



61000 Ljubljana  
Tržaška 25  
Telefon (061) 1768 411  
Fax: (061) 264 990

Št.: M-669

Datum: 30.3.1995

**Roman KAMNIK**, dipl.ing.

LJUBLJANA

Odbor za pedagoško delo Fakultete za elektrotehniko in računalništvo Univerze v Ljubljani izdaja naslednjo magistrsko nalogo iz EL

Naslov naloge: **ADAPTIVNO KRMILJENJE SILE ROBOTSKEGA DOTIKA**

Tematika naloge:

Industrijski robot s petimi rotacijskimi prostostnimi stopnjami prilagodite za eksperimentalno laboratorijsko uporabo. Izdelajte direktni in inverzni kinematični model robota in ga implementirajte v robotskem krmilniku osnovanem na osebnem računalniku. Predlagajte shemo adaptivnega impedančnega krmiljenja za regulacijo sile robotskega dotika. Obnašanje krmilnega postopka preverite z računalniško simulacijo krmiljenja ene prostostne stopnje robotskega mehanizma. Rezultate simulacije primerjajte z rezultati implementacije krmilne sheme na industrijskem robotu.

Mentor:

prof.dr.Tadej BAJD

Dekan:

prof.dr.Tomaž SLIVNIK

Komentor:

prof.dr.Drago MATKO



mod - 638



D42927 / 8.5.96

**UNIVERZA V LJUBLJANI**  
**FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO IN RAČUNALNIŠTVO**

# **MAGISTRSKO DELO**

**ROMAN KAMNIK**

**Ljubljana, junij 1995**

## Povzetek

Pričujoče delo obravnava problem vodenja robotov v dotiku z okoljem. Za industrijski robot ASEA IRb 6 s petimi prostostnimi stopnjami gibanja je zasnovan algoritem krmiljenja sile. Uporabljen je pristop, ki temelji na impedančnem vodenju robota. Krmilnik takšne vrste je sestavljen iz dveh podsklopov, notranjega pozicijskega regulatorja in zunanjega regulatorja sile. Naloga zunanjega regulatorja sile je generirati referenčno pozicijsko trajektorijo notranjemu pozicijskemu regulatorju glede na sile v dotiku. Povratna informacija o velikosti sile dotika je zagotovljena s štirosonim senzorjem sile, nameščenim v zapestju robota.

Delo je razdeljeno na dva dela. Prvi podaja prilagoditev strojne opreme industrijskega robotskega krmilnika, ki ne omogoča vodenja robota v zunanjih koordinatah. Predelava krmilnika je obsegala gradnjo dela strojne opreme ter načrtanje kinematičnih algoritmov vodenja v zunanjih koordinatah. Z novim krmilnikom, zgrajenim na bazi osebnega računalnika, robot ASEA po funkcionalnih sposobnostih dosega sodobne industrijske robote. Poleg tega je robot zaradi odprte programske arhitekture primeren za načrtovanje in študij novih krmilnih algoritmov.

V drugem delu magistrske naloge je predstavljen razvoj krmilne sheme vodenja robota v dotiku z okoljem. Krmiljenje sile temelji na krmiljenju mehanske impedance, ki jo vrh robota izraža glede na okolje. Impedančni regulator je zasnovan kot adaptivni regulator, načrtan s pomočjo direktne modelno referenčne adaptivne regulacije. Izhod, referenčna trajektorija gibanja, je generiran glede na razliko predpisanega in dejanskega odziva sile po posameznih oseh Kartezijevega prostora. Podani so simulirani odzivi krmilne sheme pri simulaciji ene prostostne stopnje ter dejanski odzivi pri implementaciji na robotu.



## ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju prof.dr. Tadeju Bajdu za neprecenljivo pomoč pri podiplomskem študiju in nastajanju tega dela. S svojimi nasveti in idejami me je tri leta usmerjal in vzpodbujal. Ob posvetih, ki so večkrat potekali ob kavi, je hkrati ustvarjal sproščeno delovno okolje v katerem sem se zelo lepo počutil.

Zahvaljujem se akademiku prof.dr. Alojzu Kralju, predstojniku Laboratorija za robotiko in biomedicinsko tehniko, ki me je sprejel v raziskovalno skupino, mi pomagal in z nakupom opreme omogočil nastanek tega dela.

Posebej se zahvaljujem komentorju prof.dr. Dragu Matku da me je uvedel v svet adaptivne regulacije in mi bil ob problemih vedno pripravljen priskočiti na pomoč.

Zahvaljujem se kolegom iz Laboratorija za robotiko in biomedicinsko tehniko. Bili smo kolektiv v kakršnem sem si vedno želel delati. Mag. Tomaž Karčnik, mag. Jure Zupančič, Zlato Matjačič, dipl.ing., dr. Zdravko Balorda in docent dr. Marko Munih so bili moji sodelavci in svetovalci, ki so mi nesebično pomagali premagovati, za mene včasih nerešljive tehnične probleme. Janez Šega, ing. mi je pomagal pri izgradnji strojne opreme.

Hvala Gordani za prijateljstvo, potrpežljivost in odrekanja tekom mojega študija.

Hvala tudi staršem in bratu Matjažu, ki so verjeli vame, mi po svojih močeh pomagali in me nenazadnje tudi finančno podprli.

# Vsebina

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Prilagoditev robota ASEA IRb 6 za eksperimentalne namene</b>	<b>9</b>
2.1	Robotski PC krmilnik	10
2.2	Pretvorba signalov resolverjev v signale kodirnikov	13
2.3	Kinematični model robota	18
2.3.1	Direktna kinematika	18
2.3.2	Inverzna kinematika	27
2.4	Sledenje trajektorije v prostoru	33
<b>3</b>	<b>Krmiljenje robota ASEA IRb 6 v dotiku z okoljem</b>	<b>37</b>
3.1	Zasnova robotskega impedančnega krmilnika	37
3.2	Adaptivna krmilna shema	41
<b>4</b>	<b>Simulacija delovanja impedančnega krmilnika</b>	<b>49</b>
4.1	Simulacijska shema	49
4.2	Rezultati simulacije	54
<b>5</b>	<b>Implementacija impedančnega krmilnika na robotu</b>	<b>59</b>
5.1	Impedančno krmiljenje po z osi	61
5.2	Impedančno krmiljenje po oseh $x$ , $y$ in $z$	64
<b>6</b>	<b>Zaključek</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Literatura</b>	<b>73</b>

# 1 Uvod

Glavni delež aplikacij robotov v avtomatizaciji proizvodnih postopkov danes predstavljajo delovne naloge, pri katerih se robot giblje v prostoru kot izoliran sistem z malo ali nič interakcije z okolico. Robotske naloge kot so barvanje, varjenje in manipulacija predmetov so primeri vodenja vrha robota po bolj ali manj kompleksni trajektoriji v prostoru, medtem ko orodje ali manipulirani predmet le redko pride v dotik z okoljem. Tudi kadar takšen dotik nastopi, nastopi brez natančno določene strategije krmiljenja gibanja robota v dotiku.

Robotsko izvajanje mnogih delovnih nalog zahteva primerno vodenje robota tudi v dotiku z okolico. V primerih robotskega vrtanja, brušenja, poliranja, raziglanja, zvijanja, montaže mehanskih delov je potrebno krmiliti gibanje robota glede na sile, ki nastopajo v dotiku. Glede na številnost takšnih delovnih nalog, ki so zanimive za nadaljni razmah robotike, predstavlja razvoj krmiljenja robotov po sili velik izziv v razvoju robotske tehnologije.

Krmiljenje robota v dotiku z okoljem je kompleksna naloga, ki zahteva natančno specifikacijo ciljev naloge, poznavanje strategije generiranja trajektorije gibanja, poznavanje strategije odzivanja na povrate informacije o sili in poziciji ter poznavanje relacije med silo dotika in gibanjem. Potrebno je znanje o nalogi v tolikšni meri, da je možno načrtati algoritem vodenja s stabilnim odzivom tako v dotiku kot pri prostem gibanju.

Začetki razvoja krmiljenja manipulatorjev po sili segajo v 1950-ta leta. Razvoj je šel od preprostih strategij diskretnega odločanja glede na silo dotika, preko pasivnih naprav za zagotavljanje voljnosti vrha manipulatorja do krmilnih zakonov regulacije sile dotika. Predlagani so bili številni algoritmi krmiljenja robotov v dotiku z okoljem. Whitney [1] je podal pregled in primerjavo krmilnih shem različnih avtorjev. Kljub različnim pristopom lahko večino krmilnih shem razvrstimo v dva razreda, v razred eksplicitnega krmiljenja sile in v razred impedančnega krmiljenja.

Eksplisitno krmiljenje sile predstavlja neposredno regulacijo sile v dotiku. Uporabnik definira želeno silo dotika, ki predstavlja referenčno vrednost regulatorju. Razlika med referenčno vrednostjo in dejansko izmerjeno silo je pogrešek sile in ta je preko krmilnega zakona preračunan v potrebne momente v sklepkih robota. Eksplisitno krmiljenje sile je ponavadi uporabljeno skupaj s pozicijskim krmiljenjem v t.i. shemi hibridnega krmiljenja sile in pozicije [2, 3, 4]. Ta razdeli delovni prostor robota na dva pravokotna si podprostora in v vsakem izvaja ločeno ali krmiljenje sile ali krmiljenje pozicije. Povratna zanka sile in pozicijska povratna zanka delujeta medsebojno neodvisno. Dovoljeno območje gibanja točke dotika mora biti vzdolž površine, medtem ko mora biti sila dotika normalna na površino. Metoda zahteva določeno znanje o dovoljenih smereh gibanja in o smereh sile dotika, ki so odvisne od strukture okolja in od naloge, ki jo želimo opravljati.

Impedančno krmiljenje temelji na ideji krmiljenja dinamičnega obnašanja robota v dotiku. Impedančni krmilnik je načrtan tako, da vrh robota, gledano z vidika okolja, posnema obnašanje izbranega fizikalnega mehanskega sistema. Celotna strategija predstavlja vodenje robota v smislu zagotavljanja dinamičnega razmerja med silo dotika in gibanjem. Tako je sila dotika krmiljena posredno preko krmiljenja pozicije in mehanskih lastnosti manipulatorja.

Trenuten prenos moči med dvema fizikalnima sistemoma je vedno definiran kot produkt dveh spremenljivk, napetosti (npr. sile) in pretoka (npr. gibanja). Gledano z vidika okolja lahko manipulator vzdolž vsake prostostne stopnje predstavlja le dva tipa fizikalnih sistemov: admitančnega, ki sprejema silo in povzroča gibanje ter impedančnega, ki sprejema gibanje in povzroča silo. Koncept impedance in admitance je bolj domač na področju elektrotehnike kot predstavitev frekvenčno odvisne upornosti in prevodnosti. Podobnost obravnave v osnovi velja, razen za dualnost obeh zapisov, ki zaradi nelinearne robotske manipulacije nista zamenljiva. Obstajajo realni fizikalni sistemi, ki so lahko zapisani le v eni od obeh oblik. Najvažnejša posledica dinamične interakcije dveh fizikalnih sistemov je ta, da morata biti sistema komplementarna drug glede na drugega. Če je eden impedančni mora biti drugi admitančni in obratno.

V večini robotskih nalog okolje vsebuje vsaj vztrajnost in/ali kinematične omejitve gibanja. To je fizikalni sistem, ki sprejema silo in se odziva s svojim gibanjem. Na tak sistem je mogoče vedno izvršiti pritisk, ni pa ga mogoče vedno premakniti. To je admitančni sistem.

Zaradi komplementarnosti kinematično sklopljenih fizikalnih sistemov je pri interakciji

z admitančnim okoljem potrebno obnašanje robota impedančne narave. Mehanska impedanca robota je definirana z impedančno enačbo, ki podaja dinamično razmerje med silo dotika in gibanjem vrha manipulatorja. Glede na uporabo različnih povratnih zank je možnih več oblik impedance. Delovanje pozicijske povratne zanke posnema fizikalno delovanje vzmeti, delovanje negativne hitrostne povratne zanke posnema delovanje dušilnega člena in delovanje povratne zanke po sili spreminja navidezno vztrajnost sistema [5]. S kombinacijo omenjenih povratnih zank dobimo impedanco reda nič, impedanco prvega reda ali impedanco drugega reda.

Impedanco reda nič definira enačba

$$F = K(X_R - X) \quad (1.1)$$

kjer je  $F$  vektor sile dotika,  $X$  vektor trenutne pozicije vrha manipulatorja in  $K$  diagonalna matrika s koeficienti željene togosti robota po posameznih stopnjah prostosti. Vektor  $X_R$  je referenčna trajektorija gibanja, ki ji skuša vrh manipulatorja pozicijsko slediti. Ob dotiku pride do spremembe te pozicije in v stacionarnem stanju je to pozicija ravnotežnega stanja. Imenovana je tudi navidezna pozicija, ker lahko leži izven delovnega prostora robota ali v notranjosti podlage. Krmiljenje linearnega razmerja med silo in pozicijo po enačbi (1.1) je poimenovano tudi krmiljenje togosti manipulatorja (*stiffness control*) [1].

Bolj tipičen predstavnik impedančnega krmiljenja je krmiljenje impedance prvega reda [1, 6]. V tem primeru je razmerje med silo in pozicijo zapisano z enačbo:

$$F = B(\dot{X}_R - \dot{X}) + K(X_R - X) \quad (1.2)$$

Krmiljenju togosti je dodana hitrostna povratna zanka s povratnozračnim ojačenjem. Koeficienti dušenja manipulatorja v matriki  $B$  so tako vsota lastnega dušenja mehanizma robota in aktivnega dušenja hitrostne povratne zanke. V tej obliki je impedančni krmilnik v bistvu PD pozicijski regulator v Kartezijevem koordinatnem sistemu. Spreminjanje mehanske impedance sistema je doseženo s spreminjanjem ojačenj pozicijske in hitrostne povratne zanke.

Robot z impedanco drugega reda se z vidika okolja obnaša kot mehanski sistema masa-vzmet-dušilni člen. Impedančna enačba je v tem primeru razširjena na obliko:

$$F = K(X_R - X) + B(\dot{X}_R - \dot{X}) - M\ddot{X} \quad (1.3)$$

Parameter  $M$  je uporabniško določena navidezna vztrajnost manipulatorja po posameznih oseh. Lastna vztrajnost robotskega mehanizma je tako modificirana s pomočjo aktivnega povratnozančnega delovanja. Prejšnja primera narekujejo uporabo povratne zanke po pospešku. Vendar ta za implementacijo v praksi ni najboljša rešitev zaradi velike šumnosti signala, ki je rezultat večkratnega odvajanja [11]. Boljša rešitev je merjenje sile dotika in uporaba izračunanega pospeška kot krmilne veličine.

Neville Hogan [7] je prvi predstavil impedančno krmiljenje osnovano na dinamičnem modelu robota. Za računanje momentov v motorjih  $\tau_A$  je uporabil dinamični model robota

$$\tau_A = H(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) - J^T F \quad (1.4)$$

v katerega je za pospešek  $\ddot{q}$  vpeljal pospešek izpeljan iz impedančne enačbe (1.3) in preračunan v koordinate sklepov:

$$\ddot{X} = M^{-1}K(X_R - L(q)) + M^{-1}B(\dot{X}_R - J(q)\dot{q}) + M^{-1}F \quad (1.5)$$

$$\ddot{q} = J^{-1}(q)[\ddot{X} - \dot{J}(q)\dot{q}] \quad (1.6)$$

Matrika  $H(q)$  v enačbi (1.4) predstavlja vztrajnostni tenzor mehanizma, matrika  $V(q, \dot{q})$  matriko Coriolisovih in centrifugalnih sil, vektor  $G(q)$  vektor gravitacijskih sil in člen  $J^T F$  preslikavo vpliva sile dotika na navore v sklepih. V enačbah (1.5) in (1.6) sta matriki  $L(q)$  in  $J(q)$  direktna kinematična transformacija ter Jacobijeva matrika. Rezultat računske operacije je krmilni zakon

$$\tau_A = HJ^{-1}M^{-1}[K(X_R - L(q)) + B(\dot{X}_R - J\dot{q}) + F] + G + V - HJ^{-1}\dot{J}\dot{q} - J^T F, \quad (1.7)$$

ki glede na izmerjene vrednosti sile, pozicije in hitrosti sklepov podaja potrebne momente v sklepih s ciljem, da vrh manipulatorja izraža želeno impedanco. Krmilni algoritem postane v gibanju brez dotika podoben krmilni shemi z izračunanim pospeškom (*resolved acceleration*) [8], ki v primeru dotika upošteva še zunanje vplive na robotski mehanizem. Metoda je zanimiva tudi s stališča reševanja inverznega kinematičnega modela pozicijsko vodenih



manipulatorjev v realnem času. V primeru, da je krmilni zakon osnovan na transponirani Jacobijevi matriki  $J^T$  [9], ta v popolnosti odpravi potrebo po izračunavanju inverzne kinematike. Izračunavanje inverzne kinematike je v splošnem časovno zamuden računski problem z večkratnimi rešitvami pri redundantnih manipulatorjih. Kako blizu bo vrh robota sledil referenčno trajektorijo  $X_R$  v prostem gibanju po prostoru je odvisno od impedančnih parametrov  $M$ ,  $B$  in  $K$ , katere izbira uporabnik sam. Vodenje redundantnih manipulatorjev z impedančnim krmilnikom sta obdelala Mussa-Ivaldi in Hogan [10].

Z izboljševanjem lastnosti Hoganovega impedančnega krmiljenja osnovanega na dinamičnem modelu robota so se ukvarjali številni avtorji. Kelly s sodelavci [12], Lu in Meng [13] ter Singh [14] zaradi nikoli dovolj dobrega modela robota uvedejo v krmilni zakon dodatne adaptivne zakone. Adaptivno nastavljivi parametri v krmilnem algoritmu zmanjšujejo občutljivost sistema na nelinearnosti in netočnosti parametrov modela. Isti problem rešujejo Lu in Goldenberg [15] s pomočjo impedančnega regulatorja v drsečem načinu delovanja (*sliding mode*) ter Dawson s sodelavci [16] s pomočjo regulatorja načrtanega na osnovi teorije Ljapunova. Vsi omenjeni pristopi so računsko zahtevni, zaradi česar so lastnosti delovanja v večini primerov preizkušene le s simulacijskimi shemami.

Anderson in Spong [17] razširita teorijo mehanske impedance robota na primere interakcij z različnimi oblikami okolij. Definirata tri modele okolja: vztrajnostnega, ki ga je možno prosto premikati po prostoru; upornostnega, ki ga je možno porivati vzdolž viskozne podlage ter kapacitivnega, ki je fiksni in je na njega možno opravljati silo. Predpostavita, da je možno z inverznim dinamičnim modelom, ki razgradi robota v linearne podsisteme po posameznih prostostnih stopnjah, uporabiti sistemsko teorijo linearnih sistemov. Glede na dualnost teoremov Nortona in Thevenina za vsak model okolja določita primerno impedanco manipulatorja. Idejo Hoganovega impedančnega krmilnika tako razširita na hibridni krmilnik po vzoru hibridnega krmiljenja sile in pozicije. Delovni prostor razstavita na pozicijsko krmiljen podprostor in podprostor krmiljen po sili. V vsakem podprostoru izvajata krmiljenje sile ali pozicije preko impedance, ki sta jo predhodno določila glede na okolje. Pozicijsko krmiljen podprostor uporablja impedančno enačbo drugega reda (1.3), medtem ko v podprostoru krmiljenim po sili avtorja uvedeta referenčno silo  $F_R$  in izvajata silo dotika preko dinamične zveze med pogreškom sile in gibanjem:

$$(F_R - F) = M\ddot{X} + B(\dot{X} - \dot{X}_f) \quad (1.8)$$

Hitrost  $\dot{X}_f$  je dodaten kompenzacijski signal dobljen s filtriranjem hitrosti manipulatorja.

Vsi dosedaj omenjeni primeri implementacije impedančnega krmiljenja so primeri osnovani na dinamičnem modelu robota. Krmilni zakon je načrtan tako, da s pomočjo modela robota, željene trajektorije gibanja in impedančne relacije sila/pozicija definira potrebne momente v sklepih. Zaradi težavnega določevanja parametrov dinamičnega modela, časovno zamudnega računanja momentov v realnem času in zahteve po neposrednem krmiljenju momentov v motorjih ta oblika impedančnega krmiljenja še ni zaživela v praktičnih aplikacijah. Današnji industrijski roboti so namreč večinoma pozicijsko vodeni manipulatorji, sposobni le zanesljivo slediti referenčni pozicijski trajektoriji v prostoru. Poleg tega zaprta arhitektura robotskih industrijskih krmilnikov ne dopušča poseganja v njihovo strojno opremo.

Navedeno je narekovalo razvoj impedančnega krmiljenja osnovanega na pozicijskem vodenju. Impedančni krmilnik takšne vrste temelji na generiranju referenčne trajektorije originalnemu robotskemu pozicijskemu regulatorju. Referenčna trajektorija je generirana tako, da je izpolnjena relacija med merjeno silo  $F$  ter željeno in dejansko pozicijo vrha manipulatorja ( $X_R$  in  $X$ ) preko impedančne enačbe:

$$F = M(\ddot{X}_R - \ddot{X}) + B(\dot{X}_R - \dot{X}) + K(X_R - X) \quad (1.9)$$

Diagonalne matrike  $M$ ,  $B$  in  $K$ , enako kot v prejšnjih primerih, vsebujejo parametre robotove navidezne vztrajnosti, dušenja in togosti po posameznih prostostnih stopnjah. Pozicijski impedančni krmilnik sestavljata dve povratni zanki, notranja in zunanja. Notranja pozicijska povratna zanka zagotavlja sledenje pozicije, ki jo definira zunanji regulacijski krog zaključen s povratno zanko po sili. Referenčna trajektorija pozicijskemu krmilniku je v prostem gibanju enaka željeni trajektoriji, ob dotiku pa se tej prišteva še sprememba pozicije zaradi sile dotika. Spreminjanje pozicije določa t.i. impedančni filter s prenosno funkcijo izpeljano iz enačbe (1.9).

Ker so lastnosti impedančnega krmilnika osnovanega na pozicijskem vodenju močno odvisne od lastnosti podrejenega pozicijskega regulatorja potekajo raziskave na tem področju v smeri proučevanja impedančnih lastnosti v odvisnosti od različnih konfiguracij zunanje povratne zanke po sili. Pelletier in Doyon [18] predstavita tri variante impedančnega



krmilnika z različnimi oblikami povratne zanke sile. Definirata mero napake in primerjata lastnosti krmilnikov glede na zadovoljitev impedančne enačbe. Za izboljšanje lastnosti vsakega krmilnika predlagata metodo z dodatnim korekcijskim signalom.

Carignan [19] izvede primerjavo dveh pozicijskih impedančnih krmilnikov uporabljenih pri krmiljenju robota Adept in pri krmiljenju testnega manipulatorja vesoljskega plovila. Z uporabo norme impedančne napake predstavi lastnosti manipulatorjev v dotiku s podlago, ki vibrira z različnimi frekvencami. Izboljšanje lastnosti doseže z vnaprejšnjim prištevanjem dodatne komponente sile k merjeni sili (*force feedforward*).

Raje kot z dodajanjem raznih kompenzacijskih shem v zunanjo zanko se Colbaugh s sodelavci v [20] ukvarja z izboljšanjem sledenja pozicije notranje zanke. Namesto klasičnega pozicijskega PD regulatorja uvede računanje momentov motorjev z direktno adaptivno shemo. Adaptivni regulator zasnuje na transponirani Jakobijevi matriki  $J^T$  in se na ta način izogne računanju inverznih kinematičnih transformacij. Tako je njegov impedančni krmilnik primeren tudi za krmiljenje redundantnih robotov.

Volpe in Khosla [21] opravita primerjavo med eksplicitnim krmiljenjem sile in impedančnim krmiljenjem. Rezultat njune teoretične in eksperimentalne analize je ugotovitev, da je eksplicitni krmilnik sile s proporcionalnim ojačenjem pravzaprav prisoten kot podsklop v impedančnem krmilniku drugega reda. Za primer interakcije s togim okoljem, ko je pozicijska povratna zveza skoraj konstantna, pa avtorja pokažeta, da se impedančni krmilnik zreducira na samo eksplicitni krmilnik sile. Takrat je referenčna hitrost manipulatorja enaka nič, zaradi česar se lahko impedančna enačba zapiše v skrčeni obliki:

$$F = M \ddot{X} + B \dot{X} + K (X - X_R) \quad (1.10)$$

Prispevek  $KX_R$ , ki je skalirana referenčna pozicija, lahko v tem primeru neposredno zamenjamo z vrednostjo referenčne sile. Volpe in Khosla, ki sta svoje ugotovitve glede prehoda impedančnega krmiljenja v eksplicitno krmiljenje pri togem okolju dognala s pomočjo impedančnega krmiljenja osnovanega na dinamičnem modelu, v delu [22] podata ekvivalentnost trditev tudi za krmilne sheme, ki so osnovane na pozicijskem vodenju.

