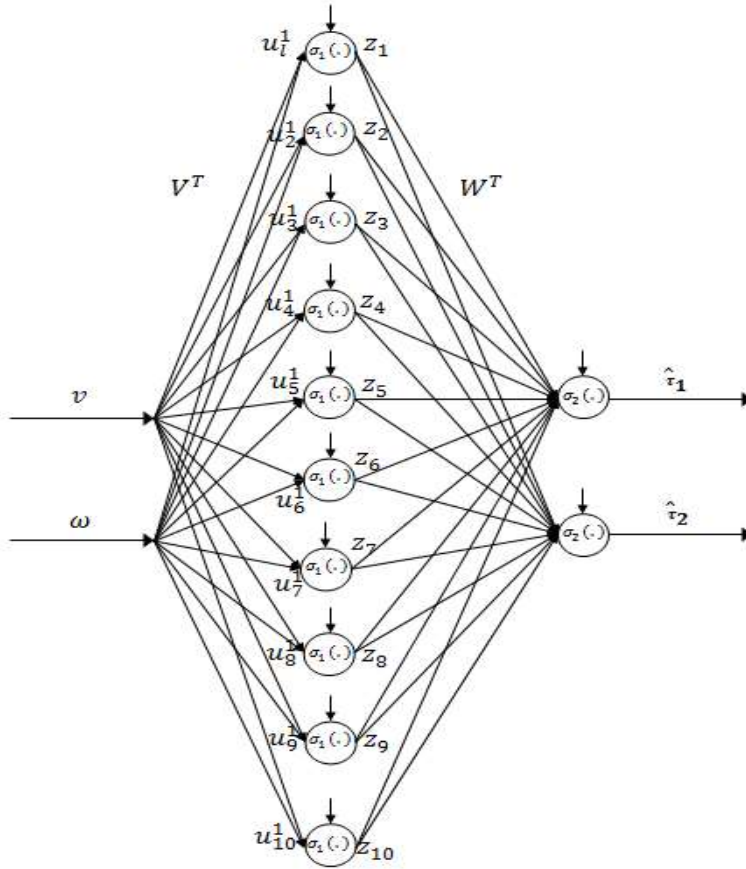


Figura4-36: Detaje të modelit invers të rrjetit neural.

Duke supozuar një funksion linear aktivizimi për shtresën e daljes ne kemi:

$$\hat{t}_1 = \sum_{l=1}^{N_h} z_l \times W_{1l}, \quad l = 1, 2, \dots, N_h \quad (4.127)$$

$$\hat{t}_2 = \sum_{l=1}^{N_h} z_l \times W_{2l}, \quad l = 1, 2, \dots, N_h \quad (4.128)$$

Sipas ekuacioneve të mësipërme për daljen e rrjetit neural (NN), ne kemi:

$$\frac{\partial \hat{t}_1}{\partial W_{1l}} = z_l, \quad \frac{\partial \hat{t}_2}{\partial W_{2l}} = z_l \quad (4.129)$$

Dalja e çdo neuroni në shtresën e fshehur është z_l dhe mund të llogaritet duke u bazuar në hyrjet e rrjetit, peshat e shtresës së parë dhe funksioni i aktivizimit të shtresës së fshehur si më poshtë:

$$z_l = \sigma(u_l^1) \quad (4.130)$$

$$u_l^1 = \sum_{j=0}^n V_{lj} x_j = V_{l1} v + V_{l2} \omega \quad j = 1, 2, \quad l = 1, 2, \dots, N_h \quad (4.131)$$

Hapi më i rëndësishëm që duhet të merret para se të përdorim algoritmin e mësipërm të të mësuarit është të trajnojmë rrjetin neural me model inverse në mënyrë që gabimi i tij i përafrit do të jenë minimale. Fazat e ndryshme të trajnimit online dhe offline me sinjale hyrëse të ndryshme për të ngacmuar nxeh të gjitha nyjet e frekuencës të modelit është bërë dhe do të shpjegohet në paragrafit tjetër. Gjatë trajnimit të rrjetit neural me model invers, ne mund të përdorim implementimin në strukturën e kontrollit të figurës 4-1.

4.5 Analiza Krahasuese

Rezultatet e simulimit të rregullatorit me model invers të rrjetit neural mund të ndahen në dy kategori si vijon:

- Rezultatet e ndjekjes së trajektores normale pa asnjë shqetësim të jashtëm mbi robot
- Ndjekja e trajektores në prani të një shqetësimi të jashtëm në momentet rrotulluese, shpejtësitë dhe pozicionin e motorit tërobotit.

Pjesa e parë e rezultateve të simulimit është ndarë për studimin e krahasimit për ndjekjen e trajektores normale midis rregullatorit ‘backstepping’ dhe rregullatorit me model invers të rrjetit neural. Diagrama bllok në Simulink që përdoret për të simuluar performancën e rregullatorit me model invers është paraqitur në figurën 4-66:

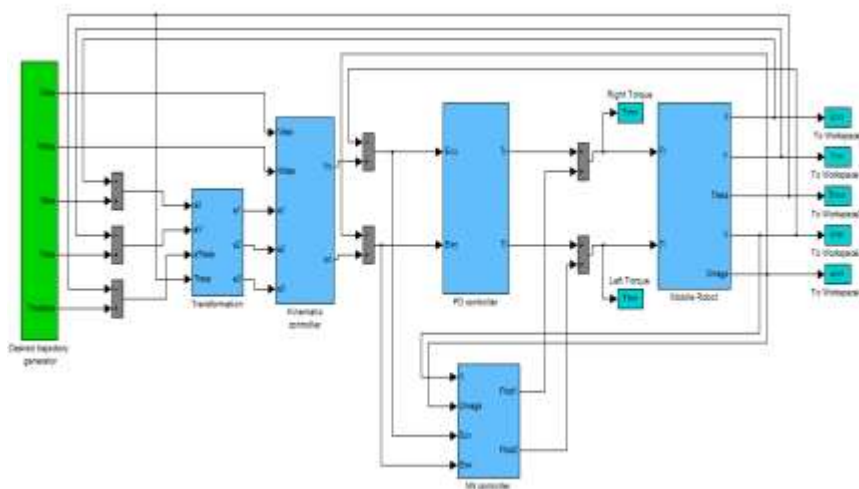


Figura4-37:Bllok diagram nëSimulink që simulon performancën e rregullatorit të rrjetit neural NN me model invers.

Bloku rregullator i rrjetit neural (NN) në bllok diagramin më lartë është rregullator me model invers i cili prodhon moment rrotullues për të kompensuar dinamikat jolineare të robotit të lëvizshëm.

Rrjeti neural i cili është përdorur në bllokun rregullator NN në modelin inversi online të rrjetit neural është zhvilluar në paragrafin e mëparshëm dhe përdor peshat e marra nga trajnimi gjithë përfshirës ‘offline’. Bllok diagrami në Simulink i përdorur për të simuluar rregullatorin ‘backstepping’ është i njëjti bllok diagram që përdoret në paragrafin e mëparshëm. Një krahasim i ndjekjes së trajektores me një trajektore reference lineare me asnjë shqetësim të jashtëm është paraqitur në Figurat 4-68:

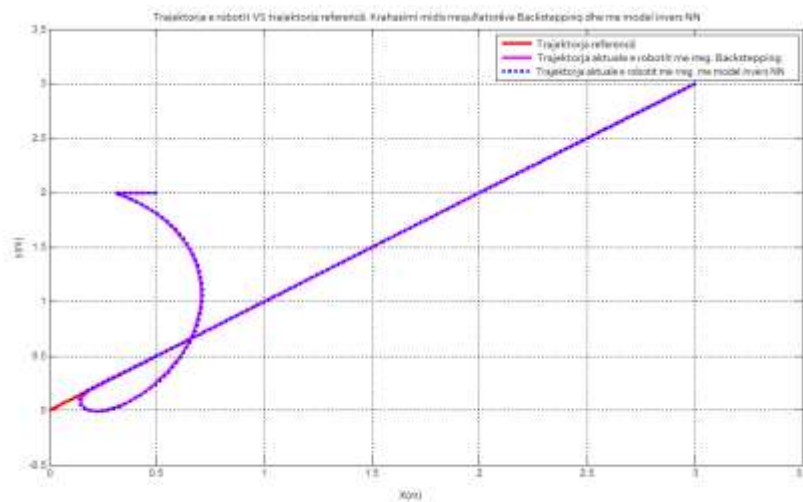


Figura4-38: Krahasimi i trajektores së robotit në planin x-y midis rregullatorit me model invers

Trajektoret e robotit janë pothuajse të njëjta për të dy rregullatorët sepse vetëm rregullatori ‘backstepping’ mund të prodhojnë hyrjet e kërkuara të kontrollit të sistemit, kur nuk ka asnjë shqetësim në sistemin. Qëllimi kryesor i rregullatorit inversi të rrjetit neural (NN) është për t'u siguruar që shpejtësitë e robotit do të ndjekin shpejtësitë e prodhuara nga rregullatori ‘backstepping’. Gabimet e shpejtësisë të sistemit që tregon efektin e pjesës së kontrollit të shpejtësia e sistemit janë paraqitur në figurën 4-69:

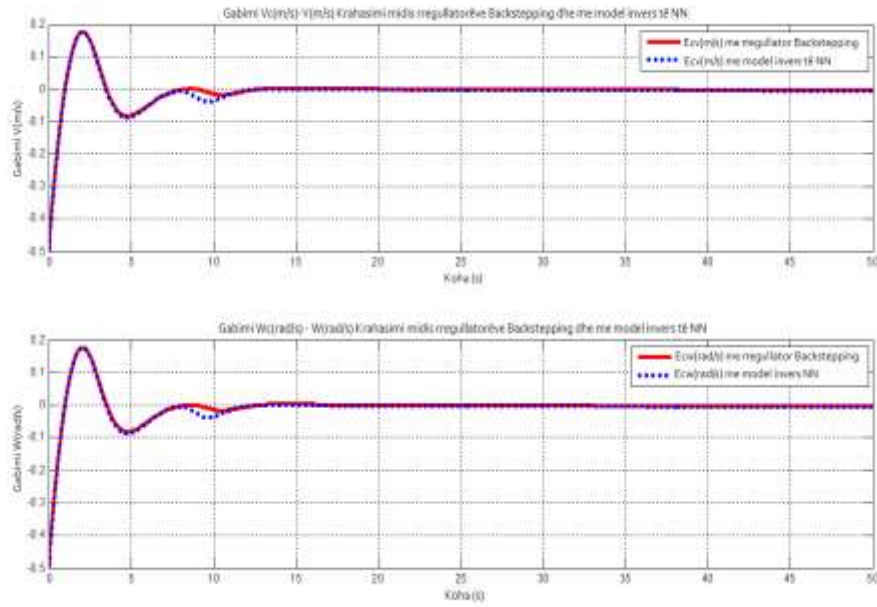


Figura4-39: Përgjigja e gabimit të shpejtësisë mes rregullatorit ‘Backstepping’ dhe rregullatorit me model invers

Efekti i kontrollit të shpejtësisë në rrjetin neural nuk është shumë i qartë në grafikët e figurës 4-69 për shkak se ai është duke punuar krahas një rregullatori PD i cili është i mjaftueshëm për kontrollin e shpejtësisë së një sistemi pa shqetësime. Performanca dhe funksionaliteti i rrjetit neural mund të vërhet duke parë në ndryshimin e peshave të tij gjatë trajektores dhe bëjmë lidhjen e tyre me gabimin e shpejtësisë së sistemit i cili është indeksi i performances së rrjetit neural.

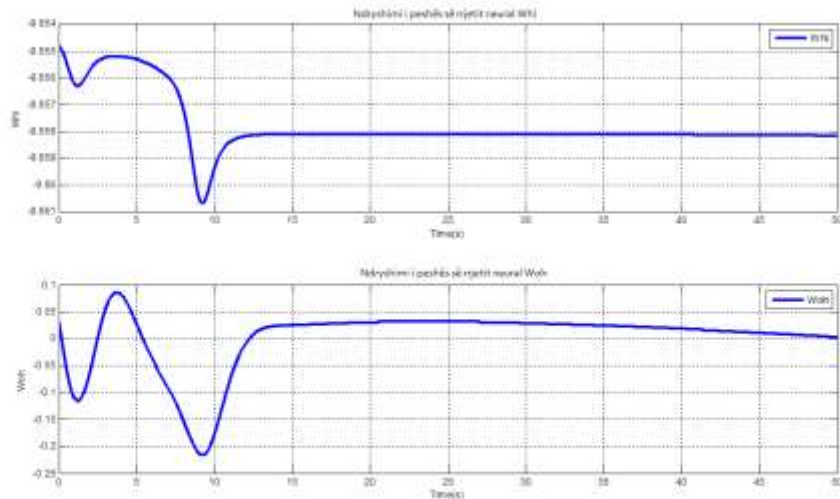


Figura4-40: Përgjigja në kohë e peshave të rrjetit neural

Duke parë përgjigjen e mësipërme në kohë, mund të gjejmë se rrjeti neural është duke mësuar dhe koeficientët do të jenë të qëndrueshëm dhe konstantë, pasi gabimet e shpejtësisë së sistemit të bëhen zero.

Hapi tjetër i analizës së performancës së këtij rregullatori të propozuar është për të futur çrregullime të sistemit dhe të krahasojmë performancën me rregullatorin ‘backstepping’. Çrregullimi është gjithmonë në formën e një momenti rrotullues në rrotën e robotit i cili mund të jetë shkaktuar nga forcat e jashtme si fërkimi, ose ajo mund të jetë në formën e shqetësimeve të shpejtësisë. Efekti i të dy çrregullimeve të përmendura më lart do të tregohet mëposhtë në analizën e shqetësimeve të sistemit.

Të gjitha shqetësime në momentet rrotulluese dhe shqetësimet e shpejtësisë janë shtuar në sistemin me rregullator me model invers të rrjetit neural (NN). Këto shqetësime gjenerohen nga blloku gjenerator i sinjalit në Matlab Simulink.

Konkluzione: Nga analiza krahasuese midis rregullatorit me model invers të rrjetit neural (NN) tregon se ky rregullator i propozuar ka përparësitë e mëposhtme mbi rregullatorin ‘backstepping’:

- Trajektoreset e robotit janë pothuajse të njëjta për të dy rregullatorët kur nuk kemi asnjë shqetësim në sistem kjo për arsye se vetëm rregullatori ‘backstepping’ mund të prodhojnë hyrjet e kërkuara të kontrollit të sistemit.
- Efekti i kontrollit të shpejtësisë në rrjetin neural nuk është shumë i qartë për kontrollin e shpejtësisë së një sistemi pa shqetësime për shkak se ai është duke punuar krahas një rregullatori PD i cili është i mjaftueshëm për kontrollin e shpejtësisë.
- Siç mund të shihet nga analiza e mësipërme rregullatori invers i rrjetit neural (NN) tregon aftësinë e tij të refuzimit të shqetësimeve kur krahasohet me rregullatorin ‘backstepping’.
- Ky rregullator mund të merret me shqetësimet e kufizimeve të pamodeluara dhe dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara në automjetin që janë pjesë e çdo mjedis që roboti dëshiron të kryej ndjekjen e trajektores.
- Për rregullatorin me model invers të rrjetit neural nuk është e nevojshme të ketë njohuri mbi dinamikën e sistemit dhe parametrat në mënyrë që të kompensoj termat jolineare në sistem. Kjo sidomos kur një platformë robot bëhet e gatshme me parametra të panjohur dhe shtresa e brendshme përdoret për ndjekjen e sinjalit të detyrës.

Duke përdorur ekuacionin (4.18) llogaritim gabimin e ndjekjes së trajektores nga ku më pastaj llogaritim me metodën e katrorit më të vogël gabimet në ndjekjen së trajektores.

$$ME = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} E_{traj}^2$$

Rregullatori Backstepping $ME = 0.3757$

Rregullatori Backstepping i Bazuar modelin Invers NN $ME = 0.3158$

$$\text{Përqindja e përmirësimit të ndjekjes} = \frac{ME_{Backstepping} - ME_{Invers NN}}{ME_{backstepping}} \times 100$$

- Performanca e ndjekjes së trajektores së rregullatorit ‘backstepping’ me model invers të rrjetit neural në krahasim me rregullatorin ‘backstepping’ është përmirësuar me 16.47% pra gabimi trajektore është ulur me këtë përqindje.

Mesatarja e shumës së katrorit të gabimeve të shpejtësisë këndore dhe shpejtësisë lineare.

$$MvE = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} E_v^2$$

$$\text{Rregullatori Backstepping } MvE = 0.5374$$

$$\text{Rregullatori Backstepping i Bazuar modelin Invers NN } MvE = 0.1414$$

$$\text{Përqindja e përmirësimit të } V_{Lineare} = \frac{MvE_{Backstepping} - MvE_{Invers NN}}{MvE_{backstepping}} \times 100$$

$$\text{Rregullatori Backstepping } MwE = 0.5374$$

$$\text{Rregullatori Backstepping i Bazuar modelin Invers NN } MwE = 0.1414$$

$$\text{Përqindja e përmirësimit të } W_{Këndore} = \frac{MwE_{Backstepping} - MwE_{Invers NN}}{MwE_{backstepping}} \times 100.$$

KAPITULLI 5

Konceptimi dhe Projektimi i Rregullatorit Adaptiv i Ndjekjes së Trajektores

5.1 Hyrje

Rregullatori i ndjekjes së trajektores që mund të dizajnohet për të përmirësuar performancën e rregullatorëve të mësipërme është ai rregullator që mund të përshtat vetëkoeficientët e rregullatorit backstepping për çdo trajektore dhe pozicion të robotit. Nga më lartëvëmë re se koeficientët e rregullatorit backstepping në të gjitha performancat e simulimit të mësipërmjanë përshtatur në përputhje me çdo trajektore dhe pozicion fillestar të robotit. Në mënyrë që të eliminojmë procesin e përshtatjes të koeficientëve të rregullatorit backstepping, proces i cilika një konsum shumë të madh të kohës dhe është një qasje joefikase, atherë projektohet dhe zbatohet një rregullator adaptiv i cili përshtat koeficientët e rregullatorit 'backsteepig' duke përdorur modelin direkt të rrjetit neural si në vazhdim. Pra, algoritmi i dytë i kontrollit i propozuar është një rregullator adaptiv self-tuning i cili përshtat nyjën e rregullatorit backstepping online në bazë të trajektores së referimit të robotit dhe pozicionit të tij fillestar. Në këtë metodë është i nevojshëm një rrjet neural për të mësuar karakteristikat e dinamikës së robotit dhe t'a përdor atë për të përcaktuar hyrjet e ardhshme që do të minimizojnë indeksin e performancës se gabimit në mënyrë që të kompensoj nyjen e rregullatorit backstepping.

