

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Timotej Gašpar

**Implementacija hitrostnega ter
navornega krmilnjenja na
industrijskem robotu Mitsubishi
PA-10 z uporabo namensko
zgrajenega UDP-ARCNET
strežnika**

Magistrsko delo

Mentor: prof. dr. Matjaž Mihelj

Somentor: dr. Leon Žlajpah

Ljubljana, 2015

Zahvala

Vsebina

1	Uvod	5
2	Robotski manipulator PA-10	7
2.1	Kinematični model robota PA-10	7
2.2	Dinamičen model robota	12
2.3	Inverzna kinematika	14
3	ARCNET - UDP strežnik za komunikacijo s krmilnikom robota ter senzorjem sile	17
3.1	Krmilnik servo motorjev robota	19
3.2	ARCNET vmesnik	20
3.3	Senzor sile in navorov - JR3	23
3.4	Strežnik	25
3.4.1	Delovanje programa	26
3.4.2	Uporaba programa	28
3.4.3	Varnostni ukrepi	30
4	Vodenje robota PA-10	33
4.1	Kompenzacija mase prijemala ter merilnega odmika na senzorju sile JR3	33

4.2	Vodenje preko inverzne kinematike	37
4.2.1	Vodenje v notranjih koordinatah	37
4.2.2	Vodenje v zunanjih koordinatah	38
4.3	Krmiljenje z inverzno dinamiko	39
4.3.1	Vodenje v notranjih koordinatah	40
4.3.2	Vodenje v zunanjih koordinatah	42
4.4	Interakcija z okoljem	43
4.4.1	Admitančno vodenje	43
4.4.2	Impedančno vodenje	45
5	Implementacija	47
5.1	Hitrostno krmiljenje	49
5.1.1	Admitančno vodenje	52
5.2	Navorno krmiljenje	55
5.2.1	Kompenzacija trenja	55
5.2.2	Sledenje referenci	55
5.2.3	Impedančno vodenje	59
6	Zaključek	61
A	Dodatek 1	67
B	Dodatek 2	69
C	Dodatek 3	71

Seznam slik

2.1	Skica robotskega mehanizma PA 10	8
2.2	Dva zaporedna člena kinematične verige, povzeto po [1]	9
2.3	Tehnična risba robota PA-10. Iz nje se definira D-H parametre. Povzeto po [2].	10
3.1	Osebni računalnik na katerem je bil razvit strežnik. Na sliki vidimo zadnji del računalnika kjer so priključki za ARCNET omrežje ter JR3 senzor.	18
3.2	Tehnična risba ohišja krmilnika servo motorjev. Povzeto po [2]. . .	19
3.3	Vsebina ARCNET paketa	21
3.4	Diagram stanj ARCNET modula na krmilniku robota	21
3.5	Krmiljenje robota s pošiljanjem ARCNET paketov.	22
3.6	Podatkovni del ARCNET paketa za krmiljenje robota v odvisnosti od tipa paketa.	22
3.7	Senzor sil in navorov JR3.	23
3.8	Dostopanje do registrov na ISA kartici za digitalno obdelavo signalov iz senzorja senzorja JR3.	24
3.9	Strežnik kot posrednik med ARCNET ter Ethernet omrežjem. . .	26
3.10	Diagram poteka programa.	29

3.11 Nalaganje ARCNET modula v jedro Linux.	30
3.12 Zaganjanje strežnika na Linux operacijskem sistemu.	30
4.1 Koordinatni sistem senzorja sile ter koordinatni sistem težišča prijemala	34
4.2 Povratna zanka za krmiljenje kota v sklepu	38
4.3 Bločna shema krmiljenja referenčne lege vrha robota	39
4.4 Bločna shema vodenja po notranjih koordinatah preko inverzne dinamike.	42
4.5 Bločna shema vodenja po zunanjih koordinatah preko inverzne dinamike.	43
4.6 Bločna shema admitančnega vodenja.	45
4.7	46
5.1 Odziv sklepa na signal stopnice.	49
5.2 Odziv sklepa na signal sinusne oblike.	50
5.3 Sledenje referenci v obliki kroga na x in y ravnini	51
5.4 Signal napake pri sledenju krožnici	51
5.5 Vrh robota PA-10 s pritrjenim senzorjem sil in navorov JR3.	52
5.6 Odziv robota na stopničast signal sile.	53
5.7 Odziv robota na stopničast signal sile.	54
5.8 Merjenje vpliva trenja.	56
5.9 Odziv sklepa na signal stopnice.	57
5.10 Odziv sklepa na signal sinusne oblike.	58
5.11 Sledenje referenci v obliki kroga na x in y ravnini	59
5.12 Signal napake pri sledenju krožnici	60

Seznam tabel

1	Veličine in simboli	xi
2.1	D-H parametri	10
3.1	Opis UDP paketa, ki ga klient pošlje strežniku.	27
3.2	Opis ARCNET paketa.	28
3.3	Opis UDP paketa, ki ga strežnik pošlje klientu.	29
5.1	Inženerski pokazatelji na odziv stopničaste reference pri hitrostnem vodenju.	49
5.2	Identificirani parametri trenja	57
5.3	Inženerski pokazatelji na odziv stopničaste reference pri navornem vodenju.	58

Seznam uporabljenih simbolov

V pričajočem zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
frekvenca	f	Hertz	Hz
sila	F	Newton	N
masa telesa	m_t	kilogram	kg
kot v sklepu	q	radijan na sekundo	rad/s
lega vrha robota	\mathbf{x}	metri	m
Jacobijeva matrika	\mathbf{J}	-	-

Tabela 1: Veličine in simboli

Pri čemer so vektorji in matrike napisani s poudarjeno pisavo. Natančnejši poimen simbolov in njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

Povzetek

Ključne besede: beseda1, beseda2, beseda3

Abstract

The thesis addresses ...

Key words: word1, word2, word3

1 Uvod

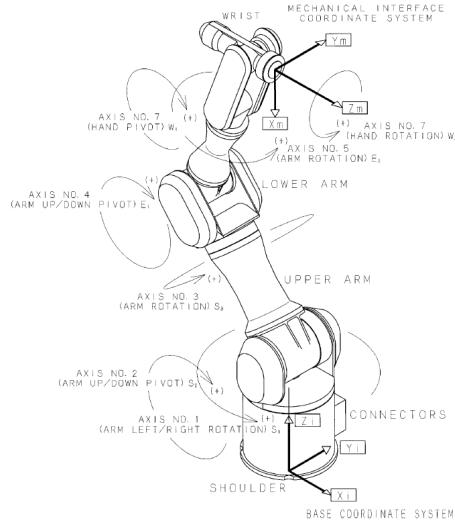
2 Robotski manipulator PA-10

Podjetje Mitsubishi Heavy Industries je leta 1992 izdelalo prvega katalogiranega industrijskega redundatnega robota [3]. Podjetje je robota poimenovalo Portable General-purpose Intelligent Arm PA-10, krajše PA-10. Gre za serijskega robota s sedmimi stopnjami prostosti (slika 2.1). Prvi trije sklepi so označeni kot ramenski sklepi (shoulder), S1, S2, S3. Naslednja dva sta označena kot komolčni sklepi (elbow), E1, E2. Zadnja dva sklepa pa sta označena kot zapestna (wrist), W1, W2. Glede na zgradbo se ga lahko uvrsti v tako imenovane antropomorfne robote [4]. Značilnost takih robotov je spremnost saj so vsi sklepi rotacijski [1].

Masa robotske roke PA-10 je 36 kg in ima nosilnost 10 kg. Servo motorji v sklepih se napajajo preko izmenične napetosti. Prenosi med v sklepih so realizirani s harmoničnimi gonili. Baza robota se lahko pritrdi v katerokoli lego. To pomeni, da se ga lahko fiksira bodisi na tla, na steno ali na strop. Robota PA-10 odlikuje relativno lahka konstrukcija, enostavno rokovanje ter odprtost njegovega krmilnika. Prav ti razlogi so povod, da je mnogo institucij vzelo tega robota kot eksperimentalni sistem za razvijanje raznih algoritmov vodenja [5, 6, 7, 8].

2.1 Kinematični model robota PA-10

Robotski mehanizem obravnavamo kot kinematično verigo n med seboj povezanih togih teles, rečemo jim tudi kinematični pari. Ker je en konec kinematične verige, t.j. baza robota, togo pritrjen v bazo se premika le vrh kinematične verige. Z opisom kinematične relacije med dvema zaporednima segmentoma je mogoče defini-



Slika 2.1: Skica robotskega mehanizma PA 10.

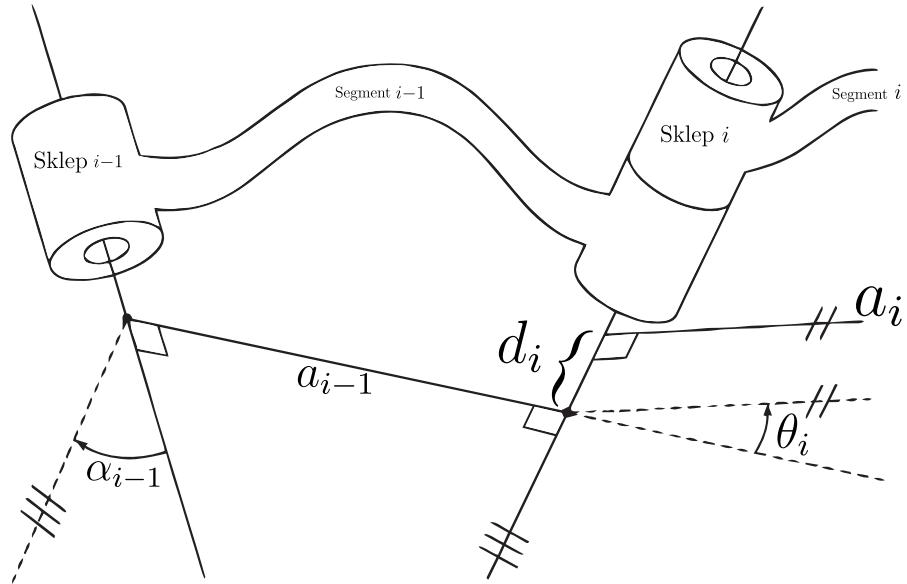
rati kinematično relacijo med bazo in vrhom robota. Homogena transformacijska matrika je operator, ki opisuje translacijo in rotacijo med dvema koordinatnima sistemoma. Definiramo jo kot [1]

$$\mathbf{T}_{i+1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_i \\ \sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\sin(a_i) & -\sin(a_i)d_i \\ \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & \cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & \cos(a_i) & \cos(a_i)d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

kjer so a_i , α_i , d_i in θ Denavit - Hartenberg (D-H) parametri in opisujejo relacijo med dvema koordinatnima sistemoma.

Sklicujoč na sliko 2.2 se D-H parametre parametre opišejo kot:

- a_i razdalja med O_i in O_{i+1} v smeri x_i ,
- α_i kot med O_i in O_{i+1} glede na os x_i ,
- d_i razdalja med O_{i-1} in O_i glede na os z_i ,
- θ razdalja med O_{i-1} in O_i glede na os z_i ,



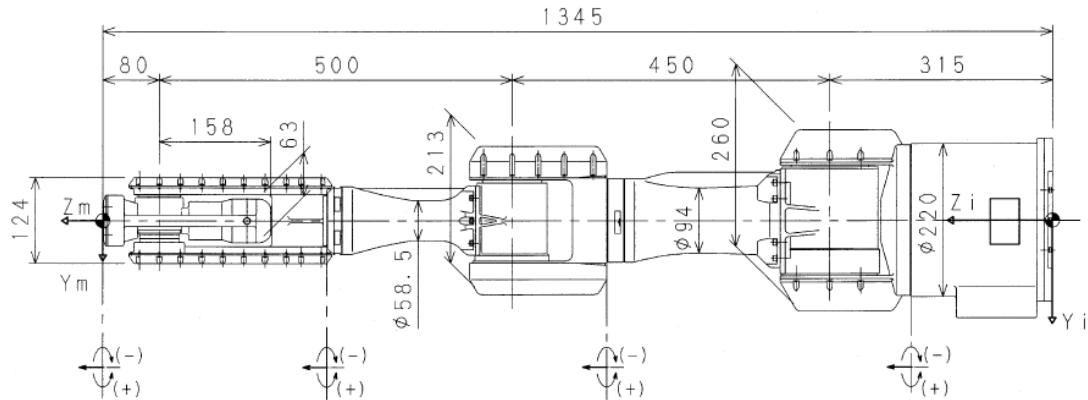
Slika 2.2: Dva zaporedna člena kinematične verige, povzeto po [1]

Z množenjem homogenih transformacijskih matrik posameznih sklepov med seboj dobimo homogeno transformacijo med vrhom robota in njegovo bazo:

$$\mathbf{T}_7^0 = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \dots \mathbf{T}_7^6. \quad (2.2)$$

D-H parametre za robota PA-10 definiramo na osnovi podatkov proizvajalca [2] in so podani na sliki 2.3. V tabeli 2.1 so zapisani D-H parametri za vse kinematične pare. Koti v sklepih robota so zapisani kot q_n in jih imenujemo notranje koordinate. Glede na D-H sistem v našem primeru q_i ustreza parametru θ_i . Z upoštevanjem tega postane matrika \mathbf{T}_{i+1}^i funkcija kotov v sklepih $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]^T$.

Opis lege vrha robota se da skrajšati in zapisati z minimalnim številom koordinat. V matriki homogene transformacije lahko poiščemo vektor translacije \mathbf{p} in rotacijsko matriko \mathbf{R} (slika 2.3).



Slika 2.3: Tehnična risba robota PA-10. Iz nje se definira D-H parametre. Povzeto po [2].

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0.315	q_1
2	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	q_2
3	$\frac{\pi}{2}$	0	0.45	q_3
4	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	q_4
5	$\frac{\pi}{2}$	0	0.5	q_5
6	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	q_6
7	$\frac{\pi}{2}$	0	0.08	q_7

Tabela 2.1: D-H parametri

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{3 \times 3} & \mathbf{p}^{1 \times 3} \\ \mathbf{0}^{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Pozicija se enostavno izpiše iz prvih treh vrstic zadnjega stolpca, vektor \mathbf{p} . Za zapis orientacije pa se je potrebno sklicati na Eulerjeve kote, ki jih lahko izračunamo iz členom podmatrike \mathbf{R} . Če omenjeno podmatriko zapišemo kot

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

lahko definiramo tri Eulerjeve kote na sledeč način

$$\varphi = \arctan 2(r_{21}, r_{11}), \vartheta = \arctan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}), \psi = \arctan 2(-r_{32}, -r_{33}). \quad (2.5)$$

Z združitvijo treh koordinat za opis pozicije in treh koordinat za opis orientacije se lahko definira vektor, ki opisuje neko točko v prostoru baze robota:

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z \ \varphi \ \vartheta \ \psi]^T. \quad (2.6)$$

Vektor x se imenuje tudi vektor zunanjih koordinat. Sedaj je mogoče opisati enačbo direktne kinematike kot funkcijo \mathbf{q} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{k}(\mathbf{q}). \quad (2.7)$$

Funkcija $\mathbf{k}(\mathbf{q})$ je vektorska funkcija notranjih koordinat, v katerih so zajete kinematične enačbe pozicije in orientacije mehanizma. Problem direktne kinematike je pri serijskih mehanizmih enostavno rešljiv in ima eno rešitev [9].