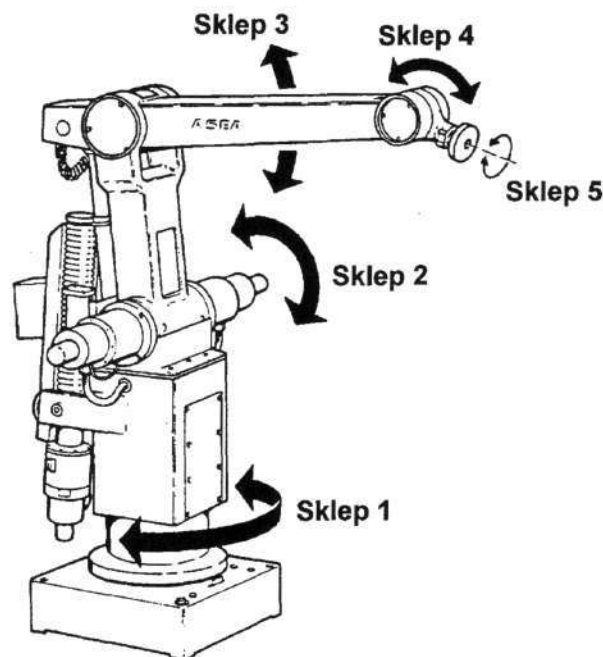
V pričujočem delu je podan razvoj in implementacija impedančnega krmilnika industrijskega robota ASEA IRb 6. Impedančni krmilnik je osnovan na pozicijskem vodenju v zunanjih koordinatah, zato je najprej v drugem poglavju predstavljena predelava obstoječega

---

pozicijskega krmilnika robota v krmilnik primeren za eksperimentalne namene. Orisani so zasnova strojne in razvoj programske opreme novega krmilnika zgrajenega na bazi osebnega računalnika. Tretje poglavje podaja teoretičen pristop k zasnovi impedančnega krmilnika. Namen impedančnega krmiljenja robota ASEA je interakcija s togo podlago in togimi predmeti. Zato so uporabljene ugotovitve Volpeja in Khosle [21] ter adaptivna shema za zagotavljanje boljšega sledenja sile. Simulirano obnašanje adaptivne impedančne krmilne sheme za primer ene prostostne stopnje predstavlja poglavje štiri. Poglavje pet pa zaključuje delo z rezultati implementacije adaptivnega impedančnega krmilnika na realnem robotu.

## 2 Prilagoditev robota ASEA IRb 6 za eksperimentalne namene

Industrijski robot ASEA IRb 6 je robot antropomorfne konfiguracije s petimi prostostnimi stopnjami gibanja. Njegove sklepe poganjajo enosmerni motorji preko mehanskih paralelogramskih struktur v kombinaciji s polžastimi ali *harmonic drive* prenosi. Slika 2.1 prikazuje strukturo robota ASEA IRb 6. Največje dovoljeno breme, ki ga robot lahko prenaša v svojem delovnem prostoru je 6 kg. Kljub dobri mehanski strukturi je eksperimentalno delo z robotom oteženo zaradi neprimerne robotskega krmilnika. Originalen krmilnik robota, zgrajen na bazi procesorja Intel 8008, namreč omogoča samo pozicijsko vodenje robota v koordinatah sklepov. Računsko določevanje želenih pozicij in morebitna komunikacija z dodatnim računalnikom nista mogoči.



Slika 2.1: Robot ASEA IRb 6

Zaradi navedenega je bil, kot prvi korak k razvoju krmiljenja sile, potreben razvoj novega pozicijskega krmilnika robota. Ta naj bi omogočal pozicijsko vodenje s točke na točko ter sledenje trajektorije v zunanjih in notranjih koordinatah. Zgradba krmilnika naj bi bila takšna, da dovoljuje priključevanje perifernih naprav, razvoj dodatnih programskih algoritmov in enostavno programiranje. Robotski krmilnik, ki izpolnjuje te zahteve smo zgradili na osnovi osebnega računalnika PC 486.

## 2.1 Robotski PC krmilnik

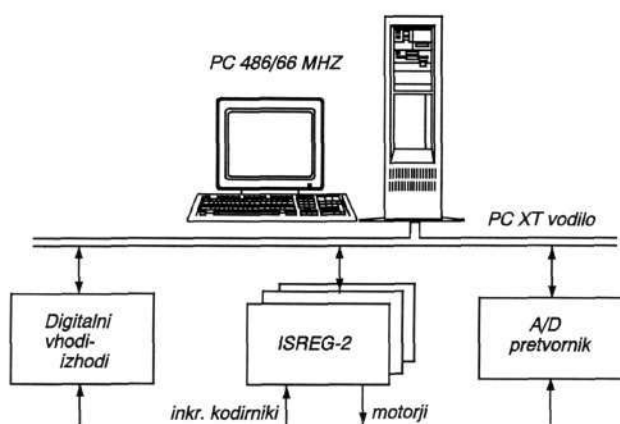
Pozicijski krmilnik robota ASEA IRb 6 smo zasnovali na regulacijskih modulih ISREG-2, proizvod Inštituta Jožef Stefan v Ljubljani <sup>1</sup>. Regulacijski moduli regulirajo pozicijo motorjev in s tem preko prenosov in mehanskih paralelogramskih struktur opravljajo želeno pozicioniranje robotskih sklepov oz. pozicioniranje vrha robota. Slika 2.2 predstavlja konfiguracijo osebnega računalnika, ki predstavlja robotski krmilnik. Na njegovo vodilo so priključeni trije moduli ISREG-2 in vhodno-izhodni vmesnik firme *Burr-Brown*. Vhodno-izhodni vmesnik služi za zajemanje analognih in izmenjavo digitalnih signalov (8 A/D kanalov in 32 digitalnih I/O kanalov). Na procesorju PC računalnika, ki je omenjeni strojni opremi nadrejen, tečejo kinematični algoritmi vodenja robota v zunanjih koordinatah. Poleg tega opravlja osebni računalnik funkcijo razvojnega sistema programov vodenja ter shranjevanja in prikazovanja podatkov.

Regulacijski modul ISREG-2 je zgrajen na tiskanem vezju Europa formata. Za komunikacijo z nadrejenim procesorjem uporablja osembitno PC XT vodilo. V regulacijski zanki deluje popolnoma samostojno, nadrejeni procesor mu le posreduje regulacijske parametre in želeno pozicijo ali hitrost servosistema. Modul temelji na dveh integriranih vezjih LM628 firme National Semiconductors, ki so bila razvita prav z namenom regulacije numerično krmiljenih pogonov. Vsak modul ISREG-2 omogoča spremljanje pozicije in regulacijo motorjev dveh servoregulacijskih stopenj preko dveh neodvisnih kanalov. Vsak

---

<sup>1</sup> Regulatorski vmesnik ISREG-2 - Tehnična dokumentacija, Inštitut "Jožef Stefan" Ljubljana, Junij 1993, Ljubljana.

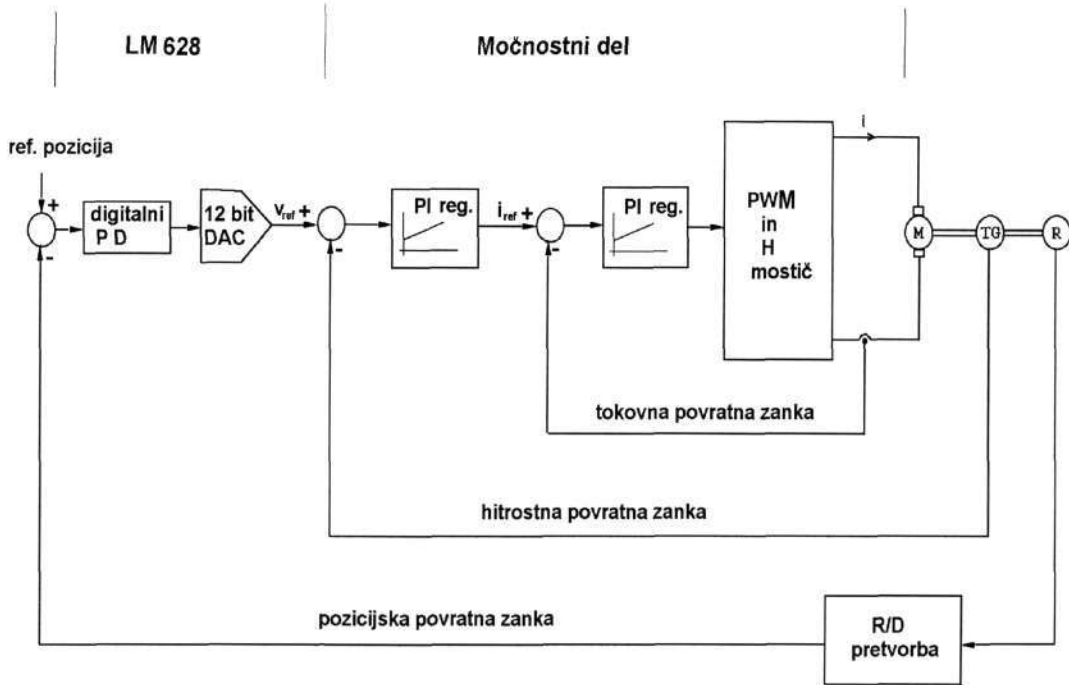
kanal vsebuje 32-bitni števec, katerega stanje nosi informacijo o poziciji. Iz trenutne in referenčne vrednosti pozicije sam izračuna krmilni signal in ga preko 12 bitnega D/A pretvornika posreduje močnostnemu ojačevalniku motorja. Regulator LM628 omogoča štirikratno povečanje ločljivosti inkrementalnih dajalnikov pozicije, odkrivanje napak oz. izgubljenih impulzov inkrementalnih dajalnikov ter proženje strojnih prekinitev nadrejenemu računalniku. Pri pospeševanju ali ustavljanju uporablja vgrajeni generator trapeznega profila hitrosti. Možno je delovanje regulatorja v pozicijskem ali hitrostnem načinu, kar pomeni, da lahko deluje kot pozicijski ali hitrostni regulator.



**Slika 2.2:** Strojna oprema osebnega računalnika - robotskega krmilnika

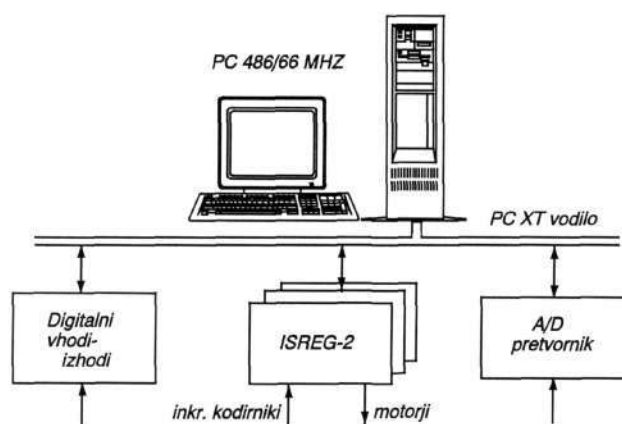
Na sliki 2.3 je prikazana blokovna shema servoregulacije enega sklepa robota ASEA. Integrirano vezje LM628 opravlja funkcijo digitalnega pozicijskega regulatorja, ki na podlagi želenih vrednosti, povratne informacije o poziciji in notranjega generatorja hitrostnega trapeznega profila generira referenčni signal hitrostnemu regulatorju končne stopnje. Pozicijska zanka opravlja regulacijo pozicije s frekvenco  $640 \text{ Hz}$ . Na sliki označeni močnostni del, ki obsega hitrostni regulator, tokovni regulator, impulzno-širinski modulator ter mostični ojačevalnik, je izveden v analogni tehniki in je ostal nespremenjen v originalni izvedbi krmilnika.

Informacijo o trenutni poziciji motorjev na robotu ASEA zagotavljajo resolverji. Ker regulacijski moduli razpoznavajo samo signale inkrementalnih kodirnikov, je bilo zato potrebno izdelati ustrezne pretvornike. Pretvorba resolverjskih signalov v signale inkrementalnih kodirnikov je na sliki 2.3 označena z blokom R/D pretvorba.



Slika 2.3: Blokovna shema pozicijske regulacije sklepa robota ASEA IRb 6

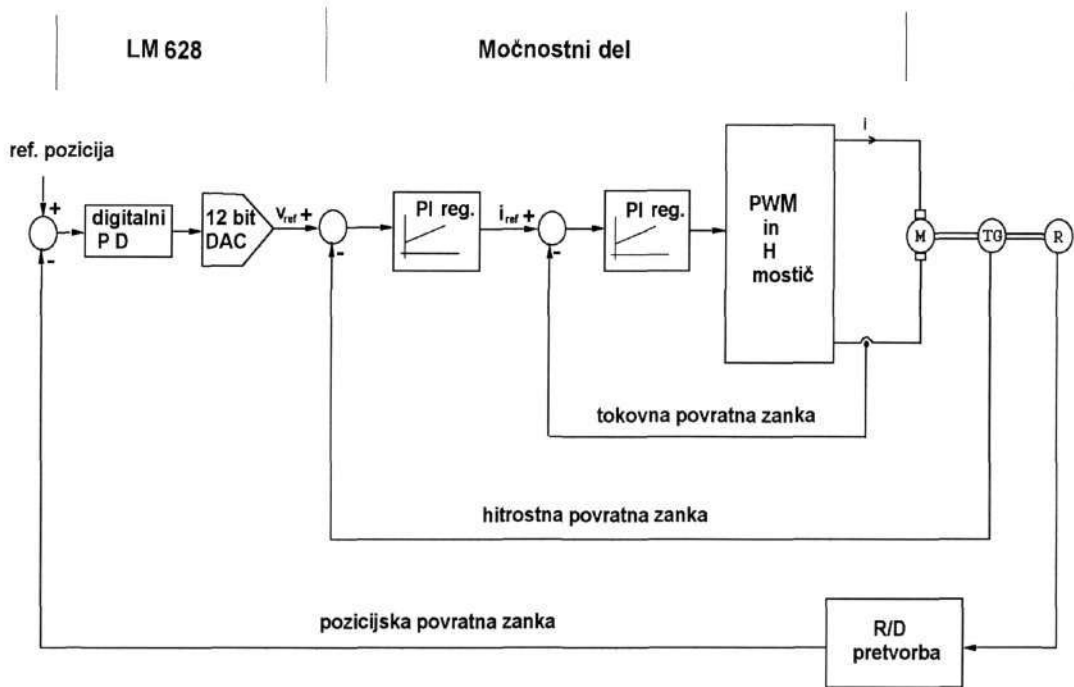
kanal vsebuje 32-bitni števec, katerega stanje nosi informacijo o poziciji. Iz trenutne in referenčne vrednosti pozicije sam izračuna krmilni signal in ga preko 12 bitnega D/A pretvornika posreduje močnostnemu ojačevalniku motorja. Regulator LM628 omogoča štirikratno povečanje ločljivosti inkrementalnih dajalnikov pozicije, odkrivanje napak oz. izgubljenih impulzov inkrementalnih dajalnikov ter proženje strojnih prekinitev nadrejenemu računalniku. Pri pospeševanju ali ustavljanju uporablja vgrajeni generator trapeznega profila hitrosti. Možno je delovanje regulatorja v pozicijskem ali hitrostnem načinu, kar pomeni, da lahko deluje kot pozicijski ali hitrostni regulator.



**Slika 2.2:** Strojna oprema osebnega računalnika - robotskega krmilnika

Na sliki 2.3 je prikazana blokovna shema servoregulacije enega sklepa robota ASEA. Integrirano vezje LM628 opravlja funkcijo digitalnega pozicijskega regulatorja, ki na podlagi zelenih vrednosti, povratne informacije o poziciji in notranjega generatorja hitrostnega trapeznega profila generira referenčni signal hitrostnemu regulatorju končne stopnje. Pozicijska zanka opravlja regulacijo pozicije s frekvenco 640 Hz. Na sliki označeni močnostni del, ki obsega hitrostni regulator, tokovni regulator, impulzno-širinski modulator ter mostični ojačevalnik, je izveden v analogni tehniki in je ostal nespremenjen v originalni izvedbi krmilnika.

Informacijo o trenutni poziciji motorjev na robotu ASEA zagotavljajo resolverji. Ker regulacijski moduli razpoznavajo samo signale inkrementalnih kodirnikov, je bilo zato potrebno izdelati ustrezne pretvornike. Pretvorba resolverskih signalov v signale inkrementalnih kodirnikov je na sliki 2.3 označena z blokom R/D pretvorba.

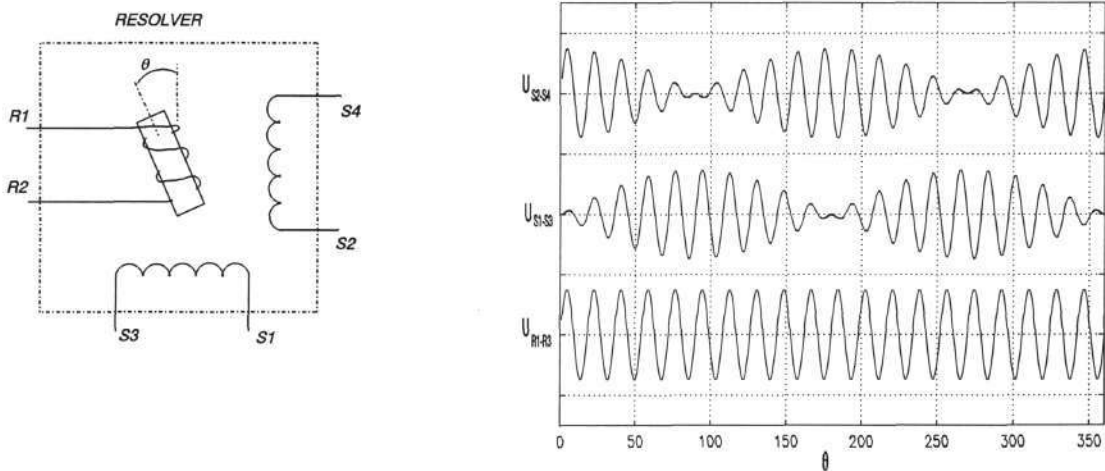


Slika 2.3: Blokovna shema pozicijske regulacije sklepa robota ASEA IRb 6



## 2.2 Pretvorba signalov resolverjev v signale inkrementalnih kodirnikov

Resolver je elektromehanska naprava sestavljena, podobno kot AC motor, iz statorja in rotorja. V osnovi predstavlja resolver vrtljiv transformator, ki spreminja induktivno sklopljenost primarnega in sekundarnih navitij v odvisnosti od kota zasuka svoje osi. Tako je na izhodu resolverja inducirana napetost, katere amplituda je direktno odvisna od kota zasuka osi. Konstrukcija resolverja obsega primarno navitje na rotorju in dve sekundarni navitji na statorju, ki sta medsebojno premaknjeni za  $90^\circ$ . V primeru da je rotorsko navitje vzbujano s sinusnim signalom konstantne amplitude in frekvenca, se na statorskih navitjih inducirata signala, ki sta v fazi z vzbujalnim-referenčnim signalom, amplituda pa je modulirana s sinusom in kosinusom kota rotacije. Slika 2.4 skupaj z enačbama (2.1) in (2.2) ponazarja razmere pri delovanju resolverja.



Slika 2.4: Shema in signali resolverja

Kadar ima vzbujalna napetost obliko:

$$U_{R1-R2} = A \sin \omega t , \quad (2.1)$$

so inducirane napetosti statorskih navitij enake:

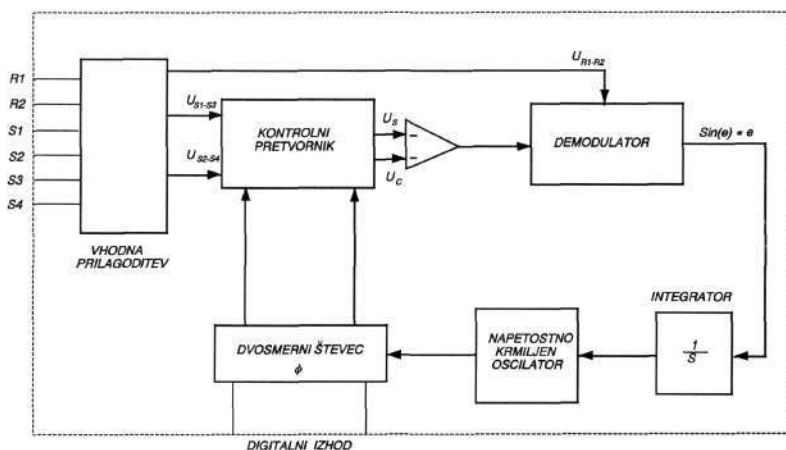
$$\begin{aligned} U_{S1-S3} &= R A \sin \omega t \sin \theta \\ U_{S2-S4} &= R A \sin \omega t \cos \theta \end{aligned} \quad (2.2)$$

Oznake v enačbah pomenijo:

- $A$  - amplituda vzbujalne napetosti
- $R$  - transformacijsko razmerje resolverja
- $\omega$  - frekvenca vzbujalne napetosti
- $\theta$  - kot zasuka osi.

Resolver je kot dajalnik pozicije v primerjavi z optičnimi kodirniki zanesljivejša naprava, neobčutljiva na temperaturo, vlago, vibracije in spremembe vzbujalne napetosti. Zagotavlja časovno stabilen signal z neskončno majhno ločljivostjo. Njegov princip delovanja omogoča absolutno določevanje položaja osi. Vzrok, da je resolver uporabljan v manjšem obsegu kot optični kodirniki, leži v bolj komplicirani pretvorbi analognega resolverskega signala v digitalno obliko.

Integrirani pretvorniki resolverjskih signalov v digitalno obliko rešujejo probleme zahtevne pretvorbe. R/D pretvorniki temeljijo na sledilni pretvorbi, ki se je izkazala najodpornejša na motnje superponiranega šuma. Osnovni princip sledilne pretvorbe je avtomatsko sledenje stanja digitalnega števca dejanskemu kotu. Stanje števca direktno predstavlja digitalizirano vrednost kota. Blokovna shema sledilnega R/D pretvornika je predstavljena na sliki 2.5.



Slika 2.5: Blokovna shema sledilnega R/D pretvornika

Kontrolni pretvornik priredi vhodnima signaloma  $U_{S1-S3}$  in  $U_{S2-S4}$  pravilno polariteto glede na to, v katerem kvadrantu leži kot in signala množi s sinusom in kosinusom digitalizirane vrednosti kota  $\phi$ . Množenje opravljata sinusni in kosinusni množilnik, ki dajeta na izhodu produkte:

$$\begin{aligned} U_C &= U_{S1-S3} \cos \phi = R A \sin \omega t \sin \theta \cos \phi \\ U_S &= U_{S2-S4} \sin \phi = R A \sin \omega t \cos \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (2.3)$$

Izhoda množilnikov sta vodena na odštevalno vezje. To vezje signala medsebojno odšteje, tako da dobimo sinusni signal nosilne frekvence z amplitudo proporcionalno sinusno razliki med dejanskim kotom  $\theta$  in digitaliziranim kotom  $\phi$  ( $\sin(\theta - \phi) = \sin \theta \cos \phi - \cos \theta \sin \phi$ ).

Demodulator iz tega signala izloči enosmerno napetost. Kot demodulacijsko referenco uporablja resolverjski vzbujačni signal. Dobljena napetost je proporcionalna sinusni razliki med kotoma  $\theta$  in  $\phi$ . Z drugimi besedami, to je sinus napake med dejansko pozicijo resolverja in digitalno vrednostjo pozicije shranjene v števcu. Za majhne vrednosti napake je sinus napake kar približno enak napaki ( $\sin(e) \cong e$ ).

Izhod integratorja, ki integrira signal napake, predstavlja krmilni signal za kontrolo frekvence napetostno krmiljenega oscilatorja (VCO). Napetostno krmiljen oscilator generira impulze, ki jih šteje dvosmerni števec. Stanje digitalnega števca direktno opisuje digitalno vrednost kota rotacije. Večja kot je razlika med dejanskim kotom  $\theta$  in digitaliziranim kotom  $\phi$ , večja je frekvenca oscilatorja in hitreje se stanje števca približuje dejanski vrednosti kota. Smer, v katero števec šteje navzgor ali navzdol, je določena glede na polariteto napake.

Sledilni R/D pretvornik je v osnovi nizkopasovni filter drugega reda. Ima predvidljiv dinamični odziv in značilne frekvenčne lastnosti, ki so določene z elementi v povratni zanki [27]. Na točnost rezultata pretvorbe vplivajo amplitudna in fazna neenakost induciranih napetosti, inducirane višje harmonske komponente ter fazni zamik in popačenje referenčnega signala. Te nepravilnosti je možno zmanjšati z uporabo računskih metod [28, 29]. Največji pogrešek sledilnega pretvornika v digitalnem rezultatu se pojavlja med pospeševanjem in zaviranjem osi resolverja, ker se pretvornik ne more dovolj hitro odzivati na spremembe kotne hitrosti. Pri konstantni hitrosti pa je frekvenca oscilatorja nastavljena na stopnjo štetja (sledilno stopnjo), ki točno ustreza stopnji spremembe  $\theta$  na časovno enoto in bo zato

digitalizirani kot sledil dejanskemu ( $\phi = \theta$ ). Informacija sledilnega pretvornika je vedno "sveža" in vedno dosegljiva kot izhod digitalnega števca.

