



Univerza v Mariboru

*Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko*

Doktorska disertacija

**POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S
PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI**

April, 2011

Avtor: Jure ČAS

Mentor: red.prof.dr. Riko ŠAFARIČ

Somentor: izr.prof.dr. Karl GOTLIH

UDK: 004.032.26:681.5(043.3)

Avtor: Jure ČAS
Naslov: POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S
PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI
UDK: 004.032.26:681.5(043.3)
Ključne besede: piezoelektrični mehanizem, položajno vodenje, nelinearni sistem,
histereze, usmerjene nevronske mreže, vzratno razširjanje
Število izvodov: 8
Mentor: red.prof.dr. Riko ŠAFARIČ
Somentor:izr.prof.dr. Karl GOTLIH

Maribor, april 2011

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju red.prof.dr. Riko Šafariču ter somentorju izr.prof.dr. Karlu Gotlihu za vodenje pri podiplomskem študiju ter za koristne ideje in strokovne nasvete pri izdelavi te doktorske disertacije.

Zahvaljujem se "*kognitivcem*" Roku, Gregorju in Davidu iz Laboratorija za kognitivne sisteme v mehatroniki za zanimive debate ter za strokovne nasvete pri reševanju in razumevanju "*makro*", "*mikro*" in "*nano*" problemov.

Zahvaljujem se sodelavcem iz podjetja *em.tronic*, ki so mi omogočili kvaliteten študij in od katerih sem se do sedaj veliko praktičnega ter koristnega naučil.

Zahvaljujem se Sabini za njene vzpodbudne besede in za vse lepe trenutke, ki sva jih med študijem skupaj preživela v Mariboru. V njeni družbi sem pozabil na nepomembne probleme ter bil zaradi tega bolj uspešen pri svojem delu.

In nenazadnje, zahvaljujem se očetu Juriju, mami Miri ter sestrama Andreji in Urški za njihovo zaupanje in za moralno podporo v vseh letih mojega študija.



Univerza v Mariboru

Maribor, 21. 6. 2010
Številka: DR 63/2010/425-MGM

Na osnovi 287., 140., 142. in 144. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB8, Ur. l. RS, št. 1/2010) ter sklepa 33. redne seje Senata Univerze v Mariboru z dne 21. 6. 2010 v zvezi z vlogo doktorskega kandidata Jureta Časa za sprejem odločitve o predlagani temi doktorske disertacije in mentorja,

izdajam naslednji

SKLEP

Odobri se tema doktorske disertacije Jureta Časa s Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko z naslovom »Položajno vodenje robotskega mehanizma s piezoelektričnimi aktuatorji«. Kandidatu se za mentorja imenuje red. prof. dr. Riko Šafarič, za somentorja pa izr. prof. dr. Karl Gotlih. Kandidat mora članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih najpozneje do 20. 6. 2014.

Obrazložitev:

Kandidat Jure Čas je dne 17. 2. 2010 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko vložil vlogo za potrditev teme doktorske disertacije z naslovom »Položajno vodenje robotskega mehanizma s piezoelektričnimi aktuatorji«. Za mentorja je bil predlagan red. prof. dr. Riko Šafarič, za somentorja pa izr. prof. dr. Karl Gotlih.

Senat Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je na osnovi pozitivnega mnenja komisije za oceno teme doktorske disertacije, ki je ugotovila, da kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti, in ocenila, da je predlagana tema ustrezna, sprejel pozitivno mnenje in poslal predlog teme doktorske disertacije s predlogom mentorja in somentorja v odobritev Senatu univerze.

Senat Univerze v Mariboru je po proučitvi vloge in na osnovi določil Statuta Univerze v Mariboru sprejel svojo odločitev o predlagani temi doktorske disertacije in imenoval mentorja in somentorja, kot izhaja iz izreka.

V skladu s 144. členom Statuta Univerze v Mariboru mora kandidat za pridobitev doktorata znanosti najpozneje v štirih letih od dneva izdaje tega sklepa, članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih. Kandidatu je bil določen rok glede na datum sprejetja teme na pristojnem organu.

Pouk o pravnem sredstvu:

Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat Univerze v Mariboru v roku 8 dni od prejema tega sklepa.

Obvestiti:

1. Kandidata.
2. Fakulteto.
3. Arhiv.



Rektor:
Prof. dr. Ivan Rozman

Kazalo

1	Uvod	1
2	Opis robotskega mehanizma	7
2.1	Piezoelektrični pojav in piezoelektrični aktuatorji	8
2.1.1	Osnove piezoelektričnega pojava	8
2.1.2	Mehanske lastnosti PZT keramike	11
2.2	Stekleno ogrodje	14
2.2.1	Obdelava fotosenzitivnega dopiranega stekla	15
2.2.2	Geometrija steklenega ogrodja	16
2.2.3	Reducirana togost steklenega ogrodja	18
2.3	Dinamični model robotskega mehanizma	21
2.3.1	Sila piezoelektričnega aktuatorja z upoštevanjem histerez	23
2.3.2	Simulacijski model robotskega mehanizma v MATLAB/Simulink	25
3	Opis opreme za položajno vodenje robotskega mehanizma	29
3.1	Napetostni ojačevalniki	31
3.1.1	Napetostni ojačevalniki - signalni del	33
3.1.2	Napetostni ojačevalniki - močnostni del	35
3.2	Oprema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma	37
3.2.1	Meritev položaja robotskega mehanizma s kamero	37
3.2.2	Meritev položaja robotskega mehanizma z inkrementalnimi dajalniki	45
3.3	Programska oprema in uporabniški vmesnik	48

3.3.1	Programska oprema za vhodno/izhodno FPGA enoto	48
3.3.2	Programska oprema za kontrolno-procesno enoto CVS-1456	50
4	Delovanje realnega robotskega mehanizma	53
4.1	Velikosti delovnega območja in sklopljenost osi	54
4.2	Vpliv histereznega pojava	55
4.3	Položajno vodenje v odprti zanki z LPK - odziv na stopnico	57
4.4	Položajno vodenje s PI regulatorjem	61
5	Ocenitev modela proge z uporabo umetnih nevronske mreže	65
5.1	Umetne nevronske mreže - splošni opis	66
5.1.1	Metode učenja umetnih nevronske mreže v robotiki	67
5.1.2	Vrste umetnih nevronske mreže	68
5.1.3	Zgradba umetnega nevrona	70
5.1.4	Algoritem vzratnega razširjanja napake	72
5.2	Ocenitev inverznega modela proge - implementacija	74
5.2.1	Opis Preisach-ovega modela histerez	75
5.2.2	Zgradba nevronske mreže	79
5.2.3	Izvedba učenja nevronske mreže s specializirano arhitekturo	81
6	Položajno vodenje robotskega mehanizma z nevronske mreže	85
6.1	Položajno vodenje z nevronske mreže v odprti zanki	85
6.2	Položajno vodenje z nevronske mreže v zaprti zanki	88
6.3	Položajno vodenje z nevronske mreže v kombinaciji s PI regulatorjem	93
6.4	Komentar rezultatov položajnega vodenja	97
7	Zaključek	99
	Literatura	101

Slike

2.1	Robotski mehanizem s piezoelektričnimi aktuatorji	7
2.2	Osnovne celice PZT keramike nad in pod Curie-vo temperaturo	10
2.3	Orientacija kristalov pri polarizaciji PZT keramike	10
2.4	Delovanje piezo. aktuatorjev v odvisnosti od polarizacije in el. polja	11
2.5	Konstantna obremenitev piezoelektričnega aktuatorja	12
2.6	Spremenljiva obremenitev piezoelektričnega aktuatorja	13
2.7	Togost piezoelektričnega aktuatorja in togost bremena - splošno	14
2.8	Strukturiranje fotosenzitivnega dopiranega stekla - fotolitografija	16
2.9	Stekleno ogrodje - tlorisni pogled	16
2.10	Kinematična shema steklenega ogrodja	18
2.11	Geometrijske oslavitve; a) dvostranska in b) enostranska	19
2.12	Grafična ponazoritev dinamičnega modela robotskega mehanizma za eno os	21
2.13	Togost uporabljenih piezo. aktuatorjev in togost steklenega ogrodja	23
2.14	MATLAB/Simulink blokovna shema modela robotskega mehanizma	26
2.15	Velikost delovnega območja robotskega mehanizma - simulacija	26
2.16	Položaj robot. mehanizma pri stopnični spremembi napetosti - simulacija	27
2.17	Položaj robot. mehanizma pri zvezni spremembi napetosti - simulacija	28
3.1	Blokovna shema sistema za položajno vodenje robotskega mehanizma	30
3.2	Kontrolno-procesna enota CVS-1456	30
3.3	Napetost ojačevalnika v odvisnosti od širine pulza PŠM signala	32
3.4	Blokovna shema napetostnega ojačevalnika	33

3.5	Nizko-pasovni filter 2. reda (<i>Sallen-Key</i> topologija)	34
3.6	Diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s piezo. aktuatorjem	35
3.7	Diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s piezo. aktuatorjem	36
3.8	Napetost piezo. aktuatorja v odvisnosti od izhoda op. ojačevalnikov	36
3.9	Velikost povečane (zajete) slike na 19" računalniškem zaslonu	39
3.10	Povečana (zajeta) slika mikrometerske skale z razmikom črtic $10 \mu\text{m}$	40
3.11	Segmentacija slike s pragovno metodo	41
3.12	Segmentacija slike z gradientnimi metodami zaznavanja robov	43
3.13	Izračun položaja vrha robotskega mehanizma po segmentaciji slike	44
3.14	Senzorska elektronika z merilno letvijo	45
3.15	Meritev položaja vrha robot. mehanizma z inkrement. dajalniki - princip	46
3.16	Izvedba meritve položaja vrha robot. mehanizma z inkrement. dajalniki	47
3.17	Signala A in B na izhodu inkrementalnega dajalnika	49
3.18	Programska koda za obdelavo signalov A in B na FPGA enoti	50
4.1	Velikost delovnega območja robotskega mehanizma	54
4.2	Vpliv histereznega pojava na delovanje robotskega mehanizma - x os	56
4.3	Vpliv histereznega pojava na delovanje robotskega mehanizma - y os	56
4.4	Blokovna shema položajnega vodenja robotskega mehanizma z LPK	57
4.5	Izhod LPK v odvisnosti od referenčne vrednosti položaja - y os	58
4.6	Stopnični odziv pri uporabi LPK - x os	59
4.7	Stopnični odziv pri uporabi LPK - y os	59
4.8	Stopnični odziv pri uporabi LPK brez prehodnega pojava - x os	60
4.9	Stopnični odziv pri uporabi LPK brez prehodnega pojava - y os	60
4.10	Stopnični odziv pri uporabi PI regulatorja - x os	62
4.11	Stopnični odziv pri uporabi PI regulatorja - y os	62
5.1	Arhitekture učenja nevronske mreže; a) generalizirana in b) specializirana	68
5.2	Klasifikacija pomembnejših tipov nevronske mreže	69
5.3	Nevronska mreža (več-plastni perceptron)	69
5.4	Model umetnega nevrona	70
5.5	Logistična funkcija v odvisnosti od parametra naklona t	72
5.6	a) Histerezni operator in b) blokovna shema Preisach-ovega modela	75

5.7	Mejni trikotnik pri a) povečevanju in b) zmanjševanju krmilne napetosti . . .	76
5.8	Sprememba dolžine piezo. aktuatorja in pripadajoči mejni trikotnik	76
5.9	a) Mejne vrednosti krmilne napetosti in b) pripadajoči mejni trikotnik . . .	77
5.10	Nevronska mreža z vhodi in izhodi	79
5.11	Mejna vrednost krmilne napetosti v odvisnosti od krmilne napetosti	80
5.12	Nevronski mreži z normiranimi vhodi in izhodi	81
5.13	Učenje inverznega modela proge	83
5.14	Vrednost vsote kvadratov pogreška (<i>SSE</i>) med postopkom učenja	84
6.1	Blokovna shema vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki	86
6.2	Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - stopnični odziv - x os . . .	86
6.3	Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - stopnični odziv - y os . . .	86
6.4	Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - sledenje krožnici - x os . .	87
6.5	Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - sledenje krožnici - y os . .	87
6.6	Blokovna shema vodenja z nevronskimi mrežami v zaprti zanki	89
6.7	Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - stopnični odziv - x os . . .	89
6.8	Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - x os	89
6.9	Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - stopnični odziv - y os . . .	90
6.10	Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - y os	90
6.11	Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - sledenje krožnici - x os . . .	91
6.12	Položajni pogrešek pri slednju krožnici - x os	91
6.13	Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - sledenje krožnici - y os . . .	91
6.14	Položajni pogrešek pri slednju krožnici - y os	92
6.15	Specializirano učenje nevronskih mrež za uporabo s PI regulatorjem	93
6.16	Položajno vodenje z nevronskimi mrežami v kombinaciji s PI regulatorjem .	94
6.17	Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - stopnični odziv - x os .	94
6.18	Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - x os	95
6.19	Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - stopnični odziv - y os .	95
6.20	Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - y os	95
6.21	Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - sledenje krožnici - x os .	96
6.22	Položajni pogrešek pri sledenju krožnici - x os	96
6.23	Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - sledenje krožnici - y os .	97

6.24 Položajni pogrešek pri sledenju krožnici - y os	97
--	----

Tabele

2.1	Delež komponent v dopiranem steklu	15
2.2	Vrednost fizikalnih parametrov steklenega ogrodja	22
2.3	Vrednost fizikalnih parametrov piezoelektričnih aktuatorjev	22
2.4	Vrednosti konstant za modeliranje histerez v piezoelektričnih aktuatorjih	25

POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI

Ključne besede: piezoelektrični mehanizem, položajno vodenje, nelinearni sistem, histereze, usmerjene nevronske mreže, vzvratno razširjanje

UDK: 004.032.26:681.5(043.3)

Povzetek

V disertaciji je predstavljeno modeliranje, izdelava in položajno vodenje ravninskega robotskega mehanizma s piezoelektričnimi aktuatorji. Robotski mehanizem je sestavljen iz steklenega ogrodja in dveh piezoelektričnih aktuatorjev. Sprememba dolžine piezoelektričnih aktuatorjev se preko steklenega ogrodja z vgrajenim prestavnim razmerjem prenaša na vrh robotskega mehanizma, kjer predstavlja njegov delovni pomik. Velikost robotskega mehanizma je 40×40 mm, velikost delovnega področja pa je približno 25×25 μm . Z uporabo piezoelektričnih aktuatorjev je vrh robotskega mehanizma mogoče pozicionirati s podmikrometrsko natančnostjo. Kakorkoli, zaradi nelinearnega histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih je takšno natančnost brez ustreznih metod za položajno vodenje nemogoče zagotoviti. Zaradi tega je bil zasnovan in implementiran sistem za položajno vodenje robotskega mehanizma, ki vključuje napetostne ojačevalnike za napajanje piezoelektričnih aktuatorjev, merilno opremo za meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma in kontrolno-procesno enoto s programsko opremo na kateri se izvajajo algoritmi oziroma metode za položajno vodenje. Uporaba tradicionalnih metod vodenja, kot je PI regulator, pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma zaradi nelinearnosti proge ne daje povsem zadovoljivih rezultatov. Zaradi tega smo za ocenitev in kompenzacijo nelinearnosti na progi (predvsem histereze v piezoelektričnih aktuatorjih) uporabili usmerjene nevronske mreže, ki so znane kot univerzalno orodje za ocenitev in kompenzacijo nelinearnih pojavov. Eksperimentalni rezultati, ki so bili pridobljeni na realnem robotskem mehanizmu, potrjujejo, da je z uporabo nevronskih mrež mogoče izboljšati rezultate tradicionalnih metod vodenja tako pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma v odprti zanki kot tudi v zaprti zanki.

POSITION CONTROL OF ROBOTIC MECHANISM WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS

Keywords: piezoelectric mechanism, position control, nonlinear system, hysteresis, feedforward neural networks, backpropagation

UDK: 004.032.26:681.5(043.3)

Abstract

This thesis presents modelling, design and position control of a planar robot mechanism with piezoelectric actuators. Robot mechanism consists of a glass frame and two piezoelectric actuators. The length displacement of piezoelectric actuators is transmitted through a glass frame with built-in transfer ratio at the tip of the robotic mechanism, where it is represented as his working shift. The size of the robot mechanism is 40×40 mm and the size of the working plane is a 25×25 μm . By employing piezoelectric actuators the tip of robotic mechanism can be positioned with sub-micrometer accuracy. However, due to the nonlinear hysteresis effect of piezoelectric actuators, this functionality is not guaranteed without the appropriate position control. Concerning these observations, a system for position control of robot mechanism has been designed and implemented. The implemented system includes voltage power amplifiers for piezoelectric actuators, the metering equipment for measuring the actual position of the robot mechanism's tip and control-processing unit with software equipment and algorithms for position control. Due to the nonlinearity of controlled plant, the use of traditional control methods, such as PI controller, does not give very satisfactory results. Therefore, for evaluation and compensation of plant nonlinearities (hysteresis in piezoelectric actuators), we use feedforward neural networks, which are known as a universal tool for evaluation and compensation of nonlinear phenomena. Experimental results obtained on real robot mechanism confirm, that the use of neural networks can improve the performance of traditional open-loop and also close-loop control methods for position control of robot mechanism.

Uporabljeni simboli

Robotski mehanizem in piezoelektrični aktuatorji

a	debelina piezoelektričnega aktuatorja
A	preseki piezoelektričnega aktuatorja
b	širina piezoelektričnega aktuatorja
d_1	ročica (oddaljenost vrtilišča od pritrdišča piezo. aktuatorja)
d_2	ročica (oddaljenost vrtilišča od vrha steklenega ogrodja)
D_{ij}	piezoelektrični koeficient razteznosti
E	jakost električnega polja na piezo. aktuatorju
E_p	modul elastičnosti piezoelektričnega aktuatorja
E_{so}	modul elastičnosti steklenega ogrodja
F_b	sila na piezoelektrični aktuator (sila bremena)
F_p	sila piezoelektričnega aktuatorja
$F_{p,max}$	maksimalna sila piezoelektričnega aktuatorja
$\widehat{\varphi}_x, \widehat{\varphi}_y$	kot zasuka robotskega mehanizma - x os, y os
h	debelina steklenega ogrodja in višina rotacijskega sklepa
i	prestavno razmerje steklenega ogrodja
k_b	togost bremena
k_o	reducirana togost steklenega ogrodja
k_p	togost piezoelektričnega aktuatorja
k_{rs}	upogibna togost rotacijskega sklepa
L	dolžina piezoelektričnega aktuatorja
ΔL_b	sprememba dimenzije oziroma položaja bremena
ΔL_0	sprememba dolžine neobremenjenega piezo. aktuatorja
$\Delta L_{0,max}$	maksimalna sprememba dolžine neobremenjenega piezo. aktuatorja
ΔL	sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja
ΔL_{max}	maksimalna sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja
m_o	masa steklenega ogrodja
m_v	masa vrha robotskega mehanizma
m^*	reducirana masa steklenega ogrodja

R	polmer rotacijskega sklepa (oslabitve)
U	električna napetost na piezo. aktuatorju
U_{max}	maksimalna (dovoljena) električna napetost
t	debelina oslabitve rotacijskega sklepa
t_o	oddaljenost težišča steklenega ogrodja od točke vrtilišča
x_{ref}, y_{ref}	referenčni položaj vrha robotskega mehanizma
x_{dej}, y_{dej}	dejanski položaj vrha robotskega mehanizma

LuGre model histerez v piezoelektričnih aktuatorjih

f_C	raven Columbo- <i>vega</i> trenja
f_S	raven stične sile
F_h	nelinearna histerezna sila
$h(\dot{x})$	krivulja Stribeck- <i>ovega</i> efekta
$\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$	pozitivne konstante
\dot{x}_S	Stribeck- <i>ova</i> hitrost
\bar{z}	povprečna kontaktna sila pri uklonu površinskih stikov

Optični sistem s kamero in mikroskopom

$f(h, v)$	digitalna slika kot funkcija sivinskih vrednosti
p_c	povečava <i>C-mount</i> adapterja
p_o	povečava objektivna
P_h	povečava optičnega sistema v horizontalni smeri
P_v	povečava optičnega sistema v vertikalni smeri

Nevronska mreža - teoretične osnove

a_x	aktivacija poljubnega nevrona x
δ_x	gradient poljubnega nevrona x
η	učna konstanta
$f(a_x)$	aktivacijska funkcija poljubnega nevrona x

p_x	prag poljubnega nevrona x
o_x	izhod poljubnega nevrona x
O_k	dejanska vrednost na izhodu nevronske mreže za nevron k
T_k	želena vrednost na izhodu nevronske mreže za nevron k
$w_{x,y}$	utež poljubnega nevrona x
$\Delta w_{x,y}$	sprememba uteži poljubnega nevrona x

Nevronska mreža - implementacija

e_x, e_y	napaka učenja nevronske mreže - x os, y os
U_x^n, U_y^n	normirana vrednost krmilne napetosti - izhod iz nevronske mreže
$(\alpha\beta)_x^n, (\alpha\beta)_y^n$	normirana mejna vrednost krmilne napetosti - vhod v nevronske mrežo
SSE	vsota kvadratov pogreška
x_{dej}^n, y_{dej}^n	normiran dejanski položaj vrha robotskega mehanizma
x_{ref}^n, y_{ref}^n	normiran referenčni položaj vrha robotskega mehanizma - vhod v nevronske mrežo

Preisach-ov model histerez v piezoelektričnih aktuatorjih

$a_{0,0}, a_{1,0}, a_{0,1}$ in $a_{1,1}$	interpolacijski koeficienti
α	zgornja mejna vrednost napetosti
β	spodnja mejna vrednost napetosti
$\gamma_{\alpha\beta}[u(t)]$	histerezni operator
U_{max}	največja zgornja mejna vrednost krmilne napetosti
U_{min}	najmanjša spodnja mejna vrednost krmilne napetosti

Uvod

Robotika kot veda o gibanju in vodenju robotov je tesno povezana tudi z razvojem nanotehnologij ter z inženirsko prakso pri izdelavi elektronskih komponent, pri mikroskopiranju, pri mikro-obdelavi materialov, itd. Za pozicioniranje mehanskih sklopov oziroma naprav s pod-mikrometrsko natančnostjo se uporabljajo različni principi in izvedbe aktuatorjev položaja, kot so elektrostatični aktuatorji [1], termalni aktuatorji [2]-[3], magnetni aktuatorji [4], zlitine s spominom oblike [5] in piezoelektrični aktuatorji [6]. V omenjenih inženirskih aplikacijah se najbolj pogosto uporabljajo piezoelektrični aktuatorji [7]-[9]. To so kompaktni aktivni elementi z eno linearno prostostno stopnjo delovanja. Piezoelektrični aktuatorji imajo veliko specifično silo glede na njihovo velikost, visoko odzivnost pri delovanju, poleg tega pa so neobčutljivi na elektromagnetne vplive oziroma motnje. Piezoelektrični aktuatorji imajo tudi nekatere slabosti, med katerimi najbolj izstopata histerezni pojav ter pojav lezenja položaja pri položajnem vodenju [10]. Med slabosti lahko štejemo tudi dejstvo, da so za položajno vodenje piezoelektričnih aktuatorjev potrebne precej velike krmilne napetosti, ki lahko presegajo vrednost 1 kV.

Piezoelektrični aktuatorji se torej vgrajujejo v mehanske sisteme oziroma naprave z namenom pozicioniranja teh naprav z mikrometrsko oziroma z nanometrsko natančnostjo. Eden takšnih sistemov je tudi ravninski robotski mehanizem s piezoelektričnimi aktuatorji (v nad.: robotski mehanizem) [11], katerega izdelava in položajno vodenje je opisano v tem delu. Predstavljeni robotski mehanizem je v osnovi platforma oziroma delovna mizica za mikro-pozicioniranje (ang.: *micro-positioning stage*). Funkcionalnost robotskega mehanizma je odvisna od orodja, ki je pritrjeno na njegov vrh (ang.: *end effector*). Z uporabo

dveh piezoelektričnih aktuatorjev je omogočeno pozicioniranje vrha robotskega mehanizma v dveh medsebojno pravokotnih oseh, ki določata njegovo delovno ravnino. Stakleno ogrodje, ki predstavlja glavni del robotskega mehanizma, je po obliki podobno paralelogramu. Izdelano je iz dopiranega mikro-strukturiranega stekla s postopkom foto-kemične obdelave, ki se imenuje fotolitografija. Elastičnost tega stekla se izkorišča za doseganje mehanskih deformacij členkov, ki so potrebne za doseganje delovnega pomika vrha. Omenjena konstrukcija robotskega mehanizma omogoča visoko ponovljivost in natančnost pri gibanju brez vpliva trenja. Elastični rotacijski sklepi, ki v nasprotju z navadnimi drsnimi ali krogličnimi ležaji ne potrebujejo vzdrževanja, lahko delujejo v vakuumu, niso odvisni od temperature in ostalih vplivov iz okolice. Mehanska konstrukcija robotskega mehanizma je zasnovana po principu paralelne kinematične verige, za katero je značilno, da vsi aktuatorji delujejo na eno centralno maso, ki v primeru robotskega mehanizma predstavlja njegov vrh.

Zaradi histereznega pojava pri krmiljenju z električno napetostjo je sisteme oziroma naprave s piezoelektričnimi aktuatorji potrebno ustrezno položajno voditi za doseganje želene natančnosti pozicioniranja. Histerezni pojav povzroča težave pri položajnem vodenju s spremenljivo vrednostjo referenčnega položaja, ker se potrebna krmilna napetost na piezoelektričnih aktuatorjih za neko isto referenčno vrednost položaja spreminja, saj je odvisna tudi od zgodovine gibanja. Natančnost položajnega vodenja brez kompenzacije histereznega pojava lahko odstopa celo do 20% glede na celotno delovno območje piezoelektričnih aktuatorjev.

Položajno vodenje piezoelektričnih aktuatorjev je poleg uporabe električne napetosti možno izvesti tudi z uporabo električnega naboja oziroma električnega toka. Glavna prednost pri vodenju piezoelektričnih aktuatorjev z električnim nabojem je zmanjšanje histereznega vpliva [12]. Kapacitivnost kot fizikalno-geometrijska lastnost predstavlja povezavo med dovedenim električnim nabojem in napetostjo, ki se inducira na ploščah piezoelektričnega aktuatorja. Z geometrijsko deformacijo piezoelektričnih aktuatorjev se posledično spremeni tudi kapacitivnost, kar je tudi glavni razlog, da se med obema načinoma položajnega vodenja pojavijo razlike. V hipotetičnem primeru, kjer bi bila kapacitivnost piezoelektričnih aktuatorjev pri položajnem vodenju konstantna, bi vodenje z električno napetostjo kot tudi vodenje z električnim nabojem dalo podobne rezultate. Avtorji poročajo, da je pri položajnem vodenju z električnim nabojem oziroma tokom možno zmanjšati histereze celo na manj kot 2%, če se nezaželeno histerežno odstopanje primerja s celotnim delovnim območjem piezoelektričnega aktuatorja [13].

Kljub omenjenim prednostim položajnega vodenja z električnim nabojem ta princip ni pogosto v uporabi. Glavni razlog temu je zahtevna izdelava nabojnih ojačevalnikov (elektronike), v kateri je med drugim potrebno implementirati tudi regulacijo toka oziroma naboja. V ta namen je potrebno izvajati meritev dejanske vrednosti električnega naboja na piezoelektričnem aktuatorju, kar pa je zahtevno za implementacijo. Zaradi omenjenih dejstev so napor raziskovalcev usmerjeni predvsem k sami izdelavi teh ojačevalnikov. Nadaljnja težava pri vodenju sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji z električnim nabojem je neustreznost takšnega sistema za kompenzacijo drugih nelinearnosti in motenj na progi. Zaradi omenjenih omejitev je položajno vodenju sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji večinoma izvedeno z električno napetostjo,

Metode, ki se uporabljajo za položajno vodenje piezoelektričnih aktuatorjev z električno napetostjo lahko razdelimo na položajno vodenje v zaprti zanki (ang.: *feedback control*), položajno vodenje v odprti zanki (ang.: *feedforward control*) ter položajno vodenje s kombinacija obojega (ang.: *feedforward/feedback control*). Vodenje piezoelektričnih aktuatorjev v odprti zanki je v določenih primerih zelo koristno, saj takšen pristop k vodenju ne povzročajo nestabilnost sistema oziroma proge, poleg tega pa se na takšen način izognemo implementaciji dragih in sorazmerno okornih merilnikov položaja. Za ocenitev oziroma kompenzacijo histereznega pojava se lahko uporabijo različni modeli histereznega pojava oziroma inverzni modeli histereznega pojava (pred-krmilniki).

Kljub omenjenim prednostim položajnega vodenja v odprti zanki je večina sistemov za vodenje piezoelektričnih aktuatorjev izvedena v zaprti zanki. Poleg histereznega pojava na natančnost pozicioniranja vpliva tudi pojav lezenja, ki predstavlja spremembo položaja piezoelektričnega aktuatorja pri konstantni vrednosti napajalne napetosti. Ta pojav v nasprotju z vodenjem v odprti zanki pri vodenju v zaprti zanki ne predstavlja težav. Vodenje v zaprti zanki je nadalje tudi bolj primerno za odpravljanje zunanjih motenj med samim delovanjem, poleg tega pa je pri položajnem vodenju v zaprti zanki možno dosegati višjo natančnosti pozicioniranja. Najpogosteje implementiran način vodenja v zaprti zanki je še vedno izveden s klasičnim PID regulatorjem.

Položajno vodenje sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji v zaprti zanki ima tudi nekatere omejitve. Vsekakor je v ta namen potrebno implementirati zelo natančno meritev položaja, kar pa lahko vpliva na končne stroške. Znano dejstvo je, da želena natančnost oziroma resolucija pri vodenju nekega sistema v zaprti zanki ne more biti višja od natančnosti merilnega sistema. Poleg same natančnosti merilnega sistema, lahko omejitve predstavlja

tudi merilni šum, ki se inducira na merilni opremi. V skrajnih primerih je takšen šum lahko tudi vzrok za nestabilnost pri vodenju [14]. V grobem ločimo dva načina meritve položaja, in sicer absolutna (direktna) meritev ter relativna meritev. Uporaba digitalne *CCD*-kamere v kombinaciji z optičnim mikroskopom je absolutna meritev položaja [15]-[16]. Uporaba takšnega merilnega sistema je po eni strani zelo praktična, saj naprave s piezoelektričnimi aktuatorji mnogokrat delujejo "pod" mikroskopom. Po drugi strani ima takšen pristop resne omejitve predvsem zaradi relativno nizke hitrosti zajemanja in kompleksnosti procesiranja digitalnih slik. Med relativne meritve položaja spadajo meritve z induktivnimi LVDT senzorji [17], meritve na osnovi laserskih interferometrov [18], meritve na osnovi kapacitivnih senzorjev, merilnih lističev (ang.: *strain-gauge*) in inkrementalnih dajalnikov.

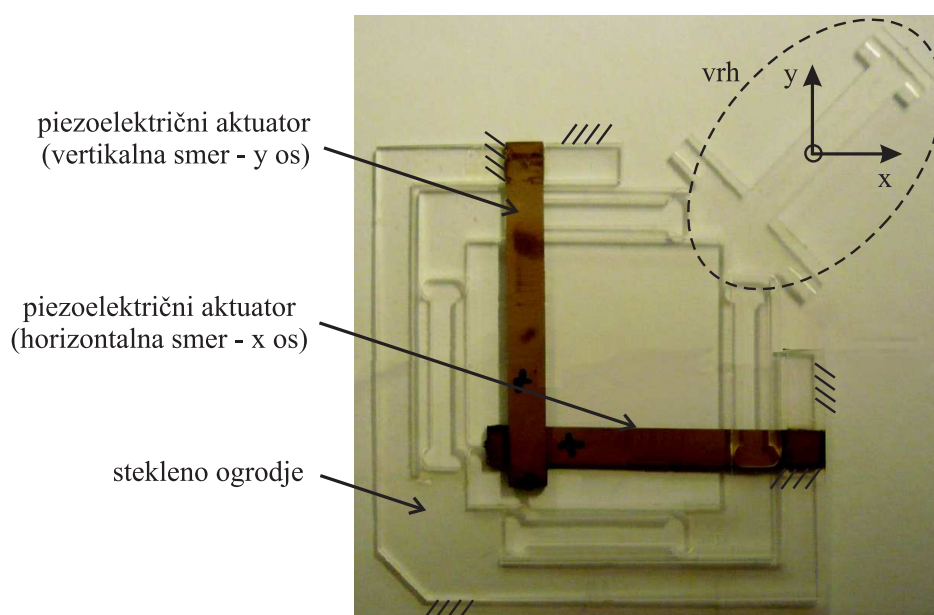
V disertaciji je predstavljeno položajno vodenje vrha robotskega mehanizma z električno napetostjo v odprti in v zaprti zanki. Najprej je predstavljeno in ovrednoteno položajno vodenje vrha robotskega mehanizma z uporabo klasičnih metod, to je z linearnim predkrmilnikom v odprti zanki ter s PI regulatorjem v zaprti zanki. Zaradi omejitev, ki se pojavljajo pri tem, je predlagano in ovrednoteno položajno vodenje vrha robotskega mehanizma z uporabo umetnih nevronske mreže oziroma večplastnega perceptrona.

Umetne nevronske mreže se pogosto uporabljajo na področjih razpoznave slik, govora in pisave, pri finančnih napovedih, ter kot fizikalni modeli različnih sistemov v fiziki in matematiki. Nevronske mreže se zaradi sposobnosti aproksimacije kinematičnih modelov uspešno uporabljajo tudi na področju robotike. V preteklih letih so bili v svetu ter tudi pri nas razviti številni nevronske sistemi za modeliranje inverzne kinematike robotskih mehanizmov [19]-[22]. Nevronske mreže so lahko zelo uporabne pri reševanju kompleksnih problemov, saj imajo sposobnost oceniti nelinearni model nekega sistema, brez kakršnegakoli predznanja o parametrih in strukturi sistema. Predvsem na podlagi te obetavne lastnosti nevronske mreže smo določili tezo doktorske disertacije, ki pravi, da lahko z uporabo nevronske mreže ocenimo ter v nadaljevanju tudi kompenziramo nelinearne karakteristike piezoelektričnih aktuatorjev oziroma robotskega mehanizma. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov, ki so predstavljeni v tej doktorski disertaciji, pa smo ugotovili, da z predlagano strukturo učenja nevronske mreže ni mogoče popolnoma natančno oceniti omenjenih nelinearnih karakteristik in s tem tudi inverznega modela robotskega mehanizma. To v nadaljevanju pomeni, da predlagana struktura ni popolnoma optimalna za kompenzacijo nelinearnosti robotskega mehanizma, vendar pa kljub temu bistveno pripomore k izboljšanju natančnosti položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma.

Razvoj sistemov oziroma naprav za mikro-pozicioniranje je v svetu zelo intenziven, medtem ko v Sloveniji zaenkrat ni zaznati zanimanja oziroma razvoja na tem področju. Pri izdelavi tega dela je bilo ugotovljeno, da je to področje kljub perspektivnosti v našem okolju nepoznano oziroma nerazvito. To delo bralcu podaja koristne in tudi praktične napotke za izdelavo tega in podobnih sistemov za mikropozicioniranje s piezoelektričnimi aktuatorji. V poglavju 2 je predstavljena zgradba robotskega mehanizma ter njegov simulacijski model, ki je izdelan z namenom razumevanja delovanja robotskega mehanizma in za potrebe načrtovanja algoritmov položajnega vodenja. V poglavju 3 so predstavljene komponente sistema za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma. To so napetostni napajalniki, merilna oprema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma in kontrolno-procesna enota s potrebno programsko opremo. V poglavju 4 so na osnovi izdelanega sistema za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma prikazani eksperimenti za ocenitev velikost delovnega področja, eksperimenti za meritev sklopljenosti osi in eksperimenti za ocenitev vpliva histerez v piezoelektričnih aktuatorjih na delovanje robotskega mehanizma. Poleg tega so v poglavju 4 prikazani tudi rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z linearnim pred-krmilnikom v odprti zanki ter s PI regulatorjem v zaprti zanki. Iz meritev je razvidno, da se pri uporabi konvencionalnih tehnik pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma pojavijo omejitve. V poglavju 5 je predstavljen postopek in rezultat učenja nevronske mreže za ocenitev nelinearnega inverznega modela robotskega mehanizma. V poglavju 6 so najprej predstavljeni rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v odprti zanki z nevronskimi mrežami. Nadalje so predstavljeni rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v zaprti zanki z nevronskimi mrežami ter rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v zaprti zanki z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem. V poglavju 7 je podan zaključek dela.

Opis robotskega mehanizma

Robotski mehanizem (slika 2.1) je sestavljen iz steklenega ogrodja in dveh piezoelektričnih aktuatorjev, ki sta fiksno nalepljena na stekleno ogrodje. V nadaljevanju razprave so najprej predstavljene osnove piezoelektričnega efekta in piezoelektričnih aktuatorjev, nato pa še izdelava in delovanje steklenega ogrodja. Na podlagi poznanih in izračunanih snovno-geometrijskih lastnosti piezoelektričnih aktuatorjev in steklenega ogrodja je v programskem paketu MATLAB/Simulink izdelan simulacijski model robotskega mehanizma, ki je koristen tako za razumevanje njegovega delovanja kot tudi za načrtovanje ustreznih algoritmov za njegovo položajno vodenje.



Slika 2.1: Robotski mehanizem s piezoelektričnimi aktuatorji

Sprememba dolžine piezoelektričnih aktuatorjev se preko vzvoda, ki je vgrajen v stekleno ogrodje, prenese na vrh robotskega mehanizma in tam predstavlja njegov delovni pomik znotraj delovnega področja. Absolutna sprememba dolžine piezoelektričnih aktuatorjev je približno enaka $2 \mu\text{m}$, prestavno razmerje ročic je enako 13, kar pomeni, da je velikost delovnega področja robotskega mehanizma (maksimalni pomik vrha) približno $25 \times 25 \mu\text{m}$. Velikost robotskega mehanizma (tlorisni pogled) je približno $40 \times 40 \text{ mm}$.

2.1 Piezoelektrični pojav in piezoelektrični aktuatorji

Leta 1880 sta brata Pierre in Jacques Curie eksperimentalno dokazala, da se na določenih naravnih materialih s kristalno strukturo (kvarc, turmalin, topaz, itd.) ob mehanskem pritisku na njih inducira električni naboj oziroma električna napetost. Po grški besedi *piezo*, ki pomeni stisniti ali pritisniti, sta to lastnost materialov poimenovala piezoelektričnost. Z uporabo istih materialov je bila dokazana tudi inverzna piezoelektričnost. Pri tem pojavu se elementu iz piezoelektričnega materiala, ki je izpostavljen električni napetosti oziroma električnemu polju, spremeni oblika oziroma dolžina. Relativna sprememba dolžine pri inverznem piezoelektričnem pojavu je minimalna in znaša približno 1/100 procenta [23].

Uporaba piezoelektričnih materialov je v današnjem času precej široka. Zaradi robustnosti in nizke cene jih je mogoče zaslediti v vsakdanjih napravah, kot sta vžigalnik (generator iskre) in zvočna voščilnica (generator zvoka). Na drugi strani pa se piezoelektrični aktuatorji zaradi njihove izjemne natančnosti pri položajnem vodenju pojavljajo v visokotehnoloških aplikacijah, kot je mikroskopiranje z vrstičnimi tipalnimi mikroskopi (ang.: *scanning probe microscopy*) in pozicioniranje optičnih sistemov v najsodobnejših vesoljskih teleskopih.