Potrebno je še opisati, kakšna je hitrost vrha robota v odvisnosti od hitrosti v sklepov. Z odvajanjem enačbe (2.7) po \mathbf{q} dobimo

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{k}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \mathbf{q} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}, \quad (2.8)$$

kjer je \mathbf{J} Jacobijeva matrika in predstavlja parcialne odvode zunanjih koordinat.

Z odvajanjem enačbe (2.8) je mogoče zapisati še relacijo med pospeški vrha robota ter pospeški sklepov

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}, \quad (2.9)$$

kjer je $\dot{\mathbf{J}}$ odvod Jacobijeve matrike.

2.2 Dinamičen model robota

Vodenje robota z referenčnimi navori veleva poznavanje njegovega dinamičnega modela. S poznavanjem dinamičnega modela je mogoče opisati silo s katero bo vrh robota deloval v kontaktu z okolico. Z razliko od kinematičnega modela je pri dinamičnem modelu število parametrov, ki vplivajo na vodenje večje. V nadaljevanju bo predstavljen splošen dinamičen model in relacija med silami, ki delujejo na vrhu robota in navori v sklepih.

Enačbe gibanja kot posledica delovanja sil in navorov se lahko zapišejo z uporabo Lagrangevih formulacij

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(q, \dot{q}) &= \mathcal{T}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q), \\ \boldsymbol{\tau} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} \end{aligned} \quad (2.10)$$

kjer \mathcal{T} in \mathcal{U} opisujeta kinetično in potencialno energijo, $\boldsymbol{\tau}$ pa generalizirane sile.

Lagrangeve formulacije so orodje za sistematičen opis dinamike posameznih segmentov [1]. Z uporabo formulacije (2.10) se lahko zapiše enačbo navorov v sklepih v odvisnosti od kotov, hitrosti in pospeškov v sklepih na sledeč način:

$$\boldsymbol{\tau}(\ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_f(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{h}_o. \quad (2.11)$$

Posamezni členi zgornje enačbe bodo opisani v nadaljevanju.

Matrika $\mathbf{B}(\mathbf{q})$ predstavlja zapis vztrajnosti posameznih segmentov. Odvisna je od trenutne konfiguracije robota. Posamezni členi pa so izračunani kot

$$b_{i,j} = \sum_{i=\max(j,k)}^n Tr[(\frac{\partial}{\partial q_k} \mathbf{T}_i^0)(\frac{\partial}{\partial q_j} \mathbf{T}_i^0)]. \quad (2.12)$$

Operator Tr je sled matrike, to je vsota diagonalnih členov matrike.

Matrika $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ vključuje podatke o Coriolisovih in centripetalnih silah. Njeni členi izraženi s pomočjo kot

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n c_{i,j,k} \dot{q}_k, \quad (2.13)$$

kjer so

$$c_{i,j,k} = \frac{1}{2} (\frac{\partial b_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial b_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial b_{jk}}{\partial q_i}), \quad (2.14)$$

Christoffelovi simboli in dodatno velja še $i, j, k = 1, \dots, n$.

Vektor $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ predstavlja navor proizveden v sklepih manipulatorja zaradi vpliva gravitacije [1]. Posamezen člen vektorja $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ je podan kot

$$g_i = \sum_{i=j}^n (-m_i \mathbf{g}_0 (\frac{\partial}{\partial q_j} \mathbf{T}_i^0)^T \mathbf{r}_i), \quad (2.15)$$

kjer je \mathbf{g}_0 vektor gravitacijskega pospeška $\mathbf{g}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -9,81 \end{bmatrix}^T$. Vektor \mathbf{r}_i opisuje mesto težišča v segmentu, m_i pa opisuje maso segmenta.

Vektor \mathbf{F}_f opisuje vpliv trenja. Vektor zajema tako Coulombovo trenje kot tudi viskozno trenje. Posamezni členi vektorja, f_i so prispevki trenja v i -tem sklepu. Podrobnejše bo ta prispevek obravnavan v poglavju 4.3.

Vektor \mathbf{h}_o vsebuje sile in navore, ki delujejo na vrh robota, $\mathbf{h}_o = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]$, kjer prvi trije členi vektorja opisujejo sile, drugi trije pa navore.

2.3 Inverzna kinematika

Nalogo, ki jo opravlja robot tipično opišemo s časovnim potekom vektorja \mathbf{x} , kot je podan v enačbi (2.7). Da bi lahko izvedli želeno gibanje, je potrebno poiskati ustreerne vrednosti notranjih koordinat \mathbf{q} , kar predstavimo z enačbo

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}^{-1}(\mathbf{x}), \quad (2.16)$$

kjer je \mathbf{k}^{-1} inverz funkcije \mathbf{k} . Ta funkcija predstavlja inverzno kinematiko. Čeprav je bila rešitev enačbe (2.7) enolična, pa enačba (2.16) nima vedno enolične rešitve. Še več, rešitev obstaja le, če \mathbf{x} leži v delovnem prostoru robota.

Pri vodenju robotov večinoma ne rešujemo inverzne dinamike direktno iz enačbe (2.16) ampak preko hitrosti, torej iz enačbe (2.8). Če predpostavimo, da je dimenzionalnost prostora naloge m in če velja, da je $m = n$, potem lahko določimo hitrost v sklepih iz relacije

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{x}}, \quad (2.17)$$

kje je \mathbf{J}^{-1} inverz Jacobijeve matrike.

V primeru, da pa ima robot več stopenj prostosti, kot jih je potrebno za izvedbo naloge, torej če je $n > m$, potem inverz \mathbf{J}^{-1} ne obstaja in je potrebno poiskati rešitev inverzne kinematike drugače. Enačbo (2.8) lahko invertiramo z uporabo naslednje zvezze

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^*\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{N}\ddot{\mathbf{q}}, \quad (2.18)$$

kjer je \mathbf{J}^* generaliziran inverz matrike \mathbf{J} , matrika \mathbf{N} pa predstavlja projekcijo v ničelni prostor matrike \mathbf{J} ,

$$\mathbf{N} = (\mathbf{I} - \mathbf{J}^*\mathbf{J}). \quad (2.19)$$

Prvi člen enačbe (2.18) predstavlja partikularno rešitev in zadosti osnovni nalogi, zagotovi, da je vrh robota v \mathbf{x} . Drugi člen enačbe (2.18) pa predstavlja homogeno rešitev in omogoča rekonfiguracijo robotskega mehanizma brez, da se

spremeni pozicija vrha robota \mathbf{x} . Zaradi tega se hitrost \dot{q}_n lahko uporabi za realizacijo dodatnih nalog nižje prioritete.

Kot generaliziran inverz matrike \mathbf{J}^* se pogosto uporablja Moore-Penroseov pseudoinvez

$$\mathbf{J}^+ = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1}. \quad (2.20)$$

ali uteženi Moore-Penroseov pseudoinverz

$$\mathbf{J}^* = \mathbf{J}^\# = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}, \quad (2.21)$$

kjer je \mathbf{W} utežnostna matrika.

Z odvajanjem enačbe (2.18) dobimo relacijo med pospeški v sklepih in pospeških na vrhu robota.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^* (\ddot{\mathbf{p}} + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N} \ddot{\mathbf{q}}_N, \quad (2.22)$$

kjer je $\ddot{\mathbf{p}}$ pospešek vrha robota, pospešek $\ddot{\mathbf{q}}_N$ pa poljubni pospešek v notranjih koordinatah, ki se uporabi za realizacijo dodatnih nalog in ne vpliva na pospešek gibanja vrha robota.

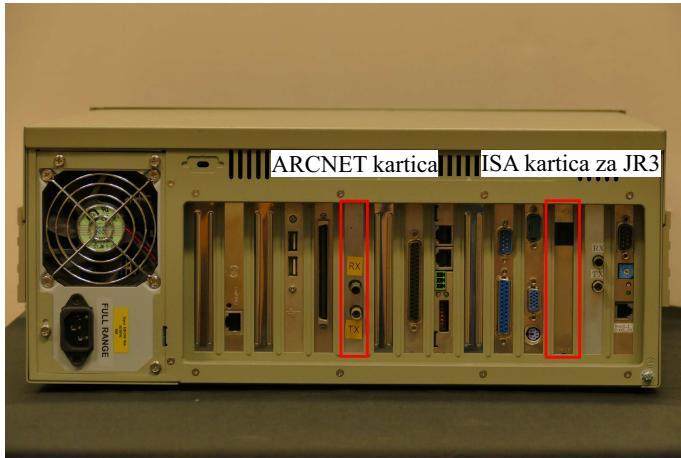
3 ARCNET - UDP strežnik za komunikacijo s krmilnikom robota ter senzorjem sile

V prejšnjem poglavju je bil opisan kinematični in dinamičen model robota PA-10. V tem poglavju pa bo predstavljen krmilnik motorjev v sklepih in program, ki je nastal za komunikacijo s krmilnikom.

V sklepih robota PA-10 so servo motorji, katerih krmiljenje se izvaja preko močnostnega krmilnika. Krmilnik omogoča vodenje servo motorjev preko referenčne hitrosti ali referenčnega navora. Komunikacija s tem krmilnikom poteka preko komunikacijskega vmesnika ARCNET, ki omogoča nastavitev močnostnih ojačevalnikov v krmilniku, izbiro načina krmiljenja in seveda pošiljanja želenih hitrosti ali navorov v sklepih. Preko te povezave se pošiljajo nazaj tudi informacije o stanju robota in krmilnika (pozicija, navori, statusi, ...).

Za samo vodenja robota pa se uporablja dodaten vmesnik, t. i. MHI Controller, ki omogoča krmiljenje robota na različne načine. Na žalost pa ima ta vmesnik kar precej omejitev, ki onemogočajo napredno vodenje robota. Omejujoče so predvsem naslednje stvari: izvaja se lahko le vodenje po hitrosti, ki navzgor dokaj strogo omejena in največja frekvenca vzorčenja je 100 Hz.

Te omejitve v MHI vmesniku omejujejo kvalitetno vodenje z upoštevanjem sil in kompenzacijo dinamičnih vplivov. Ker pa je zasnova krmilnika dokaj odprta in omogoča komunikacijo preko ARCNET omrežja dokaj dobro, smo razvili lasten

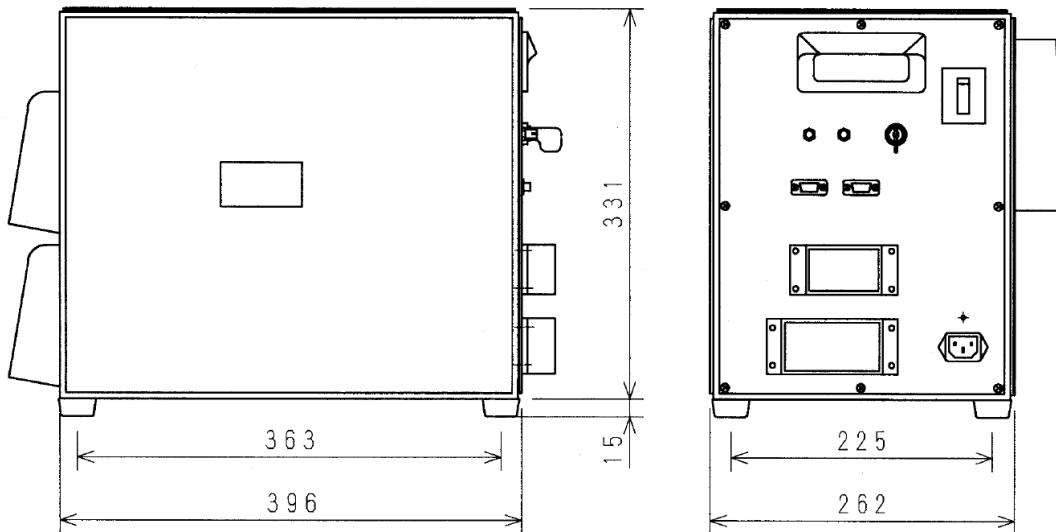


Slika 3.1: Osebni računalnik na katerem je bil razvit strežnik. Na sliki vidimo zadnji del računalnika kjer so priključki za ARCNET omrežje ter JR3 senzor.

krmilni sistem na višjem nivoju, ki bo omogočal implementacijo sodobnih načinov vodenja, tako s hitrostnim kot z navornim načinom vodenja.

Pred začetkom izdelave lastnega strežnika se je definiralo dve zahtevi, ki jih mora program izpolnjevat. Prva je bila, da program deluje dovolj hitro, da se lahko izvaja v realnem času. To je pomembno za zagotovitev kvalitetnega in stabilnega vodenja. Avtor v [10] namreč navaja, da vzorčni čas močno vpliva na stabilnost vodenja robota v kontaktu z okolico. Večja kot je vzorčna frekvenca večja je lahko togost okolice s katero je robot v kontaktu. Druga zahteva pa je bila enostavna uporaba. Krmilnik bi moral uporabniku omogočati razvijanje visokonivojskih algoritmov vodenja brez poznavanja detajlov delovanja ARCNET omrežja in krmilnika robota. Uporabnik mora imeti možnost proste izbire programskega okolja za realizacijo vodenja. Dodatno se je kasneje pojavila še želja, da bi krmilni sistem vključeval tudi vmesnik za senzor sil in navorov JR3.

Razvili smo strežnik, ki je zadostoval vsem navedenim kriterijem in hkrati tudi dopušča možnost nadgrajevanj. Nastali strežnik deluje kot ARCNET-Ethernet posrednik in deluje na osebnem računalniku 3.1, ki ima operacijski sistem Linux.



Slika 3.2: Tehnična risba ohišja krmilnika servo motorjev. Povzeto po [2].

3.1 Krmilnik servo motorjev robota

V prvem poglavju je bilo zapisano, da robota PA-10 med drugim odlikuje dobra prenosnost. To velja tako za samo robotsko roko kot tudi za krmilnik servo motorjev. Krmilnik z ohišjem ima dimenzijske $262 \times 331 \times 396$ mm in maso 22 Kg. Slika (slika 3.2) prikazuje tehnično risbo krmilnika.