Problemi i ndjekjes së trajektores për një robot të lëvizshëm nonholonomic përshkruhet dhe formulohet si vijon:

Le të jetë një trajektore referencë e përshkruar si vijon:

$$\dot{x}_r = v_r \cos \theta_r \quad (5.1)$$

$$\dot{y}_r = v_r \sin \theta_r \quad (5.2)$$

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \quad (5.3)$$

$$q_r = [x_r \quad y_r \quad \theta_r]^T \quad (5.4)$$

$$v_r = [v_r \quad \omega_r]^T \quad (5.5)$$

Me $v_r > 0$ për të gjithat, të gjejmë një kontroll të lëmuar të shpejtësisë $v_c = f(e_p, v_r, K)$, i tillë që $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_r - q) = 0$, ku e_p , v_r dhe K janë gabimi i ndjekjes së pozicionit, vektori i shpejtësisë dhe vektori i nyjës së kontrollit respektivisht. Pastaj llogaritim hyrjet e momentit rrotullues për ekuacioni dinamik (3.80) të tillë që $v \rightarrow v_c$ si $t \rightarrow \infty$. Ky kapitull detajon hapat dhe pjesë të ndryshme të projektimit të këtij algoritmi të kontrollit.

5.2 Rregullatori Back-Stepping Adaptiv

Rregullatorët e bazuar në kinematik, ose i ashtuquajturit rregullator backstepping i propozuar nga Kanayama në vitin 1992 [45] është një rregull kontrolli i ndjekjes së trajektorës i qëndrueshëm për një robot të lëvizshëm nonholonomic dhe e shpjegojmë plotësisht në pikën (4.1) të kapitullit 4. Kjo strukturë rregullatori është paraqitur në figurën 5-1:

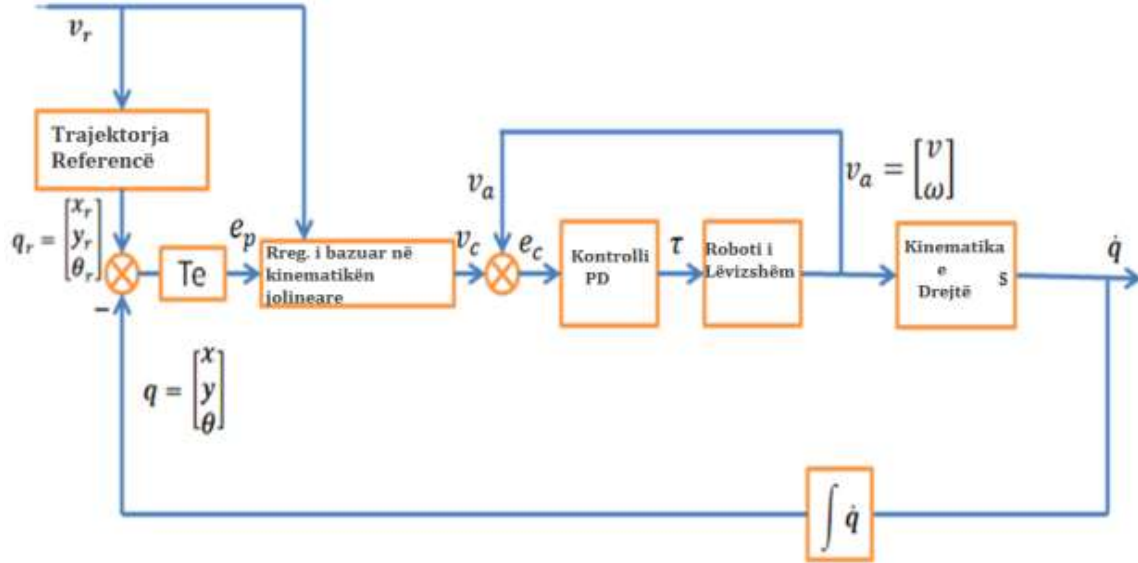


Figura 5-1: Struktura e rregullatorit backstepping

Algoritmi i kontrollit që llogarit vektorin e hyrjeve të shpejtësisë së robotit v_c tregohet në ekuacionin :

$$\begin{aligned} v_c &= \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta + K_x e_x \\ \omega_r + K_y v_r e_y + K_\theta v_r \sin e_\theta \end{bmatrix} \\ v_c &= f(e_p, v_r, K) \\ K &= (K_x, K_y, K_\theta) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Blloku shtesë rregullator PD është për t'u siguruar që shpejtësitë e robotit do të ndjekin shpejtësitë e referencës të dhëna dhe ka ekuacionin (5.3) të mëposhtëm:

$$\tau = K_P e_c + K_D \frac{de_c}{dt} \quad (5.8)$$

Në të cilin:

$$K_P = \begin{bmatrix} K_{PR} & 0 \\ 0 & K_{PL} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Siç mund të shihet në ekuacionin (5.2) të mësipërmrregullatori ka tre koeficientë të cilët janë thënë të jenë vlera pozitive të vazhdueshme në referencat e tjera. Disavantazhi i rregullatorit të mësipërm me koeficientë konstant është se ai ka nevojë për një përshtatje të kujdesshme të koeficientëve të njëjës backstepping për çdo trajektore të ndryshme referimi dhe nuk jep njëgabim të ndjekjes së trajektorës zero me një ndjekje të lëmuar të

trajktoret. Algoritmi i propozuar i kontrollit siguron një rregullator backstepping me koeficientë adaptivë që janë të ndryshueshëm dhe që ndryshojnë në përputhje me trajktoren e referencës. Struktura e rregullatorit backstepping adaptiv të bazuar në rrjetet neural (NN) është paraqitur në figurën 5-2[103]:

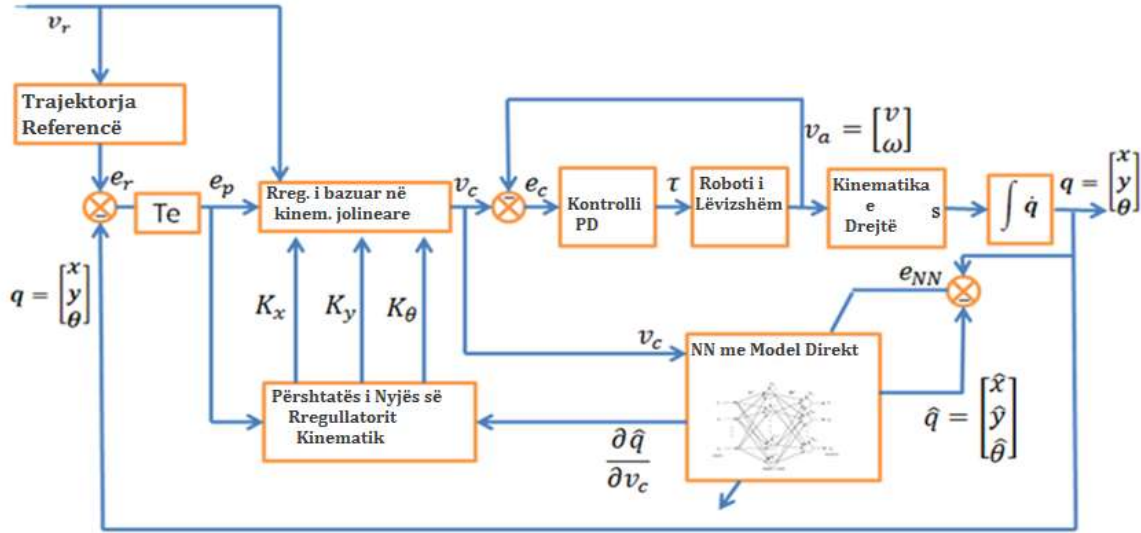


Figura 5-2: Struktura e rregullatorit backstepping adaptiv bazuar në rrjetet neural (NN)

Struktura e kontrollit të mësipërm përshtat koeficientët e rregullatorit bazuar në kinematik për të minimizuar funksionin e koston në vijim:

$$J = \frac{1}{2} \sum \gamma_x e_x^2 + \gamma_y e_y^2 + \gamma_\theta e_\theta^2 \quad (5.10)$$

Koeficientët e rregullatorit të bazuar në modelin kinematik konsiderohen pjesë e funksionit të koston së mësipërme dhe optimizohen dhe përditësohen sipas metodës me gradient zbritës. Koeficientët e rregullatorit kinematik përfaqësohen nga bashkësia $\alpha = [K_x \ K_y \ K_\theta]$. Derivati i pjesshëm i funksionit kosto i lidhur me α është [100]:

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \gamma_x e_x \frac{\partial e_x}{\partial \alpha} + \gamma_y e_y \frac{\partial e_y}{\partial \alpha} + \gamma_\theta e_\theta \frac{\partial e_\theta}{\partial \alpha} = \gamma e_p^T \frac{\partial e_p}{\partial \alpha} \quad (5.11)$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_x & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_\theta \end{bmatrix}$$

Zëvendësojmë ekuacionin (5.6) në ekuacionin (5.11) të mësipërm dhe kemi:

$$e_p = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = T_e(q_r - q) \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = \gamma e_p^T \frac{\partial (T_e(q_r - q))}{\partial \alpha} = -\gamma \times e_p^T \times T_e \times \frac{\partial q}{\partial \alpha}$$

Duke përdorur rregullin zinxhir derivati $\frac{\partial q}{\partial \alpha}$ mund të shkruhet si:

$$\frac{\partial q}{\partial \alpha} = \frac{\partial q}{\partial v_c} \times \frac{\partial v_c}{\partial \alpha} \quad (5.13)$$

Prandaj koeficientët e rregullatorit kinematik do të ndryshojnë dhe do të përshtaten për të bërë zero funksionin e kostos në përputhje me metodën e gradientit zbritës si më poshtë:

$$K_x = K_x + \Delta K_x \quad (5.22)$$

$$K_y = K_y + \Delta K_y \quad (5.23)$$

$$K_\theta = K_\theta + \Delta K_\theta \quad (5.24)$$

Në të cilin ndryshimi në koeficientët është llogaritur në bazë të ekuacioneve të mëposhtme[103]:

$$\Delta K_x = -\eta_{K_x} \frac{\partial J}{\partial K_x} \quad (5.25)$$

$$\Delta K_y = -\eta_{K_y} \frac{\partial J}{\partial K_y} \quad (5.26)$$

$$\Delta K_\theta = -\eta_{K_\theta} \frac{\partial J}{\partial K_\theta} \quad (5.27)$$

Parameterat η_{K_x} , η_{K_y} dhe η_{K_θ} janë normat e të mësuarit të algoritmit me gradient zbritës. Pjesë e rëndësishme e llogaritjes së derivateve të ekuacionit (5.16) është se si të llogaritet matrica Jacobian e sistemit. Matrica Jacobian mund të llogaritet duke përdorur ekuacionet e sakta të sistemit, ose ajo mund të sigurohet nga modeli i drejtpërdrejtë i rrjetit neural. Llogaritja e matricës Jacobian në bazë të dy metodave të mësipërme dhe avantazhet dhe kufizimet e tyre do të shpjegohet në dy paragrafët e mëposhtëm.

5.2.2 Llogaritja e Jacobian-it Duke Përdorur Modelin Direkt të NN

Rrjeti neural i cili është përdorur për të përafruar platformën e robotit ose të ashtuquajturin model të drejtpërdrejtë të rrjetit neural është treguar në figurën 5-3[99, 100]:

Matrica Jacobian që mund të gjendet nga rrjeti neural është:

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial v_c} = Jac_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}}{\partial v_c} & \frac{\partial \hat{x}}{\partial \omega_c} \\ \frac{\partial \hat{y}}{\partial v_c} & \frac{\partial \hat{y}}{\partial \omega_c} \\ \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial v_c} & \frac{\partial \hat{\theta}}{\partial \omega_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Jac_{v_{11}} & Jac_{v_{12}} \\ Jac_{v_{21}} & Jac_{v_{22}} \\ Jac_{v_{31}} & Jac_{v_{32}} \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Siç është përmendur në paragrafin hyrës të rrjetit neural në kapitullin e katërt, ekuacioni që lidh hyrjet dhe daljet e këtij rrjeti është:

$$y_i = \sigma \left(\sum_{l=1}^L W_{il} \sigma \left(\sum_{j=1}^n V_{lj} x_j + v_{l0} \right) + w_{i0} \right) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.38)$$

Hyrja për shtresëne parë është x_j . Përcaktojmë hyrjen për shtresën e dytë si:

$$z_l = \sigma \left(\sum_{j=1}^n V_{lj} x_j + v_{l0} \right) \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (5.39)$$

Kufijtë mund të trajtohen më lehtë duke përcaktuar $x_0 = 1$ dhe $z_0 = 1$. Atëherë mund të thuhet:

$$y_i = \sigma \left(\sum_{l=1}^L W_{il} z_l \right) \quad (5.40)$$

$$z_l = \sigma \left(\sum_{j=1}^n V_{lj} x_j \right) \quad (5.41)$$

Duke përdorur rregullin zinxhir, derivati i kërkuar për matricën Jacobian është:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial y_i}{\partial z_l} \times \frac{\partial z_l}{\partial x_j} \quad (5.42)$$

Derivati i parë mund të llogaritet sipas ekuacionit (5.40):

$$\frac{\partial y_i}{\partial z_l} = W_{il} \times \sigma' \left(\sum_{l=1}^L W_{il} z_l \right) \quad (5.43)$$

Derivati i dytë llogaritet sipas ekuacionit (5.41):

$$\frac{\partial z_l}{\partial x_j} = V_{lj} \times \sigma' \left(\sum_{j=1}^n V_{lj} x_j \right) \quad (5.44)$$

Prandaj derivati i ekuacionit (5.43) është:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_j} = W_{il} \times \sigma' \left(\sum_{l=1}^L W_{il} z_l \right) \times V_{lj} \times \sigma' \left(\sum_{j=1}^n V_{lj} x_j \right) \quad (5.45)$$

Ekuacioni (5.45) është ekuacioni që mund të përdoret për të llogaritur matricën Jacobian duke përdorur rrjetin neural me model të drejtpërdrejtë. Rrjeti neural që do të përdoret në këtë qasje duhet të jetë i trajnuar mirë në mënyrë që mund të kryejnë përafrim të saktë të sistemit. Detajet e trajnimit dhe zbatimit të rrjetit neural do të shpjegohen në paragrafin e simulimeve dhe rezultateve. Rezultatet e simulimit të algoritmit të kontrollit të mësipërm janë paraqitur në detaje në paragrafin tjetër.

5.3 Analizat dhe Rezultatet e Simulimit

Bllok diagrama në Simulink që është paraqitur në figurën 5-4 është përdorur për të simuluar përgjigjen e rregullatorit duke përdorur metodën e modelit të drejtpërdrejtë të rrjetit neural:

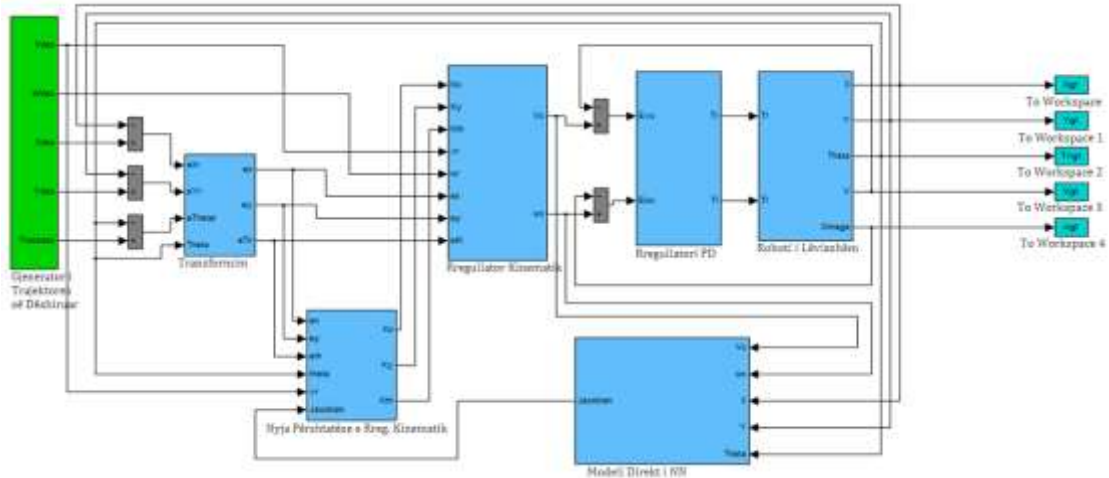


Figura 5-3: Bllok diagrama në Simulink e përdorur të simuloj përgjigjen e rregullatorit që përshtat koeficientët e rregullatorit backstepping

Blloku për modelin e drejtpërdrejtë të rrjetit neural (NN) është përgjegjës për përafrimin e modelit të robotit të lëvizshëm dhe ka brenda bllok diagramën e treguar në figurën 5-5.

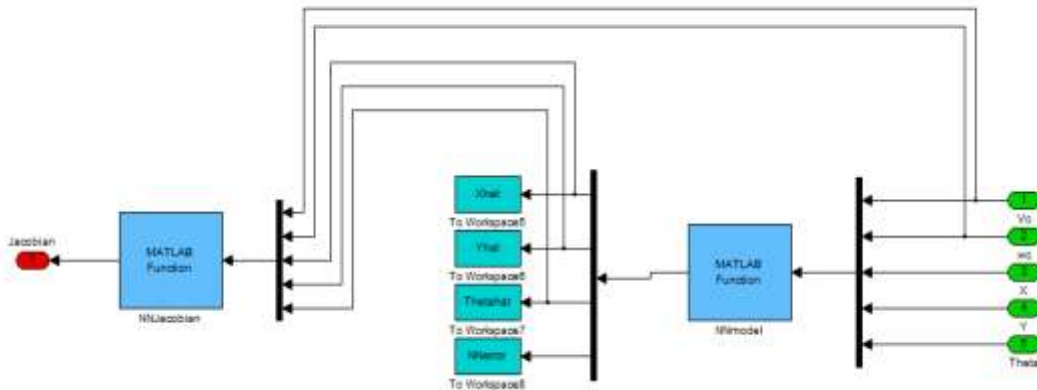


Figura 5-4: Blloku me model të drejtpërdrejtë të rrjetit neural (NN)

Blloku i modelit të rrjetit neural (NN) dhe blloku Jacobian i rrjetit neural (NN) në bllok diagramin më lartë janë dy funksione MATLAB përgjegjës për kryerjen e modelimit të drejtpërdrejtë të rrjetit neural dhe llogaritjen e Jacobianit sipas ekuacionit (5.45). Duhet të bëhet trajnimi gjithëpërfshirës i rrjetit neural për të minimizuar gabimin e modelit të drejtpërdrejtë të rrjetit neural (NN) dhe për të rritur saktësinë e llogaritjes së Jacobianit. Hapat e ndryshëm që janë bërë për të trajnuar një rrjet neural janë shpjeguar plotësisht në paragrafin e ardhshëm.