2.1.1 Osnove piezoelektričnega pojava

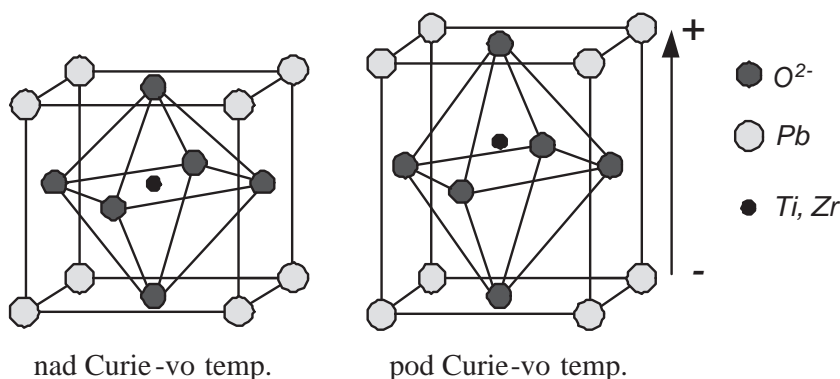
Po objavi eksperimentalnih dokazov o obstoju piezoelektričnega pojava pri določenih materialih so raziskovalci v nadaljnjih letih odkrili tudi vzrok za ta pojav. Ta se nahaja v specifičnosti osnovnih gradnikov teh materialov (kristalov), ki vsebujejo tako imenovani električni dipolni moment. Električni dipolni moment je fizikalni pojav, ki ga izkazujejo posamezne molekule ali kristali zaradi nesimetrične razporeditve električnega naboja. Na zelo majhni razdalji znotraj molekule ali kristala sta tako prisotna negativni in pozitivni pol. Električni dipolni moment je vektorska veličina, ki je enaka produktu naboja in vektorske razdalje med nabojema ter je usmerjena od negativnega k pozitivnemu naboju. Obstoj

električnega dipolnega momenta pri osnovnih gradnikih neke snovi pa ni edini pogoj za pojav piezoelektričnosti, saj na primer voda kljub polarnosti njenih molekul ni piezoelektrična snov. Poleg obstoja dipolnega momenta morajo biti gradniki piezoelektričnega materiala tudi enako prostorsko orientirani glede na njihov dipolni moment.

Piezoelektrične lastnosti, ki jih izkazujejo naravni materiali (kvarc, turmalin, itd.) so precej šibko izražene. Zaradi tega so si raziskovalci že od odkritja piezoelektričnosti prizadevali izdelati umetne materiale, ki bi izraziteje izkazovali piezoelektrične lastnosti. Najprej so v laboratorijih izdelati umetne piezoelektrične kristale, kar pa je bil precej drag, dolgotrajen in kompliciran proces. Preboj pri izdelavi umetnih piezoelektričnih materialov je bil narejen okrog leta 1950. Odkrili so, da piezoelektrične lastnosti izkazujejo tudi nekatere keramike kot sta barijev titanat ($BaTiO_3$) in svinec-cirkonijev-titanat ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$), ki je še danes najbolj pogosto uporabljen piezoelektrični material. Svinec-cirkonijev-titanat poznamo tudi pod imenom PZT keramika, kjer je kratica PZT izpeljana iz latinske besedne zveze *Plumbum-Zirconium-Titanium*. Poleg naravnih piezoelektričnih kristalov in umetnih piezoelektričnih keramik so poznani še umetni piezoelektrični polimeri, kot sta PVF (ang.: *polyvinylfluorid*) in PVDF (ang.: *polyvinylidenefluorid*).

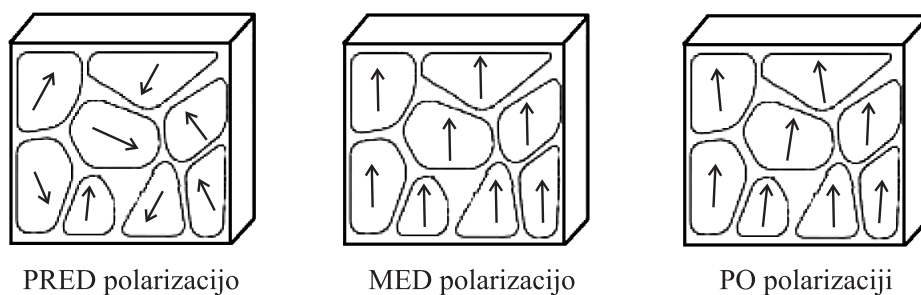
Piezoelektrični aktuatorji na predstavljenem robotskem mehanizmu, so izdelani iz PZT keramike. Proizvodni proces PZT keramike se začne z mletjem in mešanjem osnovnih materialov, to je svinca, cirkonija in titana. Pomembna lastnost PZT keramike je, da je mogoče pri njeni proizvodnji s spreminjanjem mešanice vplivati tudi na piezoelektrične karakteristike izdelanega aktuatorja. Za pospešitev reakcije med elementi se mešanica po mletju posameznih komponent segreje na 75% temperature sintranja, po ohladitvi pa sledi njeno mletje. Nato se doda vezivna snov, ki pospeši granulacijo zmletega prahu in s pomočjo katere je oblikovanje elementov pri stiskanju lažje. Po stiskanju in oblikovanju izdelka se ta najprej segreje na 750 °C, da vezivna snov izgori. Temu sledi sintranje s temperaturo med 1250 do 1350 °C. Nato se keramični blok razreže, brusi in polira do zelene oblike in tolerance. Z brizganjem se na površino nanesejo elektrode. Končno sledi še polarizacija v oljni kopeli s povišano temperaturo in z uporabo močnega električnega polja, kjer PZT keramika dobi makroskopske piezoelektrične lastnosti.

Osnovne celice v PZT keramiki lahko zavzamejo dve obliki. Nad Curie-jevo temperaturo so simetrične oblike (slika 2.2 levo), pod Curie-jevo temperaturo pa so nesimetrične oblike (slika 2.2 desno). Osnovne celice pod Curie-jevo temperaturo zaradi spontane polarizacije vsebujejo električni dipolni moment, kar je osnovni pogoj za piezoelektričnost.



Slika 2.2: Osnovne celice PZT keramike nad in pod Curie-vo temperaturo

Pred postopkom polarizacije so kristali v PZT keramiki poljubno orientirani glede na njihov električni dipolni moment. Kristale z isto orientacijo imenujemo *Weiss-ova* področja. Zaradi naključne orientacije *Weiss-ovih* področij, material kot celota ne izkazuje makroskopskih piezoelektričnih lastnosti. S postopkom polarizacije, ki se izvede pri povišani temperaturi z uporabo močnega električnega polja se *Weiss-ova* področja usmerijo. Po končanem postopku polarizacije *Weiss-ova* področja v PZT keramiki ostanejo približno enako usmerjena, zaradi česar PZT keramika izkazuje piezoelektričnost. Na sliki 2.3 je shematsko prikazana PZT keramika pred postopkom polarizacije (slika 2.3 levo), med postopkom polarizacije (slika 2.3 sredina) in po postopku polarizacije (slika 2.3 desno).

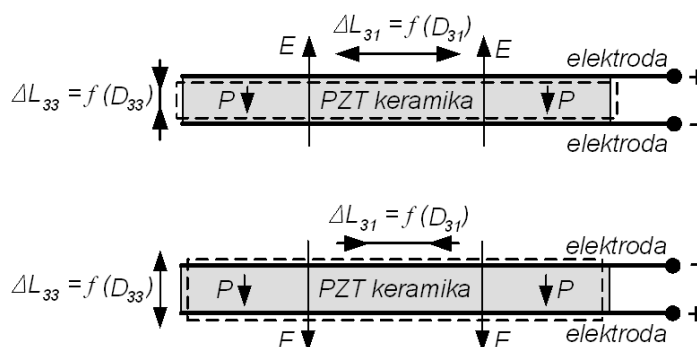


Slika 2.3: Orientacija kristalov pri polarizaciji PZT keramike

Pri uporabi polarizirane PZT keramike oziroma piezoelektričnih aktuatorjev se je potrebno zavedati, da je mogoče PZT keramiko s prekoračitvijo mehanskih, električnih ali termalnih omejitev tudi depolarizirati. Kljub vsemu velja, da so piezoelektrični aktuatorji iz PZT keramike robustni elementi, ki ob pravilni uporabi omogočajo doseganje zelo natančnih pomikov. V nadaljevanju so opisane mehanske lastnosti piezoelektričnih aktuatorjev, ki v odvisnosti od električnega polja oziroma napetosti spreminjajo svojo dolžino ter ob tem generirajo silo na elemente, ki so z njimi v fizičnem kontaktu.

2.1.2 Mehanske lastnosti PZT keramike

Pri delovanju napetosti U oziroma električnega polja E na piezoelektrični material se spremenijo dimenzije piezoelektričnega aktuatorja v odvisnosti od jakosti in orientacije električnega polja glede na orientacijo polarizacije P . Ob tem se lahko ustvarijo sorazmerno velike sile na mehanske sklope oziroma elemente, ki so v fizičnem kontaktu s piezoelektričnimi aktuatorji. Na sliki 2.4 je shematsko prikazan vpliv orientacije električnega polja in orientacije polarizacije na spremembo dolžine in debeline piezoelektričnega aktuatorja.



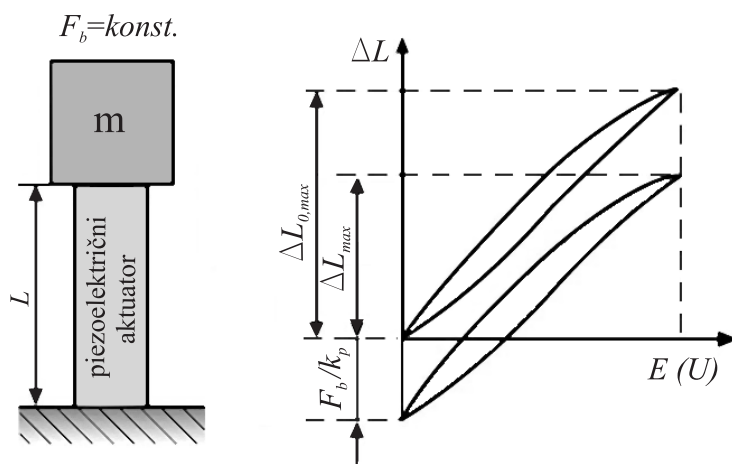
Slika 2.4: Delovanje piezo. aktuatorjev v odvisnosti od polarizacije in el. polja

Karakteristično lastnost materiala piezoelektričnega aktuatorja opišemo s piezoelektričnim koeficientom razteznosti D_{ij} . Piezoelektrični koeficient razteznosti D_{33} določa razteznost materiala v smeri, ki je vzporedna s smerjo polarizacije. Piezoelektrični koeficient razteznosti D_{31} pa določa razteznost materiala v smeri, ki je pravokotna na smer polarizacije. V primeru, ko sta smeri polarizacije in delovanja električnega polja nasprotni, je sprememba dolžine ($\Delta L_{(31)}$) piezoelektričnega aktuatorja pozitivna, sprememba širine ($\Delta L_{(33)}$) piezoelektričnega aktuatorja pa negativna. Ko sta smeri polarizacije in delovanja električnega polja enaki, je sprememba dolžina piezoelektričnega aktuatorja negativna, sprememba širine piezoelektričnega aktuatorja pa pozitivna. Pri praktični uporabi se koristi sprememba dolžine piezoelektričnih aktuatorjev ($\Delta L = \Delta L_{(31)}$), ki je v osnovi funkcija jakosti električnega polja, začetne dolžine piezoelektričnega aktuatorja L , piezoelektričnega koeficienta razteznosti D_{31} in prisotnosti zunanjih sil na aktuator. Sprememba dolžine neobremenjenega piezoelektričnega aktuatorja ΔL_0 se zato približno izračuna z enačbo

$$\Delta L_0 \approx \pm E \cdot D_{31} \cdot L \quad (2.1)$$

Enačba 2.1 se za približen izračun spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja lahko uporabi le v primeru, ko ta ni izpostavljen zunanjim silam. Takšen način delovanja piezoelektričnih aktuatorjev je v praksi težko zaslediti, saj je za pozicioniranje in premikanje

različnih mehanskih sklopov (bremen) potrebno ustvariti oziroma generirati aktivno potisno silo. Maksimalna sprememba dolžine obremenjenega piezoelektričnega aktuatorja je zaradi tega vedno manjša od maksimalne spremembe dolžine neobremenjenega piezoelektričnega aktuatorja. Z drugimi besedami lahko rečemo, da se piezoelektričnemu aktuatorju zmanjša delovno območje, če ob spremembi dolžine opravi neko delo. V splošnem sta poznana dva načina obremenitve. Pri prvem načinu obremenitve je breme oziroma sila na piezoelektrični aktuator ves čas konstantna, kar je shematsko prikazano na sliki 2.5.



Slika 2.5: Konstantna obremenitev piezoelektričnega aktuatorja

Maksimalna sprememba dolžine stalno obremenjenega piezoelektričnega aktuatorja se lahko približno izračuna z uporabo enačbe

$$\Delta L_{max} \approx \Delta L_{0,max} - \frac{F_b}{k_p}, \quad (2.2)$$

kjer je $\Delta L_{0,max}$ maksimalna sprememba dolžine neobremenjenega piezoelektričnega aktuatorja, F_b je sila bremena na piezoelektrični aktuator, k_p pa je togost piezoelektričnega aktuatorja. Aksialna togost piezoelektričnega aktuatorja se izračuna z enačbo

$$k_p \approx \frac{A E_p}{L} \approx \frac{F_{p,max}}{\Delta L_0}, \quad (2.3)$$

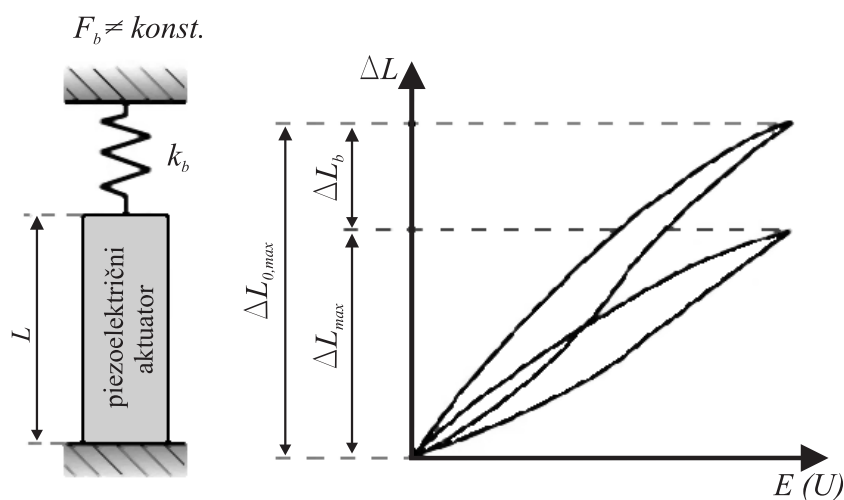
kjer je A velikost preseka piezoelektričnega aktuatorja, E_p je modul elastičnosti piezoelektričnega materiala oziroma Young-ov modul, L je začetna dolžina piezoelektričnega aktuatorja in $F_{p,max}$ je maksimalna sila, ki jo je piezoelektrični aktuator sposoben ustvariti na breme.

Togost piezoelektričnega aktuatorja je snovno-geometrijska lastnost, ki definira tudi razmerje med največjim pomikom neobremenjenega piezoelektričnega aktuatorja in maksimalno silo, ki jo je piezoelektrični aktuator sposoben ustvariti, ko je njegova sprememba

dolžine zaradi hipotetično neskončno velikega bremena onemogočena. Enačba za izračun togosti je kljub vsemu približna, saj velja, da togost piezoelektričnih aktuatorjev ni konstantna pri vseh pogojih delovanja. Na vrednost togosti vplivajo velikost delovnega območja, velikost obremenitve, temperatura okolice, itd.

Pri obremenitvi piezoelektričnih aktuatorjev je potrebno paziti, da velikosti mehanskih pritiskov na aktuatorje niso previsoke. V primeru da je obremenitev večja od dovoljene, se piezoelektrični aktuator trajno uniči. Vzrok za to pa kot zanimivost ni mehanska porušitev materiala, pač pa depolarizacija piezoelektričnosti, ki se ob uporabi prevelike napetosti v materialu po razbremenitvi več ne izkazuje. Natezna trdnost PZT keramike je dokaj visoka in znaša približno 250 MPa, vendar je kritična vrednost mehanskega pritiska pri katerem se material depolarizira dosti manjša in znaša od 20-30% natezne trdnosti.

Pri drugem načinu se obremenitev piezoelektričnega aktuatorja spreminja v odvisnosti od njegove spremembe dolžine, kar je shematsko prikazano na sliki 2.6.



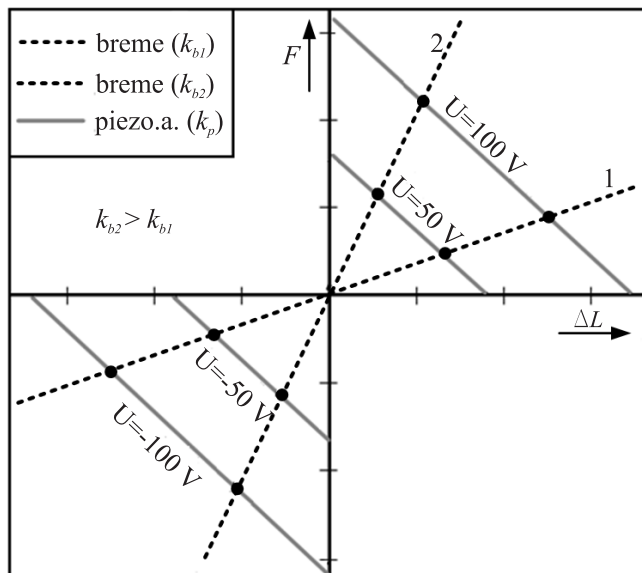
Slika 2.6: Spremenljiva obremenitev piezoelektričnega aktuatorja

V primeru spremenljive obremenitve se maksimalna sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja lahko približno izračuna z uporabo enačbe

$$\Delta L_{max} \approx \Delta L_{0,max} - \Delta L_b \approx \Delta L_0 \left(\frac{k_p}{k_p + k_b} \right), \quad (2.4)$$

kjer je ΔL_b sprememba dimenzije (položaja) bremena, k_b pa togost bremena. Iz enačbe 2.4 je razvidno, da se z večanjem togosti bremena zmanjšuje maksimalna sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja. Ta pojav je prikazan tudi v obliki grafa na sliki 2.7. Omejnjeni graf prikazuje največjo spremembo dolžine poljubnega piezoelektričnega aktuatorja s togostjo k_p v odvisnosti od bremen (vzeti) z različno togostjo. Maksimalna sprememba

dolžine je enaka projekciji koordinate presečišča premic togosti piezoelektričnega aktuatorja in bremena na abscisno os. V hipotetičnem primeru, kjer je togost bremena neskončna, je sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja enaka nič.



Slika 2.7: Togost piezoelektričnega aktuatorja in togost bremena - splošno

Piezoelektrični aktuatorji na robotskem mehanizmu so obremenjeni s spremenljivo obremenitvijo, kjer breme oziroma vzmet predstavlja stekleno ogrodje s togostjo k_o . Kot je razvidno iz grafa na sliki 2.7, je za učinkovito delovanje robotskega mehanizma potrebno zagotoviti, da togost steklenega ogrodja ni previsoka glede na togost uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev. Dejanske vrednosti togosti piezoelektričnih aktuatorjev in steklenega ogrodja so izračunane in predstavljene pri opisu simulacijskega modela robotskega mehanizma v poglavju 2.3.

2.2 Stekleno ogrodje

Osrednji element robotskega mehanizma je stekleno ogrodje, ki je bilo izdelano s pomočjo strokovnjakov na Inštitutu za mikromehanske sisteme na Tehnični univerzi Ilmenau v Nemčiji. Kot material za izdelavo je bilo predlagano fotosenzitivno dopirano steklo, ki ga je možno s tehnološkim postopkom fotolitografije zelo natančno obdelati. Fotosenzitivno dopirano steklo po izpostavitvi ultravijolični svetlobi pri nadaljnjem postopku kaljenja kristalizira. Kristalizirana področja v steklu pa se nato v kislini jedkajo dosti intenzivneje od nekristaliziranih področij v steklu. Ta fizikalno-kemična lastnost fotosenzitivnega dopiranega stekla se imenuje jedkalno razmerje in znaša približno 20.

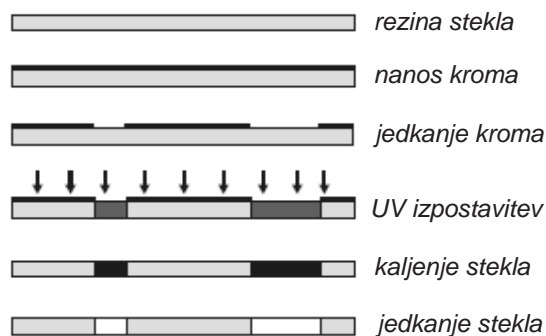
2.2.1 Obdelava fotosenzitivnega dopiranega stekla

Fotosenzitivno dopirano steklo je pomemben material na področju mikro-strukturiranja. S tehnološkim postopkom fotolitografije je iz tega stekla možno izdelati dvo-dimenzionalne strukture [24]. Omejitve nastopijo le pri izdelavi globokih lukenj z malim premerom in pri zelo tankih linijah. Steklo je kemijsko osnovano na litijevih, aluminijevih in silicijevih oksidih ($LiO_2 - Al_2O_3 - SiO_2$). Za doseganje fotosenzitivnosti so temu steklu dodani dopandi kot so srebrov nitrat, antimonov trioksid in kositrov oksid. V tabeli 2.1 so v odstotkih podani deleži osnovnih komponent ter dopandov fotosenzitivnega dopiranega stekla, ki je bilo uporabljeno pri izdelavi ogrodja robotskega mehanizma.

Tabela 2.1: Delež komponent v dopiranem steklu

komponente	delež v procentih
silicijev dioksid (SiO_2)	74,29%
litijev oksid (LiO)	11,61%
aluminijev oksid (Al_2O_3)	7,20%
natrijev oksid (Na_2O)	2,74%
kalijev oksid (K_2O)	4,16%
dopandi	delež v procentih
srebrov nitrat $AgNO_3$	0,18%
antimonov trioksid Sb_2O_3	0,40%
kositrov oksid SnO	0,07%

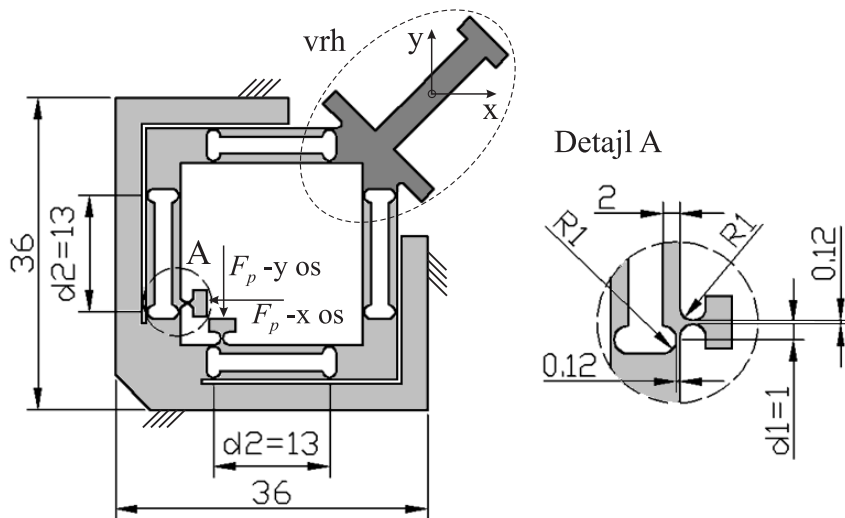
Fotolitografija fotosenzitivnega dopiranega stekla je sestavljena iz zaporedja procesnih korakov (slika 2.8). Najprej se na rezino stekla z debelino 1 mm nanese tanka plast kroma. V nadaljevanju se iz kroma izdelata maska, ki predstavlja tlorisno projekcijo končnega izdelka. Tlorisna projekcija se izdelata v programu za tehnično risanje (npr. AutoCAD). Steklena rezina z oblikovano kromovo masko se nato presvetli z ultravijolično svetlobo. Temu sledi kaljenje stekla pri povišani temperaturi, kjer predhodno svetlobno izpostavljena področja fotosenzitivnega stekla kristalizirajo. S postopkom fotolitografije je mogoče izdelati linije s širino večjo od $150 \mu m$. Dimenzija izdelanih lukenj je omejena od najmanjšega premera $100 \mu m$ do največjega premera nekaj milimetrov. Najmanjši premer luknje je odvisen od kota jedkanja in debeline steklene rezine. Največji premer luknje je določen z vrednostjo jedkalnega razmerja. Na stekleni rezini ne sme biti preveč izpostavljenih (kristaliziranih) področij, saj se s tem proces jedkanja podaljša, kar vpliva na kvaliteto končnega izdelka.



Slika 2.8: Strukturiranje fotosenzitivnega dopiranega stekla - fotolitografija

2.2.2 Geometrija steklenega ogrodja

Stekleno ogrodje je v osnovi paralelogramski mehanizem, ki je v vsaki osi fiksno zlepljen z enim piezoelektričnim aktuatorjem. Ob napajanju piezoelektričnih aktuatorjev se njihova sprememba dolžine oziroma aktivna potisna sila (F_p) prenese na stekleno ogrodje. Geometrijske oslavitve steklenega ogrodja, ki predstavljajo rotacijske sklepe, omogočajo, da se sprememba dolžine piezoelektričnih aktuatorjev z vgrajenim prestavnim razmerjem steklenega ogrodja sorazmerno poveča in kot takšna prenese na vrh steklenega ogrodja, ki predstavlja tudi vrh robotskega mehanizma. Vrh robotskega mehanizma smo poimenovali zadnji (desni zgornji) člen v kinematični verigi, ki med delovanjem robotskega mehanizma predstavlja neke vrste mikro-pozicionirno mizico. Zaradi takšnega poimenovanja je očitno, da vrh robotskega mehanizma v našem primeru ni ena sama točka pač pa celotna zgornja površina zadnjega člena v kinematični verigi oziroma mikro-pozicionirne mizice. Na sliki 2.9 je prikazana tlorisna projekcija steklenega ogrodja z glavnimi merami.



Slika 2.9: Stekleno ogrodje - tlorisni pogled

Prestavno razmerje med spremembo dolžine piezoelektričnih aktuatorjev in pomikom vrha robotskega mehanizma v pripadajoči osi je enako razmerju ročic d_2 in d_1 (slika 2.9). Za obe osi robotskega mehanizma velja enačba prestavnega razmerja

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{x}{\Delta L_x} = \frac{y}{\Delta L_y}, \quad (2.5)$$

kjer sta ΔL_x in ΔL_y spremembi dolžin piezoelektričnih aktuatorjev, x in y pa sta pomika vrha robotskega mehanizma v pripadajočih smereh oziroma oseh delovne ravnine. Vrednost ročice d_2 je 13 mm, vrednost ročice d_1 pa je 1 mm (slika 2.9), kar pomeni, da je prestavno razmerje enako 13. Robotski mehanizem ima zaradi prestavnega razmerja, ki je vgrajeno v steklenem ogrodju sorazmerno veliko delovno območje glede na njegovo velikost.

Robotski mehanizem ima poleg sorazmerno velikega delovnega območja še eno dobro lastnost, ki se kaže v dejstvu, da osi robotskega mehanizma teoretično niso sklopljene. To pomeni, da med delovanjem oziroma gibanjem robotskega mehanizma v eni osi delovne ravnine ni vpliva na gibanje v drugi osi delovne ravnine. Ta lastnost robotskega mehanizma, ki se izkaže kot koristna pri njegovem položajnem vodenju, je teoretično dokazana z naslednjo izpeljavo. Za majhne spremembe dolžin piezoelektričnih aktuatorjev (nekaj mikrometrov) veljata naslednji geometrijski zvezi

$$\begin{aligned} \frac{\Delta L_x}{d_1} &= \frac{x}{d_2} = \widehat{\varphi}_x, \\ \frac{\Delta L_y}{d_1} &= \frac{y}{d_2} = \widehat{\varphi}_y, \end{aligned} \quad (2.6)$$

kjer sta $\widehat{\varphi}_x$ in $\widehat{\varphi}_y$ kota zasukov geometrijskih oslabitev steklenega ogrodja v ločnih stopinjah oziroma radianih. Kot zasuka geometrijskih oslabitev je enak razmerju spremembe dolžine piezoelektričnih aktuatorjev v pripadajoči osi in ročice d_1 oziroma razmerju pomika vrha robotskega mehanizma v pripadajoči osi in ročice d_2 . Na podlagi enačb 2.6 lahko definiramo medsebojni vpliv oziroma kinematično sklopljenost osi robotskega mehanizma kot

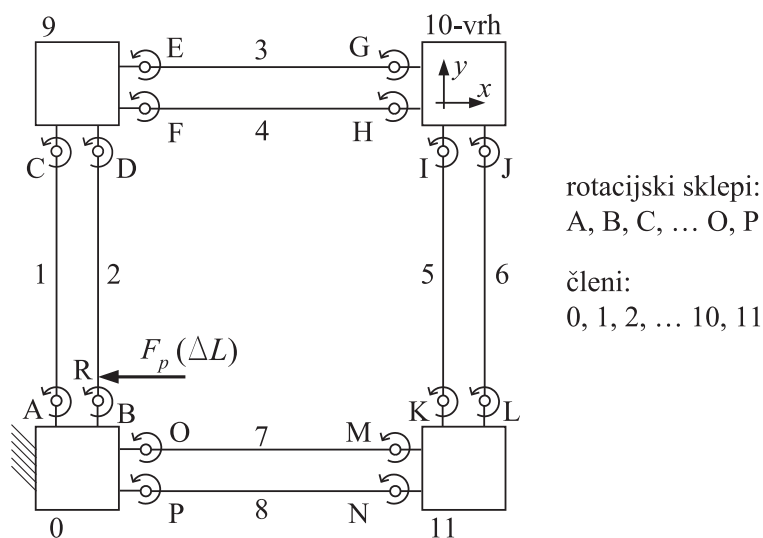
$$\begin{aligned} x &= d_2 - d_2 \cos \widehat{\varphi}_y = d_2 \left(1 - \cos \frac{y}{d_2} \right), \\ y &= d_2 - d_2 \cos \widehat{\varphi}_x = d_2 \left(1 - \cos \frac{x}{d_2} \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Za majhne kote zasuka geometrijskih oslabitev ($\widehat{\varphi} \approx 0,001$) očitno velja, da je pomik vrha robotskega mehanizma v izbrani osi delovne ravnine neodvisen od pomika vrha robotskega mehanizma v drugi osi, saj je vrednost zgornjih izrazov skoraj enaka nič.

2.2.3 Reducirana togost steklenega ogrodja

Piezoelektrični akuatorji so fiksno zlepljeni na stekleno ogrodje, ki kot breme predstavlja spremenljivo obremenitev oziroma vzmet, podobno tisti na sliki 2.6. Za učinkovito delovanje robotskega mehanizma togost steklenega ogrodja ne sme biti previsoka glede na togost piezoelektričnih akuatorjev. To dejstvo je potrebno upoštevati predvsem pri dimenzioniranju robotskega mehanizma.

Pri izpeljavi enačbe za izračun togosti oziroma reducirane togosti steklenega ogrodja v točki R si pomagamo s sliko 2.10, kjer je prikazano stekleno ogrodje v obliki mehanizma oziroma kinematične verige. Izpeljana enačba določa reducirano togosti steklenega ogrodja za vsako os robotskega mehanizma posebej. Zaradi simetričnosti robotskega mehanizma velja, da sta reducirani togosti steklenega ogrodja v obeh oseh robotskega mehanizma enaki. Na sliki 2.10 je prikazano delovanje robotskega mehanizma v horizontalni osi, pri čemer členi 0, 7, 8 in 11 ne opravljajo gibanja.



Slika 2.10: Kinematična shema steklenega ogrodja

Izpeljava enačbe za izračun reducirane togosti steklenega ogrodja v točki R je osnovana na energijskem pristopu [11]. Zaradi majhnosti kotov zasukov oziroma deformacij geometrijskih oslabitev se lahko te smatrajo kot elastični rotacijski sklepi. Prožnostna energija, ki jo ob spremembi svoje dolžine na stekleno ogrodje preko točke R prenese piezoelektrični akuator, se lahko izračuna z enačbo

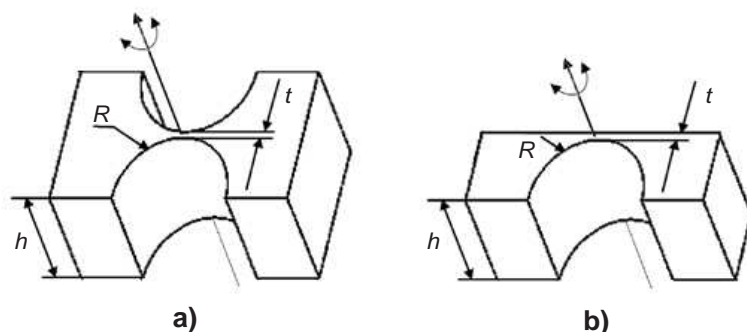
$$E_{pr} = \frac{1}{2} k_o \Delta L^2, \quad (2.8)$$

kjer je k_o reducirana togost steklenega ogrodja za točko R .

Prožnostna energija se shrani v 16-ih elastičnih rotacijskih sklepih na steklenem ogrodju. Vsi rotacijski sklepi na steklenem ogrodju so geometrijsko enaki in iz istega materiala, kar pomeni, da imajo enako upogibno togost. Vrednost shranjene prožnostne energije v steklenem ogrodju se zato lahko izračuna z uporabo enačbe

$$E_{pr} = \sum_{i=1}^{16} \frac{1}{2} k_{rs} \widehat{\varphi}_i^2, \quad (2.9)$$

kjer je k_{rs} upogibna togost enega rotacijskega sklepa. Upogibna togost elastičnih rotacijskih sklepov je snovno-geometrijska lastnost [25]-[26]. Poznane so enostranske in dvostranske geometrijske oslavitve, ki so shematsko prikazane na sliki 2.11.



Slika 2.11: Geometrijske oslavitve; a) dvostranska in b) enostranska

Za izračun upogibne togosti elastičnih rotacijskih sklepov z dvostransko geometrijsko oslavitvijo velja enačba

$$k_{rs} = \frac{2 E_{so} t h^{5/2}}{9 \pi R^{1/2}}, \quad (2.10)$$

za izračun upogibne togosti elastičnih rotacijskih sklepov z enostransko geometrijsko oslavitvijo pa velja enačba

$$k_{rs} = \frac{E_{so} t h^3}{24 R}, \quad (2.11)$$

kjer je E_{so} modul elastičnosti fotosenzitivnega dopiranega stekla oziroma steklenega ogrodja, t , h in R pa so debelina oslavitve, višina in polmer elastičnega rotacijskega sklepa. Rotacijski sklepi robotskega mehanizma so izvedeni z enostranskimi geometrijskimi oslavitvami, zato se njihova upogibna togost izračuna z enačbo 2.11.

Pri spremembi dolžine piezoelektričnega aktuatorja v horizontalni smeri (x os robotskega mehanizma) velja, da se členi 1, 2, 5 in 6 v kinematični verigi gibljejo samo z rotacijo, členi 3, 4, 9 in 10 se gibajo samo s translacijo, členi 7, 8 in 11 pa kot rečeno mirujejo (slika 2.10).

Pri tem velja, da je vrednost kota zasuka za člene 1, 2, 5 in 6 v radianih enaka razmerju spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja in ročice d_1 , oziroma razmerju pomika vrha robotskega mehanizma v x osi in ročice d_2 (enačba 2.6). Povedano lahko predstavimo tudi v matematični obliki. Enačba 2.12 določa vrednost kota zasuka 1, 2, 5 in 6 člena v kinematični verigi v odvisnosti od spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja kot

$$\widehat{\varphi}_1 = \widehat{\varphi}_2 = \widehat{\varphi}_5 = \widehat{\varphi}_6 = \frac{\Delta L_x}{d_1}. \quad (2.12)$$

Preostali členi v kinematični verigi imajo pri gibanju robotskega mehanizma v horizontalni smeri kot zasuka enak nič, kar matematično zapišemo kot

$$\widehat{\varphi}_0 = \widehat{\varphi}_3 = \widehat{\varphi}_4 = \widehat{\varphi}_7 = \widehat{\varphi}_8 = \widehat{\varphi}_9 = \widehat{\varphi}_{10} = \widehat{\varphi}_{11} = 0. \quad (2.13)$$

Kot zasuka elastičnih rotacijskih sklepov je definiran kot razlika med sosednjima členoma v kinematični verigi, ki jih ta rotacijski sklep povezuje. Na podlagi tega lahko definiramo kote zasukov za vse rotacijske sklepe na robotskem mehanizmu kot

$$\begin{aligned} \widehat{\varphi}_A &= \widehat{\varphi}_B = \widehat{\varphi}_1 - \widehat{\varphi}_0 = \widehat{\varphi}_2 - \widehat{\varphi}_0 = \Delta L_x / d_1, \\ \widehat{\varphi}_C &= \widehat{\varphi}_D = \widehat{\varphi}_9 - \widehat{\varphi}_1 = \widehat{\varphi}_9 - \widehat{\varphi}_2 = -\Delta L_x / d_1, \\ \widehat{\varphi}_E &= \widehat{\varphi}_F = \widehat{\varphi}_3 - \widehat{\varphi}_9 = \widehat{\varphi}_4 - \widehat{\varphi}_9 = 0, \\ \widehat{\varphi}_G &= \widehat{\varphi}_H = \widehat{\varphi}_{10} - \widehat{\varphi}_3 = \widehat{\varphi}_{10} - \widehat{\varphi}_4 = 0, \\ \widehat{\varphi}_I &= \widehat{\varphi}_J = \widehat{\varphi}_5 - \widehat{\varphi}_{10} = \widehat{\varphi}_6 - \widehat{\varphi}_{10} = \Delta L_x / d_1, \\ \widehat{\varphi}_K &= \widehat{\varphi}_L = \widehat{\varphi}_{11} - \widehat{\varphi}_5 = \widehat{\varphi}_{11} - \widehat{\varphi}_6 = -\Delta L_x / d_1, \\ \widehat{\varphi}_M &= \widehat{\varphi}_N = \widehat{\varphi}_7 - \widehat{\varphi}_{11} = \widehat{\varphi}_8 - \widehat{\varphi}_{11} = 0, \\ \widehat{\varphi}_O &= \widehat{\varphi}_P = \widehat{\varphi}_0 - \widehat{\varphi}_7 = \widehat{\varphi}_0 - \widehat{\varphi}_8 = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Iz enačb 2.14 je razvidno, da je prožnostna energija shranjena v osmih elastičnih rotacijskih sklepih, ki imajo absolutno enake kote zasukov. Enačba 2.9 tako dobi obliko

$$E_{pr} = 8 \frac{1}{2} k_{rs} \widehat{\varphi}_x^2 = 4 k_{rs} \left(\frac{\Delta L_x}{d_1} \right)^2. \quad (2.15)$$

Enačbo 2.15 izenačimo z enačbo 2.8 ter iz tega izraza izpeljemo končno enačbo za izračun reducirane togosti steklenega ogrodja za točko R

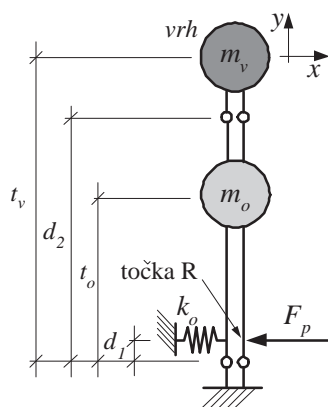
$$k_o = 8 k_{rs} \left(\frac{1}{d_1} \right)^2. \quad (2.16)$$

Enačba za izračun reducirane togosti steklenega ogrodja za točko R kaže, da je ta odvisna od upogibne togosti rotacijskih sklepov in ročice d_1 . Reducirana togost steklenega ogrodja je obratno sorazmerna od kvadrata ročice d_1 .