V ohišju servo krmilnika so vgrajeni štirje krmilniki servo motorjev. Trije krmilijo po dva motorja, eden pa le enega. Krmilniki omogočajo vodenje motorjev na dva načina, navorno in hitrostno. Različna vodenja sta v krmilnikih drugače realizirana. Navorno vodenje je realizirano z analognim P regulatorjem toka. To izvira iz modela električnega motorja, ki pravi, da je navor na gredi proporcionalen toku s katerim motor napajamo [11]. Hitrostna regulacija pa je realizirana z digitalnim PI regulatorjem s frekvenco približno 1500 Hz. Kot po vedano, so prenosi realizirani s harmoničnimi gonili. Prestavno razmerje je 1:50. Na strani reduktorja je 14 - bitni enkoder, kar pomeni, da je resolucija merjenja kota približno $0.4 \cdot 10^{-3}$ stopinj. Krmilnik ima tudi vgrajen varnostni sistem, ki preprečuje, da bi se sklepi preveč zasukali in ob morebitnem pretiranem zasuku

vklopi zavoro in tako prepreči, da bi šel do svojih mehanskih omejitvev.

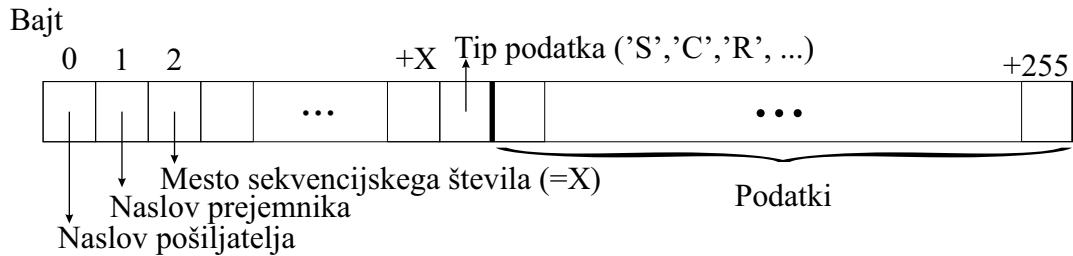
Krmilnik vsebuje dva pomnilnika. Delovni pomnilnik (RAM) in nastavitveni pomnilnik (EEPROM). V EEPROM tabeli so zapisani parametri za nastavitev in vodenje servo krmilnikov. Ob zagonu krmilnika se parametri naložijo iz EEPROM tabele v RAM. Med naloženimi parametri so tudi ojačanje proporcionalnega ter integracijskega dela regulatorja, omejitve posameznih stopenj, razmerje prenosa zobnikov, itd.

3.2 ARCNET vmesnik

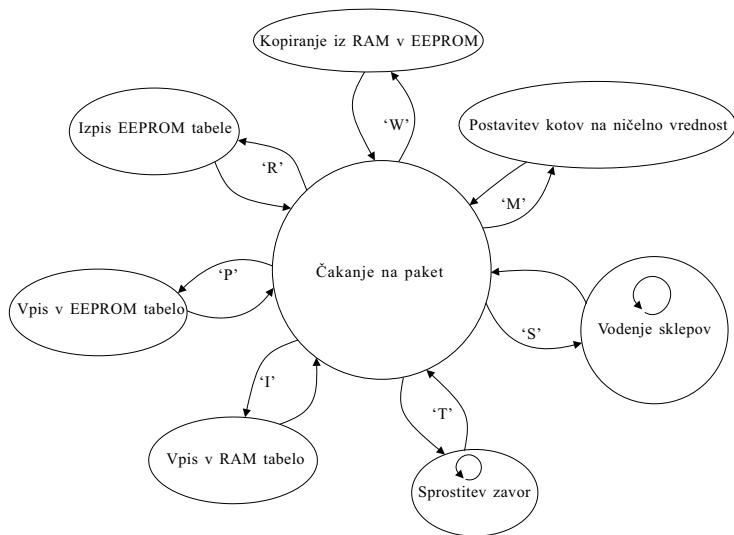
Referenčne navore in hitrosti se na krmilniku nastavlja na preko zunanjega vmesnika, ki je povezan na enako ARCNET omrežje kot servo krmilnik. Priključitev servo krmilnika na omrežje omogoča vgrajen ARCNET modul. ARCNET je omrežje, ki vključuje podatkovni in fizični nivo po OSI modelu, komunikacija pa je serijska in paketno zastavljena. Njegova prednost pred Ethernetom omrežjem je velika stopnja determinističnosti [12]. Krmilnik robota ima dva priključka za optična vodila, vhod (Rx) ter izhod (Tx). Zgornja meja hitrosti komunikacije z krmilnikom robota je 5 Mb/s [2].

Pakete, ki jih pošiljamo na krmilnik servo motorjev robota, je potrebno sestaviti tako, kot je napisano v dokumentaciji [2]. Če želimo, da bo krmilnik paket prejel, je na prvi bajt potrebno vpisati naslov krmilnika. ARCNET modul vsebuje končni avtomat stanj, ki preklaplja med stanji glede na tip poslanih podatkov. Različni tipi podatkov so definirani z različnimi kodami, znotraj poslanega paketa. Struktura ARCNET paketa je prikazana na sliki 3.3.

Preklapljanje med stanji in potrebne kode za prehod v ta stanja opisuje slika 3.4. Ikona  označuje stanja, v katerih se avtomat lahko zadrži dlje časa s ponavljajočim pošiljanjem paketov z enakim tipom podatkov. Iz teh stanj izstopi v primeru, da nov paket ne pride pravočasno, ali pa da pride paket s tipa E. Ko višjenivojski vmesnik ne pošilja nobenih ukazov je ARCNET vmesnik v stanju



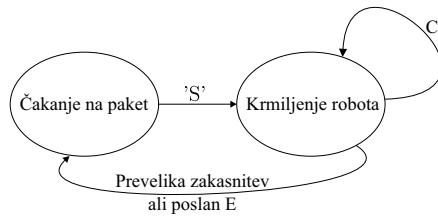
Slika 3.3: Vsebina ARCNET paketa



Slika 3.4: Diagram stanj ARCNET modula na krmilniku robota

čakanja, v katerem čaka na primerno sestavljen paket.

Za delo z robotom je pomemben predvsem način "Vodenje sklepov", v katerem se dejansko krmili gibanje robota. V tem načinu je potrebno upoštevati predpisano maksimalno zakasnitev med zaporednima paketoma, ki je definirana v EEPROM tabeli in je tovarniško nastavljena na 300 ms. V kolikor je ta zakasnitev prekoračena, se avtomat stanj vrne v začetno stanje in je krmiljenje prekinjeno. Ta način se izbere tako, da se ARCNET vmesniku najprej pošlje ukaz tipa S, nadaljuje pa se s pošiljanjem paketov tipa C ter zaključi s tem, da se pošlje paket tipa E (slika 3.5). Del paketa, ki je označen s "podatki" nosi podatke, na podlagi katerih se vodi robota. Vsebina podatkovnega dela je odvisna od tipa paketa.

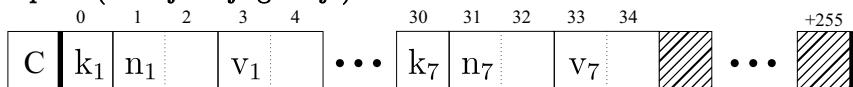


Slika 3.5: Krmiljenje robota s pošiljanjem ARCNET paketov.

Tip 'S' (začetek gibanja)



Tip 'C' (nadaljevanje gibanja)



Tip 'E' (konec gibanja)



Slika 3.6: Podatkovni del ARCNET paketa za krmiljenje robota v odvisnosti od tipa paketa.

Paketa, tipa S in E imata podatkovni del prazen. Paket tipa C pa ima v podatkovnem delu prvih 35 bajtov zapolnjenih s podatki za vodenje robota. Slika 3.6 prikazuje vsebino podatkovnega dela omenjenih paketov. V sliki so krmilni podatki označeni z k_i , n_i in v_i . Njihov pomen pa je:

- k - kontrolni bajt (velikost podatka: byte),
 - bit 0: zavora (1 - vklop, 0 - izklop),
 - bit 1: servo motor (1 - vklop, 0 - izklop),
 - bit 2: način krmiljenja (1 - navor, 0 - hitrost),
 - biti 3 - 7: se en uporabljajo,
- n - referenčni navor (velikost podatka: word) = 0.001 Nm/digit,



Slika 3.7: Senzor sil in navorov JR3.

- v - referenčna hitrost (velikost podatka: word) = 0.0002 rad/s/digit.

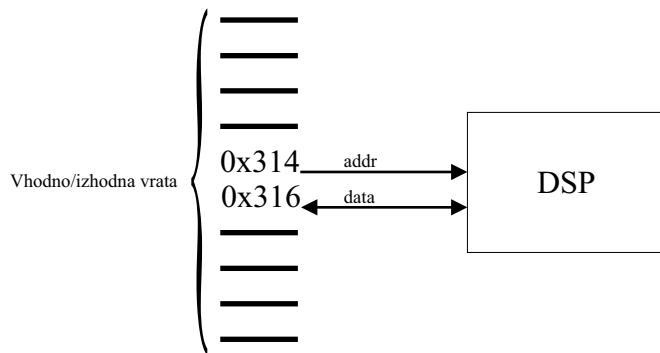
Poslani referenčni navori in hitrosti gredo od vrednosti 0x0000 do 0xFFFF. Krmlnik ima zaradi varnosti nastavljene omejitve obeh veličin, zato prevelike referenčne signale omeji in zagotovi varno gibanje do omejitev.

3.3 Senzor sile in navorov - JR3

Za realizacijo vodenja opisanega v poglavju 4.4.1 smo med vrhom robota ter prijemalom pritrtilo senzor sil JR3 (slika 3.7). Senzor nam omogoča merjenje sil in navorov v x , y in z oseh. Senzor je narejen iz uporavnih lističev porazdeljenih po notranjosti senzorja, ki je v obliki križa. Iz specifikacij senzorja [13] je razvidno, da uporablja 6 uporavnih lističev. S tem, ko na senzor deluje zunanjša sila ali navor, pride do deformacije materjala na katerem so nameščeni uporavnii lističi in se upornost na uporavnih lističih spremeni proporcionalno s silo in togostjo senzorja. Sprememba upornosti se izmeri posredno preko spremembe napetosti na AD-pretvorniku, ki je vgrajen v sam senzor. Napetost se pretvori v silo preko množenja s kalibracijsko matriko \mathbf{K}_{calib} . Naj bo \mathbf{h}_{JR3} vektor sil, ki delujejo na senzor in naj bo \mathbf{u}_u vektor napetosti na AD-pretvorniku. Enačba za izračun sil je

$$\mathbf{h}_{JR3} = \mathbf{K}_{calib} \mathbf{u}_u \quad (3.1)$$

Senzor je priklopljen na računalnik preko 8 žilnega kabla s kontektorjem tipa RJ-45 v ISA kartico. Elektronika v samem senzorju serijsko pošilja podatke o izmerjenih silah na kartico. Kartica vsebuje vezje za digitalno obdelavo signalov (ang. *digital signal processor* - DSP). V dokumentaciji kartice [14] so opisani trije nizkoprepustni filtri z različnimi mejnimi frekvencami. Uporabili smo filter z mejno frekvenco 500 Hz.



Slika 3.8: Dostopanje do registrov na ISA kartici za digitalno obdelavo signala iz senzorja senzorja JR3.

DSP kartica na ISA vodilu zavzame dva 16-bitna naslova: osnovnega (*base address*) ter naslednjega. Osnovni se uporabi kot naslovni register, drugi pa kot podatkovni register. Preko vhodno/izhodnih vrat računalnika lahko nastavljamo vsebino teh registrov. Na ta način lahko dostopamo do internih registrov DSP kartice. Na kartici so stikala preko katerih nastavimo osnovni naslov (*base address*) kartice. Če je osnovni naslov 0x314 bo naslovni register dostopen na 0x314, podatkovni pa na 0x316. Podatke na registrih DSPja preberemo tako, da na naslovni del zapišemo naslov registra. DSP nato napiše vsebino registra na podatkovni register ISA vodila. Če želimo v register DSPja nekaj zapisati, pa moramo mi zapisati podatek na podatkovni del ISA registra (slika 3.8). Za branje ter pisanje po registrih DSP kartice uporabimo sledeči funkciji v sintaksi programskega jezika C:

```
#define baseAdde 0x314
```

```

int getData(int addr)
{
    outport(baseAddr, addr);
    return inport(baseAddr + 2);
}

int putData(int addr, int data)
{
    outport(baseAddr, addr);
    outport(baseAddr + 2, data);
}

```

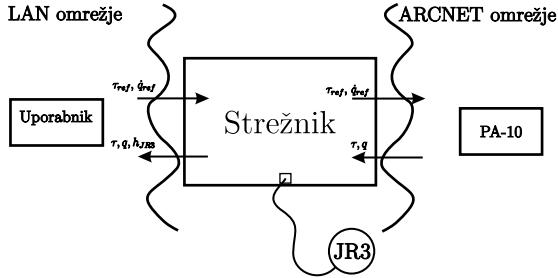
Dokumentacija navaja, da v kolikor želi uporabnik odčitati vrednost sile ali napredna F mora prebrati osnovno vrednost F_s na registru imenovanem (**full scale**), jo pomnožiti z vrednostjo F_f , ki je na registru izbranega filtra (**current force**). Nazadnje more to vrednost deliti s konstanto K_p , da pretvori podatke v ustrezne enote(N ali Nm).

$$F = \frac{F_s F_f}{K_p} \quad (3.2)$$

Ker senzor meri silo in navor v treh smereh, je potrebno opraviti izračun za vsako smer.

3.4 Strežnik

V uvodu v poglavje smo omenili, da je proizvajalec pripravil vmesnik za krmiljenje robota, MHI Controller, vendar smo se zaradi omejitev tega vmesnika, odločili za izgradnjo lastnega vmesnika. Definirane zahteve so bile visoka frekvenca, delovanje v realnem času ter enostavnost uporabe. Poleg tega pa smo želeli, da nov vmesnik vključuje tudi povezavo s senzorjem sil na vrhu robota.



Slika 3.9: Strežnik kot posrednik med ARCNET ter Ethernet omrežjem.

Ko smo se lotili izgradnje strežnika smo se najprej morali odločiti, na kakšni platformi bo strežnik deloval. Zaradi enostavnosti razvijanja smo izbrali oseben računalnik, na katerega se lahko priklopi ISA kartico za senzor sil JR3 ter ARCNET mrežno kartico za komunikacijo s krmilnikom PA-10. Naslednja odločitev je bila izbira operacijskega sistema. Odločali med Windows, Linux ali XPCtarget sistemi. Na koncu smo se odločili za operacijski sistem Linux, saj ga odlikujejo naslednje lastnosti:

- prosto dostopen,
- podpora za ARCNET omrežje,
- dobra podpora za dostop do izhodno/vhodnih vrat,
- dobro časovne lastnosti [15].

Nov vmesnik deluje kot posrednik med dvema različnima omrežjema (slika 3.9), ARCNET in UDP. Osnovna funkcionalnost razvitega strežnika je, da posreduje podatke, ki jih uporabnik pošilja preko UDP paketov, krmilniku robota PA-10 v obliki ARCNET paketov in v drugi smeri stanje robota. V nadaljevanju bo opisana zgradba tega strežnika, njegovo delovanje ter uporaba.