Za našo nalogo pretvarjanja resolverskih signalov smo izbrali R/D pretvornik firme *Analog Devices* AD2S90, ki poleg pretvorbe resolverskega signala v serijsko 12 bitno obliko in emulacije tahogeneratorja omogoča tudi emulacijo inkrementalnega optičnega kodirnika. Izhod v obliki inkrementalnega kodirnika obsega signal  $NM$ , ki se pojavi enkrat na obrat, ter signala  $A$  in  $B$ , ki sta vlaka impulzov 0 in 1, medsebojno premaknjena za 90 stopinj. Ločljivost pretvornika je 1024 impulzov na obrat. Prenosna funkcija med dejanskim kotom in digitalizirano vrednostjo kota za pretvornik AD2S90 znaša:

$$\frac{\phi}{\theta} = \frac{1 + s t_1}{1 + s t_1 + \frac{s^2}{K_1 K_2} + \frac{s^3 t_2}{K_1 K_2}} \quad (2.4)$$

kjer so:

$$t_1 = 1.0 \text{ ms}$$

$$t_2 = 90 \text{ } \mu\text{s}$$

$$K_1 = 364 \text{ s}^{-2}$$

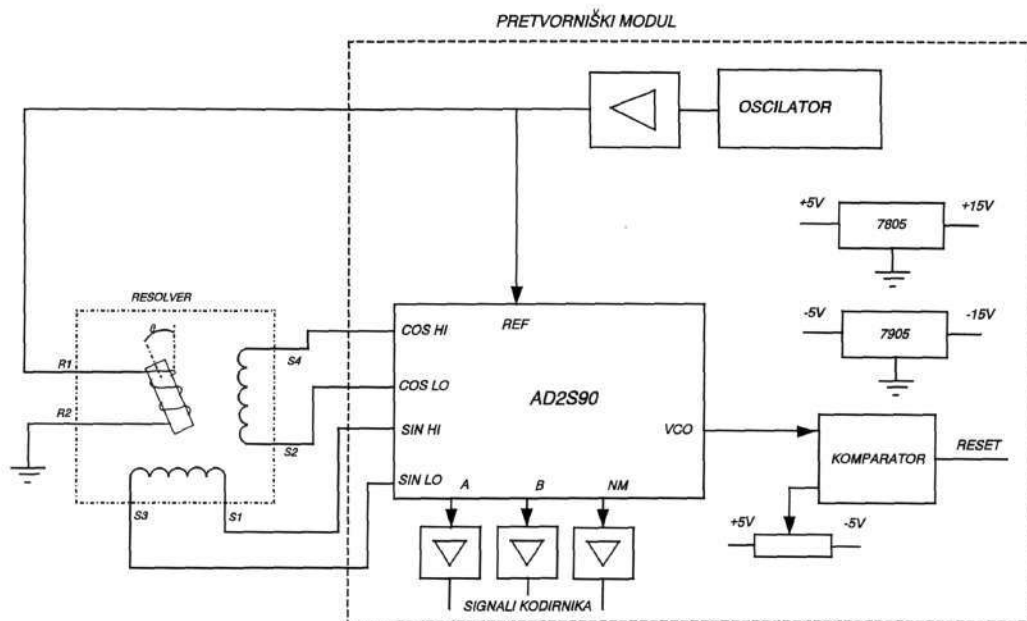
$$K_2 = 200000 \text{ s}^{-2}$$

Pasovna širina pretvornika je 1  $KHz$  in maksimalna stopnja sledenja 375 obratov/sekundo. Regulacijski čas znaša za majhne vhodne signale  $t_s = 7 \text{ ms}$ , za odziv na stopnico amplitude  $179^\circ$  pa je  $t_s$  trikrat daljši. Meje pogoška pretvornika, podane od proizvajalca ob idealnih signalih resolverja, so  $\pm 10$  kotnih minut.

Zgrajenih je bilo pet pretvorniških modulov, ki obsegajo poleg R/D pretvornika še Wienov oscilator, tokovne ojačevalnike, napetostno stabilizacijo in dodatno zaščitno vezje. Slika 2.6 prikazuje blokovno shemo pretvorniškega vezja.

Wienov oscilator generira sinusni vzbujevalni signal, ki je ojačevan z operacijskim ojačevalnikom. Vzbujevalni signal je frekvence 3.2  $KHz$  in amplitude 2.4  $V$ . Za razbremenitev izhodov pretvornika skrbijo tokovni ojačevalniki, za stabilizacijo napajalnih napetosti pa dva napetostna stabilizatorja. Dodatno zaščitno vezje je namenjeno za izključitev servosistemov robota, v primeru da pretvornik izgubi sled z merjenim kotom. V tem primeru se pojavi velika razlika med merjenim in digitaliziranim kotom, zato frekvenca napetostno

krmiljenega oscilatorja močno naraste. Izhodno napetost tega oscilatorja primerjamo z nastavljeno pragovno vrednostjo. Preklop komparatorskega vezja povzroči izklop servo ojačevalnikov motorjev.



**Slika 2.6:** Blokovna shema pretvorniškega vezja signalov resolverja v signale kodirnika

Fizično so pretvorniški moduli zgrajeni na tiskanih vezjih načrtanih tako, da jih je bilo mogoče vgraditi v ohišje motorjev poleg resolverjev. Ob vgradnji so bile uporabljene obstoječe kableske povezave z robotskim krmilnikom. Na ta način digitalni regulator položaja čuti dajalnike pozicije kot inkrementalne kodirnike.

## 2.3 Kinematični model robota

Naloga vodenja robota v zunanjih koordinatah zahteva poznavanje kinematičnega modela robota. Večino sklepov robota ASEA IRb 6 poganjajo motorji preko mehanskih vodil paralelogramske strukture. Zaradi tega kinematični model obsega dve zaporedni transformaciji: transformacijo med zasuki motorjev in zasuki sklepov ter transformacijo med zasuki sklepov in premikom vrha robota. Podpoglavje podaja izračun celotne kinematične preslikave v obeh smereh, z vrha robota v motorje in obratno.

### 2.3.1 Direktna kinematika

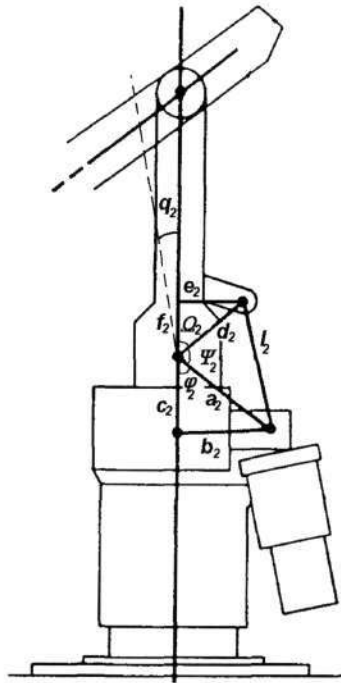
Direktna kinematika izračunava velikost premika vrha robota, ki nastane zaradi vrtenja motorjev. Premik vrha je izražen glede na robotov bazni koordinatni sistem. Za izračun celotne preslikave je potrebno najprej izpeljati preslikave med zasuki motorjev in zasuki sklepov. Če označimo kote zasukov motorjev z  $M_i$  in kote zasukov sklepov s  $q_i$ , vse izražene v stopinjah, za posamezne sklepe zapišemo povezave:

- Sklep 1:

$$q_1 = -k_1 M_1 = -\frac{1}{158} M_1 \quad (2.5)$$

$k_1$  je prenosno razmerje reduktorja v prvem sklepu.

• Sklep 2:



Slika 2.7: Mehanizem drugega sklepa

Geometrijski prikaz mehanizma, ki prenaša vrtenje drugega motorja na vrtenje drugega sklepa, podaja slika 2.7. Vrednosti dolžin in kotov s slike, ki se ne spreminjajo so:

$$a_2 = \sqrt{b_2^2 + c_2^2} = \sqrt{155^2 + 188.3^2} = 243.89 \text{ mm}$$

$$d_2 = \sqrt{e_2^2 + f_2^2} = \sqrt{135.8^2 + 40^2} = 141.56 \text{ mm}$$

$$\Omega_2 = \arctan \frac{e_2}{f_2} = \arctan \frac{135.8}{40} = 73.59^\circ \quad (2.6)$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{b_2}{c_2} = \arctan \frac{155}{188.3} = 39.46^\circ$$

V primeru, ko je vrednost kota  $q_2$  enaka nič (glej položaj manipulatorja na sliki 2.7), znašata kot  $\psi_2$  in dolžina  $l_2$ :

$$\begin{aligned}\psi_{20} &= 180^\circ - \Omega_2 - \varphi_2 = 66.95^\circ \\ l_{20} &= \sqrt{a_2^2 + d_2^2 - 2 a_2 d_2 \cos \psi_{20}} = 229.1 \text{ mm}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Zaradi vrtenja motorja se spreminja dolžina  $l_2$ :

$$l_2 = k_2 M_2 + l_{20} = \frac{1}{72} M_2 + 229.1\tag{2.8}$$

kjer  $k_2$  označuje prenosno razmerje polžastega gonila drugega motorja.

Spreminjanje dolžine  $l_2$  povzroči spremembo kota  $\psi_2$ :

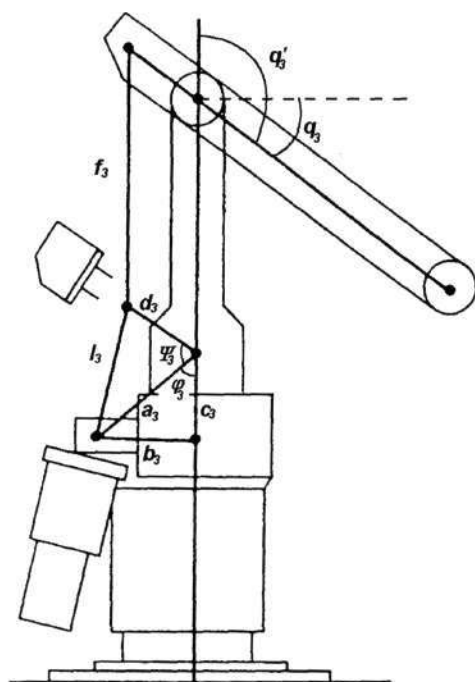
$$\psi_2 = \arccos \left( \frac{q_2^2 - a_2^2 - d_2^2}{-2 a_2 d_2} \right)\tag{2.9}$$

in posledica tega je spreminjaje kota  $q_2$ , ki ga izračunamo z enačbo:

$$\begin{aligned}q_2 &= \psi_2 + \varphi_2 + \Omega_2 - 180^\circ \\ q_2 &= \arccos \left[ \frac{(1/72 M_2 + 229.1)^2 - 79519.52}{-69054.02} \right] - 66.95^\circ\end{aligned}\tag{2.10}$$



• Sklep 3:



Slika 2.8: Mehanizem tretjega sklepa

Geometrijski prikaz mehanizma, ki prenaša vrtenje tretjega motorja na vrtenje tretjega sklepa podaja slika 2.8. Vrednosti nespremenljivih dolžin in kotov s slike so:

$$a_3 = \sqrt{c_3^2 + b_3^2} = \sqrt{188.3^2 + 155^2} = 243.89 \text{ mm}$$

$$d_3 = 141.5 \text{ mm} \quad f_3 = 690 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$\varphi_3 = \arctan \frac{b_3}{c_3} = \arctan \frac{155}{188.3} = 39.46^\circ$$

Vrednosti  $\psi_3$  in  $l_3$  v ničelni legi kota  $q_3$  sta:

$$\psi_{30} = 90^\circ - \varphi_3 = 50.54^\circ \quad (2.12)$$

$$l_{30} = \sqrt{a_3^2 + d_3^2 - 2 a_3 d_3 \cos \psi_{30}} = 188.78 \text{ mm}$$

Zaradi vrtenja motorja se spreminja dolžina  $l_3$ :

$$l_3 = k_3 M_3 + l_{30} = \frac{1}{72} M_3 + 188.78 , \quad (2.13)$$

kjer je  $k_3$  prenosno razmerje polžastega gonila tretjega motorja.

Spreminjanje dolžine  $l_3$  povzroči spreminjanje kota  $\psi_3$ :

$$\psi_3 = \arccos \left( \frac{l_3^2 - a_3^2 - d_3^2}{-2 a_3 d_3} \right) \quad (2.14)$$

Glede na dejstvo, da je vsota vseh kotov v paralelogramu 360 stopinj dobimo:

$$2 (180^\circ - (\psi_3 + \varphi_3) + q_2 + q_3') = 360^\circ \quad (2.15)$$

$$q_3 = q_3' - 90^\circ ,$$

iz česar sledi rešitev za kot  $q_3$ :

$$q_3 = \psi_3 + \varphi_3 - q_2 - 90^\circ \quad (2.16)$$

$$q_3 = \arccos \left[ \frac{(1/72 M_3 + 188.78)^2 - 79504.58}{-69020.61} \right] - 50.54^\circ - q_2$$

#### • Sklep 4:

Za četrti sklep imamo zvezo:

$$q_4 = -k_4 M_4 - q_3 - q_2 = -\frac{1}{128} M_4 - q_3 - q_2 , \quad (2.17)$$

kjer je  $k_4$  prenosno razmerje prenosa četrtega sklepa.

• Sklep 5:

Za peti sklep velja:

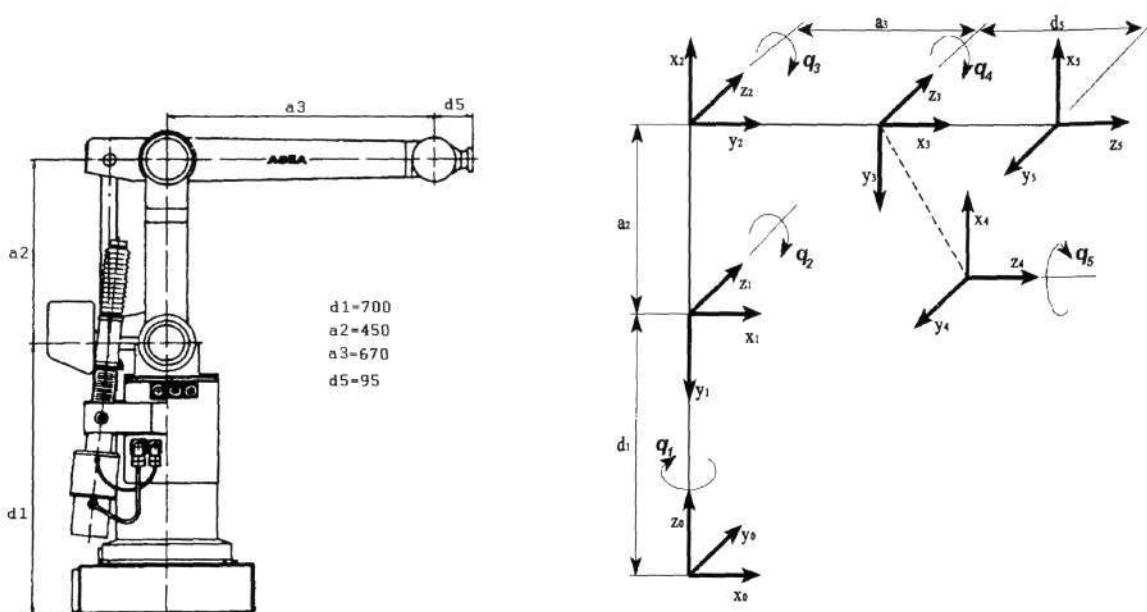
$$q_5 = k_{5A} k_{5B} M_5 + k_{5B} (q_4 + q_3 + q_2) \quad (2.18)$$

$$q_5 = \frac{1}{76} M_5 + 1.6842 (q_4 + q_3 + q_2), \quad (2.19)$$

kjer je  $k_{5A}$  prenosno razmerje *harmonic-drive* prenosa pri motorju in  $k_{5B}$  prenosno razmerje v zapestju robota.

Iz enačb transformacije motorji-sklepi je lepo razvidna posebnost mehanske konstrukcije robota ASEA. Položaj enega sklepa določa položaj več motorjev.

Naslednji korak je izračun transformacije med položajem sklepov in položajem vrha robota. Transformacijo izpeljemo s pomočjo Denavit-Hartenbergovega zapisa. Zapis podaja preslikave med koordinatnimi sistemi, ki jih predpišemo vsakemu posameznemu sklepu robota. Postavitev koordinatnih sistemov v robotske sklepe na podlagi pravil Denavita in Hartenberga [32, 33] je razvidna s slike 2.9.



Slika 2.9: Postavitev koordinatnih sistemov v sklepe robota

$q_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
$q_1$	$d_1$	0	$-\pi/2$
$q_2$	0	$a_2$	0
$q_3$	0	$a_3$	0
$q_4$	0	0	$-\pi/2$
$q_5$	$d_5$	0	0

**Tabela 2.1:** Kinematični parametri robota ASEA IRb 6

V tabeli 2.1 so zbrani vsi kinematični parametri robota. Določitev ničelnih vrednosti kotov  $q_i$  v položaju manipulatorja, v kakršnem se nahaja na sliki 2.9 zahteva predhodno korekcijo kotov  $q_i$ :

$$\begin{aligned}
 q_1 &= q_1 \\
 q_2 &= q_2 - \frac{\pi}{2} \\
 q_3 &= q_3 + \frac{\pi}{2} \\
 q_4 &= q_4 - \frac{\pi}{2} \\
 q_5 &= q_5
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Glede na tabelo 2.1 zapišemo transformacije med koordinatnimi sistemi sklepov po Denavit-Hartenberg-ovem zapisu:

$$A_i = Rot(z, q_i) Trans(0, 0, d_i) Trans(a_i, 0, 0) Rot(x, \alpha_i)
 \tag{2.21}$$

Transformacije  $A_i$  se za robot ASEA glasijo:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & -\sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & \cos q_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \tag{2.22}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & a_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & a_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & a_3 \cos q_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & a_3 \sin q_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & -\sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & \cos q_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Transformacija iz baznega koordinatnega sistema v vrhnjega je produkt vseh petih transformacijskih matrik in je zapisana s transformacijsko matriko  $T_5$ :

$$T_5 = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned}
n_x &= \cos q_1 \cos(q_2+q_3+q_4) \cos q_5 + \sin q_1 \sin q_5 \\
o_x &= \cos q_5 \sin q_1 - \cos q_1 \cos(q_2+q_3+q_4) \sin q_5 \\
a_x &= -\cos q_1 \sin(q_2+q_3+q_4) \\
p_x &= a_2 \cos q_1 \cos q_2 + a_3 \cos q_1 \cos(q_2+q_3) - d_5 \cos q_1 \sin(q_2+q_3+q_4) \\
n_y &= \cos(q_2+q_3+q_4) \cos q_5 \sin q_1 - \cos q_1 \sin q_5 \\
o_y &= -\cos q_1 \cos q_5 - \cos(q_2+q_3+q_4) \sin q_1 \sin q_5 \\
a_y &= -\sin q_1 \sin(q_2+q_3+q_4) \\
p_y &= a_2 \cos q_2 \sin q_1 + a_3 \cos(q_2+q_3) \sin q_1 - d_5 \sin q_1 \sin(q_2+q_3+q_4) \\
n_z &= -\cos q_5 \sin(q_2+q_3+q_4) \\
o_z &= \sin(q_2+q_3+q_4) \sin q_5 \\
a_z &= -\cos(q_2+q_3+q_4) \\
p_z &= d_1 - d_5 \cos(q_2+q_3+q_4) - a_2 \sin q_2 - a_3 \sin(q_2+\phi_3)
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Parametri  $n_i$ ,  $o_i$  in  $a_i$  določajo orientacijo, parametri  $p_i$  pa pozicijo zadnjega koordinatnega sistema v prostoru. Orientacijski parametri so enotski vektorji vzdolž osi baznega koordinatnega sistema.

Zapis orientacije zadnjega koordinatnega sistema s samo tremi parametri izvedemo z "Roll-Pitch-Yaw" (*RPY*) zapisom:

$$RPY = RPY(\psi_z, \psi_y, \psi_x) = Rot(z, \psi_z) Rot(y, \psi_y) Rot(x, \psi_x) \tag{2.29}$$

Parametri *RPY* zapisa so koti zasukov okoli osi baznega koordinatnega sistema. Izračunani s štirikvadrantno arctan funkcijo so enaki:

$$\begin{aligned}
R &= \psi_z = \text{atan2}(n_y, n_x) \\
P &= \psi_y = \text{atan2}(-n_z, n_x \cos \psi_z + n_y \sin \psi_z) \\
Y &= \psi_x = \text{atan2}(-a_y \cos \psi_z + a_x \sin \psi_z, o_y \cos \psi_z - o_x \sin \psi_z) .
\end{aligned} \tag{2.30}$$

## 2.3.2 Inverzna kinematika

Rešitev inverznega kinematičnega problema podaja položaje motorjev glede na želen položaj vrha robota, ki ga predpišemo v baznem koordinatnem sistemu. Željena pozicija in orientacija vrha je določena s  $T_5$  matriko:

$$T_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Orientacija vrha je lahko podana tudi z Roll-Pitch-Yaw zapisom. V tem primeru najprej preračunamo parametre *RPY* zapisa v orientacijske enotske vektorje  $n_i$ ,  $o_i$  in  $a_i$  matrike  $T_5$  po enačbi (2.32):

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\psi_z \cos\psi_y \\ n_y &= \sin\psi_z \cos\psi_y \\ n_z &= -\sin\psi_y \\ o_x &= \cos\psi_z \sin\psi_y \sin\psi_x - \sin\psi_z \cos\psi_x \\ o_y &= \sin\psi_z \sin\psi_y \sin\psi_x + \cos\psi_z \cos\psi_x \\ o_z &= \cos\psi_y \sin\psi_x \\ a_x &= \cos\psi_z \sin\psi_y \cos\psi_x + \sin\psi_z \sin\psi_x \\ a_y &= \sin\psi_z \sin\psi_y \cos\psi_x - \cos\psi_z \sin\psi_x \\ a_z &= \cos\psi_y \cos\psi_x \end{aligned} \quad (2.32)$$

Izpeljavo inverznih kinematičnih enačb izvedemo po nasvetu Fuja in Gonzalesa [32], ki pravita da osamimo neznani kot  $q_i$  v sistemu enačb, če premultipliramo enačbo (2.27) z matriko  $A_1^{-1}$ . Izpeljavo opravimo s primerjavo istoležnih členov na levi in desni strani dobljene enačbe:

$$A_1^{-1} T_5 = A_2 A_3 A_4 A_5 \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

kjer so elementi matrike na levi strani:

$$\begin{aligned} r_{11} &= n_x \cos q_1 + n_y \sin q_1 \\ r_{12} &= o_x \cos q_1 + o_y \sin q_1 \\ r_{13} &= a_x \cos q_1 + a_y \sin q_1 \\ r_{14} &= p_x \cos q_1 + p_y \sin q_1 \\ r_{21} &= -n_z \\ r_{22} &= -o_z \\ r_{23} &= -a_z \\ r_{24} &= d_1 - p_z \\ r_{31} &= n_y \cos q_1 - n_x \sin q_1 \\ r_{32} &= o_y \cos q_1 - o_x \sin q_1 \\ r_{33} &= a_y \cos q_1 - a_x \sin q_1 \\ r_{34} &= p_y \cos q_1 - p_x \sin q_1 \end{aligned} \quad (2.37)$$

in elementi matrike na desni strani:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \cos(q_2 + q_3 + q_4) \cos q_5 \\ d_{12} &= -\cos(q_2 + q_3 + q_4) \sin q_5 \\ d_{13} &= -\sin(q_2 + q_3 + q_4) \\ d_{14} &= a_2 \cos q_2 + a_3 \cos(q_2 + q_3) - d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\ d_{21} &= \cos q_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\ d_{22} &= -\sin(q_2 + q_3 + q_4) \sin q_5 \\ d_{23} &= \cos(q_2 + q_3 + q_4) \\ d_{24} &= d_5 \cos(q_2 + q_3 + q_4) + a_2 \sin q_2 + a_3 \sin(q_2 + q_3) \\ d_{31} &= -\sin q_5 \\ d_{32} &= -\cos q_5 \\ d_{33} &= 0 \\ d_{34} &= 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

S primerjavo elementov z indeksi 34 dobimo enačbo:

$$p_y \cos q_1 - p_x \sin q_1 = 0 \quad (2.37)$$



ki da rešitev za kot  $q_j$ :

$$q_1 = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad (2.38)$$

Elementi z indeksi 31 in 32 dajo enačbi:

$$-\sin q_5 = n_y \cos q_1 - n_x \sin q_1 \quad (2.39)$$

$$-\cos q_5 = o_y \cos q_1 - o_x \sin q_1 \quad (2.40)$$

Če uredimo predznake in enačbi delimo dobimo enačbo:

$$\tan(-q_5) = \frac{n_y \cos q_1 - n_x \sin q_1}{-o_y \cos q_1 + o_x \sin q_1} \quad (2.41)$$

Rezultat operacije je kot  $q_5$ :

$$q_5 = -\text{atan2}(n_y \cos q_1 - n_x \sin q_1, -o_y \cos q_1 + o_x \sin q_1) \quad (2.42)$$

Elementi z indeksi 23 in 13 dajo enačbi:

$$\begin{aligned} -a_z &= \cos(q_2 + q_3 + q_4) \\ a_x \cos q_1 + a_y \sin q_1 &= -\sin(q_2 + q_3 + q_4) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Kvocienit prve enačbe z drugo da enačbo:

$$\tan(-(q_2 + q_3 + q_4)) = \frac{a_x \cos q_1 + a_y \sin q_1}{-a_z}, \quad (2.44)$$

iz katere dobimo kot rezultat vsoto kotov  $q_2$ ,  $q_3$  in  $q_4$ :

$$(q_2 + q_3 + q_4) = -\text{atan2}(a_x \cos q_1 + a_y \sin q_1, -a_z) \quad (2.45)$$

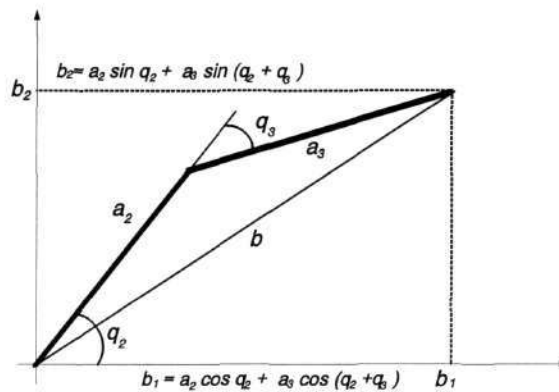
V nadaljni izpeljavi definiramo dve vmesni spremenljivki  $b_1$  in  $b_2$ , ki sta v tej fazi že izračunljivi:

$$\begin{aligned} b_1 &= p_x \cos q_1 + p_y \sin q_1 + d_5 \sin (q_2 + q_3 + q_4) \\ b_2 &= d_1 - p_z - d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Če v enačbo (2.46) vstavimo izraze za  $p_x$ ,  $p_y$  in  $p_z$ , ki smo jih izračunali z izpeljavo  $T_5$  matrike (glej sklop enačb (2.28)), dobimo:

$$\begin{aligned} b_1 &= a_2 \cos q_2 + a_3 \cos (q_2 + q_3) \\ b_2 &= a_2 \sin q_2 + a_3 \sin (q_2 + q_3) \end{aligned} \quad (2.47)$$

Geometrijski pomen spremenljivk  $b_1$  in  $b_2$  predstavlja slika 2.10. Parametra  $a_2$  in  $a_3$  na sliki sta dolžini drugega in tretjega segmenta.