5.4 Analiza Krahasese

Pas trajnimit të rrjetit neural me model të drejtpërdrejtë, ne mund të simulojmë performancën e rregullatorin adaptive që përshtat koeficientët duke përdorur bllok diagram në Simulink të figurës 5-4. Analiza e krahasimit në mes rregullatorit backstepping dhe rregullatorit adaptive backstepping bazuar në rrjetin neural (NN) është bërë për të treguar avantazhet e rregullatorit të propozuar. Karakteristikat e mëposhtme të rregullatorit duhet të diskutohen për të kptur një krahasim perfekt:

- Gabimi i ndjekjes së trajektores
- Lëmueshmëria e trajektoreve të robotit
- Koha e arritjes sëtrajektores
- Magnituda e veprimit të kontrollit

Krahasimi midis performancës së rregullatorëve në kategoritë e mësipërme rezulton në një analizë gjithë përfshirëse dhe tregon avantazhet dhe kufizimet e çdo rregullatori. Rezultatet e simulimit të rregullatorit backstepping me koeficiente fiks të rregullatorit dhe rregullatori adaptiveqëpërshtat koeficientëtne përgjigje të trajektoreve të ndryshme referuese dhe pozicioneve fillestare të robotit do të tregohet në pjesën e mbetur të këtij seksioni dhe konkluzioni do të bëhet në lidhje me performancën e çdo rregullatori.

Vini re se për simulimin të këtij algoritmi të kontrollit është përdorur shenja e matricës Jacobiane.

Trajektore reference Sinusoidale

Pozicioni fillestare i Robotit: (0, 0, 0)

Koeficientet e rregullatorit backstepping: $K_x = 2, K_y = 56, K_{th} = 15$

Koeficientet e funksionit kosto te rregullatorit adaptive:

$$J = \frac{1}{2} \sum \gamma_x e_x^2 + \gamma_y e_y^2 + \gamma_\theta e_\theta^2$$
$$\gamma_x = 1, \gamma_y = 50, \gamma_\theta = 1$$

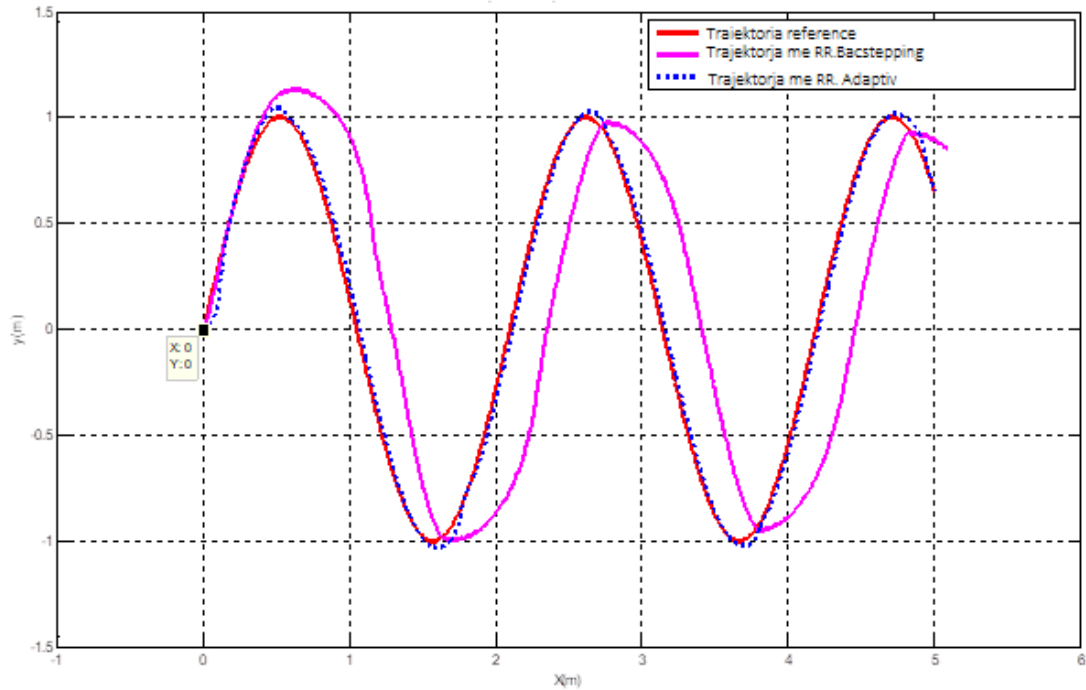


Figura 5-5: Trajektorja e robotit në planin x-y,

Trajektorja referencë sinusoidale është konsideruar si një trajektore e vështirë referencë për një robot të lëvizshëm nonholonomic për t'u ndjekur për shkak të majave të saj që përfshijnë një ndryshim të madh në këndet e kreut. Performanca e ndjekjes perfekte tërregullatorit adaptiv përshtatës i koeficientëve në krahasim me rregullatorin backstepping mund të shihet në figurën 5-33.

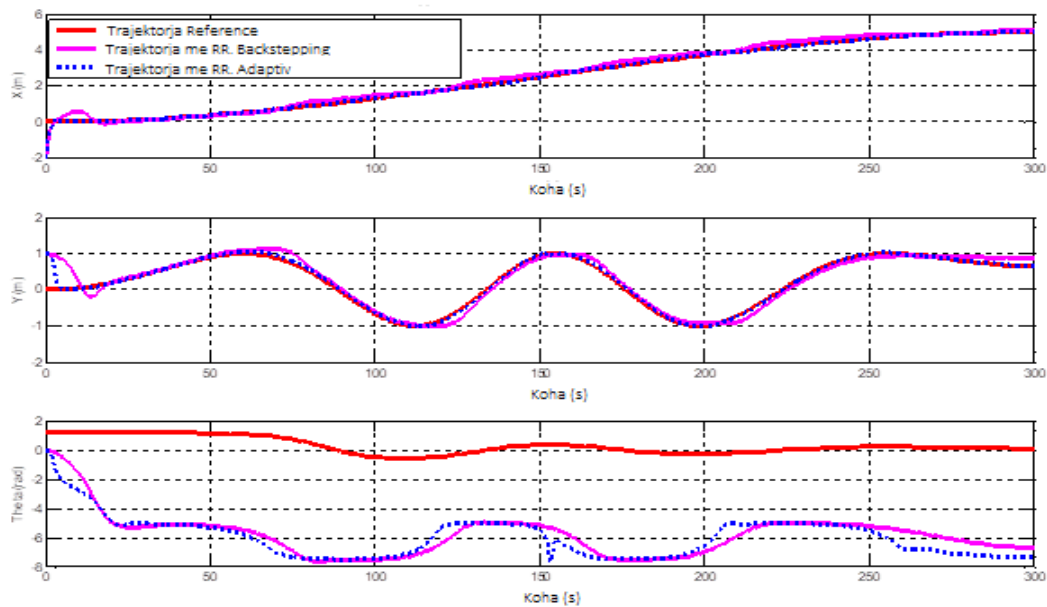


Figure 5-6: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes së robotit vs. trajektoret e referencës,

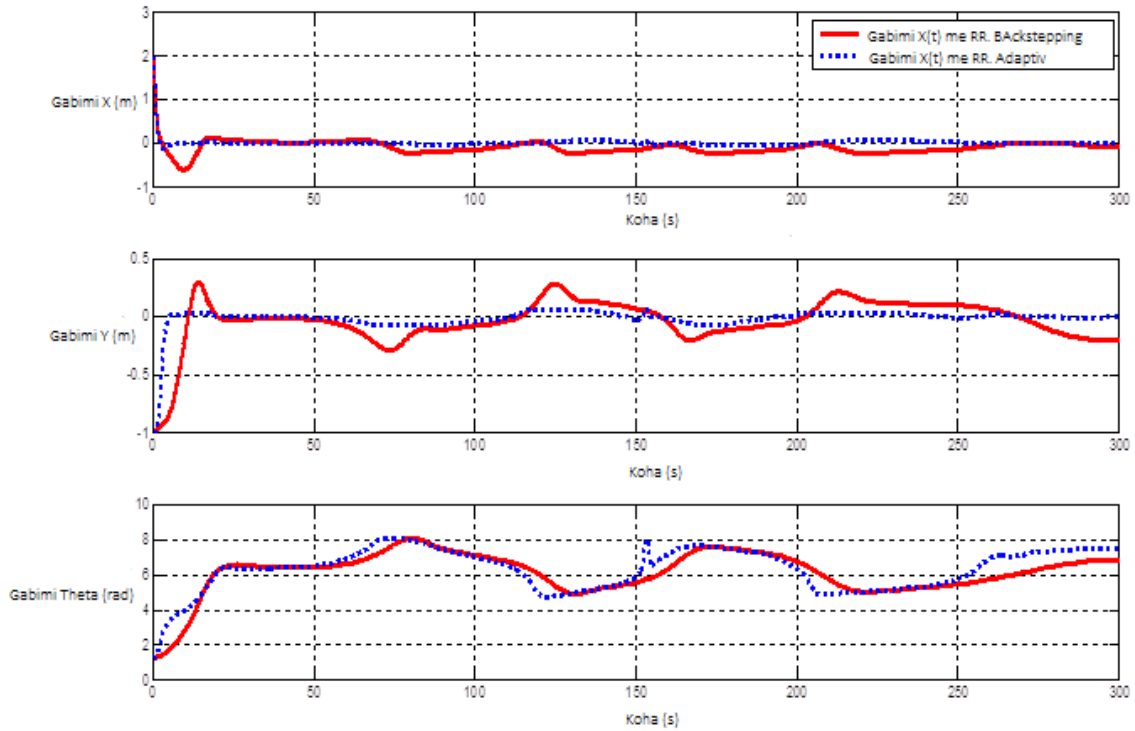


Figure 5-7: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit Ex,Ey dhe Eth.

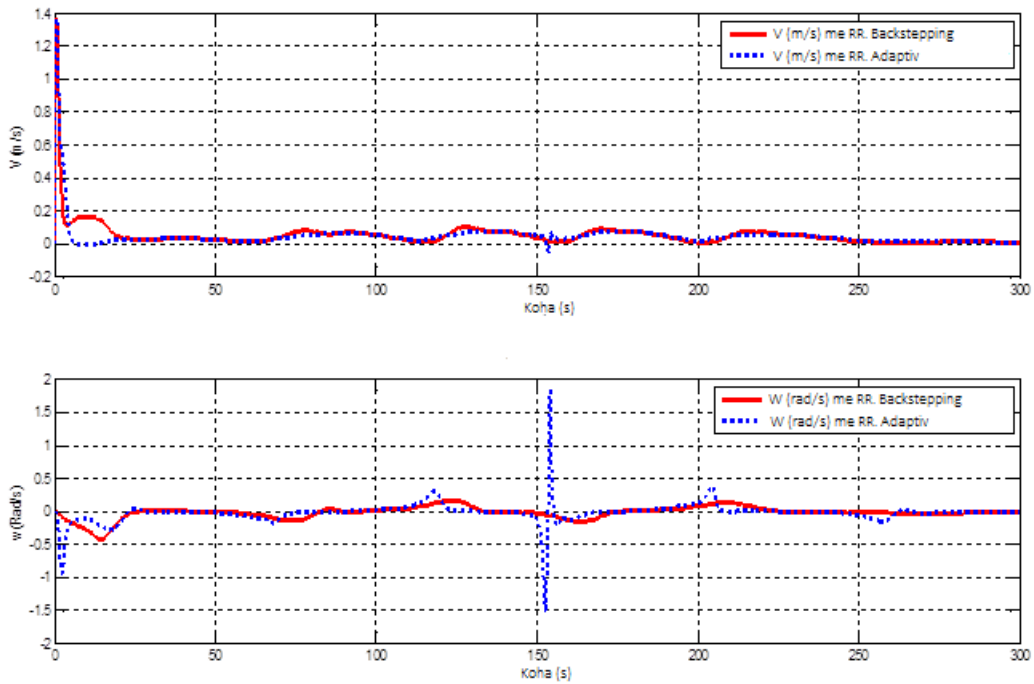


Figura 5-8: Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit,

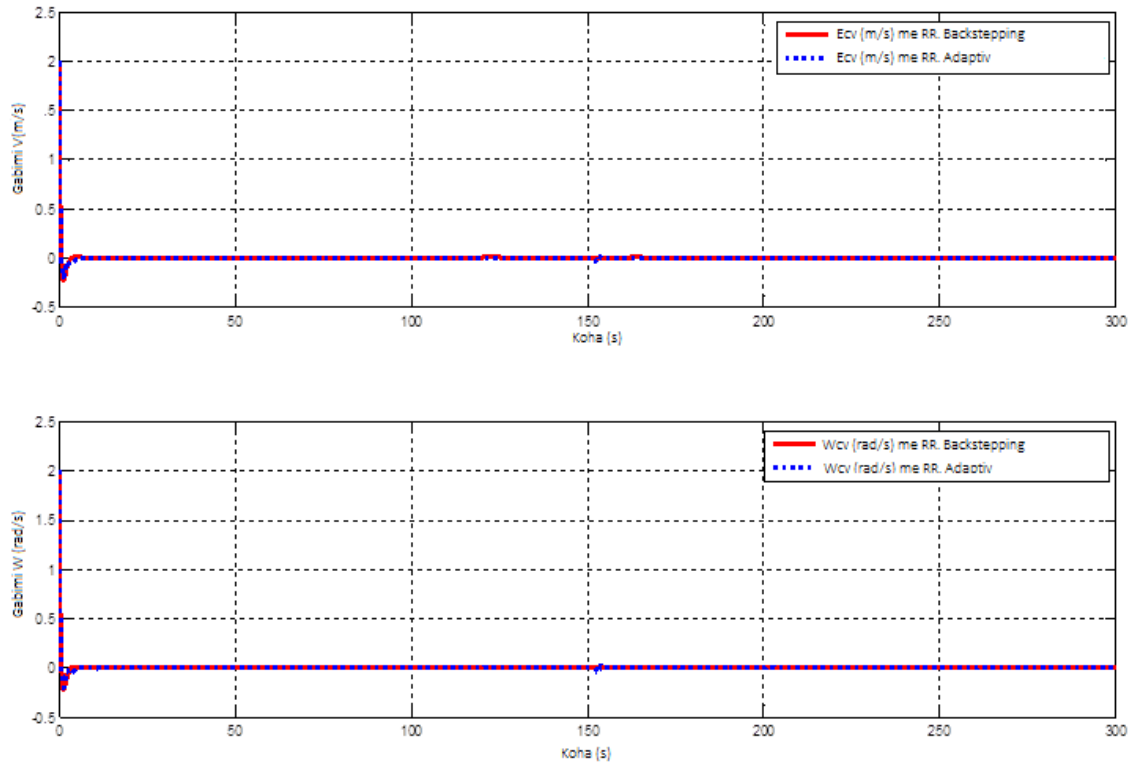


Figura 5-9: Gabimet në shpejtësinë e robotit.

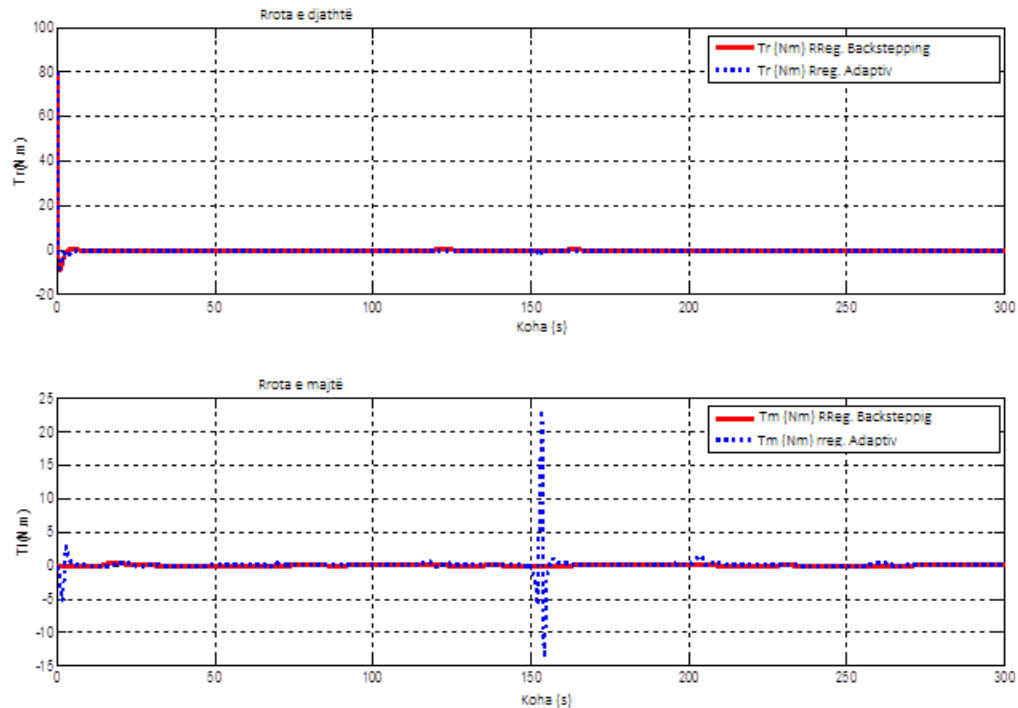


Figura5-10: Momentet rrotulluese të rrotës së djathtë dhe të majtë.

Momentet rrotulluese të rregullatorit në rrotën e djathtë dhe rrotën e majtë të robotit janë brenda rangut të ekzekutuesve.

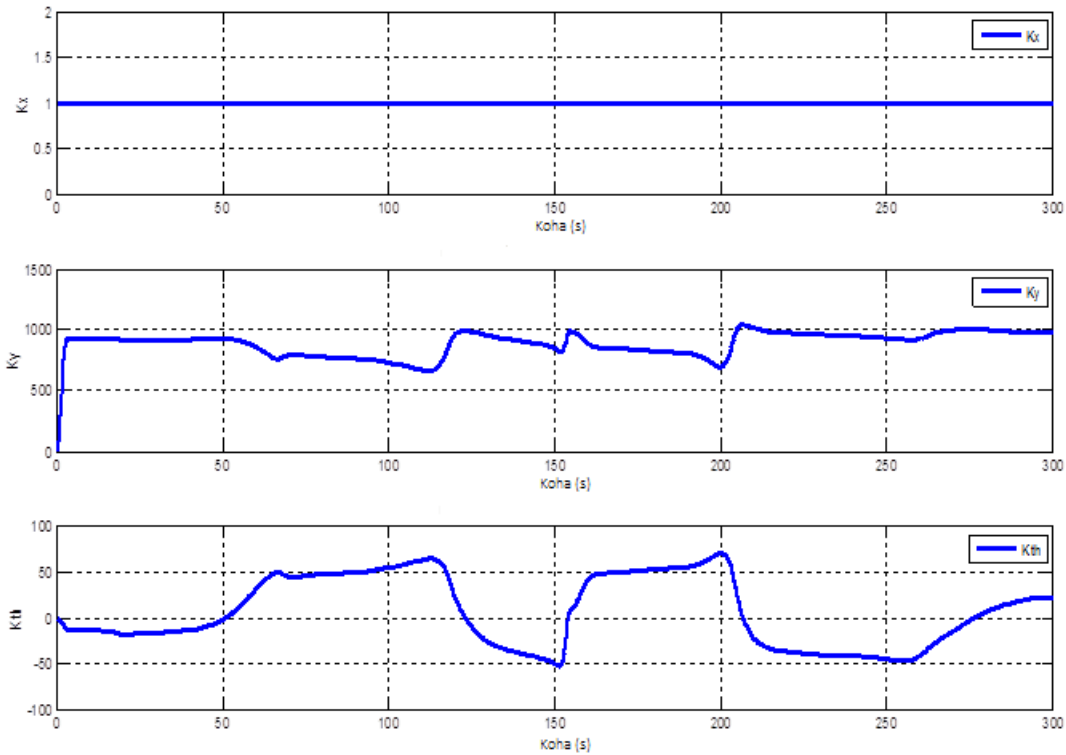


Figura5-11: Përgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve Koeficientët e rregullatorit janë subjekti që do të ndryshoj në të gjithë periudhën e trajektore, sepse trajektorja reference ka shumë ndryshime në këndin e kreut dhe kjo mund të konsiderohet si një kombinim i trajektoreve parabolike të ndryshme.