3.4.1 Delovanje programa

Razviti program deluje kot strežnik, kar pomeni, da se odzove na klientovo zahavo. Klient je kakršen koli program, ki lahko pošilja UDP pakete po Ethernet

omrežju. Za komunikacijo med klientom in strežnikom smo definirali strukture UDP paketa za pošiljanje in sprejem. Paket je velik 99 bajtov. Vsebina paketa pa je opisana v tabeli 3.1.

Zap. št.	Dolžina	Opis podatka	Tip podatka
0	7	Kontrolni bajt za posamezen motor	char
6	7	Referenčni navor za posamezen motor	signed short int
20	7	Referenčna hitrost za posamezen motor	signed short int
34	62	Rezervirani / neuporabljeni bajti	char
96	1	Štartna sekvenca	char
97	1	Trenuten čas na klientu	float

Tabela 3.1: Opis UDP paketa, ki ga klient pošlje strežniku.

Kontrolni bajt, referenčni navori ter hitrosti za posamezen motor se posredujejo naprej na krmilnik robota. Ostali bajti pa so namenjeni zagotavljanju varnosti med komunikacijo. Referenčni navori so v Nm, hitrosti pa v rad/s.

S prispelimi UDP paketom strežnik pretvori dane navore in hitrosti v format, ki je naveden v dokumentaciji in opisan v 3.2. Kontrolni bajti za posamezne motorje ostanejo nespremenjeni in se posredujejo enaki kot so prispeli. Strežnik prispele podatke zapakira v ARCNET paket naveden v tabeli 3.2. Paket pošlje po ARCNET omrežju

Strežnik nato počaka na odgovor servo krmilnika. Strežnik odgovor servo krmilnika najprej pretvori v želeno obliko. Hitrosti in navori v sklepih so ponovno zapisani v formatu navedenem v 3.2. Te podatke pa nato zapakira v UDP paket. Zraven doda še kontrolne bajte. UDP paket poslan klientu je opisan v tabeli 3.3.

Naloga strežnika je tudi zagotavljanje sinhronega delovanja. Strežnik daje takt komunikaciji. Glede hitrosti komunikacije smo izbrali frekvenco pošiljanja paketov 500 Hz. To pomeni, da strežnik, potem ko prejme in pošlje vse podatke, čaka, da mine od začetka cikla točno 2 ms. Ohranjanje frekvence časovnega cikla je kritičnega pomena. Zato strežnik prekine komunikacijo s servo krmilnikom, v kolikor nov UDP paket ne prispe pravočasno.

Zap. št.	Dolžina	Opis podatka
0	1	ID pošiljatelja
1	1	ID prejemnika
2	1	Prazen / neuporabljen bajt
3	1	Mesto sekvencijskega števila
4	1	Sekvencijsko število
5	1	Tip podatka
6	1	Statusni bajt za prvi servo
7	2	Referenčni navor za prvi servo
9	2	Referenčna hitrost za prvi servo
:	:	:
36	1	Statusni bajt za sedmi servo
37	2	Referenčni navor za sedmi servo
39	2	Referenčna hitrost za sedmi servo

Tabela 3.2: Opis ARCNET paketa.

Diagram delovanja strežnika prikazuje slika 3.10.

3.4.2 Uporaba programa

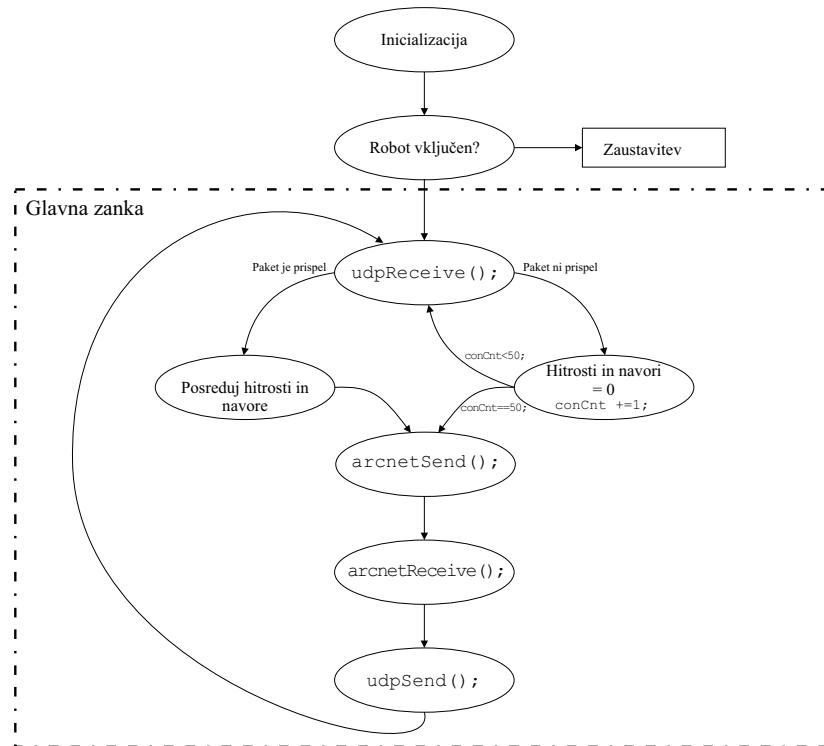
Kot povedano, je bil program narejen na Linux operacijskemu sistemu. Prednost tega sistema je tudi uporaba SSH (*Secure Shell*) protokola za oddaljen dostop. Uporabnik lahko na ta način zažene strežnik brez, da je fizično ob računalniku.

Pred zagonom strežnika je potrebno najprej naložiti ARCNET modul v Linux jedro. To napravi uporabnik z zagonom skripte `arcnet_ON`, ki smo jo pripravili (slika 3.11). Sledi zagon programa z ukazom `./udparcnet-server <port>`. Gre za standardno Linux sintakso za zagon programov pri čemer `./` pomeni zagon, `udparcnet-server` ime programa, `<port>` pa pomeni vrata na katerih bo strežnik poslušal po prispelih UDP paketih. Če uporabnik želi na primer izbrati vrata 1337 to naredi tako: `./udparcnet-server 1337`. Primer zaganjanja strežnika je na sliki 3.12.

Iz slike 3.12 vidimo, da program javi, če so bile funkcije v inicializacije uspešne

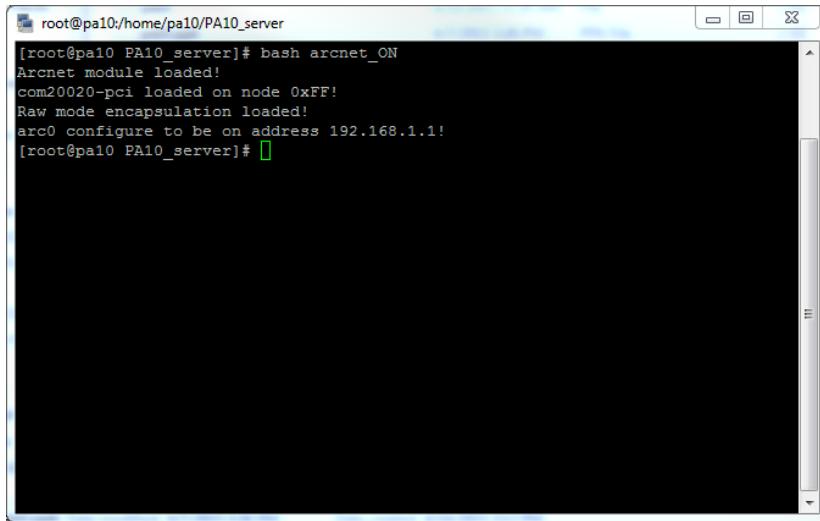
Zap. št.	Dolžina	Opis podatka	Tip podatka
0	7	Kontrolni bajt za posamezen motor	char
7	7	Trenuten kot v sklepu	float
35	7	Trenutni proizveden navor v sklepu	signed short int
63	6	Izmerjene sile in navori na JR3	float
73 - 111	38	Rezerviran prostor	float
112	1	Čas, ki je bil porabljen za programski cikel	float
116	1	Čas, ki ga je poslal klient na bajtu 60	float

Tabela 3.3: Opis UDP paketa, ki ga strežnik pošlje klientu.



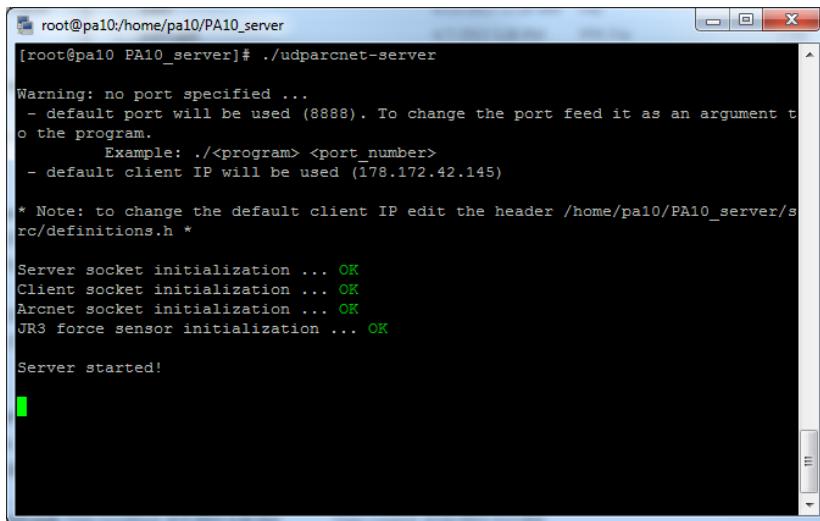
Slika 3.10: Diagram poteka programa.

in če je senzor sil JR3 povezan. V kolikor senzorja ni, strežnik še vedno deluje, vendar so vrednosti poslanih sil enake 0.



```
root@pa10:/home/pa10/PA10_server]
[root@pa10 PA10_server]# bash arcnet_ON
Arcnet module loaded!
com20020-pci loaded on node 0xFF!
Raw mode encapsulation loaded!
arc0 configure to be on address 192.168.1.1!
[root@pa10 PA10_server]#
```

Slika 3.11: Nalaganje ARCNET modula v jedro Linux.



```
root@pa10:/home/pa10/PA10_server]
[root@pa10 PA10_server]# ./udparcnet-server
Warning: no port specified ...
- default port will be used (8888). To change the port feed it as an argument to the program.
Example: ./<program> <port_number>
- default client IP will be used (178.172.42.145)

* Note: to change the default client IP edit the header /home/pa10/PA10_server/src/definitions.h *

Server socket initialization ... OK
Client socket initialization ... OK
Arcnet socket initialization ... OK
JR3 force sensor initialization ... OK

Server started!
```

Slika 3.12: Zaganjanje strežnika na Linux operacijskem sistemu.

3.4.3 Varnostni ukrepi

V tabelah, ki opisujejo poslane in prejete UDP pakete je mogoče razbrati, da so nekateri bajti namenjeni ohranjanju komunikacije oz. preverjanju ali le-ta sploh še poteka. Eden od takih ukrepov je, da v kolikor nov UDP ali ARCNET paket ne prispe v nekem vnaprej definiranem času (v našem primeru 1 s), program robota

zaustavi nato pa gre v stanje čakanja novega paketa. Ta čas smo nastavili na eno sekundo.

Ko je program v čakanju, preverja prispele UDP pakete ali imajo pravilno štartno sekvenco. Na ta način poskrbimo, da se vodenje začne z prvim prejetim UDP paketom in da v primeru prekinjene komunikacije se vodenje ne bi ponovno začelo izvajati sredi delovanja višjenivojskega vodenja.

Naslednji varnostni ukrep preverja stanje varnostnega gumba (*Emergency stop*). V kolikor se ta pritisne, se na servo krmilniku že sam po sebi sproži ukaz za ustavitev motorjev ter vklop zavor. Na strežniku pa se to pozna tako, da se program zaustavi. V kolikor želimo nadaljevati z vodenjem, je potrebno program ponovno zagnati.

4 Vodenje robota PA-10

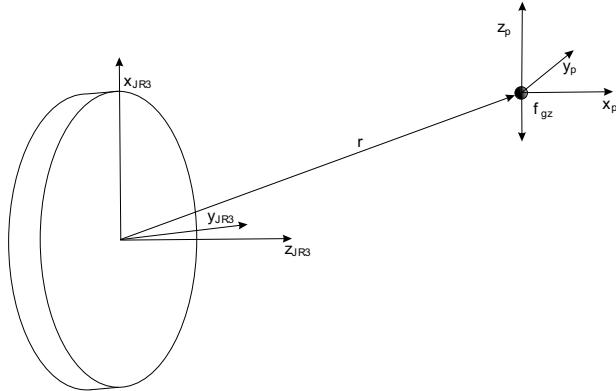
V prejšnjih poglavjih je bilo govora o pošiljanju referenčnih hitrosti in navorov na krmilnik servo motorjev robota PA-10. V poglavju, ki sledi, pa bo govora o določanju teh krmilnih veličin za vodenja robota. V tem poglavju bo natančneje opisano tudi vodenje robota v zunanjih koordinatah. Opisan bo postopek kompenzacije vpliva težnosti prijemala na senzor sile JR3. Na koncu pa bosta opisana dva načina za krmiljenje robota v stiku z okolico, admitančno vodenje ter vodenje preko inverzne dinamike.

4.1 Kompenzacija mase prijemala ter merilnega odmika na senzorju sile JR3

Delovanje senzorja sile JR3 je bilo opisano v prejšnjih poglavjih. Senzor je pritrjen na vrh robota in meri navore ter sile, ki delujejo nanj v njegovem koordinatnem sistemu. Sile in navore na vrhu robota lahko preslikamo v koordinatni sistem baze preko matrike homogene transformacije

$$\mathbf{h}_b = \mathbf{T}_7^0 \mathbf{h}_e \quad (4.1)$$

Robot brez prijemala v praksi ni pretirano uporaben saj lahko opravlja le malo uporabnih nalog, npr. premikanje objektov s porivanjem. V kolikor pa želimo, da bo robot lahko izvajal tudi druge naloge, je potrebno nanj pritrditi primerno prijemalo, ki ga pritrdimo na senzor. Ker ima prijemalo neko maso, bo na senzor



Slika 4.1: Koordinatni sistem senzorja sile ter koordinatni sistem težišča prijemala

delovala neka sila in navor kot posledica delovanja gravitacije. To pomeni, da bomo kljub temu, da senzor ni v kontaktu z okolico, izmerili neke sile. Izmerjene sile so napaka, ki se so posledica kontakta prijemala z okolico. Pri izmerjenih silah je potrebno še upoštevati merilni odmik, ki se pojavi kot posledica lezenja uporovnih mostičkov.