Slika 2.10: Geometrijski pomen spremenljivk  $b_1$  in  $b_2$

Glede na kosinusni izrek lahko s slike 2.10 zapišemo:

$$b^2 = a_2^2 + a_3^2 - 2 a_2 a_3 \cos q_3, \quad (2.48)$$

kjer je

$$b^2 = b_1^2 + b_2^2. \quad (2.49)$$

Iz (2.48) lahko zapišemo enačbo:

$$\cos q_3 = \frac{b_1^2 + b_2^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 a_2 a_3}, \quad (2.50)$$

ki vsebuje rešitev za  $q_3$ :

$$q_3 = \arccos \left[ \frac{b_1^2 + b_2^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 a_2 a_3} \right] \quad (2.51)$$

Če izraza za spremenljivki  $b_1$  in  $b_2$  (2.47) nekoliko preoblikujemo:

$$\begin{aligned} b_1 &= a_2 \cos q_2 + a_3 \cos (q_2 + q_3) = a_2 \cos q_2 + a_3 \cos q_2 \cos q_3 - a_3 \sin q_2 \sin q_3 \\ b_2 &= a_2 \sin q_2 + a_3 \sin (q_2 + q_3) = a_2 \sin q_2 + a_3 \sin q_2 \cos q_3 + a_3 \cos q_2 \sin q_3, \end{aligned} \quad (2.52)$$

dobimo sistem dveh enačb z dvema neznankama:

$$\begin{aligned} b_1 &= (a_2 + a_3 \cos q_3) \cos q_2 - (a_3 \sin q_3) \sin q_2 \\ b_2 &= (a_2 \sin q_3) \cos q_2 + (a_2 + a_3 \cos q_3) \sin q_2 \end{aligned} \quad (2.53)$$

Rešitev sistema enačb je:

$$\begin{aligned} \cos q_2 &= \frac{(a_3 \sin q_3) b_2 + (a_2 + a_3 \cos q_3) b_1}{(a_2 + a_3 \cos q_3)^2 + (a_3 \sin q_3)^2} \\ \sin q_2 &= \frac{(a_2 + a_3 \cos q_3) b_2 - (a_3 \sin q_3) b_1}{(a_2 + a_3 \cos q_3)^2 + (a_3 \sin q_3)^2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Iz česar lahko izračunamo kot  $q_2$ :

$$q_2 = \operatorname{atan2} (a_2 b_2 + a_3 b_2 \cos q_3 - a_3 b_1 \sin q_3, a_3 b_2 \sin q_3 + a_2 b_1 + a_3 b_1 \cos q_3) \quad (2.55)$$

Preostali neznani kot  $q_4$  izračunamo iz razlike kotov:

$$q_4 = (q_2 + q_3 + q_4) - q_2 - q_3 \quad (2.56)$$

Da določimo položaju robota, ki ga prikazuje slika 2.9 vrednosti kotov  $q_i = 0$ , opravimo korekcijo izračunanih kotov:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= q_1 \\
 q_2 &= q_2 + \frac{\pi}{2} \\
 q_3 &= q_3 - \frac{\pi}{2} \\
 q_4 &= q_4 + \frac{\pi}{2} \\
 q_5 &= q_5
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

Zasuke motorjev, ki so potrebni, da postavimo sklepe robota na izračunane položaje  $q_i$ , izpeljemo iz enačb (2.5), (2.10), (2.16), (2.17), (2.19):

$$M_1 = -158 q_1 \tag{2.58}$$

$$M_2 = 72 (\sqrt{-69054.02 \cos(q_2 + 66.95^\circ) + 80377.94} - 229.1) \tag{2.59}$$

$$M_3 = 72 (\sqrt{-69054.02 \cos(q_3 + q_2 + 50.54^\circ) + 79504.58} - 188.68) \tag{2.60}$$

$$M_4 = -128 (q_4 + q_3 + q_2) \tag{2.61}$$

$$M_5 = 76 (q_5 - 1.6842 (q_4 + q_3 + q_2)) \tag{2.62}$$

## 2.4 Sledenje trajektorije v prostoru

Vodenje robota z uporabo inverznega kinematičnega modela iz poglavja 2.3.2 omogoča gibanje robota od točke do točke v zunanjih koordinatah. Za nalogo robotskega sledenja trajektorije v prostoru samo kinematični model ne zadostuje. Potrebno je poiskati relacijo med vektorjema hitrosti zunanjih in notranjih koordinat ter na podlagi računanja diferencialnih pomikov izvajati hitrostno krmiljenje.

Vektor hitrosti zunanjih koordinat je razdeljen na komponente hitrosti vzdolž osi zunanjega koordinatnega sistema ter na komponente kotnih hitrosti vrtenja okoli osi istega koordinatnega sistema:

$$du = [ dp, d\phi ]^T \quad (2.63)$$

Vektor hitrosti notranjih koordinat pa sestavljajo hitrosti vrtenja posameznih sklepov

$$dq = [ dq_i ] \quad (2.64)$$

Zveza med vektorjema hitrosti je določena preko Jacobijeve matrike  $J(q)$ :

$$du = J(q) dq \quad (2.65)$$

Algoritem izračuna Jacobijeve matrike temelji na odvajanju medsebojnih produktov transformacijskih matrik  $A_i$  [33]. Vsak element Jacobijeve matrike z indeksi  $ij$  opisuje doprinos hitrosti vrtenja  $j$ -tega sklepa k hitrosti  $i$ -te zunanje koordinate:

$$J(q) = [ j_{ij} ] = \left[ \begin{array}{c} \frac{\partial u_i}{\partial q_j} \end{array} \right] \quad (2.66)$$

Jacobijeva matrika robota ASEA IRb 6 ima dimenzije 6x5. Njeno izpeljavo v simboličnem zapisu smo izvedli s programskim paketom *MATHEMATICA-ROBOTICA* [35]. Posamezne elemente matrike podaja sklop enačb (2.67):

$$\begin{aligned}
\dot{j}_{11} &= -\sin q_1 (a_2 \cos q_2 + a_3 \cos (q_2 + q_3) - d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4)) \\
\dot{j}_{12} &= -\cos q_1 (d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) + a_2 \sin q_2 + a_3 \sin(q_2 + q_3)) \\
\dot{j}_{13} &= -\cos q_1 (d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) + a_3 \sin(q_2 + q_3)) \\
\dot{j}_{14} &= -d_5 \cos q_1 \cos (q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{15} &= 0 \\
\dot{j}_{21} &= \cos q_1 (a_2 \cos q_2 + a_3 \cos (q_2 + q_3) - d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4)) \\
\dot{j}_{22} &= -\sin q_1 (d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) + a_2 \sin q_2 + a_3 \sin(q_2 + q_3)) \\
\dot{j}_{23} &= -\sin q_1 (d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) + a_3 \sin(q_2 + q_3)) \\
\dot{j}_{24} &= -d_5 \cos (q_2 + q_3 + q_4) \sin q_1 \\
\dot{j}_{25} &= 0 \\
\dot{j}_{31} &= 0 \\
\dot{j}_{32} &= -a_2 \cos q_2 - a_3 \cos (q_2 + q_3) + d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{33} &= -a_3 \cos (q_2 + q_3) + d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{34} &= d_5 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{35} &= 0 \\
\dot{j}_{41} &= 0 \\
\dot{j}_{42} &= -\sin q_1 \\
\dot{j}_{43} &= -\sin q_1 \\
\dot{j}_{44} &= -\sin q_1 \\
\dot{j}_{45} &= -\cos q_1 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{51} &= 0 \\
\dot{j}_{52} &= \cos q_1 \\
\dot{j}_{53} &= \cos q_1 \\
\dot{j}_{54} &= \cos q_1 \\
\dot{j}_{55} &= -\sin q_1 \sin(q_2 + q_3 + q_4) \\
\dot{j}_{61} &= 1 \\
\dot{j}_{62} &= 0 \\
\dot{j}_{63} &= 0 \\
\dot{j}_{64} &= 0 \\
\dot{j}_{65} &= -\cos (q_2 + q_3 + q_4)
\end{aligned} \tag{2.67}$$

Hitrostno krmiljenje robota v zunanjih koordinatah je osnovano na računanju diferencialnih pomikov motorjev v časovnem intervalu glede na vektor hitrosti zunanjih koordinat. Diferencialni pomik motorja izražen v časovni enoti je hitrost vrtenja motorja. Prvi del hitrostne transformacije iz zunanjih koordinat v koordinate sklepov zapišemo z obratom enačbe (2.65):

$$dq = J(q)^{-1} du \tag{2.68}$$

Ker Jacobijeva matrika robota ASEA ni kvadratne oblike računamo inverzno Jacobijevo matriko preko psevdoinverzne Jacobijeve matrike. S tem enačba (2.68) dobi obliko:

$$dq = [J^T J]^{-1} J^T du \quad (2.69)$$

Hitrostno krmiljenje v realnem času zahteva izračun vektorja hitrosti nekaj desetkrat na sekundo. Za pospešitev izračuna smo zato namesto klasičnega izračuna obrata matrike posegli po numerični metodi LU razcepa matrike [34]. Kvadratno matriko  $J^T J$  z elementi  $[a_{ij}]$  razcepimo na produkt dveh matrik, spodnje trikotne  $L$  in zgornje trikotne  $U$ . Algoritem za izračun elementov matrike  $L$  ( $l_{ij}$ ) in elementov matrike  $U$  ( $u_{ij}$ ) se glasi:

$$\begin{aligned} u_{1k} &= a_{1k}, \quad k = 1, 2, \dots, n \\ u_{jk} &= a_{jk} - \sum_{s=1}^{j-1} l_{js} u_{sk}, \quad k = j, \dots, n, \quad j \geq 2 \\ l_{j1} &= \frac{a_{j1}}{u_{11}}, \quad j = 2, \dots, n \\ l_{jk} &= \frac{1}{u_{kk}} \left( a_{jk} - \sum_{s=1}^{k-1} l_{js} u_{sk} \right), \quad j = k+1, \dots, n, \quad k \geq 2. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Inverzna matrika  $[J^T J]^{-1}$  dimenzije  $5 \times 5$  se s pomočjo LU-razcepa izračuna kot:

$$[J^T J]^{-1} = U^{-1} L^{-1} \quad (2.71)$$

Ker obsega izračun obrata trikotne matrike precej manj računskih korakov, kot v primeru kvadratne matrike smo s to metodo povečali hitrost izračuna vektorja hitrosti za približno dvakrat.

Drugi del hitrostne transformacije iz kotov sklepov v kote motorjev smo izpeljali z odvajanjem enačb (2.58)-(2.62):

$$dM_1 = -158 dq_1 \quad (2.72)$$

$$dM_2 = \frac{2.48 \cdot 10^6 \sin(q_2 + 66.95^\circ) dq_2}{\sqrt{80377.94 - 69054 \cos(q_2 + 66.95^\circ)}} \quad (2.73)$$

$$dM_3 = \frac{2.48 \cdot 10^6 \sin(q_3 + q_2 + 50.54^\circ) (dq_3 + dq_2)}{\sqrt{79504.58 - 69054 \cos(q_3 + q_2 + 66.95^\circ)}} \quad (2.74)$$

$$dq = [J^T J]^{-1} J^T du \quad (2.69)$$

Hitrostno krmiljenje v realnem času zahteva izračun vektorja hitrosti nekaj desetkrat na sekundo. Za pospešitev izračuna smo zato namesto klasičnega izračuna obrata matrike posegli po numerični metodi LU razcepa matrike [34]. Kvadratno matriko  $J^T J$  z elementi  $[a_{ij}]$  razcepimo na produkt dveh matrik, spodnje trikotne  $L$  in zgornje trikotne  $U$ . Algoritem za izračun elementov matrike  $L$  ( $l_{ij}$ ) in elementov matrike  $U$  ( $u_{ij}$ ) se glasi:

$$\begin{aligned} u_{1k} &= a_{1k}, & k &= 1, 2, \dots, n \\ u_{jk} &= a_{jk} - \sum_{s=1}^{j-1} l_{js} u_{sk}, & k &= j, \dots, n, \quad j \geq 2 \\ l_{j1} &= \frac{a_{j1}}{u_{11}}, & j &= 2, \dots, n \\ l_{jk} &= \frac{1}{u_{kk}} \left( a_{jk} - \sum_{s=1}^{k-1} l_{js} u_{sk} \right), & j &= k+1, \dots, n, \quad k \geq 2. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Inverzna matrika  $[J^T J]^{-1}$  dimenzije 5x5 se s pomočjo LU-razcepa izračuna kot:

$$[J^T J]^{-1} = U^{-1} L^{-1} \quad (2.71)$$

Ker obsega izračun obrata trikotne matrike precej manj računskih korakov, kot v primeru kvadratne matrike smo s to metodo povečali hitrost izračuna vektorja hitrosti za približno dvakrat.

Drugi del hitrostne transformacije iz kotov sklepov v kote motorjev smo izpeljali z odvajanjem enačb (2.58)-(2.62):

$$dM_1 = -158 dq_1 \quad (2.72)$$

$$dM_2 = \frac{2.48 \cdot 10^6 \sin(q_2 + 66.95^\circ) dq_2}{\sqrt{80377.94 - 69054 \cos(q_2 + 66.95^\circ)}} \quad (2.73)$$

$$dM_3 = \frac{2.48 \cdot 10^6 \sin(q_3 + q_2 + 50.54^\circ) (dq_3 + dq_2)}{\sqrt{79504.58 - 69054 \cos(q_3 + q_2 + 66.95^\circ)}} \quad (2.74)$$



$$dM_4 = -128 (dq_4 + dq_3 + dq_2) \quad (2.75)$$

$$dM_5 = 76 (dq_5 - 1.6842 (dq_4 + dq_3 + dq_2)) \quad (2.76)$$

Predstavljeni algoritmi kinematičnih transformacij so uporabljeni pri vodenju robota ASEA. Algoritmi tečejo na glavnem PC procesorju in so napisani v programskem jeziku *Pascal*.

Z novim krmilnikom robot ASEA glede funkcionalnih zmožnosti dosega sodobne industrijske robote. Poleg tega krmilnik omogoča odprto programsko arhitekturo, kar odpira možnosti eksperimentiranja in razvoj novih algoritmov vodenja.

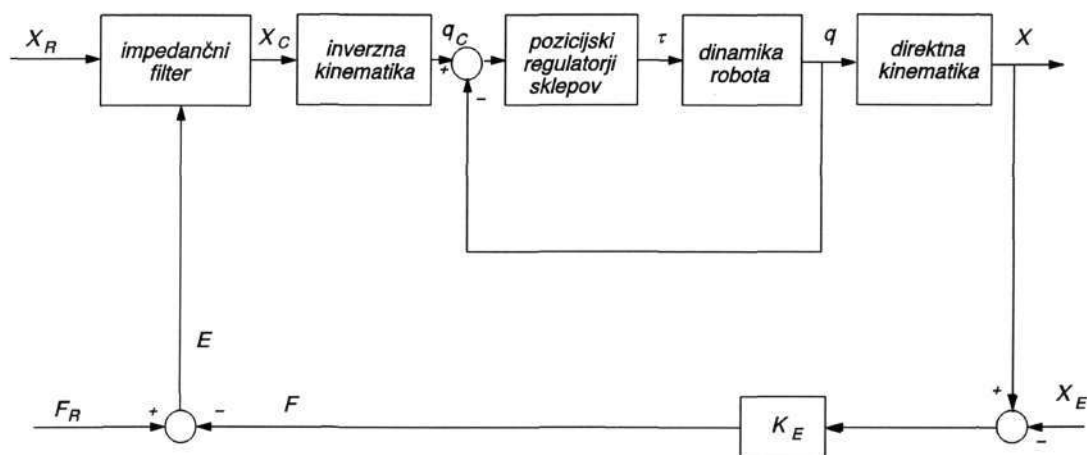
## 3 Krmiljenje robota ASEA IRb 6 v dotiku z okoljem

Pri delovnih opravilih, kot so vrtanje, brušenje, poliranje ali sestavljanje mehanskih delov, med vrhom robota in okoljem nastopajo sile in navori. Za izvršitev teh nalog brez mehanskih deformacij je potrebno krmiliti gibanje robota glede na sile dotika. V ta namen sem za primere interakcij industrijskega robota ASEA IRb 6 z okoljem načrtal impedančni krmilnik. Krmilnik je osnovan na pozicijskem vodenju, kar pomeni, da ga sestavljata dva ločena podsklopa. Notranji podsklop, krmilnik položaja, zagotavlja sledenje pozicije, katero predhodno definira zunanja zanka. Zunanji regulacijski krog je zaključen preko merjenja sile v robotskem zapestju.

### 3.1 Zasnova robotskega impedančnega krmilnika

Krmiljenje mehanske impedance robota na podlagi generiranja trajektorije podrejenemu pozicijskemu regulatorju je pristop, ki omogoča praktično implementacijo impedančnega krmiljenja pri industrijskih robotih. Ker naloge robotov v industriji obsegajo predvsem interakcije s togimi okolji, so bile pri načrtovanju krmilnika upoštevane ugotovitve Volpeja in Khosle [21]. Referenčne hitrosti so ob dotiku s togim okoljem enake nič, zaradi česar impedančni krmilnik tedaj funkcionira kot eksplicitni krmilnik sile. Glede na to dejstvo sta Seraji in Colbaugh [23] predlagala zasnovo impedančnega krmilnika z dodatnim signalom referenčne sile. Slika 3.1 prikazuje temeljne elemente impedančnega krmilnika takšne vrste.

Vektor  $X_R$  predstavlja želeno trajektorijo gibanja vrha manipulatorja, vektor  $X_C$  krmilno trajektorijo pozicijskemu regulatorju in vektor  $X$  dejanski položaj vrha. Vrednost  $X_E$  označuje položaj okolja. Vektorja sil  $F_R$  in  $F$  sta referenčna in merjena sila,  $E$  pa je pogrešek med njima. Vsi vektorji pozicij in sil so izraženi v Kartezijevem koordinatnem sistemu.



Slika 3.1: Impedančni krmilnik osnovan na pozicijskem vodenju

Za vzpostavitev določene sile v dotiku je, ob uporabi pozicijskega vodenja, potrebno definirati želeni položaj manipulatorja v notranjosti okolja, ki ga vrh zaradi geometrijskih omejitev okolja ni sposoben doseči. S tem je zagotovljena pozicijska napaka, na katero se krmilnik položaja odziva z dodatnimi momenti v motorjih in na ta način izvaja silo na podlago. Krmilna trajektorija  $X_C$ , referenčna vrednost robotskemu pozicijskemu regulatorju, je sestavljena iz želene trajektorije gibanja  $X_R$  in spremembe položaja zaradi sile dotika  $X_p$  ( $X_C = X_R + X_p$ ). Kadar se manipulator prosto giblje po prostoru, je vrednost  $X_C$  enaka  $X_R$ . V trenutku, ko nastopi dotik z okoljem, senzor sil, nameščen na vrhu robota, zazna silo  $F$  in ta informacija je preko povratne zanke uporabljena za modifikacijo  $X_C$  v smislu zagotovitve sledenja referenčne sile.

Blok s slike 3.1 z imenom impedančni filter je blok s prenosno funkcijo drugega reda. Prenosna funkcija določa dinamično relacijo med pozicijo in pogreškom sile v obliki impedančne enačbe:

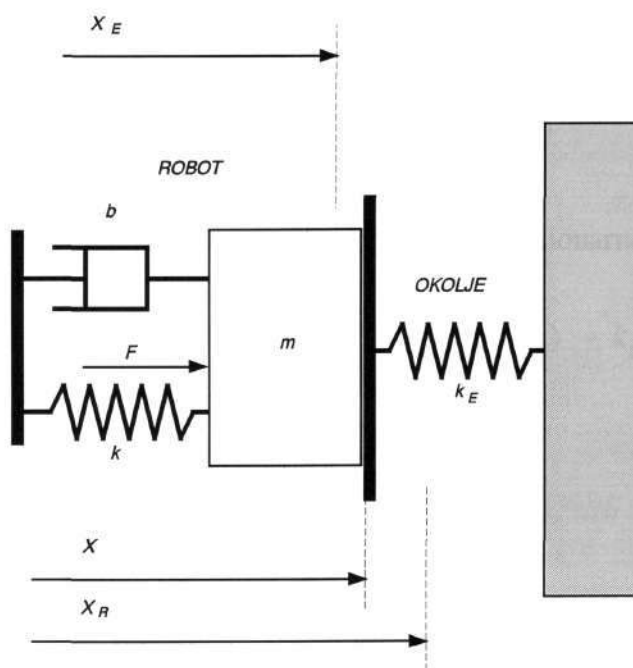
$$E = M \ddot{X}_C + B \dot{X}_C + K (X_C - X_R) \quad (3.1)$$

Diagonalne matrike  $M$ ,  $B$  in  $K$  vsebujejo parametre želene vztrajnosti, dušenja in togosti robotskega vrha po posameznih oseh. S spreminjanjem parametrov uporabnik spreminja

dinamično obnašaje robota v dotiku.

Opis razmer dotika robota z okoljem zahteva določen model dotika. Ta je ponavadi definiran s poenostavitvami in linearizacijo razmer. V našem primeru predpostavimo okolje kot linearno vzmet s konstanto elastičnosti  $K_E$ . Merjena sila na vrhu robota je v tem primeru enaka produktu konstante elastičnosti vzmeti in velikosti odmika vzmeti iz ničelne lege. Velikost odmika vzmeti ponazarja prodiranje manipulatorja v podlago, na katero pritiska. Model dotika robot-okolje opisujeta enačba (3.2), ki podaja silo dotika in slika 3.2, ki je shematični prikaz dotika robota z okoljem določene elastičnosti. Slika navaja položaj okolja ter dejanski in želen položaj vrha robota ob dotiku.

$$F = K_E \Delta X = K_E (X - X_E) \quad (3.2)$$



**Slika 3.2:** Model dotika robot-okolje

V nadaljni obravnavi predpostavimo, da je robot opremljen z idealnimi pozicijskimi regulatorji v sklepih. Idealni regulatorji zagotavljajo da je položaj manipulatorja v vsakem trenutku enak krmilni poziciji na vhodu ( $X \approx X_C$ ). S tem se v postopku izpeljave izognemo

modeliranju dinamike mehanizma robota in prevladujoče dinamike aktuatorjev. Poenostavitev omogoči, da neodvisno obravnavamo posamezne koordinate Kartezijevega prostora. Tako zdaj zapišemo prejšnje vektorje pozicij in sil ( $X$  in  $F$ ) kot skalarje z malimi črkami in ti zdaj predstavljajo posamezne komponente vektorjev.

S slike 3.1 lahko za eno prostostno stopnjo zapišemo pogrešek sile:

$$e = f_R - f = f_R - k_E(x - x_E) \quad (3.3)$$

Predpostavka  $x = x_C$  v enači (3.1) skupaj z enačbo (3.3) da enačbo dinamike pogreška sile:

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + (k + k_E)e = k(f_R + k_E x_E) - k k_E x_R \quad (3.4)$$

iz katere je razvidno, da je možno tudi s primernim generiranjem referenčne trajektorije  $x_R$  na vhodu vplivati na potek pogreška sile.