Trajektore Reference Drejtkëndëshe

Pozicioni fillestar i Robotit: (0, 0, 0)

Koeficientet e rregullatorit Backstepping: $K_x = 2, K_y = 67, K_{th} = 15$

Koeficientet e Funksionit te Kostos te Rregullatorit Adaptive:

$$J = \frac{1}{2} \sum \gamma_x e_x^2 + \gamma_y e_y^2 + \gamma_\theta e_\theta^2$$

$$\gamma_x = 1, \gamma_y = 50, \gamma_\theta = 1$$

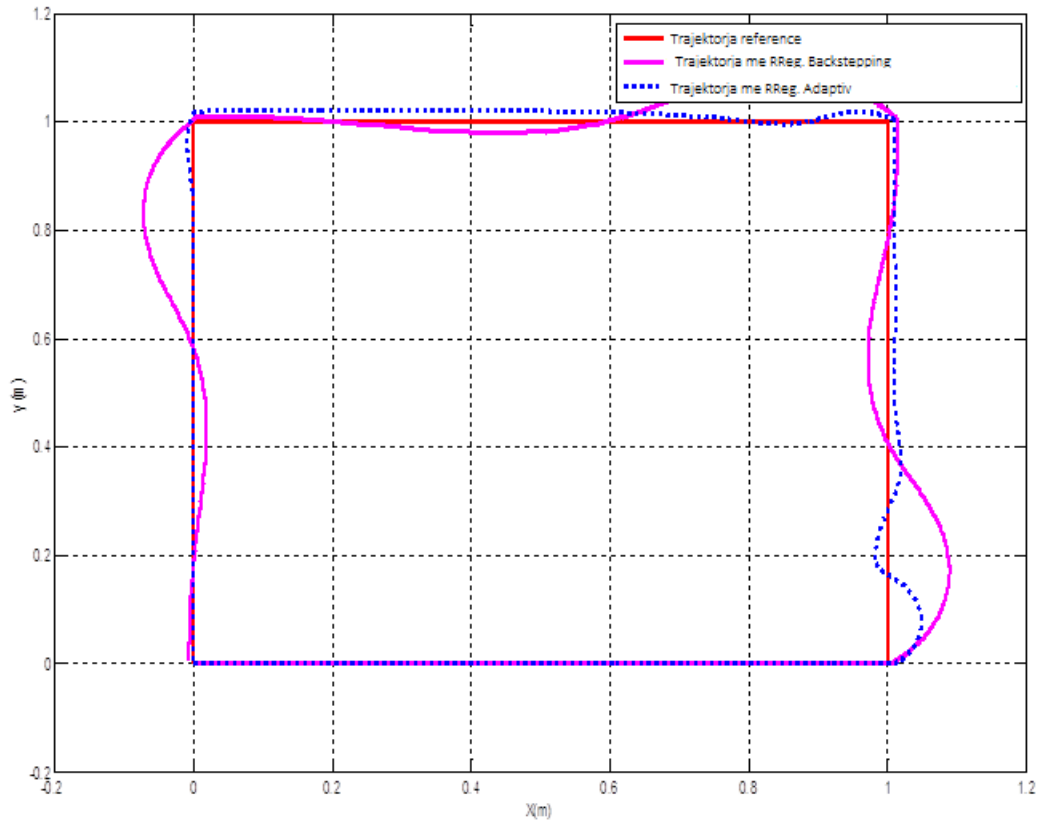


Figura5-128: Trajektorja e robotit në planin x-y.

Trajektorja referencë katrore është një nga trajektorët me të përdorurura të cilat janë testuar në literature për algoritme të ndryshme të kontrollit të ndjekjes së trajektores. Performanca më e mirë e ndjekjes së trajektores e rregullatorit adaptiv që akordon nyjen adaptive në krahasim me rregullatorin backstepping është treguar në figurën 5-48. Vini re se rregullatori backstepping me koeficientë fikse mund të përshtatet për secilën nga trajektorët e referencës, por është një proces që konsumon shumë kohë. Përshtatja e koeficientëve nga rregullatori adaptiv e zgjidh këtë problem dhe e bën robotin të ndjek cdo trajektore duke marrë parasysh pozicionin e tij fillestar.

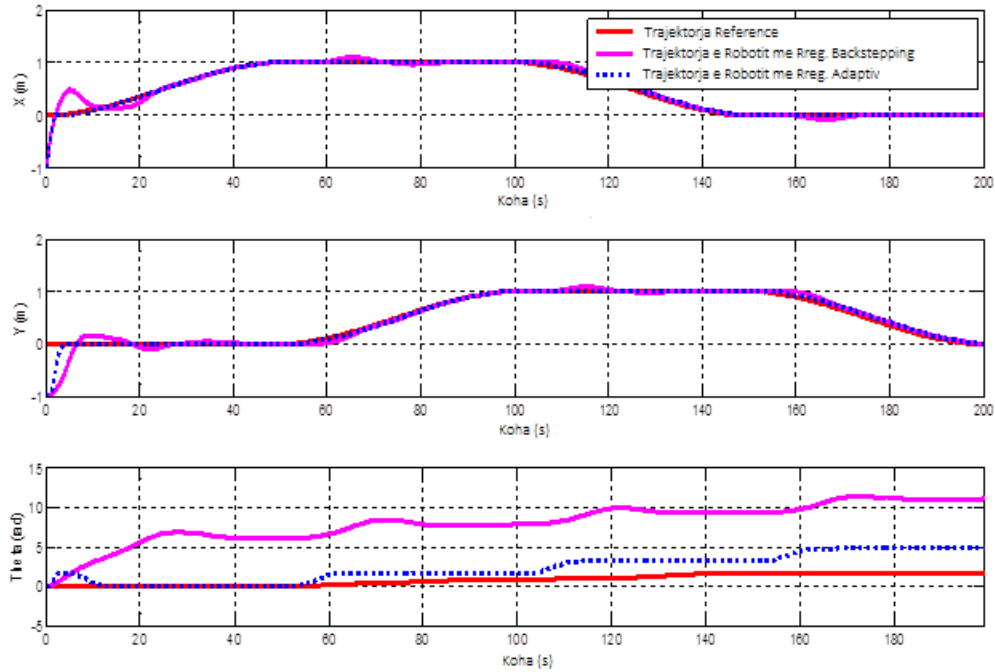


Figura5-13: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes së robotit vs. trajektoret e referencës,

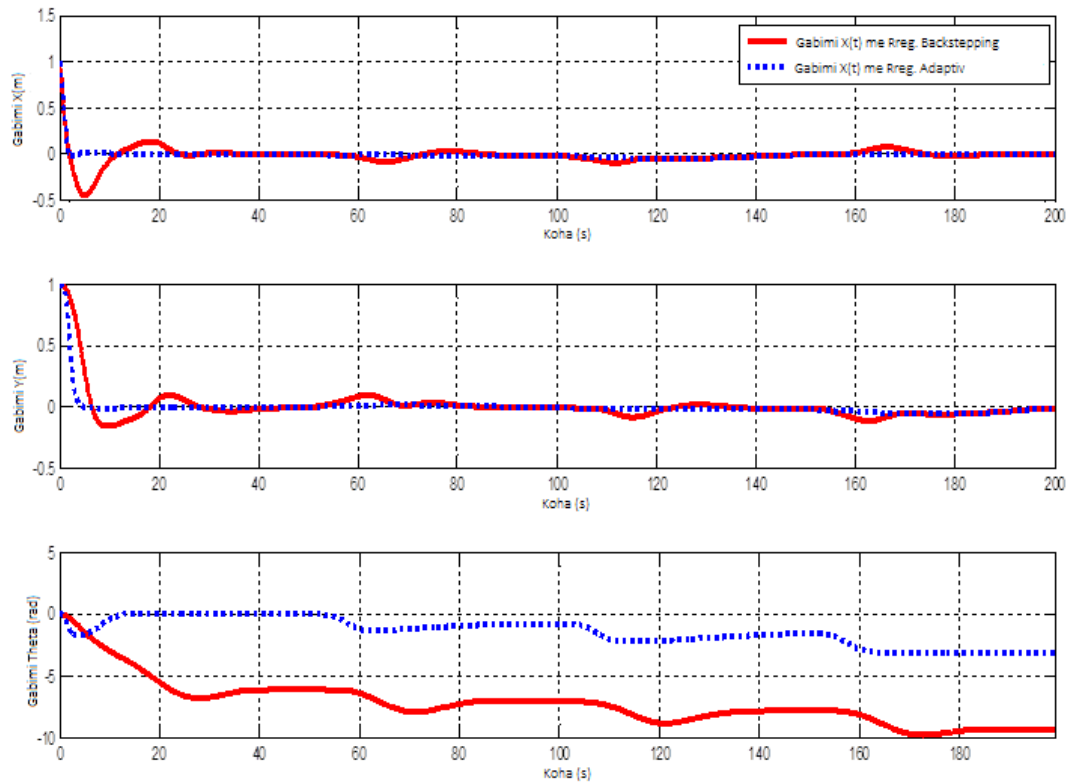


Figura5-14: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit E_x, E_y dhe E_θ .

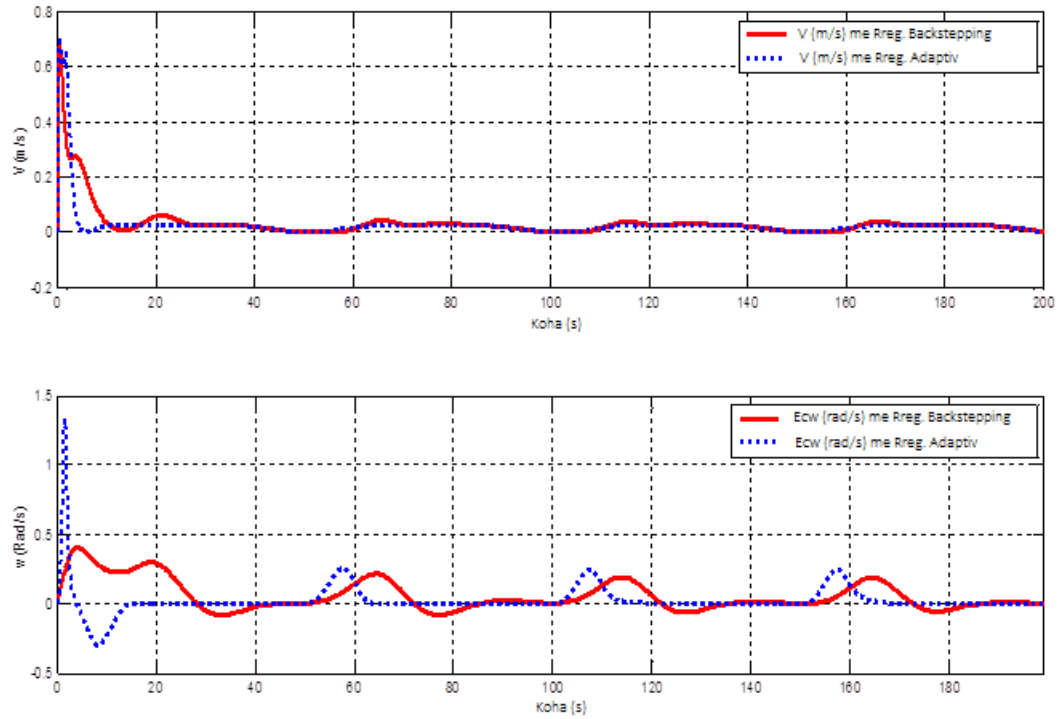


Figura5-15: Shpejtesitë lineare dhe këndore të robotit,

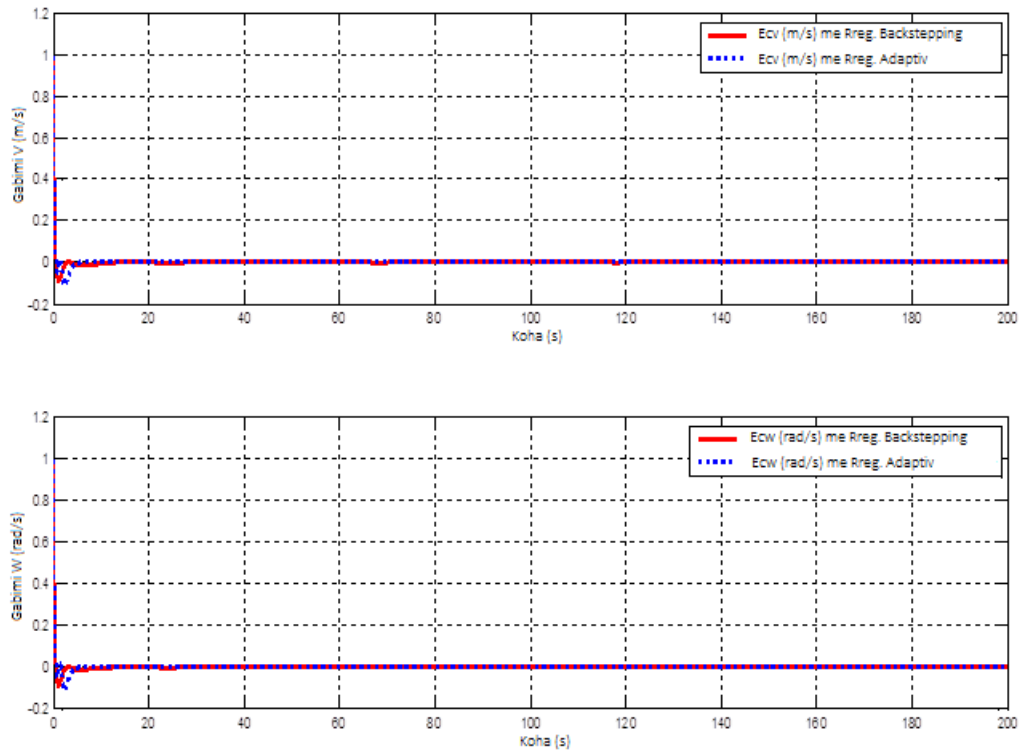


Figura5-16: Gabimet në shpejtësinë e robotit.

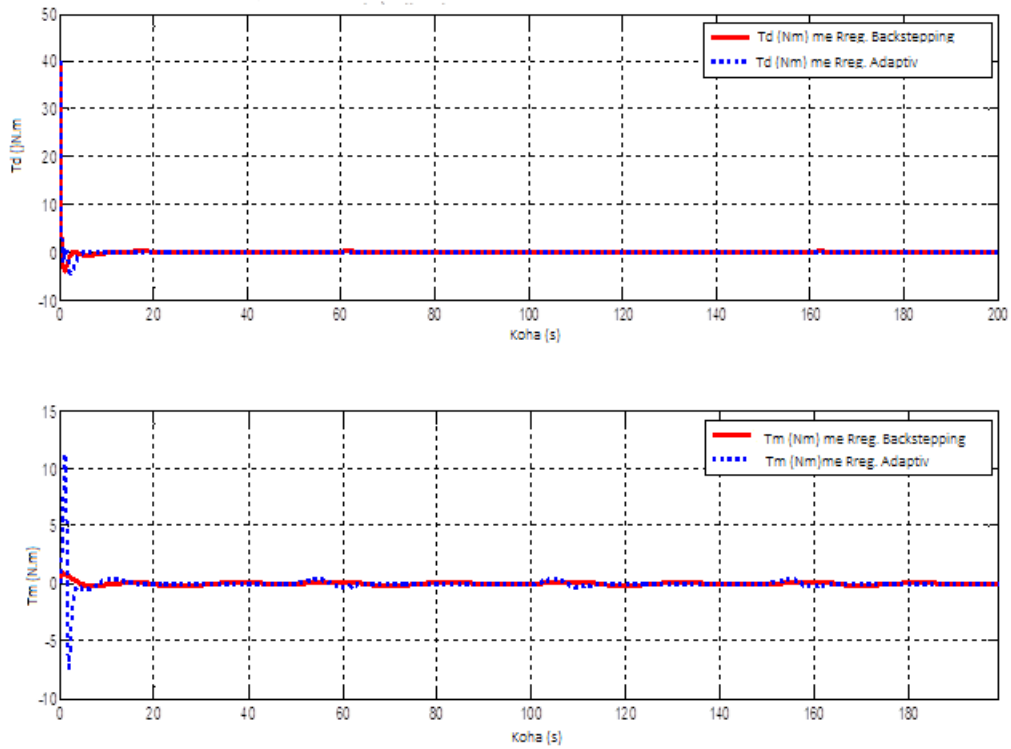


Figura5-17: Momentet rotulluese të rotës së djathtë dhe të majtë.

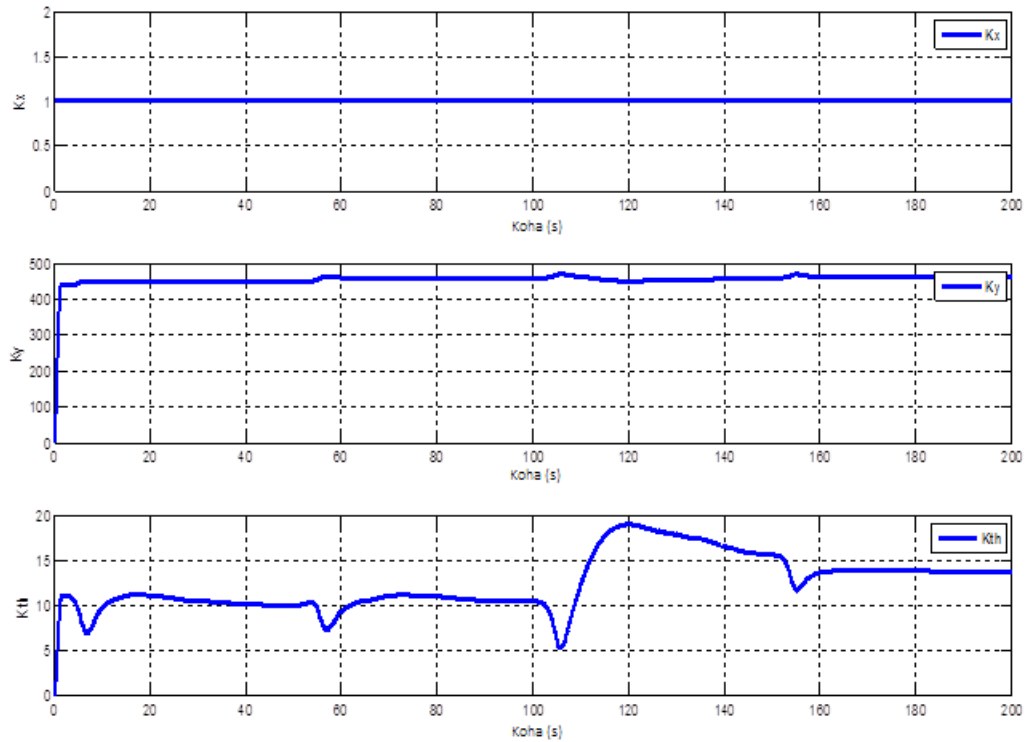


Figura5-18: Përgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve

Skajet e çdo trajektore, të cilat janë vendet që këndi i robotit ka një ndryshim të madh, janë pjesët më sfiduese të trajektoreve. Ndryshimi në koeficientët e rregullatorit do të ndodhë kryesisht në këto pika të degëve mund të shihet nga figurën 5-53.