2.3 Dinamični model robotskega mehanizma

Na podlagi predstavljenih enačb za izračun togosti in velikosti delovnega območja piezoelektričnih aktuatorjev ter reducirane togosti steklenega ogrodja je v tem poglavju opisan simulacijski model robotskega mehanizma. Poleg dinamike so v modelu robotskega mehanizma zajete še histereze v piezoelektričnih aktuatorjih, ki imajo pomemben vpliv na njegovo delovanje.

Iz enačbe 2.7 je razvidno, da je medsebojni vpliv oziroma teoretična sklopljenost osi robotskega mehanizma zanemarljiva, zaradi česar je vsaka os modelirana posebej. Najprej je izdelan model robotskega mehanizma za horizontalno os, ki je nato enostavno prilagojen oziroma podvojen še za vertikalno os. Na sliki 2.12 je prikazan dinamični model za eno os robotskega mehanizma.



Slika 2.12: Grafična ponazoritev dinamičnega modela robotskega mehanizma za eno os

Robotski mehanizem je modeliran kot dinamični sistem 2. reda, na katerega deluje sila piezoelektričnega aktuatorja F_p . Dinamični model robotskega mehanizma za eno os lahko zapišemo kot

$$m^* \Delta \ddot{L} + k_o \Delta L = F_p, \quad (2.17)$$

kjer je m^* reducirana masa robotskega mehanizma v točki R . Ta se izračuna z enačbo

$$m^* = m_o \frac{t_o^2}{d_1^2} + m_v \frac{t_v^2}{d_1^2}, \quad (2.18)$$

kjer je m_o masa steklenega ogrodja, t_o pa oddaljenost težišča steklenega ogrodja od točke vrtišča oziroma od rotacijskega sklepa, kot je označeno na sliki 2.12 [27]. V primeru, da je na vrhu robotskega mehanizma hipotetično nameščena masa (npr. orodje), je potrebno maso vrha m_v upoštevati tudi pri izračunu reducirane mase robotskega mehanizma.

Na osnovi fizikalno-geometrijskih lastnosti fotosenzitivnega dopiranega stekla oziroma steklenega ogrodja (zgornji del tabele 2.2) lahko z uporabo predstavljenih enačb izračunamo ostale parametre steklenega ogrodja, katerih vrednosti so zbrane v spodnjem delu tabele 2.2.

Tabela 2.2: Vrednost fizikalnih parametrov steklenega ogrodja

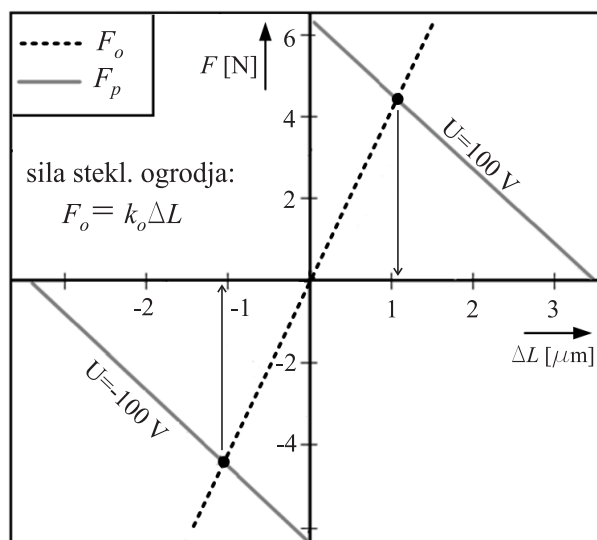
fizikalna lastnost	vrednost	enota
modul elastičnosti ogrodja (E_o)	$9,0 \times 10^{10}$	N/m^2
gostota steklenega ogrodja (ρ_o)	0,00238	g/mm^3
debelina steklenega ogrodja (h)	1	mm
polmer rotacijskega sklepa (R_{rs})	1	mm
debelina oslavitve rotacijskega sklepa (t_{rs})	0,12	mm
masa ogrodja (m_o)	0,6	g
reducirana masa ogrodja (m^*)	162	g
težišče steklenega ogrodja (t_o)	17	mm
upogibna togost rotacijskih sklepov (k_{rs})	0,45	Nm/rad
reducirana togost steklenega ogrodja (k_o)	$3,6 \times 10^6$	N/m

V zgornjem delu tabele 2.3 so podane vrednosti pomembnejših fizikalnih lastnosti uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev. Z uporabo teh parametrov je mogoče izračunati največji pomik neobremenjenih piezoelektričnih aktuatorjev (enačba 2.1) ter togost in maksimalno silo (enačba 2.3), ki jo teoretično ustvarijo uporabljeni piezoelektrični aktuatorji.

Tabela 2.3: Vrednost fizikalnih parametrov piezoelektričnih aktuatorjev

fizikalna lastnost	vrednost	enota
piezoelektrični koeficient razteznosti (D_{31})	250×10^{-12}	m/V
modul elastičnosti (E_p)	$7,8 \times 10^{10}$	N/m^2
dovoljena napetost (U_{max})	$[-100, 100]$	V
relativna dielektričnost (ε)	2000	–
dolžina piezoelektričnega aktuatorja (L)	25	mm
širina piezoelektričnega aktuatorja (b)	3	mm
debelina piezoelektričnega aktuatorja (a)	0,2	mm
maksimalna sprem. dolžine neobremen. piezo. aktuat. (ΔL_0)	$\pm 3,1$	μm
togost piezoelektričnega aktuatorja (k_p)	$1,9 \times 10^6$	N/m
maksimalna sila piezoelektričnega aktuatorja ($F_{p,max}$)	5,9	N

Reducirana togost steklenega ogrodja je približno dvakrat večja od togosti uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev. Na osnovi teh dveh vrednosti lahko z uporabo enačbe 2.4 določimo največjo spremembo dolžine uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev, ki teoretično znaša $\pm 1,1 \mu\text{m}$. To vrednost lahko določimo tudi iz grafa, ki je prikazan na sliki 2.13. Tudi grafični postopek pokaže, da je maksimalna sprememba dolžine spremenljivo obremenjenega piezoelektričnega aktuatorja pri $\pm 100 \text{ V}$ napajalne napetosti enaka $\pm 1 \mu\text{m}$.



Slika 2.13: Togost uporabljenih piezo. aktuatorjev in togost steklenega ogrodja

Na podlagi podatka o največji spremembi dolžine uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev pri $\pm 100 \text{ V}$ napetosti lahko teoretično določimo velikost delovnega območja vrha robotskega mehanizma, ki je enako produktu največje spremembe dolžine uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev in prestavnega razmerja ročic d_2/d_1 . Iz povedanega sledi, da je teoretična velikost delovnega območja vrha robotskega mehanizma v vsaki osi enaka približno $26 \mu\text{m}$ (to je $13 \times 2 \mu\text{m}$), kar pomeni, da je celotno območje robotskega mehanizma enako kvadratu (ravnini) s približno $25 \mu\text{m}$ dolgo stranico.

2.3.1 Sila piezoelektričnega aktuatorja z upoštevanjem histerez

Sila piezoelektričnega aktuatorja F_p je kot rečeno odvisna od vrednosti napajalne napetosti. Ta sila ne more biti večja od maksimalne sile, oziroma je ustrezno zmanjšana v odvisnosti od spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja, kot je prikazano na sliki 2.13. Na velikost sile vpliva tudi nelinearni histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih. Enačba za izračun sile piezoelektričnega aktuatorja na robotskem mehanizmu je zato definirana kot

$$F_p = \frac{F_{\max}}{U_{\max}} U - k_p \Delta L - F_h, \quad (2.19)$$

kjer je F_h nelinearna histerezna sila, ki se pojavi zaradi notranjega trenja v umetnem piezoelektričnem materialu. Ta sila povzroča, da sprememba dolžine za določeno vrednosti napajalne napetosti na piezoelektričnem aktuatorju ni vedno ista. Histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih je zaradi podobnosti mogoče modelirati kot mehansko trenje. V ta namen se uporabi LuGre model trenja, ki je predstavljen v nadaljevanju [28]. LuGre model opisuje trenje kot histerezni pojav s Stribeck-ovim efektom [29]. Za gibanje v eni prostostni stopnji tako veljata enačbi

$$\frac{d\bar{z}}{dt} = \dot{x} - \frac{|\dot{x}|}{h(\dot{x})}\bar{z}, \quad (2.20)$$

$$F_h = \sigma_0\bar{z} + \sigma_1\frac{d\bar{z}}{dt} + \sigma_2\dot{x}. \quad (2.21)$$

V enačbah je \bar{z} povprečna kontaktna sila pri uklonu površinskih stikov (ang.: *bristle deflection*), \dot{x} je relativna hitrost med dvema kontaktnima površinama, σ_0 , σ_1 in σ_2 pa so pozitivne konstante, ki so ekvivalentne koeficientom togosti, dušenja in viskoznega dušenja za površinske stike. Funkcija $h(\dot{x})$ v enačbi 2.20 predstavlja krivuljo Stribeck-ovega efekta, ki se zapiše kot

$$\sigma_0 h(\dot{x}) = f_C + (f_S - f_C)e^{-(\dot{x}/\dot{x}_S)^2}. \quad (2.22)$$

Pri tem je f_C raven Columbo-vega trenja, f_S je raven stične sile in \dot{x}_S je Stribeck-ova hitrost. Enačba za izračun histerezne sile v piezoelektričnem aktuatorju je izpeljana na osnovi enačb 2.20, 2.21 in 2.22. Relativna hitrost med dvema površinama \dot{x} se nadomesti s hitrostjo spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja $\Delta\dot{L}$. Ko združimo enačbi 2.20 in 2.21, dobimo enačbo, ki definira velikost histerezne sile v piezoelektričnem aktuatorju kot

$$F_h = \sigma_0\bar{z} - \sigma_1\frac{|\Delta\dot{L}|}{h(\Delta\dot{L})}\bar{z} + (\sigma_1 + \sigma_2)\Delta\dot{L}. \quad (2.23)$$

Pri tem je krivulja Stribeck-ovega efekta definirana kot

$$\sigma_0 h(\Delta\dot{L}) = f_C + (f_S - f_C)e^{-(\Delta\dot{L})/\dot{x}_S)^2}. \quad (2.24)$$

Vrednosti konstant σ_0 , σ_1 in σ_2 ter f_C , f_S in \dot{x}_S so praktično težko določljive. Pomembno pri določanju teh konstant je, da modelirana histerezna krivulja čimbolj natančno opiše realni histerezni pojav v piezoelektričnem aktuatorju. Pri določitvi teh konstant smo si pomagali z literaturo [30] in z dejstvom, da histereze predstavljajo med 15 do 20% glede na celotno delovno območje piezoelektričnega aktuatorja. V tabeli 2.4 so podane vrednosti konstant za modeliranje histerez v uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjih.

Tabela 2.4: Vrednosti konstant za modeliranje histerez v piezoelektričnih aktuatorjih

konstanta	vrednost	enota
konstanta (σ_0)	1×10^6	N/m
konstanta (σ_1)	$\sqrt{5} \times 10^4$	Ns/m
konstanta (σ_2)	0,4	Ns/m
Columb-ova sila (f_C)	4	N
stična sila (f_S)	1.5	N
Stribeck-ova hitrost (\dot{x}_S)	0,001	m/s

Izračunane vrednosti parametrov steklenega ogrodja (Tabela 2.2) in piezoelektričnih aktuatorjev (Tabeli 2.3 in 2.4) so uporabljene pri izdelavi MATLAB/Simulink modela robotskega mehanizma, katerega rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.

2.3.2 Simulacijski model robotskega mehanizma v MATLAB/Simulink

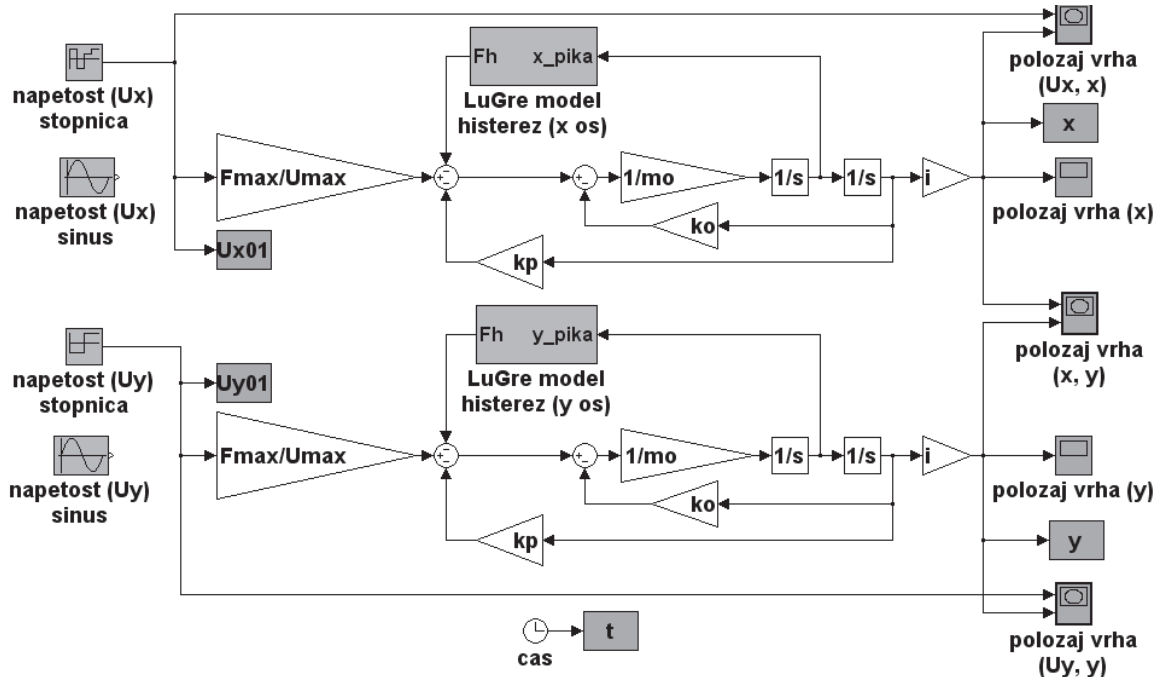
Simulacijski rezultati v nadaljevanju prikazujejo velikost delovnega območja vrha robotskega mehanizma, položaj vrha robotskega mehanizma pri stopnični spremembi napajalne napetosti (stopnični odziv) in vpliv histerez pri vodenju s sinusno obliko napajalne napetosti. Položaj vrha robotskega mehanizma je predstavljen v mikrometrih v dvoosnem kartezičnem koordinatnem sistemu. Simulacijski model robotskega mehanizma določa položaj vrha robotskega mehanizma (x, y) v odvisnosti od aktivne potisne sile piezoelektričnih aktuatorjev ($F_{p,x}, F_{p,y}$), ki je definirana z enačbo 2.19. Simulacijski model je za vsako os robotskega mehanizma predstavljen v obliki gibalne diferencialne enačbe 2. reda. Za x os robotskega mehanizma tako velja

$$m^* \ddot{x} + k_o x = i F_{p,x}, \quad (2.25)$$

za y os robotskega mehanizma pa velja

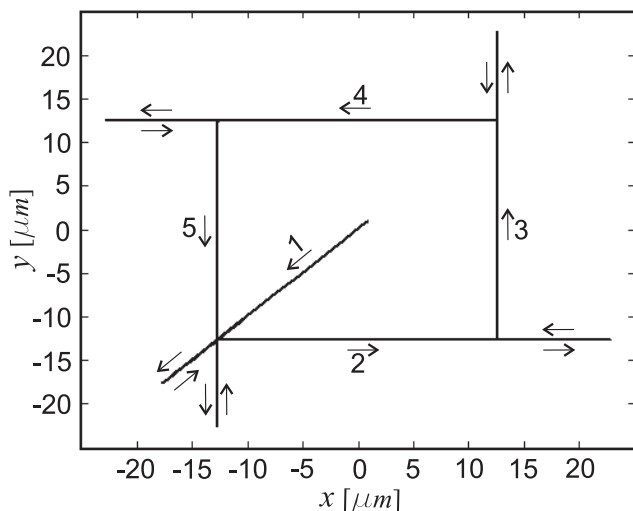
$$m^* \ddot{y} + k_o y = i F_{p,y}. \quad (2.26)$$

V enačbah 2.25 in 2.26 je i prestavno razmerje med položajem vrha robotskega mehanizma in spremembo dolžine piezoelektričnega aktuatorja, ki je enako za vsako od obeh osi robotskega mehanizma in je predhodno definirano z enačbo 2.5. Na sliki 2.14 je prikazana blokovna shema MATLAB/Simulink modela robotskega mehanizma.



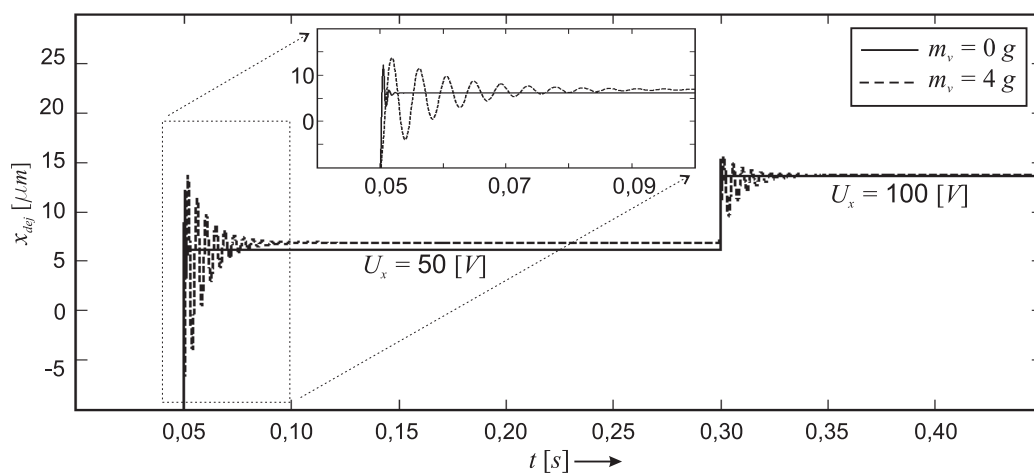
Slika 2.14: MATLAB/Simulink blokovna shema modela robotskega mehanizma

Na sliki 2.15 je prikazana velikost delovnega območja robotskega mehanizma. Napajalna napetost na piezoelektričnih aktuatorjih se spreminja v petih korakih. V 1. koraku se napetost na obeh piezoelektričnih aktuatorjih spremeni iz 0 V na -100 V. V 2. koraku se napetost na piezoelektričnem aktuatorju za x os spremeni iz -100 V na 100 V. V 3. koraku se napetost na piezoelektričnem aktuatorju za y os spremeni iz -100 V na 100 V. V 4. koraku se napetost na piezoelektričnem aktuatorju za x os spremeni iz 100 V na -100 V. V 5. koraku se napetost na piezoelektričnem aktuatorju za y os spremeni iz 100 V na -100 V.



Slika 2.15: Velikost delovnega območja robotskega mehanizma - simulacija

Simulacijski rezultat za določitev velikosti delovnega območja vrha robotskega mehanizma kaže, da se pri stopnični spremembi napajalne napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih pojavi prenehaj položaja vrha robotskega mehanizma. Omenjeni prenehaj je posledica dinamike robotskega mehanizma, ki pa je v precejšnji meri odvisna od mase robotskega mehanizma, oziroma od potencialnega bremena (npr. orodje), ki se nahaja na njegovem vrhu. Naslednji simulacijski rezultat (slika 2.16) tako prikazuje vrednost prehajanja položaja vrha robotskega mehanizma pri stopnični spremembi napajalne napetosti v odvisnosti od mase robotskega mehanizma. V prvem primeru je uporabljen model robotskega mehanizma brez dodatnega bremena na njegovem vrhu. V drugem primeru pa je predpostavljeno, da se je na vrhu robotskega mehanizma nahaja breme z maso 4 g. V tem primeru je skupna reducirana masa bremena in robotskega mehanizma že precej velika in znaša skoraj 4000 g (enačba 2.18). Simulacija je izvedena za eno os robotskega mehanizma.



Slika 2.16: Položaj robot. mehanizma pri stopnični spremembi napetosti - simulacija

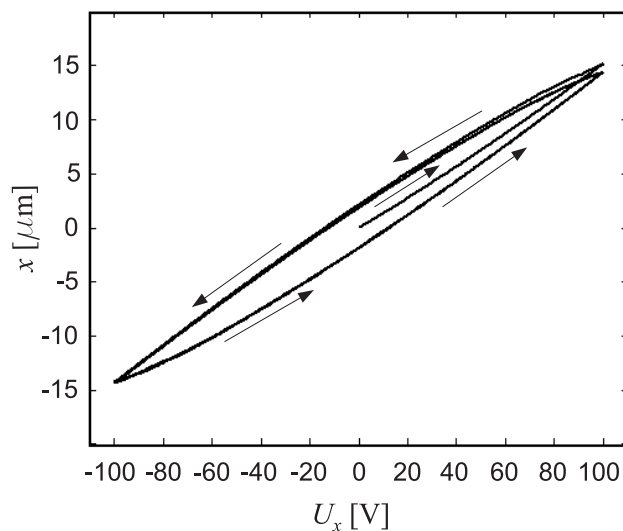
Iz slike 2.16 je razvidno, da ima breme na vrhu robotskega mehanizma precej velik vpliv na odziv položaja vrha pri stopnični spremembi napetosti. Simulacijski rezultat kaže, da že majhna vrednost bremena zelo vpliva na dinamiko robotskega mehanizma.

Kot zadnje je s pomočjo MATLAB/Simulink modela prikazan vpliv histereznega pojava na položaj vrha robotskega mehanizma pri napajanju piezoelektričnih aktuatorjev s spremenljivo vrednostjo napetosti (slika 2.17). Napajalna napetost je sinusne oblike, zato se lahko zapiše z enačbo

$$U_x(t) = 100 \sin(2t), \quad (2.27)$$

kjer t predstavlja čas.

Histerezni pojav je vključen v simulacijski model robotskega mehanizma zaradi znanega dejstva iz strokovne literature, ki navaja, da je ta pojav evidentno prisoten pri položajnem vodenju sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji. Položaj vrha robotskega mehanizma tako ni odvisen samo od vrednosti napajalne napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih, pač pa tudi od zgodovine gibanja vrha. Simulacijski model robotskega mehanizma je izdelan tako, da histerezni pojav v najslabšem primeru povzroča približno 20% odstopanja oziroma razlike položaja vrha robotskega mehanizma pri neki isti vrednosti napajalne napetosti. Odstopanje se primerja s celotnim delovnim območjem robotskega mehanizma ($25 \mu\text{m}$ v vsaki osi), kar pomeni, da 20% od te vrednosti predstavlja približno $5 \mu\text{m}$.



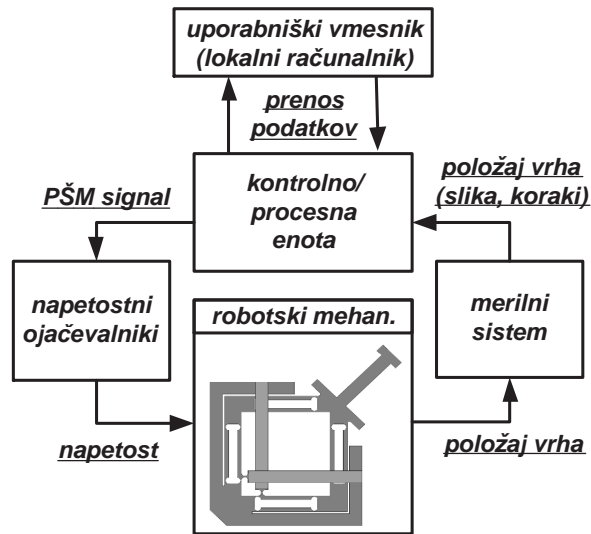
Slika 2.17: Položaj robot. mehanizma pri zvezni spremembi napetosti - simulacija

S pomočjo simulacijskega modela je bilo med drugim ugotovljeno, da na dinamiko robotskega mehanizma zelo vpliva masa, ki se potencialno nahaja na vrhu v obliki končnega efektorja. To pomeni, da sorazmerno veliko delovno območje, ki ga zagotavlja geometrijska struktura robotskega mehanizma z vgrajenim prestavnim razmerjem, na drugi strani povzroča oscilacije položaja pri odzivu na stopnično spremembo krmilne napetosti. Pri načrtovanju robotskega mehanizma je zato potrebno poiskati kompromis med velikostjo delovnega območja vrha robotskega mehanizma in želeno dinamiko robotskega mehanizma. Pri tem se lahko izdelani simulacijski model robotskega mehanizma koristno uporabi. Izdelani simulacijski model je uporaben tudi za načrtovanje položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma, saj lahko na osnovi simulacijskega modela preizkusimo različne tehnike položajnega vodenja še pred implementacijo na realnem sistemu.

Opis opreme za položajno vodenje robotskega mehanizma

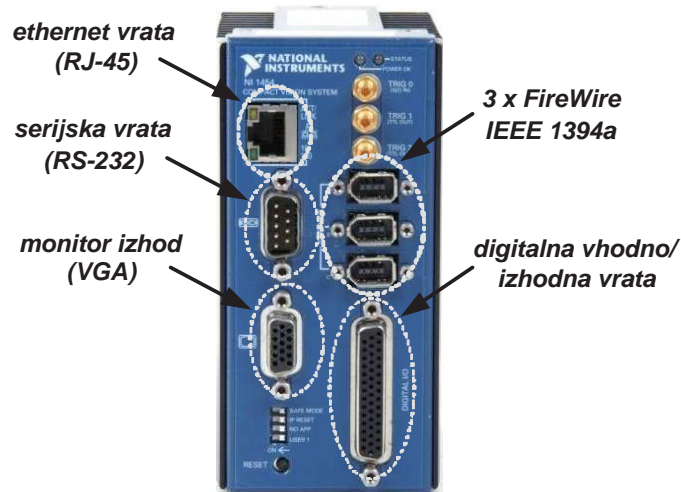
Za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma je bilo potrebno izdelati ustrezne napetostne ojačevalnike, sistem za meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma ter oboje povezati z ustrezno kontrolno-procesno enoto. Napetostni ojačevalniki morajo omogočati položajno vodenje vrha robotskega mehanizma z napetostjo, katere vrednost je odvisna od krmilnega signala na vhodu ojačevalnika. Zaradi nelinearnosti proge, ki jo povzročajo predvsem histereze v piezoelektričnih aktuatorjih, je položajno vodenje vrha robotskega mehanizma potrebno izvesti z uporabo ustreznih metod položajnega vodenja, ki se izvajajo na kontrolno-procesni enoti. Metode za položajno vodenje so večinoma osnovane na meritvi dejanske vrednosti položaja, kar pomeni, da je potrebno izdelati tudi učinkovit ter predvsem natančen sistem za meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma. Osnovni koncept za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma je v obliki blokovne sheme prikazan na sliki 3.1.

V začetni fazi načrtovanja sistema za položajno vodenje robotskega mehanizma je bilo precej raziskav usmerjenih k izbiri ustrezne opreme za meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma. Za meritev položaja s pod-mikrometersko natančnostjo so poznani principi, ki delujejo na osnovi kapacitivnih senzorjev, vendar so cene teh komponent precej visoke. Zaradi tega smo izbrali alternativno rešitev, kjer se dejanski položaj vrha robotskega mehanizma določi iz digitalne slike. V ta namen je bilo potrebno vzpostaviti merilni sistem



Slika 3.1: Blokovna shema sistema za položajno vodenje robotskega mehanizma

z optičnim mikroskopom in digitalno kamero, ki je pritrjena na optično pot mikroskopa. Z ustrezno programsko opremo se lahko v koordinatnem sistemu povečane slike določi položaj vrha robotskega mehanizma. Izbira takšnega merilnega sistema v nadaljevanju pogojuje tudi izbiro kontrolno-procesne enote, ki mora biti poleg zmogljivega procesorja opremljena tudi z vrati za zajem digitalnih slik. Izbrali smo *Compact Vision System 1456 (CVS-1456)* [31] proizvajalca *National Instruments*, ki je prikazan na sliki 3.2.



Slika 3.2: Kontrolno-procesna enota CVS-1456

Kontrolno-procesna enota CVS-1456 je opremljena s tremi *FireWire IEEE 1394a* vhodi, kar pomeni, da se lahko hkrati zajemajo slike iz treh digitalnih kamer. Za meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma je kljub vsemu potrebno uporabiti le eno digitalno kamero oziroma en vhod. Implementacija zmogljivega procesorja (*Intel Celeron 733 MHz*)

v kombinaciji z ustrezno programsko opremo omogoča zajem in procesiranje digitalnih slik v realnem času. Z uporabo VGA vrat in ustrezne programske opreme je omogočen tudi prikaz zajetih oziroma programsko obdelanih slik na računalniškem zaslonu.

Kontrolno-procesna enota CVS-1456 je opremljena tudi z digitalnimi vrati. Njihova funkcionalnost je določena s programiranjem polja programirljivih logičnih vrat (ang.: *Field Programmable Gate Array - FPGA*), ki predstavlja programirljivo vezje namenjeno za programiranje funkcionalnosti vhodno/izhodnih digitalnih vrat. Z ustreznim programiranjem je mogoče zagotoviti sočasno zajemanje in procesiranje signalov iz 15 digitalnih vhodov in generiranje signalov na 14 digitalnih izhodih.

Pomembni deli izbrane enote so ethernet vrata (*RJ-45*), ki omogočajo priključitev na omrežje, ali pa so uporabljena za direktno povezavo z drugim računalnikom preko kriznega (ang.: *cross-over*) kabla. Serijska vrata (*RS-232*) pa se lahko koristno uporabijo za povezavo z drugo elektronsko napravo v aplikacijah kjer je to potrebno.

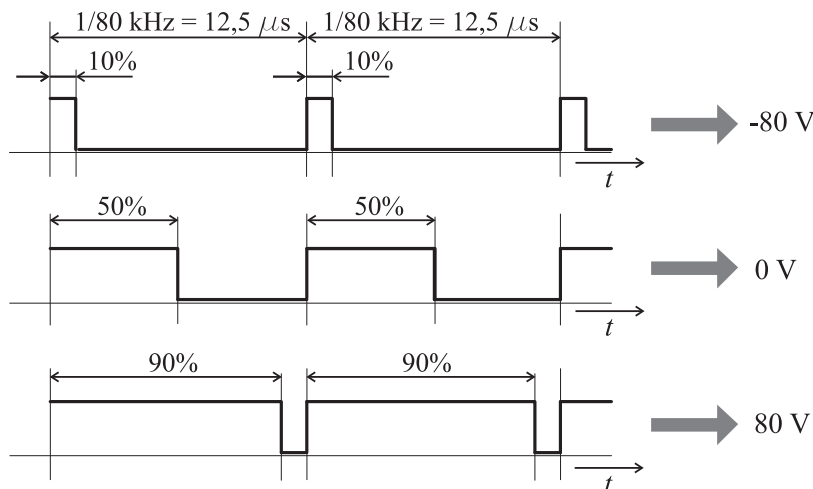
Razvoj sistema za vodenje robotskega mehanizma je pogojen oziroma prilagojen z izbiro optičnega merilnega sistema na osnovi digitalnih slik in kontrolno-procesno enoto CVS-1456. V nadaljevanju so predstavljene karakteristike izdelanih napetostnih ojačevalnikov, sistema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma in programske opreme za zajem in generiranje signalov ter obdelavo podatkov.

3.1 Napetostni ojačevalniki

Zgradba in delovanje napetostnih ojačevalnikov je na eni strani odvisna od vrste bremena, na drugi strani pa od izbire kontrolno-procesne enote oziroma od oblike krmilnih signalov. Piezoelektrični aktuator se kot breme v ekvivalentnem električnem tokokrogu lahko nadomesti z idealnim kondenzatorjem z ustrezno vrednostjo kapacitivnosti. Pri tem ni upoštevana disipacija energije, katere vrednost se veča predvsem z večanjem frekvence napajalne napetosti na piezoelektričnem aktuatorju. V primerih, kjer je zaradi visokih frekvenc delovanja potrebno upoštevati tudi disipacijo energije, se lahko piezoelektrični aktuator v ekvivalentnem tokokrogu nadomesti z zaporedno vezavo kondenzatorja in upora z ustrezno vrednostjo kapacitivnosti in upornosti [32]. Robotski mehanizem kljub vsemu ni namenjen za delovanje pri visokih frekvencah (to je >100 Hz), kar pomeni, da je disipacija energije v piezoelektričnih aktuatorjih zanemarljiva in ne vpliva na delovanje izdelanih napetostnih ojačevalnikov. Uporabljeni piezoelektrični aktuatorji se tako lahko pri izdelavi napetostnih ojačevalnikov smatrajo kot idealni kondenzatorji katerih izmerjena vrednost kapacitivnosti približno znaša

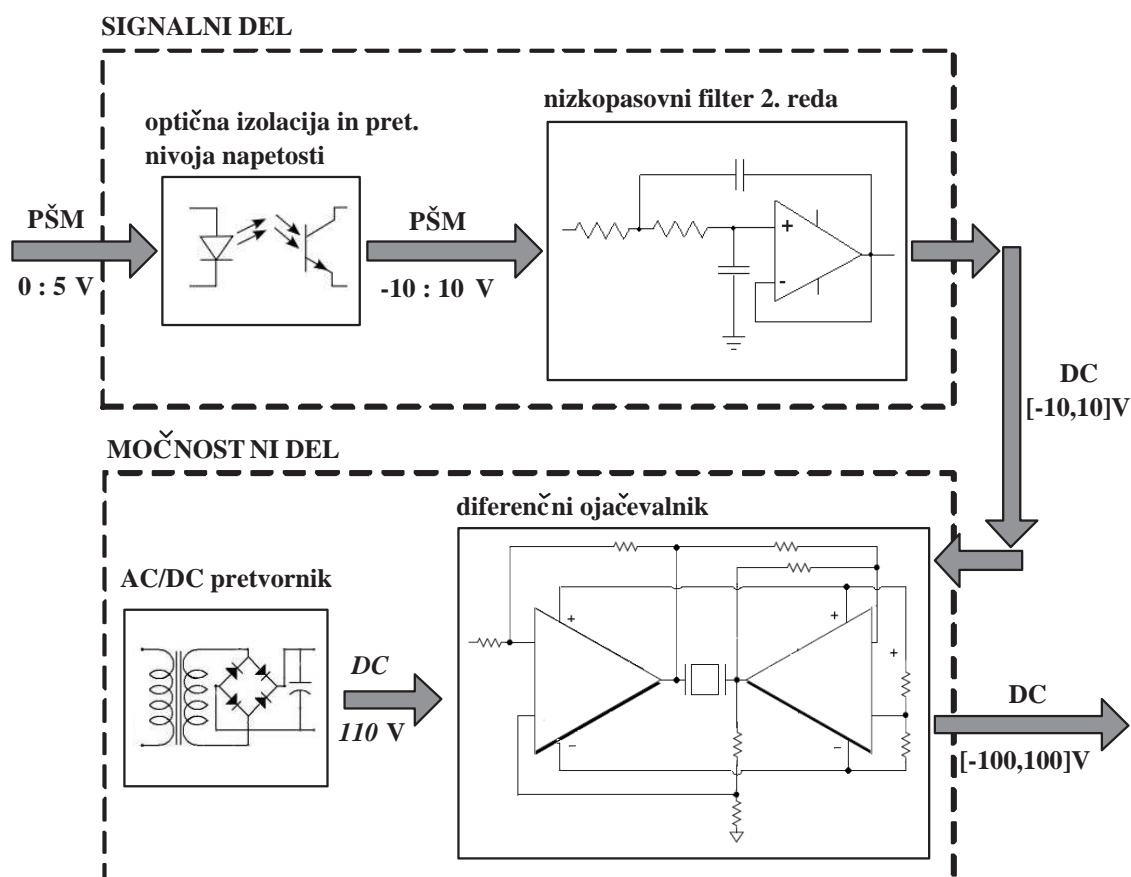
10 nF. Razlika napetosti na ploščah uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjih ne sme presegati 100 V, ker se v nasprotnem primeru zaradi previsoke vrednosti električnega polja piezoelektrični material uniči. To pomeni, da mora izdelani napetostni ojačevalnik v odvisnosti od krmilnega signala na vhodu ustvariti sorazmerno vrednost napetosti znotraj intervala $[-100, 100]$ V.

Kontrolno-procesna enota CVS-1456 ima 10 digitalnih izhodov s 5 V tranzistor-tranzistor logiko (TTL) in največjo hitrostjo prekopov 2 MHz. Za prenos krmilnih signalov iz kontrolno-procesne enote CVS-1456 na napetostni ojačevalnik je potrebno digitalni izhodni signal ustrezno modelirati. V ta namen je uporabljena pulzno-širinska modulacija (PŠM) z izbrano nosilno frekvenco PŠM signala 80 kHz. Širina pulza (ang.: *duty cycle*), ki se spreminja znotraj periode pulza, predstavlja krmilno informacijo o željeni izhodni napetosti ojačevalnika. Zaželeno je, da je izhodna napetost ojačevalnika linearno odvisna od širine pulza. Na sliki 3.3 so v procentih prikazani trije primeri širine pulza (10%, 50% in 90%), ko je želena izhodna napetost ojačevalnika sorazmerno enaka -80 V, 0 V oziroma 80 V. Širina pulza se lahko spreminja od vrednosti 0% do 100%, kar pomeni, da je interval izhodnih napetosti ojačevalnika enak $[-100, 100]$ V.



Slika 3.3: Napetost ojačevalnika v odvisnosti od širine pulza PŠM signala

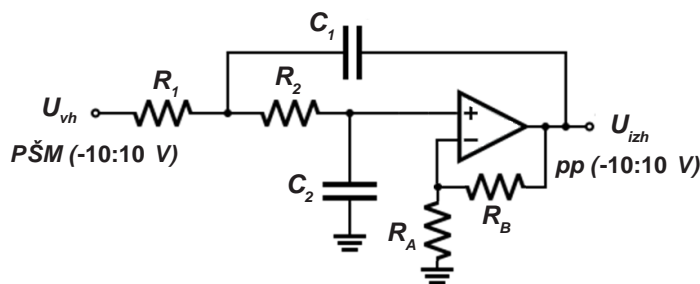
Izdelani napetostni ojačevalnik je sestavljen iz signalnega in močnostnega dela. Signalni del je namenjen galvaniski ločitvi napetostnega ojačevalnika od kontrolno-procesne enote in pretvorbi PŠM krmilnega signala v analogni signal z amplitudo v intervalu $[-10, 10]$ V. V močnostnem delu je diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s pripadajočimi elementi in 110 V napetostni usmernik. Na sliki 3.4 je prikazana blokovna shema izdelanega napetostnega ojačevalnika za napajanje enega piezoelektričnega aktuatorja.



Slika 3.4: Blokovna shema napetostnega ojačevalnika

3.1.1 Napetostni ojačevalniki - signalni del

Nosilna frekvenca krmilnega PŠM signala na vhodu napetostnih ojačevalnikov je kot rečeno 80 kHz z nivojem 0 V oziroma 5 V. Optični spojnik proizvajalca *Hewlett Packard* z oznako HCPL-3120 je namenjen galvanski ločitvi kontrolno-procesne enote CVS-1456 od napetostnega ojačevalnika in pretvorbi nivojev napetosti. Na izhodni strani optičnega spojnika je galvansko ločen PŠM signal z isto nosilno frekvenco in nivojem napetosti -10 V oziroma 10 V, pri čemer se vhodni nivo 0 V pretvori v -10 V, vhodni nivo 5 V pa se pretvori v 10 V. Tako napetostno preoblikovani PŠM signal se nato z uporabo nizko-pasovnega filtra 2. reda ustrezno usmeri. V odvisnosti od širine pulza na izhodu filtra dobimo usmerjeno napetost z amplitudo v intervalu [-10, 10] V. Uporabljeni nizko-pasovni filter 2. reda je implementiran s tako imenovano *Sallen-Key* topologijo, ki je v elektroniki cenjena zaradi enostavnosti izvedbe. Na sliki 3.5 je prikazana osnovna topologija tega elektronskega vezja, ki je izvedeno s kombinacijo štirih uporov, dveh kondenzatorjev in operacijskega ojačevalnika v neinverzirajoči vezavi z oznako TL081 (proizvajalec *ST Microelectronics*).