Vpliv referenčne trajektorije  $x_R$  na pogrešek sile  $e$  lahko preučimo z analizo sistema v stacionarnem stanju. Takrat je  $x_R$  konstanta in Laplaceov transform enačbe (3.4) da enačbo:

$$e(s) = \frac{k(f_R + k_E x_E) - k k_E x_R}{s(m s^2 + b s + (k + k_E))} \quad (3.5)$$

S teoremom končne vrednosti je definiran pogrešek sile v stacionarnem stanju:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s) = \frac{k}{k + k_E} [(f_R + k_E x_E) - k_E x_R] \quad (3.6)$$

ki je enak nič ( $e_{ss} = 0$ ), le kadar izberemo za  $x_R$  vrednost

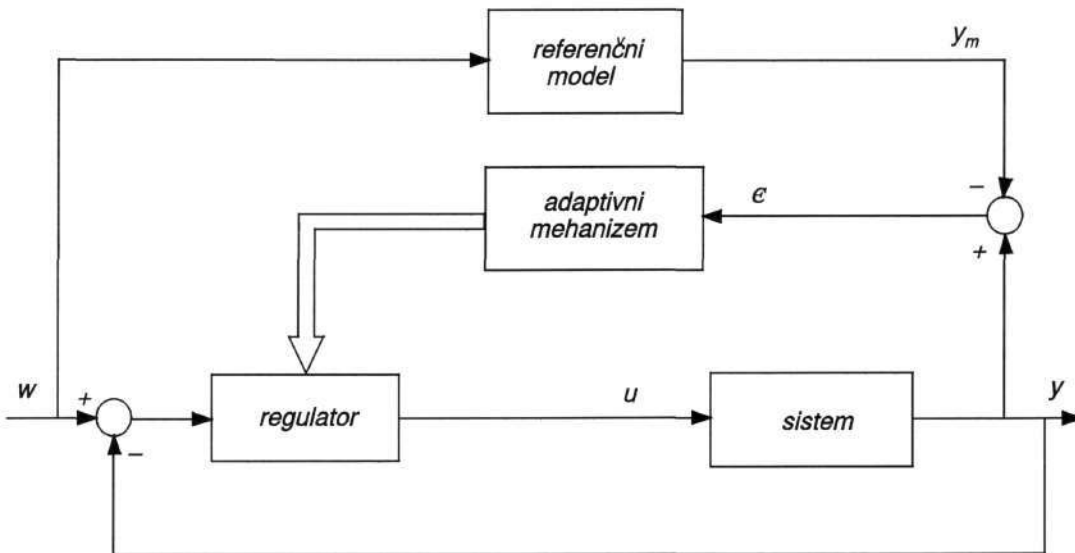
$$x_R = \frac{f_R}{k_E} + x_E \quad (3.7)$$

Iz tega sklepamo, da je z vnaprejšnim zanesljivim poznavanjem položaja okolja  $x_E$  in konstante elastičnosti okolja  $k_E$  možno po enačbi (3.7) določiti referenčno pozicijsko trajektorijo  $x_R$ , tako da je dosežena željena sila dotika. V praksi vrednosti  $x_E$  in  $k_E$  ponavadi nista poznani in ker je konstanta elastičnosti togih okolij  $k_E$  velika, lahko pride do velikih odstopanj med željeno in dejansko silo. Zaradi tega uvedemo dodatni adaptivni krmilni algoritem, ki bo zagotavljal sledenje referenčne sile ob nepoznanih parametrih okolja.

## 3.2 Adaptivna krmilna shema

Zaradi nepoznavanja parametrov okolja uvedemo v impedančni krmilnik adaptivni algoritem računanja referenčne trajektorije  $x_R$ . Uporabimo pristop modelno referenčne adaptivne regulacije (*model reference adaptive control - MRAC*). Ideja temelji na adaptivnem spreminjanju parametrov regulatorja v smislu prilagajanja odziva zaprtozančnega reguliranega procesa predpisanemu želenemu odzivu.

Slika 3.3 opisuje osnovno strukturo modelno referenčnega adaptivnega krmilnika. Zaradi nezadostnega poznavanja procesa, ko nekateri sistemski parametri niso poznani, uvedemo dodaten regulator s spremenljivimi parametri. Parametri regulatorja se adaptirajo tako, da minimizirajo razliko  $\epsilon$  med dejanskim in želenim izhodom procesa. Adaptacija parametrov regulatorja je zagotovljena z adaptivnimi zakoni izpeljanimi s pomočjo stabilnostne teorije nelinearnih sistemov, ki so npr. optimizacija lokalnih parametrov ali Ljapunova teorija globalne stabilnosti [24]. Oblika želenega odziva zaprtozančnega procesa je definirana s prenosno funkcijo referenčnega modela.



**Slika 3.3:** Struktura adaptivnega sistema vodenega s pomočjo modelno referenčne adaptivne regulacije

V primeru robotskega krmiljenja sile dotika želimo vplivati na potek pogreška sile  $e$ . Zaradi tega je ta izbran za regulirano veličino oz. izhod procesa s slike 3.3.

Za regulator z adaptivno nastavljenimi parametri, ki bo na svojem izhodu generiral pozicijsko referenčno trajektorijo  $x_R$  izberemo regulator oblike:

$$x_R = f(t) + k_p(t) e + k_d(t) \dot{e} . \quad (3.8)$$

Parametri  $f(t)$ ,  $k_p(t)$  in  $k_d(t)$  so adaptivno nastavljeni parametri.  $k_p(t)$  in  $k_d(t)$  sta proporcionalno in diferencialno ojačenje pogreška sile,  $f(t)$  pa pomožni signal.

Z vpeljavo izraza (3.8), ki podaja izračun  $x_R$  v enačbo (3.4) dobimo enačbo celotnega nastavljenega sistema v okviru modelno-referenčne adaptivne regulacije:

$$(3.9)$$

$$\ddot{e} + \left( \frac{b + k k_E k_d(t)}{m} \right) \dot{e} + \left( \frac{k + k_E + k k_E k_p(t)}{m} \right) e = \frac{k(f_R + k_E x_E - k_E f(t))}{m}$$

Parametre  $k_p(t)$ ,  $k_d(t)$  in  $f(t)$  nastavljamo glede na razliko med dejanskim odzivom sistema in odzivom predpisanega referenčnega modela.

Referenčni model zapišemo kot sistem drugega reda, ki daje na izhodu odziv na začetne pogoje:

$$\ddot{e}_m + 2\zeta\omega\dot{e}_m + \omega^2 e_m = 0 \quad (3.10)$$

kjer je  $\zeta$  predpisan faktor dušenja in  $\omega$  predpisana frekvenca nedušenega nihanja odziva pogreška v sili. Želen potek pogreška sile, ki ga določa izhod referenčnega modela  $e_m$ , je na ta način definiran tako, da ob dotiku pade z referenčne vrednosti sile  $f_R$  na vrednost nič po trajektoriji drugega reda določeni s parametri  $\zeta$  in  $\omega$ . Zapis referenčnega modela v matrični obliki podaja enačba (3.11):

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_m \\ \ddot{e}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_m \\ \dot{e}_m \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} e_m \\ \dot{e}_m \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Če zapišemo posamezne koeficiente enačbe (3.9) z malimi grškimi črkami

$$\ddot{e} + \alpha_1 \dot{e} + \alpha_2 e = \beta_0 \quad (3.12)$$

ter tvorimo razliko med koficienti enačb (3.12) in (3.10) dobimo:

$$\begin{aligned} \delta_{b_0} &= \beta_0 \\ \delta_{a_1} &= \alpha_1 - 2\zeta\omega \\ \delta_{a_2} &= \alpha_2 - \omega^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Z odštevanjem diferencialne enačbe osnovne zanke (3.12) in diferencialne enačbe referenčnega modela (3.10) tvorimo enačbo

$$(\ddot{e} - \ddot{e}_m) + \alpha_1 \dot{e} - 2\zeta\omega \dot{e}_m + \alpha_2 e - \omega^2 e_m = \beta_0 \quad , \quad (3.14)$$

ki jo nato z upoštevanjem bloka enačb (3.13) ter dejstva, da je razlika med željenim in dejanskim pogreškom enaka:

$$\epsilon = e - e_m \quad (3.15)$$

pretvorimo v obliko

$$\ddot{\epsilon} + 2\zeta\omega \dot{\epsilon} + \omega^2 \epsilon = -\delta_{a_1} \dot{e} - \delta_{a_2} e + \delta_{b_0} \quad . \quad (3.16)$$

Izračun adaptivnih zakonov izpeljemo preko Ljapunove teorije o stabilnosti nelinearnih sistemov. Za ta namen je potrebno izbrati Ljapunovo funkcijo  $V$ , ki mora zadostiti naslednjim zahtevam [25]:

- da je skalarna funkcija spremenljivk stanja,
- da je pozitivno definitna funkcija,
- da ima zvezne prve odvode.

Nekemu sistemu moremo prirediti neomejeno število funkcij Ljapunova. Raznolikost izbire narekuje uporabo izkustvenih navodil. V literaturi [25] najdemo priporočila za izbiro funkcije Ljapunova v obliki kvadratične forme:

$$V = G^T P G \quad , \quad (3.17)$$

kjer je vektor  $G = [\epsilon, \dot{\epsilon}]^T$  in matrika  $P$  matrika, ki zadosti Ljapunovi enačbi (3.18).



$$P D + D^T P = -Q \quad (3.18)$$

V enačbi (3.18) nastopa matrika  $D$ , ki izhaja iz enačbe (3.11) ter matrika  $Q$  z lastnostmi simetričnosti, realnosti in pozitivne definitnosti.

Avtorji Isermann, Lachmann in Matko [24] predlagajo za izračun adaptivnih zakonov v okviru MRAC uvedbo dodatnih členov k funkciji Ljapunova. V tem primeru ta dobi obliko:

$$V = G^T P G + \frac{1}{\gamma_0} [\delta_{b_0} + \gamma_0' q]^2 + \frac{1}{\gamma_1} [-\delta_{a_1} + \gamma_1' q \dot{e}]^2 + \frac{1}{\gamma_2} [-\delta_{a_2} + \gamma_2' q e]^2, \quad (3.19)$$

kjer so konstante  $\gamma_i$  in  $\gamma_i'$  pozitivna števila in spremenljivka  $q$  linearna kombinacija vrednosti  $\epsilon$  in  $\dot{\epsilon}$  uteženih s faktorjema  $w_p$  in  $w_d$  ( $q = w_p \epsilon + w_d \dot{\epsilon}$ ).

Če matrično enačbo (3.18) zapišemo v razširjeni obliki

$$\begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega^2 \\ 1 & -2\zeta\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 2q_{11} & 0 \\ 0 & 2q_{22} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

in jo rešimo glede na elemente matrike  $P$ , dobimo:

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{1}{2\zeta\omega} [(1 + 4\zeta^2) q_{11} + \omega^2 q_{22}] \\ p_2 &= \frac{q_{11}}{\omega^2} \\ p_3 &= \frac{1}{2\zeta\omega} \left( \frac{q_{11}}{\omega^2} + q_{22} \right) . \end{aligned} \quad (3.21)$$

Različna izbira pozitivnih konstant  $q_{11}$  in  $q_{22}$  daje različne rešitve za elemente  $p_i$ . Po Serajevem zgledu [26] izberemo:

$$\begin{aligned} q_{11} &= \omega^2 w_p \\ q_{22} &= 2\zeta\omega w_d - w_p , \end{aligned} \quad (3.22)$$

kar določi obliko matrike  $P$ :

$$P = \begin{bmatrix} 2\zeta\omega w_p + \omega^2 w_d & w_p \\ w_p & w_d \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Uvedba enačbe (3.23) v enačbo (3.19) nam da funkcijo Ljapunova:

$$V = 2\zeta\omega w_p \epsilon^2 + \omega^2 w_d \epsilon^2 + 2w_p \epsilon \dot{\epsilon} + w_d \dot{\epsilon}^2 + \frac{1}{\gamma_0} [\delta_{b_0} + \gamma_0' q]^2 + \frac{1}{\gamma_1} [-\delta_{a_1} + \gamma_1' q \dot{\epsilon}]^2 + \frac{1}{\gamma_2} [-\delta_{a_2} + \gamma_2' q e]^2. \quad (3.24)$$

Časovni odvod predlagane funkcije Ljapunova ima obliko

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 4\zeta\omega w_p \epsilon \dot{\epsilon} + 2\omega^2 w_d \epsilon \dot{\epsilon} + 2w_p \dot{\epsilon}^2 + 2w_p \epsilon \ddot{\epsilon} + 2w_d \dot{\epsilon} \ddot{\epsilon} + \\ & + \frac{2}{\gamma_0} [\delta_{b_0} + \gamma_0' q] [\delta_{b_0} + \gamma_0' \frac{d}{dt}(q)] + \\ & + \frac{2}{\gamma_1} [-\delta_{a_1} + \gamma_1' q \dot{\epsilon}] [-\dot{\delta}_{a_1} + \gamma_1' \frac{d}{dt}(q \dot{\epsilon})] + \\ & + \frac{2}{\gamma_2} [-\delta_{a_2} + \gamma_2' q e] [-\dot{\delta}_{a_2} + \gamma_2' \frac{d}{dt}(q e)] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Če v enačbi (3.25) zamenjamo  $\ddot{\epsilon}$  z izrazom, ki ga izpeljemo iz enačbe (3.16)

$$\ddot{\epsilon} = -2\zeta\omega \dot{\epsilon} - \omega^2 \epsilon - \delta_{a_1} \dot{\epsilon} - \delta_{a_2} e + \delta_{b_0}, \quad (3.26)$$

ter prištejemo in odštejemo člene  $2\gamma_0'(q)^2$ ,  $2\gamma_1'(q\dot{\epsilon})^2$ ,  $2\gamma_2'(qe)^2$ , dobimo:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -2\omega^2 w_p \epsilon^2 - 2\gamma_0' q^2 - 2\gamma_1' (q \dot{\epsilon})^2 - 2\gamma_2' (q e)^2 + [2w_p - 4\zeta\omega w_d] \dot{\epsilon}^2 + \\ & + 2(\delta_{b_0} + \gamma_0' q) \left\{ q + \frac{1}{\gamma_0} [\dot{\delta}_{b_0} + \gamma_0' \frac{d}{dt}(q)] \right\} + \\ & + 2(-\delta_{a_1} + \gamma_1' q \dot{\epsilon}) \left\{ q \dot{\epsilon} + \frac{1}{\gamma_1} [-\dot{\delta}_{a_1} + \gamma_1' \frac{d}{dt}(q \dot{\epsilon})] \right\} + \\ & + 2(-\delta_{a_2} + \gamma_2' q e) \left\{ q e + \frac{1}{\gamma_2} [-\dot{\delta}_{a_2} + \gamma_2' \frac{d}{dt}(q e)] \right\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Ljapunova teorija o stabilnosti nelinearnih sistemov pravi, da bo adaptivni sistem globalno stabilen, kadar najdemo takšno funkcijo Ljapunova, katere odvod  $\dot{V}$  bo semidefinitno

negativen ( $\dot{V} \leq 0$ ). Semidefinitno negativnost odvoda naše Ljapunove funkcije zagotovimo z izničenjem členov v zavutih oklepajih enačbe (3.27)

$$q + \frac{1}{\gamma_0} [\dot{\delta}_{b_0} + \gamma_0' \frac{d}{dt} q] = 0 \quad (3.28)$$

$$q \dot{e} + \frac{1}{\gamma_1} [-\dot{\delta}_{a_1} + \gamma_1' \frac{d}{dt} (q \dot{e})] = 0 \quad (3.29)$$

$$q e + \frac{1}{\gamma_2} [-\dot{\delta}_{a_2} + \gamma_2' \frac{d}{dt} (q e)] = 0 \quad (3.30)$$

skupaj z izpolnitvijo pogoja

$$\frac{w_p}{w_d} < 2 \zeta \omega \quad , \quad (3.31)$$

ki zagotavlja, da je člen v oglatem oklepaju v prvi vrstici enačbe (3.27) negativen. Pogoju (3.31) ob implementaciji zadostimo s primerno izbiro utežnostnih faktorjev  $w_d$  in  $w_p$ , izpolnjevanje pogojev (3.28)-(3.30) pa nas privede do adaptivnih zakonov. Rezultat preurejanja enačb (3.28)-(3.30) je sklop enačb:

$$\dot{\delta}_{b_0} = \dot{\beta}_0 = \frac{k k_E}{m} \dot{f} = -\gamma_0 q - \gamma_0' \frac{d}{dt} (q) \quad (3.32)$$

$$\dot{\delta}_{a_1} = \dot{\alpha}_1 = \frac{k k_E}{m} \dot{k}_d = \gamma_1 q \dot{e} + \gamma_1' \frac{d}{dt} (q \dot{e}) \quad (3.33)$$

$$\dot{\delta}_{a_2} = \dot{\alpha}_2 = \frac{k k_E}{m} \dot{k}_p = \gamma_2 q e + \gamma_2' \frac{d}{dt} (q e) \quad (3.34)$$

Z integracijo enačb (3.32), (3.33) in (3.34) izpeljemo zakone za adaptacijo parametrov  $f(t)$ ,  $k_p(t)$  in  $k_d(t)$ :

$$f(t) = f(0) - \frac{\gamma_0' m}{k k_E} q - \frac{\gamma_0 m}{k k_E} \int_0^t q dt \quad (3.35)$$

$$k_d(t) = k_d(0) + \frac{\gamma_1' m}{k k_E} q \dot{e} + \frac{\gamma_1 m}{k k_E} \int_0^t q \dot{e} dt \quad (3.36)$$

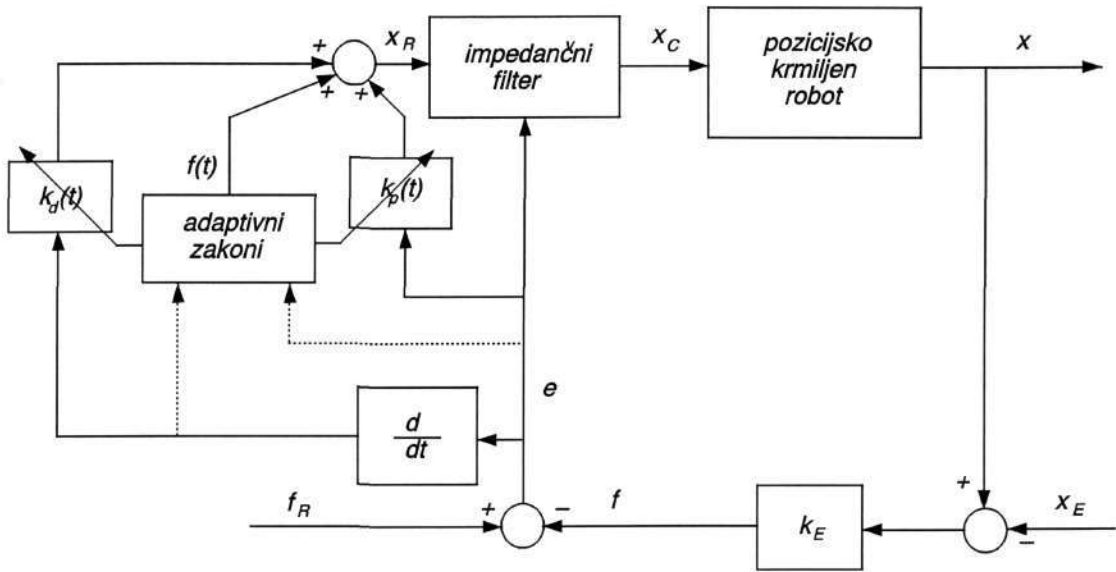
$$k_p(t) = k_p(0) + \frac{\gamma_2' m}{k k_E} q e + \frac{\gamma_2 m}{k k_E} \int_0^t q e dt \quad (3.37)$$

Če konstante adaptivnega regulatorja zapišemo s črkami  $a_i$ ,  $b_i$  in  $c_i$ , dobimo končno obliko adaptivnih zakonov:

$$\begin{aligned} f(t) &= f(0) - a_1 \int_0^t q dt - a_2 q \\ k_p(t) &= k_p(0) + b_1 \int_0^t q e dt + b_2 q e \\ k_d(t) &= k_d(0) + c_1 \int_0^t q \dot{e} dt + c_2 q \dot{e} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Konstanti  $w_p$  in  $w_d$  sta pozitivna utežnostna faktorja, konstante  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  in  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  pa pozitivna integralska in proporcionalna adaptivna ojačenja. Začetne vrednosti adaptivnih parametrov so izbrane tako, da zagotovijo primerno začetno vrednost  $x_R$  v trenutku dotika s podlago. Vrednost  $f(0)$  ima ob prostem gibanju robota v prostoru ( $q = 0$ ) vrednost želene, z okoljem neomejene, trajektorije gibanja.

Slika 3.4 prikazuje kompletno krmilno shemo adaptivnega impedančnega krmilnika. Referenčna trajektorija  $x_R$  je v prostem gibanju po prostoru enaka željeni trajektoriji gibanja. Razlika med izhodom referenčnega modela  $e_m$  in dejanskim pogreškom  $e$  je tedaj enaka nič, ker sta oba pogreška enaka referenčni vrednosti sile. Adaptivna ojačenja zato držijo konstanto začetno vrednost. Ob dotiku izhod referenčnega modela izzveni na vrednost nič po trajektoriji drugega reda. Adaptivni krmilni zakoni (3.38) se na razliko med  $e$  in  $e_m$  odzovejo s spreminjanjem adaptivnih ojačenj regulatorja. Ojačenja so nastavljena tako, da sistem teži k izničenju razlike. Ker je izhod referenčnega modela takrat enak nič ( $e_m = 0$ ), je rezultat adaptacije težnja sistema k pogrešku sile nič.



Slika 3.4: Blokovna shema adaptivnega impedančnega regulatorja

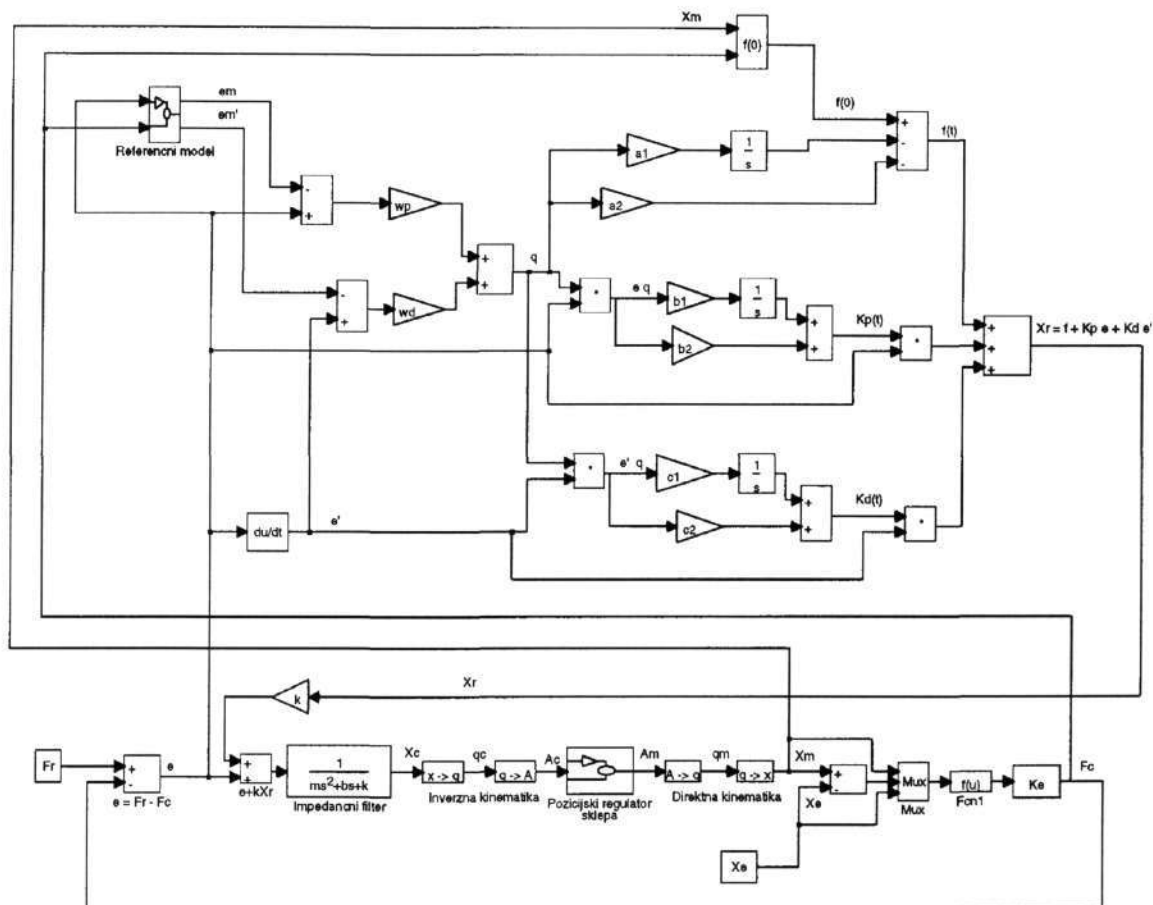
## 4 Simulacija delovanja impedančnega krmilnika

Računalniška simulacija delovanja krmilnega algoritma, predstavljenega v poglavju 3, je bila opravljena s programskim paketom *MATLAB-SIMULINK*. Programski paket omogoča simuliranje odzivov nelinearnih zveznih in diskretnih sistemov. Delo s programskim paketom je uporabniško prijazno s preglednim sestavljanjem gradnikov sistema v grafičnem okolju.

Simulacija je bila izvedena za eno prostostno stopnjo robota ASEA IRb 6. Zaradi robotove značilne mehanske konfiguracije povzroča vrtenje tretjega sklepa samo gibanje vrha vzdolž z osi Kartezijevega koordinatnega sistema z nespremenjeno orientacijo. Tako je možno preveriti delovanje krmilnika v eni prostostni stopnji samo s krmiljenjem motorja v tretjem sklepu. V shemo za simuliranje impedančnega krmiljenja po z osi Kartezijevega koordinatnega sistema so zato vključene kinematične preslikave ter realna prenosna funkcija tretjega robotskega sklepa, ki vključuje pozicijski in hitrostni regulator skupaj z motorjem.

### 4.1 Simulacijska shema

Blokovna shema na sliki 4.1 predstavlja simulacijsko shemo adaptivno krmiljenega sistema robot-okolje za primera neoviranega in omejenega gibanja robota. Simulacijsko shemo sestavljajo bloki, ki s svojimi odzivi simulirajo odzive gradnikov impedančnega krmilnika. Bloki pravokotne oblike so funkcijski bloki z različnimi funkcijami delovanja, bloki trikotne oblike ponazarjajo ojačevanje signala s faktorjem navedenim v notranjosti bloka.



Slika 4.1: Simulacijska shema v okviru programskega paketa *MATLAB-SIMULINK*

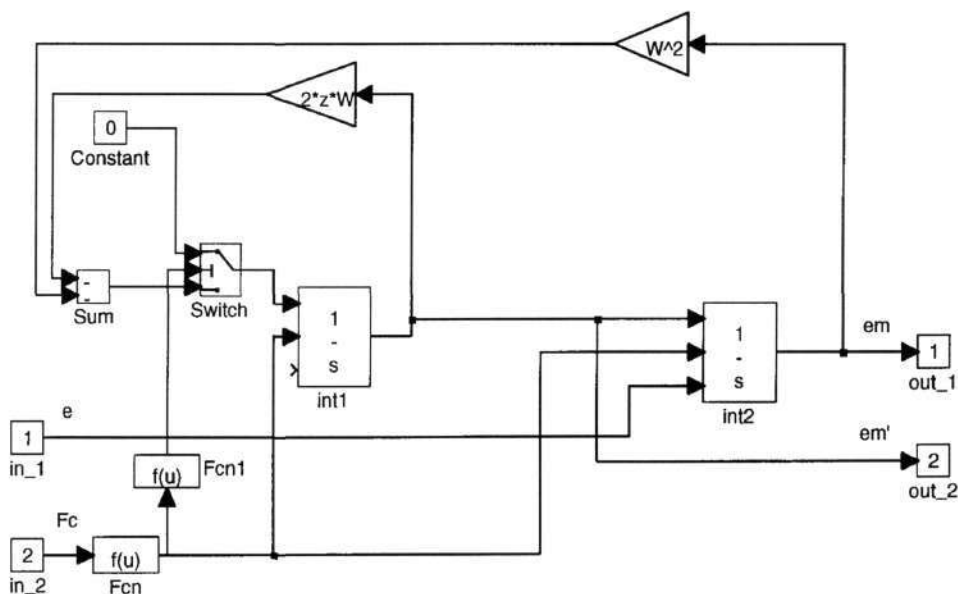
Signal referenčne trajektorije  $X_r$  je generiran s pomočjo proporcionalnih in integracijskih blokov v smislu adaptivnih zakonov (3.38). Ojačenja  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$  in  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$  so pozitivna integralska in proporcionalna ojačenja adaptivnega regulatorja. Adaptacija parametrov  $K_p(t)$ ,  $K_d(t)$  in  $f(t)$  se izvaja na podlagi razlike  $q$  med dejanskim pogreškom sile in pogreškom referenčnega modela skupaj z razliko njunih odvodov ( $q = w_p(e - e_m) + w_d(\dot{e} - \dot{e}_m)$ ).

Signal želene trajektorije prostega gibanja se k referenčni trajektoriji  $X_r$  prišteva v obliki signala  $f(0)$ . Generator signala  $f(0)$  generira poljubno obliko trajektorije gibanja v prostoru, v dotiku robota z okoljem pa na izhodu drži položaj, v katerem se je nahajal vrh robota v trenutku dotika.

Blok impedančnega filtra prevaja signal izračunane pozicije preko prenosne funkcije,

določene z impedančno enačbo (3.1). V postopku načrtovanja se je pokazalo, da je potrebno, zaradi zagotovitve enakih začetnih pogojev referenčnega modela ( $e_m = F_r$  in  $\dot{e} = 0$ ) in impedančnega filtra, ob dotiku stanje impedančnega filtra  $\dot{X}_m$  postaviti na nič. Zato je blok impedančnega filtra v simulacijski shemi realiziran kot  $S$  funkcija. Uporaba te funkcije omogoča vključitev v simulacijsko shemo tudi sistemom, ki jih opišemo v tekstovnem formatu programskega paketa *MATLAB*.

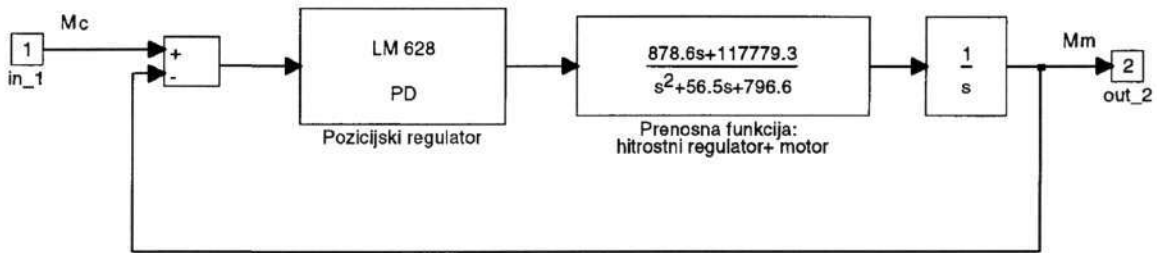
Izhod referenčnega modela določa želen potek dejanskega pogreška sile. Referenčni model je realiziran tako, da ob prostem gibanju na izhodu daje dejanski pogrešek sile, ki je takrat enak referenčni vrednosti sile. Rezultat enakih signalov  $e$  in  $e_m$  je ničelni signal  $q$ , zaradi česar adaptacija parametrov v tem trenutku ni aktivna. Ob dotiku model daje na izhodu odziv linearnega sistema drugega reda na začetno stanje. Takrat  $e_m$  izzveni z vrednosti referenčne sile na vrednost nič. Simuliranje delovanja referenčnega modela je izvedeno z uporabo integratorjev, ki omogočajo preklapljanje stanj (glej sliko 4.2). Srednji vhod integratorja je prožilni signal, v odvisnosti od katerega integrator direktno prevaja signal s tretjega vhoda ali integrira signal s prvega vhoda. Ojačevalni bloki vsebujejo parametra linearnega sistema drugega reda, faktor dušenja  $\zeta$  in frekvenco nedušenega nihanja  $\omega$ .



Slika 4.2: Simulacijska shema referenčnega modela



Pri prvem poskusu simulacije je predpostavljen idealni pozicijski regulator sklepa, kar pomeni, da je položaj manipulatorja kar enak krmilni trajektoriji ( $X_c = X_m$ ). V tem primeru je za prenosno funkcijo sklepa uporabljena enotska prenosna funkcija  $I$ . V nadaljni obravnavi so nato simulirane realne razmere z vpeljavo prenosne funkcije pozicijskega in hitrostnega regulatorja skupaj z motorjem. Prenosna funkcija za tretji robotski sklep je prikazana na sliki 4.3. Parametri bloka, ki simulira obnašanje hitrostnega regulatorja skupaj z motorjem, so bili identificirani z avtoregresivno metodo v okviru programskega paketa *MATLAB-SIMULINK*.



Slika 4.3: Model tretjega sklepa robota

Direktna in inverzna kinematična transformacija opravljata preračun med  $z$  koordinato Kartezijevega prostora in koordinato tretjega motorja (preko koordinate tretjega sklepa). V primeru, da so pomiki izraženi v milimetrih in zasuki v radianih, posamezne enačbe kinematičnih blokov na sliki 4.1 izgledajo takole:

$$q_c = \arcsin\left(\frac{X_c}{670}\right) \quad (4.1)$$

$$M_c = \sqrt{-108994.3 \cos(q_c + 1.545) + 125550.1} - 273.3 \quad (4.2)$$

$$q_m = \arccos\left(\frac{(0.79 M_m + 188.8)^2 - 79504.6}{-69020.61}\right) \quad (4.3)$$

$$X_m = 670 \sin(q_m) \quad (4.4)$$

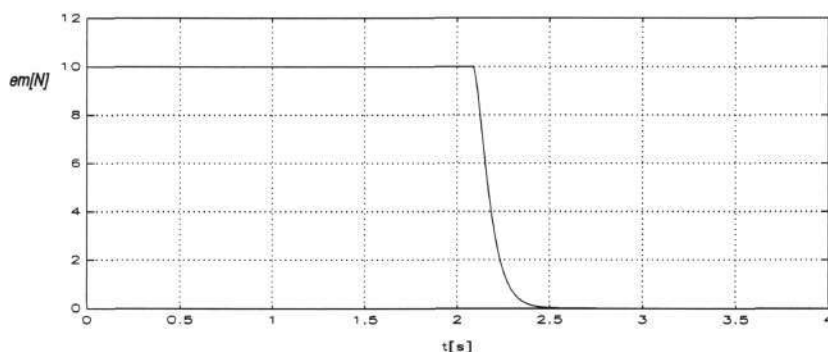
Sila dotika  $F_c$  se pojavi, kadar je položaj manipulatorja manjši od položaja okolja ( $X_m < X_e$ ):

$$F_c = K_e (X_m - X_e) \quad (4.5)$$

Takrat je sila dotika enaka produktu konstante elastičnosti okolja  $K_e$  in velikosti penetracije v podlago.

## 4.2 Rezultati simulacije

Za predstavljeni primer simulacije smo uporabili simulacijsko metodo Runge-Kutta tretjega reda, kot najprimernejšo za simulacijo nelinearnih in nezveznih sistemov<sup>2</sup>. Parametri simulacije so bili 0.0125 s dolg korak integracije in dovoljena relativna napaka integracije ob vsakem koraku 0.012. Simulacija je bila izvedena z nastavitvijo ojačenj adaptivnega regulatorja:  $a_1 = 0.11$ ,  $a_2 = 0.03$ ,  $b_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $b_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 10^{-8}$ ,  $c_2 = 10^{-8}$  in utežnostnih faktorjev:  $w_p = 5$ ,  $w_d = 2$ . V vseh primerih je simulirano približevanje vrha robota okolju s hitrostjo 20 mm/s in nato trk z okoljem, ki se nahaja na poziciji 30 mm. Konstanta elastičnost okolja je ocenjena iz realnih razmer in znaša 64 N/mm. Impedančno obnašanje robota je določeno z vrednostmi  $m = 1$ ,  $b = 6.32$  in  $k = 10$ . Izhod referenčnega modela pa s faktorjem dušenja  $\zeta = 1$  in s frekvenco nedušenega nihanja  $\omega = 20$  Hz. Prikaz izhoda referenčne oblike pogreška sile, ki ob trku pade z referenčne vrednosti sile ( $F_r = 10$  N) na vrednost nič, podaja slika 4.4.

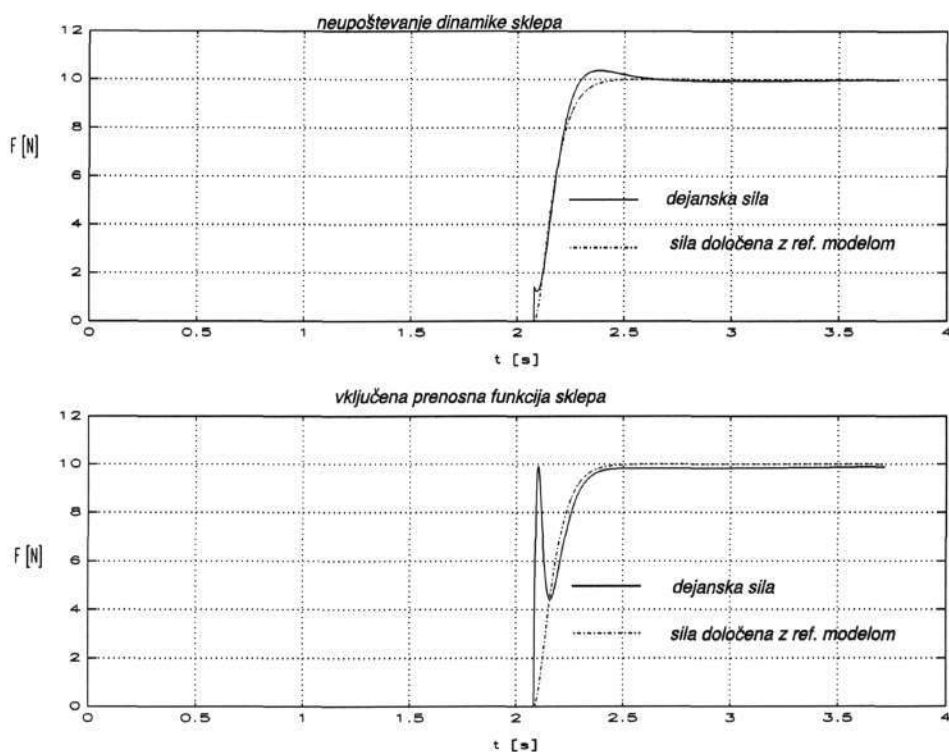


Slika 4.4: Želen potek pogreška sile

Odziv sile dotika impedančno krmiljenega sistema ob trku s podlago prikazuje slika 4.5. Gornji diagram je primer simulacije brez upoštevanja dinamike sklepa robota, obnašanje sistema z vključenim modelom tretjega sklepa pa opisuje spodnji diagram. Dinamika sklepa vnese v sistem počasnejše reagiranje, česar rezultat je impulz sile ob dotiku. Njegova

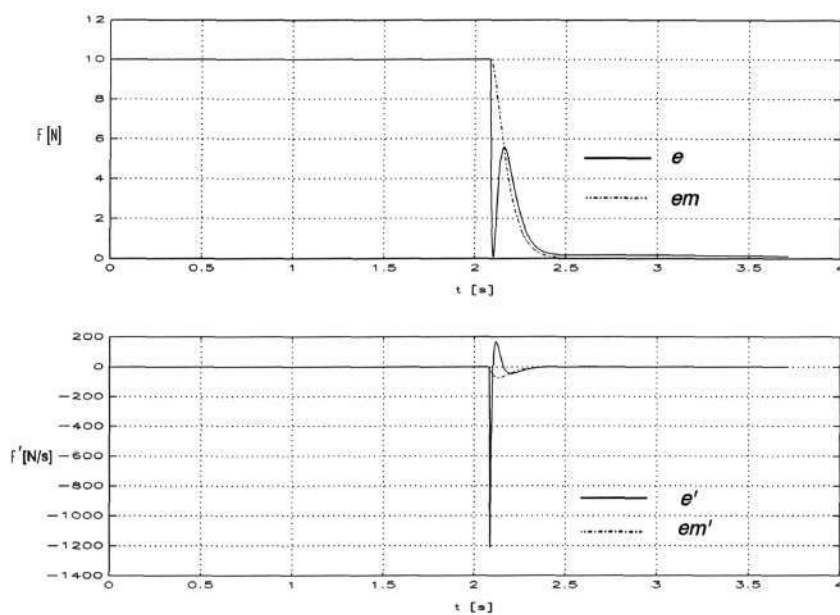
<sup>2</sup> Simulink, Dynamic System Simulation Software, Users's Guide. The Math Works, Inc., Massachusetts, 1992.

amplituda je predvsem odvisna od hitrosti približevanja pred trkom. S slike je razvidno, da sistem teži k referenčni vrednosti sile po predpisanem poteku.

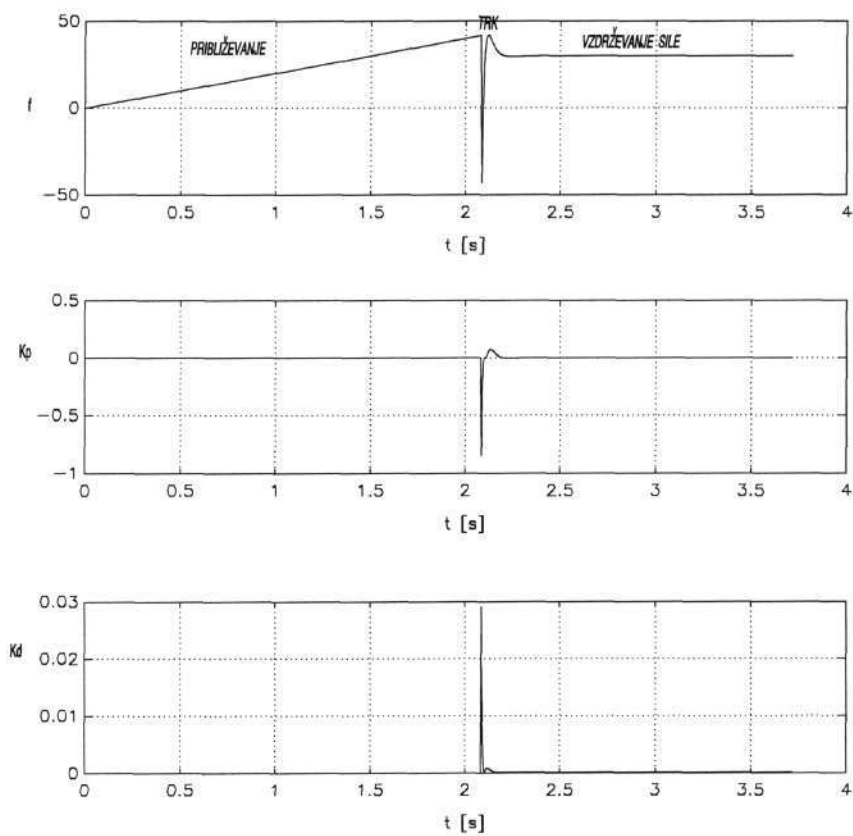


**Slika 4.5:** Sile trka ob neupoštevanju in upoštevanju dinamike sklepa

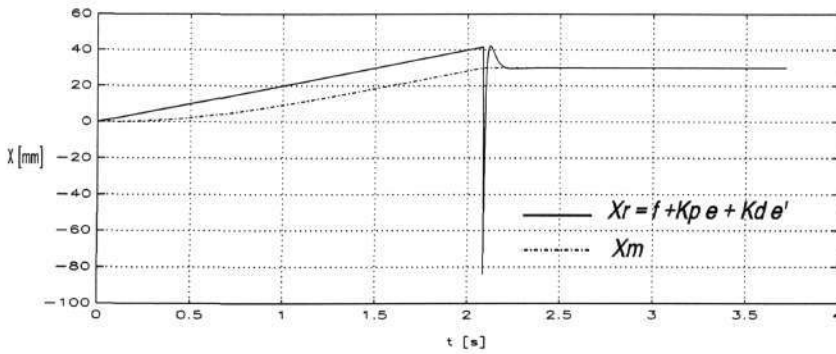
Razmere v impedančno krmiljenem sistemu ob približevanju, trku in vzdrževanju sile dotika podajajo slike 4.6, 4.7 in 4.8. Na podlagi razlike predpisanega in dejanskega pogreška sile ter razlike njunih odvodov (slika 4.6) so nastavljeni adaptivni parametri  $f(t)$ ,  $K_p(t)$  in  $K_d(t)$ . Spreminjanje adaptivnih parametrov je prikazano na sliki 4.7. Slika 4.8 pa podaja potek referenčne trajektorije  $X_r$ , ki je izračunana na podlagi adaptivnih parametrov ter potek dejanskega gibanja manipulatorja  $X_m$ .



Slika 4.6: Referenčni in dejanski pogrešek sile ter njuna odvoda

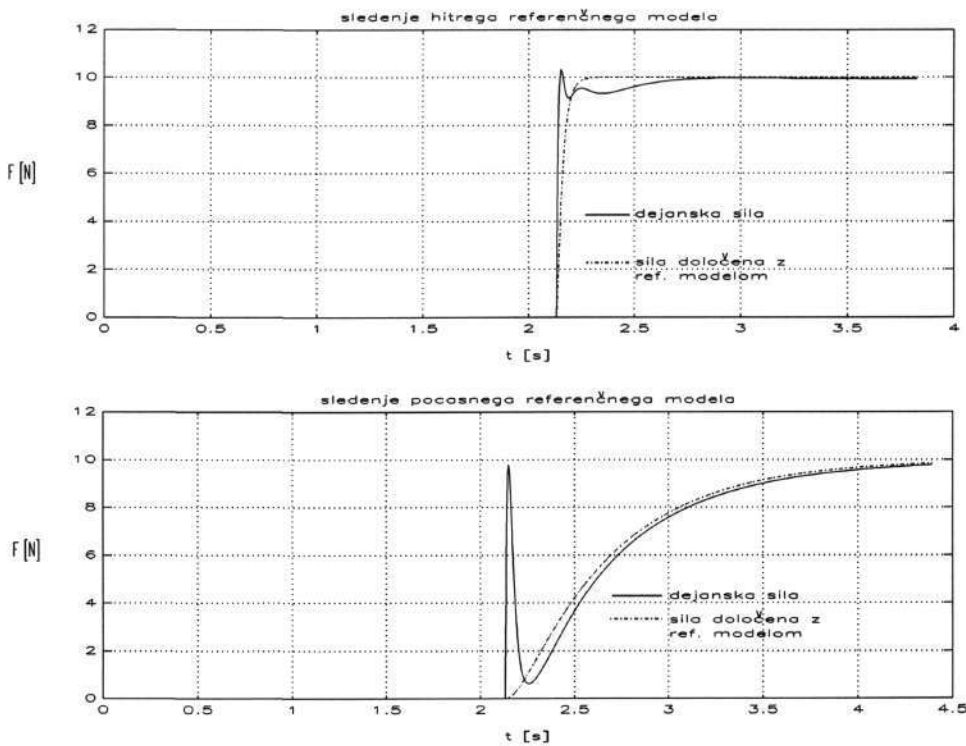


Slika 4.7: Adaptivno nastavljeni parametri



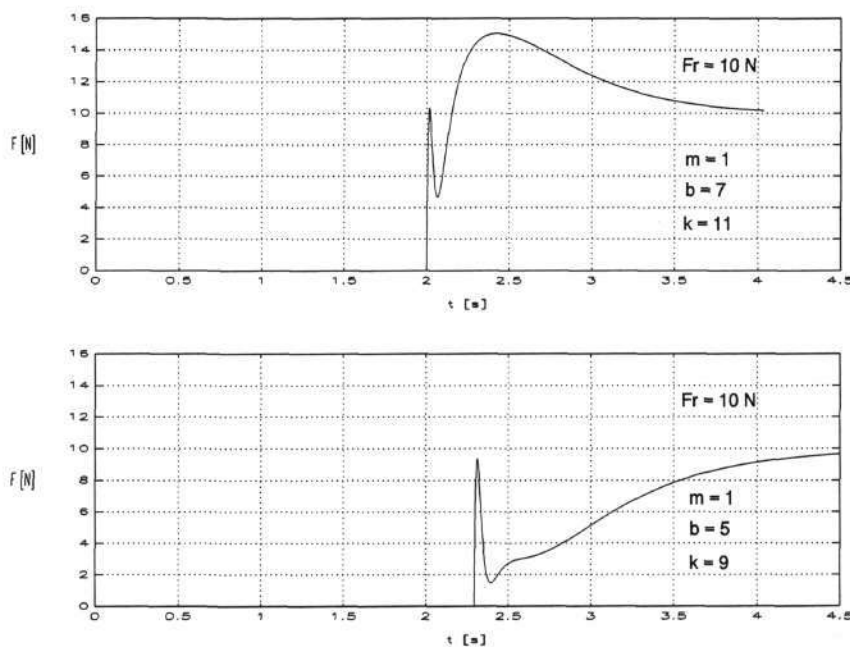
Slika 4.8: Referenčna in dejanska trajektorija pozicije manipulatorja

Kako dobro adaptivni sistem sledi odzivu referenčnega modela demonstrira slika 4.9. Prvi primer je simulacija sledenja hitrega referenčnega modela s parametri  $\zeta = 1.5$  in  $\omega = 100 \text{ Hz}$ , drugi primer pa sledenje počasnega referenčnega modela s parametri  $\zeta = 1.5$  in  $\omega = 5 \text{ Hz}$ . Na ta način je možno s preprostim spreminjanjem dveh parametrov referenčnega modela vplivati na obliko poteka sile ob trku s podlago.



Slika 4.9: Sledenje odzivu referenčnega modela

Spreminjanje impedančnih parametrov  $m$ ,  $b$  in  $k$  v impedančnem filtru ima vpliv na dinamično obnašanje robota v dotiku z okolico. Slika 4.10 predstavlja dva primera različne nastavitve impedančnih parametrov: simuliran odziv sile pri trku z bolj togim robotom (parametri:  $m = 1$ ,  $b = 7$ ,  $k = 11$ ) in simuliran odziv sile pri trku z bolj voljnim robotom (parametri:  $m = 1$ ,  $b = 5$ ,  $k = 9$ ). Robot, ki je bolj tog glede na okolje, povroči tudi večja nihanja sile okoli referenčne vrednosti.



**Slika 4.10:** Trk z različnimi impedančnimi parametri

Z izvedbo referenčnega modela, katerega izhod ob trku s podlago izzvani z referenčne vrednosti sile na vrednost nič po vnaprej določeni trajektoriji, smo se tudi približali reševanju problemov pri prehodu iz neomejenega v omejeno gibanje. Problem trka (*impact control*), pri katerem prihaja do nihanj v dotiku, drugi avtorji rešujejo na različne načine [36]. Pogosta je uporaba močnega aktivnega dušenja v trenutku trka. Težave pri tem načinu nastopijo pri trku s togim okoljem, ko ob majhnih pomikih in večjih frekvencah nastopijo nihanja zaradi premajhne ločljivosti merjenja pozicije robota ali faznega zamika izračuna hitrosti. Te težave odpravlja voljno vpetje sensorja sile, ki absorbira del energije ob trku. Vendar je voljnost vrha neželjena ob pozicijskem vodenju in zaradi nje ni mogoče točno poznavanje položaja okolja. Skupno aktivnim krmilnim shemam je, da v fazi prehoda v dotik preklaplajo parametre regulatorja [36] ali referenčno vrednost na vходу [37]. Probleme ob preklapljanju povzročajo nezveznosti, ki so prav tako lahko vzrok nihanju.

## 5 Implementacija impedančnega krmilnika na robotu

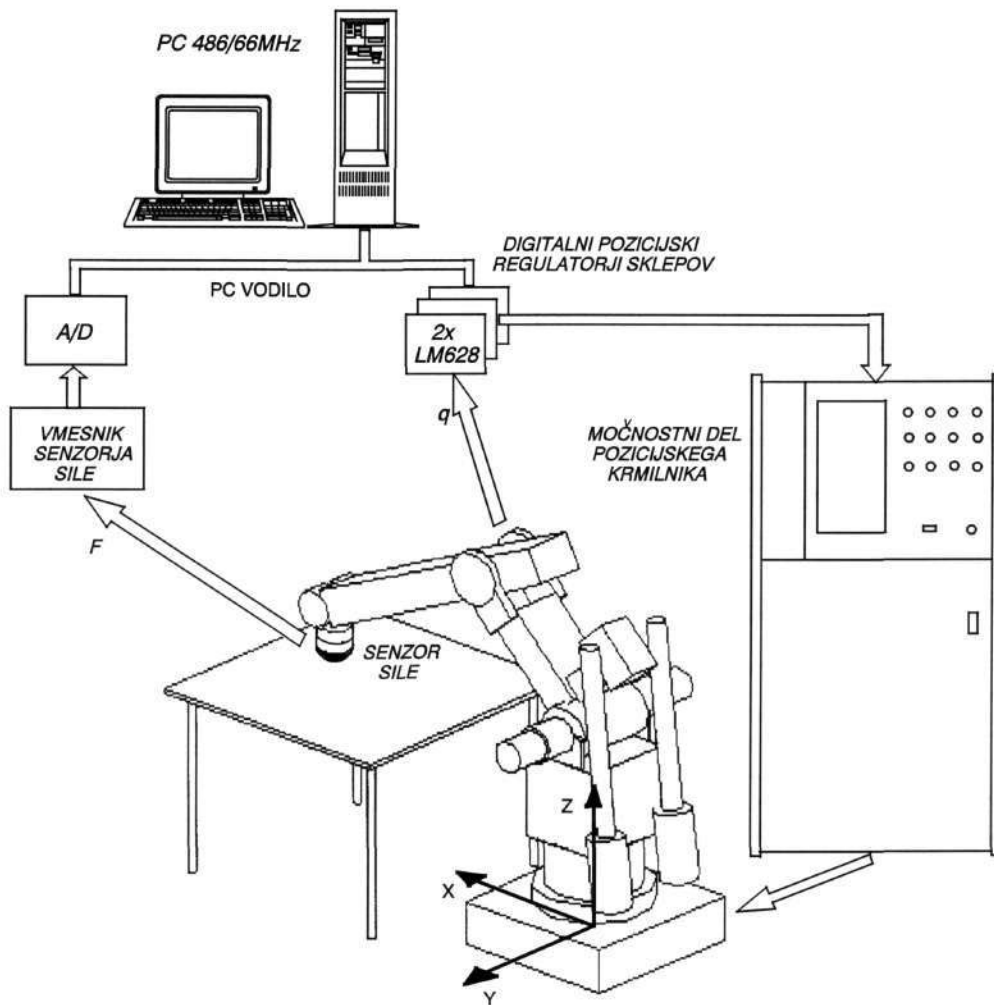
Delovanje adaptivne impedančne krmilne sheme je bilo praktično preizkušeno na robotu s pomočjo pozicijskega krmilnika, katerega razvoj podaja poglavje 2. Na glavnem računalniku krmilnika sekvenčno tečeta algoritem adaptivnega impedančnega krmiljenja in algoritem računanja kinematičnih transformacij med Kartezijevimi koordinatami in koordinatami motorjev. Impedančni krmilnik je programsko realiziran po zgledu simulacijske sheme s slike 4.1. Odzivi v sistemu so računani po Eulerjevi metodi integracije.

Merjenje sile v dotiku robot-okolje je izvedeno s štiriosnim senzorjem sile nameščenim v robotskem zapestju oz. na zadnjem robotskem segmentu. Senzor, proizvod ameriške firme JR<sup>3</sup>, meri sile v oseh  $x$ ,  $y$  in  $z$  ter navor okoli  $z$  osi. Dovoljeno področje obremenitve sensorja, za katerega daje njegova ojačevalna enota na izhodu analogne napetosti v območju  $\pm 10 V$ , je: sila v smeri  $z$   $220 N$ , sile v smereh  $x$  in  $y$   $110 N$  ter navor okoli  $z$  osi  $10 Nm$ . Zajemanje analognih signalov sensorja opravlja vhodno-izhodni vmesnik firme Burr-Brown z osmimi analogno/digitalnimi pretvorniki. Zaradi šumnosti signala merjene sile je bil ta še filtriran z diskretnim Butterworthovim nizkim filtrom tretjega reda z mejno frekvenco  $5 Hz$ . Parametri filtra so bili določeni s pomočjo programskega paketa *MATLAB*<sup>3</sup>.

Slika 5.1 prikazuje shemo krmiljenja sile dotika z industrijskim robotom ASEA IRb 6. Na lokalno vodilo osebnega računalnika so priključene tri regulatorske kartice s šestimi digitalnimi pozicijskimi regulatorji motorjev in instrumentacijska plošča za zajemanje signalov sensorja. Na osebнем računalniku tečeta algoritem računanja referenčne trajektorije glede na silo dotika ter algoritem računanja kinematičnih transformacij. Na sliki je tudi viden koordinatni sistem, postavljen v bazi robota, v katerem se opravlja krmiljenje sile in pozicije.

<sup>3</sup> Signal Processing Toolbox for use with Matlab, Users's Guide. The Math Works, Inc., South Natick, 1988.





Slika 5.1: Krmiljenje sile dotika robota ASEA IRb 6 z okoljem

Za izvedbo krmiljenja v realnem času ima sistemska ura, ki jo zagotavlja strojna oprema IBM kompatibilnega osebnega računalnika, premajhno ločljivost. Ura se osvežuje vsakih  $55\text{ ms}$ , s čimer ni mogoče doseči zahtevanih frekvenc vzorčenja regulacijske zanke do  $200\text{ Hz}$ . Zato smo za povečanje ločljivosti ure med posameznimi osvežitvami še dodatno brali prosto tekoči števec integriranega vezja PIT 8253 osebnega računalnika. Števec, ki šteje s frekvenco  $1.19318\text{ MHz}$ , se nahaja na naslovu  $\$40:6C$  in  $\$40:6E$ . To je povečalo ločljivost sistemske ure na  $8,38\ \mu\text{s}$ .

## 5.1 Impedančno krmiljenje po z osi

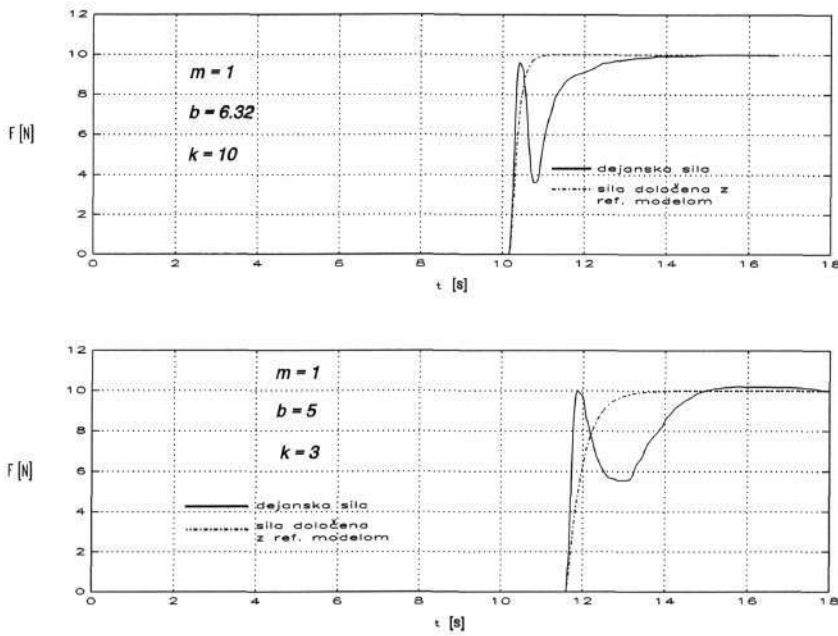
Najprej smo opravili testiranje impedančnega krmilnika na robotu na eni sami prostostni stopnji. Poskušali smo zagotoviti enake pogoje kot v primeru simulacij iz poglavja 4. Pozicijsko je bil krmiljen tretji sklep robota, medtem ko so ostali štirje sklepi ostali na istem položaju. Zaradi paralelogramske mehanske strukture robota ASEA se z gibanjem tretjega sklepa giblje vrh robota po z osi zunanega koordinatnega sistema z nespremenjeno orientacijo. Ničelna vrednost pomika je v začetnem položaju, naraščanje pomika v pozitivno smer pa pomeni približevanje vrha podlagi v smeri navzdol. Sledenje krmilne trajektorije opravljajo pozicijski regulatorji motorjev v pozicijskem načinu delovanja. Ta način je način gibanja od točke do točke, kar onemogoča hitrejše večje gibe v eni vzorčni periodi zaradi vgrajenega generatorja trapeznega profila hitrosti v regulatorjih LM 628.

Čas izračuna enega vzorca krmilne trajektorije skupaj s transformacijo v koordinate motorjev (enačbi 4.1 in 4.2) je za predstavljene primere znašal 4.9 ms. Prenosna funkcija diskretnega Butterworthovega filtra signala sile je za takšno frekvenco vzorčenja enaka:

$$\frac{F_{filt}}{F} = \frac{0.0004 + 0.0012 z^{-1} + 0.0012 z^{-2} + 0.0004 z^{-3}}{1 - 2.6923 z^{-1} + 2.4301 z^{-2} - 0.7347 z^{-3}} \quad (5.1)$$

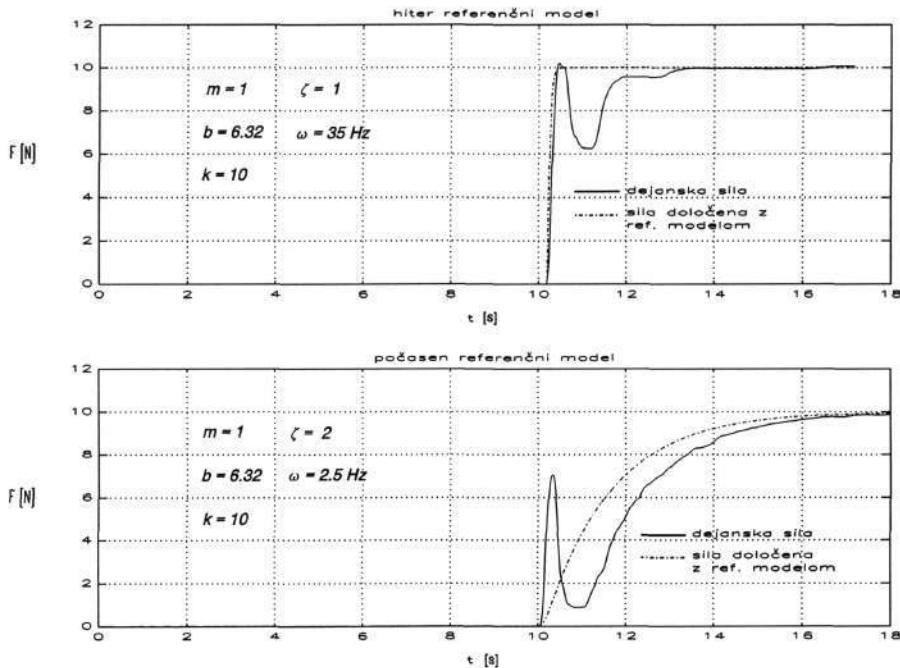
Parametri adaptivnega regulatorja so bili nastavljeni na vrednosti:  $a_1 = 0.11$ ,  $a_2 = 0.03$ ,  $b_1 = 3 \cdot 10^{-5}$ ,  $b_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 10^{-8}$ ,  $c_2 = 10^{-8}$ ,  $w_p = 5$ ,  $w_d = 2$ . Predstavljeni prikazi odzivov sil so rezultat gibanja vrha robota s hitrostjo 20 mm/s ter nato trka in vzdrževanja dotika s podlago. Podlaga, plošča mize iz lesa, se nahaja na poziciji  $X_e = 187$  mm.

Slika 5.2 prikazuje dva primera trka s podlago z različnimi parametri impedančnega filtra. V gornjem primeru ti znašajo  $m = 1$ ,  $b = 6.32$  in  $k = 10$ , v spodnjem pa so impedančni parametri enaki  $m = 1$ ,  $b = 5$  in  $k = 3$ . Parametra referenčnega modela sta za oba primera enaka ( $\zeta = 1$ ,  $\omega = 20$  Hz).



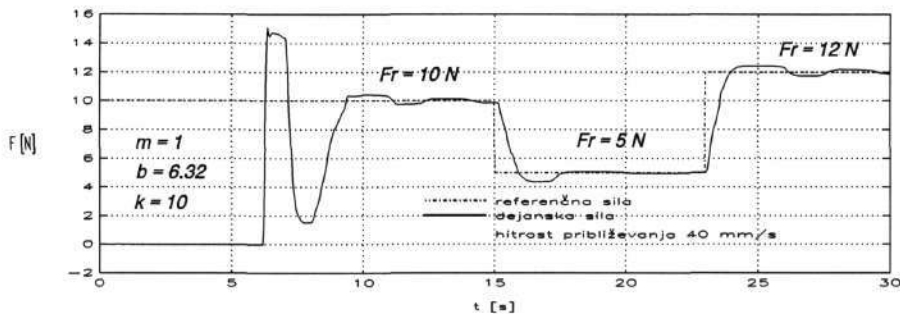
Slika 5.2: Oziv sile dotika ob različnih impedančnih parametrih

Kvaliteto delovanja adaptivnega algoritma, ki se kaže tudi v sposobnosti sistema slediti odzivu referenčnega modela demonstrira slika 5.3. Prikazano je sledenje sile dotika odzivu referenčnega modela, ki je v gornjem primeru hitrejši v spodnjem pa počasnejši narave.



Slika 5.3: Sledenje odzivu referenčnega modela

Slika 5.4 je rezultat trka vrha robota s podlago ob podvojeni hitrosti približevanja. Robot se je približeval s hitrostjo  $40 \text{ mm/s}$  in zato povzročil občutno večji impulz sile v trenutku dotika. Namen slike je tudi pokazati sposobnost slediti referenčni sili na vhodu. Ko je bil dosežen stabilen dotik, se je referenčna sila spremenila na vrednost  $5 \text{ N}$  in nato na vrednost  $12 \text{ N}$ .



**Slika 5.4:** Sledenje referenčni sili

Predstavljeni rezultati kažejo, da adaptivni impedančni krmilnik dobro deluje tudi v realnem eksperimentalnem okolju. Če naredimo primerjavo z rezultati simulacije, ugotovimo, da se oblike odzivov dokaj dobro ujemajo, slabše pa je ujemanje odzivnih časov. Očitno je, da model tretjega sklepa robota, ki smo ga uporabili v simulacijski shemi ni dovolj dobra slika realnega sistema. To je razumljivo, kajti v modelu niso upoštevane nelinearnosti realnega robotskega mehanizma, kot so npr. elastičnosti sklepov, elastičnosti segmentov robota ter mrtvi hodi prenosov.

## 5.2 Impedančno krmiljenje po oseh $x$ , $y$ in $z$

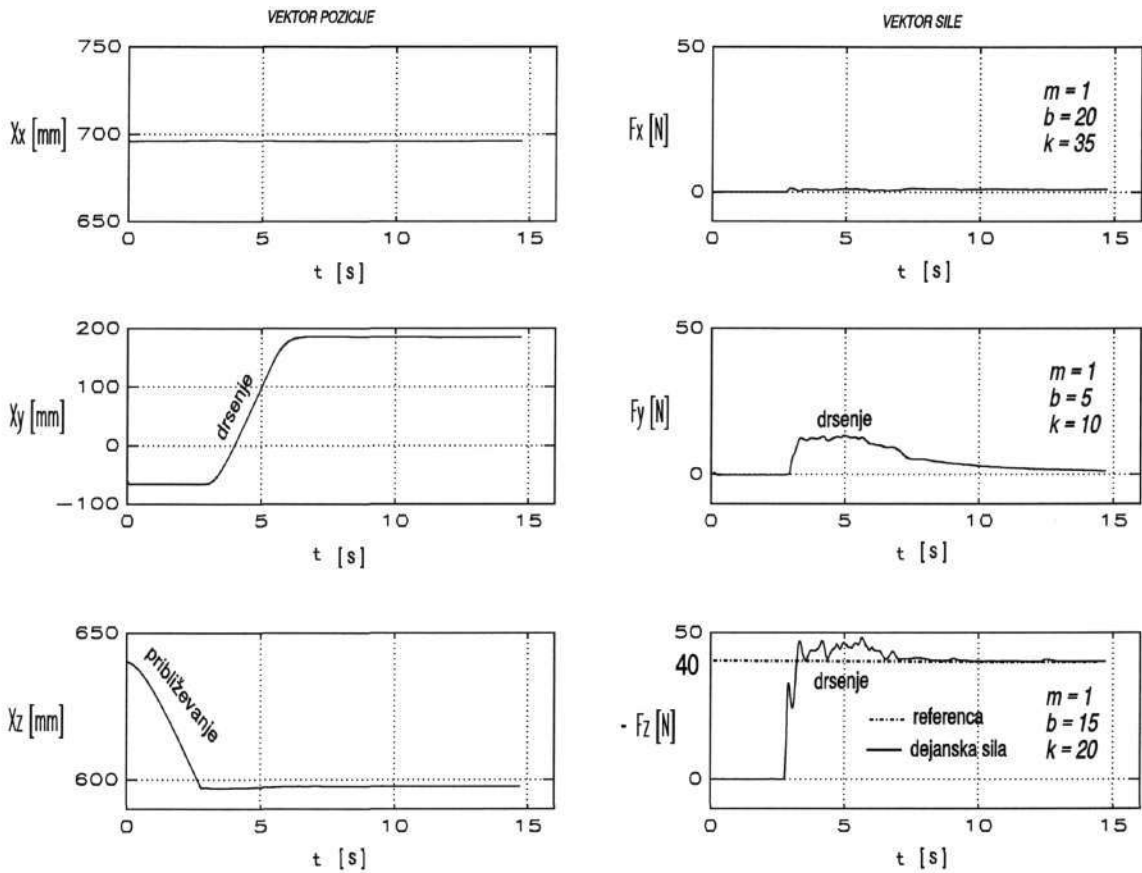
Cilj razvoja impedančnega krmilnika je realizacija vodenja robota v dotiku po vseh treh oseh Kartezijevega koordinatnega sistema. Tako je adaptivni impedančni krmilnik, ki izvaja krmiljenje sile v vseh prostostnih stopnjah, realiziran s pomočjo treh medsebojno neodvisnih adaptivnih impedančnih regulatorjev. Vsak regulator generira po eno koordinato vektorja referenčne trajektorije. Sledenje referenčne trajektorije v zunanjih koordinatah je zagotovljeno s hitrostnim krmiljenjem robota. Želena pot, ki naj jo vrh robota opravi v eni periodi vzorčenja ( $\Delta s/\Delta t$ ), predstavlja vektor referenčne hitrosti in ta je preko psevdoinverzne Jacobijeve matrike preračunan v vektor hitrosti vrtenja sklepov. Hitrost vrtenja posameznega sklepa zagotavljajo pozicijski regulatorji v hitrostnem načinu delovanja.

S takšno konfiguracijo regulacijske zanke, ki teče na osebnem računalniku ter obsega zajemanje signalov sensorja sile, algoritem treh adaptivnih impedančnih regulatorjev in algoritem hitrostnega krmiljenja, smo dosegli frekvenco vzorčenja  $120 \text{ Hz}$ . Filtriranje signalov sensorja sile nad  $5 \text{ Hz}$  je bilo opravljeno z diskretnim Butterworthovim filtrom s prenosno funkcijo:

$$\frac{F_{filt}}{F} = \frac{0.0018 + 0.0053 z^{-1} + 0.0053 z^{-2} + 0.0018 z^{-3}}{1 - 2.4778 z^{-1} + 2.083 z^{-2} - 0.5915 z^{-3}} \quad (5.2)$$

Slike 5.5 - 5.8 orisujejo obnašanje impedančnega krmilnika v različnih primerih prostorske interakcije robota z okolico. Parametri adaptivnih regulatorjev za prve tri primere so bili nastavljeni na vrednosti:  $a_1 = 0.11$ ,  $a_2 = 0.011$ ,  $b_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ ,  $b_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ ,  $c_1 = 10^{-8}$ ,  $c_2 = 10^{-8}$  in  $w_p = 5$ ,  $w_d = 2$ . Oblika odzivov referenčnih modelov je bila določena s parametroma  $\zeta = 1$  in  $\omega = 10 \text{ Hz}$ .

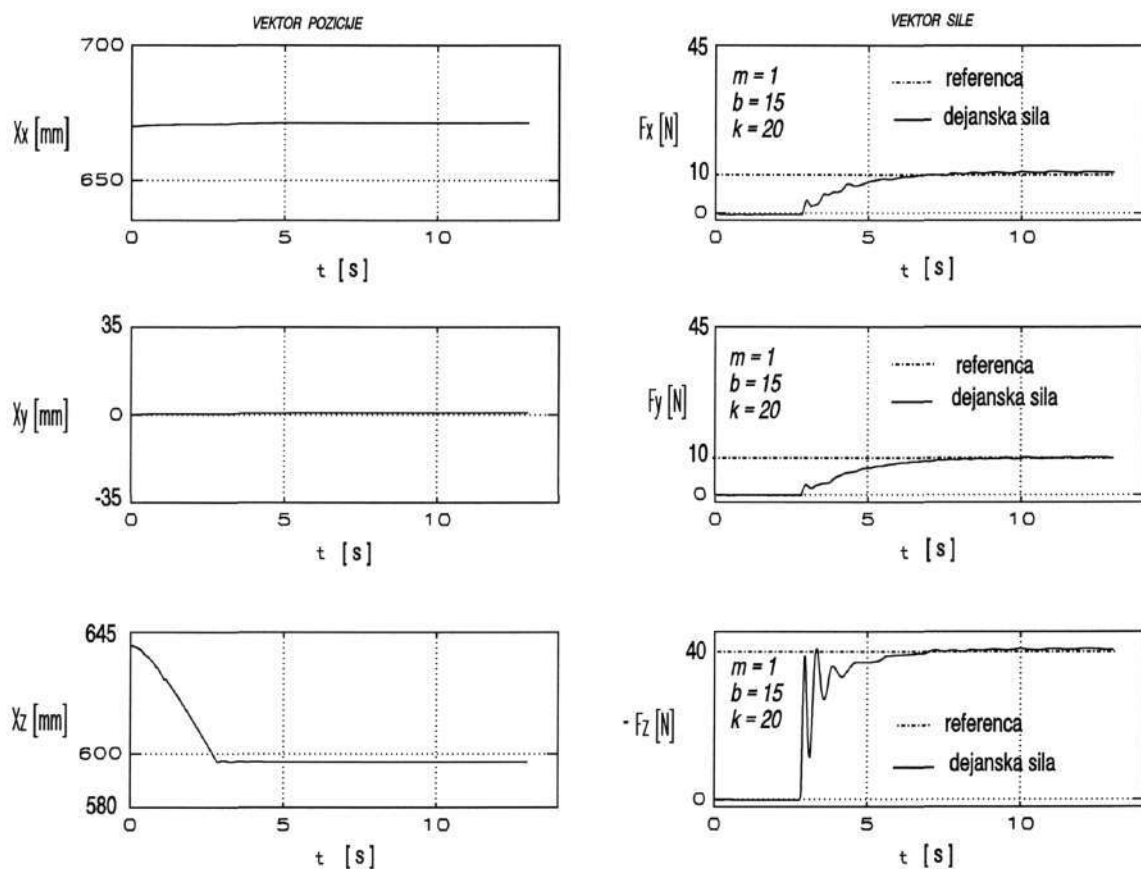
Prvi primer (slika 5.5) predstavlja nalogo robota priti v dotik z okoljem in nato pritiskati na podlago v smeri  $z$  s silo  $40\text{ N}$ . Ko je dosežen stabilen dotik in sila pritiska, vrh robota drsi po površini v smeri  $y$ . Diagrami na levi polovici slike opisujejo trajektorijo položaja vrha manipulatorja, diagrami na desni polovici pa potek sil v dotiku po posameznih koordinatah. Impedančni parametri za vsak regulator so navedeni v diagramih sil.



Slika 5.5: Drsenje vrha robota v dotiku v  $y$  smeri

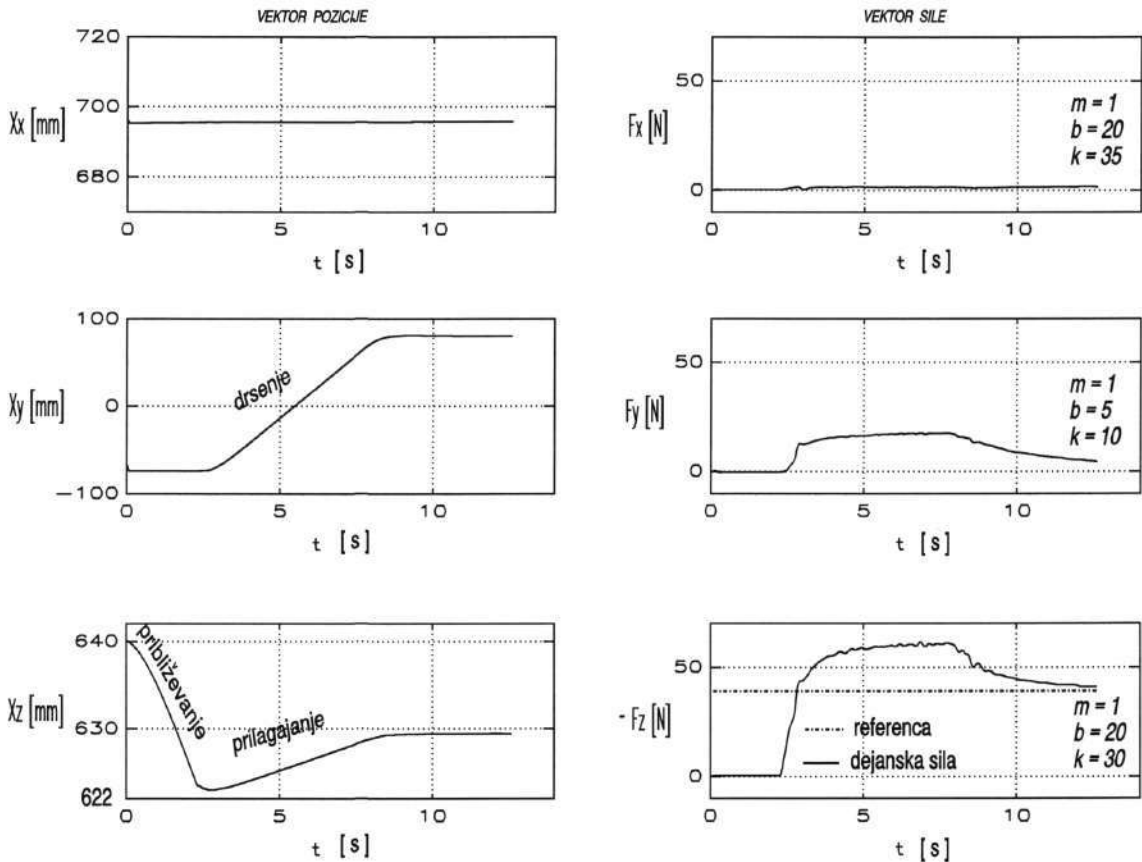
Vrh robota po približevanju podlagi s hitrostjo  $20\text{ mm/s}$  preide v dotik in nato drsi po podlagi s hitrostjo  $100\text{ mm/s}$ . S slike je razviden pojav sile v smeri  $y$  med gibanjem, katerega vzrok je trenje med podlago in vrhom robota.

Naslednja naloga robota je vzpostaviti vektor sile dotika s komponentami  $F_r = (10, 10, -40)$ . Referenčni vektor sile s temi koordinatami je izbran tako, da še ne pride do drsenja v smereh  $x$  ali  $y$ , kajti v teh smereh gibanje robota ni omejeno. Rezultate prikazuje slika 5.6.



Slika 5.6: Vzpostavitev vektorja sile v podlago

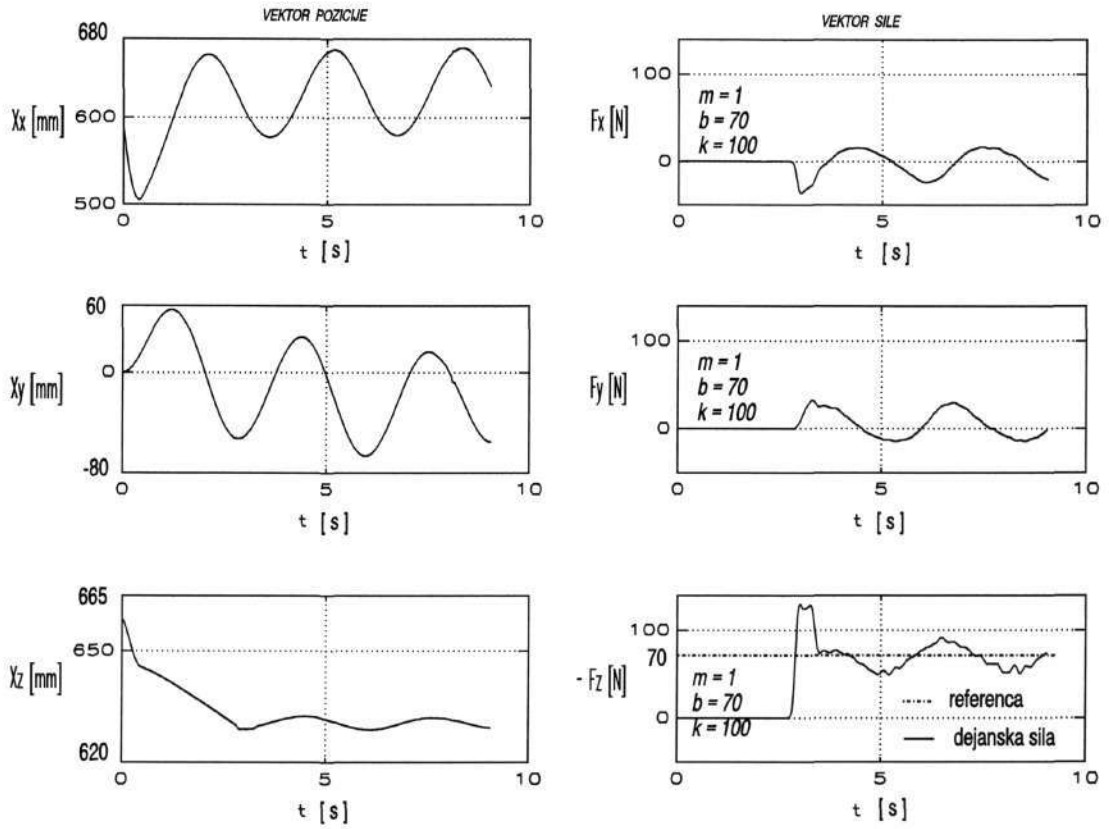
Namen slike 5.7 je pokazati, kako se impedančno krmiljeni robot prilagaja spremembam nagiba površine. Naloga robota je enaka kot v prvem primeru, le da je miza, po kateri vrh robota drsi, nagnjena pod kotom  $3^\circ$ . Hitrost gibanja v smeri  $y$  je  $30 \text{ mm/s}$ . S slike se vidi popravljanje položaja po  $z$  osi, vendar regulator med drsenjem, ko sila dotika linearno narašča ne zmore zagotoviti ničelnega pogreška. Referenčna sila  $40 \text{ N}$  je dosežena ob ustavitvi drsenja.



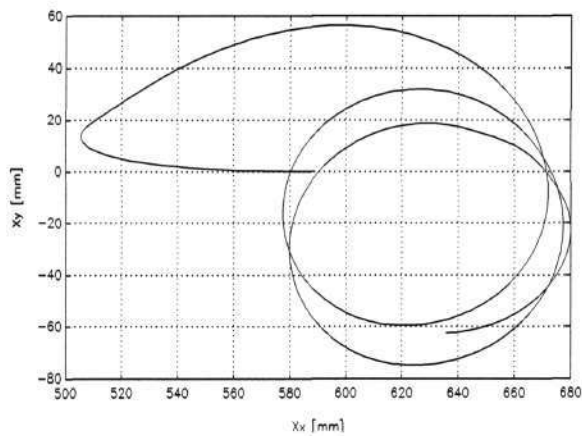
Slika 5.7: Drsenje vrha robota v dotiku v  $y$  smeri po nagnjeni površini

Slika na naslednji strani (slika 5.8) podaja odzive v primeru drsenja robota po trajektoriji, ki v ravnini  $xy$  opisuje krožnico. Površina, po kateri vrh robota drsi, je nagnjena pod kotom  $3^\circ$ . Najboljše odzive sistema pri tej nalogi smo dosegli z nastavitvijo adaptivnih parametrov:  $a_1 = 0.041$ ,  $a_2 = 0.0041$ ,  $b_1 = 10^{-8}$ ,  $b_2 = 10^{-8}$ ,  $c_1 = 10^{-10}$ ,  $c_2 = 10^{-10}$ ,  $w_p = 5$ ,  $w_d = 2$  in  $z$  impedančnimi parametri navedenimi v diagramih sile. Na pojav sil v smereh  $x$  in  $y$  zaradi trenja se krmilni sistem, da bi zagotovil silo nič, odziva s spremembo pozicije tudi v teh smereh. Rezultat spreminjanja položaja je trajektorija gibanja v ravnini  $xy$ , ki izgleda, kot to prikazuje slika 5.9.



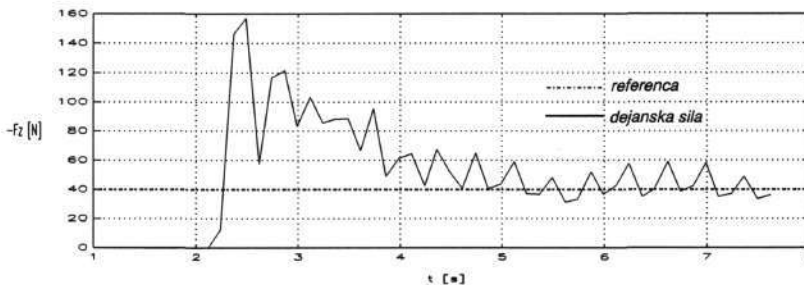


Slika 5.8: Opisovanje krožnice v dotiku na nagnjeni površini

Slika 5.9: Trajektorija gibanja vrha v dotiku v ravnini  $xy$

Prikazani primeri obnašanja sistema krmiljenega z adaptivnim impedančnim krmilnikom so bili vsi izvedeni na trdi podlagi, kot primer najzahtevnejšega krmiljenja sile z uporabo pozicijskega vodenja. Na trdi podlagi namreč zelo majhni pozicijski odkloni povzročijo velika nihanja sile dotika. Izvajanje sile dotika na mehkejših okoljih je manj problematično in z večjimi vrednostmi parametrov adaptivnega regulatorja se sistem lahko adaptira tudi na večje spremembe v položaju okolja. V primeru trde podlage pa povečanje parametrov v želji povečanja adaptivnosti na spremembe okolja lahko povzroči oscilatoren dotik.

Za ocenitev kvalitete delovanja adaptivnega impedančnega regulatorja lahko pokažemo obnašanje robota v dotiku, kadar je ta krmiljen z navadnim PID regulatorjem sile. Takšno krmiljenje robota v dotiku je bilo realizirano na robotu ASEA glede na objavo avtorjev Dégoulangeja in Daucheza [43]. PID regulator zadovoljivo opravlja regulacijo sile na mehkejših podlagah in tudi na trdi podlagi v primeru majhnih referenčnih sil (do 10 N). Neustrezen odziv sile za primer dotika s trdo podlago ob referenčni sili 40 N prikazuje slika 5.10. Sila dotika, ki ob dotiku močno preseže referenčno vrednost, tudi ob vrževanju dotika niha okoli referenčne vrednosti.



Slika 5.10: Oziv sile dotika robota krmiljenega s PID regulatorjem sile

## 6 Zaključek

V delu je obravnavano vodenje industrijskih robotskih mehanizmov v dotiku z okoljem. Pri obravnavi smo se omejili na delo z roboti poganjanimi z električnimi motorji preko mehanskih prenosov. Preizkus lastnosti predlaganega krmilnega algoritma je bil izveden na industrijskem robotu ASEA IRB 6.

Specifične lastnosti krmilnikov industrijskih robotov, ki ne omogočajo dostopa do neposrednega krmiljenja momentov motorjev, nepoznavanje parametrov dinamičnega modela robota in časovno zamudno računanje momentov, narekujejo izvedbo krmiljenja sile dotika preko pozicijskega vodenja robota. Krmilnik sile, ki je osnovan na pozicijskem vodenju je zgrajen tako, da s povratno zanko sile obkroža pozicijski regulator, kateremu glede na sile v dotiku generira referenčno pozicijo. Na ta način zaradi krmiljenja sile ni potrebno poseganje v strojno opremo obstoječega pozicijskega krmilnika, kar je zelo primerno za industrijske aplikacije vodenja po sili.

Sodobni robotski krmilniki izvajajo pozicijsko vodenje robota v zunanjih koordinatah. Za sledenje trajektorije v prostoru uporabljajo algoritem hitrostnega krmiljenja. Krmilnik robota ASEA IRB 6 v originalni izvedbi omogoča samo vodenje v koordinatah sklepov, zaradi česar je bila opravljena predelava krmilnika. Predelava je obsegala prilagoditev strojne opreme in določitev kinematičnega modela robota. Nov krmilnik je fizično zgrajen na osnovi zmogljivega osebnega računalnika z dodatnimi samostojnimi moduli pozicijske regulacije motorjev. Poleg izvajanja algoritma sledenja trajektorije je procesor osebnega računalnika sposoben izvajati tudi druge algoritme. S tem je zgrajen sistem, ki omogoča eksperimentalno delo pri razvoju algoritmov krmiljenja sile dotika.

Za zunanjo regulacijsko zanko sile smo predlagali krmilno shemo impedančnega krmiljenja. Omejili smo se na dotik s togimi predmeti, ki največkrat pride v poštev pri industrijskih aplikacijah. Impedančni krmilnik sile se v takšnem primeru obnaša kot eksplicitni krmilnik sile, kar omogoča uvedbo referenčnega signala po sili. Za zagotavljanje ničelnega

pogreška v sili ob neznanih parametrih okolja uvedemo adaptivni regulator, ki na podlagi adaptivnih zakonov spreminja parametre v smislu prilagajanja odziva sistema referenčnemu odzivu. Uporabljena je teorija modelno referenčne adaptivne regulacije naslanjajoč se na Ljapunovo teorijo. Na ta način je zagotovljena asimptotična stabilnost sistema. Adaptivni zakoni so izpeljani ob predpostavki zanemarljive dinamike robota.

Delovanje predlagane krmilne sheme smo najprej preverili s pomočjo simuliranega krmiljenja ene prostostne stopnje. Namesto zanemarjene robotske dinamike smo v simulacijsko shemo uvedli približen model prenosne funkcije tretjega sklepa robota. Implementacija impedančnega krmilnika na robotu je bila izvedena v dveh korakih. Najprej je bil implementiran impendančni krmilnik za eno stopnjo prostosto. Krmilili smo tretji sklep robota z uporabo pozicijskega vodenja v pozicijskem načinu delovanja. V tem primeru je bila hitrost odzivov sistema omejena z notranjim generatorjem trapeznega profila hitrosti pozicijskih regulatorjev. Z realizacijo treh impedančnih krmilnikov po posameznih oseh Kartezijevega koordinatnega sistema smo preverili obnašanje sistema v prostoru. Sledenje trajektorije v prostoru je bilo izvedeno s hitrostnim krmiljenjem na osnovi inverzne Jacobijeve transformacije.

Rezultati testiranja krmilnega algoritma kažejo, da smo dosegli zadovoljivo obnašanje robota v dotiku z okolico. Robot je sposoben izvajati referenčno silo na podlago in se istočasno gibati. V primerjavi s PID regulatorjem sile v primeru kontakta s togimi predmeti naš impedančni krmilnik deluje neprimerno boljše. Kljub zanemaritvi dinamike robota, upogibanja robotskih segmentov, elastičnosti sklepov ter mrtvih hodov reduktorjev v modelu sistema je adaptivnost sistema sposobna odpraviti naštetih nelinearnosti pri reguliranju sile. Mehanske lastnosti vrha robota, vztrajnost, dušenje in togost, so programsko nastavljivi parametri in jih je možno spreminjati tudi med gibanjem v odvisnosti od zadane naloge. Ugotovili smo, da je obnašanje sistema močno odvisno od lastnosti podrejenega pozicijskega regulatorja. Parametri tega regulatorja ne smejo vsebovati integralnega člena. Integralni člen namreč integrira pogrešek pozicije, zaradi katerega se sploh izvaja sila dotika. Na obnašanje sistema vplivajo tudi nastavitve ojačenj adaptivnega regulatorja. Nastavitev ojačenj ni enkratna ampak jo je potrebno spreminjati z zahtevami naloge v dotiku. Naloga drsenja po nagnjeni togi površini npr. zahteva drugačno nastavitve adaptivnega regulatorja, kot naloga prilagajanja manj togi ali ravni podlagi.

Realizacija referenčnega modela na način, da ob dotiku njegov odziv izzveni z

referenčne vrednosti sile na vrednost nič sicer vnaša neželjeno preklapljanje med načini delovanja. Vendar smo se na ta način približali tudi reševanju problema prehodnega pojava ob dotiku. Drugi avtorji ta problem običajno rešujejo s preklapljanjem parametrov regulatorja. Ker je problem trka obsežen, ga nismo rešili v celoti in smo zato omejeni pri hitrosti približevanja proti podlagi. Hitrost približevanja mora biti nizka, kar pa ni problem zagotoviti tudi v dejanskih aplikacijah.

V nadaljnjem razvoju impedančnega krmiljenja nameravamo uporabiti izkušnje iz tega dela pri konkretnih nalogah vodenja robota v dotiku z okoljem. Z impedančno krmiljenim robotom ASEA nameravamo izvajati brušenje mehanskih delov ter privijanje lesnih vijakov. Pri konkretnjših nalogah bo tudi mogoče narediti podrobnejšo analizo izbire primernih impedančnih parametrov za posamezne faze naloge [42].

Za izboljšanje odziva pri trku robota s podlago, ko adaptivni regulator zaradi impulza sile močno reagira tako, da vrh robota izgubi dotik, predlagamo uvedbo dodatnega signala v povratno zanko sile. Dodatni signal, ki bi predstavljal identificirani impulz sile ob dotiku, bi odštevali od signala dejanske sile in na ta način zagotovili, da adaptivni regulator ne bi reagiral na prehodni pojav trka.

## 7 Literatura

- [1] D.E. Whitney. Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 3-14, 1987.
- [2] Y.H. Chen, S. Pandey. Robust Hybrid Control of Robot Manipulators. *Proceedings 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 236-241, Scottsdale, 1989.
- [3] O. Khatib. The Operational Space Framework. *JSME International Journal, Series C*, Vol. 36, No. 3, pp. 277-287, 1993.
- [4] M.T. Mason. Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 11, No. 6, 1981.
- [5] A. Sharon, N. Hogan, D.E. Hardt. Controller Design in the Physical Domain (Application to Robot Impedance Control). *Proceedings 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 552-559, Scottsdale, 1989.
- [6] H. Asada, J.J.E. Slotine. Robot analysis and control. John Wiley and sons, New York, 1986.
- [7] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation, Parts I-III. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, No. 1, pp. 1-24, 1985.
- [8] T. Bajd, A. Kralj. Robotika. Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo Ljubljana, Ljubljana, 1991.
- [9] N. Hogan. Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control. *Proceedings 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1047-1054, Raleigh, 1987.
- [10] F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan. Integrable Solutions of Kinematic Redundancy via Impedance Control. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, No. 5, October 1991.
- [11] S. Tachi, T. Sakaki, H. Arai, S. Nishizava, J.F. Pelaez-Polo. Impedance control of a direct-drive manipulator without using force sensors. *Advanced Robotics*, Vol. 5, No. 2, pp. 183-205, 1991.

- [12] R. Kelly, R. Carelli, M. Amestegui, R. Ortega. On Adaptive Control of Robot Manipulators. *Proceedings 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 572-577, Scottsdale, 1989.
- [13] W.S. Lu, Q.H. Meng. Impedance control with adaptation for robotic manipulations. *IEEE Transaction on Robot Automation*, Vol.7, No.3, pp. 408-415, 1991.
- [14] S.K. Singh. Adaptive Control of Manipulator Interaction With Environment: Theory and Experiments. *Proceedings 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1001-1006, Atlanta, 1993.
- [15] Z. Lu, A.A. Goldenberg. Implementation of robust impedance and force control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 6, No. 2-3, pp. 145-163, 1992.
- [16] D.M. Dawson, F.L. Lewis, J.F. Dorsey. Robust Force Control of a Robot Manipulator. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 4, pp. 312-319, 1992.
- [17] R.J. Anderson, M.W. Spong. Hybrid impedance control of robotic manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 5, pp. 549-556, 1988.
- [18] M. Palletier, M. Doyon. On the Implementation and Performance of Impedance Control on Position Controlled Robots. *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1228-1233, San Diego, 1994.
- [19] C. R. Carignan. Manipulator Impedance Accuracy in Position-Based Impedance Control Implementations. *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1216-1221, San Diego, 1994.
- [20] R. Colbaugh, H. Seraji, K. Glass. Direct Adaptive Impedance Control of Robot Manipulators. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 217-248, 1993.
- [21] R. Volpe, P. Khosla. The Equivalence of Second Order Impedance Control and Proportional Gain Explicit Force Control: Theory and Experiments. *Proceedings of The Second International Symposium on Experimental Robotics*, Toulouse, 1991.
- [22] R. Volpe, P. Khosla. A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No. 11, pp. 1634-1649, 1988.
- [23] H. Seraji, R. Colbaugh. Force tracking in impedance control. *Proceedings 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 499-506, Atlanta, 1993.
- [24] R. Isermann, K.H. Lachmann, D. Matko. Adaptive control systems. Prentice Hall, New York, 1992.



- [25] L. Gyergyek. Teorija vezij in sistemov. Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo Ljubljana, Ljubljana, 1987.
- [26] H. Seraji. Decentralized Adaptive Control of Manipulators: Theory, Simulation, and Experimentation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 2, pp. 183-201, 1989.
- [27] M. Thomas. Dynamic characteristics of tracking converters. *Powerconverters. Intell. Motion*, vol. 14, no. 8, pp. 40-42, August 1988.
- [28] D.C. Hanselman. Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 556-561, December 1990.
- [29] D.C. Hanselman. Techniques for improving resolver-to-digital conversion accuracy. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 6, pp. 501-504, December 1991.
- [30] J. Spetzer. A sinchro/resolver tutorial. *Powerconverters. Intell. Motion*, vol. 15, no. 11, pp. 24-29, November 1989.
- [31] S.D. Eppinger, W.P. Seering. Three Dynamic Problems in Robot Force Control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 6, pp. 751-758, 1992.
- [32] K.S. Fu, R.C. Gonzales, C.S.G. Lee. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [33] R.J. Schilling. Fundamentals of Robotics: Analysis and Control. Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, 1990.
- [34] G. Tomšič. Izbrana poglavja iz matematike. Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo Ljubljana, Ljubljana, 1994.
- [35] J.F. Nethery, M.W. Spong. Robotica: A Mathematica Package for Robot Analysis. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp. 13-20, March 1994.
- [36] R. Volpe, P. Khosla. A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 351-365, 1993.
- [37] J.M. Hyde, M.R. Cutkosky. Controlling Contact Transition. *IEEE Control Systems*, Vol. 14, No. 1, February 1994.
- [38] D.Guickin, J. Melcher, R. Wimmel. Active Impedance Control in Mechanical Structures. *Acustica*, Vol. 69, No. 2, pp. 39-52, 1989.



- 
- [39] H. Kazerooni. Automated Robotic Deburring Using Impedance Control. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 8, No. 1, pp. 21-25, 1988.
- [40] R. Vossoughi, M. Donath. Using Impedance Controlled Robots for Simulating Manipulation Tasks Occurring in a Gravityless Environment. *Proceedings 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 62-67, Cincinnati, 1990.
- [41] S.A. Scheider, R.H. Cannon. Object Impedance Control for Cooperative Manipulation: Theory and Experimental Results. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 3, pp. 383-394, 1992.
- [42] M. Pelletier, L.K. Daneshmend. Synthesis of Robust Compliant Motions Based on Impedance Models. *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 2713-2718, San Diego, 1994.
- [43] E. Dégoulange, P. Dauchez. External Force Control of an Industrial PUMA 560 Robot. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 523-540, 1994.
- [44] D. Matko, B. Zupančič, R. Karba. Simulation and Modelling of Continuous Systems: A Case Study Approach. Prentice Hall International, Hertfordshire, 1992.
- [45] N. Hogan. On the Stability of Manipulators Performing Contact Tasks. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 6, pp. 677-685, 1988.
- [46] F.L. Lewis, C.T. Abdallah, D.M. Dawson. Control of Robot Manipulators. Macmillan Publishing Company, New York, 1993.
- [47] H. Seraji. Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion. *Proceedings 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 2705-2712, San Diego, 1994.
- [48] R. Kamnik, D. Matko, T. Bajd. Robotski adaptivni impedančni regulator. *Zbornik tretje Elektrotehniške in računalniške konference ERK'94*, Vol. B, pp. 217-220, Portorož, 1994.
- [49] R. Kamnik, D. Matko, T. Bajd. Adaptive Impedance Control of an Industrial ASEA IRb 6 Robot. Sprejeto za predstavitev na *26th International Symposium on Industrial Robots*, Singapore, October 1995.

**Izjavljam, da sem magistrsko delo samostojno izdelal pod vodstvom mentorja prof.dr. Tadeja Bajda in komentorja prof.dr. Draga Matka. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.**

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'R. S.' or similar initials.