Trajektore Referencë Rrethore

Pozicioni fillestar i Robotit: (0, 0, 0)

Koeficientët e rregullatorit Backstepping: $K_x = 1, K_y = 55, K_{th} = 15$

Koeficientët e Funksionit të Kostos të Rregullatorit Adaptive:

$$J = \frac{1}{2} \sum \gamma_x e_x^2 + \gamma_y e_y^2 + \gamma_\theta e_\theta^2$$
$$\gamma_x = 1, \gamma_y = 50, \gamma_\theta = 1$$

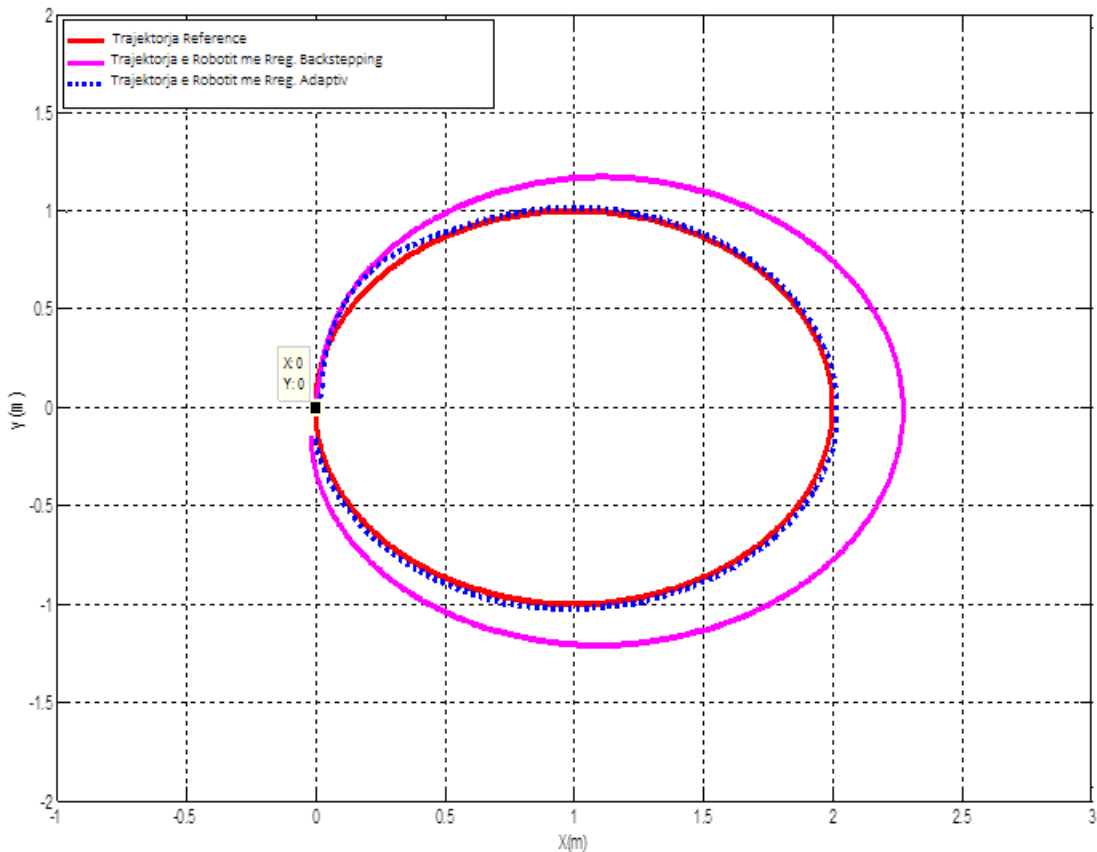


Figura5-19: Trajektorja e robotit në planin x-y,

Trajektorja referencë rrethore është një tjetër trajektore referencë e famshme e testuar nga kerkues të ndryshëm në këtë fushë. Performanca shumë e mirë e rregullatorit akordues të nyjes adaptive të propozuar në krahasim me rregullatorin backstepping mund të shihet nga figura 5-61.

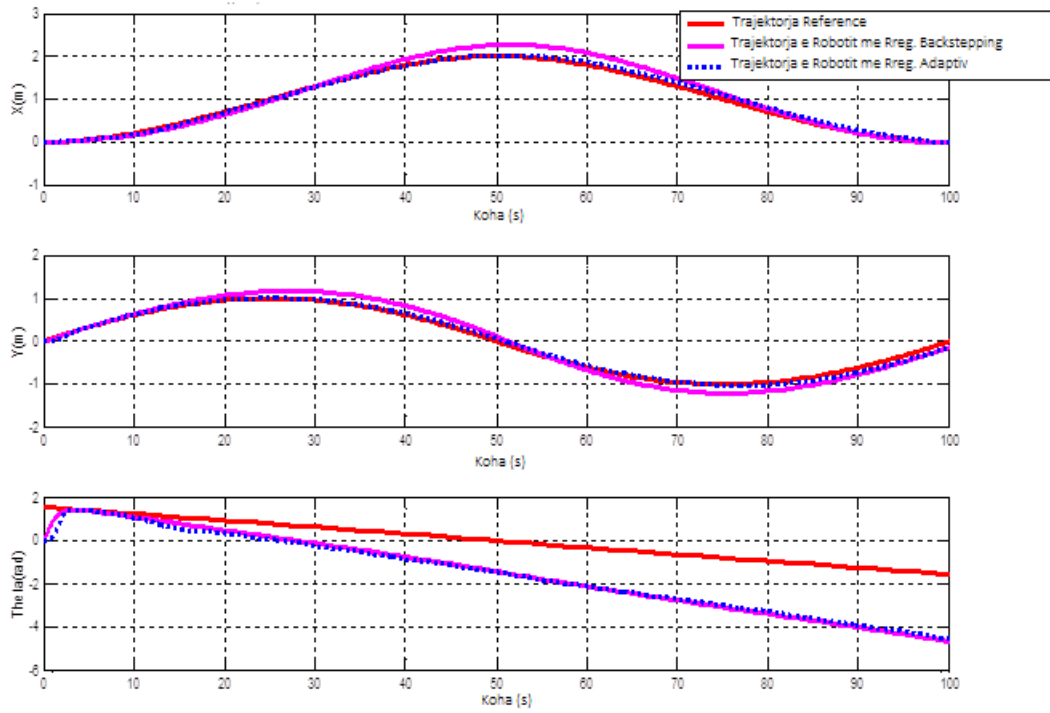


Figura5-20: Përgjigja në kohë e gjendjeve të daljes

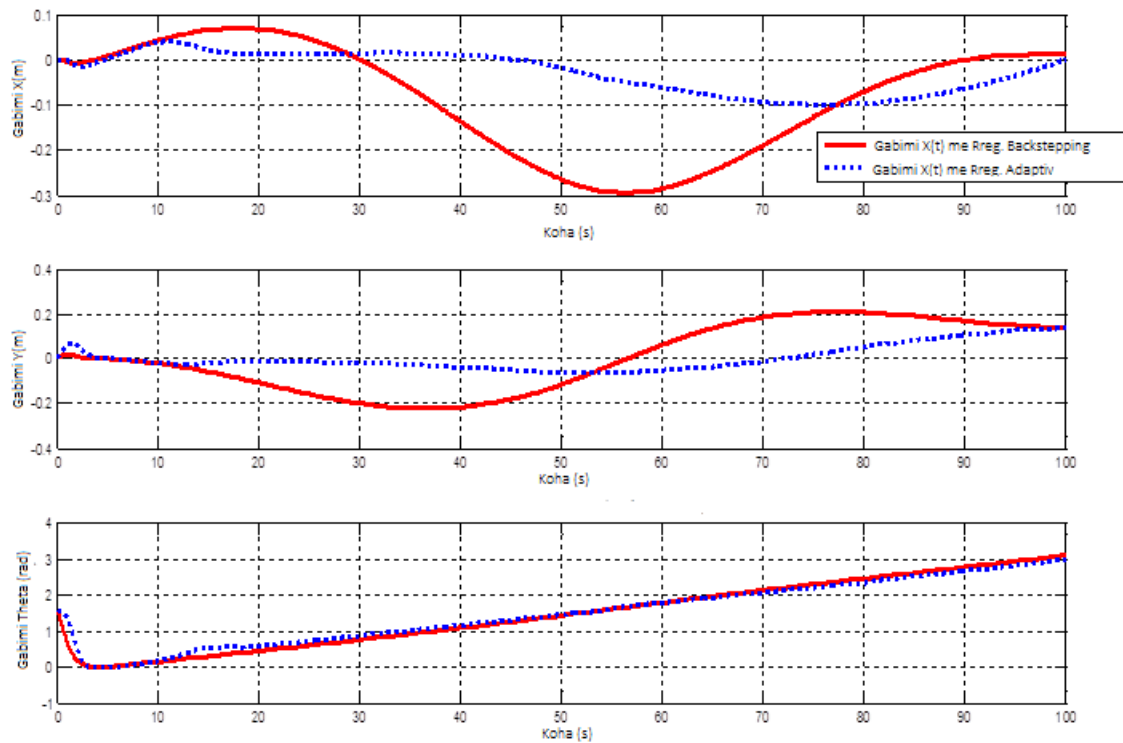


Figura5-21: Gabimet e gjendjes së daljes së robotit Ex,Ey dhe Eth.

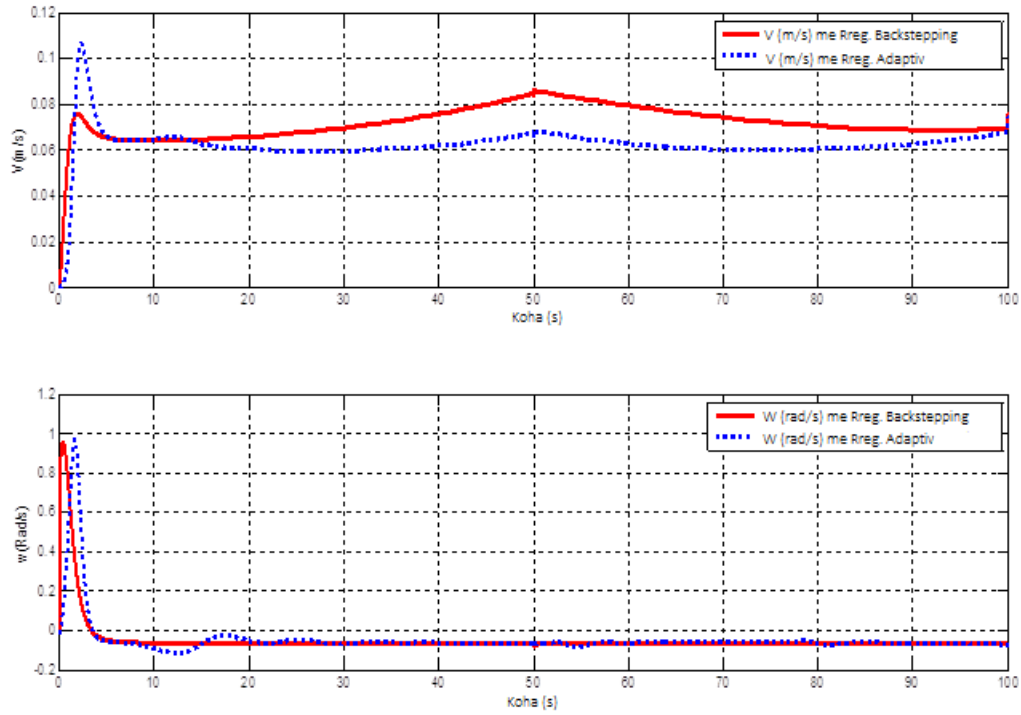


Figura5-22: Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit.

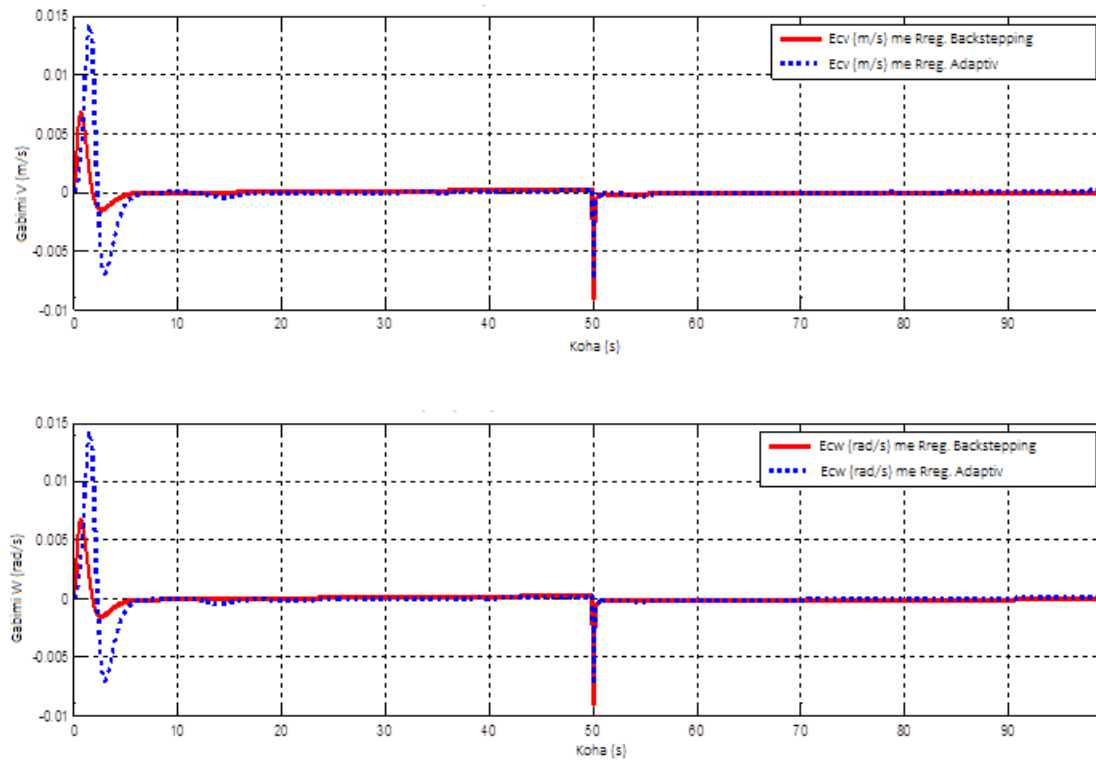


Figura5-23: Gabimet në shpejtësinë e robotit.

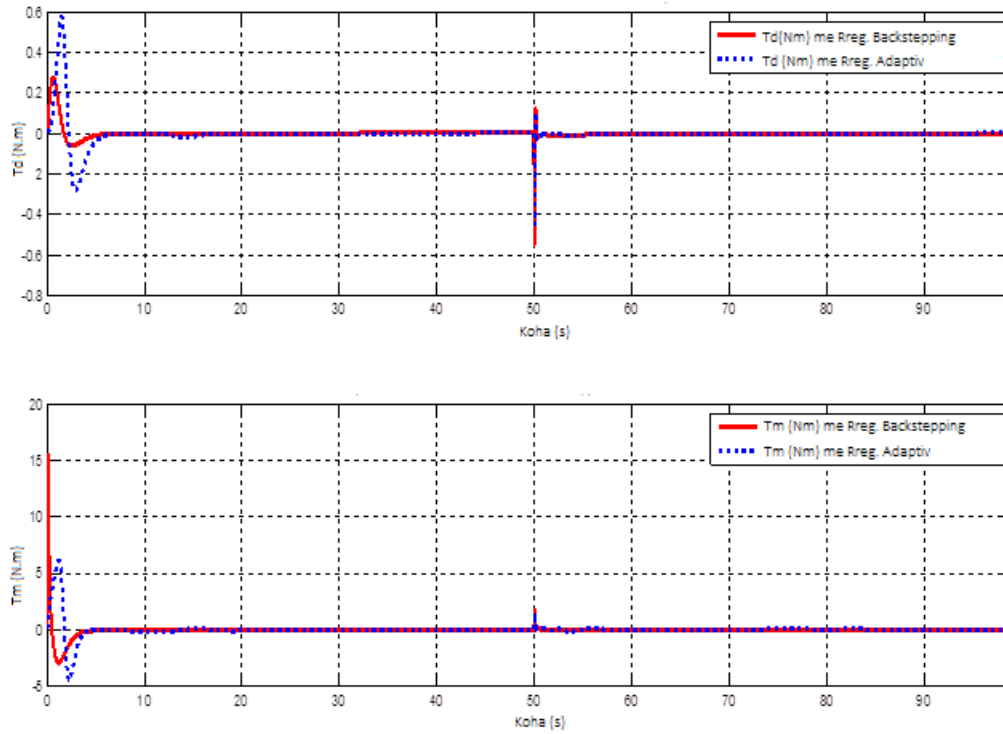


Figura5-24: Momentet rotulluese të rrotës së djathtë dhe të majtë.