Slika 3.5: Nizko-pasovni filter 2. reda (*Sallen-Key* topologija)

Vrednosti uporov R_A in R_B (slika 3.5) določajo prestavno razmerje med vhodno in maksimalno izhodno napetostjo filtra. Pri implementaciji napetostnega ojačevalnika za napajanje piezoelektričnih aktuatorjev je uporabljena enostavna izvedba *Sallen-Key* nizko-pasovnega filtra brez uporov R_A in R_B . To pomeni, da je vrednost prestavnega razmerja tako poenostavljenega filtra enaka 1, oziroma, da je amplituda vhodnega PŠM signala enaka maksimalni amplitudi izhodne napetosti [33].

Komponente filtra (upori in kondenzatorji) določajo prenosno funkcijo filtra, ki je v slikovnem prostoru določena z enačbo

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}}(s) = \frac{1}{s^2 \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s \omega_c C_1 (R_1 + R_2) + 1}, \quad (3.1)$$

kjer je ω_c lomna frekvenca filtra. Če velja, da je $a_1 = \omega_c C_1 (R_1 + R_2)$ in $b_1 = \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2$, lahko upora R_1 in R_2 določimo s pomočjo enačbe

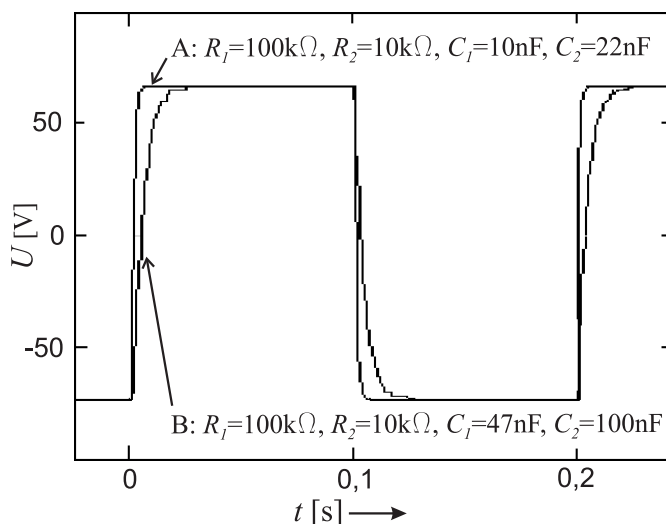
$$R_{1,2} = \frac{a_1 C_2 \mp \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2}}{4\pi f_c C_1 C_2}. \quad (3.2)$$

Da ima kvadratni koren v enačbi 3.2 samo realne vrednosti, mora vrednost kondenzatorja C_2 zadostiti pogoju, ki je podan z enačbo

$$C_2 \geq C_1 \frac{4b_1}{a_1^2}. \quad (3.3)$$

Predstavljeni nizko-pasovni filter ima kot del izdelanih napetostnih ojačevalnikov pomemben vpliv na položajno vodenje robotskega mehanizma. Z izbiro ustreznih vrednosti komponent filtra (kondenzatorjev in uporov) lahko odločilno vplivamo na obliko krmilne napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih. Na sliki 3.6 so prikazani stopnični odzivi napetostnega ojačevalnika pri različnih vrednostih komponent nizko-pasovnega filtra, in sicer:

- odziv A: $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $C_1 = 10\text{nF}$, $C_2 = 22\text{nF}$;
- odziv B: $R_1 = 100\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$, $C_1 = 47\text{nF}$, $C_2 = 100\text{nF}$.



Slika 3.6: Diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s piezo. aktuatorjem

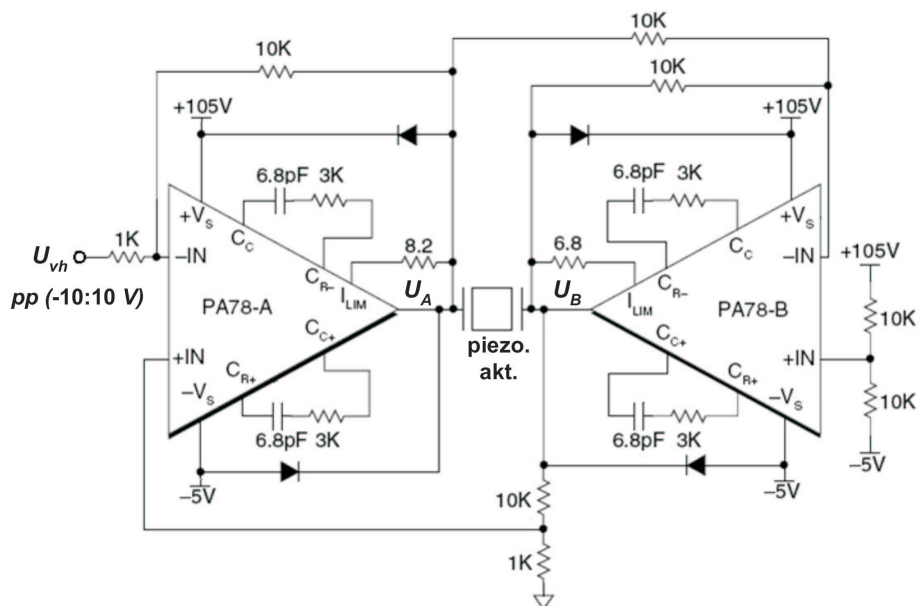
Oblika krmilne napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih je torej dokazano odvisna od izbranih komponent nizko-pasovnega filtra. Zaradi tega dejstva ima lahko napetostni ojačevalnik navsezadnje precejšen vpliv na delovanje oziroma na položajno vodenje robotskega mehanizma. Pri položajnem vodenju robotskega mehanizma v odprti zanki z uporabo linearnega pred-krmilnika (Poglavje 4.3) smo ugotovili, da lahko z "glajenjem" odziva filtra (odziv B na sliki 3.6) odpravimo oscilacije pri stopničnem odzivu, ki so posledica dinamike robotskega mehanizma. Predstavljeno možnost vplivanja na delovanje nizko-pasovnega filtra oziroma napetostnih ojačevalnikov smo kot je prikazano v nadaljevanju (slike 4.6 do 4.9) izkoristili tudi pri položajnem vodenju robotskega mehanizma.

3.1.2 Napetostni ojačevalniki - močnostni del

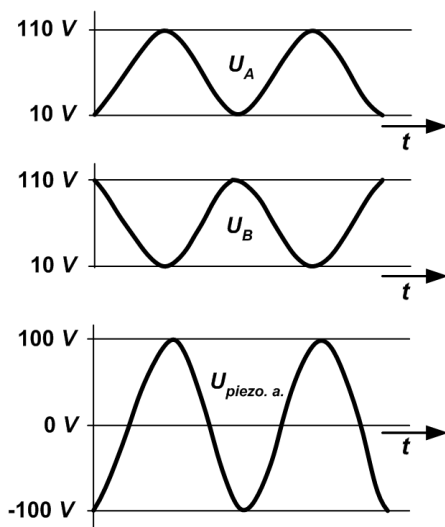
Močnostni del napetostnih ojačevalnikov je zgrajen na osnovi diferenčnega para operacijskih ojačevalnikov z oznako PA78 proizvajalca *Apex Microtechnology* [34]. Na sliki 3.7 je prikazan diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s pripadajočimi elementi. Takšna vezava ima v primerjavi s simetričnim napajanjem in uporabo enega operacijskega ojačevalnika mnogo prednosti. Znano je, da diferenčni par operacijskih ojačevalnikov močno duši signale motenj. Poleg tega omogoča, da vse nelinearnosti enega operacijskega ojačevalnika postanejo pri uporabi dveh simetrične. Vezava omogoča v primerjavi s simetričnim napajanjem uporabo le enega napetostnega usmernika.

Napetostno ojačanje diferenčnega para operacijskih ojačevalnikov se nastavi z razmerjem vhodne upornosti, ki je enaka 10. Tako pri krmiljenju diferenčnega para operacijskih ojačevalnikov z napetostjo v intervalu $[-10, 10]$ V dobimo na izhodu močnostnega napajalnika

napetost v intervalu $[-100, 100]$ V. Na sliki 3.8 so prikazane izhodne napetosti vsakega operacijskega ojačevalnika iz diferenčnega para in vsota teh dveh napetosti na piezoelektričnem aktuatorju. Piezoelektrični aktuator je v tej vezavi priključen na tako imenovano virtualno maso.



Slika 3.7: Diferenčni par operacijskih ojačevalnikov s piezo. aktuatorjem



Slika 3.8: Napetost piezo. aktuatorja v odvisnosti od izhoda op. ojačevalnikov

Za napajanje močnostnega dela napetostnega ojačevalnika je potrebno zagotoviti dovolj visoko napetost zbiralke. V ta namen smo izdelali napetostni usmernik, ki ga je mogoče priključiti na napetostno omrežje in na svojem izhodu zagotavlja 110 V enosmerne napetosti. Napetostni usmernik je izdelan z uporabo diodnega mostiča.

3.2 Oprema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma

Načrtovanje in izdelava sistema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma predstavlja zaradi izjemne natančnosti meritve enega od zahtevnejših problemov pri implementaciji sistema za položajno vodenje robotskega mehanizma. Meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma je izvedena z uporabo opreme za zajem in obdelavo digitalne povečane slike. V ta namen je tako implementiran sistem z optičnim mikroskopom in digitalno kamero, ki je opisan v nadaljevanju.

3.2.1 Meritev položaja robotskega mehanizma s kamero

Svetlobni mikroskop je instrument, ki omogoča optično povečavo zelo majhnih predmetov. V primeru, ko se vzorec z uporabo okularjev opazuje vizualno (z očmi), se povečava mikroskopa izračuna kot produkt povečave objektiva in povečave okularja. V primeru, ko se za opazovanje vzorca uporablja kamera, slika pa se prikazuje na računalniškem zaslonu, se povečava v horizontalni smeri (P_h) izračuna z enačbo

$$P_h = p_o p_c \frac{d_{h,m}}{d_{h,k}} \frac{n_{h,k}}{n_{h,m}}, \quad (3.4)$$

povečava v vertikalni smeri (P_v) pa se izračuna z enačbo

$$P_v = p_o p_c \frac{d_{v,m}}{d_{v,k}} \frac{n_{v,k}}{n_{v,m}}. \quad (3.5)$$

V enačbah 3.4 in 3.5 je p_o povečava objektiva, p_c je povečava adapterja (ang.: *C-mount adapter*), $d_{h,m}/d_{h,k}$ je razmerje med širino računalniškega zaslona in širino senzorja kamere, $n_{h,k}/n_{h,m}$ je razmerje med številom slikovnih točk na sliki in številom slikovnih točk na računalniškem zaslonu v horizontalni smeri, $d_{v,m}/d_{v,k}$ je razmerje med višino računalniškega zaslona in višino senzorja kamere in $n_{v,k}/n_{v,m}$ je razmerje med številom slikovnih točk na sliki in številom slikovnih točk na računalniškem zaslonu v vertikalni smeri. Poleg povečave je pomembna lastnost mikroskopa ločljivost, ki določa najmanjšo razdaljo, pri kateri še lahko razločimo dve sosednji točki. Zaradi uklona svetlobe ni mogoče doseči neskončno velikih optičnih povečav, saj se svetlobni žarek na robu leče ukloni in posledično širi tudi v geometrijsko senco. Zaradi uklona se svetla točka ne preslika v točko, ampak v nekoliko večjo liso z zabrisanimi robovi. Če se lisi dveh sosednjih točk prekrivata, iz slike ne moremo več ugotoviti, ali gre za sliko ene same točke ali pa za prekrivajoči se sliki dveh ali več točk. Praktično dosegljiva ločljivost optičnih mikroskopov je približno $0.2 \mu\text{m}$.

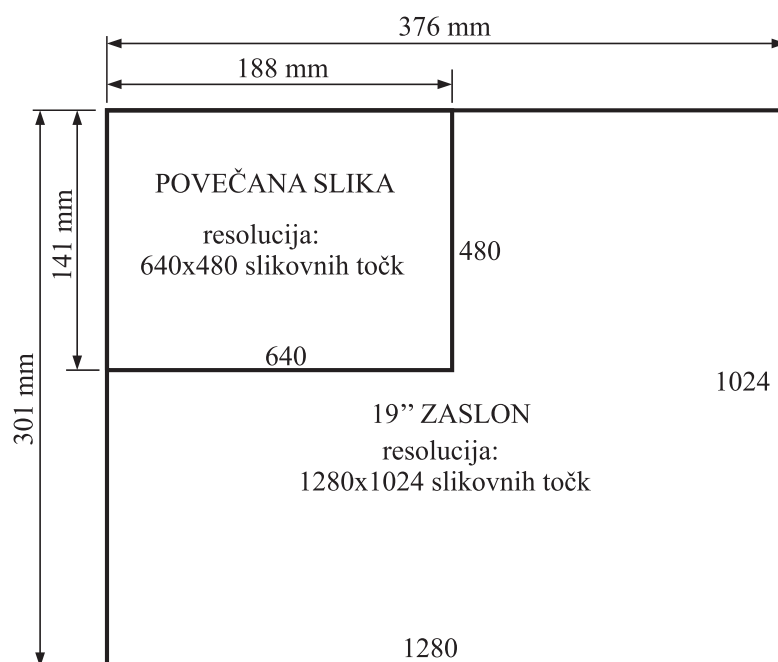
Pri postavitvi sistema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma je uporabljen metalografski mikroskop z oznako ME.2665 proizvajalca *EUROMEX*. V osnovi je ta mikroskop namenjen za raziskave kovinskih in plastičnih površin. Mikroskop ima triokularno glavo, ki poleg vizualnega opazovanja vzorcev preko okularjev omogoča tudi pritrnitev in zajem slike s kamero. Na revolverski glavi so objektivni z različnimi povečavami (4-krat, 10-krat, 40-krat, 100-krat). Za meritev položaja vrha robotskega mehanizma se uporablja objektiv s 100-kratno povečavo. Kamera je na mikroskop pritrjena z uporabo *C-mount* adapterja, ki predstavlja optično-mehansko povezavo med njima.

Za zajem slike je uporabljena digitalna kamera proizvajalca *Allied Vision Technology* z oznako *AVT Pike F032C*. Ena od prednosti te kamere je visoka hitrost zajemanja slik, saj lahko pri 8-bitni globini točke in pri resoluciji 640×480 točk zajame tudi do 200 slik na sekundo. Omenjena hitrost zajemanja pa v sistemu za meritev položaja vrha robotskega mehanizma s kamero ni popolnoma izkoriščena, saj kontrolno-procesna enota *CVS-1456* preko *FireWire IEEE 1394a* povezave omogoča prenos podatkov oziroma slik z hitrostjo do 400 Mb/s. Pri omenjeni 8-bitni globini in resoluciji slike 640×480 točk ta hitrost prenosa podatkov oziroma slik v praksi omogoča prenos do 100 slik na sekundo. Omenjena omejitev hitrosti prenosa digitalnih slik predstavlja omejitev tudi pri implementaciji položajnega vodenja, saj je hitrost osveževanja meritve dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma tako omejena na 10 ms.

Meritev položaja vrha robotskega mehanizma je izvedena v koordinatnem sistemu kamere. Koordinatno izhodišče slike se nahaja v zgornjem levem kotu slike, položaj vrha robotskega mehanizma pa je podan s številom slikovnih točk od koordinatnega izhodišča v vertikalni in v horizontalni smeri. Število točk v horizontalni in vertikalni smeri je enako 640 oziroma 480 točk. Vsaka slikovna točka na sliki predstavlja končno velik del opazovanega območja, ki je predstavljeno v mikrometrih. Širina opazovanega območja je enaka produktu vseh točk v horizontalni smeri in dolžini ene slikovne točke. Višina opazovanega območja pa je enaka produktu vseh točk v vertikalni smeri in višini ene slikovne točke.

Pri določitvi velikosti opazovanega območja se najprej z uporabo enačb 3.4 in 3.5 izračuna povečava optičnega merilnega sistema v horizontalni in vertikalni smeri. Za meritev položaja vrha robotskega mehanizma se kot rečeno uporablja objektiv s 100-kratno povečavo, povečava adapterja je 0,45-kratna, razmerje med širino računalniškega monitorja ($19''$) in širino senzorja na kameri pa je enako 79,7 (to je $376,0 \text{ mm} / 4,72 \text{ mm}$). Pri resoluciji računalniškega monitorja 1280×1024 slikovnih točk je izračunana povečava optičnega merilnega

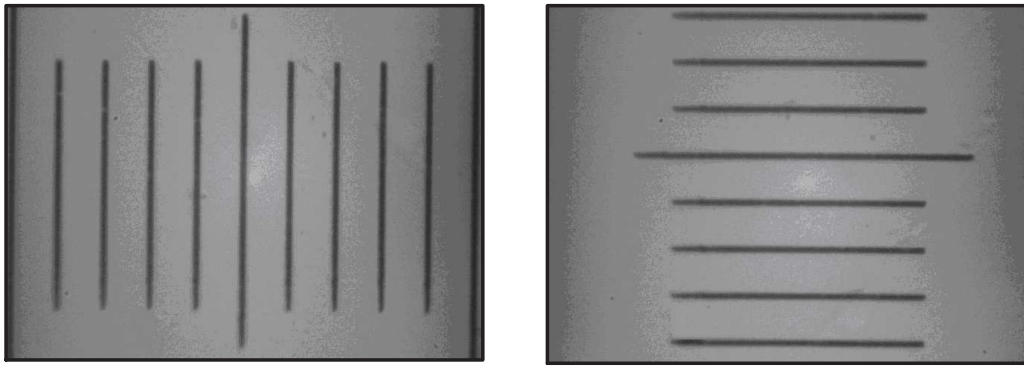
sistema v horizontalni smeri enaka 1793-krat. Podobno kot v horizontalni smeri, se izračuna povečava v vertikalni smeri. Razmerje med širino računalniškega monitorja (19") in širino senzorja na kameri je enako 85,0 (to je 301,0 mm/3,54 mm). To pomeni, da je povečava optičnega merilnega sistema v vertikalni smeri enaka 1793-krat, kar je pričakovano isto kot v horizontalni smeri. Na sliki 3.9 so shematsko prikazane dimenzije 19-inčnega računalniškega zaslona z resolucijo 1280×1024 slikovnih točk in povečane slike z resolucijo 640×480 slikovnih točk.



Slika 3.9: Velikost povečane (zajete) slike na 19" računalniškem zaslonu

Iz slike 3.9 je razvidno, da 640 slikovnih točk v horizontalni smeri predstavlja 188 mm širine in da 480 slikovnih točk v vertikalni smeri predstavlja 141 mm višine 19-inčnega računalniškega zaslona z resolucijo 1280×1024 slikovnih točk. Ta okvir predstavlja 1793-krat povečano opazovano območje. Povedano drugače, širina in višina opazovanega območja sta 1793-krat manjši od okvirja na računalniškem zaslonu in tako znašata $105 \mu\text{m}$ v horizontalni smeri in $79 \mu\text{m}$ v vertikalni smeri.

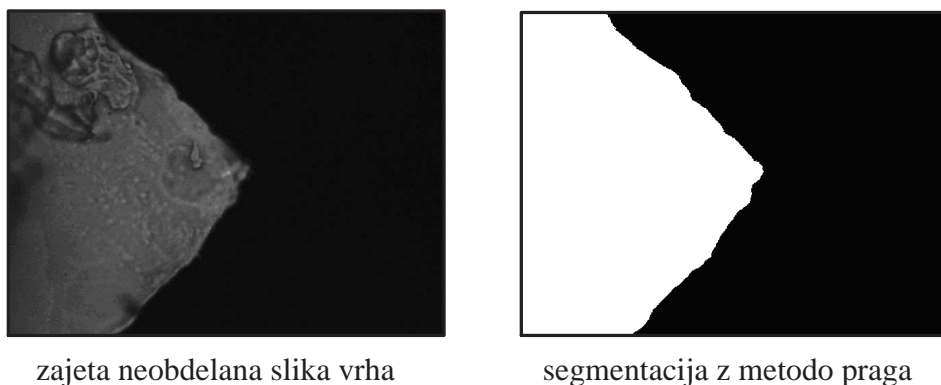
Izračunana velikost opazovanega območja je potrjena z enostavnim eksperimentom, ki je bil izveden z uporabo mikrometrške merilne skale. Mikrometrška merilna skala z $10 \mu\text{m}$ razmikom med črticami se je postavila pod objektiv, nakar se je na računalniški monitor zajela ena slika za horizontalno smer in ena slika za vertikalno smer (slika 3.10). Na podlagi preštetihih oznak na skali je bilo potrjeno, da velikost opazovanega območja znaša $105 \mu\text{m}$ v horizontalni smeri in $79 \mu\text{m}$ v vertikalni smeri.



Slika 3.10: Povečana (zajeta) slika mikrometrške skale z razmikom črtic $10 \mu\text{m}$

Pri meritvi položaja vrha robotskega mehanizma znotraj koordinatnega sistema slike je potrebno sliko razdeliti oziroma segmentirati na regije tako, da te jasno zaznamujejo vrh robotskega mehanizma znotraj slike. Poznanih je več pristopov za segmentacijo digitalnih slik, od katerih smo za določitev vrha robotskega mehanizma uporabili regijsko segmentacijo in segmentacijo z iskanjem robov na sliki [35].

Pri regijski segmentaciji je potrebno vse slikovne točke, ki pripadajo določenemu objektu, grupirati in označiti tako, da jasno zaznamujejo eno regijo na sliki. Slikovne točke pripadajo izbrani regiji, če ustrezajo določenemu pogoju, ki se razlikuje od ostale slike. Dva zelo pomembna principa pri regijski segmentaciji sta podobna vrednost (ang.: *value similarity*) in prostorsko sosedstvo (ang.: *spatial proximity*). To dvojje izhaja iz dejstva, da sta dve slikovni točki najverjetneje dodeljeni isti regiji, če imata podobne intenzivne karakteristike in sta v neposredni bližini. Principa podobnosti in sosedstva izhajata iz dejstva, da se točke na objektu projicirajo v slikovne točke na sliki, ki so prostorsko v neposredni bližini in imajo podobne sive vrednosti. V enostavnih primerih lahko regijsko segmentacijo izvedemo z metodo praga (ang.: *threshold method*). Pri 8-bitni globini slikovne točke lahko izbiramo med 256 različnimi vrednostmi praga - to je od 0 do 255. Pri tem vse slikovne točke, ki imajo manjšo vrednost od vrednosti praga, enostavno izločimo iz slike oziroma jim dodelimo vrednost 0, kar na sliki predstavlja črno barvo. Slikovne točke, ki imajo enako ali večjo vrednost od vrednosti praga pa pustimo nespremenjene ali pa jim dodelimo novo vrednost (npr. 255, kar na sliki predstavlja belo barvo). S tem postopkom lahko ločimo regije (vrh robotskega mehanizma) z večjo sivinsko vrednostjo slikovnih točk od ozadja, kjer imajo slikovne točke manjšo sivinsko vrednost (temnejše ozadje). Na sliki 3.11a je prikazana povečana slika vrha robotskega mehanizma, na sliki 3.11b pa je prikazana povečana slika vrha robotskega mehanizma po segmentaciji s pragovno metodo.



Slika 3.11: Segmentacija slike s pragovno metodo

Segmentacija digitalne slike se lahko izvede tudi z iskanjem slikovnih točk, ki ležijo na meji regij. Te slikovne točke se imenujejo robovi. Robovi se na sliki poiščejo z meritvijo razlike sivinske intenzitete med sosednjimi slikovnimi točkami. Rob na sliki je pomembna lokalna sprememba, ki se kaže kot povečana sprememba sivinske vrednosti ali prvega odvoda sivinske vrednosti med sosednjimi slikovnimi točkami. Rob se lahko kaže v obliki stopnične spremembe, kjer se sivinska vrednost na eni strani nenadoma spremeni v drugo sivinsko vrednost na drugi strani. Stopnične in linijske spremembe so na slikah redke zaradi nizkofrekvenčnih komponent in glajenja, ki ga ni mogoče popolnoma odpraviti pri zajemu slike. Stopnični robovi tako postanejo robovi z obliko rampe in linijski robovi postanejo robovi z obliko strehe, ker spremembe intenzitete pikselov niso trenutne, pač pa se zgodijo na nekem omejenem intervalu. V eni dimenziji se stopnična sprememba oziroma rob kaže kot lokalni vrh prvega odvoda sivinskih vrednosti [36].

Slika se lahko v matematični obliki zapiše kot dvo-dimenzionalno polje vrednosti funkcije sivinskih vrednosti $f(x, y)$, kjer x predstavlja horizontalno smer na sliki, y pa vertikalno smer na sliki. Gradient je merilo spremembe funkcije, zato se lahko pomembne spremembe sivinskih vrednosti na sliki zaznajo z diskretno ocenitvijo gradienta. Gradient digitalne slike $\mathbf{G}[f(x, y)]$ je dvodimenzionalen ekvivalent prvega odvoda in je definiran kot vektor

$$\mathbf{G}[f(x, y)] = [G_x, G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T, \quad (3.6)$$

kjer je G_x odvod slike v horizontalni smeri, G_y pa odvod slike v vertikalni smeri.

Vektor gradienta slike kaže v smeri največje spremembe funkcije sivinskih vrednosti. Gradient je enak največjemu povečanju funkcije sivinskih vrednosti na enoto razdalje v smeri gradienta. Absolutna vrednost gradienta slike se izračuna z enačbo

$$G[f(x, y)] = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3.7)$$

Splošno znana praksa je, da se aproksimacija absolutne vrednosti gradienta zapiše kot

$$G[f(x, y)] \approx |G_x| + |G_y| \approx \max(|G_x|, |G_y|). \quad (3.8)$$

Iz vektorske analize je znano, da se smer gradienta izračuna z enačbo

$$\varphi_{\mathbf{G}[f(x,y)]} = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right), \quad (3.9)$$

kjer je kot $\varphi_{\mathbf{G}[f(x,y)]}$ meri glede na x os.

Aproksimacija odvodov v digitalnih slikah se lahko zapiše z diferenciali, kot je predstavljano z enačbo 3.6. Najpreprostejša aproksimacija odvodov v horizontalni smeri (G_x) in vertikalni smeri (G_y) je podana z enačbo

$$\begin{aligned} G_x &\cong f[v, h + 1] - f[v, h], \\ G_y &\cong f[v, h] - f[v + 1, h], \end{aligned} \quad (3.10)$$

kjer h sovpada s pozitivno x smerjo, v pa z negativno y smerjo. Takšna enostavna aproksimacija odvodov se lahko zapiše tudi v obliki tako imenovane konvolucijske maske kot

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

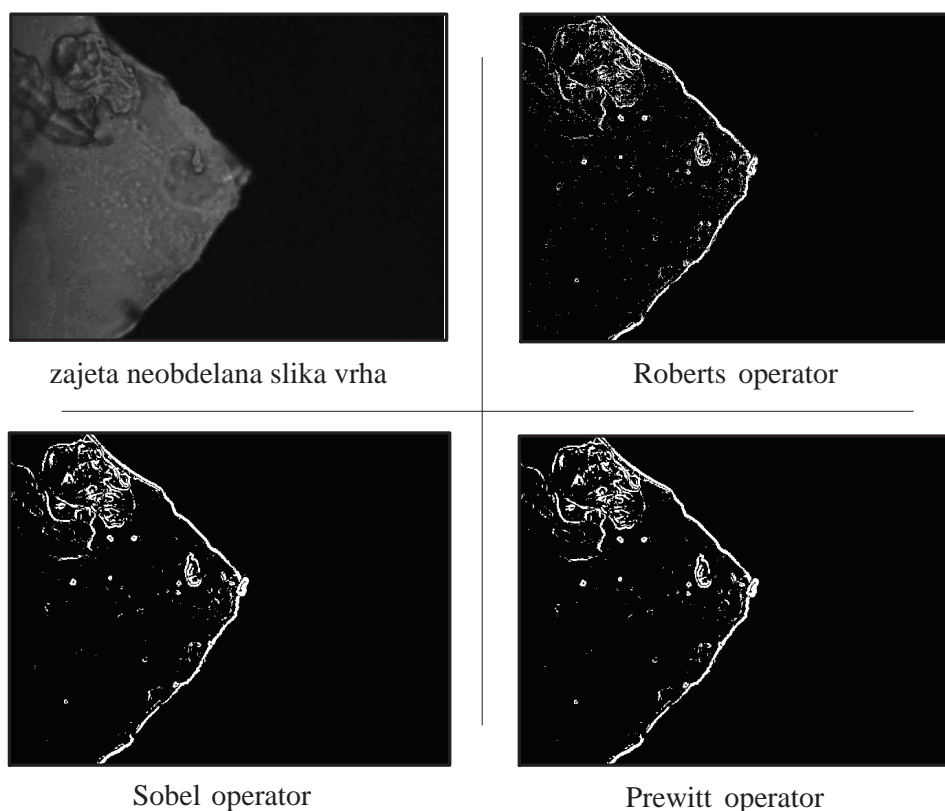
Pri aproksimaciji gradienta je pomembno, da so parcialni odvodi izračunani za isto točko na sliki. Zgornja aproksimacija G_x je v bistvu aproksimacija v interpolacijski točki $[v, h + \frac{1}{2}]$ in G_y je aproksimacija v interpolacijski točki $[v + \frac{1}{2}, h]$. Zaradi tega razloga se za izračun parcialnih odvodov pogosteje uporabljajo 2×2 diferenciali, ki se zapišejo kot

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

V tem primeru se točka, za katero je izračunan gradient, nahaja na sredini med štirimi slikovnimi točkami. Še boljše je, če se uporabi 3×3 konvolucijska maska, s pomočjo katere se gradient izračuna za slikovno točko na sredini med 9 slikovnimi točkami. Na osnovi gradientnega postopka za zaznavo robov so bili razviti postopki, kot so Roberts operator, Sobel operator in Prewitt operator. Razlika med naštetimi operatorji je ta, da za izračun robov na sliki z opisanim gradientnim postopkom uporabljajo različne konvolucijske maske, ki so predstavljene v nadaljevanju kot

$$\begin{aligned}
 \text{Roberts operator : } G_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\
 \text{Sobel operator : } G_x &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}; \\
 \text{Prewitt operator : } G_x &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Rezultati segmentacije slike z gradientno metodo zaznavanja robov z naštetimi operatorji so prikazani na sliki 3.12.



Slika 3.12: Segmentacija slike z gradientnimi metodami zaznavanja robov

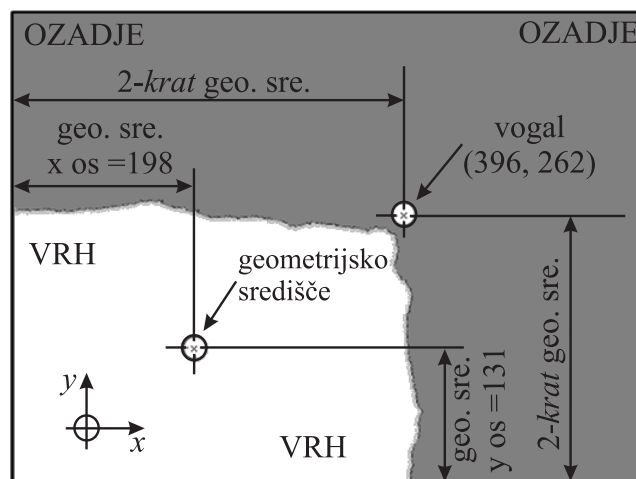
Rezultati segmentacije slike z gradientnimi metodami zaznavanja robov so neuporabni, saj je površina vrha robotskega mehanizma hrapava oziroma vsebuje napake, ki jih te metode zaznajo kot robove. Zaradi tega dobimo mnogo odvečnih robov, ki jih imenujemo tudi napačno pozitivni robovi (ang.: *false positives*). Poleg tega algoritmi za segmentacijo slike z gradientnimi metodami zavzamejo veliko procesorske moči. Na podlagi teh ugotovitev je segmentacija slike za določitev vrha robotskega mehanizma izvedena s pragovno metodo.

Po segmentaciji slike je potrebno izbrati točko opazovanja, ki predstavlja položaj oziroma koordinate vrha robotskega mehanizma. V ta namen smo izbrali zgornji desni vogal vrha robotskega mehanizma (slika 3.13). Geometrijsko središče vrha se izračuna z uporabo enačb

$$T_x = \frac{\sum f(x, y) \cdot x}{\sum f(x, y)}, \quad (3.14)$$

$$T_y = \frac{\sum f(x, y) \cdot y}{\sum f(x, y)}, \quad (3.15)$$

za horizontalno in za vertikalno smer. Pri tem je vrednost funkcije sivinskih vrednosti $f(x, y)$ po segmentaciji slike s pragovno metodo enaka 0 ali 1. Pri določitvi določitvi koordinat vogala s na osnovi koordinat geometrijskega središča je potrebno tudi zagotoviti, da je orientacija vrha robotskega mehanizma enaka orientaciji slike, kar pomeni, da so robovi vrha vzporedni z okvirjem slike. Ker ima vrh v tem primeru obliko paralelograma, se lahko položaj vrha robotskega mehanizma izračuna kot *2-kratnik* geometrijskega središča.

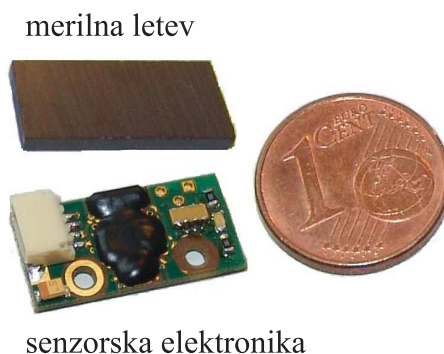


Slika 3.13: Izračun položaja vrha robotskega mehanizma po segmentaciji slike

Kljub dejstvu, da je sistem za meritev položaja vrha robotskega mehanizma s kamero uspešno implementiran, se pri uporabi tega merilnega pristopa pojavlja mnogo omejitev. Prvo omejitev predstavlja sorazmerna počasnost zajemanja slike, ki je lahko največ 100 slik/s. Poleg tega je procesiranje zajetih slik na kontrolno-procesni enoti zahtevno in zato zavzame veliko procesorske moči. Zaradi neidealne oblike vrha robotskega mehanizma je metoda določitve koordinat vrha z računanjem geometrijskega središča le približna. Poleg vsega pa zaradi sorazmerno velike povečave optičnega sistema na natančnost meritev močno vpliva osvetljenost scene in položaj vrha v sliki. Navedena dejstva omejujejo praktično uporabo tega sistema, zaradi česar je implementirana alternativna metoda za meritev položaja vrha robotskega mehanizma, ki je opisana v naslednjem podpoglavju.

3.2.2 Meritev položaja robotskega mehanizma z inkrementalnimi dajalniki

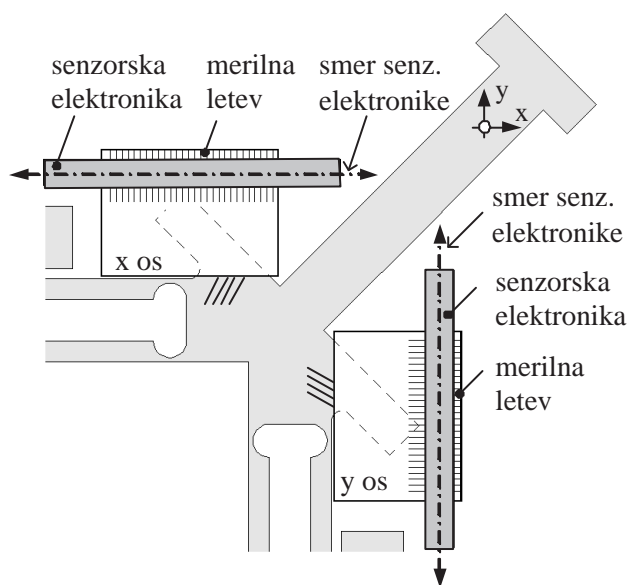
Zaradi praktičnih omejitev, ki so se pojavile pri implementaciji sistema za meritev položaja vrha robotskega mehanizma s kamero, smo raziskali alternativno rešitev, ki je osnovana na uporabi linearnih inkrementalnih dajalnikov proizvajalca *NANOS Instruments GmbH* [37]. Inkrementalni dajalniki delujejo kot magnetni senzorji v kombinaciji z merilno letvijo iz feritne keramike, ki ima na površini vdelano magnetno skalo s širino 3 mm in z delitvijo 500 μm . Merilna letev je debeline 2 mm in širine 8 mm. Najmanjša dolžina merilne letve mora biti vsaj 5 mm, nadaljnjo večanje njene dolžine pa je odvisno od velikosti merilnega območja, ki lahko znaša tudi do 300 mm ali več. Na sliki 3.14 sta prikazana senzorska elektronika in merilna letev ter kovanec za primerjavo velikosti.



Slika 3.14: Senzorska elektronika z merilno letvijo

Senzorska elektronika na izhodu generira dva pravokotna TTL signala (signal A in signal B) z amplitudo 5 V, ki v korakih predstavljata položaj merilne letve. Vrednost minimalnega koraka na izhodu inkrementalnega dajalnika je odvisna od interpolacijskega faktorja in v primeru uporabljene 13-bitne binarne interpolacije znaša 61 nm. Z večanjem interpolacijskega faktorja ter s tem natančnosti koraka se zmanjšuje dovoljena hitrost gibanja merilne letve. Dovoljena hitrost gibanja pa je odvisna tudi od kontrolno-procesne enote CVS-1456, s pomočjo katere se zajemata A in B signala. Frekvenca izhodnih A in B signalov senzorske elektronike se določi pri naročilu in znaša največ 4 MHz. V sistemu za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma maksimalna frekvenca ni izkoriščena, saj kontrolno-procesna enota CVS-1456 ne omogoča zajemanje digitalnih signalov s frekvenco, ki je višja od 100 kHz. Ta pomeni, da je pri naročilu inkrementalnih dajalnikov potrebno določiti frekvenco izhodnih A in B na 100 kHz. Na podlagi tega je bilo ugotovljeno, da je največja hitrost vrha robotskega mehanizma v eni osi, ki jo merilni sistem z inkrementalnimi dajalniki in kontrolno-procesno enoto še uspe procesirati, enaka 6,1 mm/s.