Sile (\mathbf{f}_s) in navore ($\boldsymbol{\tau}_s$), ki jih meri senzor, lahko razdelimo na tri komponente

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_s &= \mathbf{f}_{env} + \mathbf{f}_{grav} + \mathbf{f}_{off} \\ \boldsymbol{\tau}_s &= \boldsymbol{\tau}_{env} + \boldsymbol{\tau}_{grav} + \boldsymbol{\tau}_{off},\end{aligned}\tag{4.2}$$

kjer z $(.)_{env}$ označimo zunanje sile in navore, ki delujejo na senzor, z $(.)_{grav}$ vpliv mase prijemala, členi označeni z $(.)_{off}$ pa predstavljajo merilni odmik, ki je posledica lezenja senzorja. Da dobimo vrednosti sil, ki delujejo na vrh robota (\mathbf{f}_s in $\boldsymbol{\tau}_s$), je potrebno kompenzirati vplive gravitacijskih sil prijemala in lazenja senzorja. V ta namen je potrebno identificirati maso in težišče prijemala ter merilni odmik senzorja. Postopek, ki smo ga razvili, je sledeč.

Ko vrh robota ni v kontaktu z okolico velja $\mathbf{f}_{env} = 0$ in $\boldsymbol{\tau}_{env} = 0$ oziroma:

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_s &= \mathbf{f}_{grav} + \mathbf{f}_{off} \\ \boldsymbol{\tau}_s &= \boldsymbol{\tau}_{grav} + \boldsymbol{\tau}_{off}.\end{aligned}\tag{4.3}$$

Sila \mathbf{f}_{grav} je odvisna od mase prijemala (m), težišča ter orientacije vrha robota.

Predpostavimo lahko, da so koordinatni sistemi vrha robota, senzorja in prijemala enako orientirani. Orientacijo senzorja zapišemo s poznavanjem kinematičnega modela in bo v nadaljevanju označena z \mathbf{R} . Tako je mogoče določiti prispevek

$$\mathbf{f}_{grav} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{f}_{gz}. \quad (4.4)$$

Ker ima \mathbf{f}_{gz} le en člen različen od nič, lahko enačbo (4.4) poenostavimo in dobimo

$$\mathbf{f}_{grav} = \begin{bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{bmatrix} mg = (\mathbf{R}_3 g)m, \quad (4.5)$$

kjer je \mathbf{R}_3 tretji stolpec matrike \mathbf{R} .

Avtorji v [16] pokažejo, da je mogoče izračunati \mathbf{f}_{grav} in \mathbf{f}_{off} na podlagi najmanj dveh meritev ($\mathbf{f}_{meas}^{(1)}$ in $\mathbf{f}_{meas}^{(2)}$). Zapišemo sistem enačb v matrični obliki

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{mes}^{(1)} \\ \mathbf{f}_{mes}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{(1)} & \mathbf{I} \\ \mathbf{R}^{(2)} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{gz} \\ \mathbf{f}_{off} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Upoštevaje (4.5) se nam enačba (4.6) poenostavi na

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{mes}^{(1)} \\ \mathbf{f}_{mes}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_3^{(1)}g & \mathbf{I} \\ \mathbf{R}_3^{(2)}g & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ \mathbf{f}_{off} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} m \\ \mathbf{f}_{off} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Izrazimo \mathbf{f}_{grav} in \mathbf{f}_{off}

$$\begin{bmatrix} \widehat{m} \\ \widehat{\mathbf{f}}_{off} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{f}_{meas}^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Enačba bo veljala le, če bo matrika \mathbf{A} polnega ranga oziroma, če bosta meritvi linearno neodvisni.

Za navor pa je potrebno poznati tudi translacijski vektor od težišča do koordinatnega sistema senzorja, v nadaljevanju označen z \mathbf{r} . Prispevek navora zaradi

vpliva gravitacije je

$$\boldsymbol{\tau}_{grav} = \mathbf{r} \times \mathbf{f}_{grav}. \quad (4.9)$$

Vektorski produkt bomo nadomestili z uporabo matričnega zapisa vektorja \mathbf{f}_{grav} kot

$$S(\mathbf{f}_{grav}) = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{f}_{grav_z} & \mathbf{f}_{grav_y} \\ \mathbf{f}_{grav_z} & 0 & -\mathbf{f}_{grav_x} \\ -\mathbf{f}_{grav_y} & \mathbf{f}_{grav_x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

in enačbo 4.9 zapisalo kot

$$\boldsymbol{\tau}_{grav} = \mathbf{S}(\mathbf{f}_{grav})\mathbf{r}. \quad (4.11)$$

Iz treh različnih meritev navorov ($\boldsymbol{\tau}_{meas}^{(1)}$, $\boldsymbol{\tau}_{meas}^{(2)}$ in $\boldsymbol{\tau}_{meas}^{(3)}$) pri treh različnih orientacijah ($\mathbf{R}_{meas}^{(1)}$, $\mathbf{R}_{meas}^{(2)}$ in $\mathbf{R}_{meas}^{(3)}$) zapišemo sistem enačb

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(1)} \\ \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(2)} \\ \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}(\mathbf{f}_{grav})^{(1)} & \mathbf{I} \\ \mathbf{S}(\mathbf{f}_{grav})^{(2)} & \mathbf{I} \\ \mathbf{S}(\mathbf{f}_{grav})^{(3)} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \boldsymbol{\tau}_{off} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \boldsymbol{\tau}_{off} \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Enačbo obrnemo in izrazimo \mathbf{r} ter $\boldsymbol{\tau}_{off}$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \boldsymbol{\tau}_{off} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(1)} \\ \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(2)} \\ \boldsymbol{\tau}_{meas}^{(3)} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Bistveni podatki, ki smo jih s temi izračuni dobili, so ocenjeni meritni odmiki, $\widehat{\mathbf{f}}_{off}$ in $\widehat{\boldsymbol{\tau}}_{off}$ ter vpliv gravitacije, $\widehat{\mathbf{f}}_{grav} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \widehat{mg} \end{bmatrix}^T$ in $\widehat{\boldsymbol{\tau}}_{grav} = \mathbf{S}(\widehat{\mathbf{f}}_{grav})\widehat{\mathbf{r}}$. Prednost tega postopka je, da imamo orientacijo senzorja v vseh meritnih pozicijah natančno določeno zaradi poznavanja kinematicnega modela robota. Hkrati pa lahko ta postopek popolnoma avtomatiziramo, kar smo tudi naredili. Postopek je opisan v dodatku ???. Masa težišče prijemala časovno neodvisna parametra. Zaradi lezenja uporovnih lističev pa je meritni odmik časovno odvisen in ga je potrebno pogosteje izmeriti.

V nadaljevanju bo sila ter navor kot posledica interakcije z okolico zapisana v vektorju \mathbf{h}_e kot

$$\mathbf{h}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_s - \hat{\mathbf{f}}_{grav} - \hat{\mathbf{f}}_{off} \\ \boldsymbol{\tau}_s - \hat{\boldsymbol{\tau}}_{grav} - \hat{\boldsymbol{\tau}}_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{env} \\ \boldsymbol{\tau}_{env} \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

kjer so z $(.)_s$ označeni odčitki senzorja.

4.2 Vodenje preko inverzne kinematike

Za vodenje robota preko hitrosti v sklepih krmilnik uporablja PI regulator, ki poskrbi, da se vsak sklep vrati s hitrostjo čim bolj podobno referenčni. Predpostavimo lahko, da ne glede na konfiguracijo ter obremenitev robota, regulator zagotovi poskrbel konvergenco napake in stabilnost robota. V nadaljevanju bo opisano vodenje sklepov robota v želeno lego oziroma vodenje robota v notranjih koordinatah. Nato pa se bo iz tega še izpeljalo vodenje v zunanjih koordinatah.

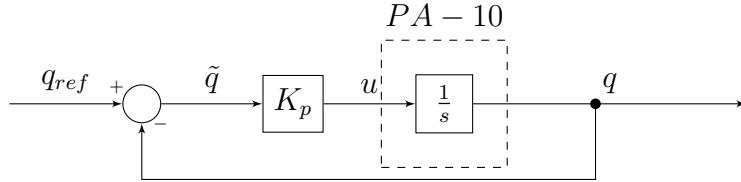
4.2.1 Vodenje v notranjih koordinatah

Krmilnik servo motorjev v vsakem danem trenutku vrača trenuten kot v sklepu. Lastnosti zaprtozančnega sistema so takšne, da lahko servo sistem ene stopnje robota aproksimiramo kot integrator. Naj bo referenčni kot v sklepih označen kot \mathbf{q}_{ref} in naj bo dejanski kot označen kot \mathbf{q} . Razlika med njima je napaka v kotu

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{ref} - \mathbf{q}. \quad (4.15)$$

S preprostim P regulatorjem lahko kote v sklepu robota vodimo s povratno zanko tako, kot je prikazano na shemi 4.2

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{q}}. \quad (4.16)$$



Slika 4.2: Povratna zanka za krmiljenje kota v sklepu

Ojačanje regulatorja je označeno s \mathbf{K}_p in je diagonalna matrika saj ima vsak sklep svoje ojačanje neodvisno od ostalih. S povečevanjem ojačanja regulatorja \mathbf{K} vplivamo na dinamiko odziva [17].

Iz blokovnega diagrama lahko zapišemo prenosno funkcijo sistema $P(s)$ in analiziramo stabilnost:

$$P(s) = \frac{K \frac{1}{s}}{1 + K \frac{1}{s}} = \frac{K}{s + K} \quad (4.17)$$

Pogoj stabilnosti je, da vsi poli sistema ležijo na desni strani s ravnine. V tem primeru je tako pogoj $0 > K > \frac{2}{T_s}$, kjer je T_s vzorčni čas (v našem primeru 0.002).

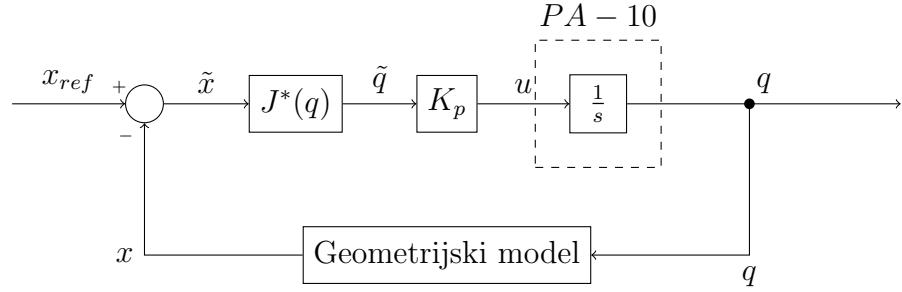
4.2.2 Vodenje v zunanjih koordinatah

Kinematični model robota in problem inverzne kinematike je bil opisan v 2.1. Predstavljen je bil problem inverzne kinematike za redundantni sistem ter pseudoinverz Jacobijeve matrike. Ker je robot PA-10 redundanten bo v nadaljevanju uporabljen generaliziran pseudoinverz Jacobijeve matrike.

Naj bo \mathbf{x}_{ref} vektor referenčne lege vrha robota in naj bo \mathbf{x} trenutna lega vrha robota. Napaka je tako

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x} \quad (4.18)$$

Enačba direktne kinematike nam govori o odnosu med hitrostjo vrha robota



Slika 4.3: Bločna shema krmiljenja referenčne lege vrha robota

ter hitrostjo v sklepih robota

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad (4.19)$$

To enačbo je mogoče razumeti tudi kot zvezo med spremembami položaja vrha ter sklepov robota [18]. Zato je mogoče to enačbo uporabiti za zapis relacije med napako vrha ter potrebnim odmikom v sklepih preko preko enačbe za inverzno kinematiko

$$\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^*(\mathbf{q})\tilde{\mathbf{x}}, \quad (4.20)$$

ki pa velja le za majhne napake.

Z vstavljivijo enačbe (4.20) v (4.16) dobimo P regulator lege vrha robota.

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_p \mathbf{J}^*(\mathbf{q})(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}). \quad (4.21)$$

Avtor v [18] navaja, da se mehanski sistem, ki je voden na ta način, obnaša kot mehanski sistem z n - dimenzionalno vzmetjo v notranjih koordinatah. Togost omenjene vzmeti pa določa ojačanje \mathbf{K}_p .

4.3 Krmiljenje z inverzno dinamiko

Navor proizveden v motorjih robota je linearno odvisen od toka, ki gre v motor. Krmilnik servo motorjev robota PA-10 uporablja P regulator toka za krmiljenje

motorjev v navornem načinu. Problem vodenja robota v zunanjih koordinatah se tako prevede v problem določevanja primernega navora za opravljanje naloge. Navore lahko izračunamo s pomočjo inverznega dinamičnega modela, kar zahteva dobro poznavanje dinamičnih parametrov. Dinamičen model je bil opisan v 2.2.

Vodenje robota v navornem načinu ima to prednost, da lahko podajnost celotnega mehanizma spremojamo. Tako robot ni nujno podajen le na vrhu ob uporabi senzorja sil, temveč po celotni konstrukciji. Tak način vodenja omogoča dobro interakcijo z okoljem ter s človekom.

V nadaljevanju bomo opisali vodenje po zunanjih in po notranjih koordinatah. Enačbo (2.11) zapišemo drugače in sicer brez upoštevanja zunanjih sil na vrh manipulatorja, $\mathbf{h}_o = 0$. Dodatno bomo vpeljali še novo veličino

$$\mathbf{n}(q, \dot{q}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_f(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (4.22)$$

ki združuje vse dinamične vplive razen vpliva vztrajnosti. Sedaj zapišemo dinamičen model robota v skrajšani obliki

$$\boldsymbol{\tau}(\ddot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4.23)$$

4.3.1 Vodenje v notranjih koordinatah

Preden se lotimo vodenja v zunanjih koordinatah je najprej potrebno definirati vodenje robota po notranjih koordinatah. Vhodna veličina je navor zato bomo zapisali

$$\boldsymbol{\tau}(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \mathbf{u}. \quad (4.24)$$

Predpostavimo, da poznamo približen dinamični model robota, t.j. ocenjeno matriko $\hat{\mathbf{B}}$ in vektor $\hat{\mathbf{n}}$. Navor za sledenje referenčnemu pospešku $\ddot{\mathbf{q}}_{ref}$ sedaj izračunamo z

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \hat{\mathbf{n}}(q, \dot{q}). \quad (4.25)$$

Vstavimo (4.25) in (4.23) v (4.24) in dobimo

$$\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \hat{\mathbf{n}}(q, \dot{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{q}). \quad (4.26)$$

Če predpostavimo, da poznamo natančen model, velja $\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{B}$ in $\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{n}$ in lahko zapišemo

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ref} = \ddot{\mathbf{q}}. \quad (4.27)$$

Enačba nam pravi, da v kolikor poznamo natančen dinamičen model, bo vodenje (4.25) zagotovilo želeno gibanje robota [18]. Ker pa dinamičnih parametrov robota v praksni nikoli ne poznamo dovolj natančno, (4.27) ne velja in se pojavi napaka v poziciji sklepov. Zato je smiselno krmilnemu signalu dodati še regulacijo hitrosti ter pozicije in definiramo krmilne pospeške $\ddot{\mathbf{q}}_u$ kot

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_{ref} - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_{ref} - \dot{\mathbf{q}}). \quad (4.28)$$

in vstavimo $\ddot{\mathbf{q}}_u$ v enačbo (4.25) namesto $\ddot{\mathbf{q}}_{ref}$. Končna enačba za vodenje preko inverzne dinamike je tako

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_{ref} + \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_{ref} - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{q}}_{ref} - \dot{\mathbf{q}})) + \hat{\mathbf{n}}(q, \dot{q}). \quad (4.29)$$

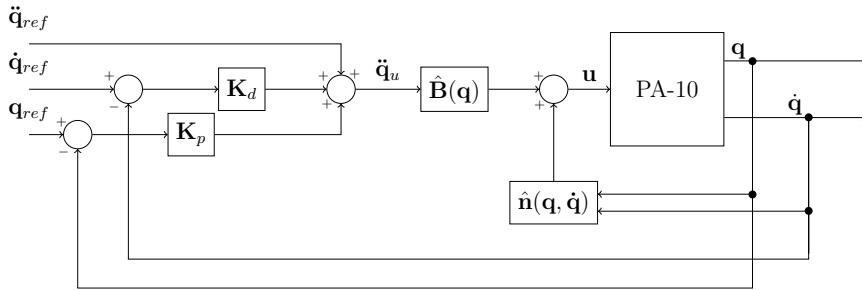
Če sedaj primerjamo $\ddot{\mathbf{q}}_u$ z dejanskim pospeškom v sklepih lahko zapišemo dinamiko signala napake, kot

$$\ddot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K}_d\dot{\tilde{\mathbf{q}}} + \mathbf{K}_p\tilde{\mathbf{q}} = 0. \quad (4.30)$$

Enačbo lahko prevedemo v Laplace-ov prostor

$$s^2 + \mathbf{K}_d s + \mathbf{K}_p = 0 \quad (4.31)$$

in opazimo, da je to prenosna funkcija drugega reda. Sistem bo asimptotično stabilen, če sta \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_d pozitivno definitni. Nesklopljenost sistema dobimo tako, da sta matriki diagonalni. Diagonalne člene zapišemo v obliki $\mathbf{K}_{p_{ii}} = \omega^2 n_{ii}$ in $\mathbf{K}_{d_{ii}} = 2\xi_i \omega_{n_{ii}}$ [18], kjer je ω lastna frekvenca in ξ dušenje sistema drugega reda. Shema takega vodenja je prikazana na sliki 4.4.



Slika 4.4: Bločna shema vodenja po notranjih koordinatah preko inverzne dinamike.

4.3.2 Vodenje v zunanjih koordinatah

V 4.2.2 smo robota vodili po hitrostih v sklepih in je bilo zato potrebno definirati tudi hitrost vrha robota. Pri vodenju preko inverzne dinamike pa smo pokazali, da je potrebno definirati ustrezne pospeške. Tako je sedaj potrebno izpeljali takšen $\ddot{\mathbf{q}}_u$, da bo robot sledil referenčnim pospeškom v zunanjih koordinatah. Z upoštevanjem relacije med hitrostmi v sklepih in hitrostmi na vrhu robota

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad (4.32)$$

in njenega odvoda

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}. \quad (4.33)$$

lahko definiramo krmilni signal

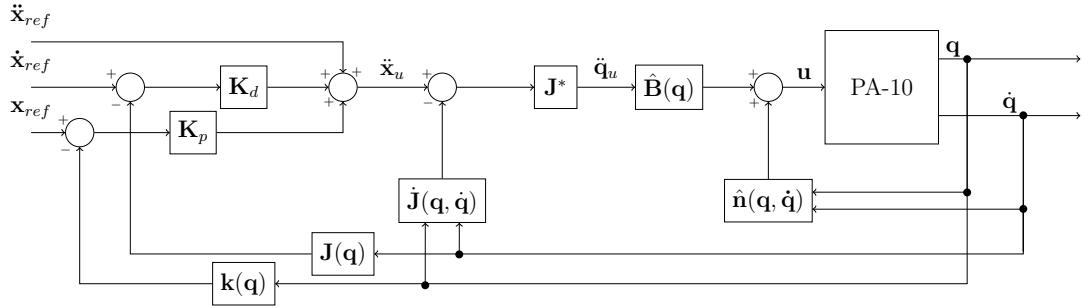
$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \mathbf{J}^*(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{x}}_u - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \quad (4.34)$$

Sedaj lahko definiramo regulator v zunanjih koordinatah $\ddot{\mathbf{x}}_u$, ki bo dajal take pospeške v sklepih, da bo vrh robota sledil referenčni legi. Avtor v [1] predлага sledeč regulator pospeškov

$$\ddot{\mathbf{x}}_u = \ddot{\mathbf{x}}_{ref} + \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} \quad (4.35)$$

Z vstavljivijo (4.35) v (4.34) dobimo končno enačbo pospeškov v sklepih

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \mathbf{J}^*(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{x}}_{ref} + \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}). \quad (4.36)$$



Slika 4.5: Bločna shema vodenja po zunanjih koordinatah preko inverzne dinamike.

Regulator zagotavlja konvergenco signala napake proti nič v stacionarnem stanju

$$\mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} = 0. \quad (4.37)$$

Shema takega vodenja je prikazana na sliki 4.5.

4.4 Interakcija z okoljem

Robotski mehanizmi so v večini primerov med opravljanjem nalog v kontaktu z okolico. Vendar pa obstaja veliko takih nalog, kjer nas sila med okolico in robotom ne zanima, npr. pobiranje in odlaganje. So pa primeri nalog, ko so interakcijske sile ključnega pomena. Primer take naloge je recimo brušenje površine ali pa interakcija s človekom. V nadaljevanju tega poglavja bomo opisali dva načina vodenja robota v kontaktu z okolico, admitančno ter impedančno.

4.4.1 Admitančno vodenje

Robotski mehanizem PA-10 je industrijski robot s segmenti iz pretežno litega železa. Segmenti imajo relativno veliko maso, sklepi pa relativno visoko trenje. Lahko predpostavimo, da ima manipulator veliko lastno impedanco. Pojem mehanske impedance izvira iz analogije električne impedance. Iz tega izraza izvira tudi izraz za admitančno vodenje robota. Tako vodenje je uporabno predvsem

ob interakciji s človekom, saj se celoten robot giblje v skladu z gibanjem človeške roke [10]. Predstavlja pa razmerje med silo (F) in hitrostjo (v).

$$Z(s) = \frac{F}{v} = ms + b + \frac{k}{s} \quad (4.38)$$

ozziroma razmerje med silo in pozicijo (x)

$$Z(s) = \frac{F}{x} = ms^2 + bs + k, \quad (4.39)$$

kjer je m masa, b viskozno dušenje, k togost [10].

Za admitančno vodenje je potrebno upoštevati še podatek o silah in navorih, ki delujejo na vrhu robota. Izmerjene sile in navori bodo označene s \mathbf{h}_e , referenčne sile in navori pa z \mathbf{h}_{ref} . Napaka sile je tako definirana kot:

$$\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_{ref} - \mathbf{h}_e. \quad (4.40)$$

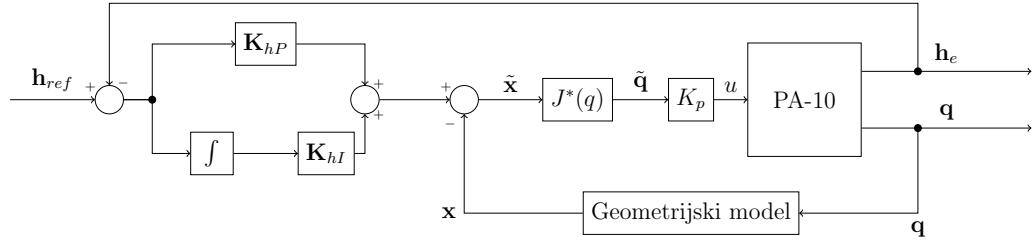
Sila kot rezultat delovanja robota na okolico je odvisna od hitrosti oz. pozicije vrha robota. Zato lahko napako sile dodamo v regulator lege (4.21) tako, da definiramo referenčno pozicijo v odvisnosti od sile

$$\mathbf{x}_{ref} = \mathbf{K}_{hP}\tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{K}_{hI} \int_0^t \tilde{\mathbf{h}} d\xi. \quad (4.41)$$

Z vstavitvijo enačbe (4.41) v (4.21) je mogoče zapisati celotno regulacijsko enačbo za vodenje robota v zunanjih koordinatah z upoštevanjem delovanja zunanjih sil na vrh robota.

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_p \mathbf{J}^* (\mathbf{K}_{hP}\tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{K}_{hI} \int_0^t \tilde{\mathbf{h}} d\xi - \mathbf{x}) \quad (4.42)$$

Dobili smo PI regulator sile interakcije. Čeprav je bilo pri definiciji mehanske impedance definirano, da je to razmerje med silo ter hitrostjo, se raje uporablja razmerje med silo ter pozicijo. Meritve sile so podvržene šumu, integrator pa deluje kot nizkopasovni filter. Shema vodenja je prikazana na sliki 4.6.



Slika 4.6: Bločna shema admitančnega vodenja.

Admitančno vodenje se uporablja takrat, ko lahko robota vodimo le hitrostno ali pozicijsko in želimo vplivati na okolico z neko silo. Silo interakcije pa je določimo z modelom okolja. Kontakt si lahko predstavljamo kot interakcijo med togim robotom in podajnim okoljem.

4.4.2 Impedančno vodenje

Pri izpeljavi vodenja lege robota z inverzno dinamiko smo predpostavili, da so sile interakcije \mathbf{h}_o enake nič. Ker pa to v primeru, da je robot v kontaktu z okoljem ni res, je potrebno pogledati kaj se zgodi takrat, ko te sile delujejo na robota. Vrh robota bo z neko silo deloval na okolje, ki pa jo lahko s senzorjem na vrhu robota oz. med prijemalom in vrhom, izmerimo. Vzemimo spet dinamičen model robota, ki ga vodimo preko reguliranega pospeška $\ddot{\mathbf{x}}_u$ in dodamo silo interakcije

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \hat{\mathbf{n}}(q, \dot{q}) + \mathbf{J}^T \mathbf{h}_o. \quad (4.43)$$

Vidimo, da bodo sedaj navori v sklepi različni od izračunanih preko inverznega dinamičnega modela in posledično bo med želeno pozicijo vrha robota in dejansko pozicijo vrha robota nastala napaka.

Za izhodišče vzamemo enačbo (4.37) in (4.43) ter zapišemo dinamiko napake z upoštevanjem delovanja zunanjih sil

$$\ddot{\mathbf{x}}_{ref} + \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\mathbf{x}}} + \mathbf{K}_p \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{B}_A^{-1} \mathbf{h}_o, \quad (4.44)$$

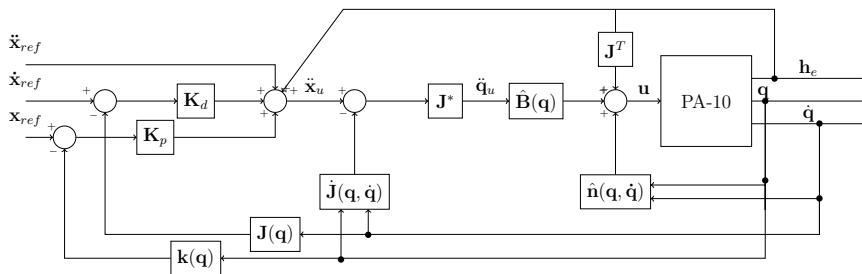
kjer je B_A analitična vztrajnostna matrika.

Če želimo napako kompenzirati je potrebno v regulator vključiti še podatek o izmerjenih silah na vrhu robota (\mathbf{h}_e). Na ta način dosežemo to, da se vrh robota obnaša kot neskončno tog sistem glede na vpliv zunanjih sil [1]. To pomeni, da će vodimo robota pozicijsko in pritisnemo na njegov vrh, bo kompenziral nastalo napako.

Zapišemo sedaj celotno enačbo, ki opisuje navore v sklepih pri impedančnem vodenju

$$\mathbf{u} = \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{q})\mathbf{J}^*(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{x}}_{ref} + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_p\mathbf{x} - \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_e) + \hat{\mathbf{n}}(q, \dot{q}) + \mathbf{J}^T\mathbf{h}_o. \quad (4.45)$$

Shema takega vodenja je prikazana na sliki 4.7.



Slika 4.7:

Impedančno vodenje se uporablja takrat, ko lahko robota vodimo preko vhodnih navorov. Z razliko od admitančnega vodenja, si lahko kontakt predstavljamo kot interakcijo med zelo togo okolico in podajnim robotom. Podajnost robota pa je odvisna od parametrov vodenja ($\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_d$) in kompenzacije sile.

5 Implementacija

Poznavanje teoretičnih osnov za vodenje robotov nam omogoča realizacijo krmiljenja na način, ki je najbolj primeren zadani nalogi. V prejšnjem poglavju so bile te osnove opisane in prikazane so bile blokovne sheme vodenja. Iz tistih shem, je videti, da je za implementacijo različnih vodenj potrebno poznati različno količino parametrov. Hitrostno vodenje je enostavnejše, saj je potrebno določiti le parameter ojačanj regulatorja. Pri navornem vodenju robota pa določitev parametrov še zdaleč ni enostaven problem saj je potrebno poznati dinamične parametre samega robota.

V nadaljevanju tega poglavja, bo opisana implementacija algoritmov vodenja, ki so bili opisani v poglavju 4. Implementacija vodenj je hkrati tudi preizkus s katerim se bo ovrednotilo namensko narejen strežnik.

Vodenje bo je bilo realizirano z uporabo strežnika opisanega v poglavju 3. Za komunikacijo s strežnikom je bilo narejeno visoko nivojsko vodenje v programske paketu MATLAB® SIMULINK®. Razlogi za izbiro omenjenega programskega paketa so bile dobre predhodne izkušnje ter dobro poznavanje delovanja programa s strani avtorjev. SIMULINK® bloki, ki smo jih uporabili, bodo v nadaljevanju prikazani na slikah in podrobneje opisani v dodatku B.

Poizkusi za hitrostno in navorno vodenje so potekali z enakimi referenčnimi signalni, da se lahko med sabo primerja rezultate. Za oba načina vodenja smo opravili tri poizkuse z različnimi referenčnimi signalni:

1. signal stopnice v notranjih koordinatah,

2. sinusni signal z naraščajočo frekvenco v notranjih koordinatah,
3. zarisovanje kroga v zunanjih koordinatah.

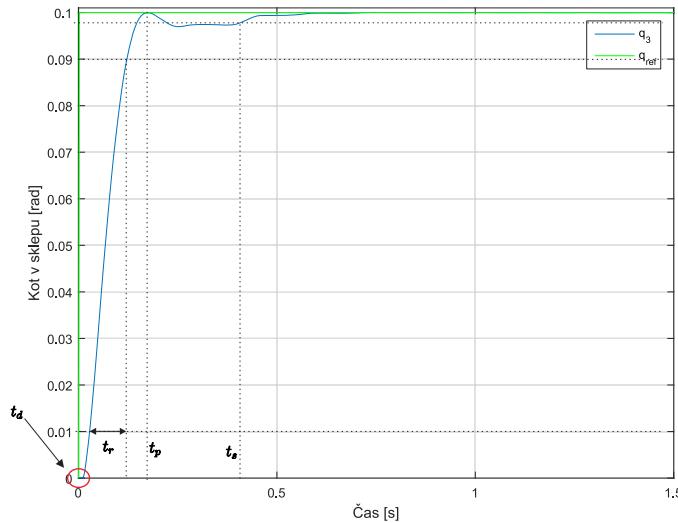
Stopničasto referenco smo izbrali, ker je odziv nanjo dober pokazatelj kako se sistem odziva na hitro spremembo. Preden smo nastavili ojačanja smo zdali pogoj, da odziv ne sme imeti prenihaja oz. naj bo le-ta najmanjši možen. Odziv smo ovrednotili na podlagi t.i. inženirskih pokazateljev [19], ki opisujejo učinkovitost delovanja regulacijskega sistema:

- mrtvi čas (t_m), sistem še ne odzove na krmiljenje,
- čas vzpona (t_r), regulirana veličina naraste iz 10% do 90% končne vrednosti,
- čas maksimalnega prevzpona (t_p), odziv doseže maksimalno vrednost,
- maksimalni prevzpon (M_p),
- umiritveni čas (t_s), odziv doseže in ostane znotraj 2% referenčne vrednosti.

Sinusni signal z naraščajočo frekvenco smo izbrali zato, ker nam pokaže kako je napaka odvisna od hitrosti spremenjanja reference. Predpostavka je bila, da višja kot je frekvenca, večja je napaka.

Zarisovanje kroga z vrhom robota smo izbrali zato, da vodimo vrh robota po prostoru naloge in vidimo, kako dobro deluje sledenje v zunanjih koordinatah. Predpostavka je bila, da z dobrim regulatorjem lahko dosežemo dobro sledenje spremenjajoči se referenci.

Ovrednotili smo tudi vodenje robota v kontaktu z okolico tako pri hitrostnem (admitančnem) kot tudi pri navornem (impedančnem) vodenju. V kontaktu z okolico je bil referenčni signal oblikovan tako, daje robot deloval z želeno silo na podlago. Preizkuse smo opravili na referencah dveh različnih oblik in sicer stopničaste in sinusne. Za obe različni referenci smo opravili tri različne poizkuse. Pri stopničastem signalu smo spremenjali amplitudo, pri sinusnem pa frekvenco.



Slika 5.1: Odziv sklepa na signal stopnice.

5.1 Hitrostno krmiljenje

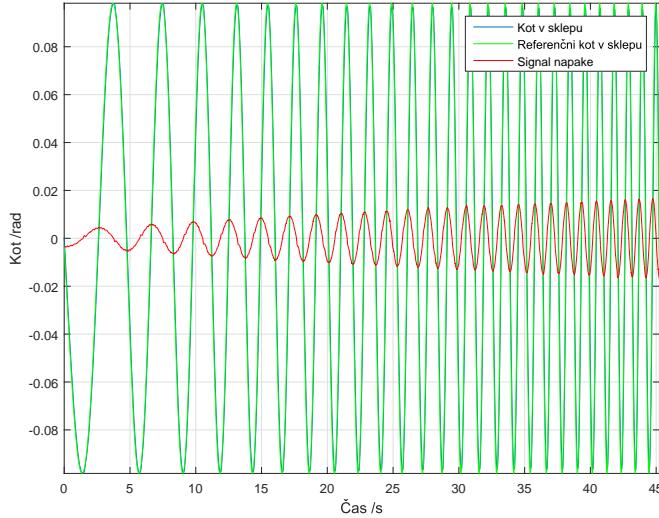
Implementacija hitrostnega krmiljenja robota je potekala postopoma. Najprej smo realizirali pozicijsko vodenje sklepov nato pa vodenje v zunanjih koordinatah.

Odziv tretjega sklepa na referenčni signal stopnice je viden na sliki 5.1. Iz pridobljenih podatkov podatkov lahko izmerimo prej definirane inženirske pokazatelje.

t_m	=	0,008 s
t_r	=	0,094 s
t_p	=	0,166 s
M_p	=	0,0999 rad
t_s	=	0,414 s

Tabela 5.1: Inženerski pokazatelji na odziv stopničaste reference pri hitrostnem vodenju.

Na grafu je videti, da krmilni signal doseže referenčno vrednost relativno hitro nato pa se za kratek čas od nje spet oddali. To je posledica dinamičnih lastnosti

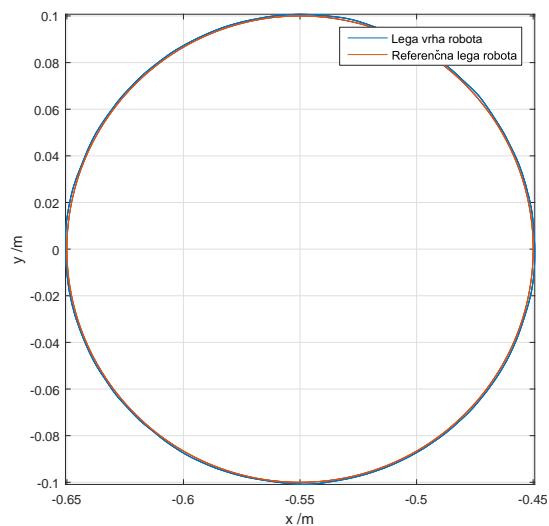
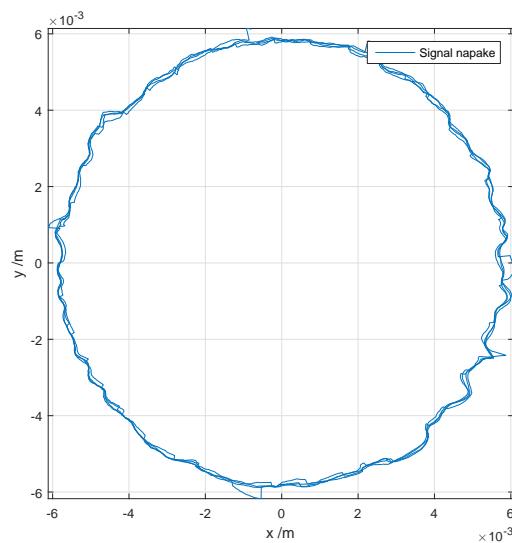


Slika 5.2: Odziv sklepa na signal sinusne oblike.

robova in PI regulatorja. Ko se sklep približa referenčni legi začne motor zavirati in zaradi vztrajnosti se povečuje I člen regulatorja. Hitrost pada na vrednost nič, vendar pa je I člen regulatorja še vedno visok in posledično se sklep malo zavrti stran od reference. Pomembno je opozoriti tudi na mrtvi čas, ki je 0.008 s. To pomeni, da je v komunikaciji med visokonivojskim in nizkonivojskim krmilnikom zamika za 4 vzorce. V tem načinu vodenja to sicer ne predstavlja težav, jih pa lahko predstavlja pri vodenju s silo.

Graf na sliki 5.2 prikazuje odziv tretjega sklepa na referenčni signal sinusne oblike. Referenčnemu signalu je frekvenca naraščala od 0.1 Hz do 1 Hz v časovnem intervalu 45 sekund. Na ta način se je preverilo, kako dobro še sledi referenci, ko se ta hitreje spreminja. Z rdečo obarvan signal napake prikazuje, da je sledenje s povečevanjem hitrosti slabše.

Tretji poizkus vodenja robota je temeljil na vodenju v zunanjih koordinatah. Referenčna trajektorija je bila v obliki kroga na x in y ravnini. Graf je na sliki 5.3. Na grafu je videti, da vrh robota dobro sledi referenci. Graf 5.4 prikazuje potek signala napake. Največja napaka v sledenju je bila 0.006 m.

Slika 5.3: Sledenje referenci v obliki kroga na x in y ravnini

Slika 5.4: Signal napake pri sledenju krožnici



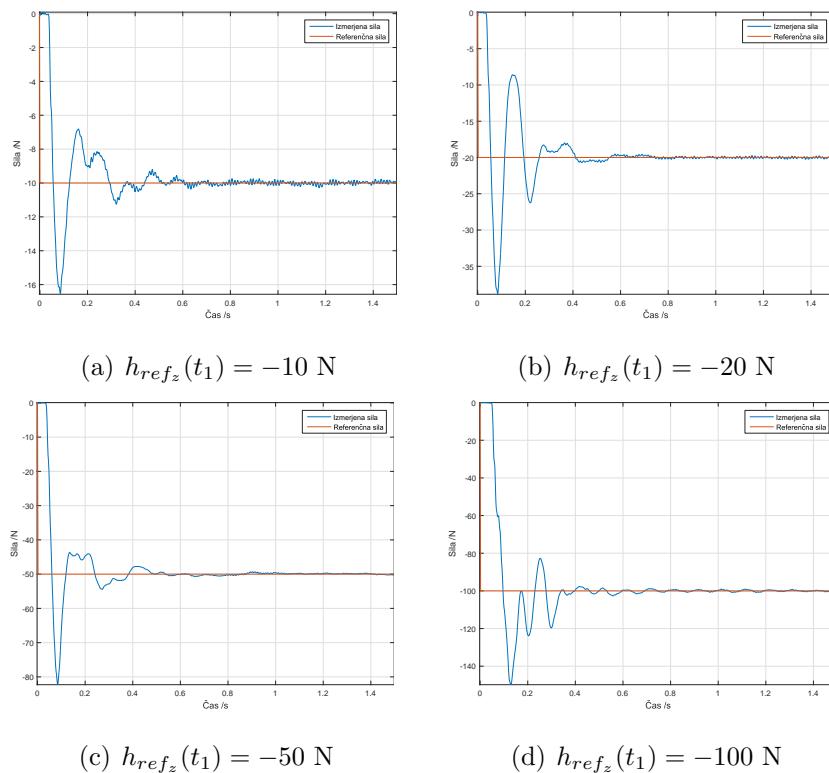
Slika 5.5: Vrh robota PA-10 s pritrjenim senzorjem sil in navorov JR3.

5.1.1 Admitančno vodenje

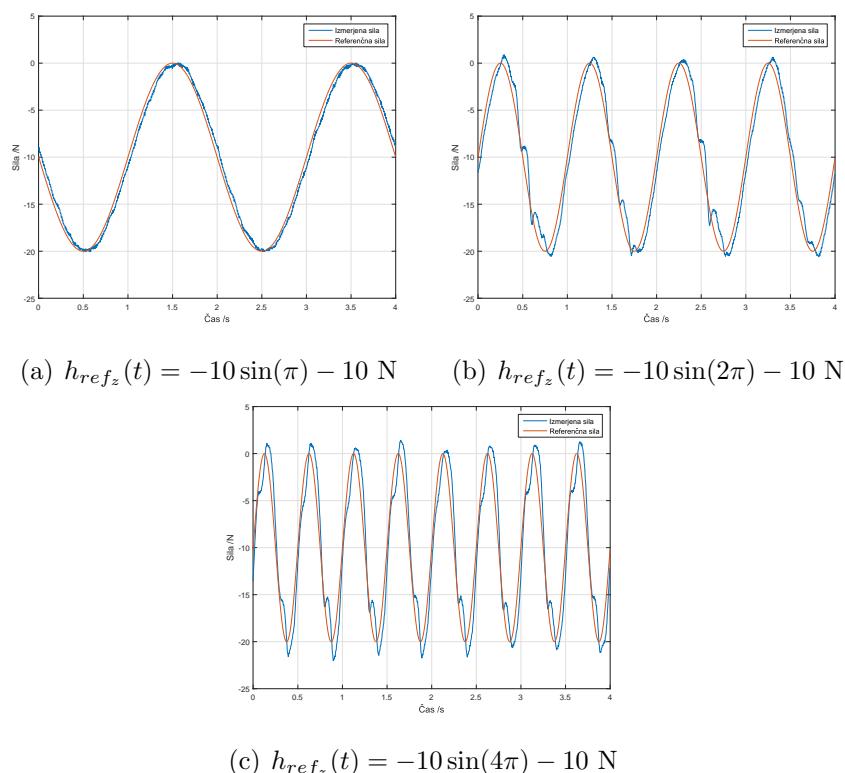
Admitančno vodenje smo implementirali ter preverili delovanje preko sledenja referenčni sili. Robot (slika 5.5) je pritiskal ob leseno površino, ki je bila zaradi varnosti postavljena na tršo spužvo. Na ta način smo dosegli to, da je robot pritiskal na relativno tog objekt, vendar pa bi v primeru premočnega potiska spužva ublažila udarce.

Sledenje stopnici prikazujejo grafi na sliki 5.6. Vidimo lahko, da amplituda prenihaja ostaja v podobnem sorazmerju z referenco in se giblje okoli 50% reference. Velik prenihaj je posledica uporabe integratorja. Se pa z večanjem amplitude reference zmanjšuje umiritveni čas. To pa zato, ker so oscilacije v ustaljenem stanju približno enake amplitude in posledično pri večjih referencah predstavlja manjši odstotek.

Sledenje sinusni referenci prikazuje slika 5.7. Na grafih je opaziti, da s povečevanjem frekvence se povečuje tudi napaka. Ta pojav smo opazili tudi pri hitrostnem vodenju in je pričakovano, da je tudi tukaj prisoten.



Slika 5.6: Odziv robota na stopničast signal sile.



Slika 5.7: Odziv robota na stopničast signal sile.

5.2 Navorno krmiljenje

Za implementacijo navornega vodenja je bilo najprej potrebno definirati dinamične parametre. Robot PA-10 je precej razširjen in so nekateri raziskovalci te parametre že identificirali. Podatke o masi robota smo povzeli iz [6, 5, 7, 8]. Parametre za model trenja smo identificirali sami.

5.2.1 Kompenzacija trenja

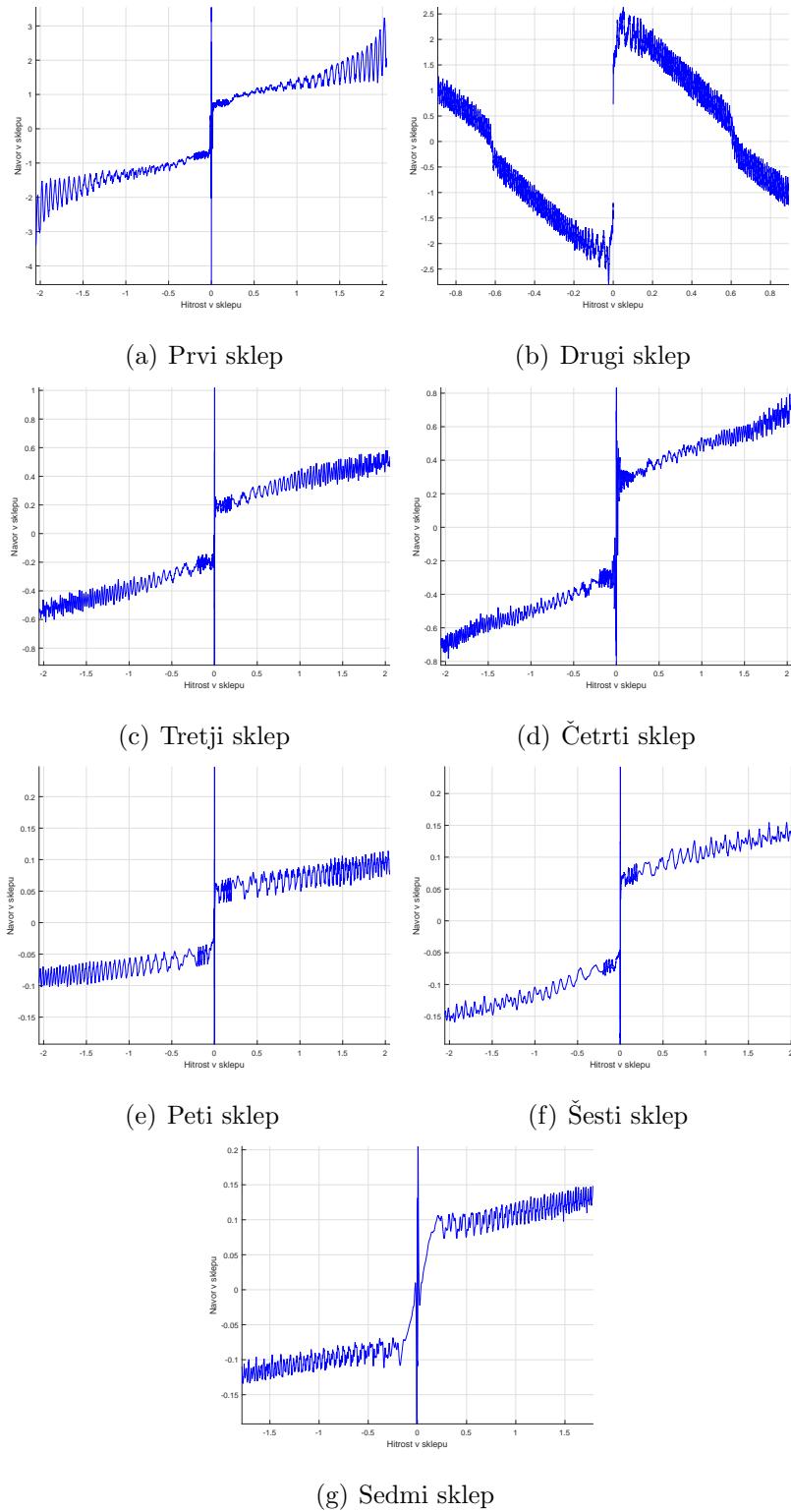
Za dobro navorno vodenje je nujno potrebna kompenzacija trenja. Avtorji v [20] predlagajo izboljšan Stribeckov model. Navor kot posledica trenja je tako aproksimiran s funkcijo

$$\tau(\dot{q}) = f_1\dot{q} + f_2\text{sign}(\dot{q}) - f_3\text{sign}(\dot{q})e^{-\frac{|\dot{q}|}{f_4}} - f_5\text{sign}(\dot{q})e^{-\frac{1}{f_6}}. \quad (5.1)$$

Parametre $f_1 \dots f_6$ smo identificirali z eksperimentom. Ker krmilnik robota v vsakem trenutku vrača navor, ki ga daje na motorje, smo robota vodili hitrostno in opazovali, kakšen navor proizvaja v sklepih. Pri tem eksperimentu smo morali robota postaviti v tako konfiguracijo, da gravitacija ni imela vpliv na navor v sklepih. Slika 5.8 prikazuje navore v odvisnosti od hitrosti. Iz pridobljenih podatkov smo s pomočjo MATLAB® funkcije za optimizacijo identificirali parametre Stribeckovega modela za vsak sklep razen za drugega. Ker je bila baza robota pritrjena na tla nismo morali postaviti robota v tako konfiguracijo, da gravitacija ne bi imela vpliva na navor proizveden v drugem sklepu, kar je tudi vidno na grafu 5.8(b). Za ta sklep smo parametre določili arbitrarno. Identificirani parametri so zapisani v tabeli 5.2.1.

5.2.2 Sledenje referenci

Za izvedbo navornega vodenja robota smo uporabili dinamični model, ki ga je zgradil [8]. Dodatno smo uporabili identificirane parametre trenja za kompenzacijo trenja. Izvedba vodenja je potekala postopoma. Najprej se je preverilo

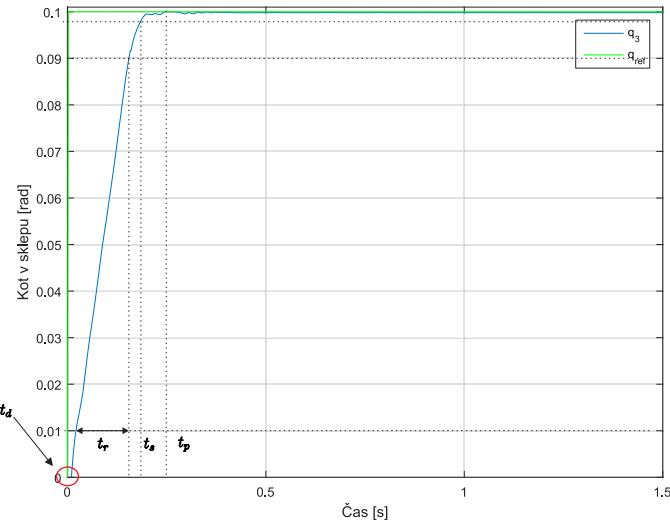


Slika 5.8: Merjenje vpliva trenja.

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Sklep 1	0,68785	0,6794	0,70838	0,019749	0,0056777	0,0061335
Sklep 3	0,25268	0,15898	-0,026137	0,13786	0,70758	0,33553
Sklep 4	0,18573	0,19	-0,11721	0,0074194	-9,8628	0,051232
Sklep 5	0,034636	0,047991	0,045469	0,0089748	0,24096	0,30666
Sklep 6	0,0537	0,0637	-0,0363	0,0023	0,1476	0,3367
Sklep 7	0,0393	0,0457	-0,0053	0,0438	0,1647	0,6124

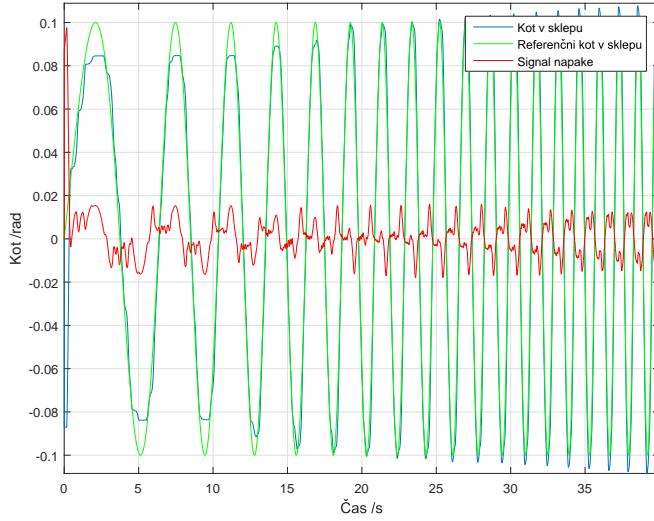
Tabela 5.2: Identificirani parametri trenja

delovanje modela tako, da se je robota vodilo le s kompenzacijo gravitacije. Predpostavka je bila, da v kolikor je vpliv gravitacije dobro kompenziran, bo robot ohranjal konfiguracijo v katerikoli legi. Ko smo to dosegli, so sledili poizkusi kot pri hitrostnem vodenju.



Slika 5.9: Odziv sklepa na signal stopnice.

Slika 5.9 prikazuje graf odziva tretjega sklepa na stopničasto referenco. Z razliko od hitrostnega vodenja v tem primeru regulirana veličina ni dosegla referenčne vrednosti. Razlog za tem je ne tako dobro kompenzirano trenje. Krmilnik



Slika 5.10: Odziv sklepa na signal sinusne oblike.

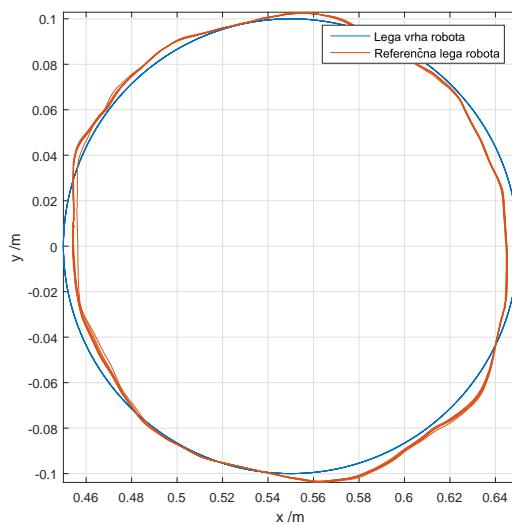
sicer daje nek navor na sklep, vendar je ta premajhen da bi premagal silo trenja. Inženirski pokazatelji vodenja za odziv na stopnico so zapisani v tabeli 5.3.

t_m	=	0,008 s
t_r	=	0,134 s
t_p	=	0,25 s
M_p	=	0,1001 rad
t_s	=	0,186 s

Tabela 5.3: Inženierski pokazatelji na odziv stopničaste reference pri navornem vodenju.

Graf na sliki 5.2 prikazuje odziv tretjega sklepa na referenčni signal sinusne oblike. Referenčni signal je bil enak kot pri hitrostnem vodenju. Če primerjamo ta graf z grafom hitrostnega vodenja opazimo, da tukaj napaka s višjo frekvenco ne narašča ampak le spreminja obliko. Razlog za tem je uporaba prvega in drugega odvoda reference za tvorjenje krmilnega signala.

Navorno vodenje robota po trajektoriji v zunanjih koordinatah po krožnici ni bilo tako uspešno kakor pri hitrostnem vodenju. Napaka je pri sledenju bila mnogo večja kot pri hitrostnem vodenju. Slika 5.11 prikazuje graf sledenja, slika

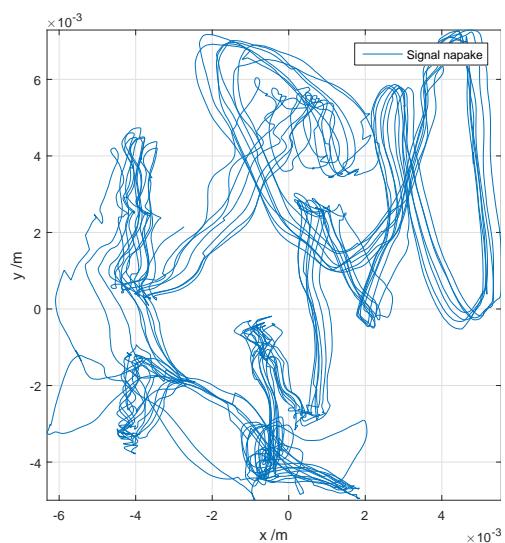


Slika 5.11: Sledenje referenci v obliki kroga na x in y ravnini

5.12 pa napako sledenja. Videti je, da sledenje ni tako uspešno. Iz grafa lahko vidimo, da je največja napaka malo več kot 6 mm

Problematika navornega krmiljenja je, da je pogojena z dobriem poznavanjem dinamičnega modela. Vsako odstopanje modela od fizičnega robota se pokaže kot napaka v sledenju. Za boljše sledenje bi bilo potrebno dinamične parametre boljše identificirati.

5.2.3 Impedančno vodenje



Slika 5.12: Signal napake pri sledenju krožnici

6 Zaključek

Literatura

- [1] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani in G. Oriolo, *Robotics, Modelling, Planning and Control*. London: Springer, 2009.
- [2] Mitsubishi Heavy Industries, *Portable General Purpose Intelligent Arm - Operating Manual*, rev. 1 izd.
- [3] M. H. I. Ltd., “Mitsubishi clean room robot,” *Seminarska naloga*, 2003.
- [4] J. J. Craig, *Introduction to Robotics*. Z.D.A.: Pearson Education International, 2005.
- [5] N. D. Vuong in M. H. J. Ang, “Dynamic model identification for industrial robots,” *Acta Polytechnica Hungarica*, 2009.
- [6] R. van der Aalst, M. H. J. Ang in H. Nijmeijer, “Dynamic identification of a mitsubishi pa-10 robotic manipulator,” *ICAR*, 1999.
- [7] R. Jamisola, M. J. Ang, T. M. Lim, O. Khatib in S. Y. Lim, “Dynamics identification and control of an industrial robot,” *ICAR*, 1999.
- [8] T. Petrič in M. Munih, “Kompenzacija trenja in gravitacije na robotu mitsubishi pa-10,” *Seminarska naloga*, 2010.
- [9] J. Lenarčič in T. Bajd, *Robotski mehanizmi*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI, 2003.
- [10] M. Mihelj, *Vodenje robotov*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI, 2011.

- [11] D. Miljavec in P. Jereb, *Električni stroji: temeljna znanja*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI, 2008.
- [12] Contemporary Controls, *ARCNET Tutorial*.
- [13] I. JR3, “JR3, Installation manual for force - torque sensors with internal electronics.” Dosegljivo: <http://www.jr3.com/product-manuals.html>. [Dostopano: 6. 17. 2015].
- [14] I. JR3, “JR3, DPS-based force sensor receivers, software and installation manual.” Dosegljivo: <http://www.jr3.com/product-manuals.html>. [Dostopano: 6. 17. 2015].
- [15] R. V. Aroca in G. Cauri, “A real time operating systems (rtos) comparison,” *XXIX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, 2009.
- [16] D. Omrčen in B. Nemec, “Meritev gibanja kolena z industrijskim robotom - avtomatska kompenzacija gravitacije prijemala,” *Strojnički vestnik*, str. 87 – 97, 2002.
- [17] B. Zupančič, *Teorija regulacij*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI.
- [18] M. Mihelj, T. Bajd in M. Munih, *Vodenje robotov*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI, 2011.
- [19] B. Zupančič, *Vodenje sistemov*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Založba FE in FRI.
- [20] N. A. Bompos, P. K. Artermiadis, A. S. Oikonomopoulos in K. J. Kyriakopoulos, “Modeling, full identification and control of the mitsubishi pa-10 robot arm,” *Proceedings of IEEE/ASME International conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2007.

Dodatek

A Dodatek 1

B Dodatek 2

C Dodatek 3

There is no spoon.