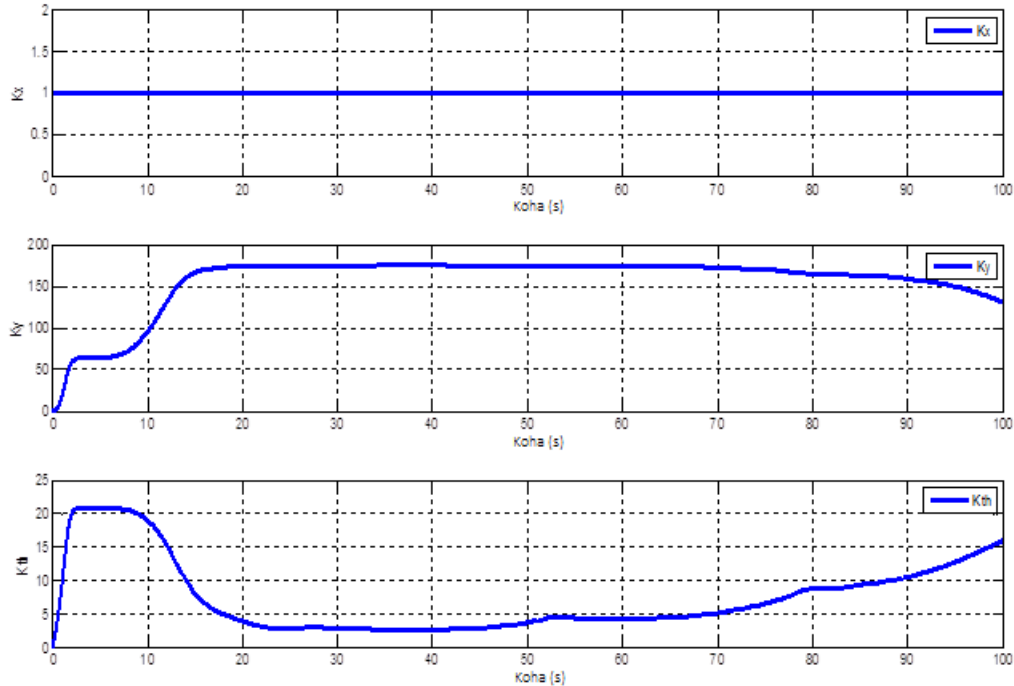


Figura5-25: P'rgjigja në kohë e koeficientëve të rregullatorit adaptiv përshtatës të koeficientëve

5.5.Konkluzione dhe Analiza krahasuese

Duke bërë një analizë krahasuese të hollësishme mbi rezultatet e marra më sipër midis rregullatorit backstepping adaptive me bazë rrjetin neural (NN) dhe rregullatorit backstepping arrijmë në përfundimin se rregullatori backstepping adaptive me bazë rrjetin neural (NN) është një rregullator i ndjekjes perfekte të trajektores sipas përparësive të mëposhtme që ai ka mbi rregullatorin backstepping.

Nga analizimi i rezultateve të marra na rezulton se

- Rregullatori adaptiv bazuar në NN tenton të bëj gabimin zero në ndjekjen e trajektores pa marrë parasysh formën e trajektores referencë dhe pozicionin fillestar të robotit në lidhje me trajektoren e referencës.
- Rregullatori adaptiv i bazuar në NN kërkon një kohë më e shkurtër për të arritur trajektoren referencë kur pozicioni fillestar i robotit është i ndryshëm nga pozicioni i trajektores referencë.
- Kur roboti përdor rregullatori adaptiv i bazuar në NN bën një trajektore më të lëmuar, gjë që e bën më të lehtë zbatimin e tij në të gjitha kërkesat e jetës reale.
- Rregullatori adaptiv i bazuar në NN nuk ka njohuri mbi dinamikën e sistemit, pozicionit fillestar të robotit dhe trajektores referencë. Njohuri të cilat ishin të nevojshme para se të përdornim këtë rregullator. Janë tiparet adaptive të këtij algoritmi që merren me ndryshimet në dinamikën e robotit, trajektoret e referencës dhe pasigurive të tjera.
- Momentet rrotullues dalëse të rregullatorit janë brenda kufijve të ekzekutuesve të robotit që e bën këtë rregullator të zbatueshëm për platformën eksperimentale të robotit.

Për të patur një vlerësim më të qartë dhe të plotë mbi rregullatorin adaptiv të bazuar në rrjet neural është e rëndësishme të bëhet një vlerësim edhei performancës së skemës së kontrollit backstepping adaptive të propozuar në krahasim me rregullatorin konvencional backstepping. Për këtë vlerësim po njësoj rregullatorët i kemi testuar me të njëjtën trajektore referencë dhe pozicion fillestar të robotit dhe kemi krahasuar indeksat e ndryshme të performancës. Më poshtë kemi spjeguar hap pas hapi rrugën e ndjekur për vlerësimin e performancës së skemave të kontrollit duke përdorur trajektoren sinusoidale. Siç e kemi përmendur edhe më parë, trajektorja sinusoidale është një nga trajektoret më të vështira që një robot mund të ndjekë. Në këtë krahasim koeficientët e rregullatorit backstepping që janë zgjedhur janë ato të përshtatura për trajektoren sinusoidale referencë. Performancat e ndjekjes së trajektores së robotit me rregullator backstepping adaptiv i bazuar në rrjet neural me model direkt dhe rregullatorit konvencional backstepping tregohet në figurën 5-69:

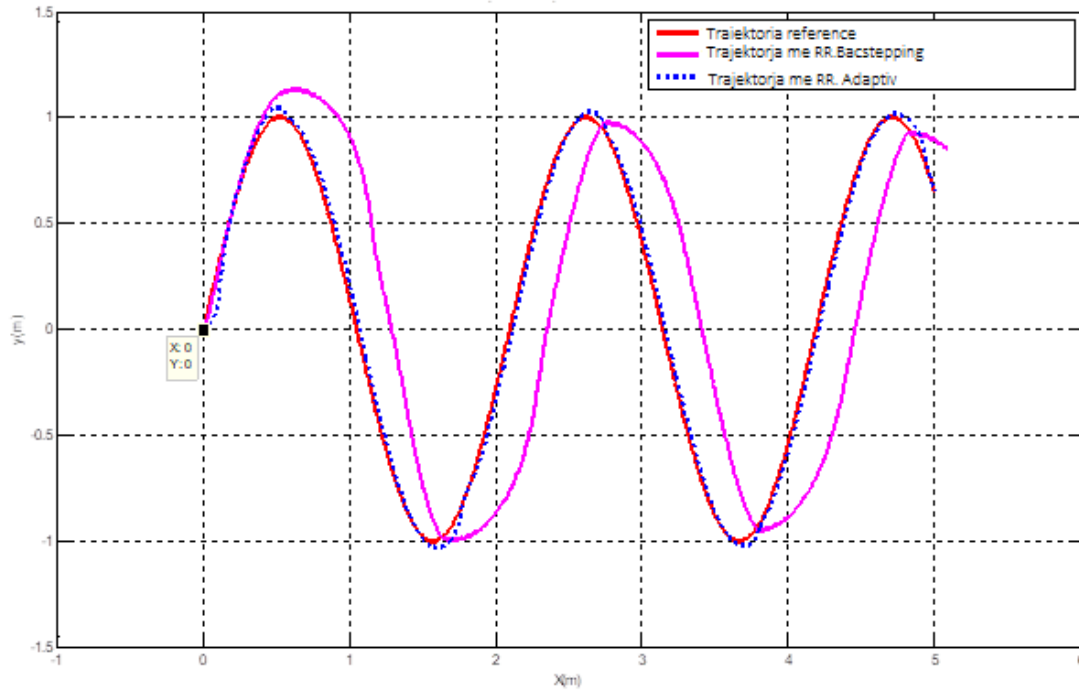


Figura 5-26: Krahاسimi midis rregullatorit adaptiv me rrjet neural dhe rregullatorit backstepping.

Figura 5-69 tregon performancën e ndjekjes së trajektores të robotit me rregullator adaptiv i bazuar në rrjet neural dhe rregullatorit backstepping me koeficientët si në vazhdim.

Funksioni kosto i rregullatorit adaptiv:

$$J = \frac{1}{2} \sum (\gamma_x e_x^2 + \gamma_y e_y^2 + \gamma_\theta e_\theta^2)$$

$$\gamma_x = 1, \gamma_y = 25, \gamma_\theta = 1$$

Shkalla e të mësuarit:

$$\eta_x = 0.8, \eta_y = 0.8, \eta_\theta = 0.8$$

$$\beta_x = 0.3, \beta_y = 0.3, \beta_\theta = 0.3$$

Koeficientët e rregullatorit backstepping:

$$K_x = 1, K_y = 110, K_\theta = 4$$

Shënojmë se koeficientët e rregullatorit backstepping janë përshtatur me kujdes për trajektoren referencë sinusoidale dhe ndjekja e trajektores e paraqitur në figurën 5-69 është relativisht përgjigjja më e mirë që kemi arritur duke përdorur rregullatorin backstepping. Përgjigjja në kohë e gjendjeve të robotit me dy rregullatorët e mësipërm tregohet në Figurën 5-70:

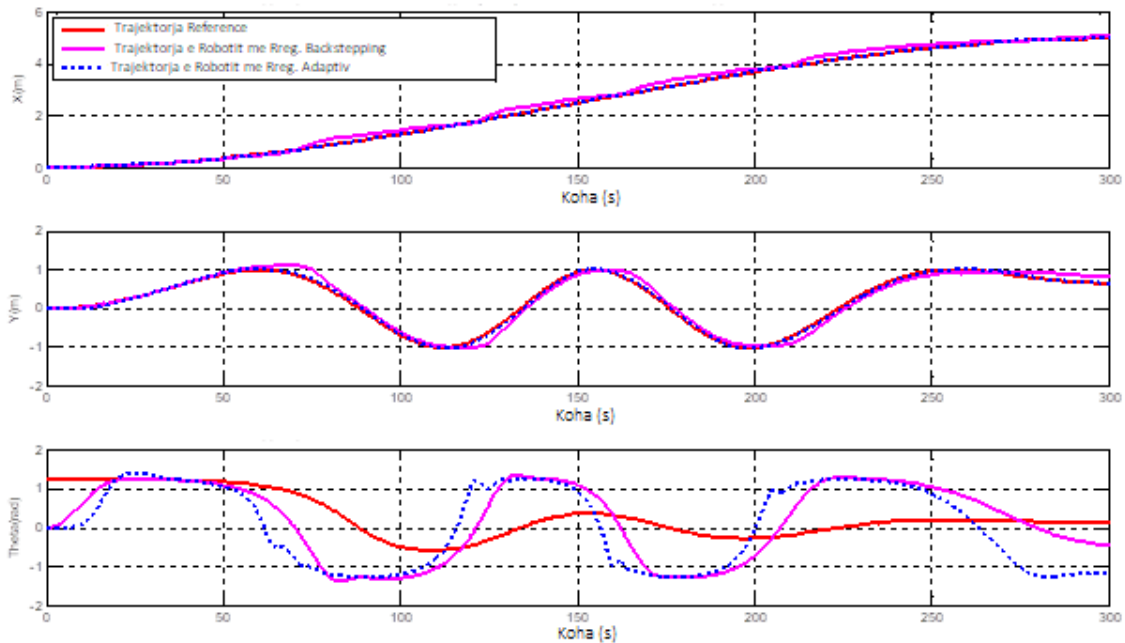


Figura 5-27: Krahاسimi midis rregullatorit adaptiv dhe rregullatorit backstepping.

Përmirësimi i performancës së ndjekjes së trajektores duke përdorur rregullatorin backstepping i bazuar në rrjet neural në krahasim me rregullatorin backstepping mund të shihet nga gjendjet X dhe Y të robotit në figurën 5-70. Gabimet e gjendjeve të robotit janë paraqitur në figurën 5-71 për të krahasuar performancën e këtyre kontrollorëve:

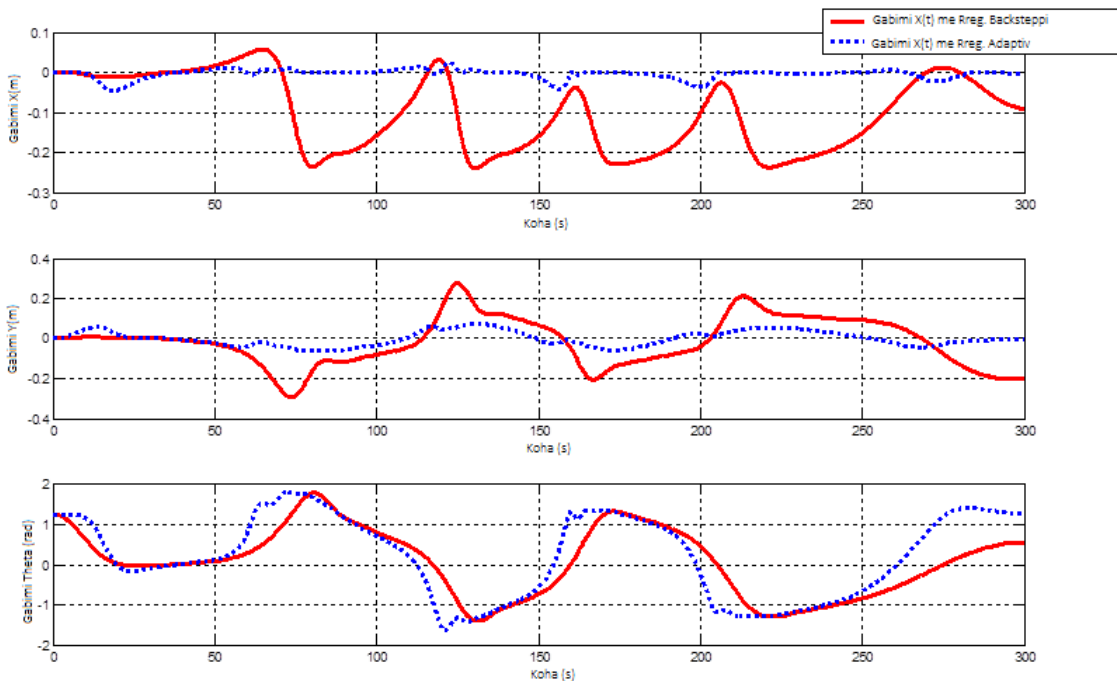


Figura 5-28: Gabimet e gjendjes së robotit.

Një rënie e madhe në gabimet e gjendjes së robotit e_x dhe e_y që i korrespondojnë rregullatorit backstepping adaptiv bazuar në rrjetet neural mund të shihet në figurën 5-71. Shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit janë paraqitur në figurën 5-72:

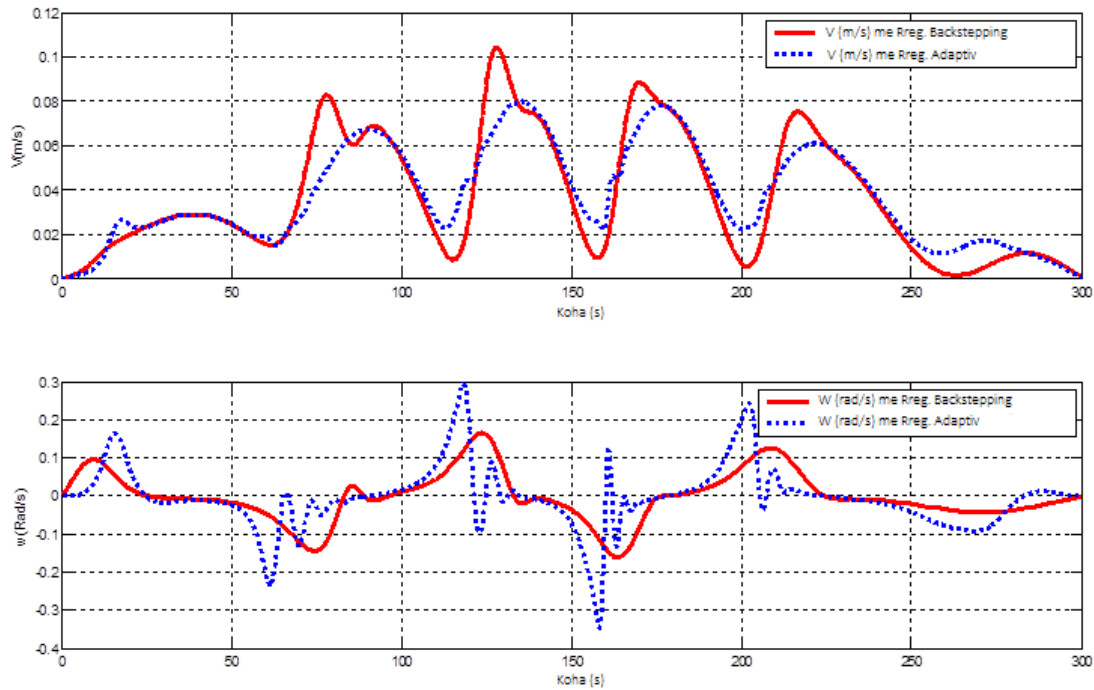
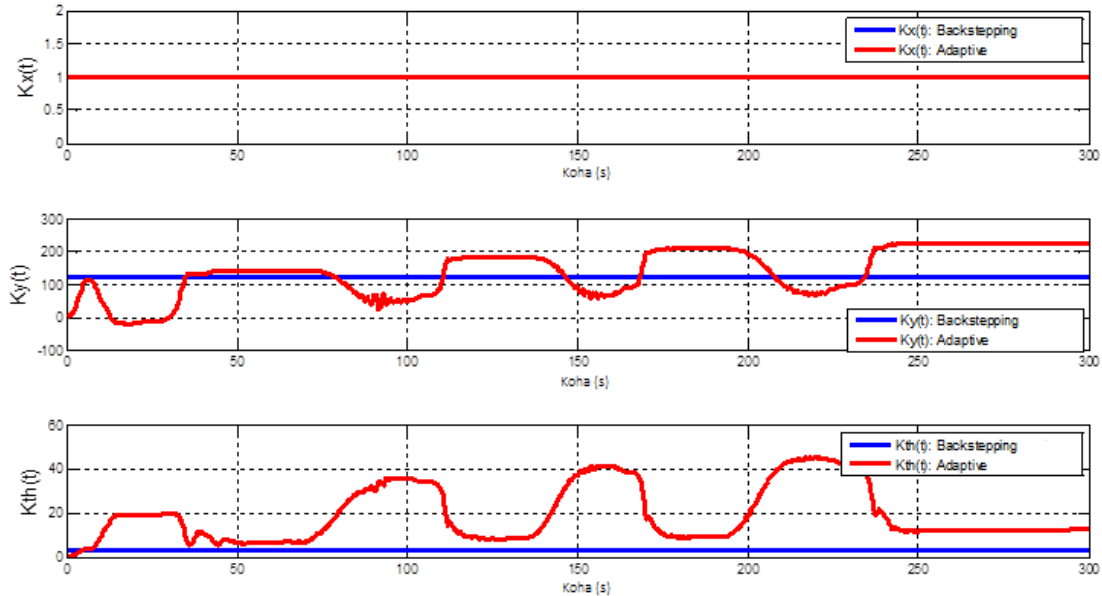


Figura 5-29: Rregullatori adaptiv dhe rregullatorit backstepping. Shpejtësitë e robotit

Koeficientët e rregullatorit adaptiv dhe koeficientët e rregullatorit backstepping janë treguar në Figurën 5-73:



Figurën 5-30: Rregullatori adaptiv dhe rregullatorit backstepping. Koeficientët e rregullatorit.