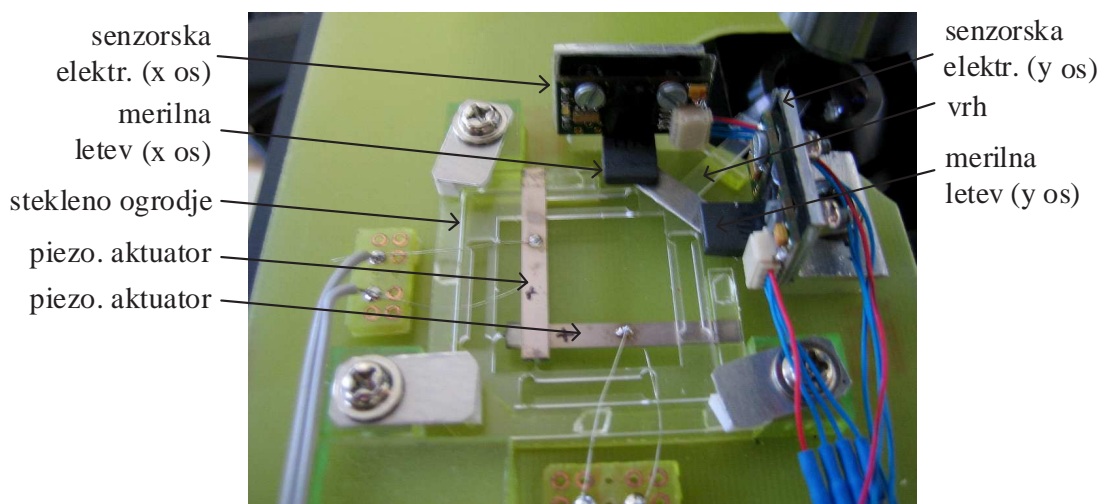
Izbrani inkrementalni dajalniki so v osnovi namenjeni meritvi položaja linearnih Piezo LEGS[®] motorjev. Za uspešno meritev položaja je med senzorsko elektroniko in merilno letvijo potrebno zagotoviti ustrezen geometrijski položaj. Prvi pogoj je, da senzorska elektronika in merilna letev nista v mehanskem kontaktu, saj to v sistem položajnega vodenja vnaša nepotrebno trenje, na drugi strani pa razdalja med elementoma ne sme biti večja od 0,1 mm. Nadalje je potrebno zagotoviti, da je senzorska elektronika nameščena čim bolj pravokotno glede na površino merilne letve oziroma na ravnino magnetenja, saj je dovoljeno odstopanje znotraj intervala $\pm 5^\circ$. Tretji pogoj predstavlja dejstvo, da mora biti smer gibanja med merilno letvijo in senzorsko elektroniko pravokotna glede na 3 mm široko magnetno skalo na letvi. Ta pogoj pri enoosnih sistemih z enim inkrementalnim dajalnikom ni težko zagotoviti, problem pa lahko nastane pri meritvi položaja v več smereh, kjer ni zagotovljeno, da je relativna smer gibanja v vsaki smeri pravokotna glede na magnetne skalo v tej smeri. Rešitev tega problema pri implementaciji meritve položaja vrha robotskega mehanizma je dokaj enostavna, saj sama konstrukcija robotskega mehanizma oziroma steklenega ogrodja zagotavlja pravokotno gibanje vrha v obeh oseh. Tlorisni pogled pritrditve merilnih letev na vrh robotskega mehanizma je shematsko prikazan na sliki 3.15. Vsaka od obeh merilnih letev je v kombinaciji s pripadajočo senzorsko elektroniko namenjena za meritev položaja vrha robotskega mehanizma v eni osi. Obe merilni letvi sta pritrjeni na robotski mehanizem in se zato gibljeta skupaj z njim, medtem ko je senzorska elektronika fiksno pritrjena na podlago.



Slika 3.15: Meritev položaja vrha robot. mehanizma z inkrement. dajalniki - princip

Iz slike 3.15 je razvidno, da se pri pomiku robotskega mehanizma ena merilna letev pomakne vzporedno z smerjo pripadajoče senzorske elektronike, druga merilna letev pa se pomakne pravokotno na smer pripadajoče senzorske elektronike. Pri vzporednem pomiku merilne letve glede na smer pripadajoče senzorske elektronike se izmeri položaj vrha v pripadajoči osi. Pri pravokotnem pomiku merilne letve glede na smer pripadajoče senzorske elektronike pa se položaj vrha v pripadajoči osi ne spremeni. Širina merilne letve v splošnem predstavlja geometrijsko omejitev, ki jo pri gibanju robotskega mehanizma ne smemo preko- račiti. Pravokotni pomik merilne letve glede na pripadajočo senzorsko elektroniko je omejen s širino merilne letve, ki znaša 3 mm. Pri delovanju predstavljenega sistema za meritev po- ložaja vrha robotskega mehanizma ta omejitev ne predstavlja težave, saj je maksimalna sprememba položaja vrha robotskega mehanizma v vsaki smeri manjša od $30 \mu\text{m}$.

Na sliki 3.16 je prikazan implementirani sistem za meritev položaja vrha robotskega mehanizma z inkrementalnimi dajalniki, ki se v prikazanem primeru nahaja na mizici optičnega mikroskopa.



Slika 3.16: Izvedba meritve položaja vrha robot. mehanizma z inkrement. dajalniki

Izdelani sistem za meritev položaja vrha robotskega mehanizma z inkrementalnimi dajal- niki ima zelo dobro natančnost, ki je določena s korakom inkrementalnega dajalnika (61 nm). V primerjavi s sistemom za meritev položaja vrha robotskega mehanizma iz slike je za delo- vanje predstavljenega sistema potrebno manj procesorske moči na kontrolno-procesni enoti CVS-1456. Meritve položaja vrha robotskega mehanizma, ki so predstavljene v naslednjih poglavjih, so zato pridobljene z uporabo merilnega sistema z inkrementalnimi dajalniki.

3.3 Programska oprema in uporabniški vmesnik

Programska oprema za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma je izdelana v programskem razvojnem okolju *LabVIEW 8.5 - Professional Development System* na razvojnem računalniku. Izdelana programska oprema se z uporabo direktne povezave oziroma *cross-over* kabla prenese na kontrolno-procesno enoto CVS-1456, ki na osnovi operacijskega sistema *LabVIEW Real-Time 8.5* omogoča njeno izvajanje v realnem času. Prenos podatkov je mogoč tudi v obratni smeri. Za prenos podatkov (npr.: meritve dejanskega položaja pri položajnem vodenju robotskega mehanizma) iz kontrolno-procesne enote CVS-1456 na osebni računalnik se uporablja protokol za prenos datotek (ang.: *File Transfer Protocol - FTP*). V izdelani programski opremi sta implementirana dva sklopa, in sicer:

- sklop za generiranje in branje digitalnih signalov na vhodno/izhodni FPGA enoti,
- ter sklop za prikaz uporabniškega vmesnika s pripadajočimi funkcijami za položajno vodenje na osnovi predlaganih metod, za shranjevanje merilnih podatkov na disk, za komunikacijo z razvojnim računalnikom, itd.

Prvi sklop programske opreme se izvaja na vhodno/izhodni FPGA enoti, drugi sklop pa se izvaja na procesorju (*Intel Celeron 733 MHz*).

3.3.1 Programska oprema za vhodno/izhodno FPGA enoto

Funkcionalnost vhodno/izhodne FPGA enote je določena z programsko opremo, ki se izvaja na FPGA vezju z oznako *SPARTAN 3E XUP* proizvajalca *Xilinx*. FPGA je polprevodniško vezje, ki je sestavljeno iz polja logičnih blokov, katerih funkcionalnost je mogoče preoblikovati oziroma reprogramirati. Podatki iz pomnilniških celic se uporabljajo tako za krmiljenje logičnih blokov kot tudi za krmiljenje povezav med njimi. Zgradba FPGA vezja omogoča izdelavo oziroma programiranje strojne arhitekture tega vezja v okviru programskega okolja. Zaradi tega dejstva daje FPGA tehnologija precejšnjo svobodo pri načrtovanju in izdelavi elektronskih vezij.

Delovanje FPGA vezja je paralelno, kar pomeni, da se vse funkcije v programu izvedejo hkrati. Paralelni način izvajanja programov je po svojem konceptu zelo podoben izvajanju virtualnih inštrumentov oziroma programov, ki so izdelani v programskem razvojnem okolju *LabVIEW* s programskim jezikom imenovanim G. K osnovnemu programskem razvojnem okolju *LabVIEW* je mogoče dokupiti dodatni modul *NI LabVIEW FPGA Module*,

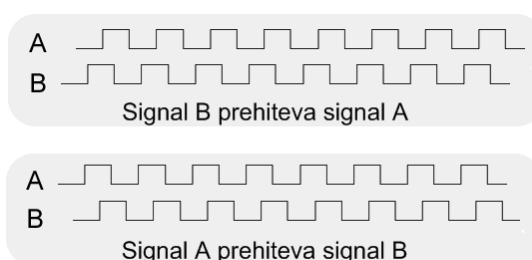
ki omogoča izdelavo virtualnih inštrumentov za izvajanje na FPGA vezju. Omenjeni dodatek vsebuje prevajalnik s pomočjo katerega se virtualni inštrumenti prevedejo v jezik za opis zelo hitrih integriranih vezij (ang.: *VHSIC Hardware Description Language - VHDL*), ki je primeren za izvajanje na FPGA vezju.

Za potrebe položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma je v izdelani programski opremi za izvajanje na FPGA vezju implementirano:

- generiranje PŠM signalov na digitalnih izhodih
- ter branje in obdelava A in B signalov iz inkrementalnih dajalnikov na digitalnih vhodih.

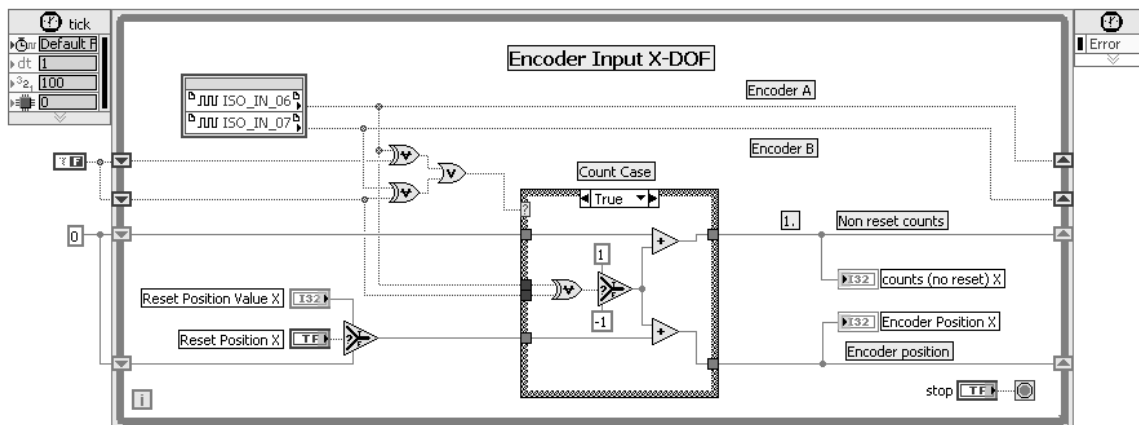
Generiranje PŠM signalov na digitalnih izhodih (en digitalni izhod za vsako os robotskega mehanizma) je izvedeno na vhodno/izhodni FPGA enoti na osnovi preračunanega števila ciklov. Število ciklov je sorazmerno periodi oziroma pulzni širini PŠM signala. Takt FPGA vezja je enak 40 MHz, nosilna frekvenca PŠM signala pa je enaka 80 kHz. To pomeni, da je ena perioda PŠM signala dolga 500 ciklov oziroma $12,5 \mu\text{s}$. Na začetku vsake periode PŠM signala se pripadajoči digitalni izhod postavi na 5 V (logična 1). Ko preteče število ciklov, ki je sorazmerno pulzni širini PŠM signala, pa se pripadajoči digitalni izhod postavi na 0 V (logična 0) in takšen ostane do začetka naslednje periode. Če je pulzna širina PŠM signala v nekem trenutku na primer 40%, je izhod 200 ciklov od začetka periode postavljen na 5 V, nato pa je 300 ciklov (do konca periode) postavljen na 0 V.

Na FPGA vezju je izvedeno tudi branje in obdelava digitalnih A in B signalov iz inkrementalnih dajalnikov. S signali A in B je posredno podan relativni položaj letve in inkrementalnega dajalnika, ki ga je potrebno z uporabo ustrezne logike na FPGA vezju pretvoriti v relativni položaj v korakih. Signala A in B sta med seboj časovno zamaknjena za 90° . Ko signal A prehiteva signal B se koraki prištevajo, ko signal B prehiteva signal A, pa se koraki odštevajo, kar je shematsko prikazano tudi na sliki 3.17.



Slika 3.17: Signala A in B na izhodu inkrementalnega dajalnika

Na sliki 3.18 je prikazan primer blokovne sheme oziroma programa, ki je izdelan v programskem okolju *LabVIEW 8.5* in je namenjen za zajem in obdelavo digitalnih A in B signalov. Program, ki se izvaja na vhodno/izhodni FPGA enoti, na podlagi vrednosti digitalnih A in B signalov preračuna število korakov med letvijo na vrhu robotskega mehanizma in inkrementalnim dajalnikom.



Slika 3.18: Programska koda za obdelavo signalov A in B na FPGA enoti

3.3.2 Programska oprema za kontrolno-procesno enoto CVS-1456

Programsko razvojno okolje *LabVIEW* je bilo na začetku razvoja namenjeno za izdelavo grafičnih uporabniških vmesnikov za upravljanje in prikazovanje merilnih podatkov iz različnih merilnih inštrumentov. Iz tega izhaja tudi ime virtualni inštrument, ki je v bistvu program napisan v tem razvojnem okolju. Virtualni inštrumenti lahko nadomestijo realna stikala, indikatorje, alfa-numerične prikazovalnike, grafe, itd. Programer oziroma uporabnik tega razvojnega okolja lahko ob uporabi dodatnih strojnih rešitev za zajem in generiranje podatkov na osnovi osebnih računalnikov izdelava lastne merilne sisteme.

Programsko razvojno okolje *LabVIEW* v novejšem času ni več namenjeno samo za izdelavo uporabniških vmesnikov za merilne inštrumente, pač pa se uporablja za širok spekter aplikacij predvsem v sistemih industrijske avtomatizacije. K osnovnemu paketu tega programskega razvojnega okolja je možno dokupiti različne module s pripadajočimi knjižnicami, ki omogočajo programiranje FPGA vezij (*NI LabVIEW FPGA Module*), zajem digitalnih slik (*NI Vision Acquisition Software*), obdelavo oziroma procesiranje digitalnih slik (*NI Vision Development Module*), itd. Omenjeni moduli so bili v programskem razvojnem okolju *LabVIEW* uporabljeni za izdelavo uporabniškega vmesnika s pripadajočo programsko

opremo za potrebe položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma.

Programsko razvojno okolje *LabVIEW* omogoča tudi izvajanje programske kode, ki je izdelana v drugih programskih okoljih. To je koristno predvsem v primeru, ko izvajanje programske kode zapisane v G jeziku ni primerno pri določenih aplikacijah. Takšen primer so umetne nevronske mreže, ki so uporabljene pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma. Zaradi tega dejstva so bile umetne nevronske mreže izdelane v programskem okolju *Microsoft Visual C++ 6.0* v obliki dinamične knjižnice (ang.: *Dynamic-Link Library - DLL*), ki jo je mogoče klicati in izvajati v programskem okolju *LabVIEW*. Opisan pristop se je izkazal kot primeren tudi glede na hitrost izvajanja programske kode.

Uporabniški vmesnik se lahko z uporabo programskega razvojnega okolja *LabVIEW* enostavno in hitro prilagodi potrebam uporabnika. Izdelani uporabniški vmesnik s pripadajočimi funkcijami za položajno vodenje, za shranjevanje merilnih podatkov na disk, za komunikacijo z razvojnim računalnikom, itd., je v osnovi namenjen preizkusu, ocenitvi in primerjavi predlaganih metod za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma.

Delovanje realnega robotskega mehanizma

Delovanje realnega robotskega mehanizma in natančnost njegovega simulacijskega modela lahko eksperimentalno ocenimo z uporabo sistema za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma, katerega komponente so podrobneje opisane v prejšnjem poglavju. V tem poglavju so predstavljene meritve:

- velikosti delovnega območja in kinematične sklopljenosti osi robotskega mehanizma,
- vpliva histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih na delovanje robotskega mehanizma,
- natančnosti položajnega vodenja robotskega mehanizma v odprti zanki brez kompenzacije nelinearnosti proge (odziv na stopnico),
- natančnosti položajnega vodenja robotskega mehanizma v zaprti zanki s PI regulatorjem brez kompenzacije nelinearnosti proge (odziv na stopnico).

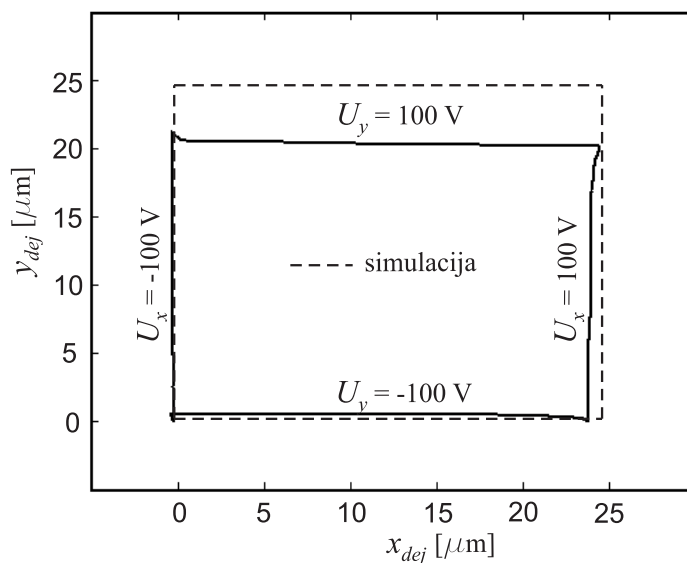
Rezultati meritev položaja vrha robotskega mehanizma so pri naštetih eksperimentih predstavljeni v mikrometrih v dvoosnem XY kartezičnem koordinatnem sistemu. Orientacija koordinatnega sistema je enaka orientaciji osi robotskega mehanizma, kar pomeni, je vrednost koordinate v abscisni osi enaka meritvi prvega inkrementalnega dajalnika in vrednost koordinate v ordinatni osi je enaka meritvi drugega inkrementalnega dajalnika. Koordinatno izhodišče je določeno tako, da je vrednost položaja vrha robotskega mehanizma

vedno pozitivna, kar pomeni, da je delovanje robotskega mehanizma zaradi enostavnosti omejeno samo na prvi kvadrant kartezičnega koordinatnega sistema.

4.1 Velikosti delovnega območja in sklopljenost osi

Simulacijski model, ki je opisan v poglavju 2, kaže, da je velikost delovnega območja najbolj odvisna od razmerja reducirane togosti steklenega ogrodja k_o in togosti uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjev k_p . Z uporabo simulacijskega modela je predvidena velikost delovnega območja približno enaka $25 \mu\text{m}$ v vsaki osi. Pri tem je napajalna napetost piezoelektričnih aktuatorjev znotraj intervala dovoljenih napetosti, ki je enak $[-100, 100]$ V.

Meritev delovnega območja robotskega mehanizma smo izvedli v štirih korakih podobno kot je izvedena simulacija, katere rezultat je prikazan na sliki 2.15. Na začetku je bila napajalna napetost na obeh piezoelektričnih aktuatorjih enaka -100 V. V prvem koraku se je napetost na prvem piezoelektričnem aktuatorju zvezno spremenila na 100 V, medtem ko je napetost na drugem piezoelektričnem aktuatorju ostala enaka -100 V. Po drugem koraku je bila napetost na obeh piezoelektričnih aktuatorjih enaka 100 V. V tretjem koraku se je napetost na prvem piezoelektričnem aktuatorju zvezno spremenila na -100 V, medtem ko je napetost na drugem piezoelektričnem aktuatorju ostala enaka 100 V. Po četrtem koraku je bila napetost na obeh piezoelektričnih aktuatorjih zopet enaka -100 V. Na sliki 4.1 so prikazani rezultati meritve velikost delovnega območja in sklopljenosti osi vrha robotskega mehanizma.



Slika 4.1: Velikost delovnega območja robotskega mehanizma

Iz slike 4.1 je razvidno, da je velikost delovnega območja robotskega mehanizma enaka približno $25 \times 21 \mu\text{m}$. Predstavljena meritev kaže, da je simulacijski model robotskega mehanizma za določitev velikosti delovnega območja precej natančen za x os robotskega mehanizma. Izmerjena velikost delovnega območja za y os robotskega mehanizma je nekoliko manjša od predvidene.

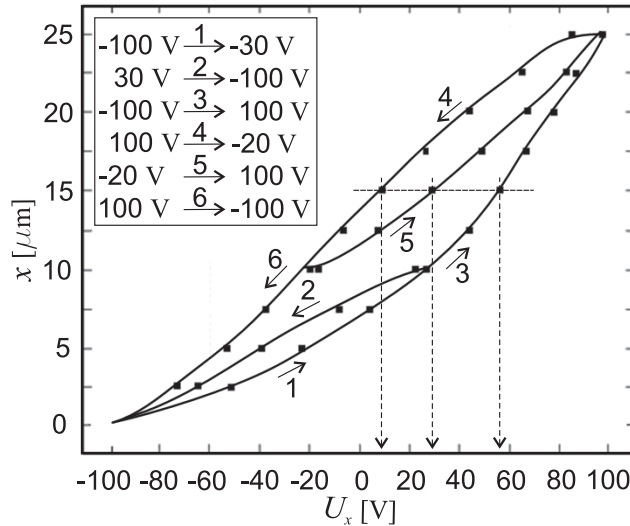
Pri modeliranju robotskega mehanizma je bilo ugotovljeno, da je teoretična sklopljenost osi robotskega mehanizma zanemarljiva, kar pomeni, da se ob spremembi položaja vrha robotskega mehanizma v eni koordinatni osi, položaj v drugi koordinatni osi naj ne bi spreminjal. S pomočjo meritev smo ocenili dejansko sklopljenost osi robotskega mehanizma (slika 4.1). Meritve kažejo, da je dejanska sklopljenost osi robotskega mehanizma opazna, vendar je v primerjavi s celotnim delovnim območjem vrha robotskega mehanizma zanemarljiva, saj absolutno znaša manj kot $1 \mu\text{m}$. Zato lahko rečemo, da so rezultati meritve sklopljenosti osi robotskega mehanizma v skladu s pričakovanji.

4.2 Vpliv histereznega pojava

Piezoelektrični aktuatorji so izdelani iz umetnih piezoelektričnih materialov, ki imajo v nasprotju z naravnimi materiali mnogo bolj izražene piezoelektrične lastnosti. Slabost piezoelektričnih aktuatorjev iz umetnih materialov, je prisotnost nelinearnega histereznega pojava. Histerezni pojav, ki problematičen predvsem pri njihovem položajnem vodenju, nastane zaradi notranjega trenja gradnikov (kristalov) v piezoelektričnem materialu. Histerezni pojav povzroča, da sprememba dolžine nekega piezoelektričnega aktuatorja ni odvisna samo od vrednosti napajalne napetosti, pač pa tudi od zgodovine gibanja oziroma predhodne spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja.

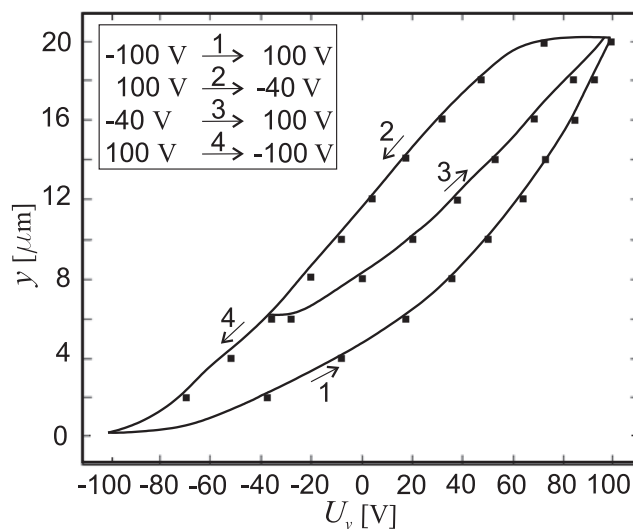
Meritev vpliva histereznega pojava v uporabljenih piezoelektričnih aktuatorjih na položaj vrha robotskega mehanizma je izvedena za vsako os robotskega mehanizma posebej. Prva meritev (x os) je izvedena v 6 zaporednih korakih. V prvem koraku se napajalna napetost na piezoelektričnem aktuatorju zvezno spremeni iz vrednosti -100 V na vrednost 30 V . V drugem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni nazaj na -100 V . V tretjem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti -100 V na vrednost 100 V . V četrtem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti 100 V na vrednost -20 V . V petem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti -20 V na vrednost 100 V . V šestem koraku pa se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti 100 V nazaj na začetno vrednost -100 V . Pri zveznem spreminjanju napajalne napetosti na piezoelektrič-

nem aktuatorju se ves čas izvaja meritev položaja vrha robotskega mehanizma v pripadajoči x osi. Na sliki 4.2 je prikazan položaj vrha robotskega mehanizma v x osi v odvisnosti od vrednosti napajalne napetosti.



Slika 4.2: Vpliv histereznega pojava na delovanje robotskega mehanizma - x os

Podobna meritev je v štirih korakih izvedena tudi za y os robotskega mehanizma. V prvem koraku se napajalna napetost na piezoelektričnem aktuatorju zvezno spremeni iz vrednosti -100 V na vrednost 100 V. V drugem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti 100 V na vrednost -40 V. V tretjem koraku se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti -40 V na vrednost 100 V. V četrtem koraku pa se napajalna napetost zvezno spremeni iz vrednosti 100 V nazaj na vrednost -100 V. Na sliki 4.3 je prikazan položaj vrha robotskega mehanizma v y osi v odvisnosti od vrednosti napajalne napetosti.

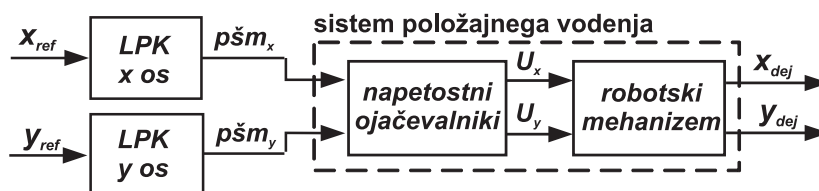


Slika 4.3: Vpliv histereznega pojava na delovanje robotskega mehanizma - y os

Iz meritev je razvidno, da ima histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih velik vpliv na delovanje robotskega mehanizma. Očitno je, da položaja vrha robotskega mehanizma ni odvisen samo od vrednosti napajalne napetosti, pač pa tudi od zgodovine gibanja. Kot primer tega je na sliki 4.2 jasno razvidno, da je položaj $15 \mu\text{m}$ v x osi robotskega mehanizma dosežen z različnimi vrednostmi napajalne napetosti, to je 10 V, 30 V in 58 V.

4.3 Položajno vodenje v odprti zanki z LPK - odziv na stopnico

Eksperimenti, ki so predstavljeni v nadaljevanju prikazujejo rezultate položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v odprti zanki z uporabo linearnega pred-krmilnika (LPK). Vhod v LPK je referenčna vrednost položaja oziroma referenčne koordinate vrha robotskega mehanizma (x_{ref}, y_{ref}) , izhod pa predstavlja širino pulza PŠM krmilnih signalov (psm_x, psm_y) . Širina pulza PŠM krmilnega signala je sorazmerna napajalni napetosti na piezoelektričnem aktuatorju, katere vrednost je v intervalu $[-100, 100]$ V. Kot je bilo predstavljeno v poglavju 3.1, širina pulza 0% PŠM krmilnega signala predstavlja -100 V napetosti na piezoelektričnem aktuatorju, širina pulza 100% PŠM krmilnega signala pa 100 V napetosti na piezoelektričnem aktuatorju. Na sliki 4.4 je prikazana blokovna shema položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v odprti zanki z LPK.



Slika 4.4: Blokovna shema položajnega vodenja robotskega mehanizma z LPK

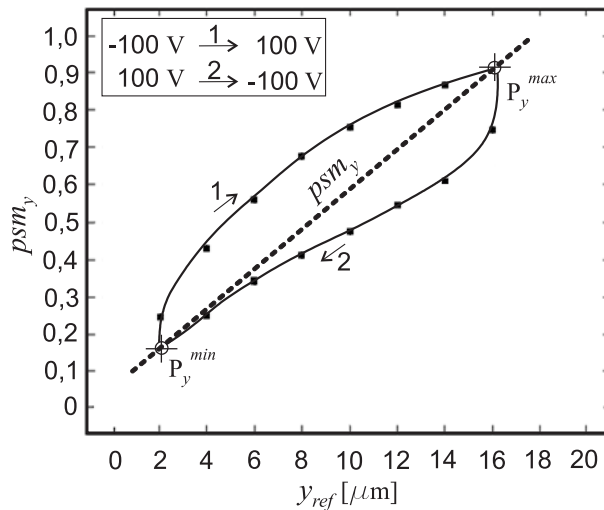
Izhod iz LPK je v splošnem odvisen od izbranega delovnega območja vrha robotskega mehanizma in od referenčnega položaja vrha robotskega mehanizma znotraj izbranega delovnega območja. Izhod LPK za vsako os robotskega mehanizma zato definiran kot

$$psm_x = psm_x^{min} + \frac{psm_x^{max} - psm_x^{min}}{x^{max} - x^{min}} \cdot x_{ref} \quad (4.1)$$

in

$$psm_y = psm_y^{min} + \frac{psm_y^{max} - psm_y^{min}}{y^{max} - y^{min}} \cdot y_{ref}. \quad (4.2)$$

Konstante v enačbah 4.1 in 4.2 so pridobljene eksperimentalno z določitvijo robnih točk za izbrano delovno območje, ki so definirane kot $\mathbf{P}_x^{min}(x^{min}, psm_x^{min})$, $\mathbf{P}_x^{max}(x^{max}, psm_x^{max})$, $\mathbf{P}_y^{min}(y^{min}, psm_y^{min})$ in $\mathbf{P}_y^{max}(y^{max}, psm_y^{max})$. Pri tem so x^{min} , x^{max} , y^{min} in y^{max} meje izbranega delovnega območja, psm_x^{min} , psm_x^{max} , psm_y^{min} in psm_y^{max} pa njihove pripadajoče vrednosti PŠM krmilnih signalov. Na sliki 4.5 je prikazana vrednost izhoda LPK v odvisnosti od referenčne vrednosti položaja vrha robotskega mehanizma v y osi. Vrednost LPK se spreminja linearno (premica) v mejah, ki jih določata dve robni točki (\mathbf{P}_y^{min} in \mathbf{P}_y^{max}). Poleg tega je na sliki prikazana tudi histerezna krivulja s pomočjo katere je razvidno dejansko odstopanje izhoda LPK (psm_y) od krmilnega PŠM signala, ki v danem primeru zagotavlja natančno položajno vodenje robotskega mehanizma.



Slika 4.5: Izhod LPK v odvisnosti od referenčne vrednosti položaja - y os

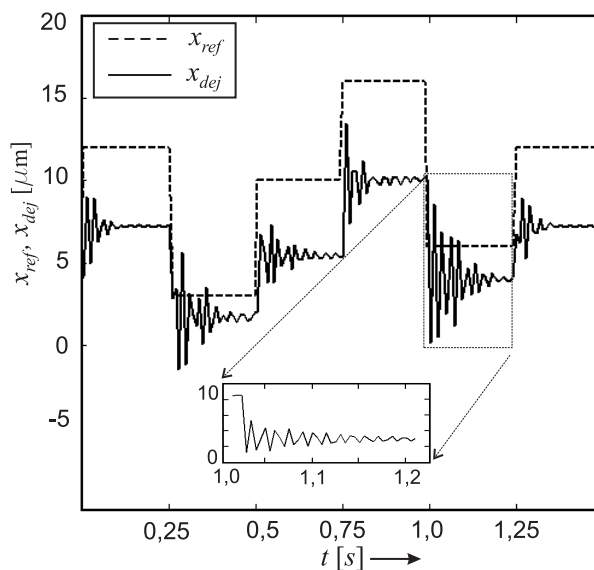
V primeru, ko je izbrano celotno delovno območje vrha robotskega mehanizma z izhodiščem v koordinatnem izhodišču ($x^{min} = 0$ in $psm_x^{min} = 0$ ter $y^{min} = 0$ in $psm_y^{min} = 0$) se enačbi 4.1 in 4.2 poenostavita v

$$psm_x = \frac{psm_x^{max}}{x^{max}} \cdot x_{ref} \quad (4.3)$$

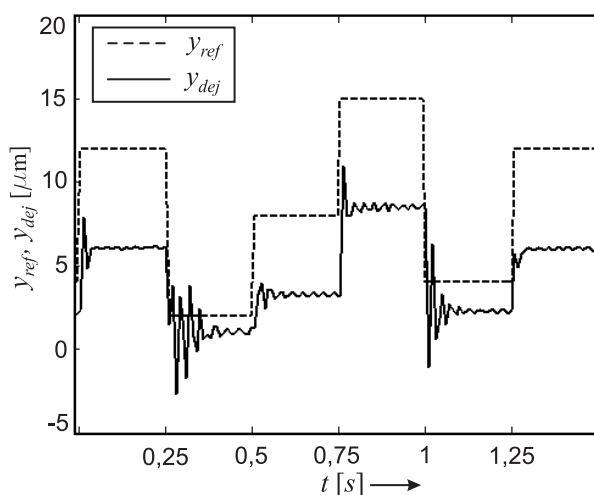
in

$$psm_y = \frac{psm_y^{max}}{y^{max}} \cdot y_{ref}. \quad (4.4)$$

Na sliki 4.5 je prikazano, da LPK ne zagotavlja natančnega položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma, saj izhod LPK odstopa od zahtevanih krmilnih vrednosti. To potrjujejo tudi eksperimenti, katerih rezultati so prikazani na slikah 4.6 in 4.7. Eksperimenti prikazujejo stopnične odzive pri vodenju vrha robotskega mehanizma z LPK.



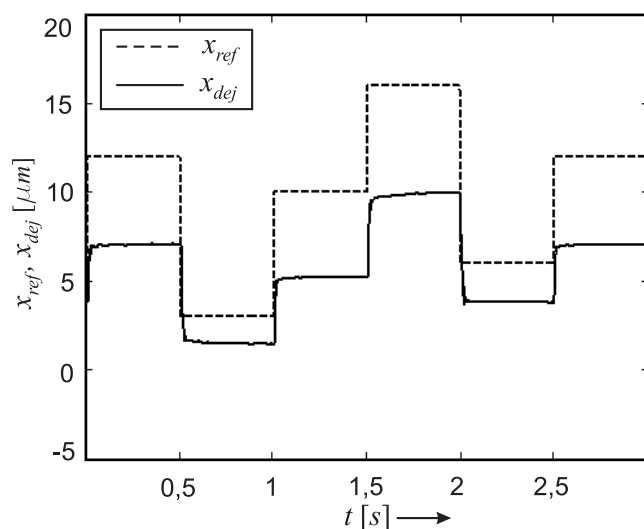
Slika 4.6: Stopnični odziv pri uporabi LPK - x os



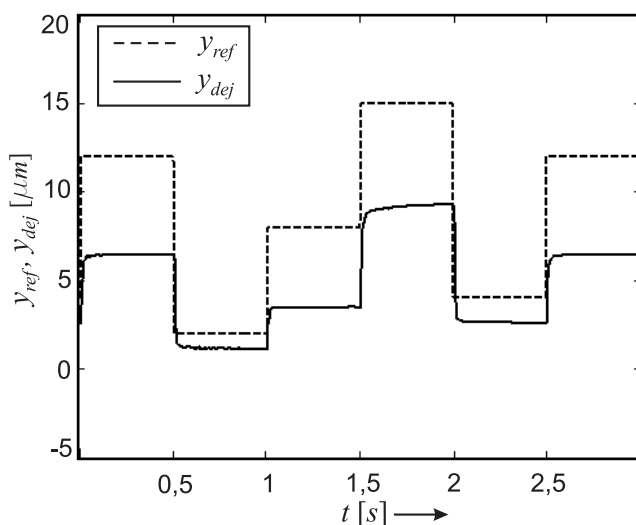
Slika 4.7: Stopnični odziv pri uporabi LPK - y os

Iz stopničnih odzivov je razvidno, da se pri tem enostavnem načinu položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma poleg histerez pri prehodnem pojavu pojavijo tudi oscilacije vrha. Oscilacije niso posledica samega položajnega vodenja oziroma regulacije (to ni vodenje v zaprti zanki), pač pa nastanejo zaradi dinamike robotskega mehanizma. Pri izdelavi simulacijskega modela smo ugotovili, da na dinamiko robotskega mehanizma precej vpliva masa, ki se nahaja na vrhu robotskega mehanizma. Ker je meritev položaja vrha robotskega mehanizma izvedena z uporabo inkrementalnih dajalnikov, se na vrhu robotskega mehanizma nahajata dve feritni letvi, ki skupno maso vrha povečata na približno 4 g. To nadalje pomeni, da je reducirana masa vrha (m^*) zaradi velikega razmerja ročic (d_2/d_1) precej velika in znaša približno 4 kg.

Pri praktični izvedbi položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma je potrebno oscilacije položaja, ki se pojavijo v stopničnem odzivu, odpraviti. V ta namen smo z izbiro ustreznih komponent nizko-pasovnega filtra preoblikovali prenosno funkcijo izdelanih napetostnih ojačevalnikov, kot je opisano v poglavju 3.1.1. Z uporabo omenjenega postopka smo napetostne ojačevalnike izdelali tako, da ti generirajo bolj "glajeno" obliko napajalne napetosti za napajanje robotskega mehanizma (odziv B na sliki 3.6). Ob uporabi predelanih napetostnih ojačevalnikov, stopnične spremembe referenčnega položaja oziroma PŠM krmilnega signala, več ne povzročajo oscilacij pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma. Na slikah 4.8 in 4.9 so prikazani stopnični odzivi pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z LPK ob uporabi predelanih napetostnih ojačevalnikov.



Slika 4.8: Stopnični odziv pri uporabi LPK brez prehodnega pojava - x os



Slika 4.9: Stopnični odziv pri uporabi LPK brez prehodnega pojava - y os

S spremembo komponent nizko-pasovnega filtra na napetostnih ojačevalnikih se je na račun poslabšanja odziva proge mogoče izogniti oscilacijam pri stopničnem odzivu robotskega mehanizma pri vodenju z LPK. Kljub odpravi oscilacij je na slikah 4.8 in 4.9 še vedno opazen vpliv histerez na natančnost položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z LPK. Za zagotavljanje natančnega položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma v odprti zanki je potrebno implementirati naprednejši način položajnega vodenja. To je opisano v poglavju 5, kjer so za ocenitev in kompenzacijo nelinearnosti oziroma histerez v piezoelektričnih akuatorjih uporabljene umetne nevronske mreže.

4.4 Položajno vodenje s PI regulatorjem

Vodenje v zaprti zanki je osnovano na meritvi dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma. Sinonim za vodenje v zaprti zanki še vedno predstavlja PID regulator, ki je zaradi robustnosti in zanesljivosti prisoten v več kot 95% industrijskih aplikacij. PID regulator je doživel mnogo sprememb v tehnologiji izvedbe - to je od mehanične in pnevmatične izvedbe, preko izvedbe z elektronkami, tranzistorji in integriranimi vezji, do izvedbe z mikroprocesorji. PID regulator sestavljajo proporcionalni del (P), integralni del (I) in diferencialni del (D). Proporcionalni del določa odziv na trenutno napako, integralni del določa odziv na vsoto predhodnih napak, diferencialni del pa določa odziv glede na hitrost spremembe napake. Izhod iz PID regulatorja je sestavljen iz obtežene vsote vseh treh delov. Enačba PID regulatorja se zapiše kot

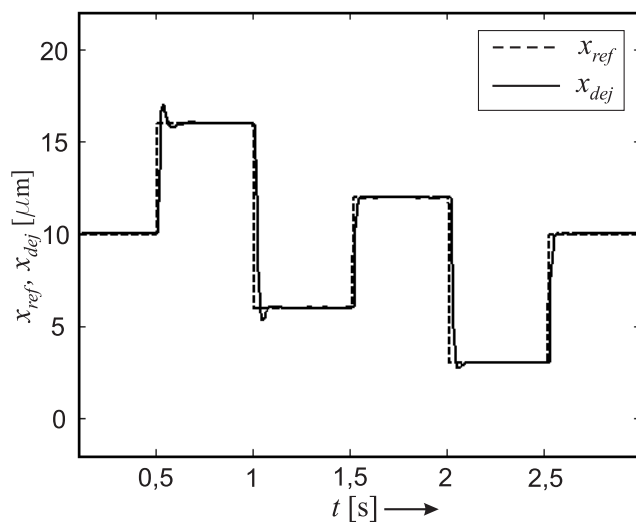
$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (4.5)$$

kjer je e pogrešek oziroma razlika med želeno vrednostjo in dejansko vrednostjo procesne spremenljivke u . Zelo pogosto se v praksi uporablja enostavnejši PI regulator, katerega izhod je določen kot obtežena vsota proporcionalnega in integralnega dela.

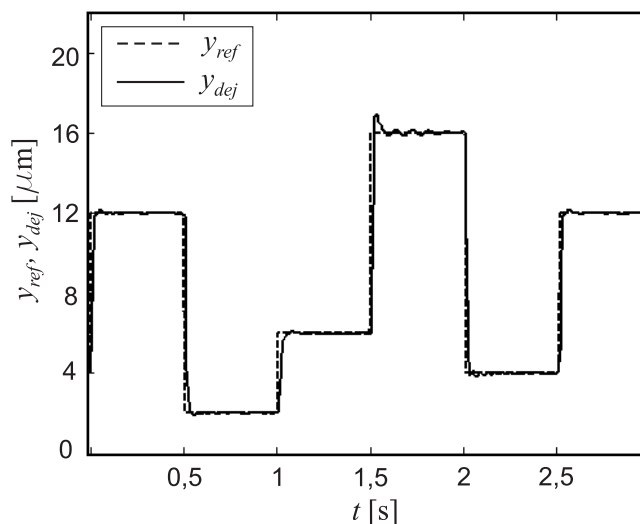
Proporcionalno ojačanje K_P in integracijski čas T_i se v praksi nastavljata glede na želeni odziv proge na stopnično spremembo referenčne vrednosti procesne spremenljivke (npr.: referenčni položaj vrha robotskega mehanizma). Pri tem se išče kompromis med hitrostjo odziva proge (čas vzpona) in velikostjo preniha, ki ne sme presežati dovoljene vrednosti. S Ziegler-Nichols-ovo metodo nastavljanja parametrov lahko dosežemo dobre rezultate vodenja pod pogojem, da je sistem vodenja linearen [38]. Drugače je pri nelinearnih sistemih, kjer delovanje PI regulatorja ni optimalno, saj velja, da določene vrednosti parametrov PI

regulatorja ne zagotavljajo enako kvalitetnega delovanja regulatorja pri vseh delovnih pogojih. Na uspešnost delovanja PI regulatorja lahko vplivajo tako spremembe v okolju (np.: velikost obremenitve, temperatura okolice, vlažnost okolice, itd.) kot tudi nelinearnosti, ki na sami progi (npr.: histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih).

Na slikah 4.10 in 4.11 so prikazani rezultati vodenja vrha robotskega mehanizma v zaprti zanki s komercialnim PI regulatorjem, ki je del knjižnice LAbVIEW *PID Control Toolkit*. Vrednosti parametrov PI regulatorja so določene s kombinacijo Ziegler-Nichols-ove metode in ročne optimizacije ter znašajo $K_P = 0,6$ in $T_i = 0,00009$ min za vsako os robotskega mehanizma posebej. Hitrost izvajanja PI regulatorja na kontrolno-procesni enoti CVS-1456 je enaka 1 kHz.



Slika 4.10: Stopnični odziv pri uporabi PI regulatorja - x os



Slika 4.11: Stopnični odziv pri uporabi PI regulatorja - y os

Rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma s PI regulatorjem kažejo, da ta regulator zagotavlja dosti boljše rezultate v primerjavi s položajnim vodenjem v odprti zanki z LPK, kot je prikazano na slikah 4.8 in 4.9. Kljub vsemu je pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma s PI regulatorjem razvidno, da delovanje tega regulatorja ni enako za vse delovne točke, saj se pri nekaterih prehodnih pojavi pojavi prenehaj, pri drugih pa ne. V primeru, da želimo zagotoviti položajno vodenje vrha robotskega mehanizma s PI regulatorjem brez prenehajev, moramo ustrezno spremeniti vrednosti parametrov proporcionalnega ojačanja in integracijskega časa, s čimer se izgubi odzivnost proge. Tistim referenčnim vrednostim, ki v primeru prikazanih odzivov na slikah 4.10 in 4.11 nimajo prenehaja, se čas vzpona še podaljša, kar pa lahko v določenih aplikacijah predstavlja resno omejitev.

Vodenje v zaprti zanki s PI regulatorjem daje zadovoljive rezultate. Kljub vsemu se vidijo nelinearnosti, ki jih v največji meri povzročajo histereze v piezoelektričnih aktuatorjih. Če se želimo pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma izogniti vplivu nelinearnosti na progi, jih moramo kompenzirati, za kar pa potrebujemo napredne metode vodenja. Ena takšnih je izdelana na osnovi nevronske mreže in je opisana v poglavju 6.

Ocenitev modela proge z uporabo umetnih nevronskih mrež

Položajno vodenje piezoelektričnih aktuatorjev je v praksi večinoma izvedeno z uporabo napetostnih ojačevalnikov, ki v odvisnosti od krmilnega signala na vhodu proizvedejo sorazmerno vrednost napetosti na piezoelektričnih aktuatorjih. Pri napetostnem vodenju je histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih neizogiben, zaradi česar se raziskujejo različne metode za kompenzacijo teh nelinearnosti.

Položajno vodenje piezoelektričnih aktuatorjev v odprti zanki je osnovano na različnih matematičnih modelih piezoelektričnih aktuatorjev oziroma njihovih inverznih modelih, ki jih lahko imenujemo tudi pred-krmilniki. Te metode se raziskujejo precej intenzivno, saj imajo v primerjavi z metodami vodenja v zaprti zanki nekaj dobrih lastnosti. Poleg tega, da ne povzročajo nestabilnost sistema vodenja, se z implementacijo teh metod izognemo uporabi dragih in mnogokrat relativno velikih oziroma robustnih položajnih senzorjev. Avtorji raziskav predlagajo načine kot so kompenzacija histereznega pojava s polinomskimi funkcijami [39]-[40], kompenzacija z LMS metodami [41] in kompenzacija z uporabo Maxwell slip modela [42]-[43]. Med vsemi modeli piezoelektričnih aktuatorjev oziroma histerez je najbolj pogosto uporabljen Preisach-*ov* model histerez [44]. Izpeljanka Preisach-*ovega* modela histerez je Prandtl-Ishlinskii model [45]-[46]. Inverz Prandtl-Ishlinskii modela je mogoče izračunati analitično, kar pomeni, da je primeren za položajno vodenje sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji v realnem času.

Nekateri avtorji za kompenzacijo histerez pri vodenju sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji predlagajo tudi tako imenovane tehnike mehkega računanja, kot sta mehka logika [47] in umetne nevronske mreže. V ta namen se lahko umetne nevronske mreže uporabijo kot samostojna metoda vodenja sistemov s piezoelektričnimi aktuatorji [48] ali v kombinaciji z tradicionalnimi metodami vodenja kot sta vodenje s PI regulatorjem [49]-[51] ali *sliding-mode* metodo [30],[52]. Iz omenjene literature je razvidno, da so nevronske mreže uporabne za kompenzacijo histerez v piezoelektričnih aktuatorjih. Na podlagi teh dejstev smo raziskali uporabnost nevronskih mrež tudi za potrebe položajnega vodenja opisanega robotskega mehanizma. Ugotovili smo, da lahko s predlagano metodo ocenitve in kompenzacije histerez izboljšamo rezultate položajnega vodenja robotskega mehanizma.

Kljub enostavnosti koncepta vodenja z uporabo nevronskih mrež, se je potrebno vseeno zavedati, da nevronske mreže niso nek vsevedni in vsemogočni stroj. Učenje in posledično njihovo uporabo najbolj omejujejo učni podatki oziroma vzorci. Zaradi tega je bilo pri učenju nevronskih mrež potrebno skrbno premisliti kakšno strukturo učenja bomo uporabili, s kakšnimi vhodnimi podatki in relacijami. Za realizacijo položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo umetnih nevronskih mrež je bilo najprej potrebno kvalitativno oceniti inverzni model robotskega mehanizma. Takšen model se lahko v nadaljevanju koristno uporabi pri položajnem vodenju robotskega mehanizma.

5.1 Umetne nevronske mreže - splošni opis

Umetne nevronske mreže (ang.: *artificial neural networks*) s strukturo in načinom delovanja posnemajo biološke možgane, ki so sestavljeni iz velikega števila povezanih možganskih celic oziroma nevronov. Iz nevronov izhajajo aksoni, ki se preko sinaps povezujejo z aksoni drugih nevronov. Sinapse oziroma stiki med aksoni se lahko spreminjajo v smislu omogočanja oziroma zaviranja prenosa signala iz aksona enega nevrone na akson drugega nevrone. Možgani vsebujejo mehanizem uravnavanja učinkovitost prenosa signalov preko sinaps glede na ugodne in neugodne dražljaje iz okolja.

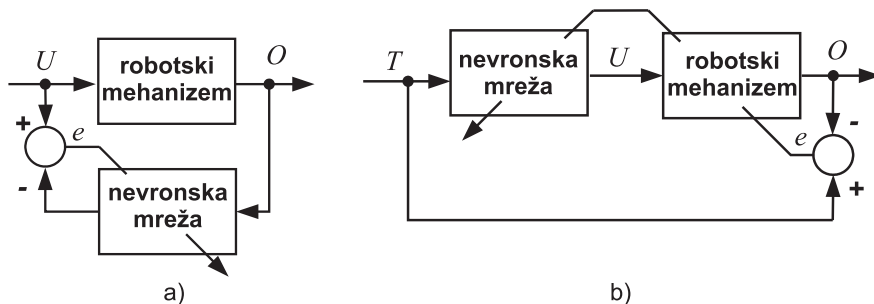
Začetek razumevanja bioloških možganov, ki je temeljil na predpostavkah o poteku osnovnih fizikalno-kemičnih procesov, je predstavljal prvi korak pri razvoju umetnih nevronskih mrež. Na podlagi medicinskih oziroma nevroloških spoznanj, sta biologa McCulloch in Pitts leta 1943 razvila prvi matematični model nevrone. Omenjeni model je bil osnovan na predpostavki, da so nevroni binarne naprave s konstantnim pragom. Leta 1949 je Hebb s psihološkega vidika predstavil svoj pogled na postopek učenja bioloških možganov. Pred-

postavil je, da se biološki možgani skozi vse življenje učijo različnih nalog oziroma opravil na osnovi adaptacije sinaps med aksoni. Sodelovanje med nevrologi, psihologi in inženirji je prispevalo k nadaljnjemu razvoju umetnih nevronske mreže. Leta 1957 je Rosenblatt z izdelavo tako imenovanega enoplastnega perceptrona (ang.: *single-layer perceptron*) in pripadajočega učnega postopka, ki je temeljil na adaptaciji sinaps, zbudil veliko zanimanja med raziskovalci. Kljub prvotnemu navdušenju pa sta leta 1969 Minsky in Papert objavila knjigo z naslovom *Perceptrons*, v kateri je bilo dokazano, da enoplastni perceptron ni uporaben za modeliranje mnogo klasifikacijskih problemov, med drugim tudi enostavne »XOR« funkcije. Ker je bilo v istem delu predpostavljeno, da tudi za večplastni perceptron veljajo enake omejitve, se je razvoj nevronske mreže močno upočasnili. Šele v 80-ih letih prejšnjega stoletja, to je več kot 10 let po objavi omenjenega dela, se je raziskovalcem uspelo dokopati do spoznanja, da ima večplastni perceptron (ang.: *multilayer perceptron*) mnogo boljše procesne zmogljivosti kot enoplastni. Na ponovni razvoj umetnih nevronske mreže je vzporedno s tem ugodno vplivalo tudi odkritje učnega postopka vzvratnega razširjanja (ang.: *back-propagation*), ki je leta 1974 predstavil Paul Werbos. Postopek, ki se za učenje nevronske mreže uporablja še danes, je bil leta 1986 z nekaj izboljšavami ponovno predstavljen. To je pomenilo ponovni zagon raziskav na področju umetnih nevronske mreže. Do danes je bilo razvitih mnogo tipov nevronske mreže in mnogo učnih postopkov. Večplastni perceptron z učnim postopkom vzvratnega razširjanja pa je kljub temu zaradi sorazmerne enostavnosti in velike procesorske zmogljivosti še vedno pogosto uporabljen pri reševanju različnih inženirskih problemov tudi na področju robotike.

5.1.1 Metode učenja umetnih nevronske mreže v robotiki

Nevronske mreže se na področju robotike uporabljajo kot univerzalno orodje za izgradnjo dinamičnih modelov oziroma inverznih dinamičnih modelov robotskih mehanizmov. Inverzni dinamični modeli, ki so v večini primerov precej kompleksni, se lahko v nadaljevanju uporabijo kot pred-krmilnik za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma. S pomočjo inverznega modela se na osnovi vhodnih vrednosti, ki ponavadi predstavljajo želene oziroma referenčne koordinate vrha robotskega mehanizma, določijo izhodne krmilne vrednosti, ki vrh robotskega mehanizma pripeljejo v želeni položaj.

V splošnem poznamo generalizirano in specializirano arhitekturo učenja, ki sta prikazani na slikah 5.1a in 5.1b. Avtorji predlagajo tudi kombinacijo obeh arhitektur tako, da se generalizirano učenje uporabi za začetno učenje nevronske mreže [53]-[54].



Slika 5.1: Arhitekture učenja nevronskih mrež; a) generalizirana in b) specializirana

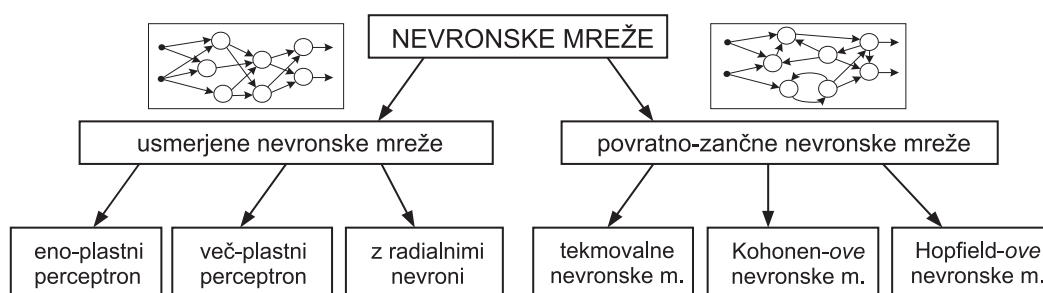
Generalizirano učenje se uporablja za izgradnjo inverznega modela (kinematičnega ali dinamičnega modela) robotskega mehanizma preden se ta model vključi v samo vodenje. Učni proces poskuša minimizirati napako (e) med vhodno krmilno vrednostjo (U) in izhodom iz nevronske mreže, ki predstavlja modelirano krmilno vrednost. Za učenje nevronske mreže je potrebno zagotoviti mnogo učnih vzorcev, da je inverzni model čimbolj natančen na celotnem območju učenja. Ko je proces učenja nevronske mreže končan se vrednosti uteži več ne spreminjajo. Naučena nevronska mreža se lahko uporabi kot pred-krmilnik pri položajnem vodenju robotskega mehanizma v odprti zanki. Če se vrednosti parametrov robotskega mehanizma med položajnim vodenjem zelo spremenijo (obremenitev, dodatno trenje, itd.), ta metoda ni primerna za vodenje v odprti zanki.

S specializiranim učenjem se izognemo problemom, ki nastanejo pri generaliziranem učenju, saj je nevronska mreža vključena v proces vodenja ves čas. Poleg tega lahko enostavno določimo delovno področje učenja. Uteži nevronske mreže se podobno kot pri generaliziranem učenju spreminjajo glede na razliko med referenčno vrednostjo oziroma tarčo (T) ter dejansko vrednostjo (O) na izhodu iz nevronske mreže. Problem specializirane arhitekture učenja je v tem, da lahko na začetku zaradi naključno izbranih začetnih uteži v nevronske mreži pride do nestabilnosti vodenja in posledično mehanske okvare robotskega mehanizma. Omenjeno metodo je za vodenje možno uporabiti takrat, ko so na začetku učenja znane približne uteži nevronske mreže ali ko začetna nenatančnost vodenja ni kritična.

5.1.2 Vrste umetnih nevronskih mrež

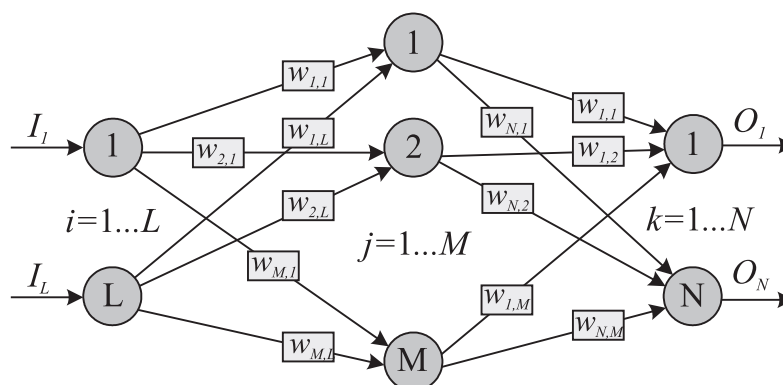
Z arhitekturo nevronske mreže opišemo razporeditev in povezanost nevronov v nevronske mreži. Glede na arhitekturo poznamo dva osnovna tipa nevronskih mrež: usmerjene nevronske mreže (ang.: *feedforward neural networks*) in nevronske mreže s povratnimi povezavami (ang.: *recurrent neural networks*) [55]. Za usmerjene nevronske mreže je značilno, da se vedno propagirajo naprej, kar z drugimi besedami pomeni, da informacije v nevronske mreži

potujejo le v smeri od vhoda proti izhodu. Vsak vhodni podatek (vhodni vektor) se v usmerjeni nevronske mreži obravnava kot ločena entiteta, kar pomeni, da predhodni podatki na delovanje takšne nevronske mreže nimajo vpliva. Za nevronske mreže s povratnimi povezavami je značilno, da poleg povezav naprej vsebujejo tudi povratne povezave v mreži. Delovanje teh nevronske mreže je odvisno od zaporedja vhodnih podatkov, kar pomeni, da se učenje in delovanje precej razlikuje od usmerjenih nevronske mreže. Te nevronske mreže so dinamične, ker se njihovo stanje spreminja dokler ne dosežejo ravnovesne točke. Klasifikacija pomembnejših tipov nevronske mreže je prikazana na sliki 5.2.



Slika 5.2: Klasifikacija pomembnejših tipov nevronske mreže

V nadaljevanju je opisano delovanje in učenje več-plastnega perceptrona, ki spada med usmerjene nevronske mreže. Več-plastni perceptron je običajno sestavljen iz treh plasti nevronov, kjer je vhodna plast povezana s skrito plastjo, ta pa z izhodno plastjo. Izhod vsakega nevrona v plasti je preko uteži povezan z vsemi nevroni v naslednji plasti. Vhodna informacija v nevronske mreže predstavlja aktivnost na vhodni plasti. V skriti plasti se določijo vrednosti uteži med vhodno in skrito plastjo nevronov. Končni izhod oziroma rezultat več-plastnega perceptrona je odvisen od aktivnosti v skriti plasti in od vrednosti uteži med skrito in izhodno plastjo. Tipičen primer usmerjene nevronske mreže z eno skrito plastjo je prikazan na sliki 5.3.

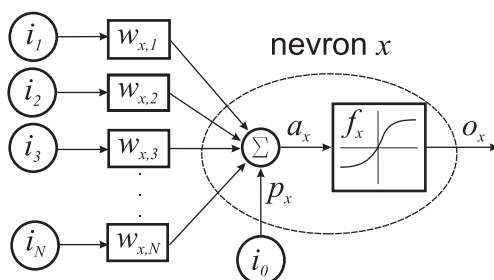


Slika 5.3: Nevronska mreža (več-plastni perceptron)

Univerzalni aproksimacijski teorem pravi, da je lahko vsaka zvezna funkcija, ki preslikuje vhodni interval realnih števil v nek izhodni interval realnih števil, ocenjena z večplastnim perceptronom, ki ima samo en skriti nivo nevronov [56]. Večanje števila nevronov oziroma plasti ima tudi praktične omejitve, saj zahtevana procesorska zmogljivosti računalnikov s tem hitro narašča. Za praktične aplikacije je potrebno poiskati kompromis med zahtevano natančnostjo nevronske mreže in procesorsko zmogljivostjo. Večino praktičnih primerov lahko z zadostno natančnostjo rešimo z večplastnimi perceptroni z eno ali dvema skritima plastema in omejenim številom nevronov v skriti plasti.

5.1.3 Zgradba umetnega nevrona

Osnovni gradniki umetnih nevronske mreže so nevroni. To so pragovne funkcije, ki imajo več vhodov ter en izhod. Vhodi in izhodi iz posameznih nevronov so povezani z drugimi nevroni v nevronske mreže preko sinaps, od katerih ima vsaka sinapsa svojo pripadajočo utež (ang.: *weight*). Sinapsa je vzbujajoča, če je njena utež pozitivna in zavirajoča, če je njena utež negativna. Na sliki 5.4 je prikazan model umetnega nevrona.



Slika 5.4: Model umetnega nevrona

Aktivacija a_x poljubnega nevrona x je vsota vseh vhodov v nevron, ki so preko sinaps oziroma sinaptičnih uteži ustrezno ojačani. Aktivacija se zato lahko izrazi kot

$$a_x = \sum_{y=1}^N w_{x,y} i_y + p_x, \quad (5.1)$$

kjer je N število vhodov v nevron, $w_{x,y}$ pa so vrednosti pripadajočih sinaptičnih uteži k vhodom. Osnovni model nevrona vsebuje tudi prag p_x (ang.: *threshold*), ki predstavlja nivo signala, pri katerem se sproži nevron. Prag se lahko smatra tudi kot zunanji parameter nevrona. Z vpeljavo $w_{x,0} = p_x$ in $i_0 = 1$, se lahko aktivacija nevrona izračuna z enačbo

$$a_x = \sum_{y=0}^N w_{x,y} i_y. \quad (5.2)$$

Izhod iz nevrona o_x se izračuna z uporabo aktivacijske funkcije f kot

$$o_x = f(a_x) = f\left(\sum_{y=0}^N w_{x,y} i_y\right). \quad (5.3)$$

Model nevrona, ki sta ga leta 1943 predstavila McCulloch in Pitts, je bil izdelan z uporabo pragovne (stopničaste) funkcije, ki je definirana kot

$$f(a_x) = \begin{cases} 1, & a_x \geq 0 \\ 0, & a_x < 0 \end{cases}. \quad (5.4)$$

Poznamo še druge vrste aktivacijskih funkcij. Odsekoma linearna funkcija je aproksimacija nelinearnega ojačevalnika in je definirana kot

$$f(a_x) = \begin{cases} 0, & a_x \leq -0,5 \\ a_x, & -0,5 < a_x < 0,5 \\ 1, & a_x \geq 0,5 \end{cases}. \quad (5.5)$$

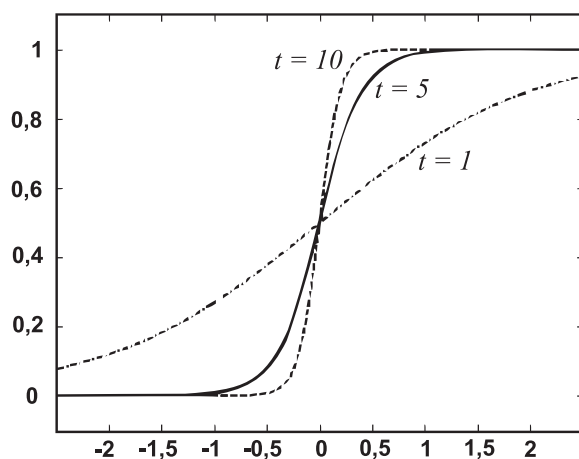
Običajno se kot aktivacijske funkcije uporabljajo tako imenovane sigmoidne funkcije, katerih skupna značilnost je podobnost s črko S. Najbolj znana sigmoidna funkcija je logistična funkcija, ki je definirana z enačbo

$$f(a_x) = \frac{1}{1 + e^{-t(a_x + b)}}, \quad (5.6)$$

kjer je t parameter naklona. Velike vrednosti parametra t naredijo logistično funkcijo bolj strmo, male vrednosti parametra t pa krivuljo sploščijo (slika 5.5). Ko se parameter naklona t približuje k neskončnosti, postane logistična funkcija enostavna pragovna funkcija. S parametrom b lahko logistično funkcijo pomikamo levo in desno po x osi. Logistična funkcija zvezno zavzame vrednosti od 0 do 1 in je za razliko od pragovne funkcije odvedljiva. Odvod se zapiše z enačbo

$$f'(a_x) = f(a_x) (1 - f(a_x)). \quad (5.7)$$

V skupino sigmoidnih funkcij poleg logistične funkcije spadajo še funkcije, kot so hiperbolični tangens, funkcija signum, itd. Vsem funkcijam je skupno, da z neomejenega definicijskega območja slikajo na omejeno zalogo vrednosti, na primer na interval $[0,1]$ v primeru logistične funkcije, oziroma na interval $[-1,1]$ v primeru funkcije hiperbolični tangens.



Slika 5.5: Logistična funkcija v odvisnosti od parametra naklona t

5.1.4 Algoritem vzratnega razširjanja napake

Pravila učenja so razdeljena v tri skupine: nadzorovano učenje (ang.: *supervised learning*), nenadzorovano učenje (ang.: *unsupervised learning*) in ojačitveno učenje (ang.: *reinforcement learning*). Pri nadzorovanem tipu učenja se vrednosti sinaptičnih uteži urejajo na podlagi množice učnih parov, ki vsebujejo vhodne vrednosti v nevronske mreže in želene izhodne vrednosti iz nevronske mreže. Pred začetkom učenja se vrednosti sinaptičnih uteži in pragov postavijo na naključne vrednosti. Z učnim algoritmom nato prilagajamo te uteži tako dolgo, da za vse vhodne vrednosti na izhodu nevronske mreže dobimo želene vrednosti. Za ostali dve skupini učenja nevronske mreže velja, da pri učenju ni podanih želenih izhodnih vrednosti iz nevronske mreže. Pri nenadzorovanem učenju učni algoritem prireja vrednosti parametre nevronske mreže na podlagi vhodnih vrednosti v nevronske mreže. Po zaključenem postopku učenja so vhodni podatki klasificirani v posamezne razrede. Ojačitveno učenje je posebna oblika nadzorovanega učenja v tem smislu, da je rezultat učenja pridobljen od zunaj. Osnova tem učnim algoritmom je tako imenovano tekmovanje za prevlado, kjer se zmagovalni nevron ojača, ostali nevroni pa se oslabijo.

Večplastne perceptrone najpogosteje učimo z algoritmom vzratnega razširjanja napake, ki spada v tip nadzorovanega učenja nevronske mreže [57]. Ta algoritem vsebuje dva prehoda skozi nevronske mreže in sicer prehod naprej in prehod nazaj. Za vhodni podatek (vhodni vektor) se pri prehodu naprej izračuna izhod iz nevronske mreže. Dobljeni izhod iz nevronske mreže se odšteje od želenega izhoda. Razlika med želenim in dejanskim izhodom (napaka nevronske mreže za vhodni podatek) se propagira nazaj z namenom, da se prilagodijo sinaptične uteži in da postane dejanski izhod iz nevronske mreže bližje žele-

nemu. Sinaptične uteži se popravijo po predstavitvi vsakega učnega vzorca. Skupna napaka nevronske mreže E je pri učenju z algoritmom vzratnega razširjanja določena kot

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (T_k - O_k)^2, \quad (5.8)$$

kjer T_k predstavlja želene vrednosti na izhodu nevronske mreže, O_k pa dejanske vrednosti nevronov na izhodu nevronske mreže.

Z algoritmom vzratnega razširjanja napake se izračunajo spremembe sinaptičnih uteži na osnovi parcialnih odvodov skupne napake nevronske mreže po vseh sinaptičnih utežeh v mreži. Skupna napaka je torej definirana kot funkcija sinaptičnih uteži. Optimalne vrednosti sinaptičnih uteži se izračunajo z uporabo matematične metode, ki se imenuje padajoči gradient oziroma gradientni spust (ang.: *gradient descent*). Gradientni spust poljubne uteži $w_{x,y}$ je definiran kot

$$\Delta w_{x,y} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{x,y}}, \quad (5.9)$$

kjer je η konstanta, ki določa hitrost spremembe vrednosti uteži, $\frac{\partial E}{\partial w_{x,y}}$ pa je parcialni odvod skupne napake nevronske mreže glede na poljubno utež $w_{x,y}$. Na osnovi enačb 5.8 in 5.9 je izpeljano splošno pravilo za izračun spremembe poljubne uteži nevronske mreže, ki je definirano kot

$$\Delta w_{x,y} = \eta \delta_x o_y. \quad (5.10)$$

Pri tem je δ_x gradient poljubnega nevrona x , o_y pa je izhod nevronov iz predhodne plasti. V nadaljevanju je za nazornejšo predstavitev enačb poljubni nevron skrite plasti označen z indeksom j , poljubni nevron izhodne plasti pa je označen z indeksom k (slika 5.3). Splošna enačba za izračun gradienta poljubnega nevrona k v izhodni plasti je zapisana kot

$$\delta_k = f'(a_k) (T_k - O_k), \quad (5.11)$$

kjer je $f'(a_k)$ odvod prenosne funkcije nevronov v izhodni plasti, $(T_k - O_k)$ pa je razlika (napaka) med želenim in dejanskim izhodom poljubnega nevrona k v izhodni plasti. Splošna enačba za izračun gradienta poljubnega nevrona j v skriti plasti pa je zapisana kot

$$\delta_j = f'(a_j) \sum_{k=1}^N (w_{k,j} \delta_k), \quad (5.12)$$

kjer je $f'(a_j)$ odvod prenosne funkcije nevronov v skriti plasti.

Končna enačba za izračun spremembe uteži nevronov v izhodni plasti, ki se izrazi z uporabo enačb 5.10 in 5.11, je torej definirana kot

$$\Delta w_{k,j} = \eta f'(a_k) (T_k - O_k) o_j, \quad (5.13)$$

pri čemer je o_j izhod nevronov v skriti plasti nevronske mreže. Enačba za izračun spremembe uteži nevronov v skriti plasti, ki se izrazi uporabo enačb 5.10 in 5.12, pa je definirana kot

$$\Delta w_{j,i} = \eta f'(a_j) \sum_{k=1}^N (w_{k,j} \delta_k) I_i, \quad (5.14)$$

pri čemer je za 3-plastno nevronska mrežo I_i i -ti vhod v nevronska mrežo.

Sprememba uteži nevronov v skriti plasti in izhodni plasti nevronske mreže se prišteje k trenutni vrednosti uteži. Nova vrednost uteži se upošteva v naslednjem ciklu učenja za učni vzorec $p + 1$. To pomeni, da se izhod nevronske mreže v naslednjem ciklu izračuna na podlagi uteži, ki so določene kot

$$w_{k,j}^{p+1} = w_{k,j}^p + \Delta w_{k,j}^p, \quad (5.15)$$

za izhodno plast nevronske mreže, oziroma za skrito plast nevronske mreže kot

$$w_{j,i}^{p+1} = w_{j,i}^p + \Delta w_{j,i}^p. \quad (5.16)$$

V enačbah 5.13 in 5.14 se pojavlja učna konstanta η , ki vpliva na hitrost in stabilnost učenja nevronske mreže in jo je zato potrebno pravilno izbrati.

5.2 Ocenitev inverznega modela proge - implementacija

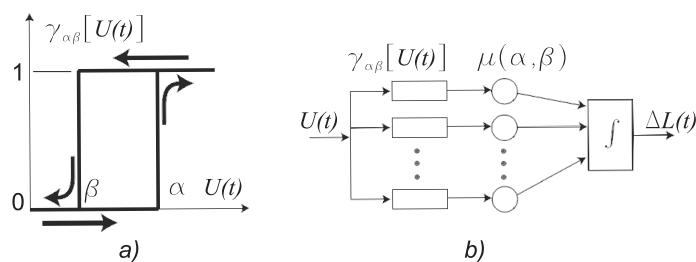
Kljub splošno znani univerzalnosti nevronskih mrež, njihova praktična uporaba pri modeliranju in nadalje pri položajnem vodenju robotskih mehanizmov ni trivialna. Vsekakor je pri načrtovanju takšnega vodenja potrebno skrbno določiti število in vrsto vhodov ter izhodov nevronske mreže. Nadalje je potrebno določiti tudi število plasti nevronske mreže, število nevronov, intervale začetnih uteži, vrednosti učnih konstant ter nenazadnje tudi način oziroma metodo učenja.

Razumevanje proge je ključnega pomena pri načrtovanju položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo inverznega modela, ki pri tem predstavlja pred-krmilnik. Pri izdelavi inverznega modela robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami je v prvi vrsti

potrebno določiti ustrezne vhode in izhode nevronske mreže, saj se le tako lahko pravilno oceni njegov inverzni model. Glavni izziv pri razumevanju proge predstavlja histerezni pojav v piezoelektričnih aktuatorjih. Za razumevanju histereznega pojava smo si pomagali s Preisach-ovim modelom, ki je najbolj pogosto uporabljen in najbolj znan matematični opis histerez v piezoelektričnih aktuatorjih.

5.2.1 Opis Preisach-ovega modela histerez

Osnovna ideja Preisach-ovega modela [58] leži v opisu histerez skozi neskončno število histereznih operatorjev $\gamma_{\alpha\beta}[U(t)]$. Za piezoelektrične aktuatorje velja, da je histerezni operator enak $+1$ v primeru, ko je trenutna krmilna napetost $U(t)$ večja od zgornje mejne vrednosti napetosti α , in enak 0 , ko je trenutna krmilna napetost manjša od spodnje mejne vrednosti napetosti β (slika 5.6a). V blokovni shemi modela so histerezni operatorji pomnoženi z utežitveno funkcijo $\mu[\alpha, \beta]$ in vzporedno povezani kot je prikazano na sliki 5.6b.

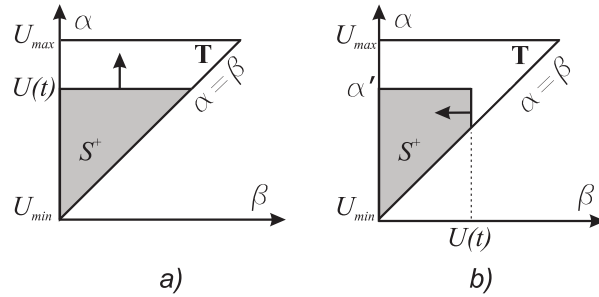


Slika 5.6: a) Histerezni operator in b) blokovna shema Preisach-ovega modela

Takšna predstavitev histreze v piezoelektričnih aktuatorjih upošteva dejstvo, da so histereze nelinearen pojav z nelokalnim spominskim efektom (ang.: *nonlocal memory effect*). To pomeni, da je sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja ΔL odvisna tudi od zgodovine vrednosti krmilne napetosti. Klasični Preisach-ov model je predstavljen z enačbo

$$\Delta L(t) = \iint_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[U(t)] d\alpha d\beta. \quad (5.17)$$

Enačba 5.17 se lahko grafično predstavi z uporabo mejnega trikotnika (\mathbf{T}), imenovanega tudi $\alpha - \beta$ diagram. Mejni trikotnik je definiran tako, da velja $U_{max} \geq \alpha \geq \beta \geq U_{min}$, kjer je U_{max} največja zgornja mejna vrednost krmilne napetosti in U_{min} najmanjša spodnja vrednost krmilne napetosti. Površina S^+ ustreza operatorju $\gamma_{\alpha\beta}[U(t)]$, ko je ta enak vrednosti $+1$. Površina S^+ se povečuje od spodaj navzgor pri povečevanju trenutne vrednosti krmilne napetosti (slika 5.7a) ter se zmanjšuje od desne proti levi pri zmanjševanju trenutne vrednosti krmilne napetosti (slika 5.7b).



Slika 5.7: Mejni trikotnik pri a) povečevanju in b) zmanjševanju krmilne napetosti

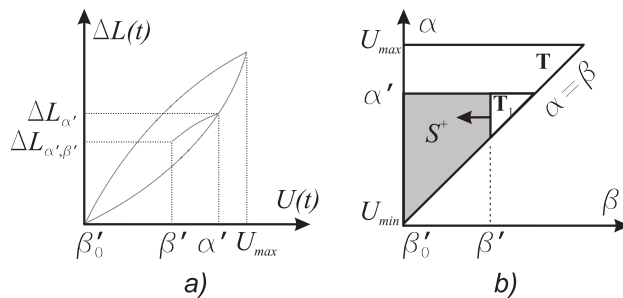
Ker je operator $\gamma_{\alpha\beta}[U(t)]$ enak 0 zunaj površine S^+ , se lahko enačba 5.17 zapiše kot

$$\Delta L(t) = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (5.18)$$

Z namenom, da se poenostavi računanje oziroma dvojna integracija, se sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja lahko izračuna tudi kot

$$\Delta L(\alpha', \beta') = \Delta L_{\alpha'} - \Delta L_{\alpha', \beta'}, \quad (5.19)$$

kjer je $\Delta L_{\alpha'}$ sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja pri krmilni napetosti α' , in $\Delta L_{\alpha', \beta'}$ sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja na povratni krivulji pri krmilni napetosti β' , kot je prikazano na sliki 5.8a. Pri tem α' predstavlja zgornjo mejno vrednost krmilne napetosti, β' pa predstavlja spodnjo mejno vrednost krmilne napetosti.

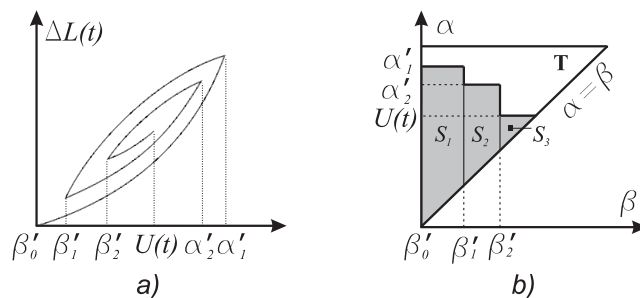


Slika 5.8: Sprememba dolžine piezo. aktuatorja in pripadajoči mejni trikotnik

Sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja (enačba 5.19) se lahko glede na sliko 5.8b izračuna tudi z uporabo enačbe

$$\Delta L(\alpha', \beta') = \iint_{T_1} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (5.20)$$

V primeru kot histerezna zanka vsebuje več maksimalnih oziroma minimalnih vrednost krmilne napetosti, je površina S^+ sestavljena iz več trapezoidnih regij, kot je prikazano na sliki 5.9.



Slika 5.9: a) Mejne vrednosti krmilne napetosti in b) pripadajoči mejni trikotnik

Vse mejne vrednosti krmilne napetosti (zgornje α'_k in spodnje β'_k) so shranjene v zgodovino. Za regijo S_1 se lahko sklepamo, da velja

$$\iint_{S_1} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \Delta L(\alpha'_1, \beta'_0) - \Delta L(\alpha'_1, \beta'_1). \quad (5.21)$$

Integracija na površini S^+ je vsota integracij na vseh površinah S_k . To pomeni, da se lahko sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja glede na enačbo 5.18 pri trenutni pozitivni spremembi napetosti ($\dot{U}(t) > 0$) izračuna z enačbo

$$\Delta L(t) = \sum_{k=1}^N [\Delta L(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - \Delta L(\alpha'_k, \beta'_k)] + \Delta L(U(t), \beta'_N). \quad (5.22)$$

Podobno se lahko celotna sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja pri trenutni negativni spremembi napetosti ($\dot{U}(t) < 0$) izračuna z enačbo

$$\Delta L(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [\Delta L(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - \Delta L(\alpha'_k, \beta'_k)] + \Delta L(\alpha'_N, \beta'_{N-1}) - \Delta L(\alpha'_N, U(t)), \quad (5.23)$$

kjer je N število shranjenih vrednosti α'_k in β'_k .