Një krahasim më i mirë midis performancës së ndjekjes së rregullatorëve mund të arrihet duke llogaritur gabimin e trajektores bazuar në ekuacionin (5.46):

$$e_{tr} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2} \quad (5.46)$$

Për të vlerësuar performancën e rregullatorit backstepping adaptiv me bazë rrjetin neural ë krahasim me rregullatorin konvencionale backstepping janë përdorur dy indekset e mëposhtme të performancës:

1. Metoda e katrorit më të vogël të gabimeve të ndjekjes së trajektores:

$$MSTE = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} E_{traj}^2 \quad (5.47)$$

2. Shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit (SMC) e cila në këtë rast janë shpejtësitë e hyrjes v dhe ω duke ju referuar ekuacionit (5.48) dhe (5.49):

$$SMC_v = \sum_{k=1}^{N_s} |v(k)| \quad (5.48)$$

$$SMC_\omega = \sum_{k=1}^{N_s} |\omega(k)| \quad (5.49)$$

Indeksi i parë i performancës i cili është katrori më i vogël i gabimit të ndjekjes së trajektores është llogaritur për gabimet e trajektores të treguara në figurën (5-74) dhe rezultatet janë si më poshtë:

Rregullatori Backstepping $MSTE = 0.1298$

Rregullatori Backstepping Adaptiv i Bazuar nëNN $MSTE = 0.0559$

Vlerat e mësipërme për mesataren e katrorit të gabimeve të trajektores që i korrespondojnë këtyre dy kontrollorëve tregojnë se performanca e ndjekjes së trajektores së robotit është shumë e përmirësuar kur përdorim rregullatorin e propozuar backstepping adaptiv të bazuar në rrjet neural. Përqindjet e përmirësuar të ndjekjes së trajektores të llogariten sipas ekuacionit (5.50):

$$\begin{aligned} &\text{Përqindja e përmirësimit të ndjek} \\ &= \frac{MTE_{backstepping} - MTE_{adaptive}}{MTE_{backstepping}} \times 100 \end{aligned} \quad (5.50)$$

Performanca e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping adaptive me bazë rrjetin neural në krahasim me rregullatorin backstepping është përmirësuar me 56.99% pra gabimi trajektore është ulur me 56.99 % përqind.

Indeksi i ardhshëm i performancës është shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit që tregon vlerën dhe fuqinë e sinjalit të kontrollit të nevojshme për secilin nga performancat e ndjekjes së trajektores së mësipërme. Për rastin e algoritmit të kontrollit të mësipërm, hyrjet e kontrollit janë shpejtësitë lineare dhe këndore të robotit të cilat janë llogaritur nga rregullatorët. SMC korrespondente për çdo sinjal të kontrollit dhe çdo rregullatorë janë paraqitur në tabelën 5-1:

Tabela5-1: MSTE dhe SMC për hyrje sinusoidale të shpejtësisë lineare dhe këndore midis rregullatorit backstepping adaptiv i bazuar në NN dhe rregullatorit backstepping

	Indeksi/ Rregullatori	Rreg.Adaptiv Back.Bazuar NN	Rreg. Backstepping	Rezultatet në%
Trajekto Sinusoidale	MSTE	0.0559	0.1298	- 56.99%
	SMC _v	435.987	479.878	- 9.14%
	SMC _w	1890.1	1787.5	+ 5.73%

Sipas tabelës 5-1 shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit që i korrespondon shpejtësisë lineare është më e ulët për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN me 9.14%. Shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit përkatës të shpejtësië këndore është më i lartë për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN nga 5.73%. Këto vlera tregojnë se përdorimi i rregullatorit backstepping adaptiv me bazë NN do të rrisë shpejtësinë këndore të robotit dhe mund të shkaktojë luhatje të vogla, por zvogëlon shpejtësinë lineare e cila prodhon performancë të ndjekjes së trajektores më të qëndrueshëm dhe më të lëmuar.

Duke ndjekur të njëjtën analizë krahasuese për të gjitha trajektorët e ndjekura nga modeli i robotit kemi bërë vlerësimin e performancës për secilën skemë kontrolli dhe kemi rezultate përfundimtare të marra i kemi vendosur në tabelën 5-2. Gjithashtu në këtë tabelë kemi vendosur edhe kohën që iduhet robotit për të mbritur trajektorën referencë në rastin kur pozicioni fillestar i robotit është në një distancë të konsiderueshme nga trajektorja referencë.

Tabela 5-2: MSTE dhe SMC për hyrjet e shpejtësisë lineare dhe këndore midis rregullatorit backstepping adaptiv i bazuar në NN dhe rregullatorit backstepping

	Rregullatori Indeksi	Rreg.Adaptiv Back.Bazuar NN	Rreg. Backstepping	Rezultatet në%
Trajekto Sinusoidale (0;0;0)	MSTE	0.0523	0.1300	- 57.87%
	SMC _v	436.321	479.356	- 9.74%
	SMC _w	1890.1	1787.5	+ 6.03%
Trajekto Sinusoidale 2.3 m (-2;1;0)	MSTE	0.1312	0.3773	- 64.22 %
	SMC _v	254.371	276.582	- 7.03%
	SMC _w	1312.62	1389.97	+ 6.00%
	T (mbritjes)	8 sek	22 sek	-14 sek
Trajekto Drejt këndore	MSTE	0.01576	0.0286	- 44.89%
	SMC _v	109.5	114.6	- 4.45%

(0;0;0)	SMC _w	976.21	856.93	+ 10.53 %
Trajektore Drejtëndore 1.4 m (-1:-1:0)	MSTE	0.0286	0.0656	- 56.4%
	SMC _v	107.99	120.906	- 10.052%
	SMC _w	803.57	756.31	+ 6.24%
	T (mbritjes)	5.3 sek	20.12 sek	- 15.02 sek
Trajektore Rrethore (0;0;0)	MSTE	0.104	0.252	- 58.33 %
	SMC _v	62.314	70.325	- 11.39%
	SMC _w	96.25	91.52	+ 5.19%
Trajektore Lineare 1 m (0;1;0)	MSTE	0.0599	0.0316	- 48.45%
	SMC _v	54.539	54.141	+ 1.12%
	SMC _w	115.74	108.926	+ 4.787 %
	T (mbritjes)	3.4 sek	6.99 sek	- 4.0 sek

Sipas tabelës 5-2 na rezulton se performanca e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping adaptive me bazë rrjetin neural në krahasim me rregullatorin backstepping është përmirësuar me nga 48.45 % për trajektoren lineare deri në 64.22% për trajektoren sinusoidale. Pra kemi një ulje të konsiderueshme të gabimit të ndjekjes së trajektores. Gjithashtu nga tabela 5-2 na rezulton se roboti e mbrin trajektoren referencë shumë më shpejt kur përdor rregullatorin adaptiv të bazuar në rrjet neural se sa kur përdor rregullatorin backstepping, në varësi të distancës roboti do ta mbrij trajektoren referencë 14.82 sek deri në 3.9 sek më shpejtë kur përdor rregullatorin adaptiv me bazë rrjetin neural. Sipas tabelës 5-2 shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit që i korrespondon shpejtësisë lineare është më e ulët për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN pothuajse për të gjitha trajektoret referencë nga 11.39% për trajektoren rrethore, 10.55% dhe 4.445% për trajektoret drejtëndore dhe 9.14% dhe 8.03 për trajektoret sinusoidale. Përfundim bën vetëm trajektorja lineare kjo për arsye se rregullatori për të zvogëluar gabimin e ndjekjes së trajektores në një kohë kur roboti ndodhet larg trajektores referencë rrit shpejtësinë lineare edhe këndore. Po ti referohemi grafikut të shpejtësisë lineare për këtë trajektore do të vërejmë se kemi një shpejtësi të madhe në fillim për të mbrritur trajektoren referencë dhe më vonë shpejtësia lineare ulet dhe stabilizohet. Gjithashtu duke ju referuar tabelës 5-2 shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit përkatës të shpejtësië këndore është më e lartë për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN nga 5.73% dhe 5.89% për trajektoren sinusoidale, 10.53% dhe 6.24% për trajektoret drejtëndore, 5.19% trajektorja rrethore dhe 4.787% trajektorja lineare. Këto vlera tregojnë se përdorimi i rregullatorit backstepping adaptiv me bazë NN do të rrisë shpejtësinë këndore të robotit dhe mund të shkaktojë luhatje të vogla, por zvogëlon shpejtësinë lineare e cila prodhon performancë të ndjekjes së trajektores më të qëndrueshëm dhe më të lëmuar.

KAPITULLI 6

Konsiderata Përfundimtare

6.1 Hyrje

Në këtë punim konceptuam rregullatorët e ndjekjes së trajektores në një robot të lëvizshëm nonholonomic me motor diferencial dhe i projektuam dhe zbatuam në software-in MATLAB Simulink

6.2 Përmbledhje

Po paraqesim një përmbledhje të tezës së doktoraturës:

- Kemi bërë një rishikim të plotë të literaturës së rregullatorëve të ndryshëm të ndjekjes së trajektores për robotët e lëvizshëm nonholonomic.
- Kemi bërë modelim gjithpërfshirës dhe të detajuar të një roboti të lëvizshëm me makinë diferenciale duke përfshirë modelin dinamik, modelimin kinematik dhe modelimin e ekzekutuesve.
- Modeli i nxjerrë është simuluar duke përdorur programin Matlab Simulink dhe janë paraqitur rezultatet të ndryshme simulimi për të verifikuar modelin.
- Kemi bërë projektimin, ndërtimin dhe simulimin e rregullatorit backstepping bazuar në kinematik për ndjekjen e trajektores së robotëve të lëvizshëm. Qëndrueshmëria e rregullatorit është vërtetuar duke përdorur qasjen e qëndrueshmërisë sipas Lyapunov dhe janë diskutuar dhe realizuar të gjitha avantazhet dhe disavantazhet.
- Kemi bërë projektimin, ndërtimin dhe simulimin e rregullatorit backstepping me lidhje të kundërt jolineare për ndjekjen e trajektores së robotëve të lëvizshëm. Qëndrueshmëria e rregullatorit është vërtetuar duke përdorur qasjen e qëndrueshmërisë sipas Lyapunov dhe janë analizuar dhe diskutuar në detaje indeksat e ndryshme të performancës së rregullatorit.
- Kemi zhvilluar dhe zbatuar një rrjet neural për përafrimin e një funksioni me shumë hyrje dhe shumë dalje dhe janë diskutuar dhe analizuar zgjedhja e algoritmit të trajnimit dhe parametrave të rrjetit neural.
- Është konceptuar dhe realizuar projektimi, ndërtimi dhe simulimi i rregullatorit që llogarit momentin rrotullues me rrjet neural për të përmirësuar performancën e ndjekjes së trajektores në robotin e lëvizshëm në praninë e çrregullimeve kufizuese dhe pasiguritë në modelin e robotit.

- Është propozuar një strukturë kontrolli që integron rregullatorin ‘backstepping’ dhe një rregullator që llogarit momentin rrotullues me rrjet neural për robotët e lëvizshëm nonholonomic. Një ligj që kombinon kinematikën me momentin rrotullues është zhvilluar duke përdorur ‘backstepping’ dhe qëndrueshmëria është dëshmuar duke përdorur qasje Lyapunov.
- Është konceptuar dhe realizuar projektimi, ndërtimi dhe simulimi i rregullatorit backstepping adaptiv të bazuar në rrjet neural i cili përmirëson shumë performancën e ndjekjes së trajektores të rregullatorit backstepping për çdo lloj trajektorje. Është një rregullator adaptiv i cili përshtat koeficientët e rregullatorit ‘backstepping’ online në bazë të trajektores referenceë të robotit dhe pozicionit të tij fillestarë.
- Në këtë metodë është i nevojshëm një rrjet neural për të mësuar karakteristikat dinamike të robotit dhe duke e përdorur ta përdorim atë për të përcaktuar hyrjet e ardhshme që do të minimizojnë indeksin e performancës së gabimit në mënyrë që të kompensojë koeficientët e rregullatorit backstepping.
- Epërsitë dhe të metat e të dy algoritmave të kontrollit të propozuara janë analizuar dhe diskutuar në kapitujt e mësipërm.

6.3 Konkluzione

Në këtë punim janë propozuar dy rregullatorë të ndryshëm të ndjekjes së trajektores bazuar në rrjetit neural. Analiza krahasuese ndërmjet rregullatorit backstepping dhe rregullatorit bazuar në modelin invers të rrjetit neural tregon se ky rregullator i propozuar ka përparësitë e mëposhtme mbi rregullatorin backstepping:

- Rregullatori i bazuar në modelin invers të rrjetit neural mund të merret me shqetësimet kufizuese të pamodeluara dhe dinamikat e pastrukturuara dhe të pamodeluara të platformës që janë pjesë e çdo mjedisi real që roboti dëshiron të kryej ndjekjen e një trajektoreje.
- Rregullatori i bazuar në modelin invers të rrjetit neural nuk e ka të nevojshme të njoh parametrat dhe dinamikën e sistemit në mënyrë që të kompensojë termat jolineare në sistemin.
- Performanca e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping me model invers të rrjetit neural në krahasim me rregullatorin backstepping është përmirësuar me 15.97% pra gabimi trajektore është ulur me këtë përqindje.
- Gjithashtu gabimi i shpejtësisë lineare dhe këndore zvogëlohet me 73.68 % kur përdorim rregullatorin me model invers të rrjetit krahasuar me rregullatorin backstepping me lidhje të kundërt jolineare.
- Analiza krahasuese mes rregullatorit backstepping dhe rregullatorit adaptiv backstepping bazuar në rrjet neural tregon se rregullatori i propozuar adaptiv përmirëson shumë performancën e ndjekjes së trajektores në robotët e lëvizshëm

dhe mund të përshtat performancën e ndjekjes së trajektores sipas çdo forme të trajektores referencë dhe pozicioni fillestar të robotit.

- Nga analiza e bërë na rezulton se performanca e ndjekjes së trajektores së rregullatorit backstepping adaptive me bazë rrjetin neural në krahasim me rregullatorin backstepping është përmirësuar me nga 48.45 % për trajektoren lineare deri në 65.22% për trajektoren sinusoidale. Pra kemi një ulje të konsiderueshme të gabimit të ndjekjes së trajektores. Gjithashtu na rezulton se roboti e mbrin trajektoren referencë shumë më shpejt kur përdor rregullatorin adaptiv të bazuar në rrjet neural se sa kur përdor rregullatorin backstepping.
- Në varësi të distancës roboti do ta mbrrij trajektoren referencë 14.82 sek deri në 3.9 sek më shpejtë kur përdor rregullatorin adaptiv me bazë rrjetin neural.
- Shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit që i korrespondon shpejtësisë lineare është më e ulët për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN pothuajse për të gjitha trajektoret referencë nga 11.39% për trajektoren rrethore, 10.55% dhe 4.445% për trajektoret drejtkëndore dhe 9.14% dhe 8.03 për trajektoret sinusoidale. Përgjatë bën vetëm trajektorja lineare kjo për arsye se rregullatori për të zvogëluar gabimin e ndjekjes së trajektores në një kohë kur roboti ndodhet larg trajektores referencë rrit shpejtësinë lineare edhe këndore.
- Shuma e moduleve të sinjalit të kontrollit të shpejtësisë këndore është më e lartë për rregullatorin backstepping adaptiv të bazuar NN nga 5.73% dhe 5.89% për trajektoren sinusoidale, 10.53% dhe 6.24% për trajektoret drejtkëndore, 5.19% trajektorja rrethore dhe 4.787% trajektorja lineare. Këto vlera tregojnë se përdorimi i rregullatorit backstepping adaptiv me bazë NN do të rrisë shpejtësinë këndore të robotit dhe mund të shkaktojë luhatje të vogla, por zvogëlon shpejtësinë lineare e cila prodhon performancë të ndjekjes së trajektores më të qëndrueshëm dhe më të lëmuar.

6.4 Mundësi për Hulumtime për të Ardhmen

- Rregullatorët e ndjekjes së trajektores të propozuar dhe implementuar në programin MATLAB Simulink mund të zbatohen në një platformë reale fizike të një roboti.
- Kërkimi i ardhshëm në platformën e robotit të lëvizshëm mund të jetë në fushën e planifikimit rrugë.
- Shtimi i rregullatorëve të propozuar të ndjekjes së trajektores në algoritmin e planifikimit të rrugës do të kompletonte detyrën e planifikimit të lëvizjes së robotit me një performancë shumë të saktë.

Referencat

- [1] R. Murphy, Introduction to Artificial Intelligent Robotics. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.
- [2] R. Siegwart and I. R. Nourbakhah, Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [3] A. Filipescu, V. Minzu, B. Dumitrascu and E. Minca, Trajectory Tracking and Discrete-Time Sliding-Mode Control of Wheeled Mobile Robot. Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation, Shenzhen, China, 2011, pp. 27-32.
- [4] B. Krose, Environment Representations for Cognitive Robot Companions. ERCM News, No. 53, 2003, pp. 29-30.
- [5] G. Artus, P. Morin, and C. Samson, Tracking of an omnidirectional target with a nonholonomic mobile robot, in Proc. IEEE Conf. Adv. Robot.(ICAR), 2003, pp. 1468–1473.
- [6] M. Ashoorirad, R. Barzamini and A. Afshar, J. Jouzdani, Model Reference Adaptive Path Following for Wheeled Mobile Robots, International Conference on Information and Automation, 2006. ICIA 2006
- [7] R. W. Brockett, Asymptotic stability and feedback stabilization, in Differential Geometric Control Theory, R. W. Brockett, R. S. Millman, and H. J. Sussmann, Eds. Boston, MA: Birkauer, 1983.
- [8] J. M. Yang and J. H. Kim, Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots, in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, pp. 578-587, June 1999.
- [9] G. Campion, G. Bastin, and B. d'Andrea-Novel, Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots, in IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 12, pp. 47–62, Jan. 1996.
- [10] G. Campion and G. Bastin, On adaptive linearizing control of omni-directional mobile robots, MTNS, pp. 531-538, Amsterdam, Holland, 1989.
- [11] G. Klancar and I. Skrjanc, Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time, in Robotics and autonomous systems, vol. 25, pp. 460-469, Sep. 2007.
- [12] J. Ye, Tracking control for nonholonomic mobile robots: Integrating the analog neural network into the backstepping technique, in Neurocomputing, vol. 71, pp. 3373-3378, Dec. 2007.
- [13] M. Hulse and M. Hild, Informatics for Cognitive Robots. Advanced Engineering Information, Vol. 24, 2010, pp. 2-3.
- [14] A. Farinelli, G. Grisetti and L. Locchi, Design and Implementation of Modular Software for Programming Mobile Robot. International Journal Advance Robotics Systems, Vol. 3, 2006, pp. 37-42.
- [15] A. A. Razavian and J. Sun, Cognitive Based Adaptive Path Planning Algorithm for Autonomous Robotic Vehicles. Proceedings of the IEEE Southeast Con, 2005, pp. 153-160.
- [16] C. Beak and H. Neumann, A Neuroinspired Cognitive Behavioural Control Architecture for Visually Driven Mobile Robotics. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, Feb. 21-26, 2009, pp. 2190-2196.
- [17] E. Ahle and D. Soffker, A Cognitive-Oriented Architecture to Realize Autonomous Behaviour-Part II: Application to Mobile Robotics. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Taipei, Taiwan, Oct 8-11, 2006, pp. 2221-2227.
- [18] J. Velagic, N. Osmicz and B. Lacevic, Neural Network Controller for Mobile Robot Motion Control, in International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol.2, No:11, 2008
- [19] J. Velagic, B. Lacevic and B. Perunicic, A 3-Level Autonomous Mobile Robot Navigation System Designed by Using Reasoning/Search Approaches. Robotics Autonomous Systems. Vol. 54, No. 12, 2006, pp. 989-1004.
- [20] C. Ordonez, E.G. Collins Jr., M.F. Selekwia and D.D. Dunlap, The Virtual Wall Approach to Limit Cycle Avoidance for Unmanned Ground Vehicles. Robotics Autonomous Systems. Vol. 56, No. 8, 2007, pp. 645-657.
- [21] M.A. Porta, O. Montiel, O. Castillo, R. Sepulveda and P. Melin, Path Planning for Autonomous Mobile Robot Navigation with Ant Colony Optimization and Fuzzy Cost Function Evaluation. Applied Soft Computing, Vol. 9, 2009, pp. 1102-1110.
- [22] V. Mohan, P. Morasso, G. Metta and S. Kasderidis, The Distribution of Rewards in Sensorimotor Maps Acquired by Cognitive Robots through Exploration. Neurocomputing, Vol. 74, 2011, pp. 3440-3455.
- [23] O. Motlagh, S. H. Tang, N. Ismail and A. R. Ramli, an Exoert Fuzzy Cognitive Map for Reactive Navigation of Mobile Robot. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 201, 2012, pp. 105-121.
- [24] H. Wei, B. Wang, Y. Wang, Z. Shao and K. C. Chan, Staying-alive Path Planning with Energy Optimization for Mobile Robot. Expert Systems with Applications, Vol. 39, 2012, pp. 3559-3571.
- [25] Real-time Navigation of Mobile Robots in Problems of Border Patrolling and Avoiding Collisions with Moving and Deforming Obstacle. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, 2012, pp. 769-788.
- [26] X. Linlin, T. Changxing, Y. Xuedong, K. Yunhan and F. Yan, 2-Dimensional SVFC Application in Path Planning of Mobile Robots. Energy Procedia, Vol. 17, 2012, pp. 1563-1569.
- [27] N. Ghita and M. Kloetzer, Trajectory Planning for a Car-like Robot by Environment Abstraction. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, 2012, pp. 609-619.
- [28] T-C. Lee, K-T. Song, C-H. Lee and C-C. Teng, Tracking Control of Unicycle-Modelled Mobile Robots Using a Saturation Feedback Controller. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 9, No. 2, 2001, pp. 305-318.

- [29] S. Nazlibilek, Autonomous Navigation of Robotic Units in Mobile Sensor Network, *Measurement* Vol. 45, 2012, pp. 938–949.
- [30] J. M. Toibero, F. Roberti, R. Carlli and P. Fiorini, Switching Control Approach for Stable Navigation of Mobile Robots in Unknown Environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, 2011, pp. 558-568.
- [31] W. Yaonan, Y. Yimin, Y. Xiaofang, Z. Yuanli, Y. Feng and T. Lei, Autonomous Mobile Robot Navigation System Designed in Dynamic Environment Based on Transferable Belief Model. *Measurement* Vol. 44, 2011, pp. 1389-1405.
- [32] C-Y. Tsai and K-T. Song, Visual Tracking Control of a Wheeled Mobile Robot with System Model and Velocity Quantization Robustness. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 3, 2009, pp. 520-527.
- [33] T. Hirukawa, S. Komada and J. Hirai, Image Feature Based Navigation of Nonholonomic Mobile Robots with Active Camera. *SICE Annual Conference*, Kagawa University-Japan, 12-20 Sept. 2007, pp. 2502-2506.
- [34] Y. Liu, J. Gao, D. Liu and Z. Wang, The Design of Control System and Study on Control Algorithm of Laser Navigation Mobile Robot. *Proceedings of the 3rd International Congress on Image and Signal Processing CISP*, 2010, pp. 4276-4280.
- [35] Y-C. Chang, Y.Y. Lwin and Y. Yamamoto, Sensor-Based Trajectory Planning Strategy for Nonholonomic Mobile Robot with Laser Range Sensors. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2009*, Seoul Olympic Parktel, Seoul, South Korea, 5-8 July, 2009, pp. 1755-1760.
- [36] A. Kokosy, F-O. Defaux and W. Perruquetti, Autonomous Navigation of a Nonholonomic Mobile Robot in a Complex Environment. *Proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, Sendai, Japan, October 2008, pp. 102-108.
- [37] D. Pedrosa, A. Medeiros and P. Alsina, Point-to-Point Paths Generation for Wheeled Mobile Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 14-9 Sept. 2003, pp. 3752-3757.
- [38] G. Yasuda and H. Takai, Sensor-Based Path Planning and Intelligent Steering Control of Nonholonomic Mobile Robots. *Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON*, 2001, pp. 317-322.
- [39] T. Sahin and E. Zengeroglu, A Computationally Efficient Path Planner for a Collection of Wheeled Mobile Robots with Limited Sensing Zones. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 10-14 April 2007, pp. 1074-1079.
- [40] W. Shangming and Z. Milo, Smooth Path Planning and Control for Mobile Robots. *Proceedings of the IEEE International Conference on Network Sense Control*, March 2005, pp. 894-899
- [41] T. Hague, N. Tillet, Navigation and Control of an Autonomous Horticultural Robot. *Mechatronics*, Vol. 6, No. 2, 1996, pp. 165-180.
- [42] H. Choi and S. Ryew, Robotic System with Active Steering Capability for Internal Inspection of Urban Gas Pipelines. *Mechatronics*, Vol. 12, No. 5, 2002, pp. 713-736.
- [43] F. Takanori, N. Kiroshi and A. Norihiko, Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot. *IEEE Trans Robotic Autonomous*, Vol 16, No. 2, 2000, pp. 609-615.
- [44] J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [45] Y. Kanayama et al., A stable tracking control method for an autonomous mobile robot, in *Proc. IEEE Conf. Robot. Autom.* 1990, pp. 384–389.
- [46] R. Fierro and F. L. Lewis, Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks, in *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 9, pp. 589-600, July 1998.
- [47] R. Fierro and F. L. Lewis, Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics, in *Proc. Of 34th IEEE Conf. on Decision and Control*, Piscataway, NJ, IEEE press, USA, 1995, pp. 3805-3810.
- [48] A. Bloch and S. Drakuinov, Stabilization of a nonholonomic system via sliding modes, in *Proc. Of IEEE international conference on Decision Control*, Madrid, Spain, 1994, pp. 2961-2963.
- [49] K. N. Faress, M. T. El harguy and A.A. El kosy, Trajectory tracking control for a wheeled mobile robot using fuzzy logic controller 9th WSEAS International Conference on Systems, Athens, Greece, 2005, pp. 1261-1269.
- [50] P. Morin and C. Samson, Control of Nonholonomic Mobile Robots Based on the Transverse Function Approach, in *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 25, pp. 1058-1073, Oct. 2009.
- [51] Ti-Chung Lee, Kai-Tai Song, Ching-Hung Lee, and Ching-Cheng Teng, Tracking Control of Unicycle-Modeled Mobile Robots Using a Saturation Feedback Controller, *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 9, no. 2, march 2001.
- [52] O. Fukao, H. Nakagawa and N. Adachi, Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, in *IEEE Trans. on Robotics and automation*, vol. 16, pp. 609-615, Oct. 2000.
- [53] Wenjie Dong and K.-D. Kuhnert, Robust Adaptive Control of Nonholonomic Mobile Robot with Parameter and Nonparameter Uncertainties, in *IEEE Trans. on Robotic*, vol. 21, pp. 261-266, April 2005.
- [54] Lianzheng Ge, , Ruifeng Li, , Dianyong Yu and Lijun Zhao, A Nonlinear Adaptive Variable Structure Trajectory Tracking Algorithm for Mobile Robots, *Intelligent Robotics and Applications*
- [55] G. Oriolo, A. D. Luca and M. Vendittelli, WMR Control via Dynamic Feedback Linearization: Design, Implementation, and Experimental Validation, in *IEEE Trans. on Control Systems Thechnology*, vol. 10, pp. 835-852, Nov. 2002.
- [56] Nan Hu, Chaoli Wang, Adaptive Tracking Control of an Uncertain Nonholonomic Robot, *Intelligent Control and Automation*, 2011, 2, 396-404.
- [57] Zhong-Ping Jiang and Henk Nijmeijer, Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping, in *Automatica* vol. 33, pp. 1393-1399, June 1997.

- [58] J. Ye, Adaptive Control of Nonlinear PID-Based Analogue Neural Network for a Nonholonomic Mobile Robot. *Neurocomputing*, Vo. 71, 2008, pp. 1561-1565.
- [59] J. E. Normey-Rico, I. Alcalá, J. Gomez-Ortega and E. F. Camacho, Mobile Robot Path Tracking Using a Robust PID Controller. *Control Engineering Practice*, Vol. 9, 2001, pp. 1209-1214.
- [60] M.S. Saidonr, H. Desa and R. M. Noor, A Differential Steering Control with Proportional Controller for an Autonomous Mobile Robot. *Proceedings of the 7th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 2011, pp.90-94.
- [61] R. Tsai-Jiun, C. Tien-Chi and C. Chun-Jung, Motion Control for a Two-Wheeled Vehicle Using a Self-Tuning PID Controller. *Control Engineering Practice*, Vol. 16, 2008, pp. 365-375.
- [62] P.k. Padhy, T. Sasaki, S. Nakamura and H. Hashimoto, Modeling and Position Control of Mobile Robot. *Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Nagaoka-Japan, 21-24 March, 2010, pp.100-105.
- [63] S. Thrun, An Approach to Learning Mobile Robot Navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 15, 1995, pp. 301-319.
- [64] Y.Y. Cha, Navigation of Free-Ranging Mobile Robot Using Heuristic Local Path-Planning Algorithm. *Proceedings of the Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 2, 1997, pp. 145-156.
- [65] J. Reuter, Mobile Robots Trajectories with Continuously Differentiable Curvature: An Optimal Control Approach. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, B.C., Canada, Oct 1998, pp. 38-43.
- [66] M. Cikes, M. Dakulovic and I. Petrovic, The Path Planning Algorithms for a Mobile Robot Based on the Occupancy Grid Map of the Environment – A Comparative Study. *Proceedings of International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, 2011, pp. 1-8.
- [67] Y. Zhong, B. Shirinzadah and Y. Tain, A New Neural Network for Robot Path Planning. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Xian, China, July 2-5, 2008, pp. 1361-1366.
- [68] N. Sadati and J. Taheri, Solving Robot Motion Planning Problem Using Hopfield Neural Network in a Fuzzified Environment. *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2002, pp. 1144-1149.
- [69] M. Li and J. Hu and L. Li, Multipath Planning Based on Neural Network Optimized with Adaptive Niche in Unknown Environment. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, pp. 761-764.
- [70] H. Chen, X. Du and W. Gu, Path Planning Method Based on Neural Network and Genetic Algorithm. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, Chendgu, China, 2004, pp. 667-671.
- [71] M. Gao, J. Xu, J. Tian and H. Wu, Path Planning for Mobile Robot Based on Chaos Genetic Algorithm. *Proceedings of the 4th International Conference on Natural Computation*, 2008, pp. 409-413.
- [72] S. Yang and C. Luo, A Neural Network Approach to Complete Coverage Path Planning. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, Vol. 34, No. 1, 2004, pp. 718-724.
- [73] Y-H. Xue and H-P. Liu, Optimal Path Planning for Service Robot in Indoor Environment. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, pp. 850-853.
- [74] E. Masehian and D. Sedighizadeh, A Multi-Objective PSO-based Algorithm for Robot Path Planning. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010, pp. 465-470.
- [75] W. Li and G-Y. Wang, Application of Improved PSO in Mobile Robotic Path Planning. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems*, 2010, pp. 45-48.
- [76] F. Wang and B. Lu, The Robot Path Planning Based on PSO Algorithm Integrated with PID. *Proceedings of the International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 2009, pp. 1-4.
- [77] J. A. Battle, J. M. Font-Llagunes and A. Barjau, Calibration for Mobile Robots with an Invariant Jacobian. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, 2010, pp. 10-15.
- [78] K. Kanj and A. Zell, Path Following for an Omnidirectional Mobile Robot Based on Model Predictive Control. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe international Conference Centre, May 12-17, 2009, pp. 3341-3346.
- [79] Y. Liu, X. Wu, J. Jim Zhu, and J. Lew, Omni-Directional Mobile Robot Controller Design by Trajectory Linearization. *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado, Jun. 2003, pp. 3423-3428.
- [80] G. V. Raffo, G. K. Gomes and J. E. Normey-Rico, A Predictive Controller for Autonomous Vehicle Path Tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No.1, 2009, 92-102.
- [81] D. Gu and H. Hu, Neural Predictive Control for a Car-Like Mobile Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 39 2002, pp. 73-86.
- [82] K. Shojaei, A. M. Shahri and A. Tarakameh, Adaptive Feedback Linearizing Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots in Presence of Parametric and Nonparametric Uncertainties. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol. 27, 2011, pp. 194-204.
- [83] R. Martinez, O. Castillo and L. Aguilar, Optimization of Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers For a Perturbed Autonomous Wheeled Mobile Robot Using Genetic Algorithms. *Information Sciences*, Vol. 179, 2009, pp. 2158-2174
- [84] R-J Wai and C-M Liu, Design of Dynamic Petri Recurrent Fuzzy Neural Network and Its Application to Path-Tracking Control of Nonholonomic Mobile Robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No.7, 2009, pp. 2667-2683.

- [85] G. Klancar and I. Skrjanc, Tracking Error Model-Based Predictive Control for Mobile Robots in Real Time. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 55, 2007, pp. 460-469.
- [86] J.J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanical and Control. 2nd edition. Boston. Addison-Wesley, 1989.
- [87] L. Sciavicco, L. Siciliano, Modeling and Control of Robot Manipulators. New York. McGraw-Hill, 1996.
- [88] H-X Zhang, G-J Dai and H Zeng, A Trajectory Tracking Control Method for Nonholonomic Mobile Robot. *Proceedings of the International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition* Beijing, China, 2-4 Nov. 2007, pp. 7-11.
- [89] S.X. Yang, H. Yang, Q. Max and H. Meng, Neural Dynamics Based Full-State Tracking Control of a Mobile Robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, LA, 2004, pp. 4614-4619.
- [90] A.M. Bloch, Nonholonomic Mechanics and Control. New York: Springer-Verlag, 2003.
- [91] A. Filipescu, V. Minzu, B. Dumitrascu and E. Minca, Discrete-Time Sliding Mode Control of Wheeled Mobile Robots. *Proceedings of the 8th Asian Control Conference ASCC*, Kaohsiung, Taiwan, May 15-18, 2011, pp. 771-776.
- [92] T. Das, I.N. Kar and S. Chaudhury, Simple Neuron-Based Adaptive Controller for a Nonholonomic Mobile Robot Including Actuator Dynamics. *Neurocomputing*, Vol. 69, 2006,
- [93] B.S. Park, S.J. Yoo, J.B. Park and Y.H. Choi, Adaptive Neural Sliding Mode Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots with Model Uncertainty. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 1, 2009, pp.207-214.
- [94] Albagul, A. &Wahyudi / Dynamic Modelling and Adaptive Traction Control for Mobile Robots, pp. 149 - 154, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Volume 1, Number 3 (2004), ISSN 1729-8806.
- [95] Rev H'ERA Mobile Robot' User's Manual, October 2009, Player Software v. 2.0.4 2009 Videre Design LLC
- [96] S. Han, B. Choi and J. Lee, A Precise Curved Motion Planning for a Differential Driving Mobile Robot. *Mechatronics*, Vol. 18, 2008, pp. 486-494.
- [97] G. Scaglia, A. Rosales, L. Quintero, V. Mut and R. Agarwal, A Linear-Interpolation-Based Controller Design for Trajectory Tracking of Mobile Robots. *Control Engineering Practice*, Vol. 18, 2010, pp. 318-329.
- [98] G. Klancar, D. Matko and S. Blazic, A Control Strategy for Platoons of Differential Drive Wheeled Mobile Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, 2011, pp. 57-64.
- [99] Martin t. Hagan, Howard b. Demuth and Orlando de Jesús, An introduction to the use of neural networks in control systems, int. j. Robust nonlinear control 2002.
- [100] Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark Hudson Beale, Orlando De Jesús, *Neural Network Design 2nd Edition*, hagan.okstate.edu/nnd.html
- [101] M. Gjonaj, B. Çiço, A. Myrtellari, Comparative analysis for NN inverse model controller and back-stepping controller on mobile robots, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Volume-5, Issue-11, pp-247-256
- [102] M. Gjonaj, B. Çiço, A. Myrtellari, Path Planning, Dynamic Trajectory Generation and Control Analysis for a Wheeled Mobile Robot Using Nonlinear PID Neural based on Optimization Algorithm, *International Journal of Latest Research in Engineering and technology*, Volume 2 Issue 4 | April 2016 | PP 55-59
- [103] M. Gjonaj, B. Çiço, A. Myrtellari, Comparative Analysis for NN-Based Adaptive Back-stepping Controller and Back-stepping Controller, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 6, Issue 11, (Part -3) November 2016, pp.01-10
- [104] M. Gjonaj, B. Çiço, A. Myrtellari, Using Ultrasonic Sensor To Create 3D Navigation Model Of Area For Mobile Robot, *BotimnëRevistënPavaresia*
- [105] M. Gjonaj, B. Çiço, A. Myrtellari, Design and Simulation of Control Systems for a Mobile Robot Platform, 7-th International Conference "Information Systems and Technology Innovations: the New Paradigm for a Smarter Economy, 17-18 June 2016
- [106] M. Gjonaj, B. Çiço, Trajectory tracking Control for a Wheeled Mobile Robot Using Nonlinear PID Neural based on Optimization Algorithm, 6-th International Conference "Information Systems and Technology Innovations: Inducting Modern Business Solutions, 5-6 June 2015
- [107] M. Gjonaj, A. Myrtellari, Mobile Robot path Tracking Based on Nonlinear Model Predictive Control, *Takimii 9-të VjetorInternacionaliInstitutitëAlb-ShkencësPrishtinë: Seksioni I ShkencaveInxhinjerikedhetëTeknologjisëëInformacionit*, 29-31 Gusht 2014
- [108] M. Gjonaj, A. Myrtellari, Speed Control of DC Motors Using Different Combinations of Conventional Controllers, *Takimii 8-tëVjetorInternacionaliInstitutitëAlb-ShkencësPrishtinë: Seksioni I Shkencave Inxhinjerik edhe të Teknologjisë së Informacionit*, 29-31 Gusht 2013