Za izračun vrednosti $\Delta L(\alpha', \beta')$ je potrebno vzpostaviti mrežo vrednosti α in β znotraj mejnega trikotnika \mathbf{T} . Vrednosti $\Delta L(\alpha, \beta)$ so za vsako vozlišče α in β izmerjene na realnem piezoelektričnem aktuatorju ter shranjene v pripadajočo mrežo za nadaljnjo uporabo. Ker je število vozlišč omejeno, je pri izračunu vrednosti $\Delta L(\alpha', \beta')$ potrebno uporabiti obliko interpolacije. Potem ko se določi celica v katero spada nek poljubni par (α', β') se pripadajoča vrednost $\Delta L(\alpha', \beta')$ izračuna z uporabo bilinearne interpolacije po enačbi

$$\Delta L(\alpha', \beta') = a_{00} + a_{10} \alpha' + a_{01} \beta' + a_{11} \alpha' \beta'. \quad (5.24)$$

Za vsako vrednost $\Delta L(\alpha', \beta')$ se interpolacijski koeficienti $a_{0,0}$, $a_{1,0}$, $a_{0,1}$ in $a_{1,1}$ pridobijo skozi interpolacijo, ki je osnovana na vrednostih vozlišč, ki obkrožajo celico $\Delta L(\alpha_i, \beta_j)$, $\Delta L(\alpha_i, \beta_{j+1})$, $\Delta L(\alpha_{i+1}, \beta_j)$ in $\Delta L(\alpha_{i+1}, \beta_{j+1})$.

Za pravilno delovanje Preisach-*ovega* modela, je potrebno vključiti še lastnost brisanja (ang.: *wipe-out property*). Ta lastnost omogoča da se nek par $(\alpha'_N, \beta'_{N-1})$ izbriše iz zgodovine, ko trenutna vrednost krmilne napetosti preseže vrednost α'_N . Podobne se lahko par (α'_N, β'_N) izbriše iz zgodovine, ko vrednost krmilne napetosti postane manjša od β'_N .

Eden od načinov položajnega vodenja piezoelektričnih aktuatorjev v odprti zanki je z uporabo inverznega Preisach-*ovega* modela [58]. V ta namen je na osnovi predhodno izpeljanih enačb potrebno določiti izraz za izračun krmilne napetosti, ki zagotavlja doseganje želene vrednosti spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja.

Prvič je obravnavan primer, ko trenutna vrednost krmilne napetosti narašča ($\dot{U}(t) > 0$). Pri tem je čas t_0 definiran v trenutku, ko krmilna napetost doseže lokalni minimum in se sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja lahko izračuna z enačbo

$$\Delta L(t_0) = \sum_{k=1}^N [\Delta L(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - \Delta L(\alpha'_k, \beta'_k)]. \quad (5.25)$$

Vse spremembe dolžin $\Delta L(\alpha'_k, \beta'_{k-1})$ in $\Delta L(\alpha'_k, \beta'_k)$ so predhodno shranjene v zgodovino gibanja. Ko se krmilna napetost od trenutka t_0 naprej povečuje, se sprememba dolžine piezoelektričnega aktuatorja lahko izračuna z enačbo 5.22. S kombiniranjem enačb 5.22 in 5.25 dobimo naslednji izraz

$$\Delta L(U(t), \beta'_N) = \Delta L(t) - \Delta L(t_0). \quad (5.26)$$

Sprememba dolžine $\Delta L(U(t), \beta'_N)$ se lahko izračuna tudi z enačbo 5.24 kot

$$\Delta L(U(t), \beta'_N) = a_{00} + a_{10} U(t) + a_{01} \beta'_N + a_{11} U(t) \beta'_N. \quad (5.27)$$

S kombiniranjem enačb 5.26 in 5.27 dobimo končni izraz za izračun krmilne napetosti pri njenem povečevanju v odvisnosti od želene spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja

$$U(t) = \frac{\Delta L(t) - \Delta L(t_0) - a_{00} - a_{01} \beta'_N}{a_{10} + a_{11} \beta'_N}. \quad (5.28)$$

Drugič je obravnavan primer, ko trenutna vrednost krmilne napetosti pada ($\dot{U}(t) < 0$). Izpeljava enačbe za izračun krmilne napetosti v tem primeru je zelo podobna izpeljavi za primer, ko krmilna napetost narašča. Končni izraz za izračun krmilne napetosti pri njenem zmanjševanju v odvisnosti od želene spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja je zato enak

$$U(t) = \frac{\Delta L(t_0) - \Delta L(t) - a_{00} - a_{10}\alpha'_N}{a_{01} + a_{11}\alpha'_N}. \quad (5.29)$$

Predstavljeni Preisach-*ov* model predstavlja eksperimentalni opis delovanja piezoelektričnih aktuatorjev. Njegov inverz se lahko uporablja za vodenje piezoelektričnih aktuatorjev v odprti zanki, vendar je potrebno za določitev parametrov modela veliko eksperimentalnih meritev.

Predstavljeni inverzni Preisach-*ov* model nazorno kaže, da je krmilna napetost odvisna od želene spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja ter tudi od zgodovine vrednosti krmilnih napetosti. Pri opisu inverznega Preisach-*ovega* modela smo želeli izpostaviti ravno to dejstvo, ki ga je potrebno upoštevati pri načrtovanju zgradbe nevronskih mrež.

5.2.2 Zgradba nevronskih mrež

S pojmom zgradba nevronskih mrež je določeno število in vrsta vhodov v nevronske mreže, število skritih plasti in nevronov ter število in vrsta izhodov iz nevronskih mrež. Vsi ti parametri imajo velik vpliv na učinkovitost nevronskih mrež pri ocenitvi inverznega modela robotskega mehanizma. Pri opisu inverznega Preisach-*ovega* modela je poudarjeno, da je vrednost krmilne napetosti odvisna od želene spremembe dolžine piezoelektričnega aktuatorja ter tudi od zgodovine vrednosti krmilnih napetosti. Z upoštevanjem tega dejstva smo določili osnovno zgradbo nevronske mreže, katere vhodi in izhodi so shematsko prikazani na sliki 5.10.



Slika 5.10: Nevronska mreža z vhodi in izhodi

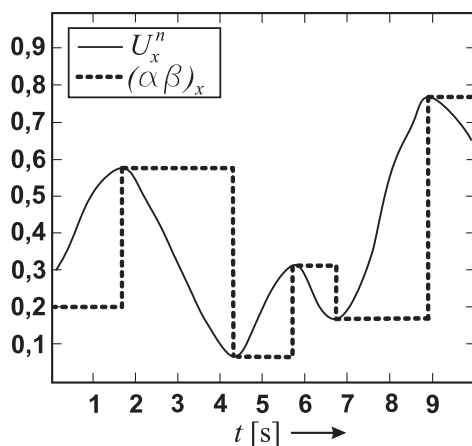
Iz slike 5.10 je razvidno, da ima predlagana nevronska mreža 4 vhode in 2 izhoda. Prva dva vhoda predstavljata želeni (referenčni) položaj vrha robotskega mehanizma za vsako od osi robotskega mehanizma. Druga dva vhoda $((\alpha\beta)_x$ in $(\alpha\beta)_y$) predstavljata mejne vrednosti krmilnih napetosti oziroma zgodovino krmilnih napetosti za vsako os robotskega mehanizma posebej. Izhoda iz nevronske mreže sta krmilni napetosti za vsako od obeh osi robotskega mehanizma.

Pri izdelavi simulacijskega modela je bilo predpostavljeno in nato z eksperimentalnimi meritvami potrjeno, da osi robotskega mehanizma niso sklopljene. Zaradi tega je za ocenitev inverznega modela smiselno uporabiti dve enaki nevronske mreži. Pri tem načinu se vsaka

od nevronske mreže uporabi za ocenitev inverznega modela ene osi robotskega mehanizma.

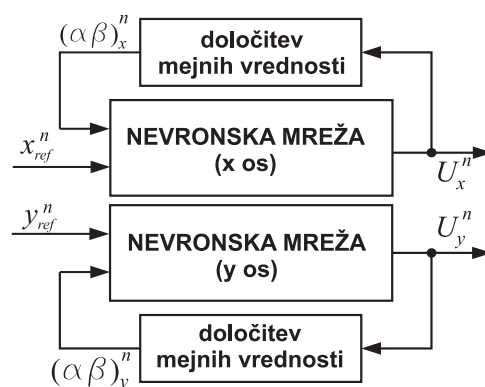
Vrednosti vhodov v nevronske mreže so normirane na interval od 0 do 1, kar pomeni, da sta referenčni vrednosti položaja vrha robotskega mehanizma (x_{ref} in y_{ref}) deljeni z velikostjo delovnega območja. Prav tako so na isti interval normirane krmilne napetosti, ki so s tem enake širini pulza PŠM krmilnega signala na vhodu napetostnih ojačevalnikov ($U_x^n = PSM_x$ in $U_y^n = PSM_y$). Normirana krmilna napetost 0 zato predstavlja -100 V krmilne napetosti na izhodu napetostnega ojačevalnika, normirana krmilna napetost 1 pa predstavlja 100 V krmilne napetosti na izhodu napetostnega ojačevalnika.

Na isti interval so normirane tudi mejne vrednosti krmilnih napetosti ($(\alpha\beta)_x$ in $(\alpha\beta)_y$), ki so izračunane z uporabo algoritma za določanje mejnih vrednosti. Določitev mejnih vrednosti krmilnih napetosti na podlagi normirane vrednosti krmilne napetosti je grafično prikazana na sliki 5.11.



Slika 5.11: Mejna vrednost krmilne napetosti v odvisnosti od krmilne napetosti

Spodnja mejna vrednosti normirane krmilne napetosti se določi v trenutku, ko je trenutna normirana krmilna napetost večja od predhodne normirane krmilne napetosti. V primeru, ki je prikazan na sliki 5.11, se to zgodi v času 4,2 s in 6,8 s. Podobno se zgornja mejna vrednost normirane krmilne vrednosti določi v trenutku, ko je trenutna normirana krmilna napetost manjša od predhodne normirane krmilne napetosti. Kot je prikazano na primeru se to zgodi v času 1,8 s, 5,8 s in 9,0 s. V času povečevanja normirane krmilne napetosti je aktualna spodnja mejna vrednost normirane krmilne napetosti. V času zmanjševanja normirane krmilne napetosti pa je aktualna zgornja mejna vrednost normirane krmilne napetosti. Opisana struktura z dvema nevronske mrežama in z dodatnimi bloki za izračun mejnih vrednosti normirane krmilne napetosti je v obliki blokovne shema prikazana na sliki 5.12.



Slika 5.12: Nevronske mreže z normiranimi vhodi in izhodi

Poleg določitve vhodov in izhodov nevronske mreže je potrebno izbrati število plasti, število nevronov v plasteh ter obliko aktivacijskih funkcij. Pri določitvi števila skritih plasti smo upoštevali dejstvo, da je z nevronske mreže, ki vsebuje vsaj eno skrito plast, možno oceniti poljubno nelinearno funkcijo [56]. Na začetku je bil za ocenitev inverznega modela robotskega mehanizma uporabljen večplastni perceptron z eno skrito plastjo in z 20 nevroni. Aktivacijska funkcija za nevrone v skriti plasti je logistična funkcija (enačba 5.6), aktivacijska funkcija za nevrone v izhodni plasti pa je linearna funkcija ($f(a_k) = 0, 1 a_k$).

5.2.3 Izvedba učenja nevronske mreže s specializirano arhitekturo

Dejansko učenje nevronske mreže za ocenitev inverznega modela robotskega mehanizma je izvedeno s specializirano arhitekturo (slika 5.1b). Pri specializiranem učenju so nevronske mreže vključene v progo že od samega začetka učenja. Običajno se pri tem načinu učenja oziroma položajnega vodenja na začetku pojavi nestabilnost, saj inverzni model robotskega mehanizma ni ustrezno ocenjen. Inverzni model robotskega mehanizma se oceni šele skozi zaporedje učnih vzorcev. Začetna nestabilnost pri obravnavanem robotskem mehanizmu ne predstavlja težave, saj je ta zgrajen tako, da ne more uničiti samega sebe. Obravnavani robotski mehanizem zaradi majhnih pomikov in sil tudi ni nevaren za okolico.

Pri izpeljavi enačb za učenje nevronske mreže s specializirano arhitekturo in z algoritmom vzratnega razširjanja je potrebno upoštevati položaj robotskega mehanizma v blokovni shemi učenja. Algoritem vzratnega razširjanja se mora izvajati preko proge (ang.: *back-propagation through the plant*). Avtorji predlagajo, da se proga pri tej arhitekturi učenja smatra kot zadnja (navidezno dodana) plast nevronske mreže [53], ki je v nadaljevanju označena z indeksom p . Glede na splošno enačbo 5.11 je gradient navidezno dodane plasti nevronske mreže odvisen od vrednosti napake učenja oziroma pogreška kot

$$\delta_p = f'(a_p) (T_p - O_p). \quad (5.30)$$

Vrednost odvoda funkcije $f(a_p) = a_p$ je enaka 1. Enačba za izračun gradienta na dejanski izhodni plasti nevronske mreže zaradi navidezno dodane zadnje plasti ni več definirana na osnovi enačbe 5.11, pač pa je definirana na osnovi enačbe 5.12 kot

$$\delta_k = f'(a_k) \sum_{p=1}^P (\delta_p w_{p,k}), \quad (5.31)$$

kjer je P število izhodov (neuronov) navidezno dodane plasti nevronske mreže. To število je v našem primeru učenja inverznega modela robotskega mehanizma z dvema nevronskima mrežama očitno enako 1 (slika 5.12), kar pomeni, da lahko enačbo 5.31 poenostavimo ($P = 1$) in jo izrazimo z enačbo 5.30 kot

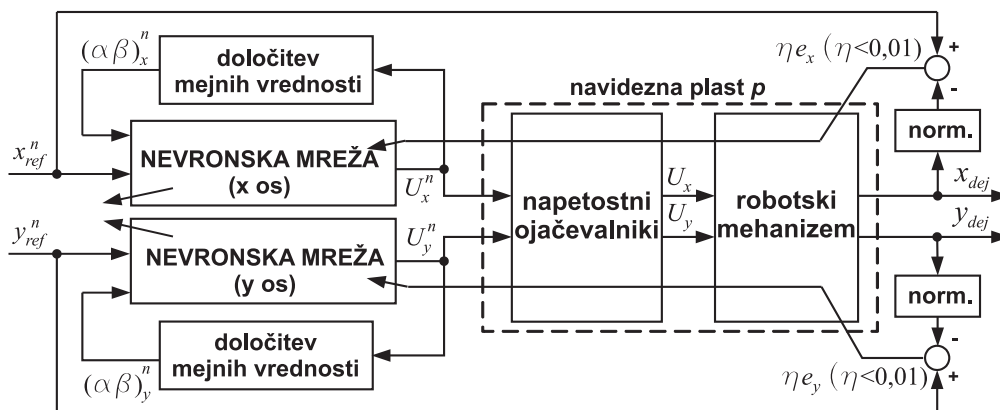
$$\delta_k = f'(a_k) (T_p - O_p) w_{p,k}. \quad (5.32)$$

Uteži med dejansko izhodno plastjo nevronske mreže (krmilna napetost) in navidezno dodano plastjo nevronske mreže (dejanski položaj vrha robotskega mehanizma) lahko nadomestimo s parcialnimi odvodi [59]. Ker je učenje inverznega modela robotskega mehanizma kot rečeno izvedeno z dvema nevronskima mrežama, ima vsaka od obeh nevronskih mrež med dejansko izhodno plastjo in navidezno izhodno plastjo samo eno utež. Ta utež je za x os definirana kot $w_{p,k}^x = w_{1,1}^x = \frac{\partial x_{dej}^n}{\partial U_x^n}$ in za y os kot $w_{p,k}^y = w_{1,1}^y = \frac{\partial y_{dej}^n}{\partial U_y^n}$. Ti parcialni odvodi so v splošnem členi Jacobijeve matrike, ki so težko določljivi. Nekateri avtorji so dokazali, da rezultati specializiranega učenja nevronskih mrež z algoritmom vzvratnega razširjanja niso poslabšani, če se omenjeni parcialni odvodi poenostavijo in nadomestijo s funkcijo *sign*, katere vrednost je enaka +1 za pozitivne vrednosti parcialnih odvodov in je enaka -1 za njihove negativne vrednosti [59]-[60]. Za obravnavani robotski mehanizem velja, da vsaka pozitivna sprememba napajalne napetosti (U_x^n oziroma U_y^n) povzroči tudi pozitivno spremembo položaja vrha robotskega mehanizma (x_{dej} oziroma y_{dej}) in da vsaka negativna sprememba napajalne napetosti povzroči tudi negativno spremembo položaja vrha robotskega mehanizma. To pomeni, da so parcialni odvodi v enačbi 5.32 vedno pozitivni in jih zato z upoštevanjem zgornje poenostavitve lahko nadomestimo z vrednostjo +1. Na podlagi tega dobimo enačbo za izračun gradienta na dejanskem izhodu nevronskih mrež

$$\delta_k = f'(a_k) (T_p - O_p), \quad (5.33)$$

ki je precej podobna enačbi 5.11. Izraz $(T_p - O_p)$ v enačbi 5.33, ki velja v primeru obrav-

navanega robotskega mehanizma ne predstavlja napake učenja na izhodu nevronske mreže, pač pa napako učenja na izhodu proge oziroma položajni pogrešek. Pri tem za x os velja $(T_p - O_p) = (x_{ref}^n - x_{dej}^n) = e_x$ in za y os velja $(T_p - O_p) = (y_{ref}^n - y_{dej}^n) = e_y$. Ostale enačbe za učenje uporabljenih nevronske mreže so splošne enačbe algoritma vzratnega razširjanja, ki so predstavljene v enem od prejšnjih podglavij (enačbe 5.12 do 5.16). Na sliki 5.13 je prikazana blokovna shema učenja inverznega modela robotskega mehanizma,.



Slika 5.13: Učenje inverznega modela proge

Kvaliteta oziroma natančnost inverznega modela robotskega mehanizma je ocenjena z uporabo ocenitvene funkcije učenja, ki je definirana kot vsota kvadratov pogreška (ang.: *Sum Square Error - SSE*) in je zapisana kot

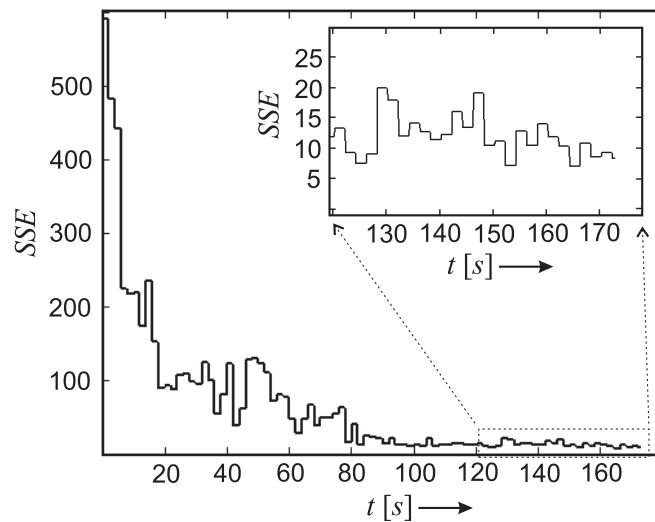
$$SSE = \sum_{i=1}^{1000} (e_x^2 + e_y^2) = \sum_{i=1}^{1000} ((x_{ref}^n - x_{dej}^n)^2 + (y_{ref}^n - y_{dej}^n)^2), \quad (5.34)$$

pri čemer je $(x_{ref}^n - x_{dej}^n)$ oziroma $(y_{ref}^n - y_{dej}^n)$ napaka učenja za vsako od obeh nevronske mreže v danem trenutku. Cilj učenja nevronske mreže je, da se ocenitvena funkcija učenja čimbolj približa vrednosti 0, kar pa je doseženo v primeru, ko za celotno območje učenja velja $x_{ref}^n = x_{dej}^n$ in $y_{ref}^n = y_{dej}^n$. Vrednost ocenitvene funkcije se ugotavlja vsakih 1000 korakov učenja. Algoritem za generiranje naključnih vrednosti referenčnega položaja znotraj delovnega območja robotskega mehanizma vsako novo vrednost x_{ref}^n in y_{ref}^n generira po 200 ponovitvah učnega postopka vzratnega razširjanja. Učenje nevronske mreže se na procesorju izvaja s frekvenco 500 Hz, kar pomeni da se v 1000 ponovitvah učenja preverja natančnost učenja za 5 novih referenčnih vrednosti položaja. Na podlagi povedanega je očitno tudi dejstvo, da se vrednost ocenitvene funkcije obnavlja vsake 2 s.

Vrednost učne konstante η mora biti znotraj nekega določenega intervala vrednosti. V primeru, da je vrednost učne konstante premajhna bo nevronska mreža konvergirala k optimalni rešitvi, vendar bo proces učenja počasen. V primeru, da je vrednost učne

konstante prevelika, pa bo utežni vektor osciliral in postopek učenja zato ne bo konvergirал k stabilni rešitvi. Vrednost učne konstante se je določila z meritvijo ocenitvene funkcije pri postopku učenja nevronske mreže in znaša 0,01.

Poleg vrednosti učne konstante na hitrost in natančnost inverznega modela robotskega mehanizma zelo vpliva izbira intervalov znotraj katerih se nahajajo vrednosti začetnih uteži. Tudi pri izbiri začetnih intervalov uteži smo si pomagali z meritvijo ocenitvene funkcije. Na sliki 5.14 je prikazana vrednost ocenitvene funkcije pri učenju nevronske mreže.



Slika 5.14: Vrednost vsote kvadratov pogreška (SSE) med postopkom učenja

Meritve ocenitvene funkcije učenja kažejo, da izbira intervalov začetnih uteži zelo vpliva na natančnost inverznega modela robotskega mehanizma ter tudi na hitrost učenja nevronske mreže. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov, ki so pridobljeni na podlagi meritve ocenitvene funkcije učenja, so bili izbrani intervali začetnih uteži. Vrednosti začetnih uteži v skriti plasti so znotraj intervala vrednosti od -2 do 1,9, vrednosti začetnih uteži v izhodni plasti pa so znotraj intervala vrednosti od -1 do 1.

Nadalje je iz meritev ocenitvene funkcije učenja razvidno, da se vrednost ocenitvene funkcije po določen času več ne zmanjšuje in da ostane njena vrednost večja od 0. To pomeni, da z uporabo specializiranega učenja nevronske mreže ni mogoče popolnoma natančno oceniti inverznega modela robotskega mehanizma. Eksperimentalne meritve predstavljene v nadaljevanju kažejo, kako nenatančnost ocenitve inverznega modela z uporabo nevronske mreže vpliva na kvaliteto položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma.

Položajno vodenje robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami

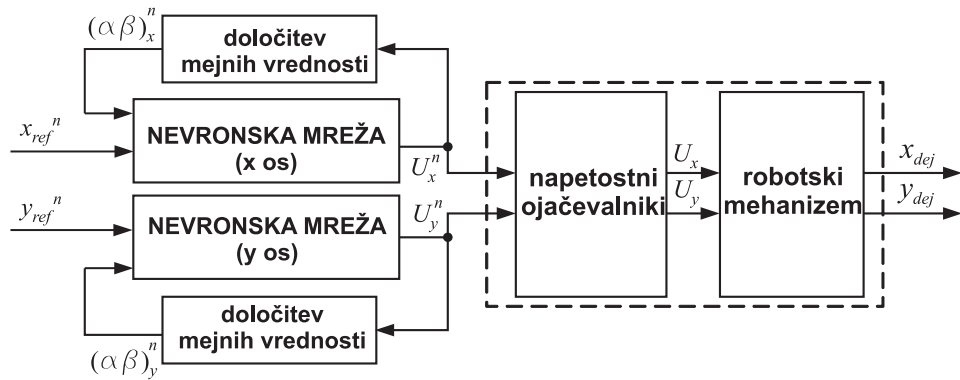
Ocenjeni inverzni model je mogoče koristno uporabiti za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma. V tem poglavju so predstavljeni eksperimentalni rezultati pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z:

- nevronskimi mrežami v odprti zanki,
- nevronskimi mrežami v zaprti zanki in
- nevronskimi mrežami v odprti zanki v kombinaciji s PI regulatorjem.

Za primerjavo eksperimentalnih rezultatov pri vodenju v odprti zanki je uporabljen LPK, ki je predstavljen v poglavju 4.3. Za primerjavo eksperimentalnih rezultatov pri vodenju v zaprti zanki pa je uporabljen PI regulator, ki je predstavljen v poglavju 4.4.

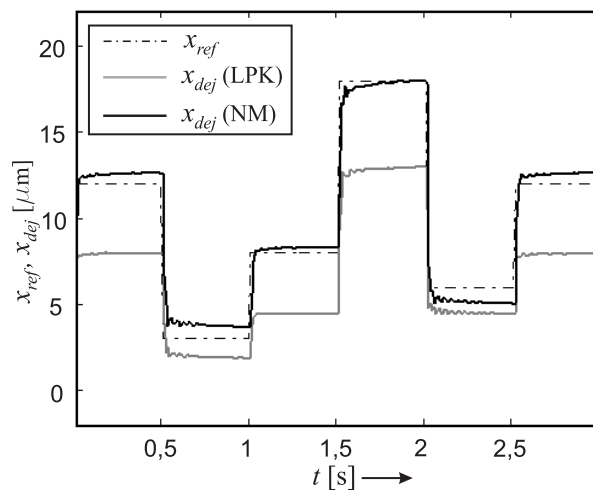
6.1 Položajno vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki

Po zaključenem postopku učenja oziroma po ocenitvi inverznega modela robotskega mehanizma se uteži nevronskih mrež shranijo v datoteko na disku. Te uteži se lahko kadarkoli oziroma pred položajnim vodenjem preberejo iz te datoteke in se nato med položajnim vodenjem v odprti zanki več ne spreminjajo. Blokovna shema predlaganega položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v odprti zanki je prikazana na sliki 6.1.

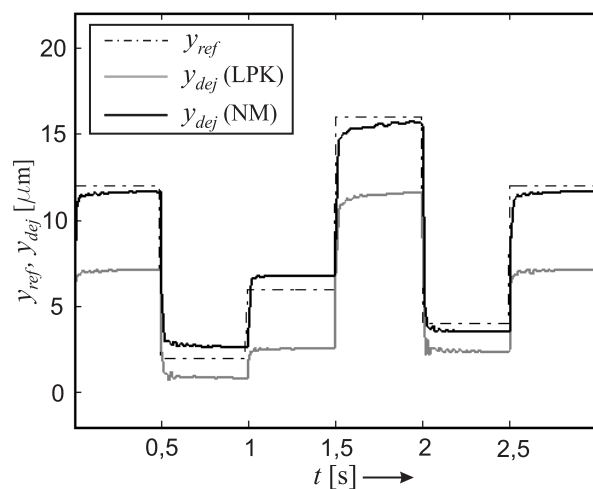


Slika 6.1: Blokovna shema vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki

Na slikah 6.2 in 6.3 so prikazani odzivi na stopnično spremembo referenčnega položaja pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v odprti zanki za x os in za y os robotskega mehanizma.



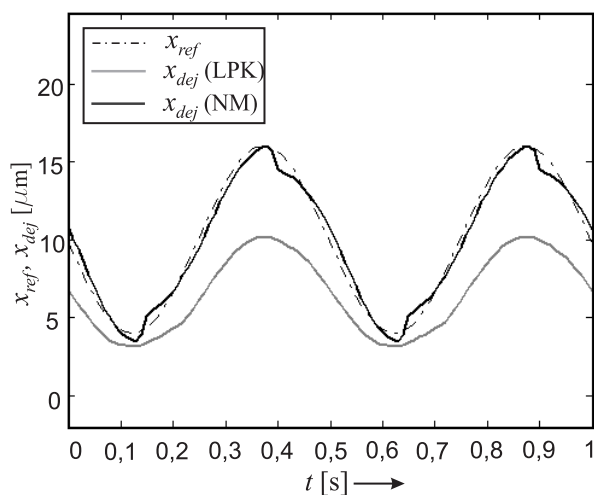
Slika 6.2: Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - stopnični odziv - x os



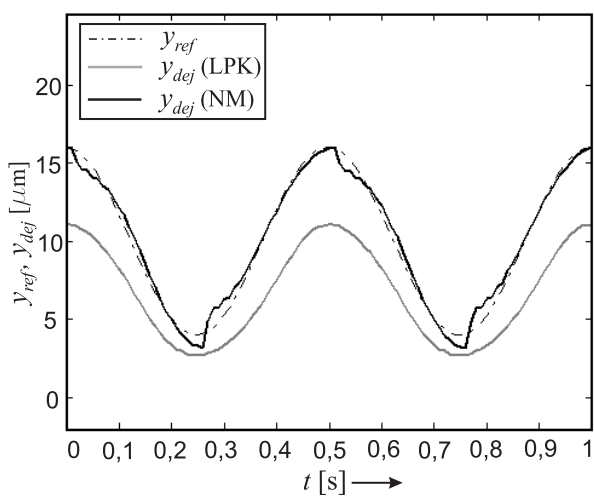
Slika 6.3: Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - stopnični odziv - y os

Stopnični odzivi pri položajnem vodenju v odprti zanki so podobni za obe osi robotskega mehanizma. Povprečni statični pogrešek, ki pri vodenju z LPK v vsaki osi znaša približno $4 \mu\text{m}$, je pri vodenju z nevronskimi mrežami zmanjšan na približno $1 \mu\text{m}$. Tudi največji statični pogrešek je zmanjšan, saj pri vodenju z LPK znaša $5 \mu\text{m}$, pri vodenju z nevronskimi mrežami pa $1,5 \mu\text{m}$. Statični pogrešek je posledica nenatančnosti ocenitve inverznega modela robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami. Zaradi tega ne preseneča dejstvo, da je statični pogrešek pri vodenju z nevronskimi mrežami lahko pozitiven ali negativen.

Na slikah 6.4 in 6.5 so prikazani rezultati sledenja referenčni krivulji z uporabo nevronskih mrež v odprti zanki in z uporabo LPK. Referenčna krivulja je v delovni ravnini robotskega mehanizma definirana kot krožnica s premerom $12 \mu\text{m}$ in s frekvenco kroženja 2 Hz .



Slika 6.4: Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - sledenje krožnici - x os



Slika 6.5: Vodenje z nevronskimi mrežami v odprti zanki - sledenje krožnici - y os

Na podlagi rezultatov sledenja referenčni krivulji z uporabo nevronskih mrež v odprti zanki lahko zaključimo, da je predlagana metoda bolj primerna za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma od vodenja z LPK. Iz slik 6.4 in 6.5 je razvidno, da je pogrešek pri sledenju referenčni krivulji z uporabo predlagane metode občutno zmanjšan.

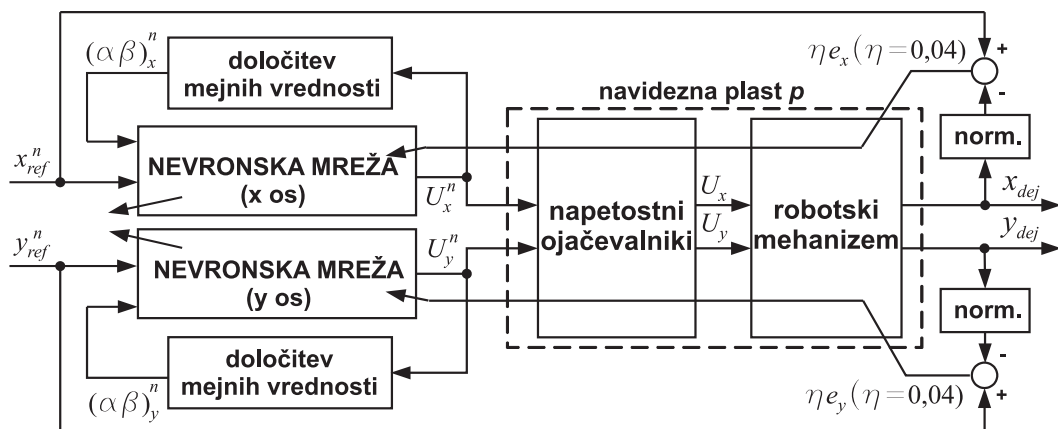
Predstavljeni rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v odprti zanki kažejo, da je pri uporabi predlagane metode občutno zmanjšan vpliv histerez v piezoelektričnih aktuatorjih na natančnost položajnega vodenja. Predlagana metoda položajnega vodenja je lahko hipotetično zelo koristna v primeru, ko je meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma izvedena s kamero. V omenjenem primeru po končanem postopku učenja nevronskih mrež meritve dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma več ni potrebno izvajati, kar zelo poenostavi oziroma pohitri izvajanje programske kode. Poleg tega se v omenjenem primeru izognemo tudi problemu osvetlitve scene, ki tako ne vpliva na kvaliteto položajnega vodenja.

Kakorkoli, predlagana metoda vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki ni primerna za uporabo v primeru, ko želimo popolnoma odpraviti statični pogrešek vrha robotskega mehanizma. V tem primeru so za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma bolj primerne metode, ki delujejo v zaprti zanki in pri katerih je zato potrebna meritev dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma.

6.2 Položajno vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki

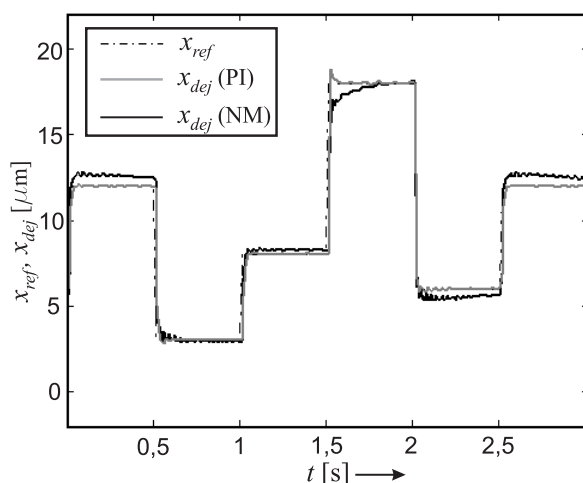
Slabost predlagane metode vodenja vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v odprti zanki je predvsem pojav statičnega pogreška. Kadar je zaželen visoka natančnost položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma lahko to predstavlja težavo, ki se ji najlažje izognemo z implementacijo položajnega vodenja v zaprti zanki. Zaradi tega je v nadaljevanju predstavljena metoda položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo nevronskih mrež v zaprti zanki.

Predlagana metoda je zelo podobna učenju nevronskih mrež, ki je v obliki blokovne sheme prikazano na sliki 6.6. Razlika med učenjem nevronskih mrež in položajnim vodenjem z nevronskimi mrežami v zaprti zanki je v vrednosti učne konstante. Ta je med vodenjem nekajkrat večja, kar zagotavlja hitrejšo konvergenco statičnega pogreška. Vrednost učne konstante med položajnim vodenjem kljub vsemu ne sme biti prevelika, saj to povzroči oscilacijo vektorja uteži. Vrednost učne konstante je pri položajnem vodenju določena eksperimentalno in znaša 0,04.

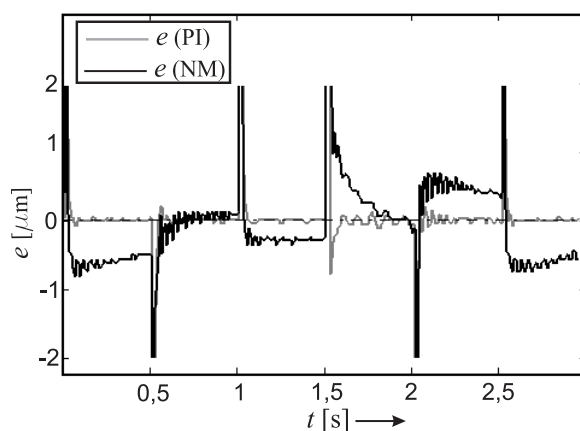


Slika 6.6: Blokovna shema vodenja z nevronskimi mrežami v zaprti zanki

Na slikah od 6.7 do 6.10 so prikazani stopnični odzivi pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v zaprti zanki.



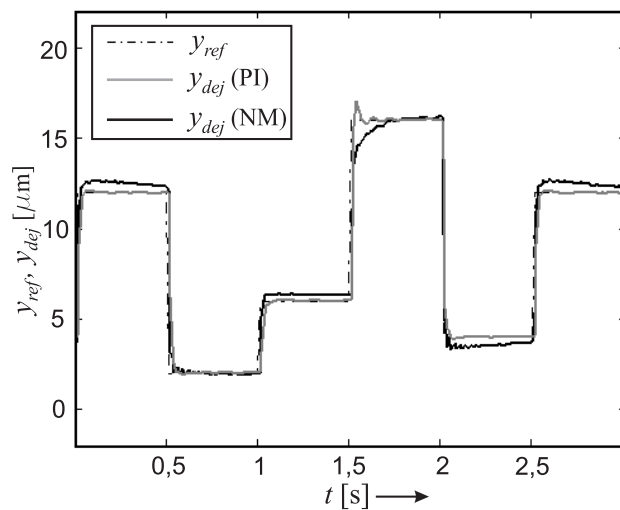
Slika 6.7: Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - stopnični odziv - x os



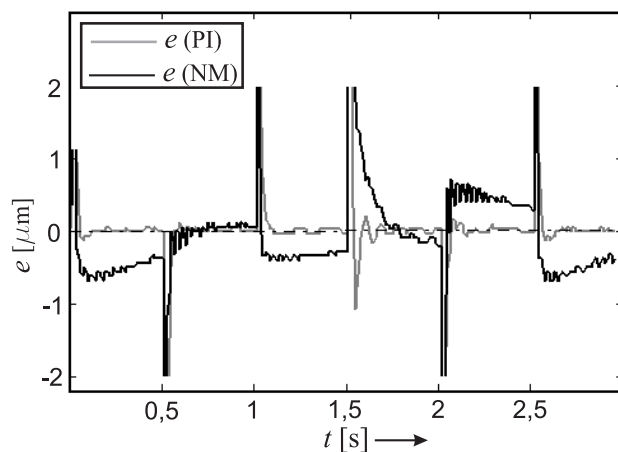
Slika 6.8: Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - x os

Iz prikazanih stopničnih odzivov pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma

z nevronskimi mrežami v zaprti zanki lahko razberemo, da predlagana metoda vodenja ne zagotavlja želene odzivnosti, saj se statični pogrešek precej počasi zmanjšuje. Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da PI regulator zagotavlja boljšo odzivnost oziroma hitrejšo minimizacijo statičnega pogreška. Poleg tega je izvedba PI regulatorja dosti enostavnejša. Na podlagi predstavljenih rezultatov smo ugotovili, da je pri stopnični spremembi referenčnega položaja PI regulator bolj primeren za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma kot pa predlagana metoda z nevronskimi mrežami v zaprti zanki.

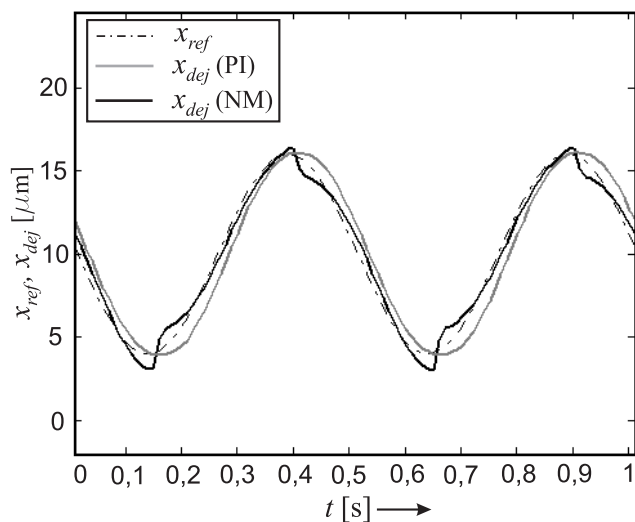


Slika 6.9: Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - stopnični odziv - y os

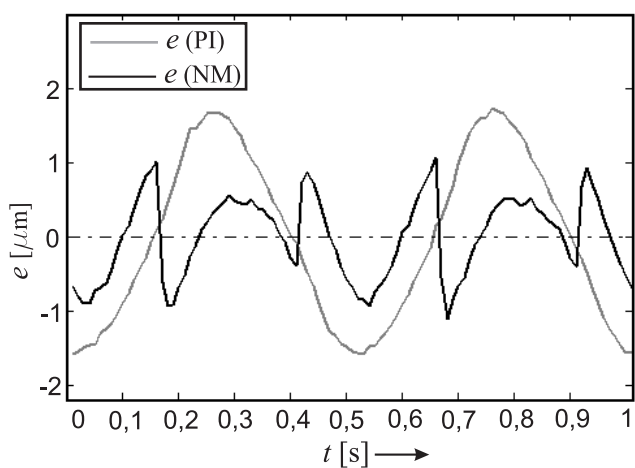


Slika 6.10: Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - y os

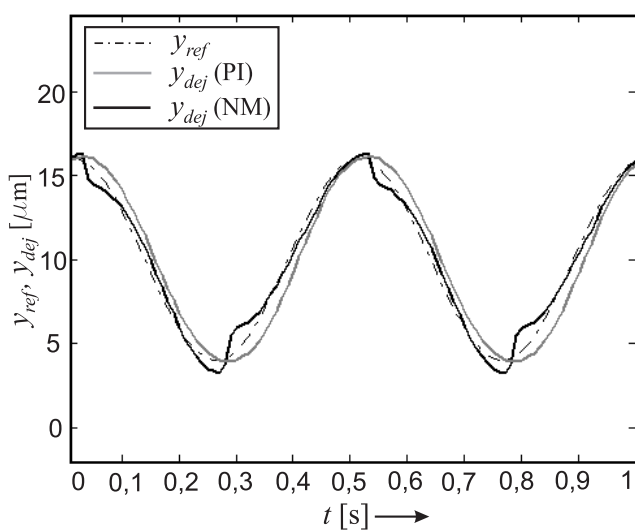
Na slikah od 6.11 do 6.14 so prikazani rezultati sledenja referenčni krivulji z uporabo nevronskih mrež v zaprti zanki ter z uporabo PI regulatorja. Referenčna krivulja je definirana kot krožnica s premerom $12 \mu\text{m}$ in s frekvenco kroženja 2 Hz .



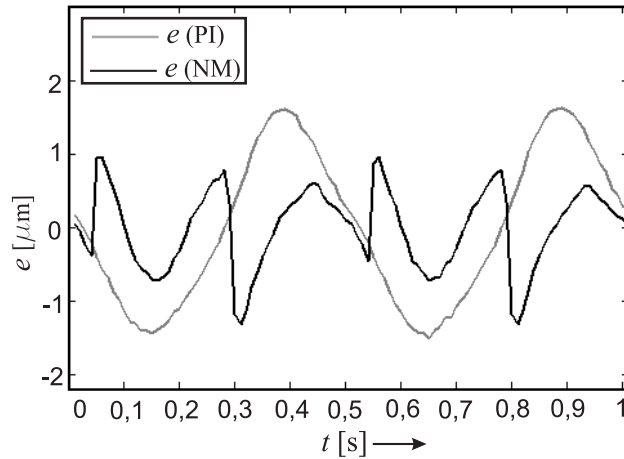
Slika 6.11: Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - sledenje krožnici - x os



Slika 6.12: Položajni pogrešek pri slednju krožnici - x os



Slika 6.13: Vodenje z nevronskimi mrežami v zaprti zanki - sledenje krožnici - y os



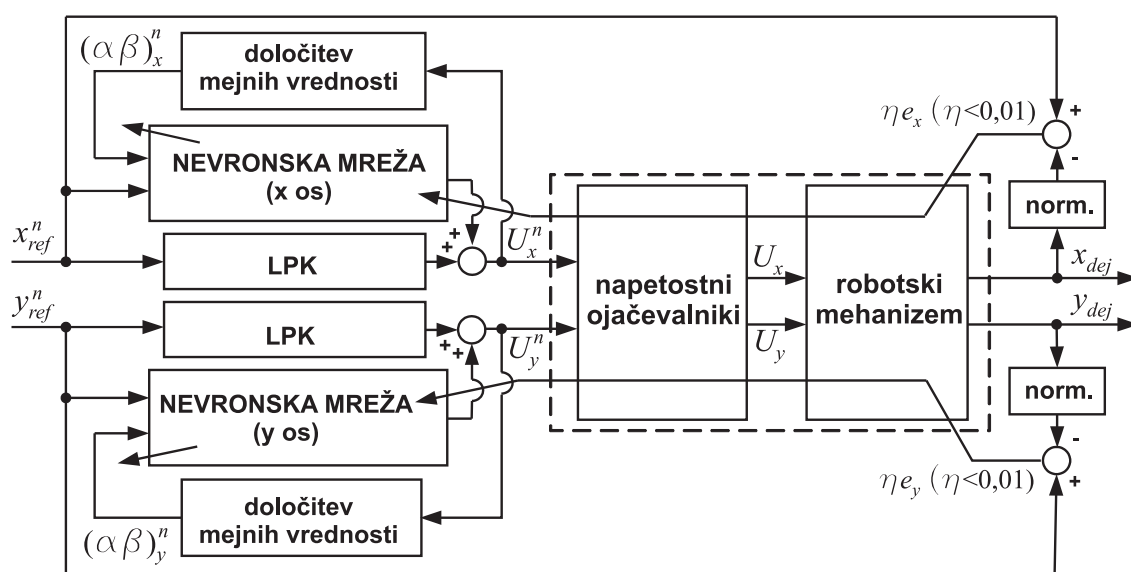
Slika 6.14: Položajni pogrešek pri sledenju krožnici - y os

Iz slik 6.12 do 6.14 je razvidno, da je položajni pogrešek pri sledenju krožnici z nevronskimi mrežami v zaprti zanki nekoliko manjši v primerjavi s položajnim pogreškom pri sledenju krožnici s PI regulatorjem.

Na osnovi predstavljenih rezultatov položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo nevronskih mrež v odprti zanki ter v zaprti zanki lahko zaključimo, da imata predlagani metodi tako prednosti kot tudi slabosti. Nevronske mreže so koristne za ocenitev in kompenzacijo nelinearnosti, ki so predvsem posledica histerez v piezoelektričnih aktuatorjih. Kljub vsemu predlagani način ocenitve in kompenzacije nelinearnosti oziroma histerez ni optimalen, kar se pri položajnem vodenju z nevronskimi mrežami v odprti zanki kaže v obliki statičnega pogreška. Pri vodenju s PI regulatorjem smo pri stopničnih odzivih opazili hitrejšo minimizacijo statičnega pogreška. Poleg tega je tudi implementacija PI regulatorja enostavnejša. Na podlagi predstavljenih dejstev smo zasnovali metodo položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma, ki je kombinacija vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki in PI regulatorja in zato izkorišča prednosti obeh metod. Nevronske mreže v predlagani metodi položajnega vodenja omogočajo kompenzacijo nelinearnega histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih, PI regulator pa zagotavlja odzivnost predlagane metode, ki se kaže v kvalitetni oziroma hitri minimizaciji statičnega pogreška.

6.3 Položajno vodenje z nevronskimi mrežami v kombinaciji s PI regulatorjem

Predlagana metoda je kot rečeno kombinacija vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki ter vodenja s PI regulatorjem v zaprti zanki. Osnovni način specializiranega učenja nevronskih mrež, ki je predstavljen v poglavju 5.2.3 je nekoliko spremenjen. V obliki blokovne sheme je prikazan na sliki 6.15.

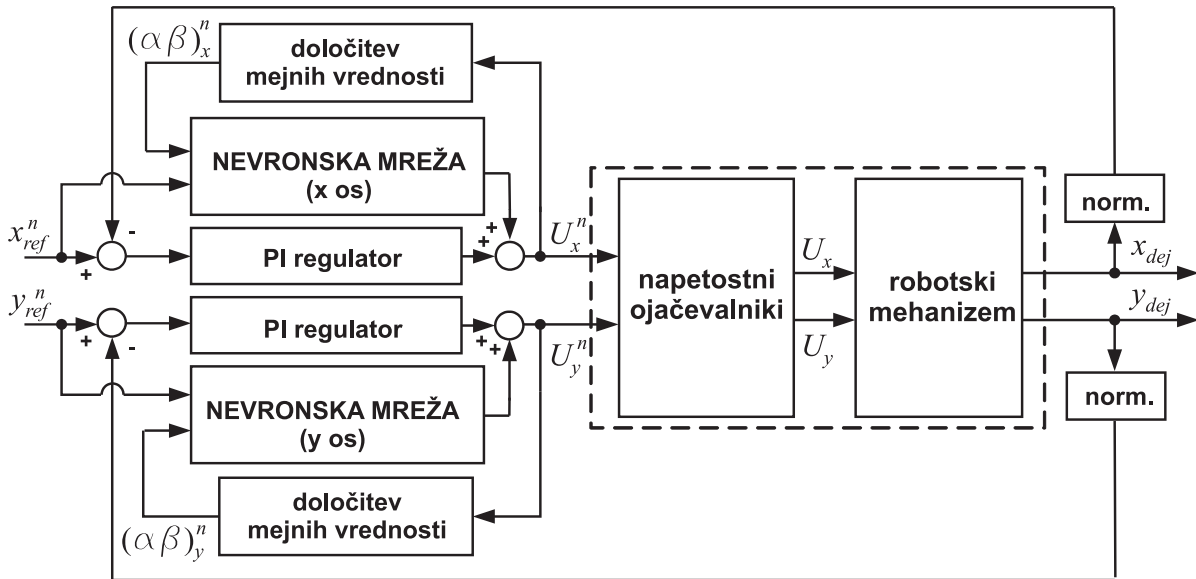


Slika 6.15: Specializirano učenje nevronskih mrež za uporabo s PI regulatorjem

Iz slike 6.15 je razvidno, da se pri specializirani arhitekturi učenja nevronskih mrež uporablja LPK, ki je v poglavju 4.3 predstavljen kot preprosto orodje za vodenje robotskega mehanizma v odprti zanki. LPK v primeru prikazane blokovne sheme učenja predstavlja del (linearni del) inverznega modela robotskega mehanizma. Preostali del inverznega modela robotskega mehanizma (nelinearni del) je ocenjen s postopkom specializiranega učenja nevronskih mrež. Vsota izhodov iz LPK in nevronskih mrež (linearni del + nelinearni del) predstavlja celotni inverzni model robotskega mehanizma.

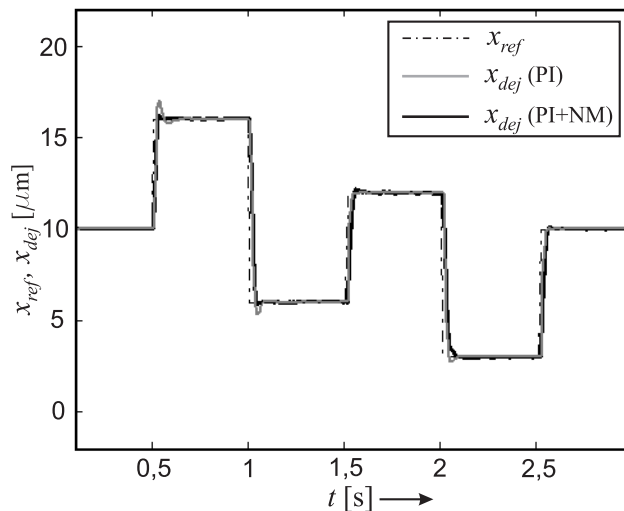
Kot je razvidno iz blokovne sheme učenja, se nevronske mreže tudi pri tej metodi koristijo za ocenitev in kompenzacijo nelinearnosti proge, ki jih predstavljajo predvsem histereze v piezoelektričnih aktuatorjih. Pri položajnem vodenju se LPK nadomesti z PI regulatorjem. V primeru, da je kompenzacija nelinearnosti proge uspešna, te več nimajo vpliva na delovanje PI regulatorja. Povedano drugače, stopnični odzivi pri predlaganem načinu vodenja so podobni za vse referenčne točke v delovni ravnini robotskega mehanizma.

Na sliki 6.16 je prikazana blokovna shema položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo nevronskih mrež v kombinaciji s PI regulatorjem.



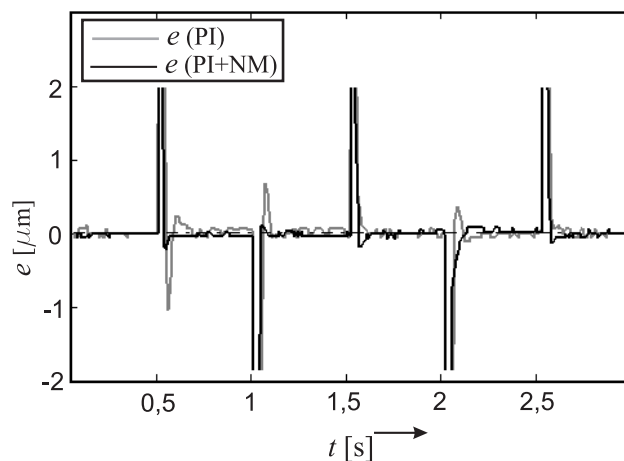
Slika 6.16: Položajno vodenje z nevronskimi mrežami v kombinaciji s PI regulatorjem

Na slikah od 6.17 do 6.20 so prikazani odzivi na stopnično spremembo referenčnega položaja pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z uporabo nevronskih mrež v kombinaciji s PI regulatorjem. Za primerjavo so na istih slikah prikazani tudi rezultati položajnega vodenja samo s PI regulatorjem.

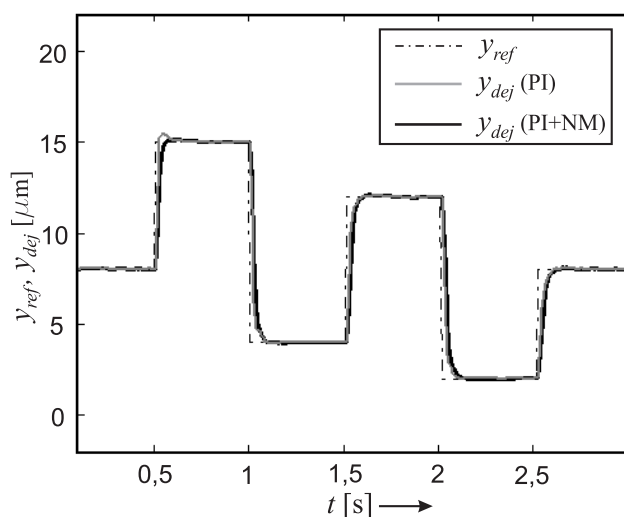


Slika 6.17: Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - stopnični odziv - x os

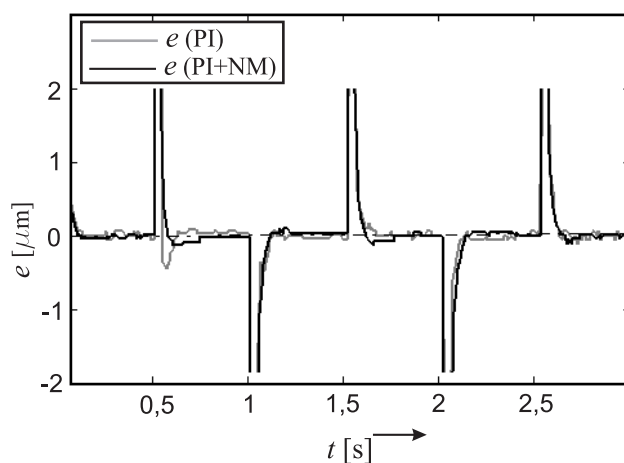
Oblika odziva na stopnično spremembo referenčnega položaja vrha robotskega mehanizma pri vodenje s PI regulatorjem je odvisna od vrednosti referenčnega položaja in tudi



Slika 6.18: Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - x os



Slika 6.19: Vodenje z nevroskimi mrežami s PI regulatorjem - stopnični odziv - y os

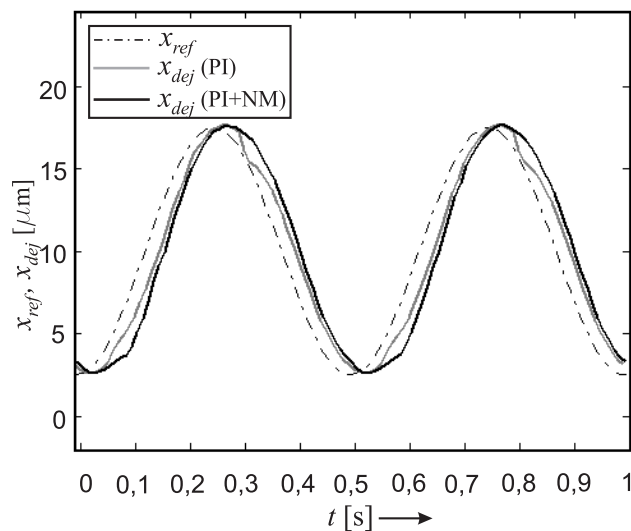


Slika 6.20: Položajni pogrešek pri stopničnem odzivu - y os

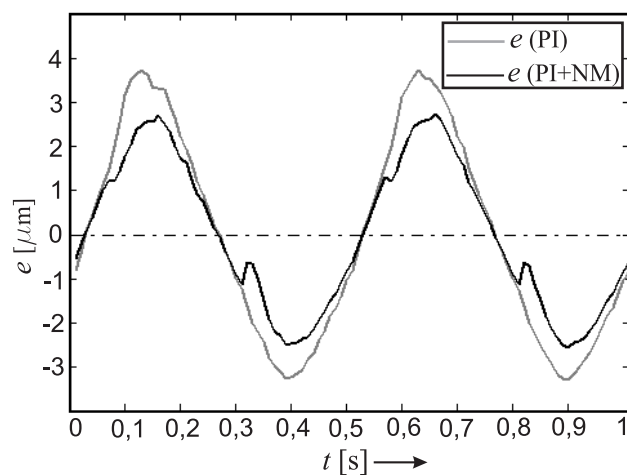
od predhodnega položaja vrha robotskega mehanizma. Na slikah 6.17 oziroma 6.18 odziva v času 1,5 s in 2,5 s nimata preniha, medtem ko imata odziva v času 0,5 s in 1 s preniha.

Prenihaj je razviden tudi na slikah 6.19 oziroma 6.20, in sicer v času 0,5 s. V primeru, ko se uporabi PI regulator z nevronskimi mrežami, preniha pri stopničnih odzivih niso vidni, saj nevronske mreže kompenzirajo nelinearnosti na progi. Na podlagi predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da je predlagana metoda primerna za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma pri stopnični spremembi referenčnega položaja.

Na slikah od 6.21 do 6.24 so prikazani rezultati sledenja referenčni krivulji z uporabo nevronskih mrež v kombinaciji s PI regulatorjem. Za primerjavo so na istih slikah prikazani tudi rezultati položajnega vodenja samo s PI regulatorjem. Referenčna krivulja je definirana kot krožnica s premerom $15 \mu\text{m}$ in s frekvenco kroženja 2 Hz.

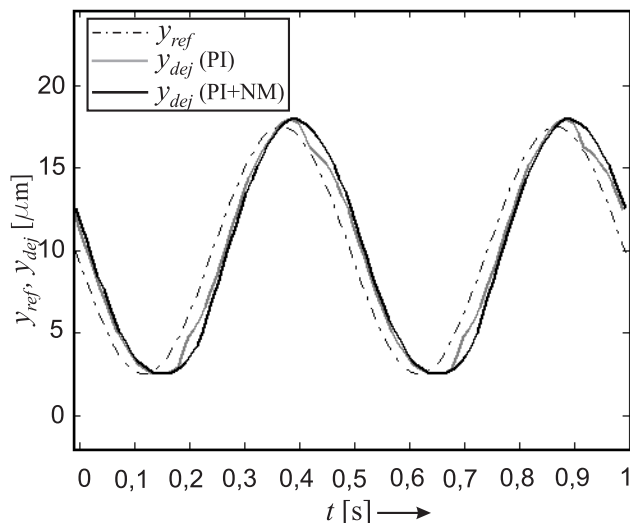


Slika 6.21: Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - sledenje krožnici - x os

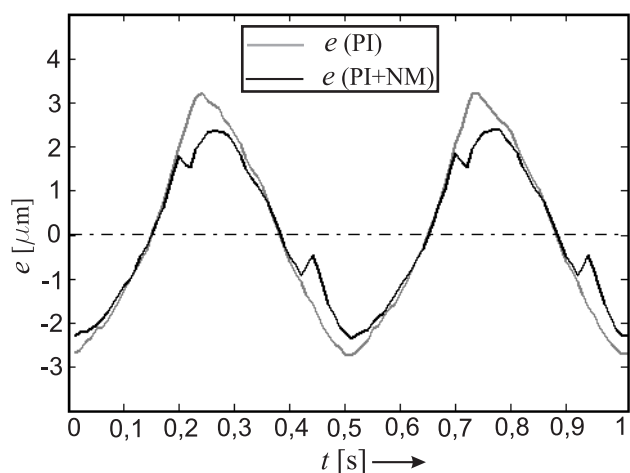


Slika 6.22: Položajni pogrešek pri sledenju krožnici - x os

Največji položajni pogrešek pri sledenju krožnici z nevronskimi mrežami v kombinaciji s PI regulatorjem je zmanjšan v primerjavi z največjim položajnim pogreškom pri sledenju



Slika 6.23: Vodenje z nevronskimi mrežami s PI regulatorjem - sledenje krožnici - y os



Slika 6.24: Položajni pogrešek pri sledenju krožnici - y os

krožnici z uporabo samo PI regulatorja.

6.4 Komentar rezultatov položajnega vodenja

Na podlagi eksperimentalnih rezultatov je bilo ugotovljeno, da so nevronske mreže primerne za ocenitev inverznega modela robotskega mehanizma in za kompenzacijo nelinearnosti robotskega mehanizma. Kljub vsemu meritve vsote kvadratov pogreška pri učenju nevronskih mrež kažejo, da tako ocenjeni inverzni model robotskega mehanizma ni optimalen. Posledica tega se kaže pri položajnem vodenju vrha robotskega mehanizma z nevronskimi mrežami v odprti zanki. Povprečni statični pogrešek pri položajnem vodenju z nevronskimi mrežami v odprti zanki je za eno os enak $1 \mu\text{m}$, kar predstavlja približno 5% delovnega območja. Kljub temu, da statični pogrešek pri položajnem vodenju z nevronskimi mrežami v odprti

zanki ostaja, so rezultati predlagane metode vodenja precej izboljšani v primerjavi z vodenjem brez kompenzacije histerez, kot je vodenje z LPK. Kljub nekoliko slabši natančnosti se lahko predlagana metoda vodenja z nevronskimi mrežami v odprti zanki koristno uporabi takrat, ko po končanem postopku učenja nevronskih mrež več ne želimo izvajati meritve dejanskega položaja vrha robotskega mehanizma (npr.: sistem z digitalno kamero in mikroskopom). Takšen način položajnega vodenja lahko v tem primeru zelo poenostavi in pohitri izvajanje programske kode, saj se s tem izognemo izvajanju algoritmov za zajem in obdelavo digitalnih slik kamere.

Rezultati predlagane metode položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma samo z nevronskimi mrežami v zaprti zanki kažejo, da ima ta metoda v primerjavi s PI regulatorjem slabo dinamiko, saj je konvergenca statičnega pogreška počasna. V primerjavi s predlagano metodo vodenja z nevronskimi mrežami v zaprti zanki je vodenje z enostavnim PI regulatorjem učinkovitejše, saj poleg hitrejše konvergence statičnega pogreška zagotavlja tudi enostavnejšo in hitrejšo implementacijo. Kljub vsemu se pri vodenju robotskega mehanizma z linearnim PI regulatorjem pojavijo težave, ki so posledica nelinearnosti na progi. To se najbolj evidentno vidi iz stopničnih odzivov, saj ti zaradi nelinearnosti oziroma histerez v piezoelektričnih aktuatorjih niso enaki za vse referenčne točke v delovni ravnini. Zaradi tega smo za vodenje vrha robotskega mehanizma v zaprti zanki predlagali kombinacijo PI regulatorja in nevronskih mrež s pomočjo katerih je mogoče oceniti ter kompenzirati nelinearnosti (histereze) na progi. Posledično je oblika stopničnih odzivov enaka za vse referenčne točke v delovni ravnini, poleg tega pa je v primerjavi z vodenjem s PI regulatorjem zmanjšan tudi pogrešek pri sledenju krožnici.

Zaključek

V doktorski disertaciji je predstavljeno modeliranje, izdelava in položajno vodenje robotskega mehanizma s piezoelektričnimi aktuatorji. Slednje zaradi nelinearnega histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih zahteva podrobno obravnavo in napredno izvedbo. Za ocenitev in kompenzacijo histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih smo za potrebe položajnega vodenja robotskega mehanizma uporabili usmerjene nevronske mreže, ki so znane kot univerzalno orodje za ocenitev nelinearnih pojavov. Rezultati položajnega vodenja vrha robotskega mehanizma z uporabo usmerjenih nevronskih mrež so pridobljeni eksperimentalno na realnem robotskem mehanizmu, kar pomeni, da predstavljajo realno osnovo za ocenitev kvalitete predlaganih metod.

Prvi del doktorske disertacije (poglavja 2, 3, 4) je namenjen opisu modela robotskega mehanizma ter opisu komponent sistema za položajno vodenje robotskega mehanizma, kot so napetostni ojačevalniki, sistem za meritev dejanskega položaja robotskega mehanizma in uporabniški vmesnik s programsko opremo. Izdelan model je pomemben iz dveh vidikov. Kot prvo ta model omogoča načrtovanje algoritmov položajnega vodenja, kot drugo pa se lahko koristno uporabi pri načrtovanju oziroma konstruiranju podobnih robotskih mehanizmov. Eden od možnih primerov uporabe opisanega robotskega mehanizma je v obliki platforme oziroma mizice za mikro-pozicioniranje vzorcev pri mikroskopiranju. Pri tem se lahko položaj mizice (robotskega mehanizma) z uporabo izdelanih komponent sistema za položajno vodenje (napetostni ojačevalniki, sistem za meritev dejanskega položaja, ...) določi preko uporabniškega vmesnika na računalniku. Na splošno smo ob načrtovanju in izdelavi opisanega sistema za položajno vodenje vrha robotskega mehanizma ter tudi pri pisanju

doktorske disertacije ugotovili, da je inženirsko področje mikro-pozicioniranja mehanskih sistemov v Sloveniji slabo razvito. Zaradi tega je v tem delu (poglavje 3) predstavljen tudi inženirski vidik načrtovanja in izdelave sistema za mikro-pozicioniranje.

Delo vsebuje naslednje prispevke k znanosti:

- teoretični opis dinamičnega modela robotskega mehanizma z upoštevanjem histereznega pojava v piezoelektričnih aktuatorjih,
- zasnova, izvedba in ocenitev kvalitete učenja inverznega modela realnega robotskega mehanizma z uporabo nevronske mreže,
- zasnova, izvedba in ocenitev kvalitete položajnega vodenja vrha realnega robotskega mehanizma z uporabo nevronske mreže v odprti in v zaprti zanki ter v kombinaciji s PI regulatorjem.

Literatura

- [1] D.A. Horsley, N. Wongkomet, R. Horowitz, P. Pisano, "Precision positioning using a microfabricated electrostatic actuator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 2, pp. 993–999, March 1999.
- [2] X. Shen, Y. Zhang, X. Chen, "Feasibility study of micro electro-thermal actuator for lever nano motion", *Proceedings of the 2006 International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Zhuhai, China*, pp. 1025–1028, January 2006.
- [3] J. Varona, M. Tecpoyotl-Torres, A.A. Hamoui, "Modelling of MEMS thermal actuation with external heat source", *Proceedings of the 2007 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Morelos, Mexico*, pp. 591–596, September 2007.
- [4] Y.W. Yi, C. Liu, "Magnetic actuation of hinged microstructures", *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 10–17, March 1999.
- [5] P. Krulevitch, A.P. Lee, P.B. Ramsey, J.C. Trevino, J. Hamilton, M.A. Northrup, "Thin film shape memory alloy microactuators", *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, vol.5, no.4, pp. 270–282, December 1996.
- [6] M. Pozzi, T. King, "Piezoelectric actuators in micropositioning", *Engineering Science and Education Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 31–36, February 2001.
- [7] R. Yang, M. Jouaneh, R. Schweizer, "Design and characterisation of a low-profile micropositioning stage", *Precision Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 20–29, January 1996.
- [8] A. Woronko, J. Huang, Y. Altintas, "Piezoelectric tool actuator for precision machining on conventional CNC turning centers", *Precision Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 335–345, October 2003.

- [9] S. Jien, Y. Ogawa, S. Hirai, H. Takayama, "Unconstrained pneumatic on-off poppet valve driven by piezoelectric actuator", *Proceedings of the 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich, Switzerland*, pp. 1–6, September 2007.
- [10] J. Minase, T.-F. Lu, B. Cazzolato, S. Grainger, "Adaptive identification of hysteresis and creep in piezoelectric stack actuators", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 9–12, pp. 913–921, 2010.
- [11] R. Kerschkerjan, F. Qiao, H. Wurmus, "Piezoelectric X-Y-micropositioner made of photosensitive glass to form one micro-handling unit", *Proceedings of the Actuator 2000, Bremen, Germany*, pp. 296–299, June 2000.
- [12] R.H. Comstock, "Charge control of piezoelectric actuators to reduce hysteresis effects", *U.S. Patent nr. 4,263,527*, April 1981.
- [13] P. Ronkanen, P. Kallio, H. Koivo, "Current control of piezoelectric actuators with power loss compensation", *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland*, pp. 1948–1953, October 2002.
- [14] G. Aloisi, A. Santucci, M. Carla, D. Dolci, L. Lanzi, "Electronic linearization of piezoelectric actuators and noise budget in a scanning probe microscopy", *Review of Scientific Instruments*, vol. 77, no. 7, pp. 073701–073701-6, July 2006.
- [15] J.T. Feddema, R.W. Simon, "Visual servoing and CAD-driven microassembly", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 5, no. 4, pp. 18–24, December 1998.
- [16] C.D. Onal, M. Sitti, "Autonomous 2D microparticle manipulation based on visual feedback", *Proceedings of the 2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Zurich, Switzerland*, pp. 1–6, September 2007.
- [17] D. Dinulovic, H.H. Gatzert, "Microfabricated inductive micropositioning sensor for measurement of a linear movement", *IEEE Sensors Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 1482–1487, December 2006.
- [18] A. Sacconi, G.B. Picotto, W. Pasin, "The IMGCC calibration setup for microdisplacement actuators", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, vol. 48, no. 2, pp. 483–487, April 1999.
- [19] C. Kazakiewicz, T. Ogiso, N. Miyake, "Partitioned neural network architecture for inverse kinematic calculation of a 6 DOF robot manipulators", *Proceedings of the 1991*

- IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Seattle, USA*, vol. 3, pp. 2001–2006, November 1991.
- [20] L. Nguyen, R.V. Patel, K. Khorasani, "Neural network architectures for the forward kinematics problem in robotics", *Proceedings of the 1990 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, San Diego, USA*, vol. 3, pp. 393–399, June 1990.
- [21] R. Šafarič, K. Jezernik, M. Pec, "Neural network control for direct-drive robot mechanisms", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 11, no. 6, pp. 735–745, December 1998.
- [22] R. Klobučar, J. Čas, R. Šafarič, M. Brezočnik, "Uncalibrated visual servo control with neural network", *Journal of Mechanical Engineering - Strojniški Vestnik*, vol. 54, no. 9, pp. 619–627, September 2008.
- [23] A. Arnau Vives, "Piezoelectric Transducers and Applications", *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2nd edition*, 2008.
- [24] K. Feindt, A. Harnisch, V. Zoppig, D. Hulsenberg, E. Kallenbach, "3D-structuring of photosensitive glasses", *Proceedings of the 1998 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany*, pp. 207–210, January 1998.
- [25] J.M. Paros, L. Weisbord, "How to design flexure hinges", *Machine Design*, vol. 37, no. 27, pp. 151–156, November 1965.
- [26] W. Xu, T.G. King, "Flexure hinges for piezo-actuator displacement amplifiers: flexibility, accuracy and stress considerations", *Precision Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 4–10, July 1996.
- [27] M. Oblak, J. Avsec, I. Gubenšek "Dinamika strojev-zbirka rešenih nalog", *Založniška dejavnost FS, Maribor, 2nd edition*, 2004.
- [28] K.J. Astrom, C. Canudas-de-Wit, "Revisiting the LuGre friction model", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 28, no. 6, pp. 101–114, December 2008.
- [29] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 3, pp. 419–425, March 1995.
- [30] F.-J. Lin, H.-J. Shieh, P.-K. Huang, L.-T. Teng, "Adaptive control with hysteresis estimation and compensation using RFNN for piezo-actuator", *IEEE Transactions*

- on *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 53, no. 9, pp. 1649–1661, September 2006.
- [31] National Instruments, "NI Vision - NI CVS-1450 series user manual", *Web source: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373610f.pdf>*, November 2007.
- [32] M. Guan, W.H. Liao, "Studies on the circuit models of piezoelectric ceramics", *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Information Acquisition* pp. 26–31, June 2004.
- [33] M. Milanovic, "Analogna integrirana vezja v industrijski elektroniki", *Založniška dejavnost FERI, Maribor, 1st edition*, 1999.
- [34] Apex Microtechnology Corp., "PA78 Design ideas", *Web source: http://www.cirrus.com/en/pubs/appNote/AN_PA78_Design_Ideas.pdf*, 2007.
- [35] D.A. Forsyth, J. Ponce "Computer vision: A modern approach", *NY: Prentice Hall, 1st edition*, 2002.
- [36] R. Jain, R. Kasturi, B.G. Schunck "Machine vision", *NY: McGraw-Hill, 1st edition*, 1995.
- [37] NANOS Instruments GmbH, "Linear encoder", *Web source: http://www.nanos-instruments.de/nanosweb/media/pdf/Encoder_engl_v4.pdf*.
- [38] J.G. Ziegler, N.B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 64, pp. 759–768, November 1942.
- [39] S. Chonan, Z. Jiang, T. Yamamoto, "Nonlinear hysteresis compensation of piezoelectric ceramic actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 7, no. 2, pp. 150–156, 1996.
- [40] X. Wang, S. Guo, C. Ru, "Modeling and compensation of piezoelectric ceramic hysteresis behavior", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China*, pp. 977–981, August 2009.
- [41] C.H. Ru, L. Sun, M.X. Kong, "Adaptive inverse control for piezoelectric actuator based on hysteresis model", *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China*, vol. 5, pp. 3189–3193, August 2005.

- [42] M. Goldfarb, N. Celanovic, "Behavioral implications of piezoelectric stack actuators for control of micromanipulation", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MN, USA*, vol. 1, pp. 226–231, April 1996.
- [43] G.S. Choi, Y.A. Lim, G.H. Choi, "Tracking position control of piezoelectric actuators for periodic reference inputs", *Mechatronics*, vol. 12, no. 5, pp. 669–684, June 2002.
- [44] I.D. Mayergoyz, "Mathematical models of hysteresis", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 22, no. 5, pp. 603–608, September 1986.
- [45] P. Krejci, K. Kuhnen, "Inverse control of systems with hysteresis and creep", *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 148, no. 3, pp. 185–192, May 2001.
- [46] T.A. Wei, F.A. Garmon, P.K. Khosla, C.N. Riviere, "Modeling rate-dependent hysteresis in piezoelectric actuators", *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA*, vol. 2, pp. 1975–1980, October 2003.
- [47] Y. Stepanenko, C.-Y. Su, "Intelligent control of piezoelectric actuators", *Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Decision and Control, Tampa, FL, USA*, vol. 4, pp. 4234–4239, December 1998.
- [48] J.-H. Xu, "Neural network control of a piezo tool positioner", *Proceedings of the 1993 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vancouver, Canada*, vol. 1, pp. 333–336, September 1993.
- [49] B. Lee, S. Yang, K. Ahn, "Precision control of piezoelectric actuator using inverse hysteresis model and neuro control", *Proceedings of the 2003 IEEE Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, Ulsan, Republic of Korea*, vol. 1, pp. 273–283, July 2003.
- [50] S.S. Ku, U. Pinsopon, S. Cetinkunt, S.I. Nakajima, "Design, fabrication, and real time neural network control of a three-degrees-of-freedom nanopositioner", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 5, no. 3, pp. 273–280, December 2000.
- [51] C.-H. Yang, K.-M. Chang, "Adaptive neural network control for piezoelectric hysteresis compensation in a positioning system", *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Canada*, vol. 1, pp. 829–834, July 2006.
- [52] S. Yu, B. Shirinzadeh, G. Alici, J. Smith, "Sliding mode control of a piezoelectric actuator with neural network compensating rate-dependent hysteresis", *Proceedings*

- of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*, pp. 3641–3646, April 2005.
- [53] D. Psaltis, A. Sideris, A.A. Yamamura, "A multilayered neural network controller", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 17–21, April 1988.
- [54] R. Šafarič, A. Rojko, "Inteligentne regulacijske tehnike v mehatroniki", *Založniška dejavnost FERl, Maribor, 1st edition*, 2007.
- [55] A.K. Jain, M. Jianchang, K.M. Mohiuddin, "Artificial neural networks: a tutorial", *Computer*, vol. 29, no. 3, pp. 31–44, March 1996.
- [56] K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators", *Neural Networks*, vol. 2, no. 5, pp. 359–366, 1989.
- [57] D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, "Learning internal representations by error propagation In D.E. Rumelhart, J.L. McClelland, Parallel distributed processing", *MIT Press, Cambridge, 1st edition*, 1986.
- [58] P. Ge, M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators", *Precision Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 211–221, July 1995.
- [59] W.H. Schiffmann, H.W. Geffers, "Adaptive control of dynamic systems by back propagation networks", *Neural Networks*, vol. 6, no. 4, pp. 517–524, 1993.
- [60] M. Saerens, A. Soquet, "Neural controller based on back-propagation algorithm", *IEE Proceedings - F*, vol. 138, no. 1, pp. 55–62, February 1991.

Življenjepis

Ime: Jure Čas
Rojstni datum: 22. november 1982
Rojstni kraj: Slovenj Gradec
Starši: Juri Čas
Mira Čas (roj. Hosner)
Narodnost: Slovenec
Stalni naslov: Vodriž 10, 2381 Podgorje

Šolanje:

1989 - 1997 Osnovna šola Podgorje, Podgorje
1997 - 2001 Srednja strojno-kovinarska šola, Ravne na Koroškem

Študij:

2001 - 2006 Fakulteta za strojništvo, Maribor
od 2006 Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Zaposlitev:

november 2006 em.tronic d.o.o., Počehova 12, 2000 Maribor



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani-a Jure ČAS,
vpisna številka 95031403

izjavljam,

da je doktorska disertacija z naslovom

POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Podpis doktorskega-e kandidata-ke:





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA KANDIDATOVEGA MENTORJA O USTREZNOSTI DOKTORSKE DISERTACIJE

Podpisani-a red.prof.dr. Riko ŠAFARIČ, mentor-ica doktorskemu-i kandidatu-ki, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom

POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI,

ki jo je izdelal-a doktorski-a kandidat-ka Jure ČAS, v skladu z odobreno temo, Pravilnikom o pripravi in zagovoru doktorske disertacije ter mojimi navodili in predstavlja izviren prispevek k razvoju znanstvene discipline.

Datum in kraj:

Maribor, 20.04.2011

Podpis mentorja-ice:

Riko Šafarič



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA O OBJAVI ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE IN OSEBNIH PODATKOV, VEZANIH NA ZAKLJUČEK ŠTUDIJA

Ime in priimek doktoranda-ke: Jure ČAS
Vpisna številka: 95031403
Študijski program: FERI-E DR ELEKTROTEHNIKA EDOK
Naslov doktorskega dela:

POLOŽAJNO VODENJE ROBOTSKEGA MEHANIZMA S PIEZOELEKTRIČNIMI AKTUATORJI

Mentor-ica: red.prof.dr. Riko ŠAFARIČ
Somentor-ica: izr.prof.dr. Karl GOTLIH

Podpisani soglašam z objavo doktorske disertacije v Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija doktorske disertacije je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal-a v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Podpisani-a hkrati izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum diplomiranja, naslov diplomskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah Univerze v Mariboru.

Datum in kraj:

Maribor, 20.4.2011

Podpis doktoranda-ke:

