

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Damir Omrčen

**Kombinacija hitrostnega in navornega vodenja pri
mobilnem robotskem manipulatorju**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Jadran Lenarčič

Ljubljana, maj 2005

ženi Danici in sinu Valu

Zahvala

Zahvaljujem se svojemu mentorju prof. dr. Jadranu Lenarčiču za mentorstvo in koristne nasvete pri izdelavi doktorske disertacije.

Zahvaljujem se tudi vsem kolegom iz Odseka za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko na Institutu Jožef Stefan, ki so mi pomagali pri delu. Prav posebna zahvala gre dr. Bojanu Nemcu in dr. Leonu Žlajpahu, ki sta mi pomagala s koristnimi nasveti ter s svojim bogatim znanjem pozitivno vplivala na potek tega dela.

Za finančno podporo podiplomskega študija se zahvaljujem Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Nenazadnje bi se rad zahvalil svoji družini za moralno podporo v vseh letih študija.

Vsebina

1. Uvod	1
1.1 Opis ožjega znanstvenega področja in problematike	1
1.2 Cilji disertacije	7
1.3 Metodologija	9
2. Model sistema	13
2.1 Mobilna ploščad Nomad XR4000	13
2.1.1 Model ploščadi	15
2.2 Planarni robotski manipulator	24
2.2.1 Model robotskega manipulatorja	25
2.3 Kinematični model mobilnega manipulatorja	26
2.4 Dinamični model	27
2.4.1 Dinamični model	28
2.4.2 Določitev gravitacijskih členov	29
2.4.3 Določitev vztrajnostnih členov	29
2.4.4 Določitev Coriolisovih in centrifugalnih členov	31
2.5 Model robota z notranjimi koordinatami, ki niso izražene relativno	33
2.5.1 Notranje koordinate uporabljene pri mobilnem manipulatorju	35
2.6 Zaključek	37
3. Vodenje in analiza vodenja	39

3.1	Kombinacija hitrostnega in navornega vodenja	39
3.2	Analiza regulatorja	41
3.2.1	Analiza sledenja predpisani trajektoriji	41
3.2.2	Analiza odvisnosti sistema na zunanje sile	44
4.	Določitev naloge mobilnega manipulatorja	51
4.1	Naloga mobilnega manipulatorja	51
4.1.1	Izogibanje oviram v okolici ploščadi	52
4.1.2	Odmikanje od ovir v okolici manipulatorja	53
4.2	Določitev uteži posplošenega inverza	54
4.3	Nasičenje hitrosti in pospeškov	57
4.3.1	Kompenzacija pospeška	62
4.3.2	Rezultati kompenzacije nasičenja hitrosti	63
4.4	Gibalno območje ploščadi	64
4.5	Orodje za delo z mobilnimi manipulatorji	70
4.6	Povezava sistemov	71
5.	Rezultati in ovrednotenje dela	77
5.1	Primerjava med hitrostnim, navornim in kombiniranim načinom vodenja	77
5.1.1	Sledenje trajektoriji	78
5.1.2	Sila na vrhu manipulatorja	79
5.1.3	Sila na segmente mobilnega manipulatorja	81
5.2	Analiza odziva na realnem sistemu	84
5.2.1	Model trenja	86
5.2.2	Primerjava med navornim in kombiniranim načinom vodenja za sledenje trajektoriji v prostoru naloge v prostoru brez ovir	87

5.2.3	Sledenje trajektoriji v prostoru naloge v prostoru z ovirami	89
5.2.4	Gibanje v primeru kontakta vrha manipulatorja z okoljem	93
5.3	Drugi algoritmi za kombinirano vodenje	93
6.	Sklep	97
6.1	Izvirni prispevki	99
Literatura		101

Povzetek

Poglavitni prispevek doktorske disertacije je izdelava kombiniranega načina vodenja. To je povsem nov pristop k vodenju in združuje dva načina vodenja, to sta hitrostni in navorni način. Za ta način vodenja smo analizirali sledenje trajektoriji ter vpliv zunanje sile. V delu smo prikazali še modeliranje robotskega sistema ter nekaj dodatkov, ki izboljšajo delovanje robotskega sistema, kadar ima sistem omejene hitrosti oz. pospeške.

Robotski sistem v našem delu je sestavljen iz holonomne mobilne ploščadi in robotskega manipulatorja in je redundanten. V začetku dela smo predstavili modeliranje celotnega sistema. Ugotovili smo, da je ploščad možno voditi samo s hitrostjo ter da dobro sledi trajektoriji. Na tej ploščadi je nameščen manipulator, ki ga lahko vodimo tudi z navorom. Določitev dinamičnega modela manipulatorja, ki se nahaja na mobilni ploščadi, je prikazana v nadaljevanju dela. Razvita metoda določitve dinamičnega modela je namenjena različnim vrstam manipulatorjev, pri katerih se baza premika v ravnini. Temelji na predpostavki, da je dinamični model samega manipulatorja znan. Potrebno je določiti le tiste člene v dinamičnem modelu, ki jih prispeva gibanje ploščadi. Opisana metoda modeliranja je hitrejša in enostavnejša, manjša je tudi možnost napak v primerjavi z drugimi metodami opisanimi v literaturi.

Načini vodenja, ki so bili do sedaj opisani v literaturi, ne omogočajo vodenja sistemov, pri katerih je del sistema potrebno voditi s hitrostjo in del z navorom. Robotski sistem, ki smo ga uporabili v našem delu, je sestavljen ravno na ta način, saj je manipulator potrebno voditi z navorom ploščad pa s hitrostjo. Zaradi tega uporabimo kombinirani način vodenja, ki omogoča vodenje tako sestavljenih sistemov. Osnovan je na regulatorju pospeška. Regularne pospeške razdelimo v dva dela za vsak podsistem ločeno. Z integracijo določimo regularne hitrosti, ki jih uporabimo pri ploščadi. Za določitev regularnih navorov manipulatorja, pa upoštevamo dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi. Ker je ta

način vodenja novost, smo analizirali sledenje trajektoriji v prostoru naloge ter v ničelnem prostoru. Robotski sistem deluje v prostoru, kjer je možen tudi dotik z okoljem. V delu smo prikazali vpliv zunanje sile na gibanje robota. Pri tem smo analizirali silo v prostoru naloge ter ničelnem prostoru. Pri tem imajo pomembno vlogo parametri regulatorja. Parametri določajo togost sistema ter zmožnost sledenja trajektoriji. Večja togost pomeni boljše sledenje in obratno.

Raziskovalci so pokazali, da je redundanten robotski sistem dinamično konsistenten, če pri določitvi uteženega posplošenega inverza uporabimo utež, ki je enaka vztrajnostni matriki robota. To velja samo, če celoten sistem vodimo z navori. Če je sistem voden s kombiniranim načinom vodenja, smo pokazali, da to ne velja. Ugotovili smo še, da je takšen sistem lahko dinamično konsistenten, vendar z drugo utežjo. Žal pa z utežjo, ki zagotavlja dinamično konsistenco, sistem delno ločimo, kar ni zaželeno. Zaradi tega dinamična konsistenca v primeru kombiniranega načina vodenja ni uporabna.

Osnovni namen robotskega sistema je uporaba v okolju, kjer živi človek. V takšnem okolju mora imeti robot velik delovni prostor ter sposobnost manipulacije z objekti, kar lahko dosežemo z mobilnim manipulatorjem. V takšnem okolju, ki je največkrat neznan in se dinamično spreminja, moramo zagotoviti, da se robot izogiba oviram. To smo dosegli na dva različna načina. Prvi način je preprost, navezuje se na ploščad in temelji na merjenju razdalje do ovir. Večina komercialno dosegljivih ploščadi že ima vgrajene ultrazvočne senzorje razdalje, ki zaznavajo ovire v njeni okolici. Te ovire generirajo pomik ploščadi v ničelnem prostoru, ki povzroči odmik ploščadi stran od ovir. Na drugi strani je zaznavanje ovir v okolici manipulatorja zelo težavno, saj gre za meritve v 3D prostoru. Rešitve opisane v literaturi pa ne dajejo ustreznih rešitev. Zaradi tega smo uporabili princip, ki temelji na dejstvu, da sila ovire pri kontaktu povzroči silo na manipulator, ki manipulator odmakne stran od ovire. Predpogoj, da je takšno odmikanje možno, je, da ima manipulator nesamozaporne prenose in nizko trenje v sklepih. S primerno izbiro parametrov regulatorja pa moramo zagotoviti, da je manipulator podajen v ničelnem prostoru, da se oviri ne upira. Hkrati moramo zagotoviti dobro sledenje trajektoriji v ničelnem prostoru, to je izogibanje oviram v okolici ploščadi. Manipulator mora biti podajen tudi na vrhu (v prostoru naloge), saj lahko pride do dotika vrha z okoljem. Parametre regulatorja za prostor naloge

določimo tako, da sistem dobro sledi trajektoriji v prostoru naloge in da ima primerno obnašanje ob dotiku.

V disertaciji smo podali nekaj lastnih izboljšav k vodenju, ki odpravijo težave nastale zaradi končnih hitrosti in pospeškov ploščadi. Opisali smo gibanje ploščadi znotraj t.i. gibalnega območja ter popolno kompenzacijo presežkov hitrosti in pospeškov. S temi izboljšavami dosežemo manjši pogrešek v prostoru naloge ter se izogibamo singularnim konfiguracijam mobilnega manipulatorja.

Ob koncu dela smo podali primerjavo med tremi načini vodenja. Primerjali smo hitrostni, navorni in kombinirani način vodenja. Kljub omejitvi, da lahko ploščad vodimo samo s hitrostjo, smo dosegli, da so rezultati kombiniranega načina vodenja primerljivi z rezultati navornega načina ter so mnogo boljši kot pri hitrostnem načinu. Pri tem mislimo na sledenje trajektoriji ter na odziv sistema na zunanjo silo. Preizkusi na realnem sistemu so pokazali, da sistem zadovolji vsem zahtevam, ki smo jih podali v začetku dela. To pomeni, da je sistem dovolj natančen, ima velik delovni prostor, se odmika od vseh ovir v okolici manipulatorja ali ploščadi in pri tem uporablja le lastne senzorje, gibanje ob dotiku je ustrezno in se ga da nadaljevati.

Abstract

The main contribution of this thesis is development of combined control. This is a novel framework for robot control that integrates two different types of control i.e. velocity control and torque control. In addition in the thesis the mathematical analysis of the presented control algorithm and modelling of the robotic system is also shown.

The robotic system used in our work consists of a holonomic mobile platform and a robotic manipulator arm. This system is redundant. In the beginning we developed the mathematical model of the system. It was stated, that the mobile platform can only be controlled by velocity. The integrated controller ensures good tracking of the trajectory reference in spite of external forces. On the top of the mobile platform we have mounted the manipulator arm. The manipulator arm can also be controlled by torque. Later on we present the method for determining the dynamic model of a manipulator mounted on a mobile platform. The presumption for this method is that the model of the self-standing manipulator is known in advance. Therefore we have to determine only the elements in the dynamic model caused by the motion of the platform. Consequently the determination of the dynamic model is easier and faster with less possibility of fault comparing with other methods described in the literature.

Until now no control algorithm described in the literature enabled control of the system where one part of the system is controlled by torque and one part by velocity. Since the robotic system used in our work is controlled in this way we used combined control. This type of control enables control of such systems. The combined control is based on acceleration control. The control accelerations are divided into two parts. The first part corresponds with the platform and the second part with the manipulator. The velocity reference of the platform is obtained by integration of the platform part of the control acceleration. On the other hand the torques of the manipulator are obtained using the dynamic

model of the manipulator on the mobile platform and the manipulator part of the control acceleration. This system of combined control is new. Therefore, we have to analyse the system controlled by such control. The analysis includes tracking the trajectory reference in the task and null space. Furthermore, the influence of the external forces in the task and null space on the motion of the mobile manipulator is analysed. Using the controller parameters one can set the task space impedance and null space damping and quality of the trajectory tracking. Better trajectory tracking corresponds to higher stiffness and vice versa.

Redundant robotic system is dynamically consistent in case of inertia weighted generalized inverse. This is true only if we control all torques in the system. In case of combined controlled system this is not true. We have shown, that such system can also be dynamically consistent while using other weight. In this case the system is partly decomposed, which is not desired. As a result the dynamic consistency is not desired in case of combined control.

Robotic system used in our work can also be used in human environments. In such environments the robot must have large work space and ability of manipulation with objects. Both requirements are already fulfilled using our robotic system. Furthermore, human environments are highly unstructured and dynamic, therefore, the robotic system must have the ability of obstacle avoidance. For the obstacle avoidance two different principles are used. The first principle is used for the obstacle near the platform. Many commercially available mobile platforms already have integrated ultrasonic sensors for obstacle detection. The obstacles generate repulsive velocity in the null space that moves the platform away from the obstacles without influencing the task space. On the other hand, the obstacles near the manipulator are not measured. They are actually not avoided, but the contact forces, which occur after the collision between the manipulator links and obstacles, are minimized. To achieve this, the manipulator has to be backdrivable and the control should make the manipulator compliant in the null space. The controller parameters should assure high compliance in the null space and at the same time good trajectory tracking in the null space i.e. obstacle avoidance for the platform. The dynamics of the contact between the manipulator end effector and the environment and dynamics of the tracking of the trajectory in the task space define the controller parameters for the task space.

The platform used in our work has limited velocities and accelerations. During the movement this limitation can cause an error in the task space and is also a reason for bringing the manipulator in the singularity configuration. In scope of this thesis we developed a few improvements for solving such problems.

In the end of the work the comparison between three different control principles is made. We compared the velocity, torque and combined control. The results of trajectory tracing and response to external force show that the results of the combined control are comparable with the results of torque control and much better than the results of velocity control. The accuracy of the real system is satisfactory. The real robotic system has large work space and the ability of manipulation with objects. The robot avoids all obstacles near the platform and manipulator, using only integrated ultrasonic sensors. The dynamics of the contact with the environment is compliant and is tunable.

1. Uvod

Ob začetku pojava robotike je bila večina raziskav namenjena vpeljavi robotov v industrijo. Roboti so opravljali vnaprej določene naloge, gibi so bili ponovljivi, interakcija z okoljem zelo majhna. Kasneje so raziskovalci z uporabo senzorjev in robotskega vida dosegli določeno stopnjo avtonomije, saj so se trajektorije prilagajale trenutni situaciji. Z vpeljavo regulacijskih shem, ki temeljijo na vodenju sile, je robotika postala pomembna tudi pri opravilih, ki zahtevajo vodeno silo dotika z okoljem.

Trenutni trend na področju razvoja robotike je vpeljava robotov v vsakdanje življenje. Raziskovalci poskušajo vpeljati robote v domove ljudi, kjer okolja niso strukturirana tako kot v tovarnah. Pojavljajo se strežni roboti, roboti za čiščenje, roboti vodiči, roboti za rokovanje z nevarnimi snovmi in nenazadnje roboti, namenjeni samo zabavi. Na tem področju je vse več raziskav [1, 2, 3, 4, 5] in nekaj uspešnih aplikacij. Na tržišču je več vrst avtonomnih robotov za čiščenje [6] kot je npr. Electroluxov Trilobite za čiščenje tal. Sony je izdelal že kar nekaj robotov za zabavo (Aibo, Qrio). Hondin najnovejši humanoidni robot Asimo zna teči, hoditi in se rokovati z ljudmi. Obstaja tudi mnogo uporabnih robotov vodičev [7, 8, 9].

1.1 Opis ožjega znanstvenega področja in problematike

Problem, ki nastopa pri uporabi robotov v vsakdanjem življenju, je zapletenost in nestrukturiranost okolja, v katerem biva človek. Ta okolja so zelo nestrukturirana v primerjavi z delovnimi mesti v tovarnah. Poleg tega tudi niso opremljena s senzorji, ki bi robotu dali informacijo o prostoru. Zaradi tega mora biti robot bolj inteligenten ter doseči avtonomnost samo z uporabo lastnih senzorjev. Tudi delovni prostor teh robotov mora biti mnogo večji od delovnega prostora

manipulatorskih industrijskih robotov, saj običajno zavzema celotno stanovanje, pisarno, muzej, letališče ipd. Povečanje delovnega prostora robota dosežemo s premikanjem manipulatorskega robota po prostoru. Premikanje je lahko izvedeno z uporabo hodečih mehanizmov ali pa enostavneje z mobilnim robotom na kolesih.

Tematika mnogih raziskav v robotiki je razvoj mehanizmov in algoritmov za gibanje po neravnih terenih. Problematika je osredotočena predvsem na razvijanje struktur mehanizmov in vodenje takšnih mehanizmov. Enostavnejši so mobilni roboti, namenjeni vožnji po ravnih tleh. Ti roboti imajo običajno tri ali štiri kolesa. Delimo jih na holonomne in neholonomne robote. Holonomni roboti so zmožni neodvisnega gibanja v vseh treh prostostnih stopnjah v ravnini, to je translacija v obeh smereh ter rotacija okoli lastne osi, saj se lahko vsako kolo giblje neodvisno. Bolj omejeni so neholonomni roboti, ki imajo le dve prostostni stopnji in se zato ne morejo gibati neodvisno v vseh treh smereh v ravnini. Takšni roboti imajo eno ali dve kolesi, s katerimi robot lahko zavija, ostalih koles pa ne moremo obračati. Primer neholonomnega vozila je npr. avtomobil. Raziskave na področju obeh vrst mobilnih robotov so usmerjene predvsem v lokalizacijo robota v prostoru in na iskanje optimalne poti za izvedbo zelene naloge. Takšne raziskave so pomembne predvsem pri razvoju robotov vodičev, ki morajo voditi ljudi po vnaprej določeni poti v prostoru, ali pri robotih za čiščenje, ki morajo poznati celotni prostor.

Nekateri mobilni roboti so prirejani, da na njih namestimo robotski manipulator. Takšni roboti so običajno večji in težji ter imajo na vrhu večjo ravno površino, kamor se pritrdi manipulator. Takšne mobilne robote v literaturi pogosto imenujejo tudi "mobilne ploščadi". Za sistem, ki je sestavljen iz mobilne ploščadi in robotskega manipulatorja, pa se v literaturi največ uporablja izraz "mobilni manipulator", neredko pa tudi kar "mobilni robot". Z združitvijo mobilne ploščadi ter robotskega manipulatorja naj bi izkoristili dobre lastnosti obeh podsistemov ter zmanjšali njune pomanjkljivosti. Manipulatorji so običajno natančni in hitri, imajo pa omejen delovni prostor, nasprotno pa so ploščadi počasne in manj natančne, a imajo teoretično neskončen delovni prostor. Mobilni manipulator ima lahko torej visoko natančnost in hitrost ob "neskončnem" delovnem prostoru. Takšne lastnosti pa je možno doseči samo ob uporabi ustreznega sen-

zorskega sistema in ustreznega načina vodenja. V to skupino robotov sodijo t.i. strežni roboti. Le-ti morajo v sebi združevati mobilnost in sposobnost manipulacije, kjer sposobnost manipulacije omogoča robotu opravljanje opravil, sama mobilnost pa robotu povečuje delovni prostor.

Na področju vodenja mobilnih manipulatorjev je bilo v zadnjem času narejeno veliko raziskav [2, 10, 11, 12, 13, 14, 15] na različnih nivojih vodenja. Raziskave na višjih hierarhičnih nivojih so usmerjene predvsem v razvoj zahtevnih aplikacij, kot so na primer odpiranje vrat [16], zlaganje knjig [13], manipulacija z uporabo robotskega vida [14] itd. Posebno področje je tudi zagotavljanje stabilnosti sistema oziroma preprečevanje prevračanja mobilnega manipulatorja [17, 18]. Na nižjih hierarhičnih nivojih je predmet raziskav zagotavljanje pravilne izvedbe želenega gibanja določenega na višjih nivojih. Nekateri raziskovalci obravnavajo vodenje mobilnega manipulatorja na kinematičnem nivoju [12], kjer sta ploščad in manipulator vodena hitrostno. Naprednejši načini vodenja pa upoštevajo dinamične lastnosti sistema. V tem primeru sta oba podsistema vodena z navorom [2]. Z upoštevanjem dinamike lahko dosegamo večje hitrosti gibanja ter boljše obnašanje sistema v stiku z okoljem. Seveda pa v tem primeru potrebujemo dinamični model mobilnega manipulatorja [10, 19]. V praksi se pogosto srečamo s problemom, da krmilniki robotov ne omogočajo vodenja z navorom. Na primer, na tržišču ni komercialno dosegljive mobilne ploščadi, ki bi jo bilo možno voditi z navorom. Problem lahko rešimo s predelavo obstoječega krmilnika, kot je to predlagal Khatib [20]. Ta rešitev je sicer učinkovita, a draga in zahtevna ter zahteva mnogo razvojnega časa in denarja. Kot kompromis lahko uporabimo vodenje, kjer je ploščad vodena hitrostno, manipulator pa z navorom [21, 15]. Z uporabo tega načina vodenja lahko kljub uporabi obstoječega hitrostnega krmilnika ploščadi obdržimo nekaj prednosti dinamičnega načina vodenja.

Tudi na področju mobilnih manipulatorjev se po problematiki vodenja razlikujejo holonomni in neholonomni mobilni manipulatorji. Zaradi enostavnejše izdelave je večina mobilnih ploščadi neholonomnih. Zato tudi večina raziskav obravnava neholonomne mobilne manipulatorje [3, 11, 22, 14]. Tematika raziskovanja je usmerjena predvsem na reševanje neholonomnosti in kako nadomestiti to pomanjkljivost ploščadi z gibanjem manipulatorja. Tehnološko bolj dovršene so holonomne mobilne ploščadi. Prednost pri uporabi le-teh pri mobilnih mani-

pulatorjih je, da lahko mobilne stopnje prostosti obravnavamo kot serijski manipulator z dvema translacijskima in eno rotacijsko stopnjo [23]. Torej celoten sistem obravnavamo enako kot serijski mehanizem in pri tem uporabljamo enake metode vodenja kot pri običajnih serijskih nemobilnih manipulatorjih.

Celoten sistem ploščadi in manipulatorja lahko obravnavamo kot enoten mehanizem ali pa kot dva medsebojno povezana mehanizma. V primeru, da sistem obravnavamo kot enoten mehanizem, moramo uporabljati centralizirane regulatorje. Ta pristop se največ uporablja, kadar ni velike razlike v obravnavanju obeh podsistemov npr. pri holonomnih mobilnih manipulatorjih, kjer celoten sistem obravnavamo kot serijski manipulator. Prednost tega pristopa je, da je sistem obravnavan enotno in je zato sistemsko bolj podprt. Druga možnost je, da sistem obravnavamo kot dva ločena sistema in pri tem uporabljamo decentralizirane regulatorje. Pri tem je potrebno upoštevati še interakcije med obema podsistemoma. Ta pristop se največ uporablja pri neholonomnih mobilnih manipulatorjih. Običajno ima manipulator svojo nalogo in ploščad svojo, lahko pa je gibanje ploščadi direktno odvisno od konfiguracije manipulatorja [3] oziroma od trajektorije manipulatorja. Decentralizirano vodenje se uporablja tudi pri holonomnih mobilnih manipulatorjih, kadar sta si podsistema zelo različna. Tako je Khatib [24, 25] razdelil sistem na t.i. makro in mini del. Makro del sistema je tisti del sistema, ki je prvi v kinematični verigi in je večinoma pritrjen na tla. Običajno je počasnejši in manj natančen del celotnega sistema. Mini del sistema je običajno hitrejši in bolj natančen. Poleg tega mora imeti vsaj toliko prostostnih stopenj, kot jih zahteva naloga. Oba sistema morata biti medsebojno usklajena in sposobna kompenzirati slabosti drugega dela sistema.

Holonomni mobilni manipulatorji imajo običajno več stopenj prostosti, kot jih potrebujejo za izvršitev naloge, in so zaradi tega kinematično redundantni. Redundanca je pomembna lastnost, saj povečuje prilagodljivost robota. Redundantni roboti lahko poleg izvajanja osnovne naloge zadostijo tudi drugim zahtevam. Izvajanje osnovne naloge ima seveda največjo prioriteto, dodatne zahteve pa imajo nižjo prioriteto. Osnovno nalogo imenujemo "primarna naloga", tej pa sledijo ostale naloge kot sekundarna, terciarna in tako naprej, vsaka s svojo padajočo prioriteto. Na primer, primarna naloga je lahko sledenje trajektoriji, hkrati pa se od robota lahko zahteva, da se s svojimi segmenti odmika od ovir, mini-

mizira navore, se izogiba singularnim konfiguracijam, optimizira manipulabilnost itd. Na področju redundantnih mehanizmov je bilo v zadnjih letih veliko raziskav [26, 27, 28, 29]. V začetku so raziskovalci obravnavali redundantne stopnje kot pomanjkljivost mehanizma ter obravnavo redundantnega sistema preuredili na obravnavo neredundantnega. To so dosegli tako, da so zmanjšali število stopenj manipulatorja ali pa da so nalogi dodali dodatne omejitve in s tem povečali število potrebnih prostostnih stopenj za izvedbo naloge. Šele sčasoma se je na redundanco gledalo kot na prednost mehanizma. V literaturi je podanih več načinov kako izkoristiti redundanco kot prednost mehanizma. Eden izmed načinov je ta, da določene stopnje označimo kot redundantne, ostale pa kot neredundantne [30, 31]. Nekateri avtorji predlagajo uporabo Riemannove mnogoterosti [23]. Največkrat pa redundanco rešujemo z uporabo metod, ki temeljijo na lokalni optimizaciji in na uporabi psevdno ali posplošenega inverza [26]. Pri teh metodah je celoten sistem obravnavan enotno. To pomeni, da so vse stopnje obravnavane enako, ne da bi eksplicitno izbrali, katere so redundantne in katere ne.

Pri uporabi posplošenih inverzov je zelo pomembna izbira uteži pri določitvi uteženega posplošenega inverza. Khatib [25] je pokazal, da le z uporabo posplošenega inverza, uteženega z vztrajnostno matriko mehanizma, dosežemo, da je sistem dinamično konsistenten. Sistem je dinamično konsistenten, kadar navori v ničelnem prostoru ne povzročajo pospeškov v prostoru naloge oziroma kadar sile v prostoru naloge ne povzročajo pospeškov v ničelnem prostoru [32].

Za robote, ki delajo v nestrukturiranih prostorih, je pomembno, da se lahko odmikajo od ovir. Določitev gibanja med ovirami oziroma določanje proste poti med ovirami lahko temelji na lokalnih ali globalnih metodah. Pri globalnih metodah se načrta celotna pot od začetka do konca z upoštevanjem informacije o celotnem prostoru. Globalne metode so računsko zelo zapletene in se praviloma ne morejo izvajati v realnem času. Njihova uporaba je praktično vprašljiva predvsem, če se okolje med izvajanjem naloge spreminja. Računska kompleksnost teh metod se zelo povečuje s številom prostostnih stopenj robota. Lokalne metode pri iskanju rešitve upoštevajo le trenutno bližnjo okolico ter določajo le trenutno optimalne pomike robota. Računsko so enostavnejše in zaradi tega se običajno lahko izvajajo v realnem času. Seveda te metode ne zagotavljajo vedno globalno optimalne rešitve. Brock [33] je predlagal način, pri katerem kombiniramo obe

metodi. Začetna pot je načrtana globalno, spreminjanje poti v odvisnosti od trenutne pozicije ovir pa je lokalno in poteka v realnem času. Metodo je zasnoval na t.i. "elastičnem traku" ter "mehurčkih", ki predstavljajo trenutni prosti prostor okoli robota.

Pri lokalnih metodah izogibanje oviram običajno temelji na merjenju razdalje med segmenti robota in ovirami [34, 35, 36]. Na podlagi te razdalje se določa nadaljnje gibanje robota. Merjenje razdalje med mobilno ploščadjo in ovirami običajno ni problematično, saj se ploščad giblje v ravnini in lahko izvajamo meritve samo v ravnini. V ta namen imajo mobilne ploščadi običajno na obodu že vgrajene senzorje za merjenje razdalje. Največkrat so to ultrazvočni senzorji, ki merijo razdaljo le v eni smeri. Če pa uporabimo obroč teh senzorjev okoli celotne ploščadi, lahko zaznavamo ovire v vsej ravninski okolici. Nasprotno je ugotavljanje prostega prostora okoli manipulatorjev bolj zahtevna naloga, saj se celotna problematika razširi na 3D prostor. Čeprav obstaja več načinov ugotavljanja celotnega prostega prostora okoli robota, se noben ni zares uveljavil. Na primer, prosti prostor lahko določimo z množico kamer, ki modelirajo prostor. Računska kompleksnost takšnih metod je velika. Poleg tega pa prostora, ki je kameram skrit za oviro, ne moremo modelirati. Druga možnost je, da ima vsak segment manipulatorja mrežo senzorjev, ki zaznavajo ovire. Slabost tega načina je veliko število senzorjev, ki dražijo sistem, ter množica žic do posameznega senzorja. Kot naslednjo možnost nekateri avtorji predlagajo uporabo na dotik občutljive "kože" [37]. V tem primeru se na segmente pritrudi mreža senzorjev dotika, ki dajo podatek o kontaktu robota z oviro. Slabost teh senzorjev je, da se ovira zazna šele s samim dotikom, tako da se robot izogne oviri šele po dotiku iz zato lahko pri tem pride do poškodb. Ta način je tudi drag in njegova izvedba je mehansko zahtevna. Nekateri avtorji [36] pa predlagajo povsem drugačen pristop k odmikanju od ovir. Predlagajo, da se ovir sploh ne zazna. V primeru da do trka pride, mora biti vodenje načrtano tako, da robot sili ovire ne nasprotuje, ampak da sila povzroči odmik robota od ovire. Pristop temelji na osnovnem fizikalnem zakonu akcije in reakcije. Sila trka povzroči reakcijsko silo na segment, kjer je prišlo do trka. Ta sila pa mora odmakniti segment stran od ovire. Predpogoj, da je tak pristop k odmikanju od ovir možen, je, da mora imeti manipulator nesamozaporne prenose ter da ima nizko trenje v sklepih. Torej ga je možno premikati z dovolj majhno silo na segmentu robota.

Nekatere naloge zahtevajo, da pride robot v stik z okoljem. V takem primeru je potrebno voditi silo dotika [38, 39, 29, 40, 41]. Silo lahko reguliramo na več različnih načinov. V grobem jih lahko razdelimo na impedančno vodenje in hibridno vodenje. Impedančno vodenje omogoča, da se vrh robota obnaša kot linearni sistem z določeno impedanco, to je z navidezno maso, dušenjem in elastičnostjo. Hibridno vodenje [39] pa združuje regulacijo hitrosti in sile. V regulatorju se določi, v kateri smeri naj poteka regulacija hitrosti in v kateri regulacija sile. Pri obeh načinih je za natančno regulacijo sile potrebna povratna zanka sile, za kar potrebujemo senzor sile.

Pri robotih, ki delajo s človekom, ni tako pomembna natančna regulacija sile. Bolj kot da je sila natančna, je pomembno, da je ta sila omejena in da je obnašanje robota podajno. Iz vsakdanjega življenja vemo, da tudi ljudje težko dosegajo natančno silo ob dotiku, lahko pa dobro prilagodijo podajnost roke trenutnim razmeram. Pri robotih lahko z uporabo regulatorja za vodenja pospeška [42, 29] dosežemo podajno obnašanje vrha robota in pri tem ne potrebujemo senzorja sile.

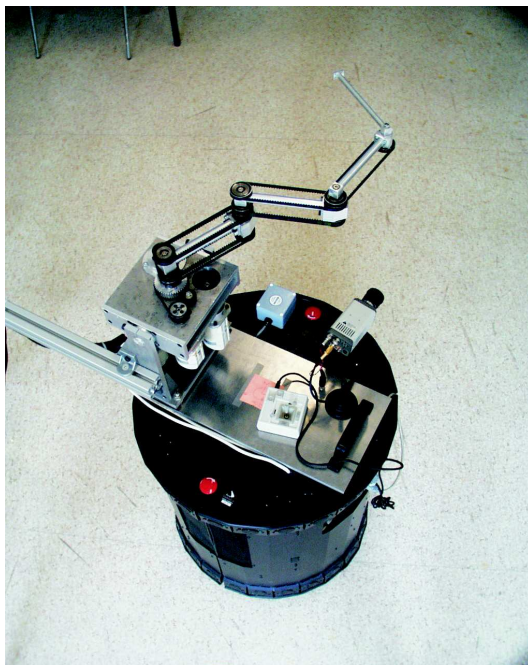
1.2 Cilji disertacije

Namen disertacije je razviti robotski sistem, ki je sposoben delovanja v človekovem okolju. Pri tem želimo zadostiti naslednjim zahtevam:

- Robot mora imeti dovolj velik delovni prostor in sposobnost manipulacije z objekti.
- Sistem vodenja mora zagotavljati avtonomno gibanje v nestrukturiranih okoljih ter sledenje predpisani trajektoriji vrha. Pri tem se mora robot učinkovito odmikati od vseh ovir v svoji okolici, pri čemer ne sme priti do poškodb ovire ali robota. Trajektorija gibanja vrha robota je podana z zunanjim sistemom.
- Za detekcijo ovir lahko uporabimo le senzorje razdalje, ki se nahajajo v/na robotu. Zunanji sistem za detekcijo ovir ni na voljo.
- Robot mora izkoriščati prednosti redundantnih mehanizmov, to je slediti predpisani trajektoriji in se hkrati odmikati od ovir.

- V primeru dotika z okoljem se zahteva, da je sistem podajen.
- Vodenje mora delovati v realnem času na realnem sistemu.

Za doseg velikega delovnega prostora in sposobnosti manipulacije smo uporabili mobilni manipulator. V našem primeru je mobilni manipulator sestavljen iz planarnega manipulatorja, nameščenega na holonomni mobilni ploščadi (slika 1.1). Uporabljeni manipulator ima nesamozaporne prenose ter nizko trenje v sklepih, ima štiri prostostne stopnje in omogoča vodenje s hitrostjo ali z navorom. Ploščad ima vgrajen obroč ultrazvočnih senzorjev razdalje. Vodimo jo lahko le s hitrostjo.



Slika 1.1: Mobilni manipulator

Pričakovani prispevki doktorske disertacije so:

- Razvoj sistema za kombinirano vodenje mobilnega manipulatorja.

Ploščad ne omogoča vodenja z navorom, sama predelava krmilnika pa ni smiselna. Razvili smo sistem za kombinirano vodenje, kjer je ploščad vodena hitrostno, manipulator pa z navori. Sistem voden s kombiniranim načinom vodenja zagotavlja boljše rezultate, kot če bi bil celotni sistem hitrostno voden.

- Razvoj dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi.

Vpeljali smo učinkovitejši način za razvoj dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi. Metoda temelji na predpostavki, da je model manipulatorja znan. Potrebno je določiti le tiste člene, ki so posledica gibanja ploščadi.

- Matematična analiza sistema vodenja ter realizacija na realnem sistemu.

Razviti algoritem smo najprej analizirali z uporabo matematičnih postopkov. Pri tem smo analizirali sledenje trajektoriji primarne ter sekundarne naloge. Vsa analiza je opravljena za sistem, na katerega ne delujejo zunanje sile, ter za sistem, na katerega delujejo zunanje sile v prostoru naloge in/ali v ničelnem prostoru. Matematične rezultate smo preverili s pomočjo simulacije. V ta namen smo uporabili simulacijski program, ki deluje v okolju Matlab Simulink in ki smo ga razvili namensko za uporabo pri mobilnih manipulatorjih. Na koncu smo algoritem realizirali še na realnem sistemu, ter ga tudi ovrednotili.

- Postopki za izboljšanje delovanja sistema.

Uporabljena mobilna ploščad omogoča samo hitrostno vodenje, pri čemer so hitrosti in pospeški omejeni. Zaradi omejitev lahko v določenih primerih pride do povečanja pogoška ter do singularnih konfiguracij. Predlagali smo nekaj izboljšav k vodenju in s tem dosegli boljše delovanje sistema.

1.3 Metodologija

Najprej smo določili matematični model gibanja mobilnega manipulatorja. V 2. poglavju je opisana določitev matematičnega modela gibanja ploščadi. Podana je odvisnost med referenčno hitrostjo ploščadi in njenim dejanskim premikom. Pri tem smo identificirali sistem kot črno škatlo, ugotavljali, ali je sistem multivariabilen, analizirali odvisnost orientacije posameznih koles ter analizirali vpliv zunanje sile na gibanje.

V nadaljevanju poglavja je prikazan postopek določitve dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi ter določitev modela trenja. Določitev dinamičnega modela temelji na predpostavki, da je dinamični model samega manipu-

latorja znan. Ta predpostavka je velikokrat izpolnjena. Predstavljena je metoda, ki omogoča določitev samo tistih elementov v dinamičnem modelu, ki so posledica gibanje ploščadi. To so elementi, ki opisujejo vztrajnosti manipulatorja zaradi pospeškov ploščadi ter centrifugalni in Coriolisovi elementi zaradi rotacije ploščadi. V primeru, da se ploščad giblje v vodoravni ravnini, ni dodatnih vplivov gravitacije. Predstavljena metoda je osnovana na Lagrangeovi metodi določitve dinamičnega modela. S podano metodo smo poenostavili modeliranje v primerjavi z metodo, ki modelira mobilni manipulator kot enovit sistem ter zmanjšali možnost napake.

V 3. poglavju smo opisali regulator, namenjen redundantnim sistemom, ki združuje navorno in hitrostno vodenje. Predlagani način vodenja smo poimenovali "kombinirano vodenje". Podani način kombiniranega vodenja je v svetu novost. Regulator je osnovan na regulatorju za vodenje pospeška [42, 29] in je razdeljen na dva dela. Prvi del regulirnih pospeškov se vodi v regulator za ploščad, drugi del pa v regulator za manipulator. Regulator za manipulator določa navore v sklepih manipulatorja, pri čemer upošteva celotni dinamični model manipulatorja s trenjem ter vse dinamične interakcije s ploščadjo.

V nadaljevanju poglavja smo dokazali, da predstavljeni regulator zagotavlja sledenje trajektoriji v prostoru naloge ter v ničelnem prostoru, kadar so zunanje sile enake nič. Nato smo podali analizo vpliva zunanjih sil. Prikazan je vpliv zunanje sile na gibanje v prostoru naloge ter ničelnem prostoru. Obravnavali smo primere, ko je zunanja sila delovala na vrhu manipulatorja, na sklepe manipulatorja ali na mobilno ploščad. Pokazali smo tudi, ali je lahko sistem voden s takšnim načinom vodenja dinamično konsistenten in pod kakšnimi pogoji.

V naslednjem 4. poglavju smo definirali primarno in sekundarno nalogo mobilnega manipulatorja. Prikazan je način izogibanja oviram v okolici ploščadi, ki temelji na merjenju razdalje do ovir. V odvisnosti od razdalje do ovir regulator generira odbojno hitrost v ničelnem prostoru, ki povzroči odmik ploščadi stran od ovir. Prikazali smo tudi, kako se lahko manipulator odmika od ovir, kadar robotski sistem ni opremljen s senzorji za zaznavanje ovir v okolici manipulatorja.

V nadaljevanju poglavja smo podali različne postopke za izboljšanje vodenja. Zaradi končnih hitrosti in pospeškov ploščadi se lahko pojavijo večji pogoški v prostoru naloge in pride sistem do singularne konfiguracije. Zaradi tega smo

razvili algoritem namenjen redundantnim sistemom, ki v primeru prekoračitve hitrosti oziroma pospeška ustrezno poveča hitrosti v drugih sklepih in zagotavlja, da ne pride do pogrškov v prostoru naloge. Podan je tudi algoritem za omejevanje hitrosti ploščadi, da le-ta ne prekorači t.i. "gibalnega območja". S tem algoritmom preprečimo, da bi sistem prišel v singularno konfiguracijo.

V okviru raziskav smo intenzivno uporabljali simulacijska orodja. V ta namen smo izdelali orodje za delo z mobilnimi manipulatorji, ki je opisano v istem poglavju. Orodje je bilo razvito za programski paket Matlab in Matlab Simulink in je uporabno za različne mobilne manipulatorje, saj ne predpisuje njegove strukture. S pomočjo tega orodja lahko določimo modele mobilnega manipulatorja in testiramo različne načine vodenja. Orodje vključuje grafično predstavitev rezultatov. Bistvena lastnost pa je, da lahko vključimo v regulacijsko zanko tudi realen sistem.

Ob koncu poglavja je predstavljena izvedba na realnem sistemu. Predstavljen je celotni postopek izdelave, testiranja in realizacije algoritmov. Pri tem poteka izdelava in testiranje algoritmov na posebnem računalniku z uporabo Matlab Simulinka na zelo visokem hierarhičnem nivoju, samo vodenje sistema pa poteka na ločenem računalniku z omejenim operacijskim sistemom in omogoča visoke frekvence vzorčenja in delovanje v realnem času. Prikazana je tudi povezava med vsemi sklopi sistema.

V predzadnjem poglavju smo naše delo uvrstili v delo, opravljeno na področju robotskih mehanizmov. Prikazana je primerjava med hitrostmim, kombiniranim in navornim načinom vodenja. Ta primerjava je izvedena samo s pomočjo simulacije. V nadaljevanju so prikazani rezultati implementacije na realnem sistemu. Ob koncu poglavja smo naredili primerjavo z drugimi načini kombiniranega vodenja.

2. Model sistema

V poglavju je opisan mobilni manipulator, ki smo ga uporabili v našem delu. Mobilni manipulator je sestavljen iz mobilne ploščadi Nomad XR4000 in planarnega robotskega manipulatorja s štirimi prostostnimi stopnjami. Ploščad lahko vodimo samo hitrostno. Vsebuje vgrajeni hitrostni regulator, ki določa odvisnost med referenco hitrosti in dejanskim premikom. Tipa regulatorja ne poznamo, tako tudi te odvisnosti ne poznamo in jo je potrebno določiti. Sistem smo identificirali kot črno škatlo, kjer ne poznamo ne strukture ne parametrov. Pri tem smo upoštevali morebitno multivariabilnost sistema, ugotavljali vpliv gibanja in začetne orientacije posameznega kolesa ter analizirali vpliv zunanje sile.

Uporabljeni robotski manipulator ima nesamozaporne prenose med motorji in sklepi ter razmeroma nizko trenje. Dinamični model manipulatorja poznamo. V poglavju smo opisali metodo določitve modela manipulatorja na mobilni ploščadi, pri čemer določimo le elemente, ki jih prispeva gibanje ploščadi. Večina metod za določanje dinamičnega modela temelji na notranjih koordinatah, ki so podane relativno, to je, da so koti med segmenti manipulatorja izraženi relativno glede na prejšnji segment. V našem primeru so notranje koordinate, zaradi zgradbe manipulatorja, podane v drugi obliki. Tako smo ob koncu poglavja podali preslikave med matrikami dinamičnega modela, ki omogočajo preslikavo iz relativno izraženih notranjih koordinat v notranje koordinate, ki niso izražene v relativni obliki.

2.1 Mobilna ploščad Nomad XR4000

V našem eksperimentalnem delu smo uporabili mobilno ploščad Nomad XR4000 (slika 2.1). To je komercialno dosegljiva mobilna ploščad proizvajalca Nomad Technologies. Ploščad je valjaste oblike. Na zgornjem in spodnjem robu "valja" ima

vgrajena obroča s po 24 ultrazvočimi in infrardečimi senzorji razdalje. Z uporabo ultrazvočnih senzorjev lahko zaznavamo ovire, ki se nahajajo v ravnini ploščadi in so od ploščadi oddaljene od približno 20 cm do približno 5 m. Zaznavanje predmetov v okolici ploščadi in izogibanje trkom je zelo pomembno, saj znaša teža ploščadi preko 180 kg, ploščad pa se lahko giblje z maksimalno hitrostjo 1,5 m/s. Višina ploščadi znaša 85 cm, premer pa 64 cm. Ploščad omogoča pritrditev in vožnjo drugih težjih predmetov (npr. manipulatorja), kar je tudi razlog za takšno velikost in težo. Ploščad poganjajo štiri kolesa, ki so vsa gnana, vsako od njih se lahko neodvisno orientira in vrti. Z usklajenim vodenjem vseh štirih koles dosežemo, da se lahko ploščad giblje povsem neodvisno v vseh treh prostostnih stopnjah v ravnini (to so dve translaciji in ena rotacija). Ploščad, ki se lahko giblje neodvisno v vseh treh prostostnih stopnjah v ravnini, je holonomna ploščad.



Slika 2.1: Mobilna ploščad Nomad XR4000

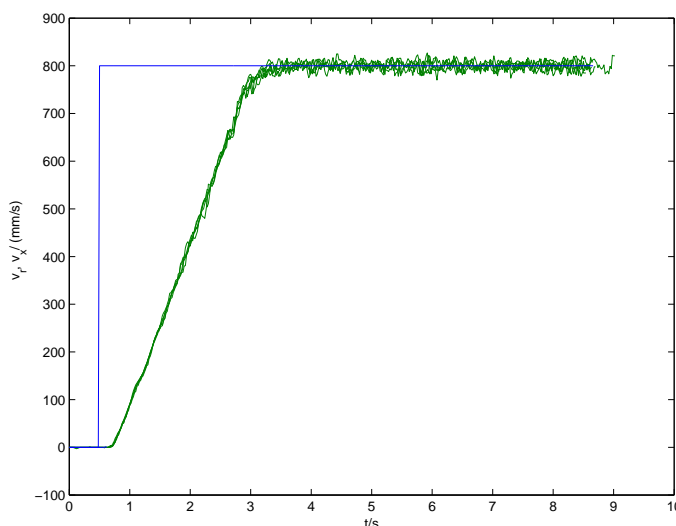
Čeprav se vsako kolo lahko giblje neodvisno, uporabnik nima vpliva na gibanje posameznega kolesa. Uporabnik določi želeno hitrost v posamezni prostostni stopnji. Vgrajeni regulator določa hitrosti vrtenja in orientacije posameznih koles in poskrbi, da ploščad v določenem času doseže željeno hitrost. Poleg tega uporabnik dostopa tudi do podatkov o legi ploščadi v prostoru glede na nek globalni koordinatni sistem ter do podatkov ultrazvočnih in infrardečih senzorjev.

2.1.1 Model ploščadi

Za načrtovanje vodenja je potrebno določiti model ploščadi. Potrebno je določiti, kakšna je odvisnost med želeno referenčno hitrostjo in odzivom ploščadi. Ker vgrajenega regulatorja hitrosti, ki določa to odvisnost, ne poznamo, sistem obravnavamo kot črno škatlo.

Identifikacija ploščadi

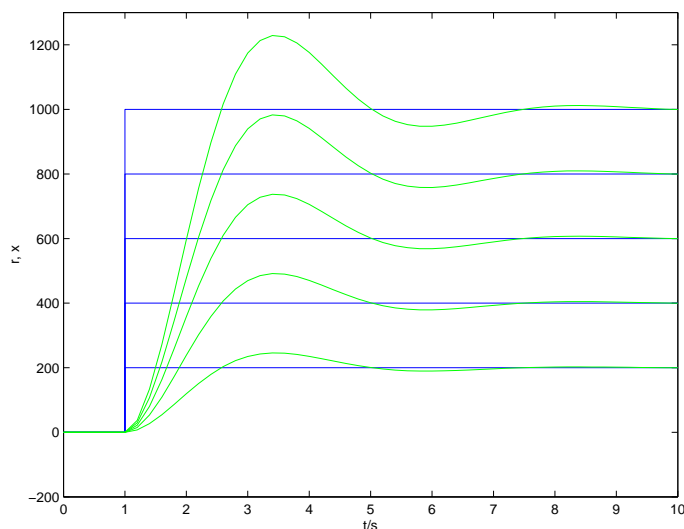
V začetku identificiramo odziv gibanja ploščadi, ki se giblje v smeri samo ene prostostne stopnje. Pred postopkom identifikacije se prepričamo, ali so odzivi na enako referenco dovolj ponovljivi, saj je v nasprotnem primeru identifikacija nezanesljiva. Na stopničasto referenco hitrosti (v_r) v smeri prostostne stopnje x smo izvedli pet meritev (slika 2.2). Na tej in sledečih slikah je z modro prikazana referenca, z zeleno pa odziv. Ugotovimo, da so odzivi (v_x) ponovljivi, tako da je sistem primeren za identifikacijo. Pomembna ugotovitev je tudi, da hitrost po prehodnem pojavu doseže želeno vrednost in nima pogreška v ustaljenem stanju.



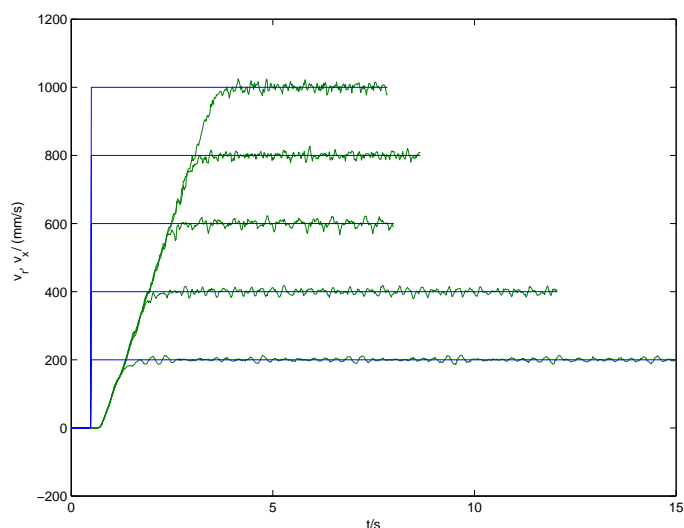
Slika 2.2: Ponovljivost odziva na stopničasto referenco

Ker je analiza linearnih sistemov mnogo enostavnejša od analize nelinearnih sistemov, smo skušali modelirati ploščad kot linearen sistem 2. reda. Odziv sistema 2. reda na različne nivoje stopnic (r) da tipičen odziv (x), ki je prikazan na sliki 2.3. Normirani odziv je vedno enak neodvisno od izbire nivoja stopnice. Pri-

merjava odzivov na različne nivoje stopničaste reference pri ploščadi (slika 2.4) pa kaže, da zaprto-zančni sistem ni linearen, kot smo predpostavili. Izkaže se, da je odziv močno odvisen od višine stopnice. Ugotovimo, da je naklon krivulje hitrosti med prehodnim pojavom konstanten, kar pomeni, da pride pospešek ploščadi v nasičenje. Na sliki opazimo tudi zakasnitev dejanskega signala za referenčnim, kjer je zakasnitev konstantna.



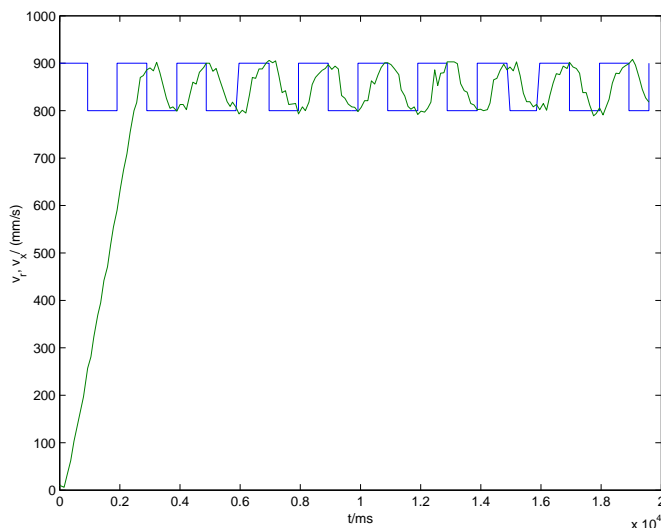
Slika 2.3: Primerjava odzivov na različne višine stopnic pri linearnem sistemu 2. reda



Slika 2.4: Primerjava odzivov na različne višine stopničastih referenc pri ploščadi

Pospešek pride v nasičenje samo v primeru velike razlike med referenčnim in

dejanskim signalom. Kadar se dejanska vrednost približa referenčni, pospešek ni več v nasičenju. To lahko vidimo pri odzivu na manjše spremembe reference (slika 2.5). V tem primeru je odziv močno zakrit s šumom, zato natančnejše identifikacije ne izvajamo.



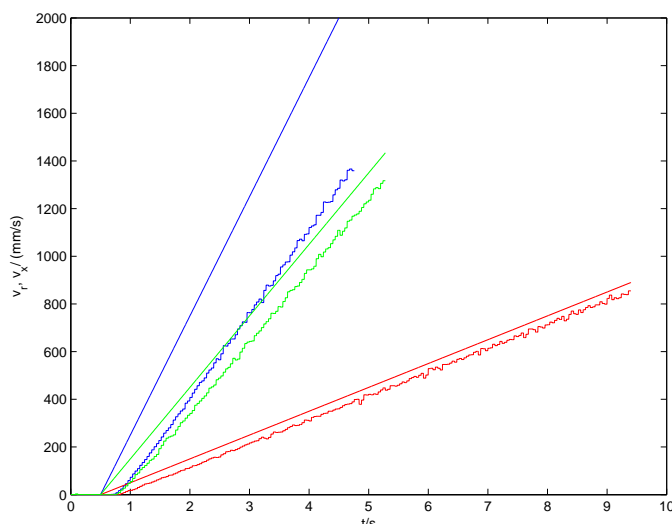
Slika 2.5: Odziv na majhne spremembe reference

Slika 2.6 prikazuje sledenje rampi (signalu s konstantnim naklonom). Prikazane so tri rampe z različnimi nakloni ter njihovi odzivi. Modra prikazuje rampo z naklonom 500 mm/s^2 , zelena z naklonom 300 mm/s^2 in rdeča z naklonom 100 mm/s^2 . V primeru počasne spremembe reference (100 mm/s^2 in 300 mm/s^2) ploščad sledi referenci s časovnim zaostankom. Kadar je sprememba reference večja od nasičenja pospeška, se hitrost ploščadi povečuje s pospeškom nasičenja in ne more slediti referenci (rampa z naklonom 500 mm/s^2).

Model sistema, pri katerem izhodni signal sledi referenčnemu signalu ter ima nasičenje na spremembi izhodnega signala, zadovolji našim potrebam. Model je torej sledeč

$$v = \begin{cases} v_r, & \left| \frac{dv}{dt} \right| < |a_{nas}|, \\ a_{nas}t, & \text{drugače} \end{cases}, \quad (2.1)$$

pri čemer v predstavlja dejansko hitrost gibanja, v_r referenčno hitrost gibanja in a_{nas} pospešek nasičenja.



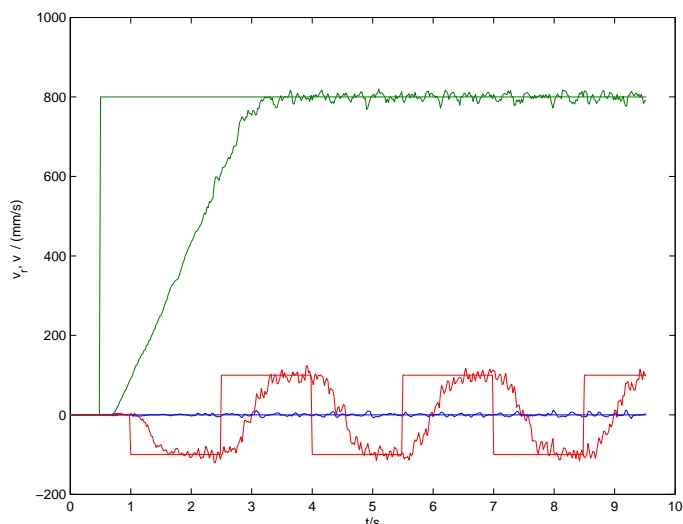
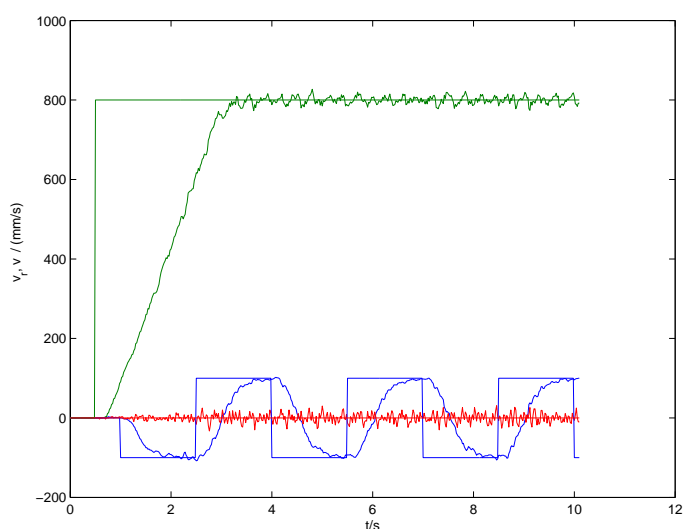
Slika 2.6: Sledenje rampam z različnimi nakloni

Enak postopek identifikacije, kot smo ga uporabili za določitev gibanja v smeri prostostne stopnje x , ponovimo še na ostalih dveh prostostnih stopnjah. Rezultati so podobni.

Medsebojni vpliv prostostnih stopenj

Navedene ugotovitve temeljijo na dejstvu, da se ploščad giblje le v smeri ene prostostne stopnje. Ploščad pa se lahko giblje v več prostostnih stopnjah hkrati. Sistem je multivariabilen v primeru, da gibanje v eni prostostni stopnji vpliva na gibanje v drugi prostostni stopnji. Za določitev medsebojnega vpliva posameznih prostostnih stopenj je potrebno, da se sistem hkrati giblje v več prostostnih stopnjah hkrati. Za ta namen uporabimo za referenco v eni prostostni stopnji stopnico, v drugi pa vlak pravokotnih impulzov (sliki 2.7 in 2.8). Na slikah je z zeleno barvo označeno gibanje v prostostni stopnji x , z rdečo v y in z modro v φ .

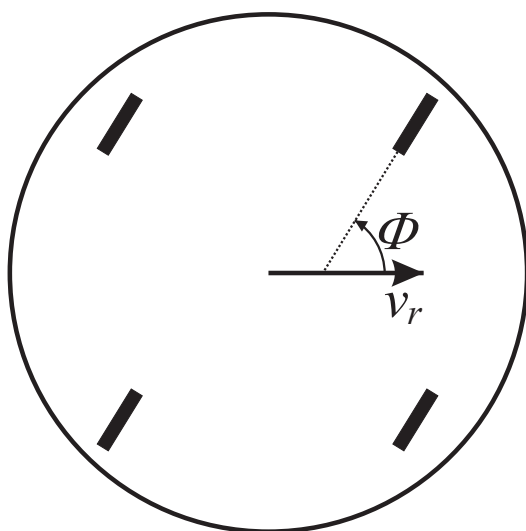
Primerjava med slikama 2.7 in 2.8 ter sliko 2.2 kaže na manjši vpliv drugih prostostnih stopenj v času pospeševanja, v ustaljenem stanju pa je ta vpliv zanemarljiv. Zato lahko sistem smatramo kot univariabilen in s tem poenostavimo vodenje.

Slika 2.7: Vpliv hitrosti v prostostni stopnji y na hitrost v prostostni stopnji x Slika 2.8: Vpliv hitrosti v prostostni stopnji φ na hitrost v prostostni stopnji x

Vpliv orientacije koles

Začetna orientacija koles ploščadi ima velik vpliv na obnašanje ploščadi. Slika 2.9 prikazuje primer, kjer so vsa kolesa zasukana od prave smeri za kot ϕ . V primeru, da so kolesa na začetku gibanja obrnjena v pravo stran $\phi = 0$, ploščad mnogo hitreje doseže končno hitrost, kot če so kolesa obrnjena v nasprotno stran $\phi = \pi$. Odziv na stopnico je različen za različne začetne orientacije koles (slika 2.10). Vpliv začetne orientacije koles je zelo težko določljiv, kot lahko vidimo s

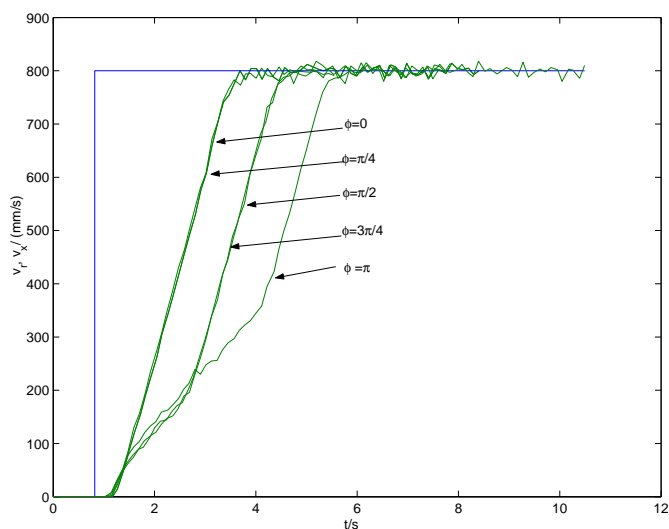
slike 2.10. Poleg tega imajo lahko različna kolesa različno začetno orientacijo, kar še otežuje določitev. V primeru, da se ploščad giblje, ima orientacija koles mnogo manjši oz. zanemarljiv vpliv. V tem primeru se orientacija koles spremeni hitreje, saj je trenje med kolesom in tlemi med zasukom manjše, če se ploščad giblje. Na sliki 2.11 je prikazan odziv na stopnico 800 mm/s v smeri prostostne stopnje x , pri tem pa se robot že giblje s hitrostjo 800 mm/s v smeri prostostne stopnje y , tako da imajo kolesa orientacijo $\phi = \pi/4$ pred začetkom gibanja v pravokotni smeri. V tem primeru je vpliv začetne orientacije koles zanemarljiv, kar je razvidno iz primerjave slik 2.11 in 2.2.



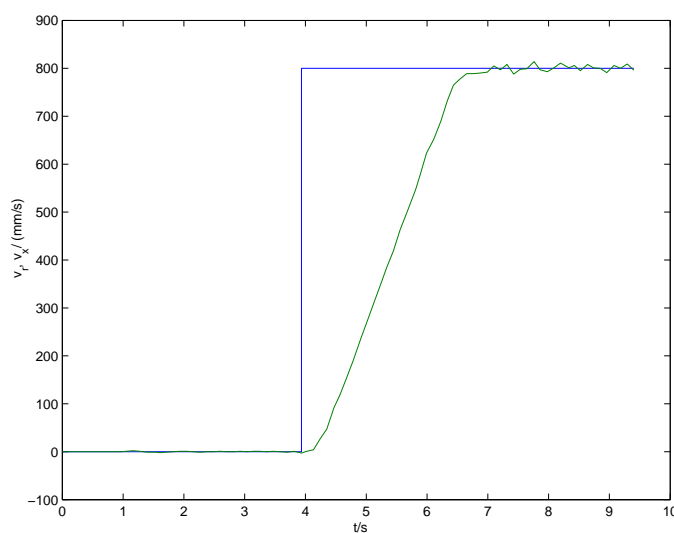
Slika 2.9: Prikaz orientacije koles ploščadi

Slika 2.12 prikazuje sledenje rampi, pri čemer so kolesa na začetku gibanja obrnjena v nasprotno stran. Prikazane so tri rampe z različnimi nakloni ter njihovi odzivi. Modra prikazuje rampo z naklonom 500 mm/s^2 , zelena z naklonom 300 mm/s^2 in rdeča z naklonom 100 mm/s^2 . Zaradi nasprotno obrnjenih koles je pospešek nasičenja v tem primeru manjši kot običajno. Izhodni signal dobro sledi referenci v primeru počasne reference (100 mm/s^2). V primeru, kadar je sprememba večja od nasičenja pospeška pri narobe obrnjenih kolesih, pa se hitrost ploščadi povečuje s pospeškom nasičenja in ne more slediti referenci (rampe z naklonom 300 mm/s^2 in 500 mm/s^2).

Podatki o orientacijah koles niso na voljo, iz zgodovine gibanja bi lahko približno skleпали, kakšne te orientacije so. Poleg tega je vpliv orientacije koles zelo

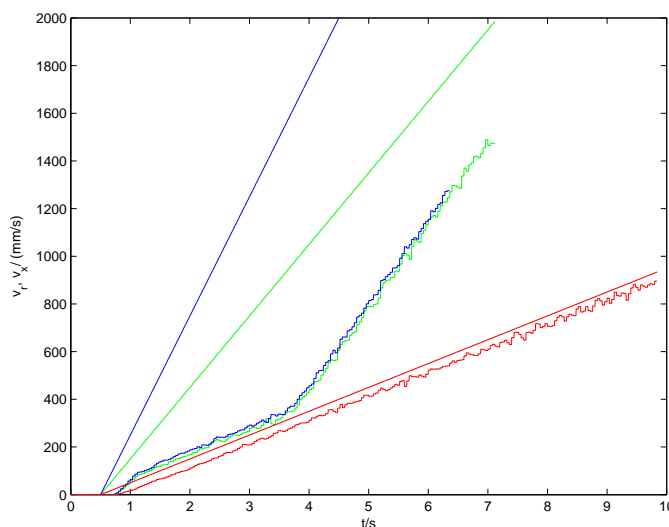


Slika 2.10: Vpliv začetne orientacije koles na odziv na stopnico



Slika 2.11: Vpliv orientacije koles med gibanjem ploščadi v pravokotni smeri

težko določljiv, sploh če imajo različna kolesa različno orientacijo. Zaradi tega smatramo vpliv orientacije koles kot motnjo, ki je nismo identificirali. Pri tem smo vzeli na znanje, da je pravilnost modela slabša v primeru visokih pospeškov iz mirujočega gibanja z veliko spremembami smeri, saj je vpliv orientacije koles v tem primeru večji.



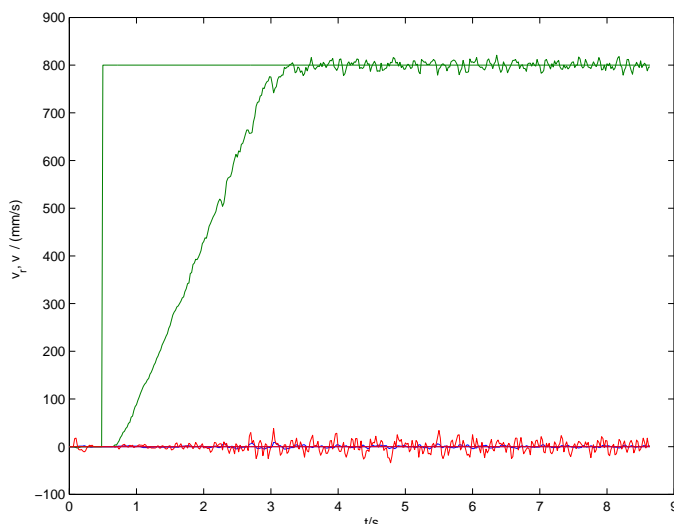
Slika 2.12: Sledenje rampam z različnimi nakloni z obratno orientacijo koles

Vpliv zunanje sile

Mobilna ploščad je prirejena pritrditvi robotskega manipulatorja. Manipulator s svojim gibanjem povzroča silo na ploščad, ki lahko vpliva na gibanje ploščadi. Ugotoviti je potrebno, kakšen je vpliv gibanja manipulatorja na gibanje ploščadi. V našem primeru je masa manipulatorja v primerjavi z maso ploščadi zelo majhna. Vpliv smo testirali tako, da se je manipulator vrtel s konstantno hitrostjo (5 rad/s), pri tem je povzročal sinusno spreminjajočo se silo na ploščad. Ocenjujemo, da je bila hitrost vrtenja manipulatorja in s tem tudi sila na ploščad večja kot pri običajnem delovanju. Slika 2.13 prikazuje gibanje v vseh treh prostostnih stopnjah ter njihove reference. Z zeleno barvo je označeno gibanje v prostostni stopnji x , z rdečo v y in z modro v φ . Iz primerjave slik 2.13 in 2.2 ugotovimo, da gibanje manipulatorja nima opaznejšega vpliva na gibanje ploščadi, regulator ploščadi v tem primeru uspešno odpravi zunanje motnje.

Določitev lege ploščadi

Za določanje lege (pozicije in orientacije) ploščadi se meri gibanje posameznega kolesa. Iz teh podatkov se nato izračuna lega. Zaradi drsenja koles se pojavi pogrešek lege, ki se akumulira in je močno odvisen od obračanja ploščadi. Pri samem premem gibanju je ta pogrešek dokaj majhen, pri večjih spremembah



Slika 2.13: Vpliv gibanja manipulatorja na gibanje ploščadi

orientacij koles pa se zelo poveča. Za običajno delo natančnost zadošča, lahko pa lego sproti popravljamo z uporabo senzorjev razdalje na ploščadi in modelom prostora. Če zahtevamo večjo natančnost, je potreben dodatni zunanji sistem za merjenje pozicije in orientacije ploščadi.

Rezultati

Model ploščadi je sestavljen iz treh ločenih podmodelov, to je za vsako prostostno stopnjo eden. Vhodni signal v vsak podmodel je referenčna hitrost ploščadi v smeri določene prostostne stopnje, izhodni signal pa je dejanska hitrost ploščadi v isti smeri. Pri tem dejanska hitrost sledi referenčni hitrosti ter ima nasičenje pospeška (spremembe hitrosti) (enačba (2.1.1)). Pri določitvi modela smo zamenjali zakasnitev izhodnega signala, odziv pri majhnih spremembah, medsebojni vpliv posameznih prostostnih stopenj, vpliv začetne orientacije koles ter vpliv zunanje sile. Največjo napako v modelu prispeva vpliv začetne orientacije koles, saj je pri tem je nasičenje pospeška manjše. V praksi se ta napaka ne odraža veliko, saj se ploščad največkrat giblje počasi in ne presega pospeška nasičenja.

Osnovni namen modela je uporaba v računalniški simulaciji ter uporaba pri regulacijah. Z uporabo modela v računalniški simulaciji lahko hitreje in varneje izvajamo poizkuse, s katerimi približno ugotovimo obnašanje pri podanih

vhodnih podatkih. Obnašanje pa natančneje določimo s pomočjo poizkusov na realni ploščadi. Pri uporabi v regulacijah se nenatančnost modela običajno odraža v pogrešku sledenja nalogi. V praksi lahko z dobrim regulatorjem vse motnje zaradi poenostavitev izničimo. Tako da je namen modela le približno posnemanje gibanja realne ploščadi. Temu namenu pa model ustreza kljub vsem poenostavitvam.

Velikost nasičenja pospeška a_{nas} smo določili iz naklona hitrosti pri odzivu na stopnico (slika 2.2), pri tem so bila kolesa obrnjena v pravo stran, hitrosti ostalih dveh prostostnih stopenj pa so bile enake nič. Zakasnitev pri vseh smereh prostostnih stopenj je znašala 0,35 s. Rezultati so podani v naslednji tabeli:

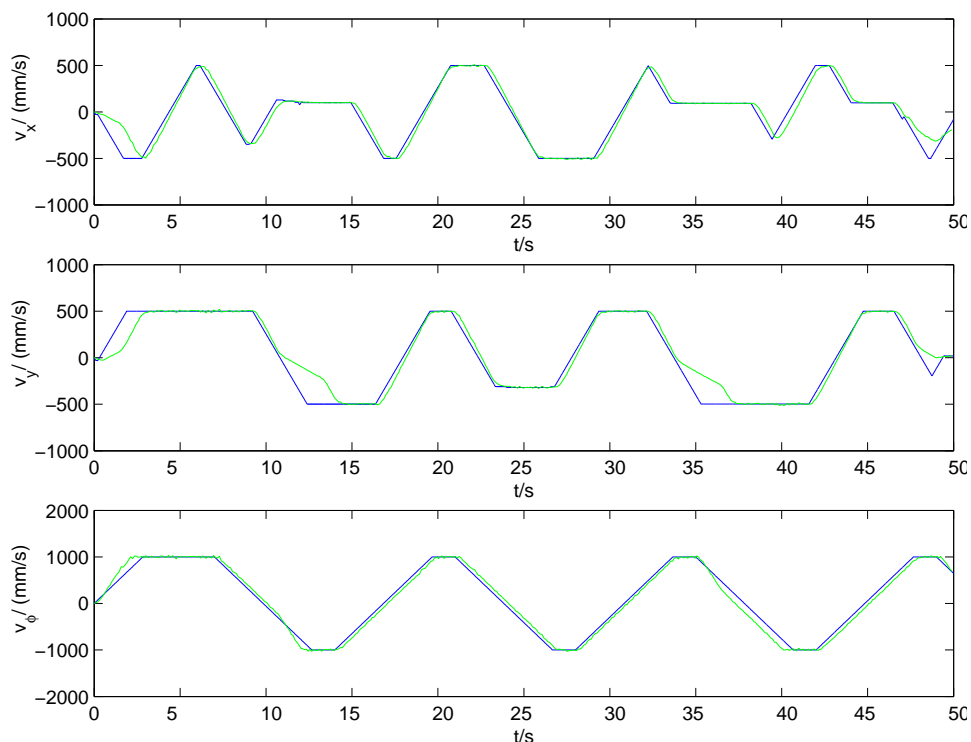
$a_{nas_x} / (m/s^2)$	$a_{nas_y} / (m/s^2)$	$a_{nas_\varphi} / (s^{-2})$
3,150	3,150	3,530

Tabela 2.1: Velikost nasičenja pospeška a_{nas}

Slika 2.14 prikazuje odziv na testni signal v vseh treh prostostnih stopnjah. Z zeleno je prikazan dejanski odziv realnega sistema in z modro odziv modela. Testni signal zajema gibanje pri visokih in nizkih hitrostih ter pogoste spremembe smeri gibanja. Rezultati so bili zadovoljivi. Opazni so le pogreški zaradi začetne orientacije koles. Ob času nič pride do pogreška v smeri prostostne stopnje x in y . Ob času približno 11 s in 34 s pride do pogreška v smeri prostostne stopnje y . Kot lahko vidimo je v obeh primerih v smeri prostostne stopnje x gibanje majhno, zato je vpliv orientacije koles večji.

2.2 Planarni robotski manipulator

V sestavu mobilnega manipulatorja je uporabljen planarni manipulator s štirimi prostostnimi stopnjami. Dolžine posameznih segmentov manipulatorja so okoli 20 cm, teža pa znaša od 50 g do 900 g. Manipulator je v osnovi namenjen raziskavam na področju redundantnih mehanizmov. Vsi pogoni se nahajajo v bazi robota, pomiki se v sklepe prenašajo preko jermenov. Zaradi tega ima manipulator zelo visoke hitrosti ob nizki teži ter relativno nizko trenje, žal pa je natančnost manipulatorja majhna. Struktura manipulatorja je takšna, da so prenosni nesamozaporni, kar pomeni, da ga lahko premikamo z ustvarjanjem zunanje sile na



Slika 2.14: Primerjava odziva modela ter odziva realnega sistema

segmentih manipulatorja. Zaradi prenosa premikov preko jermenov je struktura mehanizma takšna, da se kot v sklepu izraža absolutno glede na koordinatni sistem baze in ne tako kot pri običajnih robotskih manipulatorjih, kjer se kot v sklepu izraža relativno glede na prejšnji sklep (glej poglavje 2.5).

2.2.1 Model robotskega manipulatorja

Kinematični in dinamični model robotskega manipulatorja je že določen [43]. Dinamični model opisuje sledeča enačba

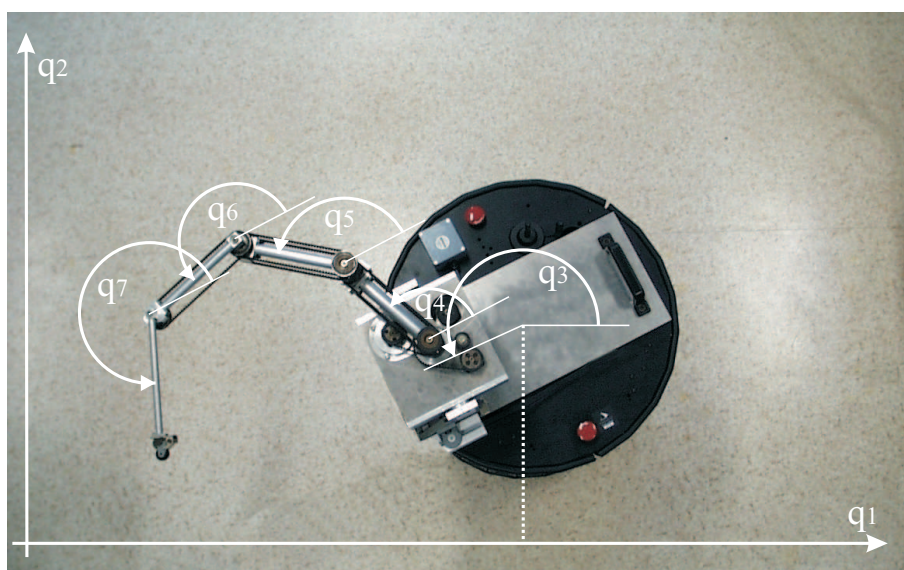
$$\mathbf{H}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\dot{\mathbf{q}}_m, \mathbf{q}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) = \boldsymbol{\tau}_m, \quad (2.2)$$

kjer \mathbf{q}_m in $\boldsymbol{\tau}_m$ predstavljata kote in navore v sklepih manipulatorja, \mathbf{H}_m , \mathbf{C}_m in \mathbf{g}_m pa predstavljajo matriko vztrajnostnih momentov manipulatorja, matriko prispevkov Coriolisovih in centrifugalnih sil ter vektor prispevkov gravitacije.

2.3 Kinematični model mobilnega manipulatorja

Mobilni manipulator je sestavljen iz planarnega robotskega manipulatorja in holonomne mobilne ploščadi. Z uporabo holonomne mobilne ploščadi lahko stopnje prostosti, ki pripadajo ploščadi, obravnavamo enako kot manipulatorjeve ter celoten sistem kot serijski manipulator [23]. Pri tem ploščad obravnavamo kot dva prizmatična sklepa, ki sta medsebojno pravokotna, ter en rotacijski sklep, ki ima os v središču ploščadi. Na ploščadi je nameščen robotski manipulator. V našem primeru je prva os manipulatorja odmaknjena iz osi centra ploščadi, saj bi s postavitvijo v center izgubili eno prostostno stopnjo. Postavitev manipulatorja na ploščad je takšna, da je ravnina delovanja manipulatorja vzporedna z ravnino delovanja ploščadi, torej je vzporedna s tlemi (slika 2.15). Tako je celoten sistem postavljen v ravnini. Uporabnost je v tem primeru običajno manjša v primerjavi s postavitvijo v prostoru. Z raziskovalnega stališča je takšna postavitev boljša, saj dosežemo večjo stopnjo redundance in s tem večjo svobodo pri izbiri nalog.

Slika 2.15 prikazuje postavitev prostora notranjih koordinat. S pomočjo



Slika 2.15: Postavitev koordinatnih sistemov na mobilnem manipulatorju

osnovnih geometričnih operacij enostavno določimo direktno kinematiko

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} q_1 + L_3 c_3 + L_4 c_{43} + L_5 c_{53} + L_6 c_{63} + L_7 c_{73} \\ q_2 + L_3 s_3 + L_4 s_{43} + L_5 s_{53} + L_6 s_{63} + L_7 s_{73} \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

kjer \mathbf{x} predstavlja pozicijo vrha v ravnini, q_i predstavljajo notranje koordinate (glej sliko 2.15), L_i pa so dolžine segmentov mobilnega manipulatorja. Pri tem L_3 predstavlja odmik prve osi manipulatorja od središča ploščadi. Zaradi krajšega zapisa so uporabljeni simboli s_i , c_i , s_{ij} in c_{ij} , ki nadomestijo $\sin(q_i)$, $\cos(q_i)$, $\sin(q_i + q_j)$ in $\cos(q_i + q_j)$. Jacobijeva matrika je določena z odvodom \mathbf{x} na vse notranje koordinate

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 1, & 0, & -L_3 s_3 - L_4 s_{43} - L_5 s_{53} - L_6 s_{63} - L_7 s_{73}, & -L_4 s_{43}, & -L_5 s_{53}, & -L_6 s_{63}, & -L_7 s_{73} \\ 0, & 1, & +L_3 c_3 + L_4 c_{43} + L_5 c_{53} + L_6 c_{63} + L_7 c_{73}, & +L_4 c_{43}, & +L_5 c_{53}, & +L_6 c_{63}, & +L_7 c_{73} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Sistem lahko zapišemo z uporabo Denavit-Hartenbergove notacije. Sledeča tabela prikazuje Denavit-Hartenbergove parametre:

segment	α	a	ϑ	d	tip sklepa	
1	$-\frac{\pi}{2}$	0	$+\frac{\pi}{2}$	q_1	prizmatični	ploščad
2	$-\frac{\pi}{2}$	0	$+\frac{\pi}{2}$	q_2	prizmatični	
3	0	0,207	q_3	0,830	rotacijski	
4	0	0,184	q_4	0	rotacijski	manipulator
5	0	0,184	q_5	0	rotacijski	
6	0	0,184	q_6	0	rotacijski	
7	0	0,203	q_7	0	rotacijski	

2.4 Dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi

Kot bomo videli v nadaljevanju, za namene vodenja ne potrebujemo celotnega dinamičnega modela mobilnega manipulatorja, ampak le dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi. Običajno določitev dinamičnega modela temelji na uporabi ene izmed uveljavljenih metod za določitev celotnega dinamičnega modela (npr. Lagrangeova ali Newton-Eulerjeva metoda). Metoda, opisana v nadaljevanju, omogoča hitrejšo določitev dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi. Metoda ne predpisuje strukture manipulatorja in temelji na predpostavki, da je dinamični model samega manipulatorja z nepremično bazo znan. Ta predpostavka je velikokrat izpolnjena. V tem primeru je potrebno določiti le tiste prispevke, ki jih prispeva gibanje ploščadi. Tako je lahko določitev

dinamičnega modela mnogo enostavnejša in hitrejša, manjša je tudi možnost napak. V primeru, da dinamični model samega manipulatorja ni znan, pa določimo celotni dinamični model po eni izmed običajnih metod.

2.4.1 Metoda določitve dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi

Metoda je osnovana na Lagrangeovi metodi za določanje dinamičnega modela [44]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}_i} = \boldsymbol{\tau}_i. \quad (2.5)$$

Iz te enačbe lahko določimo celotni dinamični model mobilnega manipulatorja in ga zapišemo v obliki

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (2.6)$$

kjer \mathbf{q} in $\boldsymbol{\tau}$ predstavljata kote in navore v sklepih mobilnega manipulatorja, \mathbf{H} , \mathbf{C} in \mathbf{g} pa predstavljajo matriko vztrajnostnih momentov mobilnega manipulatorja, matriko prispevkov Coriolisovih in centrifugalnih sil ter vektor gravitacije.

Ker je mobilni manipulator sestavljen iz dveh podsistemov, dinamični model (2.6) razdelimo na dva dela. To je na del, ki pripada ploščadi in ima \underline{p} prostostnih stopenj, in del, ki pripada manipulatorju in ima \underline{m} prostostnih stopenj. Razdeliti je potrebno matrike dinamičnega modela ter vektorja \mathbf{q} in $\boldsymbol{\tau}$. Vektorja \mathbf{q} in $\boldsymbol{\tau}$ se delita iz dimenzije $n \times 1$ na dva vektorja dimenzije $\underline{p} \times 1$ in $\underline{m} \times 1$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}(\mathbf{q}) & \mathbf{H}_{12}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{H}_{21}(\mathbf{q}) & \mathbf{H}_{22}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) & \mathbf{C}_{12}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \\ \mathbf{C}_{21}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) & \mathbf{C}_{22}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_p \\ \dot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(\mathbf{q}) \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_p \\ \boldsymbol{\tau}_m \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Pri tem velja

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_p \\ \mathbf{q}_m \end{bmatrix}, \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_p \\ \boldsymbol{\tau}_m \end{bmatrix}.$$

V enačbah indeks p označuje ploščad m pa manipulator. Za namene vodenja ne potrebujemo celotnega dinamičnega modela, kot bomo videli v nadaljevanju

(3. poglavje), ampak le del, ki se nanaša na manipulator. Potrebujemo torej le dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi, to je spodnji del enačbe (2.7)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{21}(\mathbf{q}) & \mathbf{H}_{22}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{21}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) & \mathbf{C}_{22}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_p \\ \dot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_2(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_m \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Za določitev dinamičnega modela je torej potrebno določiti matrike $\mathbf{H}_{21}(\mathbf{q})$, $\mathbf{H}_{22}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}_{21}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$, $\mathbf{C}_{22}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$ in $\mathbf{g}_2(\mathbf{q})$. Za enostavnejšo določitev matrik upoštevajmo, da je dinamični model samega manipulatorja z nepremično bazo znan, tako je potrebno določiti le prispevke zaradi gibanja ploščadi. Dinamični model samega manipulatorja je zapisan v sledeči obliki

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{q}_m)\ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{C}_m(\dot{\mathbf{q}}_m, \mathbf{q}_m)\dot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m) = \boldsymbol{\tau}_m. \quad (2.9)$$

2.4.2 Določitev gravitacijskih členov

Določiti je potrebno vektor gravitacijskih prispevkov $\mathbf{g}_2(\mathbf{q})$. Pri tem predpostavimo, da se ploščad vedno giblje v vodoravni ravnini. Ob tej predpostavki gibanje ploščadi nima vpliva na gravitacijske člene, zato velja

$$\mathbf{g}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{g}_m(\mathbf{q}_m). \quad (2.10)$$

V primeru, da se ploščad ne giblje v vodoravni ravnini, bi lahko ob uporabi primernih senzorjev naklona računali vpliv gravitacije. Običajno pa so nakloni, po katerih se lahko giblje ploščad, zelo majhni, tako da lahko spremembo gravitacijskih členov obravnavamo kot motnjo.

2.4.3 Določitev vztrajnostnih členov

Najprej določimo člen \mathbf{H}_{22} . Ta predstavlja prispevek mas in vztrajnostnih momentov manipulatorja zaradi pospeškov manipulatorja.

Vemo, da na elemente v matriki \mathbf{H} ne vplivajo predhodni segmenti. Tako na zadnji element $\mathbf{H}_{(n,n)}$ vpliva le zadnji n -ti segment, na prvi element $\mathbf{H}_{(1,1)}$ pa

vplivajo vsi segmenti od prvega do zadnjega. To je razvidno iz enačbe (2.12). Do enakega rezultata pridemo tudi na drug način, kot je pokazal Khatib [25].

\mathbf{H}_{22} je podmatrika matrike \mathbf{H} dimenzije $\underline{m} \times \underline{m}$, matrika je enaka matriki vztrajnostnih momentov zadnjih \underline{m} segmentov - manipulatorja. Zato velja

$$\mathbf{H}_{22} = \mathbf{H}_m. \quad (2.11)$$

\mathbf{H}_{21} predstavlja prispevek mas in vztrajnostnih momentov manipulatorja zaradi pospeškov ploščadi. Izhajajoč iz Lagrangeove enačbe (2.5) uporabimo enačbo za določitev matrike \mathbf{H} [44]

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n \left(m_i \mathbf{J}_L^{(i)T} \mathbf{J}_L^{(i)} + \mathbf{J}_A^{(i)T} \mathbf{I}_i \mathbf{J}_A^{(i)} \right), \quad (2.12)$$

kjer $\mathbf{J}_L^{(i)}$ in $\mathbf{J}_A^{(i)}$ predstavljata linearni ter kotni del Jacobijeve matrike \mathbf{J} za i -ti segment. $\mathbf{J}^{(i)}$ je enak matriki \mathbf{J} , pri čemer so stolpci od i -tega naprej enaki 0.

Jacobijevo matriko celotnega sistema lahko razdelimo na del, ki pripada ploščadi, in del, ki pripada manipulatorju

$$\mathbf{J} = \left[\mathbf{J}_p \parallel \mathbf{J}_m \right],$$

pri čemer \mathbf{J}_p vsebuje prvih \underline{p} stolpcev in \mathbf{J}_m ostalih \underline{m} stolpcev. Spodnji produkt lahko ponazorimo s produkti podmatrik Jacobijeve matrike

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p^T \\ \mathbf{J}_m^T \end{bmatrix} \left[\mathbf{J}_p \parallel \mathbf{J}_m \right] = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p^T \mathbf{J}_p & \mathbf{J}_p^T \mathbf{J}_m \\ \mathbf{J}_m^T \mathbf{J}_p & \mathbf{J}_m^T \mathbf{J}_m \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Pri izračunu matrike \mathbf{H}_{21} , dimenzije $\underline{m} \times \underline{p}$, uporabimo produkt podmatrik $\mathbf{J}_m^T \mathbf{J}_p$, ki se nahaja v spodnjem levem kotu.

$$\mathbf{H}_{21} = \sum_{i=1}^n \left(m_i \mathbf{J}_{Lm}^{(i)T} \mathbf{J}_{Lp}^{(i)} + \mathbf{J}_{Am}^{(i)T} \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{Ap}^{(i)} \right), \quad (2.14)$$

kjer $\mathbf{J}_{Lm}^{(i)}$ in $\mathbf{J}_{Lp}^{(i)}$ predstavljata linearni del Jacobijeve matrike za i -ti segment za manipulator oz. ploščad, $\mathbf{J}_{Am}^{(i)}$ in $\mathbf{J}_{Ap}^{(i)}$ pa predstavljata kotni del Jacobijeve matrike za i -ti segment za manipulator oz. ploščad

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{Lp} & \mathbf{J}_{Lm} \\ \mathbf{J}_{Ap} & \mathbf{J}_{Am} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Prispevek členov za $i = 1..p$ je enak nič, saj je vrednost matrike $\mathbf{J}_m^{(i)}$ za $i = 1..p$ enaka nič. Torej lahko te vrednosti v vsoti izpustimo. Glede na te ugotovitve lahko zapišemo končno krajšo enačbo za določitev matrike \mathbf{H}_{21}

$$\mathbf{H}_{21} = \sum_{i=p+1}^n \left(m_i \mathbf{J}_{Lm}^{(i)T} \mathbf{J}_{Lp}^{(i)} + \mathbf{J}_{Am}^{(i)T} \mathbf{I}_i \mathbf{J}_{Ap}^{(i)} \right). \quad (2.16)$$

2.4.4 Določitev Coriolisovih in centrifugalnih členov

Coriolisove in centrifugalne člene lahko določimo s pomočjo enačbe [44]

$$\mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = \sum_{j=1}^n c_{ij} \dot{\mathbf{q}}_j = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{\mathbf{q}}_k \dot{\mathbf{q}}_j, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.17)$$

kjer c_{ij} predstavljajo elemente matrike $\mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$, h_{ijk} pa so Christoffelovi simboli in jih izračunamo z

$$h_{ijk} = \frac{\partial H_{ij}}{\partial \mathbf{q}_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial H_{jk}}{\partial \mathbf{q}_i}. \quad (2.18)$$

Najprej določimo elemente matrike \mathbf{C}_{22} . Za razliko od gravitacijskih in vztrajnostnih členov Coriolisovi členi vsebujejo tudi elemente, ki so posledica hkratnega gibanja ploščadi in manipulatorja. Krajša enačba za določitev te matrike je

$$\mathbf{C}_{22} = \mathbf{C}_m + \left[h_{ij3} \dot{\mathbf{q}}_3 \right], \quad i, j = 4, 5, \dots, n. \quad (2.19)$$

Elementi ($h_{ij3} \dot{\mathbf{q}}_3$), ki so dodani matriki Coriolisovih in centrifugalnih členov manipulatorja, so posledica Coriolisovih sil na manipulator, ki jih prispeva rotacija ploščadi. Dokaz:

Za elemente v matriki $\mathbf{C}_{22}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})$ velja

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{\mathbf{q}}_k = \sum_{k=1}^3 h_{ijk} \dot{\mathbf{q}}_k + \sum_{k=4}^n h_{ijk} \dot{\mathbf{q}}_k, \quad i, j = 4, 5, \dots, n. \quad (2.20)$$

Ker pa velja $\mathbf{H}_{22} = \mathbf{H}_m$, lahko z nekaj računanja ugotovimo, da druga vsota v enačbi predstavlja elemente matrike \mathbf{C}_m . Torej velja

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^3 h_{ijk} \dot{\mathbf{q}}_k + c_{ijm}, \quad i, j = 4, 5, \dots, n, \quad (2.21)$$

pri čemer c_{ijm} predstavlja elemente matrike \mathbf{C}_m . Izkaže se, da so h_{ijk} enaki nič, kadar gre za translatorno gibanje, in so različni od nič, kadar gre za rotacijo, saj se nanašajo na Coriolisove in centrigualne sile. Prvi dve stopnji mobilne ploščadi sta translacijski ($k = 1, 2$) zato velja

$$h_{ij1} = 0,$$

$$h_{ij2} = 0.$$

Matriki \mathbf{C}_m dodamo samo elemente, ki so posledica Coriolisovih sil na manipulator, ki jih prispeva rotacija ploščadi ($h_{ij3} \dot{\mathbf{q}}_3$).

Določitev elementov matrike \mathbf{C}_{21}

Z uporabo enačbe (2.17) in z upoštevanjem indeksov v vsoti pridemo do enačbe

$$\mathbf{C}_{21}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}_m = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_k \dot{q}_j, \quad i = 4, 5, \dots, n \quad (2.22)$$

in končna enačbe za določitev matrike \mathbf{C}_{21}

$$\mathbf{C}_{21} = \left[\sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_k \right] \quad i = 4, 5, \dots, n, \quad j = 1, 2, 3. \quad (2.23)$$

Celoten dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi zapišemo krajše

$$\left[\mathbf{H}_{pm}(\mathbf{q}) \quad \mathbf{H}_m(\mathbf{q}) \right] \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \mathbf{C}_{pmm}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_m, \quad (2.24)$$

pri čemer velja

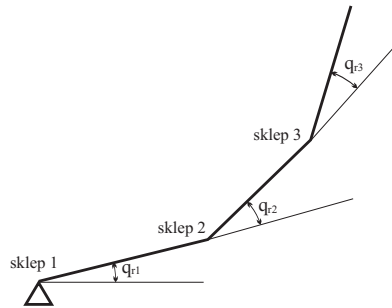
$$\mathbf{H}_{pm}(\mathbf{q}) = \mathbf{H}_{21}(\mathbf{q})$$

in

$$\mathbf{C}_{pmm}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) = \left[\mathbf{C}_{21}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \quad \mathbf{C}_{22}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}) \right].$$

2.5 Model robota z notranjimi koordinatami, ki niso izražene relativno

Označitev notranjih koordinat se ponavadi ujema z dejanskimi premiki na realnem sistemu. Večina robotov je sestavljenih tako, da so motorji, ki premikajo sklepe, nameščeni v samem sklepu. Zaradi tega je smiselno, da notranje koordinate izrazimo relativno. To pomeni, da uporabimo kot notranje koordinate relativne kote med segmenti. Kot v sklepu i ustreza kotu med segmentoma $i - 1$ in i (slika 2.16).



Slika 2.16: Relativno izraženi koti sklepov

Vse prej opisane enačbe za določitev dinamičnega modela veljajo za relativno izražene notranje koordinate. V primeru kadar notranje koordinate niso izražene v relativni obliki, pa moramo člene v modelu spremeniti. Preslikava med relativno izraženimi notranjimi koordinatami \mathbf{q}_r in notranjimi koordinatami, ki niso izraženi v tej obliki \mathbf{q}_{nr} je sledeča.

$$\mathbf{q}_r = \mathbf{P}\mathbf{q}_{nr}, \quad (2.25)$$

kjer je \mathbf{P} matrika preslikave med obema označbama notranjih koordinat.

Določitev Jacobijeve matrike

Hitrost v zunanjih koordinatah (hitrost gibanja vrha) \mathbf{x} je neodvisna od tega, kako so označene notranje koordinate

$$\dot{\mathbf{x}}_{nr} = \dot{\mathbf{x}}_r,$$

zato velja

$$\mathbf{J}_{nr}(\mathbf{q}_{nr})\dot{\mathbf{q}}_{nr} = \mathbf{J}_r(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r$$

in sledi

$$\mathbf{J}_{nr}(\mathbf{q}_{nr}) = \mathbf{J}_r(\mathbf{P}\mathbf{q}_{nr})\mathbf{P}. \quad (2.26)$$

Določitev matrike vztrajnostnih momentov manipulatorja

Ker je kinetična energija sistema neodvisna od označbe notranjih koordinat, velja

$$\dot{\mathbf{q}}_{nr}^T \mathbf{H}_{nr}(\mathbf{q}_{nr}) \dot{\mathbf{q}}_{nr} = \dot{\mathbf{q}}_r^T \mathbf{H}_r(\mathbf{q}_r) \dot{\mathbf{q}}_r,$$

če \mathbf{q}_r nadomestimo s \mathbf{q}_{nr} , dobimo

$$\dot{\mathbf{q}}_{nr}^T \mathbf{H}_{nr}(\mathbf{q}_{nr}) \dot{\mathbf{q}}_{nr} = \dot{\mathbf{q}}_{nr}^T \mathbf{P}^T \mathbf{H}_r(\mathbf{P}\mathbf{q}_{nr}) \mathbf{P} \dot{\mathbf{q}}_{nr}$$

in sledi

$$\mathbf{H}_{nr}(\mathbf{q}_{nr}) = \mathbf{P}^T \mathbf{H}_r(\mathbf{P}\mathbf{q}_{nr}) \mathbf{P}. \quad (2.27)$$

Določitev matrike gravitacijskih členov

Za določitev preslikave gravitacijskih členov uporabimo sledečo enačbo [44]

$$\mathbf{g}_i = \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \mathbf{J}_{Li}^{(j)}, \quad (2.28)$$

kjer \mathbf{g} predstavlja vektor gravitacijskih pospeškov, $\mathbf{J}_{Li}^{(j)}$ pa je i -ti stolpec v matriki $\mathbf{J}_L^{(j)}$. Torej lahko zapišemo vektor \mathbf{g}^T kot

$$\mathbf{g}^T = \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \mathbf{J}_L^{(j)}, \quad (2.29)$$

podobno zapišemo

$$\mathbf{g}_{nr}^T = \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \mathbf{J}_{Lnr}^{(j)}.$$

V enačbo vstavimo (2.26) in dobimo

$$\mathbf{g}_{nr}^T = \sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \mathbf{J}_{Lr}^{(j)} \mathbf{P}.$$

\mathbf{P} je konstantna matrika in jo lahko postavimo izven vsote, izraz $\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{g}^T \mathbf{J}_{Lr}^{(j)}$ pa nadomestimo z \mathbf{g}_r^T . Končna enačba je

$$\mathbf{g}_{nr}(\mathbf{q}_{nr}) = \mathbf{P}^T \mathbf{g}_r(\mathbf{P} \mathbf{q}_{nr}). \quad (2.30)$$

Določitev matrike Coriolisovih in centrifugalnih členov

Podobno kot pri določitvi gravitacijskih členov tudi tukaj postopamo podobno. Z uporabo enačb (2.17) in (2.18) ter z upoštevanjem (2.32) in (2.27) dobimo končno enačbo

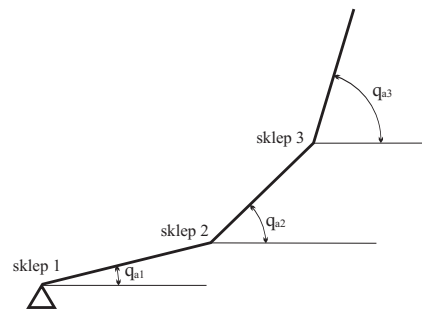
$$\mathbf{C}_{nr}(\dot{\mathbf{q}}_{nr}, \mathbf{q}_{nr}) \dot{\mathbf{q}}_{nr} = \mathbf{P} (\mathbf{C}_r(\mathbf{P} \dot{\mathbf{q}}_{nr}, \mathbf{P} \mathbf{q}_{nr}) \mathbf{P} \dot{\mathbf{q}}_{nr}). \quad (2.31)$$

2.5.1 Notranje koordinate uporabljene pri mobilnem manipulatorju

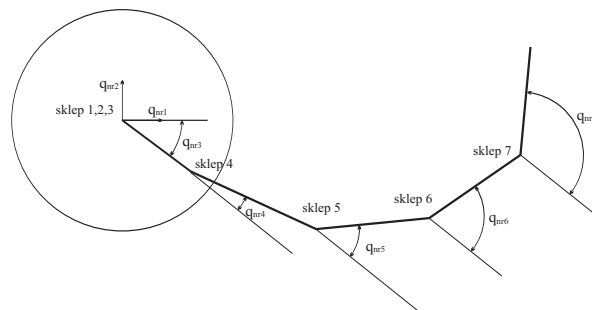
V našem primeru ima manipulator vse motorje nameščene v bazi robota, ti so povezani s sklepi preko jermenov. Zaradi takšne strukture se notranje koordinate izražajo absolutno (slika 2.17). To pomeni, da zasuk ustreza kotu med segmentom in bazo robota.

Pri opisu mobilnega manipulatorja smo uporabili oba načina označbe notranjih koordinat. Pri tem so notranje koordinate ploščadi izražene z relativnimi koti, notranje koordinate manipulatorja pa absolutno glede na ploščad (slika 2.18).

Preslikava med relativno izraženimi notranjimi koordinatami q_r in notranjimi koordinatami, ki niso izražene relativno in so uporabljene pri mobilnem manipulatorju q_{nr} , je



Slika 2.17: Absolutno izraženi koti sklepov



Slika 2.18: Koti sklepov kot so uporabljeni pri mobilnem manipulatorju

$$q_{r1} = q_{nr1},$$

$$q_{r2} = q_{nr2},$$

$$q_{r3} = q_{nr3},$$

$$q_{r4} = q_{nr4},$$

$$q_{r5} = -q_{nr4} + q_{nr5},$$

$$q_{r6} = -q_{nr5} + q_{nr6},$$

$$q_{r7} = -q_{nr6} + q_{nr7}.$$

Preslikave lahko enostavno določimo s slike 2.18. Preslikavo zapišemo v matrični obliki

$$\mathbf{q}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{q}_{nr} = \mathbf{P} \mathbf{q}_{nr}. \quad (2.32)$$

Vse matrike, ki določajo dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi, je potrebno preslikati z opisanimi preslikavami z zgoraj določeno preslikavo \mathbf{P} .

2.6 Zaključek

Opisano metodo določitve dinamičnega modela smo preverili s programskim orodjem *Robotica* v okviru programskega okolja *Mathematica* [45]. Dinamični model smo izdelali na dva načina. Pri prvem načinu smo izdelali celotni dinamični model z uporabo namenskih funkcij v okviru programskega orodja *Robotica*. Za model dobljen na ta način verjamemo, da je pravilen. Pri drugem načinu smo izdelali le dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi, pri tem smo uporabili metodo opisano v delu. S primerjavo obeh modelov smo ugotovili pravilnost predstavljenega postopka. Prav tako smo preverili tudi preslikave, ki jih uporabimo, kadar notranje koordinate niso izražene v relativni obliki. Opisani postopek omogoča lažjo določitev dinamičnega modela.

3. Vodenje in analiza vodenja

V poglavju je opisan regulator, ki omogoča kombinirano vodenje. To vodenje omogoča, da je del sistema voden hitrostno in del navorno. Za opisani regulator smo prikazali analizo sledenja trajektoriji v prostoru naloge in ničelnem prostoru ter analizirali vpliv zunanje sile. Pokazali smo tudi, da je sistem voden s kombiniranim načinom vodenja lahko v posebnih primerih dinamično konsistenten, vendar ob prevelikih omejitvah.

3.1 Kombinacija hitrostnega in navornega vodenja

Sistem mobilnega manipulatorja, ki je uporabljen v našem delu, je sestavljen iz dveh podsistemov. Kot je že bilo večkrat omenjeno, je del podsistema možno voditi samo hitrostno, del pa omogoča tudi navorno vodenje. V delu je opisan algoritem, ki omogoča vodenje tako sestavljenega sistema.

Algoritem vodenja temelji na regulatorju za vodenje pospeška [42, 29]

$$\boldsymbol{\tau}_c = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_c + \hat{\mathbf{C}}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}), \quad (3.1)$$

pri čemer $\boldsymbol{\tau}_c$ in $\ddot{\mathbf{q}}_c$ predstavljata regulirni navor in pospešek v notranjih koordinatah, to je v sklepih manipulatorja. $\hat{\mathbf{H}}$, $\hat{\mathbf{C}}$ in $\hat{\mathbf{g}}$ predstavljajo približke dinamičnega modela manipulatorja. Regulator je primeren tudi za uporabo pri redundantnih sistemih, saj lahko ločeno reguliramo pospeška v prostoru naloge $\ddot{\mathbf{x}}_c$ ter v ničelnem prostoru $\ddot{\Phi}$. Regulirni pospešek lahko zapišemo v obliki

$$\ddot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}^\#(\ddot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N}(\ddot{\Phi} - \dot{\mathbf{N}}\dot{\mathbf{q}}), \quad (3.2)$$

kjer sta $\ddot{\mathbf{x}}_c$ in $\ddot{\Phi}$ pospeška v prostoru naloge in v ničelnem prostoru in ju lahko

zapišemo

$$\ddot{\mathbf{x}}_c = \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}, \quad \mathbf{e} = \mathbf{r} - \mathbf{x}, \quad (3.3)$$

$$\Phi = \mathbf{N}\ddot{\varphi} + \dot{\mathbf{N}}\dot{\varphi} + \mathbf{K}_n \dot{\mathbf{e}}_n, \quad \dot{\mathbf{e}}_n = \mathbf{N}(\dot{\varphi} - \dot{\mathbf{q}}). \quad (3.4)$$

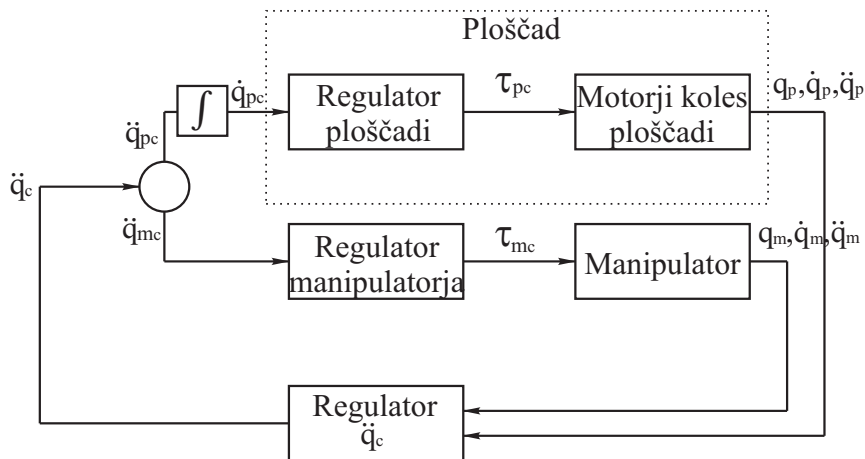
V enačbah predstavljata \mathbf{r} in φ referenco v prostoru naloge in v ničelnem prostoru, \mathbf{e} pa predstavlja pogrešek v prostoru naloge. Parametri \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d in \mathbf{K}_n so parametri regulatorja. $\mathbf{J}^\#$ je posplošeni inverz Jacobijeve matrike z utežjo \mathbf{W}

$$\mathbf{J}^\# = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}, \quad (3.5)$$

kjer je matrika \mathbf{W} simetrična pozitivno definitna matrika. \mathbf{N} je ortogonalni komplement Jacobijeve matrike, ki predstavlja preslikavo v ničelni prostor \mathbf{J}

$$\mathbf{N} = \mathbf{I} - \mathbf{J}^\# \mathbf{J}. \quad (3.6)$$

Omenjeni regulator je primeren samo za sisteme, ki so v celoti vodeni navorno. V našem primeru navedenega regulatorja ne moremo direktno uporabiti, saj ne moremo krmiliti navorov ploščadi τ_p . Zaradi tega je potrebno regulator preoblikovati, tako da sistem dosega želene pospeške v notranjih koordinatah ob upoštevanju te omejitve. Regulator je preoblikovan tako, da v prostostne stopnje ploščadi ne vodimo navorov ampak hitrosti (slika 3.1).



Slika 3.1: Preoblikovani regulator

Regulirne pospeške razdelimo na tiste, ki pripadajo manipulatorju $\ddot{\mathbf{q}}_{mc}$, in tiste, ki pripadajo ploščadi $\ddot{\mathbf{q}}_{pc}$. Za določitev regulirnih hitrosti ploščadi je po-

trebno regulirne pospeške integrirati. Tako določene regulirne hitrosti vodimo v vgrajeni hitrostni regulator ploščadi

$$\boldsymbol{\tau}_{pc} = f_p(\dot{\mathbf{q}}_{pc}), \quad (3.7)$$

kjer $f_p(\dot{\mathbf{q}}_{pc})$ predstavlja neznan regulator v ploščadi, ki določa navore na kolesih ploščadi, ki premikajo ploščad z želeno hitrostjo. Vemo (poglavje 2.1.1), da regulator zagotavlja sledenje regulirnim hitrostim, dokler sta hitrost in sprememba hitrosti omejeni.

Regulirne pospeške manipulatorja vodimo v regulator manipulatorja, ki določa navore v sklepih manipulatorja

$$\boldsymbol{\tau}_{mc} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_{pm}(\mathbf{q}) & \hat{\mathbf{H}}_m(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_{pc} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{mc} \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{C}}_{pmm}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}_m(\mathbf{q}). \quad (3.8)$$

$(\hat{\cdot})$ predstavljajo ocene dinamičnega modela mobilnega manipulatorja. Regulator predstavlja le tisti del regulatorja (3.1), ki se nanaša na manipulator. Ob predpostavki, da ni zunanjih motenj in da so približki elementov dinamičnega modela dovolj natančni, regulator zagotavlja sledenje želenim pospeškom (poglavje 3.2.1). Opisani regulator zahteva le dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi ne pa celotnega dinamičnega modela mobilnega manipulatorja.

Opisani regulator lahko razložimo tudi drugače. Na najvišjem hierarhičnem nivoju je centraliziran regulator, ki določa regulirne veličine celotnega sistema (3.2). Le-ta vpliva na dva posamezna decentralizirana regulatorja, enega za manipulator in enega za ploščad, ki upoštevata medsebojne povezave podsistemov.

3.2 Analiza regulatorja

3.2.1 Analiza sledenja predpisani trajektoriji

Ena osnovnih zahtev regulirnega sistema je sledenje predpisani trajektoriji vrha. Preučili smo sledenje brez in ob prisotnosti zunanjih navorov $\boldsymbol{\tau}_{extm}$, ki so običajno posledica zunanjih sil in trenja. Regulirne navore manipulatorja (3.8) vodimo na sklepe manipulatorja

$$\boldsymbol{\tau}_{m_c} = \boldsymbol{\tau}_m.$$

Za določitev navorov $\boldsymbol{\tau}_m$ uporabimo dinamični model manipulatorja na mobilni ploščadi (2.24) z dodatnimi zunanji navori $\boldsymbol{\tau}_{ext_m}$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_{pm}(\mathbf{q}) & \hat{\mathbf{H}}_m(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_{pc} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{C}}_{pmm}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}_m(\mathbf{q}) = \\ & = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{pm}(\mathbf{q}) & \mathbf{H}_m(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_m \end{bmatrix} + \mathbf{C}_{pmm}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}_m(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \end{aligned}$$

Ob predpostavki, da je približek dinamičnega modela natančen $(\hat{\cdot}) = (\cdot)$ in da regulator ploščadi zagotavlja sledenje regulirnim pospeškom $\ddot{\mathbf{q}}_{pc} = \ddot{\mathbf{q}}_p$ (pokazano v poglavju 2.1.1), velja

$$\mathbf{H}_m \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} = \mathbf{H}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \quad (3.9)$$

Analiza v prostoru naloge

Obe strani enačbe pomnožimo z leve najprej s \mathbf{H}_m^{-1} in nato še z \mathbf{J}_m , ki predstavlja desni del Jacobijeve matrike, tisti, ki pripada manipulatorju $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p \\ \mathbf{J}_m \end{bmatrix}$

$$\mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} = \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}.$$

Na obeh straneh prištejemo člen $\mathbf{J}_p \ddot{\mathbf{q}}_p$, kjer \mathbf{J}_p predstavlja levi del Jacobijeve matrike, tisti, ki pripada ploščadi. Pri tem upoštevajmo, da ploščad sledi regulirnemu pospešku $\ddot{\mathbf{q}}_p = \ddot{\mathbf{q}}_{pc}$

$$\mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} + \mathbf{J}_p \ddot{\mathbf{q}}_{pc} = \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{J}_p \ddot{\mathbf{q}}_p + \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}$$

in zapišemo v krajši obliki

$$\mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \quad (3.10)$$

Uporabimo enačbo za določitev regulirnih pospeškov v notranjih koordinatah (3.2) ter upoštevamo izraza $\mathbf{J}\mathbf{N} = 0$ in $\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}$

$$\ddot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}.$$

S pomočjo enačbe (3.3) dobimo končno enačbo, ki predstavlja dinamiko pogreška v zunanjih koordinatah

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \quad (3.11)$$

Ob predpostavki, da so zunanji navori enaki nič oz. so kompenzirani $\boldsymbol{\tau}_{ext_m} = 0$, določimo splošno rešitev homogene enačbe $\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = 0$. Rešitev enačbe je dobro znana iz teorije diferencialnih enačb. Odziv sistema je lahko dušen, kritično dušen ali podkritično dušen, odvisno od izbire parametrov regulatorja \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_d . Zahtevamo čim hitrejši odziv brez prenihajev, kar dosežemo pri kritičnem dušenju. Tak odziv dosežemo pri pogoju $4\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_d^2$.

Mrtvi časi v sistemu ter vzorčenje signalov zmanjšujeta stabilnost sistema. Zaradi tega je priporočljivo, da je sistem nadkritično dušen $4\mathbf{K}_p < \mathbf{K}_d^2$. Natančnejša določitev parametrov je podana v nadaljevanju (poglavje 3.2.2).

Analiza v ničelnem prostoru

Pri analizi izhajamo iz enačbe 3.9. Obe strani enačbe pomnožimo z leve najprej s \mathbf{H}_m^{-1} in nato še z \mathbf{N}_m , ki predstavlja desni (manipulatorjev) del matrike preslikave v ničelni prostor $\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_p \\ \mathbf{N}_m \end{bmatrix}$

$$\mathbf{N}_m \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} = \mathbf{N}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m},$$

na obeh straneh prištejemo člen $\mathbf{N}_p \ddot{\mathbf{q}}_p$

$$\mathbf{N}_m \ddot{\mathbf{q}}_{m_c} + \mathbf{N}_p \ddot{\mathbf{q}}_{p_c} = \mathbf{N}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{N}_p \ddot{\mathbf{q}}_p + \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}$$

in zapišemo v krajši obliki

$$\mathbf{N} \ddot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{N} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \quad (3.12)$$

Uporabimo enačbo za določitev regulirnih pospeškov v notranjih koordinatah (3.2) ter upoštevamo izraze $\mathbf{N}\mathbf{J}^\# = 0$, $\mathbf{N}\mathbf{N} = \mathbf{N}$ in $\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^\#(\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N}\ddot{\mathbf{q}}$

$$\mathbf{N}(\Phi - \dot{\mathbf{N}}\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{N}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}.$$

S pomočjo enačbe (3.4) dobimo končno enačbo, ki predstavlja dinamiko pogreška v ničelnem prostoru

$$\mathbf{N}(\ddot{\mathbf{e}}_n + \mathbf{K}_n \dot{\mathbf{e}}_n) = \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}. \quad (3.13)$$

Zapišimo Ljapunovo funkcijo

$$v = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{W} \dot{\mathbf{e}}_n,$$

kjer je \mathbf{W} utežnostna matrika uporabljena pri določitvi posplošenega inverza. Časovni odvod Ljapunove funkcije je enak

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{W} \ddot{\mathbf{e}}_n + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}_n^T \dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{e}}_n = \\ &= -\dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{W} \mathbf{N} \mathbf{K}_n \dot{\mathbf{e}}_n + \dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{W} \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{e}}_n^T \dot{\mathbf{W}} \dot{\mathbf{e}}_n = \\ &= -\dot{\mathbf{e}}_n^T (\mathbf{W} \mathbf{K}_n - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{W}}) \dot{\mathbf{e}}_n + \dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{W} \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \boldsymbol{\tau}_{ext_m}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

pri tem smo upoštevali izraza $\dot{\mathbf{e}}_n^T = \dot{\mathbf{e}}_n^T \mathbf{N}^T$ in $\mathbf{N}^T \mathbf{W} = \mathbf{W} \mathbf{N}$. Sistem je asimptotično stabilen, če je odvod Ljapunove funkcije \dot{v} negativno definiten. Kadar ni zunanjih sil ($\boldsymbol{\tau}_{ext_m} = 0$), je sistem asimptotično stabilen, kadar je $\mathbf{W} \mathbf{K}_n - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{W}}$ pozitivno definitna.

Enačbi (3.13) in (3.11) kažeta, da regulator zagotavlja ločitev med prostorom naloge in ničelnim prostorom.

3.2.2 Analiza odvisnosti sistema na zunanje sile

V tem poglavju je opisan vpliv zunanje sile na manipulator. Poglavje je razdeljeno na dva dela. V prvem smo obravnavali silo na vrhu manipulatorja, v drugem pa silo na segmente manipulatorja ter silo na ploščad.

Predstavljeni algoritem vodenja ni namenjen vodenju sile, kljub temu pa je potrebno ugotoviti odziv na zunanjo silo. Za sistem, ki je voden v celoti z navo-rom, je Žlajpah pokazal, kakšen je odziv na sile v različnih konfiguracijah [46].

Sila na vrhu manipulatorja

V primeru, da nastopa samo sila na vrhu manipulatorja \mathbf{F}_0 , določimo navore v sklepih manipulatorja

$$\boldsymbol{\tau}_{ext_m} = \mathbf{J}_m^T \mathbf{F}_0 \quad (3.15)$$

in z upoštevanjem enačbe 3.11 dobimo sledečo nehomogeno diferencialno enačbo

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = \mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{J}_m^T \mathbf{F}_0. \quad (3.16)$$

Žlajpah [47] je pokazal, da je pri omejeni sili \mathbf{F}_0 sistem stabilen in da pogrešek konvergira k nekemu omejenemu območju.

Pri določitvi parametrov \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_d je potrebno upoštevati enačbo dinamike pogreška v zunanjih koordinatah (3.11) ter želeno obnašanje sistema na zunanjo silo (3.16). Z večanjem parametra \mathbf{K}_p povečamo togost sistema na zunanjo silo ter pohitrimo odziv sledenja trajektoriji. Previsoka vrednost parametra poveča oscilatornost odziva. Na realnem sistemu lahko previsoka vrednost parametra zaradi vzorčenja in mrtvih časov povzroča nestabilnost. Večanje parametra \mathbf{K}_d povečuje dušenje sistema na zunanjo silo ter upočasnjuje odziv sledenja trajektoriji, s tem pa se povečuje stabilnost sistema. Dinamika odziva je odvisna tudi od konfiguracije robota, saj je sila \mathbf{F}_0 pomnožena s členom $\mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{J}_m^T$, ki vsebuje to odvisnost.

Definirajmo

$$\mathbf{M}_m = (\mathbf{J}_m \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{J}_m^T)^{-1}.$$

V primeru, da želimo impedanco v prostoru naloge z maso \mathbf{M}_m , dušenjem \mathbf{D} in s togostjo \mathbf{K} , ki ni odvisna od konfiguracije, uporabimo sledeče parametre regulatorja [47]

$$\mathbf{K}_d = \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{D}$$

in

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{K},$$

ki so odvisni od konfiguracije sistema ($\mathbf{M}_m = f(\mathbf{q})$). S temi parametri regulatorja lahko dosežemo enak učinek kot z uporabo impedančnega načina vodenja brez povratne zanke sile [38].

Dinamična konsistentnost sistema

Raziskati je potrebno, kakšen je vpliv zunanje sile na vrhu manipulatorja na gibanje v ničelnem prostoru. Vpliv te sile je odvisen od izbire uteži v posplošenem inverzu. Pri izbiri uteži imamo neomejeno število možnosti, saj je utež lahko vsaka simetrična pozitivno definitna matrika dimenzije $n \times n$ [48]. Z izbiro uteži vplivamo na obnašanje sistema, tako lahko s primerno izbiro minimiziramo hitrosti v posameznih sklepih, minimiziramo kinetično energijo sistema, zmanjšamo pogrešek sekundarne naloge [49] ipd. V praksi je zaželeno, da je sistem dinamično konsistenten. Sistem je dinamično konsistenten, kadar navori v ničelnem prostoru ne povzročajo pospeškov v prostoru naloge [25] oziroma kadar sile v prostoru naloge ne povzročajo pospeškov v ničelnem prostoru [32]. Khatib [25] je ugotovil, da le z uporabo posplošenega inverza, uteženega z vztrajnostno matriko robota, dosežemo, da je sistem dinamično konsistenten. S to utežjo hkrati minimiziramo kinetično energijo sistema [27].

Pri sistemih vodenih s kombiniranim načinom vodenja, ne vplivamo direktno na navore v delu sistema, tako da ne dosežemo dinamične konsistence, kljub uporabi uteži, ki je enaka vztrajnostni matriki sistema. Ugotoviti je potrebno, ali in v kakšnem primeru je to sploh možno doseči.

Poglejmo, ali sila na vrhu (v prostoru naloge) povzroča pospeške v ničelnem prostoru. Izhajamo iz enačb (3.13) in (3.15)

$$\mathbf{N}(\ddot{\mathbf{e}}_n + \mathbf{K}_n \dot{\mathbf{e}}_n) = \mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{J}_m^T \mathbf{F}_0.$$

Sistem je dinamično konsistenten, če zunanja sila \mathbf{F}_0 ne vpliva na gibanje v ničelnem prostoru, torej mora veljati

$$\mathbf{N}_m \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{J}_m^T = 0. \quad (3.17)$$

Zaradi doslednejšega zapisa definirajmo matriko \mathbf{I}_m

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

Spodnji del matrike predstavlja enotino matriko dimenzije $\underline{m} \times \underline{m}$, zgornji pa je sestavljen iz ničel. Velja $\mathbf{J}_m = \mathbf{J}\mathbf{I}_m$ in $\mathbf{N}_m = \mathbf{N}\mathbf{I}_m$. Nadaljujmo z enačbo (3.17)

$$\mathbf{N}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T = 0,$$

$$(\mathbf{I} - \mathbf{W}^{-1}\mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{J}^T)^{-1}\mathbf{J})\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T = 0,$$

$$\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T - \mathbf{W}^{-1}\mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{J}^T)^{-1}\mathbf{J}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T = 0. \quad (3.18)$$

Poiskati moramo torej tako utež \mathbf{W} , ki zagotavlja, da je enačba 3.17 pravilna. Če izberemo utež

$$\mathbf{W}^{-1} = \mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T \quad (3.19)$$

in jo vstavimo v enačbo (3.18)

$$\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T - \mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T)^{-1}\mathbf{J}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T = 0.$$

Ker je $(\mathbf{J}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T)^{-1}\mathbf{J}\mathbf{I}_m\mathbf{H}_m^{-1}\mathbf{I}_m^T\mathbf{J}^T = \mathbf{I}$, je enačba (3.17) pravilna. Torej z utežjo (3.19) dosežemo, da zunanje sile v prostoru naloge ne vplivajo na gibanje v ničelnem prostoru in je sistem dinamično konsistenten. V nasprotnem primeru zunanja sila vpliva na pogrešek v ničelnem prostoru.

Drugega pogoja za dinamično konsistenco, to je, da navori v ničelnem prostoru ne povzročajo pospeškov na vrhu, ne moremo preveriti, saj ne poznamo vseh navorov v sistemu.

Lastnosti uteži \mathbf{W}

Izbrana utež (3.19) ima obliko

$$\mathbf{W}^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{H}_m^{-1} \end{array} \right].$$

zaradi tega imata posplošeni inverz in matrika preslikave v ničelni prostor sledečo obliko

$$\mathbf{J}^\# = \left[\begin{array}{c} \mathbf{0} \\ \hline (\cdot) \end{array} \right],$$

$$\mathbf{N} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \hline (\cdot) & (\cdot) \end{array} \right].$$

S takšno izbiro posplošenega inverza dosežemo, da so regulirni sklepni pospeški (3.2), ki so rezultat gibanja v prostoru naloge, samo pospeški v sklepih manipulatorja pri tem pa ploščad miruje. To pomeni, da samo gibanje manipulatorja izvaja nalogo, pri čemer ploščad miruje, kar pa je enako, kot bi imeli manipulator z nepremično bazo. Pri preslikavi v ničelni prostor, se gibanje ploščadi prenese direktno z enotino matriko, manipulator pa s svojim gibanjem kompenzira gibanje ploščadi in zagotavlja, da ni vpliva na gibanje v prostoru naloge. S takšno izbiro uteži oba podsistema delno ločimo, kar pa ni zaželeno. Torej s stališča uporabnosti ta utežnostna matrika ni primerna. Poleg tega utež \mathbf{W} ne zadošča pogojem uteži, saj vsebuje neskončne člene.

Sila na segmente mobilnega manipulatorja

V primeru, da sila pritiska na segmente mobilnega manipulatorja, ta povzroča navore direktno v ničelnem prostoru neodvisno od izbire uteži inverza. Ta navor povzroči odmik segmentov v smeri stran od sile, povzroči pa tudi pogrešek v ničelnem prostoru (3.13). Sila na segmente povzroči tudi silo na ploščad, ki pa ne vpliva na gibanje ploščadi. To silo kompenzira regulator ploščadi, ki je sposoben kompenzirati vse zunanje sile do določene amplitude in zagotoviti nemoteno gibanje ploščadi (glej poglavje 5.1.3).

Podajnost manipulatorja na zunanjo silo določa parameter \mathbf{K}_n , odvisna pa je tudi od konfiguracije ter vztrajnostne matrike manipulatorja. Pri enaki sili na segment je odmik težjih segmentov manipulatorja manjši kot pri lažjih segmentih. Tako je tudi podajnost manjša. Kadar je parameter \mathbf{K}_n večji, je boljše sledenje

trajektoriji v ničelnem prostoru, s tem pa je večja tudi togost sistema v ničelnem prostoru. In obratno, manjši kot je parameter, slabše je sledenje in večja je podajnost. Tako je potrebno izbrati čim manjšo vrednost \mathbf{K}_n , ko želimo imeti visoko podajnost sistema. Premajhna vrednost pa lahko vodi v negativno definitnost odvoda Ljapunove funkcije (3.14) in posledično do nestabilnosti sistema.

Parameter \mathbf{K}_n je lahko tudi matrika dimenzije $n \times n$. S takšno matriko lahko določene stopnje utežimo bolj in druge manj. S tem lahko npr. dosežemo, da ploščad dobro sledi trajektoriji, manipulator pa je podajen. Primer takšnega \mathbf{K}_n je diagonalna matrika, ki ima na prvih treh diagonalnih mestih, ki se nanašajo na ploščad, visoke elemente na ostalih pa nizke.

Poudariti je potrebno, da sila na segmente manipulatorja ne povzroča samo navorov v ničelnem prostoru, ampak tudi take, ki se odražajo v pogrešku v prostoru naloge (3.11). Vendar pa po času, ko sila ne deluje več na manipulator, pogrešek v prostoru naloge konvergira proti nič.

Sila na ploščad Zunanja sila na ploščad ne povzroča navorov v sklepih manipulatorja. Povzroča samo silo na ploščad, ki jo kompenzira regulator ploščadi. Tako sila ne vpliva niti na gibanje ploščadi niti na gibanje manipulatorja in s tem ne vpliva niti na gibanje v ničelnem prostoru niti na gibanje v prostoru naloge (3.11), (3.13).

4. Določitev naloge mobilnega manipulatorja

V tem poglavju definiramo nalogo mobilnega manipulatorja. Primarna naloga je sledenje vrha trajektoriji. Sekundarna naloga pa je izogibanje oviram v okolici ploščadi. Podali smo, kako določiti parametre regulatorja v ničelnem prostoru. Določitev temelji na zahtevi po odmikanju manipulatorja od ovir z uporabo podajnosti v ničelnem prostoru ter na odmikanju ploščadi preko odbojnih hitrosti zaradi ovir. V nadaljevanju smo prikazali kompenzacijo nasičenja hitrosti in pospeškov, ki deluje v sekundarni nalogi. Definirali smo izraz gibalno območje ploščadi, na podlagi katerega omejujemo hitrost ploščadi med gibanjem. Ob koncu poglavja smo na kratko opisali orodje za delo z mobilnimi manipulatorji, ki deluje v okviru Matlab Simulinka, ter povezave med deli sistema.

4.1 Naloga mobilnega manipulatorja

V 3. poglavju smo pokazali, da regulator omogoča izvajanje primarne in sekundarne naloge hkrati. Pokazali smo tudi, da je sistem v primeru kontakta vrha robota z okoljem podajen. Manipulator pa je podajen tudi v ničelnem prostoru, kar za ploščad ne velja.

Eden izmed ciljev doktorske disertacije je zagotovitev gibanja v prostoru z neznanimi ovirami. Primarna naloga mobilnega manipulatorja je sledenje vrha predpisani trajektoriji. Hkrati s primarno nalogo pa se mora mobilni manipulator izogibati oviram. Za izogibanje oviram ploščadi uporabimo ultrazvočne senzorje razdalje, ki se nahajajo na ploščadi in učinkovito ugotavljajo prosti prostor v okolici ploščadi. Kot smo že omenili, manipulator nima lastnih senzorjev za merjenje razdalje. Za odmikanje smo uporabili lastnost manipulatorja, da je v ničelnem prostoru podajen. V primeru kontakta z oviro, ovira generira silo na manipulator, ki manipulator od ovire odmakne.

4.1.1 Izogibanje oviram v okolici ploščadi

Eden izmed najpogosteje uporabljenih načinov za izogibanje oviram je, da v odvisnosti od razdalje ovir od robota generiramo pomik v ničelnem prostoru, ki povzroči odmik robota od ovire in hkrati ne vpliva na primarno nalogo [35]. Podobno dosežemo tudi z uporabo t.i. potencialnega polja [34], kjer se robot giblje v polju navideznih sil, ki odbijajo robota stran od ovir in ga privlačijo proti ciljni točki. Pri določanju razdalje med robotom in ovirami, robota in ovire aproksimiramo z množico točk, med katerimi določamo razdaljo. Računska zahtevnost se močno poveča, kadar naraste število točk, med katerimi računamo oz. merimo razdaljo. Število točk za aproksimacijo robota ter s tem računsko zahtevnost lahko zmanjšamo s tem, da predstavimo robota in ovire z množico mehurčkov, ki predstavljajo prosti prostor okoli robota [50, 51]. Število točk se s tem zmanjša na število mehurčkov. Pri tem velja, da je lahko robot predstavljen na grobo z manj velikimi mehurčki ali pa zelo natančno z več manjšimi mehurčki.

Določitev odbojne hitrosti ali sile je lahko rezultat samo ene najbližje ovire ali pa je rezultat vsote vseh ovir znotraj nekega območja vpliva ovir. Kadar upoštevamo le eno oviro, je izračun enostavnejši, vendar lahko pride do pogostih preklapov med dvema ovirama, ki sta na približno isti razdalji. To pa vodi v nezveznosti v odbojni veličini. Za določitev odbojne veličine v odvisnosti od razdalje je v literaturi predlaganih veliko načinov, vsi imajo skupno to, da je odbojna veličina večja, kadar je ovira bližje. Na robu območja vpliva ovir, naj je veličina čim nižja oz. enaka nič.

V našem primeru ovire generirajo odbojno hitrost, ki jo določimo z upoštevanjem vseh ovir v okolici ploščadi, ki so znotraj območja vpliva ovire d_{soi} . Razdaljo do ovir določimo z uporabo ultrazvočnih senzorjev na ploščadi. Enačba za določitev odbojne hitrosti ploščadi v ničelnem prostoru $\dot{\varphi}_p$ je določena s sledečo enačbo [52]

$$\dot{\varphi}_p = - \sum_{i=0}^{n_0} w_i K_s \left(\frac{d_{soi}}{\|\mathbf{d}_{0_i}\|} - 1 \right) \frac{\mathbf{d}_{0_i}}{\|\mathbf{d}_{0_i}\|}, \quad \forall \|\mathbf{d}_{0_i}\| < d_{soi}, \quad (4.1)$$

kjer K_s in \mathbf{d}_{0_i} predstavljata koeficient odboja in vektor razdalje od ploščadi do posamezne ovire i , n_0 pa je število ovir znotraj območja vpliva. Dodane so uteži

w_i , ki normirajo posamezno odbojno hitrost, in so določene s sledečo enačbo

$$w_i = \frac{d_{soi} - \|\mathbf{d}_{0i}\|}{\sum_{i=0}^{n_0} (d_{soi} - \|\mathbf{d}_{0i}\|)}.$$

Z normiranjem odbojne hitrosti dosežemo, da dve oviri, ki sta blizu skupaj, generirata enako silo, kot bi jo ena sama na isti razdalji. V nasprotnem primeru bi bila sila dvakrat večja.

V določenih primerih se lahko zgodi, da hkrati ni možno izpolniti obeh nalog-sledenja trajektoriji in izogibanja oviram. V primeru da se ovira nahaja med ploščadjo in vrhom robota, bo prišlo do gibanja ploščadi v smeri stran od ovire in s tem stran od vrha. Pri tem se bo manipulator iztegoval. To bo možno do maksimalne iztegnjenosti manipulatorja. Po tem času se ploščad oviri ne bo več odmikala, saj je izogibanje oviram sekundarna naloga, ki pa ne more biti izpolnjena, ne da bi prišlo do pogoška v primarni nalogi. V takšnem primeru, kadar se ovire preveč približajo ploščadi, moramo delovanje ustaviti ali pa zamenjati prioriteto nalog.

4.1.2 Odmikanje od ovir v okolici manipulatorja

Zaznavanje ovir v okolici manipulatorja je običajno problem. Obstaja več različnih načinov za zaznavanje ovir. Z uporabo množice kamer lahko rekonstruiramo celoten prostor. Ta način je računsko zelo zahteven in deluje le na dovolj enostavnih prostorih. Prostora, ki se kameram skriva za oviro, ne moremo rekonstruirati. Računsko zahtevnost lahko zmanjšamo z uporabo posebnih markerjev, ki jih pritrdimo na ovire. Pozicijo teh markerjev lahko dokaj enostavno določimo s kakšnim od optičnih merilnih sistemov (Elite, Optotrak, Vicon). Slabost je označevanje ovir, kar v vsakdanjem življenju ni zaželeno. Druga možnost je uporaba mreže senzorjev razdalje, ki jih pritrdimo na segmente manipulatorja. Ta način je drag in njegova izvedba je mehansko zahtevna, povečana pa je tudi teža segmentov. Najpogosteje uporabljamo na dotik občutljive "kože", kjer se ovira zazna šele s samim dotikom.

V našem delu smo za odmikanje od ovir uporabili princip akcije in reakcije. Pri tem ni potrebno zaznavanje ovir. Princip temelji na dejstvu, da trk z oviro povzroči silo na segmentih manipulatorja. Predpogoj, da je tako odmikanje od

ovir možno, je, da ima manipulator nesamozaporne prenose in nizko trenje v sklepih. V tem primeru se sila ovire prenaša direktno na motorje manipulatorja. Iz rezultatov v poglavju 3.2.2 vemo, da je manipulator v ničelnem prostoru podajen na zunanjo silo. Sila ovire v primeru dotika povzroči odmik manipulatorja. Kakšna je dejanska podajnost oziroma kakšen je dejanski odmik manipulatorja je odvisno od vrednosti parametra \mathbf{K}_n , vztrajnostne matrike manipulatorja ter od konfiguracije manipulatorja [46]. Žal se dotik z oviro odraža tudi v pogrešku v prostoru naloge, vendar pa se potem, ko pade sila dotika na nič, pogrešek v prostoru naloge asimptotično približa nič.

Manipulator je bolj podajen pri manjši vrednosti parametra \mathbf{K}_n , tako je tudi sila po trku manjša. Z manjšim \mathbf{K}_n pa je slabše sledenje trajektoriji v ničelnem prostoru, torej je odmik ploščadi od ovir manjši. Zaradi tega moramo dovolj povečati koeficient odboja K_s , kar lahko vodi v nestabilnost. Parameter \mathbf{K}_n je matrika, pri kateri lahko z izbiro elementov bolj ojačamo določene stopnje kot druge. Tako bolj ojačamo prizmatični stopnji, ki pripadata ploščadi, ostale pa manj. S tem dosežemo veliko podajnost v ničelnem prostoru manipulatorja in dobro sledenje v ničelnem prostoru za stopnji mobilne ploščadi, ki predstavljata odmik od ovir okoli ploščadi. Primer take matrike \mathbf{K}_n je diagonalna matrika, ki ima za prva dva člena višjo vrednost na ostalih pa nižjo.

Manipulator je lahko hkrati tog v prostoru naloge in podajen v ničelnem prostoru. To pomeni, da bi bil manipulator sposoben na vrhu držati večjo maso npr. 100 kg, njegove segmente pa bi lahko premikali z zelo majhno silo npr. 1 N. Takšne naloge pa ne more izvršiti niti človek. Edina omejitev takšnega gibanja pri robotu je njegova mehanska izvedba.

4.2 Določitev uteži posplošenega inverza

Slabost kombiniranega načina vodenja je ta, da sistem ni dinamično konsistenten, kljub uporabi posplošenega inverza uteženega z vztrajnostno matriko. Razlog za to je hitrostni regulator v ploščadi. Dinamične konsistence ni možno doseči brez vpliva na vse navore v sistemu. Edina utež, ki to omogoča, pa ne daje ustreznih rešitev, saj ločuje oba podsistema (poglavje 3.2.2).

Kot smo že omenili, je z uporabo uteži, ki je enaka vztrajnostni matriki, mi-

nimizirana kinetična energija sistema [27]. V našem primeru, kjer obstaja zelo velika razlika v teži med ploščadjo (180 kg) in segmenti manipulatorja (50g do 900 g), to ni zaželeno. Zaradi te razlike minimizacija kinetične energije vodi v to, da večino gibanja opravi manipulator, ploščad pa se v primerjavi z manipulatorjem zelo malo premika. Posledično manipulator zelo pogosto pride v singularno konfiguracijo (se iztegne do konca). V izogib tega problema, je potrebno utež spremeniti na način

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_p & \mathbf{H}_{mp} \\ \mathbf{H}_{pm} & k * \mathbf{H}_p \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

pri tem smo matriko \mathbf{H}_p določili samo približno, saj ne vpliva signifikantno na obnašanje sistema. Na realnem sistemu je matrika diagonalno dominantna, zato je izbrana \mathbf{H}_p enaka diagonalni matriki z elementi, ki označujejo maso in vztrajnostni moment ploščadi. V enačbi parameter k vpliva samo na del vztrajnostne matrike, ki pripada manipulatorju. Kadar je $k = 1$, je $\mathbf{W} = \mathbf{H}$ in celotna kinetična energija je vključena v minimizacijo. Z uporabo $k > 1$ je delež vztrajnostne matrike manipulatorja večji. Zaradi tega je rezultat minimizacije kinetične energije tak, da je gibanje manipulatorja manjše, gibanje ploščadi pa večje. Tako je kljub veliki razliki v masah ploščadi in manipulatorja, gibanje ploščadi dovolj veliko in manipulator ne pride v singularno konfiguracijo. Izbrana utež je simetrična pozitivno definitna matrika in zadosti pogojem uteži pri $k > 0$.

Povzemimo, če je k premajhen, bo večji delež gibanja izvajal manipulator in prišel bo do singularne konfiguracije. Nasprotno, če je k prevelik, bo večji delež gibanja izvajala ploščad. Posledično bo natančnost in dinamika sistema manjša, saj gibanje temelji na počasnejšem delu sistema. Zaradi tega predlagamo dinamično spreminjanje parametra k v odvisnosti od gibanja mobilnega manipulatorja.

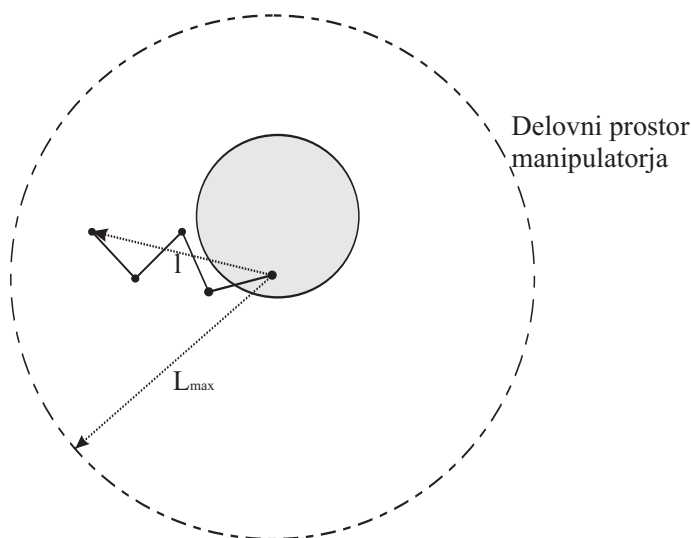
Ker je manipulator hitrejši in natančnejši, naj večji del gibanja opravi manipulator (k je manjši). V primeru ko je vrh manipulatorja blizu roba manipulatorjevega delovnega prostora, je nujno, da se tudi ploščad giblje (k je večji). Podobno, kadar se vrh približuje robu, naj bo k večji, kadar pa se oddaljuje od roba oz. se bliža središču delovnega prostora, naj bo k manjši.

V enostavnem ravninskem primeru, kot je v našem primeru, je delovni prostor manipulatorja omejen s krožnico s središčem v bazi manipulatorja in radijem

L_{max} , ki je enak vsoti dolžin vseh segmentov manipulatorja (slika 4.1). Razdalja med bazo ter vrhom manipulatorja l ustreza bližini roba delovnega prostora. Predlagamo, da je k funkcija razdalje l in funkcija časovnega odvoda razdalje \dot{l} in je podana z enačbo

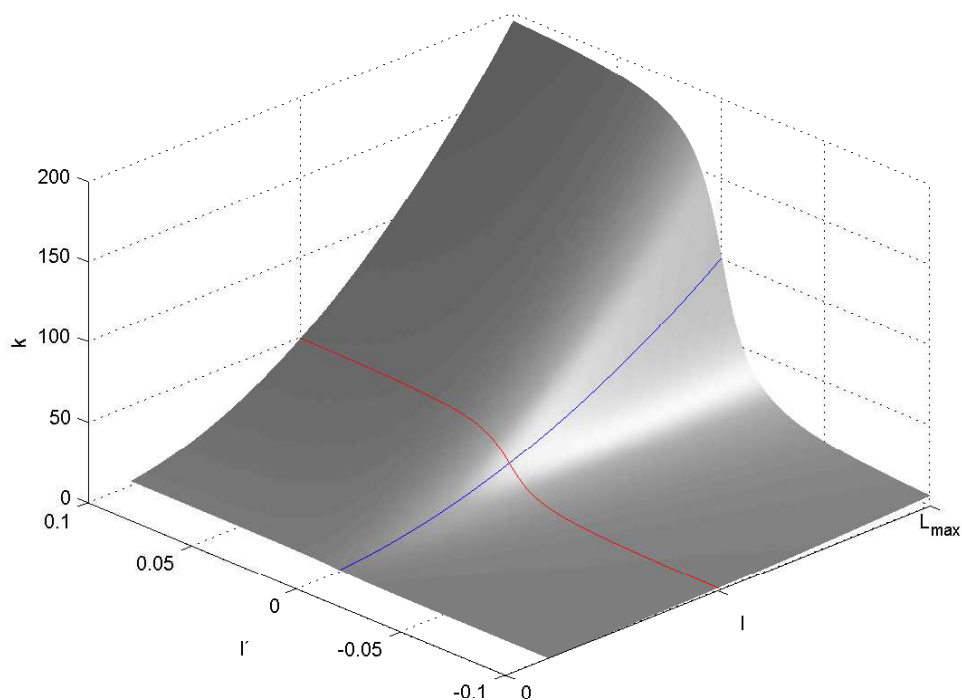
$$k = (al^2 + b) \left(\frac{\arctan(\dot{l}c)}{\frac{\pi}{2}} + 1 \right), \quad (4.3)$$

kjer so a , b in c empirično definirani parametri. Slika 4.2 prikazuje to odvisnost. Modra črta prikazuje člen $(al^2 + b)$ pri čemer se l ne spreminja ($\dot{l} = 0$). V tem primeru se vrednost k povečuje z večanjem razdalje l . Rdeča črta pa prikazuje člen odvisnosti od hitrosti $\left(\frac{\arctan(\dot{l}c)}{\frac{\pi}{2}} + 1 \right)$ pri konstantni razdalji $l = L_{max}/2$. Ta člen poveča vrednost k , če se l povečuje ($\dot{l} > 0$), in zmanjša k , če se l zmanjšuje ($\dot{l} < 0$).



Slika 4.1: Prikaz delovnega prostora manipulatorja

V našem predhodnem delu [53] smo uporabili optimizacijo manipulabilnosti manipulatorja kot del sekundarne naloge. S tem smo dosegli krčenje manipulatorja, kar je odpravilo singularnost. Slabost tega pristopa je v tem, da s tem vplivamo na togost v ničelnem prostoru, kar pa ni zaželeno pri odmikanju od ovir v okolici manipulatorja.



Slika 4.2: k je funkcija razdalje l in njenega odvoda \dot{l}

4.3 Nasičenje hitrosti in pospeškov

Na mnogih področjih, kjer se uporabljajo roboti, se zahteva čimvečja hitrost gibanja robotov. Žal je hitrost robotov omejena zaradi njihovih mehanskih lastnosti. Pri velikih hitrostih in pospeških nastajajo velike sile v segmentih robota, kar vodi do zmanjšanja natančnosti in celo do poškodb robota. Zaradi tega krmilniki robotov omejujejo hitrosti, pospeške in navore v motorjih. Pri določevanju regularnih veličin navedenih omejitev ne smemo preseči, saj v primeru, da omejitev presežemo, pride do razlike med pričakovano-izračunano veličino in veličino, ki jo izvrši robotski krmilnik. To pa se odraža v pogrešku v prostoru naloge. Pri redundantnih robotih ima sekundarna naloga lastnost, da ne vpliva na primarno nalogo. To pa lahko dosežemo samo, če naloga ne povzroči presežka omejitve, v nasprotnem primeru sekundarna naloga vpliva na primarno nalogo. Nekatere aplikacije zahtevajo poleg sledenja poziciji tudi točno določeno hitrost gibanja vrha (npr. lakiranje, varjenje, ...), kjer je zmanjševanje oz. spreminjanje želene hitrosti vrha nezaželeno. Robot je najbolje izkoriščen, kadar dela z največjo

dovoljeno hitrostjo in pospeškom.

Pri neredundantnih robotih obstaja končno mnogo rešitev za izvrševanje naloge. Robot ne more preiti iz ene konfiguracije v drugo, ne da bi se spremenile vrednosti zunanjih koordinat. Pri neredundantnih robotih moramo v primeru, da naloga določa preveliko hitrost v posameznem sklepu, zmanjšati vse sklepne hitrosti, ter tudi hitrost gibanja vrha. Kot je že bilo povedano, spreminjanje hitrosti gibanja vrha ni zaželeno, a druge možnosti pri neredundantnih robotih ni. Paziti moramo že pri načrtovanju naloge, da teh omejitev ne presežemo.

Nasprotno ima pri redundantnih robotih naloga več rešitev. V primeru, da so določene sklepne hitrosti presežene, lahko za dosego zelenih hitrosti na vrhu ustrezno povečamo hitrosti v drugih sklepih redundantnega robota, ki nadomestijo primanjkljaj in odpravijo pogrešek v prostoru naloge.

V literaturi je bilo predstavljenih več različnih postopkov za reševanje omejenega problema. Žlajpah je predstavil postopek, ki ne temelji na uporabi Jacobijevega posplošenega inverza. Pri postopku minimizacije je kot pogoj zastavil omejitev v sklepu. Ta rešitev zagotavlja primerno gibanje, vendar je čas računanja mnogo daljši, saj je postopek minimizacije numeričen. Ker razviti algoritem ne temelji na uporabi posplošenega inverza, kar je običaj na področju redundantnih robotov, je dokaj zahteven in zato ni primeren za hitro implementacijo v obstoječe regulacijske sheme.

Postopek, ki je primernejši za uporabo v obstoječih regulacijskih shemah, temelji na spreminjanju uteži posplošenega inverza. Utež izberemo tako

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}.$$

Z večanjem elementa a_{ii} lahko dosežemo, da je hitrost \dot{q}_i manjša. Seveda pa se posledično povečajo ostale sklepne hitrosti. Za primerno delovanje je potrebno utež spreminjati dinamično med gibanjem. Ko \dot{q}_i preseže omejitev, a_{ii} povečamo, ko \dot{q}_i pade pod omejitev, lahko a_{ii} zmanjšamo. Odnos med a_{ii} in \dot{q}_i ni linearen, zato je postopek natančne določitve a_{ii} dolgotrajen, še posebej, če nastopa več presežkov in je potrebno določiti več elementov a_{ii} , a_{jj} , ... V primeru, da želimo

poleg primarne naloge opravljati še sekundarno nalogo, pa velja, da mora biti a_{ii} manjši, da je hitrost \dot{q}_i manjša. To pa se ravno izključuje s prejšnjim pogojem, kar omejuje uporabnost opisanega postopka.

V nadaljevanju smo prikazali postopek, ki temelji na uporabi sekundarne naloge za rešitev prekoračitve hitrosti oz. pospeška. Dodatno sekundarno nalogo definiramo tako, da doda tak prispevek k hitrosti v sklepih, ki točno kompenzira presežek hitrosti v posameznem sklepu. Zaradi tega se druge ustrezne stopnje gibljejo hitreje. Ker je ta prispevek dodan v sekundarni nalogi, ne vpliva na primarno nalogo.

Hitrostni regulator je običajno podan kot

$$\dot{\mathbf{q}}_{c1} = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}_n,$$

kjer prvi člen predstavlja sklepne hitrosti v prostoru naloge, drugi pa sklepne hitrosti v ničelnem prostoru. Kadar sklepna hitrost $\dot{\mathbf{q}}_{c1}$ preseže nasičenje hitrosti $\dot{\mathbf{q}}_{sat}$, moramo prišteti še kompenzacijsko hitrost $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ v ničelnem prostoru, ki zagotovi, da nova sklepna hitrost $\dot{\mathbf{q}}_c$ ne presega nasičenja

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}^\# \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}_n + \mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}_{comp},$$

v enačbi $\dot{\mathbf{q}}_c$ predstavlja regulirno hitrost, ki je že kompenzirana in ne presega nasičenja.

Presežek v i -tem sklepu \dot{q}_{over_i} zapišemo

$$\dot{q}_{over_i} = \begin{cases} \dot{q}_{c1_i} - \dot{q}_{sat_i}^+, & \dot{q}_{c1_i} > \dot{q}_{sat_i}^+ \\ 0, & \dot{q}_{sat_i}^- \leq \dot{q}_{c1_i} \leq \dot{q}_{sat_i}^+ \\ \dot{q}_{c1_i} - \dot{q}_{sat_i}^-, & \dot{q}_{c1_i} < \dot{q}_{sat_i}^- \end{cases},$$

pri čemer $\dot{q}_{sat_i}^+$ in $\dot{q}_{sat_i}^-$ predstavljata pozitivno in negativno nasičenje hitrosti v i -tem sklepu. Za popolno kompenzacijo presežka hitrosti v i tem sklepu mora biti produkt $\mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}_{comp}$ za i -ti sklep enak $-\dot{q}_{over_i}$. Zaradi lažjega razumevanja zapišimo produkt $\mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}_{comp}$ v razčlenjeni obliki

$$\mathbf{N}\dot{\mathbf{q}}_{comp} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1i} & \dots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2i} & \dots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ N_{i1} & N_{i2} & \dots & N_{ii} & \dots & N_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ N_{n1} & N_{n2} & \dots & N_{ni} & \dots & N_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_{comp1} \\ \dot{q}_{comp2} \\ \vdots \\ \dot{q}_{comp_i} \\ \vdots \\ \dot{q}_{comp_n} \end{bmatrix},$$

pri čemer so N_{ij} komponente matrike \mathbf{N} , \dot{q}_{comp_i} pa komponente vektorja $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$. Produkt $\mathbf{N}\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ mora ravno kompenzirati presežek hitrosti v i -tem sklepu

$$\dot{q}_{over_i} = - \begin{bmatrix} N_{i1} & N_{i2} & \dots & N_{ii} & \dots & N_{in} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{comp}.$$

Kompenzacijska hitrost $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ povzroči poleg hitrosti \dot{q}_{over_i} v sklepu i , kjer je hitrost presežena, tudi hitrosti v ostalih sklepih. Te hitrosti nadomestijo primanjkljaj in zagotovijo, da je hitrost vrha $\dot{\mathbf{x}}$ nespremenjena.

Poleg presežka hitrosti \dot{q}_{over_i} so rezultat produkta $\mathbf{N}\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ tudi hitrosti v nepreseženih sklepih, ki nadomestijo ta primanjkljaj.

Definirajmo selekcijsko matriko \mathbf{S} , s katero določimo mesta, na katerih je prišlo do omejitve. Matrika \mathbf{S} je sestavljena iz toliko vodoravnih vektorjev, kolikor je presežkov. Vsak vektor je dolžine števila prostostnih stopenj n in ima samo na mestu, kjer je prišlo do presežka, zapisano 1 na ostalih mestih pa 0. Vrstni red vektorjev je poljuben. Spodaj je prikazan primer selekcijske matrike za primer, kjer je prišlo do presežka v 3, 5 in 6 sklepu manipulatorja s sedmimi prostostnimi stopnjami

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Produkt selekcijske matrike z vektorjem $\dot{\mathbf{q}}_{over}$ izloči iz vektorja samo tiste elemente, kjer je prišlo do presežka npr.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{over_3} \\ \dot{q}_{over_5} \\ \dot{q}_{over_6} \end{bmatrix} = \mathbf{S}\dot{\mathbf{q}}_{over}.$$

Produkt $\mathbf{N}\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ mora samo na mestih, kjer je prišlo do presežka, rezultirati v $-\dot{q}_{over_i}$. Z uporabo selekcijske matrike lahko torej zapišemo

$$-\mathbf{S}\dot{\mathbf{q}}_{over} = \mathbf{SN}\dot{\mathbf{q}}_{comp}. \quad (4.5)$$

Produkt \mathbf{SN} je podmatrika matrike \mathbf{N} in vsebuje samo tiste vrstice matrike \mathbf{N} , ki se nanašajo na prekoračene sklepe. V enačbi 4.5 moramo določiti vektor $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$, da bo rezultat operacije ravno enak presežkom v preseženih sklepih. Sistem enačb je poddeterminiran. Z uporabo psevdoinverza matrike \mathbf{SN} dobimo eno izmed rešitev

$$\dot{\mathbf{q}}_{comp} = -(\mathbf{SN})^T [(\mathbf{SN})(\mathbf{SN})^T]^{-1} \mathbf{S}\dot{\mathbf{q}}_{over}. \quad (4.6)$$

Če je matrika \mathbf{SN} polnega ranga, torej so vrstice med seboj linearno neodvisne, inverz $[(\mathbf{SN})(\mathbf{SN})^T]$ obstaja. V matriki \mathbf{N} je lahko največ toliko neodvisnih vrstic, kolikor je redundantnih stopenj. V primeru, da matrika \mathbf{SN} ni polnega ranga, ni možno kompenzirati presežka hitrosti.

Presežene hitrosti po kompenzaciji torej ravno dosegajo nasičenje, s tem je hitrost v teh stopnjah določena. Tako z vsako stopnjo, ki preseže omejitve, zgubimo eno stopnjo redundance. Postopek kompenzacije lahko izvajamo, dokler je v določeni smeri dovolj redundance, to pomeni, dokler je matrika \mathbf{SN} polnega ranga. Kadar ni polnega ranga, hitrosti ni več možno kompenzirati s hitrostmi v drugih sklepih, zato postopamo enako kot pri neredundantnih robotih s sorazmernim zmanjšanjem vseh sklepnih hitrosti in s tem tudi z zmanjšanjem hitrosti v prostoru naloge.

Kompenzacija hitrosti temelji na določitvi hitrosti $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ z uporabo enačbe (4.6). S kompenzacijo presežkov hitrosti dosežemo, da hitrosti v obravnavanih sklepih ne presegajo omejitev. Ker pa kompenzacijo dosežemo s povečanjem hitrosti v drugih sklepih, kjer ni prišlo do presežka, se lahko zgodi, da popravljena hitrost \dot{q}_c po kompenzaciji presega nasičenje v nekompenziranem sklepu. V tem primeru moramo znova določiti selekcijsko matriko \mathbf{S} in $\dot{\mathbf{q}}_{comp}$ tudi za sklep, kjer je po novem prišlo do presežka. V tem primeru določimo presežek v novo prekoračenem sklepu i z enačbo $\dot{q}_{over_i} = \dot{q}_{c1_i} - \dot{q}_{sat_i}$

Mobilni manipulator, uporabljen v našem delu, ima zelo nizke omejitve hitro-

sti ploščadi. Tako je za doseg želenih hitrosti običajno potrebno povečati hitrosti manipulatorja.

4.3.1 Kompenzacija pospeška

Predstavljeni algoritem kompenzacije nasičenja hitrosti je namenjen uporabi v hitrostno vodenih sistemih. Naš regulacijski algoritem pa temelji na vodenju pospeška, kjer ima sistem poleg omejenih hitrosti tudi omejene pospeške. Podobno kot velja za hitrostni regulator, lahko zapišemo tudi za pospeškovni regulator. Dodati je potrebno člen, ki kompenzira presežek pospeška

$$\ddot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}^\#(\ddot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N}(\Phi - \dot{\mathbf{N}}\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{N}\ddot{\mathbf{q}}_{comp}. \quad (4.7)$$

Določitev pospeška za kompenzacijo $\ddot{\mathbf{q}}_{comp}$ poteka podobno kot določitev hitrosti v prejšnjem poglavju

$$\ddot{\mathbf{q}}_{comp} = -(\mathbf{SN})^T ((\mathbf{SN})(\mathbf{SN})^T)^{-1} \mathbf{S}\ddot{\mathbf{q}}_{over}, \quad (4.8)$$

pri čemer $\ddot{\mathbf{q}}_{over}$ predstavlja presežke pospeška. Maksimalen pospešek določimo iz nasičenja pospeška ter tudi iz nasičenja hitrosti. V primeru, da je hitrost nasičenja za nek sklep dosežena, se ne sme več povečevati. Torej je maksimalen pospešek za ta sklep enak 0. Dokler pa hitrost nasičenja ni dosežena, pa je maksimalen pospešek enak pospešku nasičenja. Spodnje enačbe prikazujejo določitev maksimalnih pospeškov za pozitivno $(\cdot)^+$ in negativno $(\cdot)^-$ smer gibanja sklepa

$$\ddot{q}_{sat_i}^+ = \begin{cases} \ddot{q}_{sat_{i_0}}^+, & \dot{q}_i < \dot{q}_{sat_i}^+ \\ 0, & \text{drugače} \end{cases}, \quad (4.9)$$

$$\ddot{q}_{sat_i}^- = \begin{cases} \ddot{q}_{sat_{i_0}}^-, & \dot{q}_i > \dot{q}_{sat_i}^- \\ 0, & \text{drugače} \end{cases}, \quad (4.10)$$

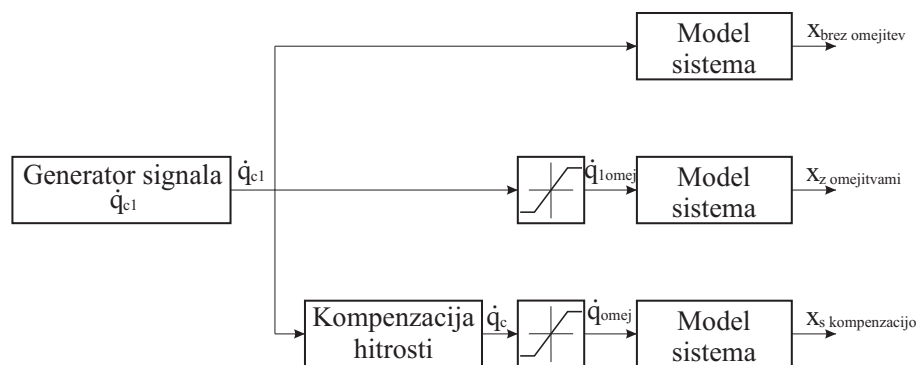
pri čemer predstavlja $\ddot{q}_{sat_{i_0}}$ nasičenje pospeška sistema v sklepu i .

Enak princip bi lahko uporabili v primeru okvare-zaskočitve določenega sklepa. V tem primeru bi postavili v tem sklepu hitrost in pospešek na nič, ostale sklepe hitrosti bi nadomestile primanjkljaj.

4.3.2 Rezultati kompenzacije nasičenja hitrosti

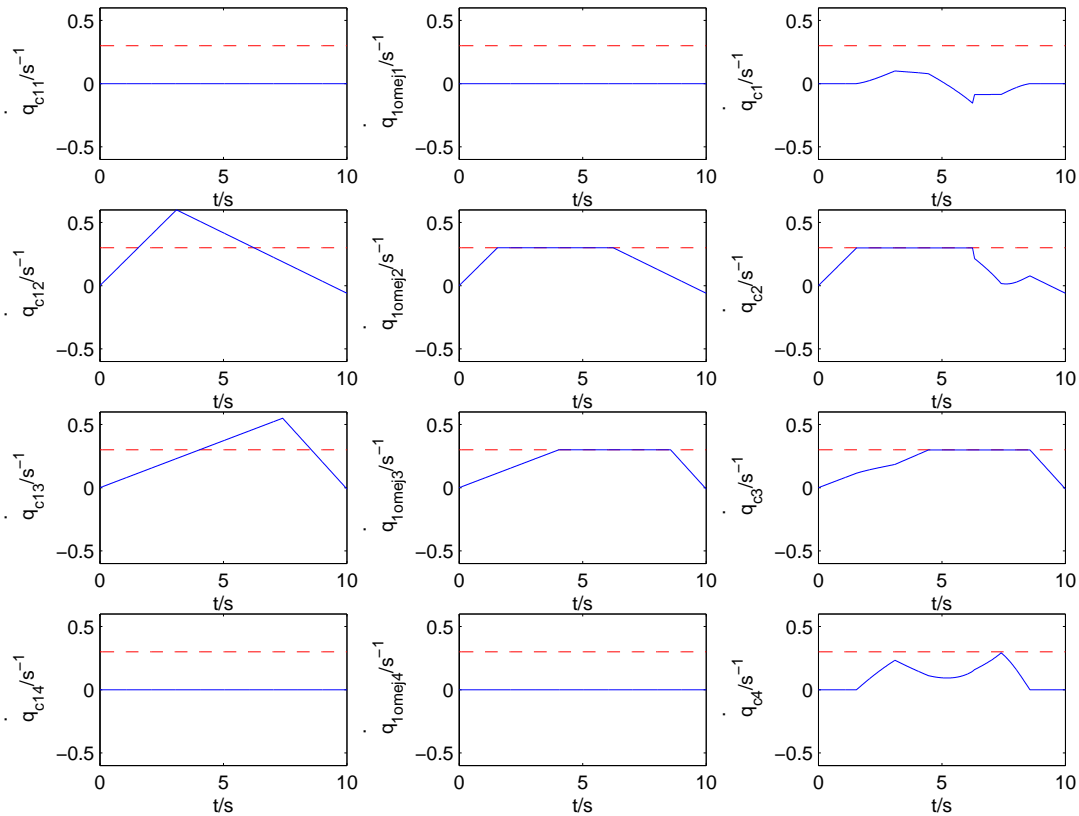
Algoritem za kompenzacijo hitrosti in pospeškov smo prikazali na redundantnem manipulatorju s štirimi rotacijskimi prostostnimi stopnjami, ki se giblje v ravnini. Stopnji redundance sta torej dve, kar pomeni, da lahko dve stopnji prideta v nasičenje, da bo sistem še vedno zadovoljivo deloval. Za boljši prikaz delovanja smo algoritem testirali na sistemu brez povratne zanke. Regulator s povratno zanko bi odpravil del pogreška v prostoru naloge, tako da bi bil učinek algoritma slabše videni rezultati pa močno odvisni od regulatorja.

Model, ki smo ga uporabili pri testiranju algoritma, je prikazan na sliki 4.3. Generator signala generira signal sklepnih hitrosti, ki je prikazan na sliki 4.4 v levem stolpcu. Slika prikazuje hitrosti vseh štirih sklepov. Signal v drugi in tretji stopnji presega omejitve, ki znašajo 0,3 rd/s in so prikazane s črtkano črto. Signal generatorja vodimo na tri veje. V zgornji veji je model sistema, ki ne vsebuje omejitev. Odziv te veje v prostoru naloge smo poimenovali $\mathbf{x}_{\text{brez omejitev}}$. V srednji veji vodimo isti signal preko omejljnika hitrosti na model. Omejeni signal je prikazan na sliki 4.4 v srednjem stolpcu. Odziv te veje v prostoru naloge smo poimenovali \mathbf{x}_z omejitvami. V spodnji veji smo signal generatorja vodili na blok za kompenzacijo hitrosti. Sklepne hitrosti po kompenzaciji ne presegajo omejitev, dodane pa so tudi hitrosti v drugih sklepih, ki zagotavljajo nemoteno gibanje v prostoru naloge (slika 4.4 desni stolpec). Dobljene hitrosti preko omejljnika hitrosti vodimo v model. Odziv te veje v prostoru naloge smo poimenovali \mathbf{x}_s kompenzacijo.



Slika 4.3: Blok shema za testiranje algoritma za kompenzacijo hitrosti

Slika 4.5 prikazuje pogreške v prostoru naloge. Pogrešek je definiran kot raz-

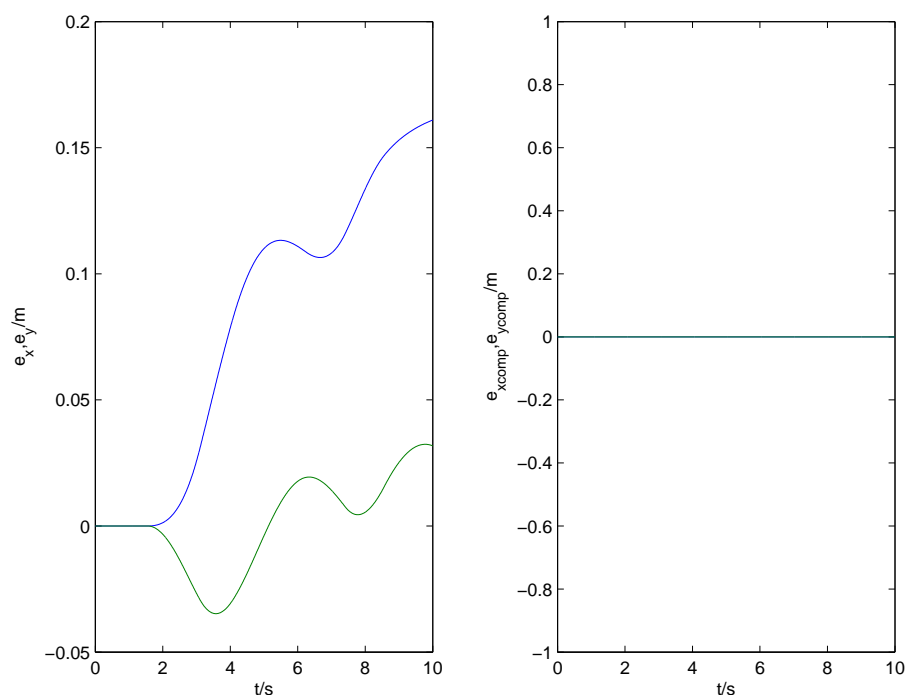


Slika 4.4: Hitrosti v sklepih manipulatorja; levo - neomejene hitrosti, sredina - omejene nekompenzirane hitrosti, desno - kompenzirane hitrosti

lika med odzivom sistema brez omejitev ($\mathbf{x}_{\text{brez omejitev}}$) in sistema z omejitvami \mathbf{x}_z omejitvami in \mathbf{x}_s kompenzacijo. Na levi strani je prikazan pogrešek sistema v veji brez kompenzacije. Pogrešek je različen od nič, kar pomeni, da se odziv v prostoru naloge razlikuje od pričakovanega. Na desni sliki je prikazan pogrešek sistema v veji s kompenzacijo hitrosti. Zaradi popolne kompenzacije je pogrešek ves čas enak nič, kar pomeni, da je odziv v prostoru naloge enak kljub omejitvi. Hitrosti v drugih sklepih učinkovito kompenzirajo primanjkljaj hitrosti v preseženih sklepih in zagotavljajo, da je gibanje v prostoru naloge enako.

4.4 Gibalno območje ploščadi

Mobilni manipulator ima teoretično neskončen delovni prostor. Sam manipulator pa ima omejen delovni prostor glede na ploščad, glede na to omejitev definiramo

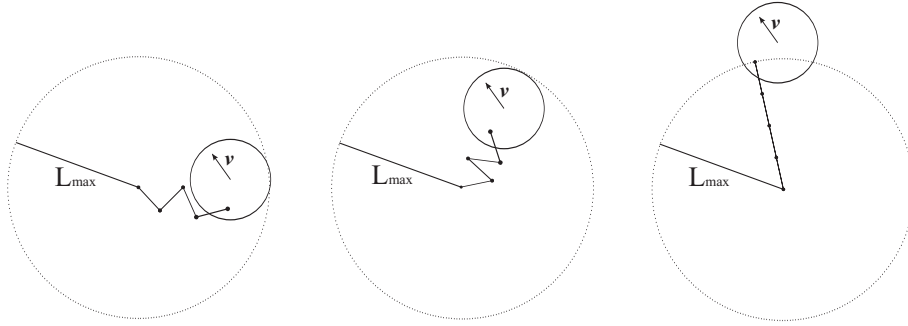


Slika 4.5: Pogrešek v prostoru naloge; levo - brez kompenzacije, desno - s kompenzacijo

gibalno območje ploščadi. To je območje gibanja ploščadi, kjer lahko manipulator doseže želeno točko v prostoru. Algoritmi za vodenje, ki obravnavajo celoten sistem mobilnega manipulatorja kot celoto, običajno določajo, da se ploščad nahaja znotraj gibalnega območja, saj je sistem obravnavan v celoti in skupaj teži k rešitvi naloge. Zaradi omejenih pospeškov pa se lahko zgodi, da pride ploščad izven svojega gibalnega območja.

Za sistem mobilnega manipulatorja je običajno značilno, da je ploščad počasnejša in da ima nižje omejitve hitrosti in pospeškov kot manipulator. To moramo upoštevati pri določitvi gibanja ploščadi in zagotoviti, da se ploščad vedno nahaja znotraj gibalnega območja. Lahko se namreč zgodi, da se ploščad zaradi prevelike hitrosti ne more ustaviti znotraj svojega gibalnega območja. Zaradi tega pride izven gibalnega območja, kar povzroči, da je želeno točko dosega manipulatorja izven delovnega prostora manipulatorja, kar pa povzroči pogrešek v prostoru naloge. Za ilustracijo si pogledjmo naslednji primer. Manipulator dosega določeno točko v prostoru. Ploščad se odmika od ovire, zaradi tega se manipulator izteguje. Ko je manipulator blizu roba svojega delovnega prostora (je

skoraj iztegnjen) se mora ploščad hitro ustaviti, a se ne more zaradi omejenih pospeškov. To povzroči, da pride do pogreška v prostoru naloge in do tega, da se manipulator iztegne do konca in pride v singularnost, kar povzroči oscilacije v sklepih manipulatorja. Zaradi omenjenega problema moramo hitrost ploščadi zmanjševati še preden pride do roba gibalnega območja (slika 4.6).



Slika 4.6: Določitev maksimalne hitrosti zaradi roba gibalnega območja

Slika 4.6 prikazuje gibanje ploščadi znotraj gibalnega območja. Ploščad se z določeno hitrostjo v pomika proti robu območja, ki je na sliki prikazano s črtnim krogom. Gibalno območje je v primeru planarnega manipulatorja določeno s krogom z radijem L_{max} . Središče gibalnega območja v prostoru sovpada s pozicijo vrha manipulatorja. Torej se gibalno območje premika s hitrostjo, ki je enaka hitrosti vrha v prostoru naloge (\dot{x}). Potrebno je ugotoviti, kakšna je lahko maksimalna hitrost ploščadi, da ne bo prišla izven gibalnega območja, če zavira z maksimalnim pojemkom. Iščemo torej presečišče trajektorije gibanja ploščadi s krožnico gibalnega območja.

Enačba roba gibalnega območja je enačba premikajoče krožnice v ravnini in je podana z enačbo

$$(k_x - (x_0 + \dot{x}_x t))^2 + (k_y - (y_0 + \dot{x}_y t))^2 = L_{max}^2,$$

kjer k_x in k_y predstavljata koordinate točk na krožnici, x_0 in y_0 pa sta začetni koordinati pozicije vrha. \dot{x}_x in \dot{x}_y sta hitrosti vrha v x in y smeri. Pri tem smo predpostavili, da se hitrost gibanja vrha med gibanjem ne spreminja. Enačbe gibanja ploščadi predstavljajo enakomerno pospešeno (pojemajoče) gibanje

$$x_p = \frac{a_{p_x} t^2}{2} + \kappa v_{p_x} t + x_{p0},$$

$$y_p = \frac{a_{p_y} t^2}{2} + \kappa v_{p_y} t + y_{p0},$$

kjer predstavljata x_p, y_p pozicijo ploščadi, z začetno pozicijo x_{p0} in y_{p0} . a_p in v_p sta maksimalni pojemek in trenutna hitrost ploščadi.

Z opisanim postopkom želimo vplivati na gibanje ploščadi, tako da ne bo prišla izven gibalnega območja. Pri tem želimo čim manj vplivati na običajno delovanje sistema. To pomeni, da hitrosti ne omejujemo, dokler se lahko ploščad ustavi znotraj gibalnega območja. Ko pa začnemo omejevati hitrost, pa naj ta ostane v isti smeri, saj s tem v praksi najmanj vplivamo na obnašanje sistema.

Zanima nas torej, kakšna je lahko maksimalna hitrost gibanja κv_p v isti smeri, ki zagotavlja, da bo ploščad ostala znotraj gibalnega območja ob podanem maksimalnem pojemku gibanja. Poiskati je potrebno parameter κ . Presečišče trajektorije in krožnice je določeno z

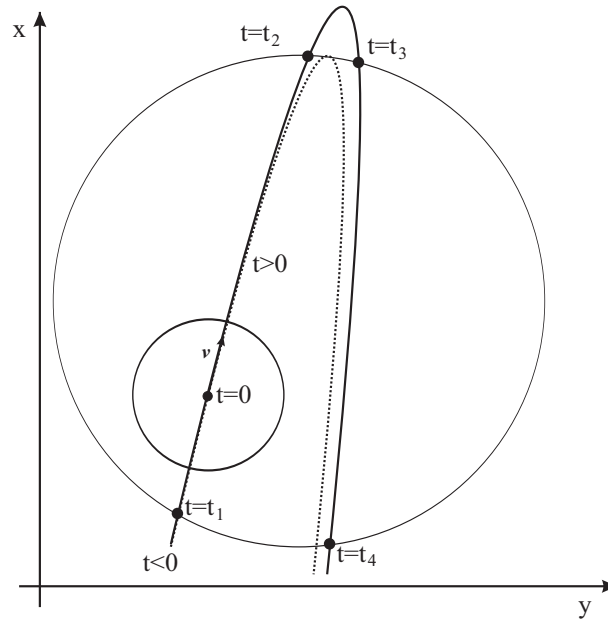
$$k_x = x_p, \quad k_y = y_p.$$

Z upoštevanjem teh dveh pogojev pridemo po daljšem preračunavanju do polinoma 4. stopnje, katerega ničle iščemo

$$a(\kappa)t^4 + b(\kappa)t^3 + c(\kappa)t^2 + d(\kappa)t + e(\kappa) = f(t). \quad (4.11)$$

Potrebujemo le eno rešitev, polinom pa nam ponuja štiri rešitve. Katera rešitev je prava, si ponazorimo grafično. Slika 4.7 ponazarja gibanje ploščadi znotraj gibalnega območja. Prikazani sta x in y dimenziji, paraboli pa prikazujeta gibanje ploščadi skozi čas. Opazimo, da res pride do štirih presečišč. Prvo presečišče se nahaja na spodnjem delu krožnice v negativnem času t_1 , zatem sta dve presečišči na zgornjem delu krožnice pri časih t_2 in t_3 in še eno presečišče na spodnjem delu krožnice pri času t_4 . Naša naloga je poiskati skrajno obliko gibanja ploščadi, tako da pride ravno do dotika s krožnico. V tem primeru ploščad pride do roba gibalnega območja, nato pa se začne gibati nazaj proti središču. Takšno gibanje ponazarja črtkano označena parabola. V tem primeru ima polinom vedno štiri realne ničle, od tega sta dve enojni in ena dvojna.

Problem, ki ga moramo rešiti pa ni iskanje ničel, temveč iskanje koeficientov polinoma (a, b, c, d in e) iz enačbe (4.11), ki zagotavljajo rešitev v podani obliki.



Slika 4.7: Prikaz gibanja ploščadi znotraj gibalnega območja

Iščemo edini parameter κ , ki zagotavlja, da ima polinom dve enojni realni ničli in eno dvojno realno ničlo.

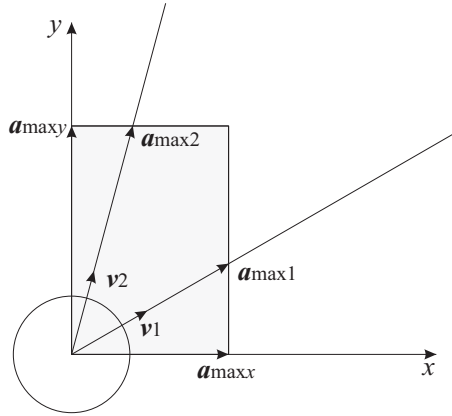
Ferrari je že v 16. stoletju predstavil enačbe za analitično iskanje ničel polinoma 4. reda. Za polinome višjih redov sta mnogo kasneje Abel in Galois pokazala, da analitična rešitev ni možna. Z uporabo Ferrarijevih enačb [54] in z upoštevanjem, da ima polinom štiri realne ničle, od tega je ena dvojna, pridemo do pogoja, da mora biti diskriminanta polinoma (4.11) enaka nič. Diskriminanta polinoma je polinom 7. stopnje [54]. Iščemo ničle tega polinoma

$$D(f(t)) = k_7\kappa^7 + k_6\kappa^6 + k_5\kappa^5 + k_4\kappa^4 + k_3\kappa^3 + k_2\kappa^2 + k_1\kappa + k_0 = 0. \quad (4.12)$$

Če velja, da je diskriminanta (4.12) pri $\kappa = 1$ večja od nič, ima polinom dve realni in dve kompleksni rešitvi. V tem primeru ploščad ne pride izven gibalnega območja, zato njene hitrosti ne omejujemo. Parabola gibanja ploščadi se "obrne" znotraj kroga. V primeru, da je diskriminanta (4.12) pri $\kappa = 1$ manjša od nič, ima polinom štiri realne ničle. V tem primeru je hitrost ploščadi prevelika, saj bo prišla izven gibalnega območja. Parabola seka krožnico. V tem primeru je potrebno hitrost ploščadi omejiti na vrednost κv_p do te mere, da se bo ploščad ravno dotaknila roba krožnice gibalnega območja. Določiti je potrebno takšno

vrednost κ , da je diskriminanta točno enaka nič. Iščemo torej ničlo polinoma 7. reda (4.12), katere ni možno določiti analitično. Ker je hitrost ploščadi zvezna, je vrednost κ pri omejevanju vedno malo manjša kot ena in večja od nič, kar upoštevamo pri numeričnem določevanju ničle.

Maksimalni pospešek ploščadi v smeri gibanja (v smeri hitrosti \mathbf{v}) je določen z omejitvami pospeškov ploščadi v obeh smereh premega gibanja.



Slika 4.8: Določitev maksimalnega pospeška

Omejitvi pospeškov v obeh smereh gibanja ploščadi \mathbf{a}_{max_x} in \mathbf{a}_{max_y} določata pravokotnik, ki ga vidimo na sliki 4.8. Maksimalen pospešek v določeni smeri je določen s pravokotnikom. Na sliki sta prikazana dva različna primera \mathbf{v}_1 in \mathbf{v}_2 . V odvisnosti od smeri hitrosti določimo največji pospešek v isti smeri, ki je znotraj pravokotnika. Računsko določimo maksimalen pospešek s sledečo enačbo

$$a_{max} = \min\left(\mathbf{a}_{max_x} \frac{v_x}{|\mathbf{v}|}, \mathbf{a}_{max_y} \frac{v_y}{|\mathbf{v}|}\right) = \begin{bmatrix} a_{p_x} \\ a_{p_y} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Opisani postopek določitve maksimalne hitrosti gibanja ploščadi znotraj gibalnega območja omejuje hitrost gibanja ploščadi že preden pride do roba gibalnega območja. S tem preprečimo pogrešek v prostoru naloge in singularnost manipulatorja. Pri tem smo vpeljali nekaj predpostavk. Predpostavili smo, da se hitrost gibanja vrha ne spreminja. V primeru, da se hitrost spremeni, je lahko hitrost ploščadi prevelika in ne zagotavlja več ustavljanja znotraj gibalnega območja. Zanemarili smo tudi rotacijo ploščadi. V praksi lahko obe poenostavitvi rešimo tako, da zmanjšamo velikost gibalnega območja in si s tem zagotovimo rezervo,

ki zagotavlja ustavljanje tudi v teh primerih. Opisani postopek je specifičen za sistem mobilnega manipulatorja, ki smo ga uporabili v delu. Kljub temu pa ga lahko enostavno prilagodimo tudi za druge vrste mobilnih manipulatorjev.

4.5 Orodje za delo z mobilnimi manipulatorji

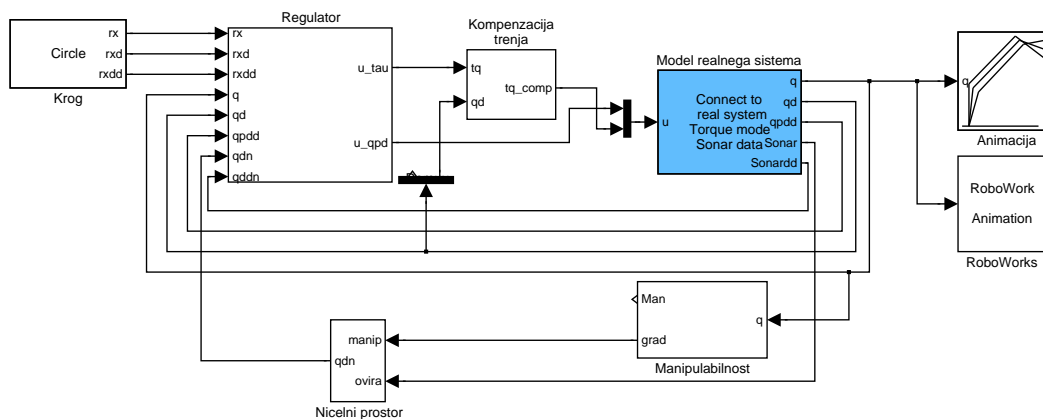
V fazi testiranja in razvijanja algoritmov je nepogrešljiva simulacija sistema. S pomočjo simulacije hitreje in lažje načrtujemo sistem vodenja, analiziramo sistem ter odkrivamo in spoznavamo napake algoritma vodenja. Obstaja več različnih programskih paketov za simulacijo robotskih manipulatorjev. Ti paketi so večinoma splošni in dokaj kompleksni. Razvili smo poseben visoko nivojski programski paket, ki je namenjen samo delu z mobilnimi manipulatorji. Temelji na paketu, namenjenemu planarnim manipulatorjem [43]. Predviden je za delo v okolju Matlab in Matlab Simulink, kjer imamo na voljo veliko podporo drugih orodij, ki jih potrebujemo pri sintezi in analizi sistemov vodenja. To so npr. orodja za delo v realnem času, optimizacijo, grafično predstavitev...

Programski paket je namenjen planarnim mobilnim manipulatorjem. Je splošen, saj struktura sistema ni podana vnaprej, ampak jo uporabnik preko parametrov poda sam. Paket omogoča določitev kinematičnega modela manipulatorja. Omogoča določitev dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi, kjer upošteva gravitacijske, Coriolisove in centrifugalne ter vztrajnostne člene. Modeli temeljijo na enačbah podanih v 2. poglavju.

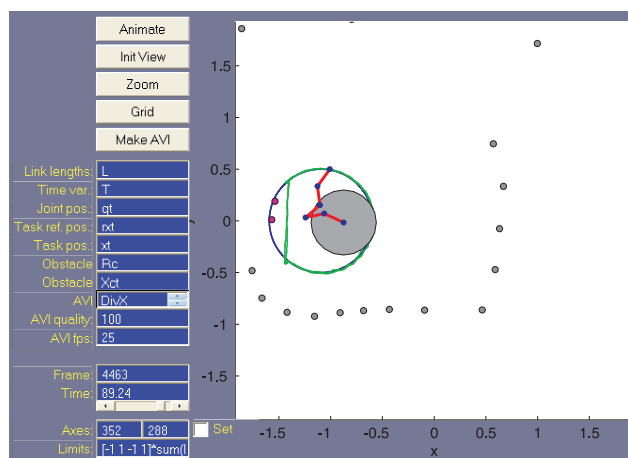
Paket omogoča grafično predstavitev gibanja mobilnega manipulatorja med ali po koncu simulacije s prikazom ovir v okolici ploščadi. Predstavitev je možna v okviru Matlab ali v okolju Roboworks, ki je namenjeno 3D grafični predstavitvi. Paket vključuje tudi več drugih blokov, ki so potrebni pri vodenju. To so npr. PID regulator, regulator v ničelnem prostoru, model trenja, izračun manipulabilnosti, bloke za povezavo z realnim sistemom itd.

Slika 4.9 kaže primer sistema vodenja načrtanega v okolju Matlab. Celotno shemo sestavlja majhno število medsebojno povezanih blokov (npr. model, regulator itd.), ki vsebujejo bolj kompleksne elemente. Slika 4.10 prikazuje grafično predstavitev v Matlabu. Prikazane so tudi ovire. Možen je prikaz drugih veličin npr. referenčne in dejanske trajektorije gibanja, navideznih hitrosti, hitrosti v

ničelnem prostoru, ... Gibanje po korakih in opazovanje sistema v posameznih trenutkih in izdelava filmov gibanja sta prav tako vgrajeni funkciji. Slika 4.11 pa prikazuje mobilni manipulator prikazan v okolju Roboworks.



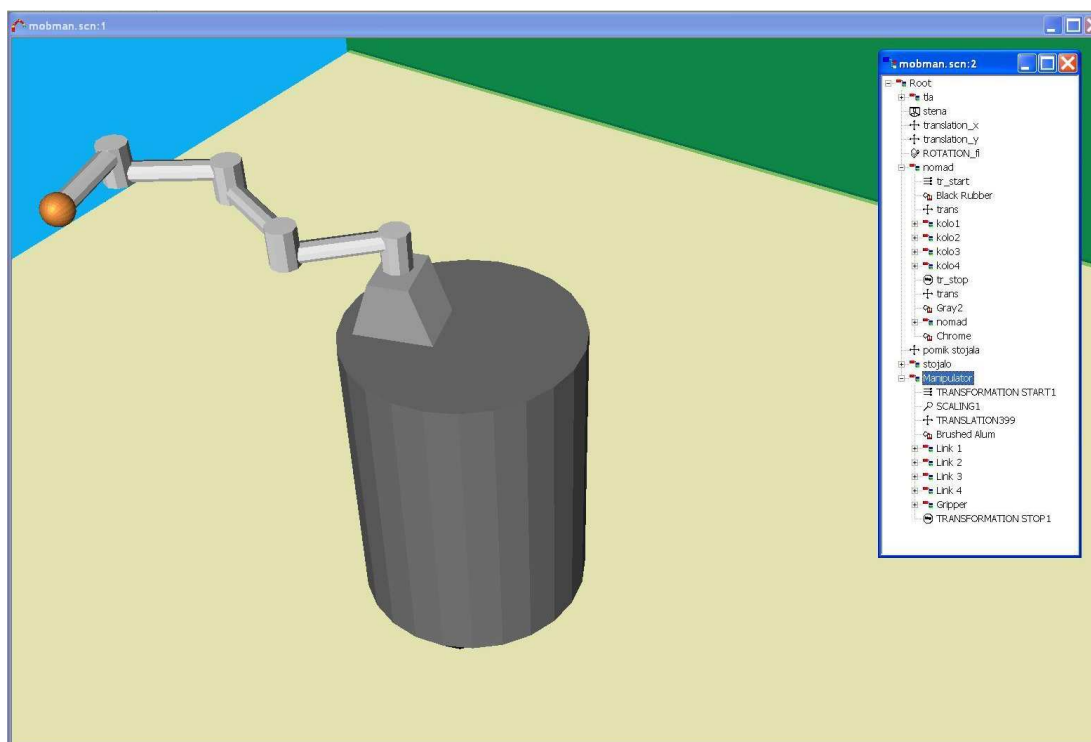
Slika 4.9: Primer uporabe orodja v Matlab Simulinku



Slika 4.10: Prikaz grafične predstavitve mobilnega manipulatorja v prostoru z ovirami

4.6 Povezava sistemov

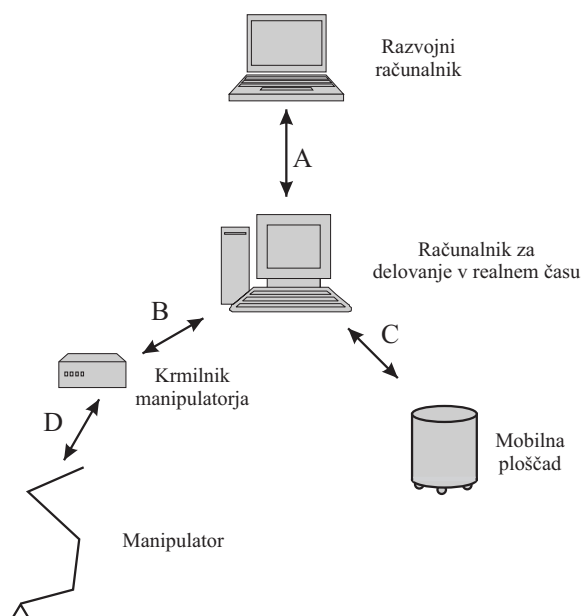
V sklopu mobilnega manipulatorja nastopata dva povsem ločena podsistema. Pošiljanje ukazov za vodenje ter branje konfiguracij se pri obeh sistemih razlikuje.



Slika 4.11: Prikaz mobilnega manipulatorja v okolju Roboworks

Potrebno je bilo razviti sistem, ki je sposoben vodenja obeh podsistemov in ki lahko deluje v realnem času. Delovanje v realnem času je pri realnih sistemih mnogokrat ključnega pomena in močno vpliva na stabilnost sistema. Običajno se zahteva tudi visoka frekvenca vzorčenja, saj ima nizka frekvenca negativen vpliv na obnašanje sistema. Zaradi tega je potrebno, da algoritem poteka v realnem času z zadostno frekvenco vzorčenja. To je možno doseči na več načinov. Mnogi raziskovalci za ta namen uporabljajo posebne operacijske sisteme, ki delujejo v realnem času. To so npr. Real Time Linux, QNX, EYRX, SMX in mnogi drugi. Uporabljajo se pa tudi namensko razviti operacijski sistemi. Slabost pri večini teh sistemov je predvsem neprenosljivost med različnimi sistemi in pa dolgotrajnost razvoja. Mnogokrat je potrebno algoritem zapisati v enem od nižje-nivojskih programskih jezikov (npr. C). To pa povečuje možnost napake in podaljša čas testiranja.

Struktura vodenja, ki smo jo uporabili v našem delu, je prikazana na sliki 4.12. Vodenje poteka na več hierarhičnih nivojih. Na najvišjem nivoju poteka razvoj in testiranje regulacijskih algoritmov. Na drugem nivoju poteka izvajanje razvitega



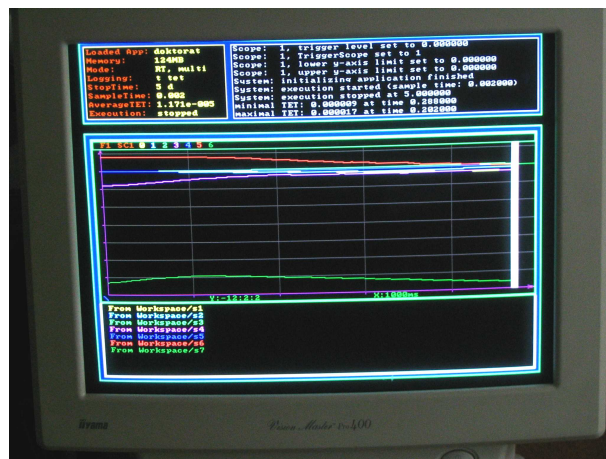
Slika 4.12: Prikaz strojne povezave

algoritma v realnem času. Na tretjem nivoju pa se izvaja lokalna regulacija na manipulatorju ter ploščadi.

Najvišji nivo - razvoj in testiranje algoritmov poteka na osebni računalniku v okolju Matlab Simulink z uporabo paketa za delo z mobilnimi manipulatorji. Razvoj in testiranje algoritmov je v takšnem okolju hitro in enostavno. Na tem nivoju opravimo tudi vsa testiranja algoritmov z uporabo simulacije. Celotni sistem deluje v okolju Windows, kjer so orodja večinoma grafična in zaradi tega uporabniku prijaznejša. Žal s takšnimi operacijskimi sistemi ne moremo zagotoviti delovanja algoritmov v realnem času z zadostno frekvenco vzorčenja. Ko dosežemo zadovoljive rezultate, je potrebno algoritem prenesti na drug računalnik, ki deluje v realnem času (drugi hierarhični nivo). Ta prenos se izvede preko povezave A, ki je izvedena z ethernet povezavo. Pred prenosom algoritmov je le potrebno v Matlab Simulinku zamenjati blok, ki predstavlja model sistema z blokom, ki predstavlja povezavo z realnim sistemom.

Na drugem hierarhičnem nivoju se nahaja računalnik, ki izvaja algoritme v realnem času. Na tem računalniku teče operacijski sistem xPC Target, ki ga je razvil Matlab (slika 4.13). Sistem xPC Target smo izbrali zato, ker je namenjen razvoju prototipnih aplikacij in omogoča delovanje v realnem času. Prednost tega

okolja pred ostalimi je v tem, da omogoča razvoj algoritmov v Matlab-Simulinku in direktni prenos prevedenih programov na povsem ločen računalnik, kjer poteka delovanje v realnem času. Prevedeni program se iz razvojnega računalnika prenese v računalnik za delovanje v realnem času. Prenos je izveden preko računalniške mreže, tako da je ta postopek hiter in enostaven, ter omogoča razvoj tudi na daljavo.



Slika 4.13: Slika na monitorju računalnika z xPC target operacijskim sistemom

Operacijski sistem xPC target je zelo preprost. Vsebuje le orodja za komunikacijo z razvojnimi računalnikom in enostavnejši izris signalov ter nekaj preprostejših ukazov, s katerimi zaganjamo in ustavljamo simulacijo ter spreminjamo parametre. Zaradi enostavnosti operacijski sistem ne troši veliko računalniškega časa in zagotavlja delovanje v realnem času z visoko frekvenco vzorčenja. V našem primeru algoritem poteka s frekvenco 500 Hz, na računalniku Pentium II, 400 MHz. Frekvenca vzorčenja je dovolj ponovljiva, saj znaša od cca. 495 Hz do 505 Hz, kar predstavlja le 1 % odmik in ne vpliva pomembno na obnašanje sistema. Ta računalnik pošilja izračunane regulirne signale manipulatorju ter ploščadi. Komunikacija z manipulatorjem poteka preko namenskih kartic nameščenih v računalniku (povezava B), ki omogočajo določanje krmilnih veličin manipulatorja in branje pozicij ter hitrosti v sklepih. Komunikacija s ploščadjo pa poteka preko serijske povezave (povezava C).

Tretji hierarhični nivo obravnava lokalno regulacijo manipulatorja ter ploščadi. Manipulator vsebuje štiri ločene motorske krmilnike za vsak sklep ločeno. Za vsak posamezen sklep si lahko izberemo dva načina vodenja. To sta hitro-

stni ali navorni način. Referenčno veličino manipulatorja (hitrost oz. navor) določa osebni računalnik, ki je predstavljen na drugem nivoju. Mobilna ploščad vsebuje hitrostni regulator, ki določa hitrosti posameznih koles in njihove orientacije. Uporabnik nima direktnega dostopa do posameznega kolesa, ampak določi zeleno hitrost in smer celotne ploščadi. Uporabnik dostopa tudi do podatkov o poziciji ter orientaciji ploščadi v globalno določenem koordinatnem sistemu. Ta informacija je določena z merjenjem pomikov vseh štirih koles.

Dejanska postavitve sistema v laboratoriju je prikazana na sliki 4.14.



Slika 4.14: Prikaz dejanske postavitve sistema

5. Rezultati in ovrednotenje dela

V tem poglavju smo primerjali kombinirani način vodenja s hitrostnim in navornim načinom vodenja. To primerjavo smo izvedli samo s pomočjo simulacije, saj navornega načina nismo mogli realizirati na realnem sistemu. Simulacijo smo izvajali s pomočjo orodja za delo z mobilnimi manipulatorji, ki smo ga razvili v ta namen. V nadaljevanju poglavja smo podali rezultate implementacije na realnem sistemu. Pri tem smo izpostavili sledenje primarni nalogi, izogibanje oviram ter odziv sistema na silo na vrhu ter v prostoru naloge. Podali smo še primerjavo z drugim načinom kombiniranega vodenja, ki ga je predlagal Oetomo [21].

Primerjava med regulatorjem za vodenje pospeškov, na katerem je osnovan naš način kombiniranega vodenja, ter drugimi načini dinamičnega vodenja (npr. impedančno in hibridno vodenje) je bila podana v literaturi [38], zato je nismo opravili.

5.1 Primerjava med hitrostnim, navornim in kombiniranim načinom vodenja

Primerjali smo tri načine vodenja. Prvi način je hitrostni, kjer je celoten sistem voden hitrostno. Regulator je podan s sledečo enačbo

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}^\# (\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \mathbf{N}\dot{\varphi}. \quad (5.1)$$

V tem primeru vsako stopnjo robota ločeno vodi lokalni PID regulator z optimiziranimi parametri. Regulator določa navor motorja, ki zagotavlja sledenje željeni sklepni hitrosti, kadar ni zunanjih motenj. Gibanje robota v posameznih sklepih vpliva na gibanje drugih sklepov. Te medsebojne vplive hitrostni regulator obravnava kot motnje, torej jih ne kompenzira. Drugi način, ki smo ga primerjali, je kombinirani način, ki smo ga predlagali v disertaciji. V tem primeru vodenje

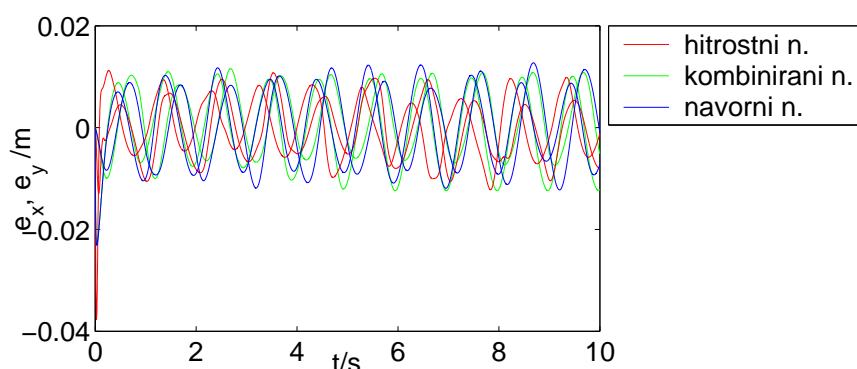
kompenzira vplive gibanja manipulatorja ter vplive gibanja ploščadi na manipulator, obratno pa ne. Tretji način je popolno navorni [42, 29] in je podan z enačbo

$$\tau_c = \hat{\mathbf{H}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_c + \hat{\mathbf{C}}(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}). \quad (5.2)$$

V tem primeru vplivamo na vse navore v sistemu. Ta način vodenja kompenzira vse medsebojne vplive med sistemoma. Parametri regulatorjev so bili pri vseh treh načinih optimalni. Določeni so bili tako, da je imel sistem enake lastnosti pri sledenju določeni trajektoriji (glej naslednje poglavje).

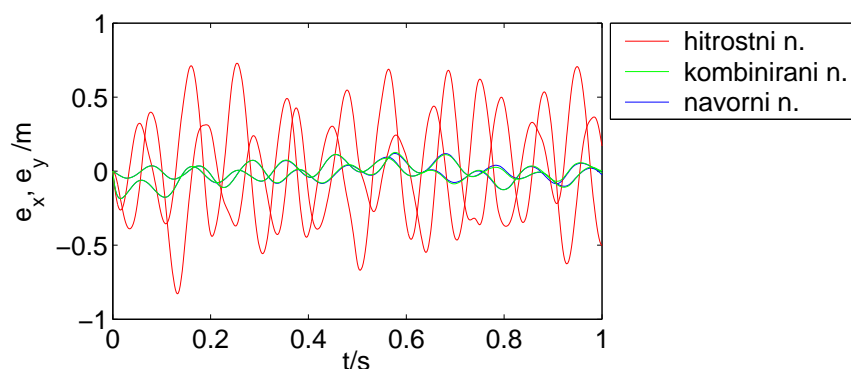
5.1.1 Sledenje trajektoriji

Najprej smo primerjali sledenje trajektoriji vrha. Trajektorijo smo podali kot krožnico z radijem 1 m. Izbrali smo dva različna primera. V prvem primeru je gibanje dokaj počasno, perioda traja 1 s (slika 5.1). V drugem primeru je gibanje hitrejše, perioda traja 0,1 s (slika 5.2).



Slika 5.1: Pogrešek v prostoru naloge pri gibanju po krožnici s periodo 1 s

Sliki prikazujeta pogreške vseh treh načinov vodenja v prostoru naloge. V počasnejšem primeru so pogreški vseh treh načinov v približno istem velikostnem razredu, kar smo dosegli s primerno izbiro parametrov regulatorja. Gibanje je počasno, medsebojni vplivi med posameznimi stopnjami so majhni. Lokalni hitrostni regulatorji zadovoljivo odpravljajo motnje. V drugem primeru je gibanje hitrejše, zato so dinamični vplivi med stopnjami mnogo večji. Zaradi tega je pri hitrostnem gibanju pogrešek mnogo večji, saj to vodenje ne kompenzira medsebojnih vplivov. Rezultati so mnogo boljši pri kombiniranem in navornem vodenju,



Slika 5.2: Pogrešek v prostoru naloge pri gibanju po krožnici s periodo 0,1 s

ki kompenzirata večino teh sklopitev. Pogreški teh dveh načinov so v enakem velikostnem razredu.

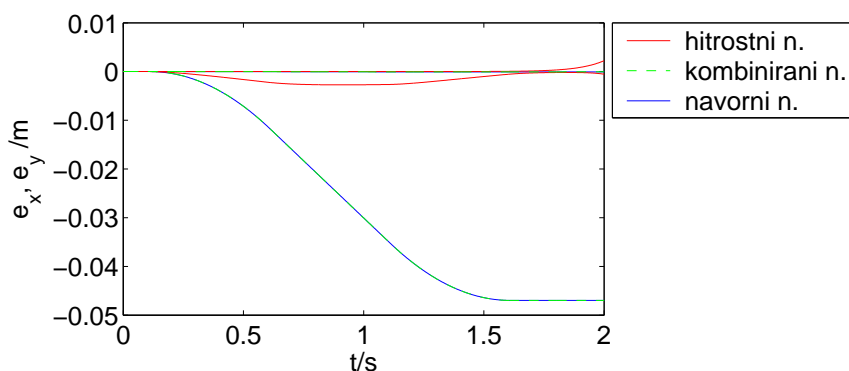
5.1.2 Sila na vrhu manipulatorja

Raziskali smo obnašanje mobilnega manipulatorja pri dotiku vrha z okoljem. Noben izmed načinov ne regulira sile direktno in ne vključuje senzorja sile, s katerim bi zaznali silo na vrhu manipulatorja in v odvisnosti od te vplivali na vodenje. Zunanja sila pri vseh načinih nastopa kot motnja v sistem.

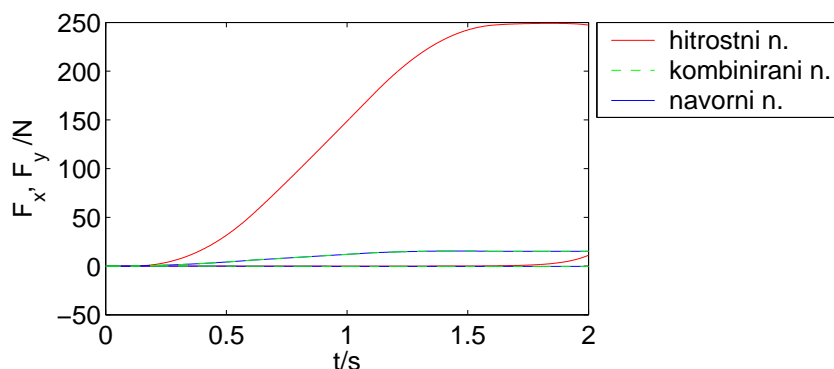
Zunanja sila na vrhu mobilnega manipulatorja nastopi pri dotiku vrha z okoljem. Do dotika lahko pride, kadar je referenca gibanja znotraj predmeta v okolju. Robot skuša slediti referenci, ki je v tem primeru v notranjost predmeta, pri tem pa nastanejo sile kot posledica togosti predmeta. V našem primeru smo izbrali togost predmeta 5000 N/m. Kot referenca je izbran pomik za 5 cm v x smeri v notranjost predmeta pod pravim kotom. Sliki prikazujeta pogrešek v prostoru naloge (slika 5.3) ter silo na vrhu mobilnega manipulatorja (slika 5.4).

Hitroštno voden sistem je običajno zelo tog. To kažejo tudi rezultati, saj je pogrešek majhen, posledično pa je sila zelo velika. Togost sistema je odvisna od internih hitroštnih sklepni regulatorjev, ki imajo običajno visoko ojačenje, s katerim dosežemo dobro sledenje kljub zunanjim motnjam.

V primeru navorno vodenega sistema sila na vrhu povzroči navore v sklepih mobilnega manipulatorja. Če utež v posplošenem inverzu ni enaka vztrajnostni matriki mobilnega manipulatorja, sistem ni dinamično konsistenten. Posledica



Slika 5.3: Pogrešek v prostoru naloge



Slika 5.4: Sila na vrh mobilnega manipulatorja

tega je, da sila povzroči tudi pospeške v ničelnem prostoru in s tem gibanje v ničelnem prostoru. To vodi do spremembe konfiguracije. Gibanje v ničelnem prostoru premika ploščad v smer proti sili, posledično se manipulator izteguje in pride do singularne konfiguracije. Zaradi tega je potrebno, da je inverz utežen z matriko vztrajnostnih momentov mobilnega manipulatorja. V tem primeru je sistem dinamično konsistenten in sila na vrhu ne povzroča pospeškov v ničelnem prostoru. Kljub zunanji sili ni lastnega gibanja mobilnega manipulatorja. Sklepni navori regulatorja se ravno kompenzirajo z navori, ki jih povzroči zunanja sila.

Odziv sistema na zunanjo silo na vrhu pri dinamično konsistentnem sistemu je prikazan na slikah 5.3 in 5.4. Sila na vrhu je mnogo manjša kot v primeru hitrostno vodenega sistema in je odvisna od parametrov regulatorja, ki jih sami nastavljamo. Pogrešek sledenja je v tem primeru večji, saj na predmet delujemo z manjšo silo in ga manj deformiramo.

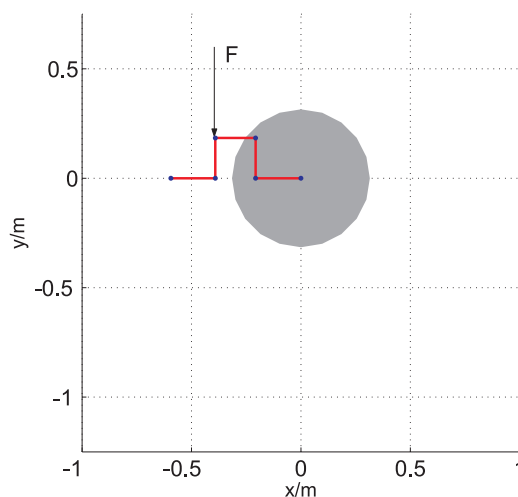
V primeru kombinirano vodenega sistema so odzivi praktično enaki kot v primeru navorno vodenega. V tem primeru dinamične konsistence ne moremo zagotoviti (poglavje 3.2.2), se pa z utežjo, ki je enaka vztrajnostni matriki, lahko zelo približamo dinamično konsistentnemu obnašanju. Lastno gibanje kot posledica zunanje sile je zaradi velike mase ploščadi majhno in je opazno šele po daljšem času.

V primeru, da bi potrebovali natančno vodenje sile na vrhu, bi morali uporabiti impedančno ali hibridno vodenje. Z razvitim algoritmom kombiniranega vodenja bi lahko natančno regulacijo sile dosegli s spremenljivimi parametri regulatorja (poglavje 3.2.2).

5.1.3 Sila na segmente mobilnega manipulatorja

Sila na manipulator

Na koncu drugega segmenta manipulatorja smo povzročili silo 10 N kot kaže slika 5.5. Slika prikazuje tlorisni pogled na konfiguracijo mobilnega manipulatorja. Krog predstavlja ploščad, na njej se nahaja manipulator, ponazorjen z rdečo barvo.



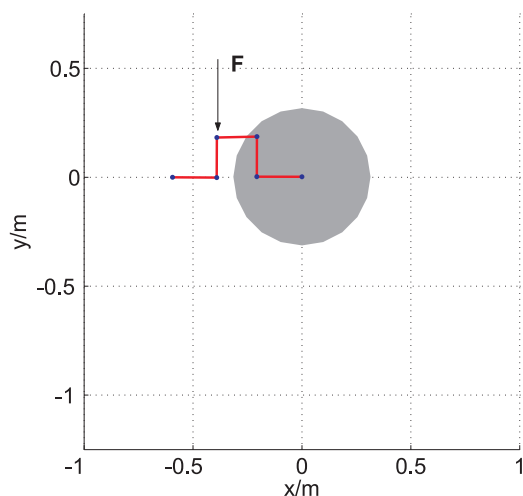
Slika 5.5: Prikaz mesta pritiska sile na manipulator

Pri hitrotno vodenem sistemu sila ni povzročila opaznejše spremembe konfiguracije (slika 5.6) niti pogreška v prostoru naloge (slika 5.9). Sistem je tog

na zunanjo silo, ne glede na to, ali ta nastopa v ničelnem prostoru ali prostoru naloge. Interni hitrostni regulatorji odpravijo zunanje motnje.

V primeru kombinirano vodenega sistema je sila povzročila odmik manipulatorja v smeri stran od sile (slika 5.7 a). Pri tem je prišlo do pogreška v prostoru naloge (slika 5.9), ki je povzročil rahel premik ploščadi v smeri proti sili z namenom odpravljanja pogreška. To se bolje vidi na sliki 5.7 b, ki prikazuje konfiguracijo po 100 s delovanja sile. V tem času manipulator ni več podajen na zunanjo silo zaradi singularne konfiguracije manipulatorja med prijemališčem sile in ploščadjo.

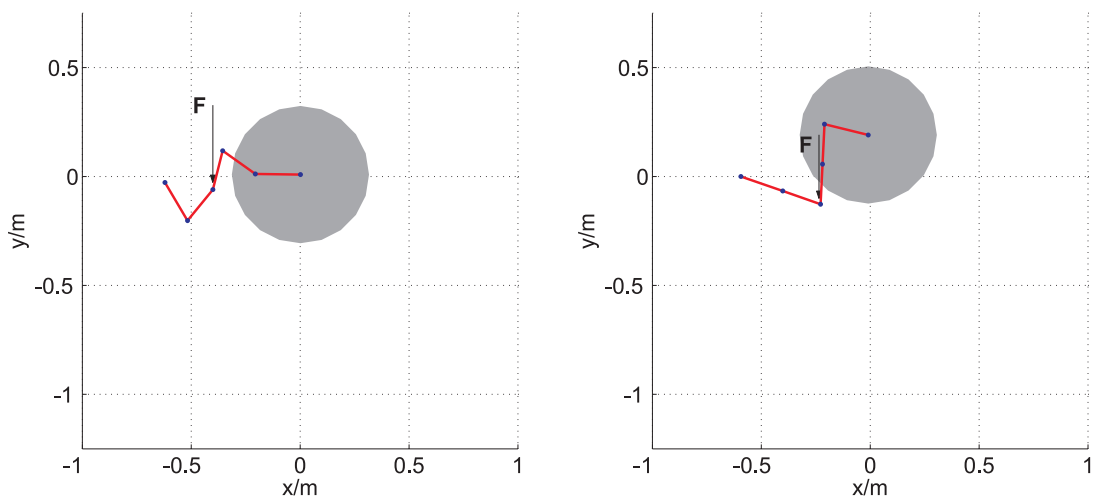
Najboljše delovanje dosežemo z navorno vodenim sistemom. V tem primeru sila povzroči odmik celotnega sistema (tudi ploščadi) v smeri stran od sile (slika 5.8). Pogrešek v prostoru naloge (slika 5.9) je približno enak v primeru navornega in kombiniranega načina. Pogrešek je odvisen od velikosti sile in od trenutne konfiguracije mobilnega manipulatorja (poglavje 3.2.2).



Slika 5.6: Prikaz spremenjene konfiguracije po 2 s delovanja sile za sistem voden s hitrostnim načinom

Sila na ploščad

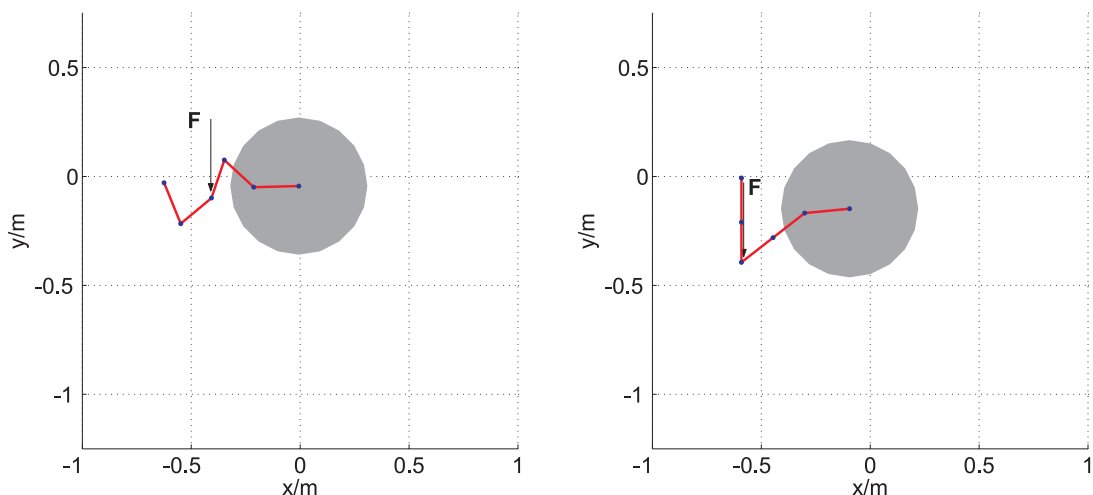
Povzročili smo silo 10 N na ploščad, kot kaže slika 5.10. V tem primeru opazimo največjo slabost kombinirano vodenega sistema. Odziva hitrostno vodenega sistema in kombinirano vodenega sistema sta popolnoma enaka, saj gre v obeh



a) Po 2 sekundah delovanja sile

b) Po 100 sekundah delovanja sile

Slika 5.7: Prikaz spremenjene konfiguracije po delovanju sile za sistem voden s kombiniranim načinom



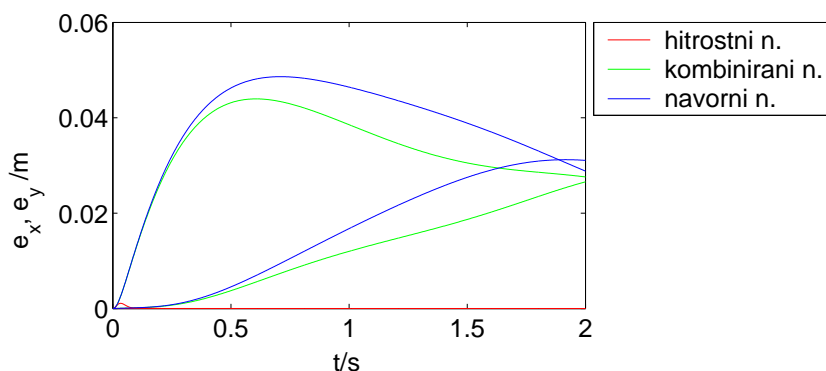
a) Po 2 sekundah delovanja sile

b) Po 100 sekundah delovanja sile

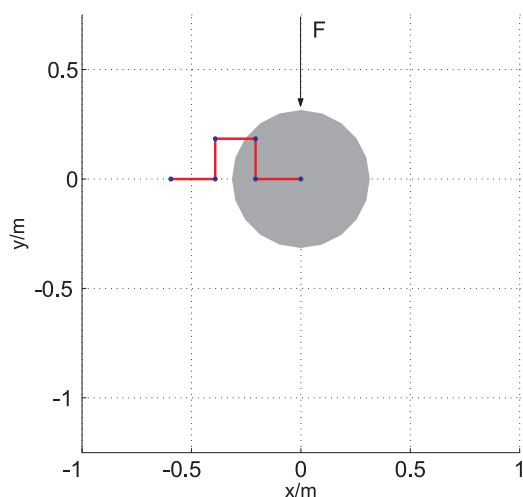
Slika 5.8: Prikaz spremenjene konfiguracije po delovanju sile za sistem voden z navornim načinom

primerih za enak regulator v ploščadi. Sila v obeh primerih povzroči zanemarljivo spremembo konfiguracije (slika 5.6). Ploščad se sili ne odmika, saj je vodena hitrotno, vgrajeni regulator pa kompenzira zunanjo silo. Tudi pogrešek v prostoru naloge je zanemarljiv (slika 5.12).

V primeru navorno vodenega sistema se ploščad odmika v smeri sile. Odmik je manjši kot v primeru, ko je sila delovala na manipulator, saj je masa ploščadi



Slika 5.9: Pogrešek v prostoru naloge

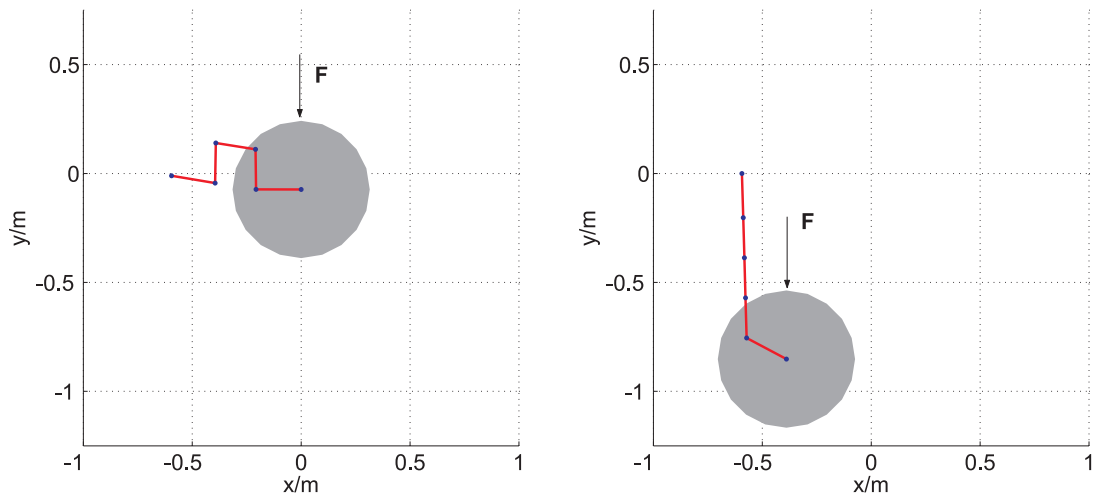


Slika 5.10: Prikaz mesta pritiska sile na ploščad

večja in je potrebna večja sila oziroma daljši čas za enak odmik. Sila povzroči tudi pogrešek v prostoru naloge (slika 5.12).

5.2 Analiza odziva na realnem sistemu

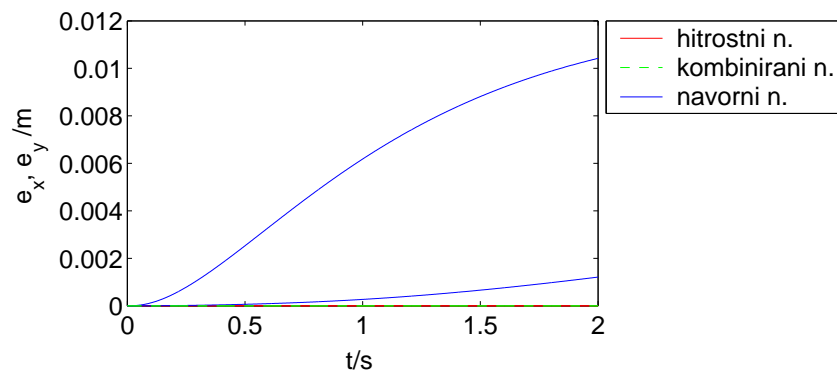
Predstavljeni način kombiniranega vodenja smo realizirali na realnem sistemu mobilnega manipulatorja. Parametre regulatorja smo določili empirično ob upoštevanju priporočil, podanih v poglavju 3.2. \mathbf{K}_p in \mathbf{K}_d smo izbrali tako, da je odziv nadkritično dušen, pri čemer vrh manipulatorja zadovoljivo sledi trajektoriji, sistem pa je pri zunanji sili na vrhu podajen. Vrednost parametra \mathbf{K}_n smo izbrali čim nižje zaradi želje po visoki podajnosti v ničelnem prostoru, zadovoljiti



a) Po 2 sekundah delovanja sile

b) Po 100 sekundah delovanja sile

Slika 5.11: Prikaz spremenjene konfiguracije po delovanja sile za sistem voden z navornim načinom, sila deluje na ploščad



Slika 5.12: Pogrešek v prostoru naloge

pa mora pogoju za stabilnost. Vrednosti so sledeče: $\mathbf{K}_p = 1000$, $\mathbf{K}_d = 160$ in $\mathbf{K}_n = 1$.

Za ovrednotenje rezultatov smo izbrali funkcijo povprečja integrala absolutnega pogreška (angl. Average Integral Absolute Error)

$$AIAE = \frac{1}{t_{final}} \int_0^{t_{final}} \sqrt{e_x^2 + e_y^2} dt, \quad (5.3)$$

kjer t_{final} predstavlja končni čas meritve, e_x in e_y pa sta pogreška v x in y smeri.

5.2.1 Model trenja

Za boljše delovanje sistema smo kompenzirali trenje v sklepih manipulatorja. Uporabili smo model trenja, ki vključuje lepenje, statično trenje ter viskozno trenje (slika 5.13).

Model viskoznega trenja je najenostavnejši. Navor viskoznega trenja τ_v je

$$\tau_v = k_v \dot{q},$$

pri čemer je k_v konstanta viskoznega trenja, \dot{q} pa hitrost v sklepu.

Viskozniemu trenju dodamo še statično komponento trenja τ_s , ki je neodvisna od amplitude hitrosti. Je konstantna, smer pa je odvisna od smeri hitrosti

$$\tau_s = k_s \text{sign}(\dot{q}),$$

pri čemer k_s predstavlja velikost statičnega trenja.

Kadar je sklep v mirujočem stanju, sta statična in dinamična komponenta trenja enaki nič. V tem primeru nastopa le lepenje. Navor lepenja nasprotuje gibanju v sklepu. Dokler sistem miruje je velikost lepenja τ_l takšna, da je vsota vseh navorov enaka 0. Ker vseh navorov v sklepu ne poznamo in je znan samo regulirni navor v sklepu, določimo model navora lepenja le na osnovi regulirnega navora

$$\tau_l = k_l \text{sign}(\tau),$$

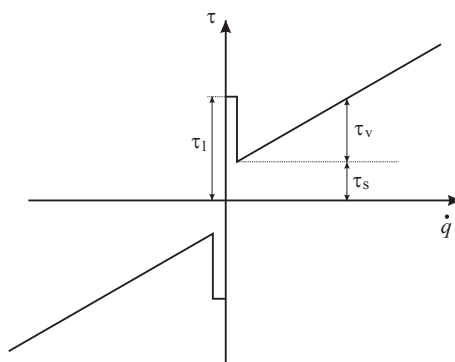
pri čemer je k_l velikost lepenja.

Trenje vedno nasprotuje gibanju, zato moramo za kompenzacijo trenja navorom v sklepu τ prišteti navore modela trenja

$$\tau_{comp} = \tau + \tau_v + \tau_s + \tau_l,$$

pri čemer τ_{comp} predstavlja navor v sklepu skupaj s kompenziranim trenjem.

Trenje moramo kompenzirati v vseh sklepih. Parametre smo določali na realnem sistemu. Parametri se zelo spreminjajo v odvisnosti od kota zasuka sklepa ter od položaja jermenov. Zaradi tega smo parametre določili tako, da je trenje podkompenzirano, saj bi v nasprotnem primeru lahko prišlo do neželenega gibanja manipulatorja, ki bi bilo posledica prekompenzacije trenja.



Slika 5.13: Model trenja

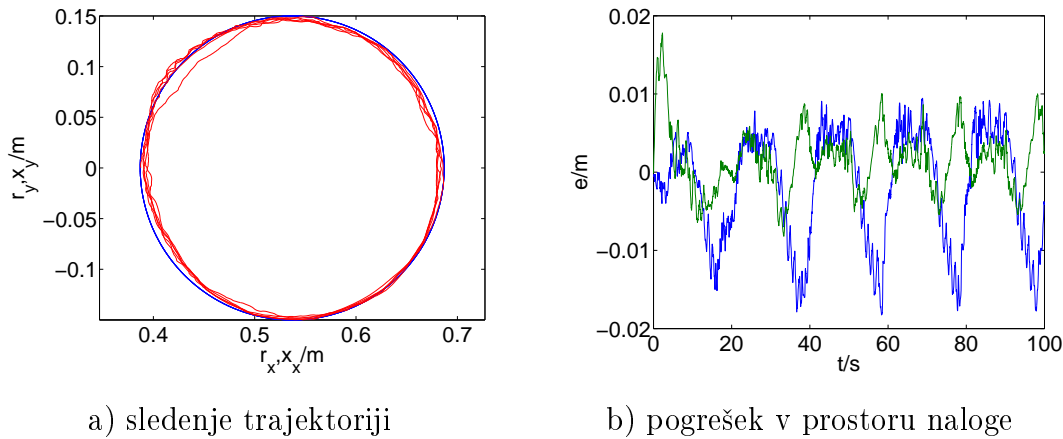
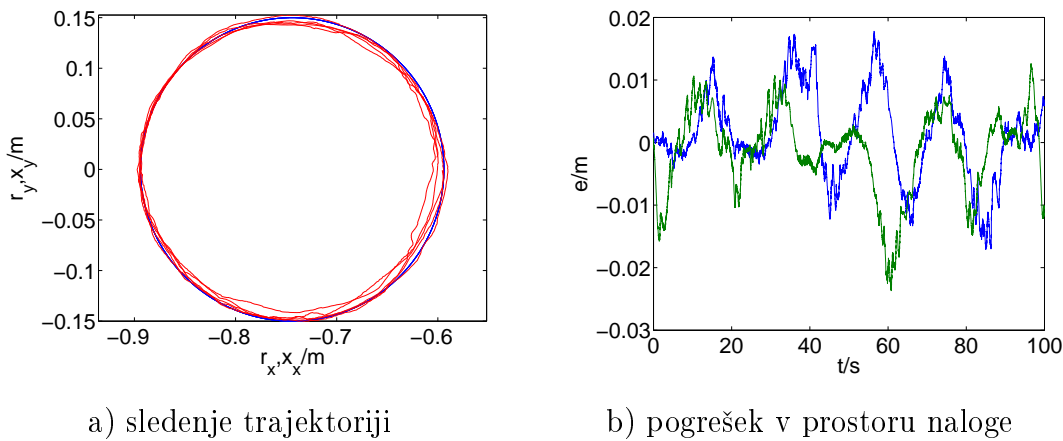
5.2.2 Primerjava med navornim in kombiniranim načinom vodenja za sledenje trajektoriji v prostoru naloge v prostoru brez ovir

Neprimernost hitrostnega načina vodenja za naše potrebe smo podali v predhodnem poglavju. Tako smo v tem poglavju podali primerjavo samo med navornim in kombiniranim načinom vodenja na realnem sistemu. Ker celotnega realnega sistema mobilnega manipulatorja ni možno voditi z navornim načinom, smo podali primerjavo med kombinirano vodenim manipulatorjem na mobilni ploščadi in pa navorno vodenim samostojnim manipulatorjem z nepremično bazo. To primerjavo smo izbrali zato, ker je odziv sistema zelo odvisen od zgradbe manipulatorja. Sam manipulator v veliki meri določa natančnost, podajnost na zunanjo silo itd.

Analizirali smo slednje trajektoriji v obliki krožnice. Pri tem sta izbrana dva različna primera. V prvem primeru sledimo manjši krožnici z radijem 15 cm in periodo 20 s, ki se v celoti nahaja znotraj delovnega prostora manipulatorja. V drugem primeru ima krožnica radij 50 cm in periodo 50 s in se ne nahaja v celoti znotraj delovnega prostora manipulatorja.

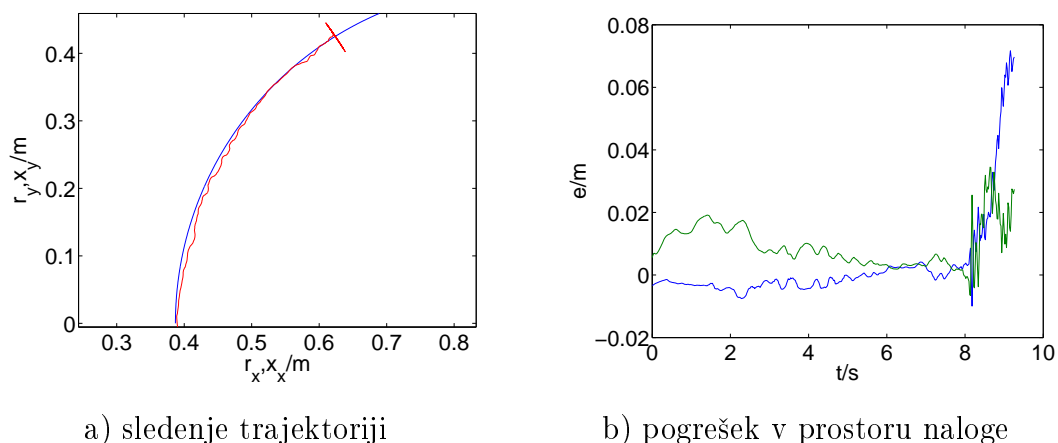
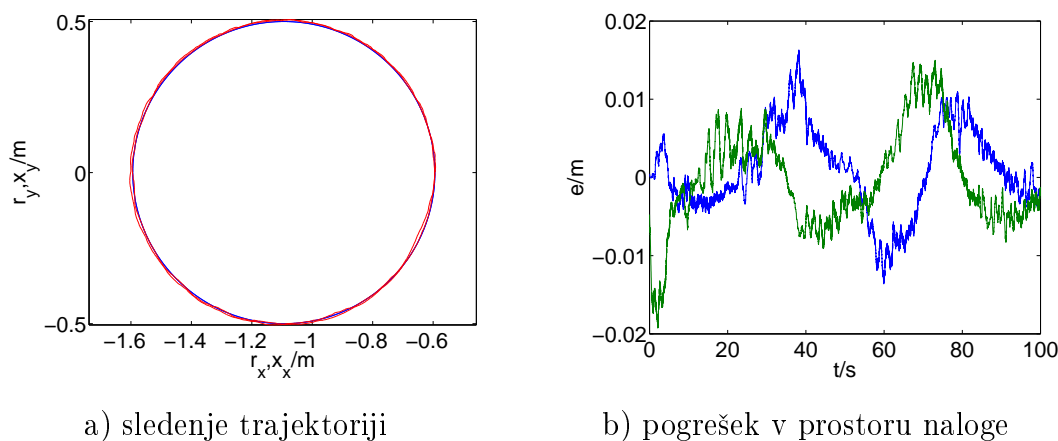
Na sliki 5.14 je prikazan odziv gibanja manipulatorja na manjšo krožnico z radijem 15 cm. Vrh manipulatorja zadovoljivo sledi krožnici s pogreškom $AIAE$, ki znaša 7,5 mm.

Slika 5.15 prikazuje gibanje vrha mobilnega manipulatorja po enaki krožnici. V tem primeru je pogrešek $AIAE$ enak 8,5 mm, kar je v istem velikostnem razredu kot v primeru nemobilnega manipulatorja. Z dodano mobilnostjo se natančnost sistema ni znatneje spremenila.

Slika 5.14: Neovirano gibanje vrha manipulatorja (krožnica $r=15$ cm)Slika 5.15: Neovirano gibanje vrha mobilnega manipulatorja (krožnica $r=15$ cm)

Slika 5.16 prikazuje gibanje vrha nemobilnega manipulatorja po večji krožnici, ki se ne nahaja v celoti znotraj delovnega prostora. Manipulator skuša slediti trajektoriji. Pri tem pride do roba delovnega prostora in do singularne konfiguracije. Od tega trenutka dalje se pogrešek sledenja močno poveča. Zaradi singularne konfiguracije pride do visokih hitrosti in oscilacij v sklepih manipulatorja ter posledično do ustavitve gibanja.

Kot smo pričakovali, z dodano mobilnostjo dosežemo boljše delovanje sistema pri sledenju trajektorije, ki se ne nahaja v celoti znotraj delovnega prostora manipulatorja. Dodana mobilnost sistemu poveča delovni prostor, kar prikazuje slika 5.17. Robot v tem primeru sledi trajektoriji tudi v delu, ki se nahaja izven delovnega prostora samega manipulatorja. Pri tem je pogrešek $AIAE$ v istem velikostnem razredu kot v primeru manjše krožnice in znaša 7,5 mm.

Slika 5.16: Neovirano gibanje vrha manipulatorja (krožnica $r=50$ cm)Slika 5.17: Neovirano gibanje vrha mobilnega manipulatorja (krožnica $r=50$ cm)

5.2.3 Sledenje trajektoriji v prostoru naloge v prostoru z ovirami

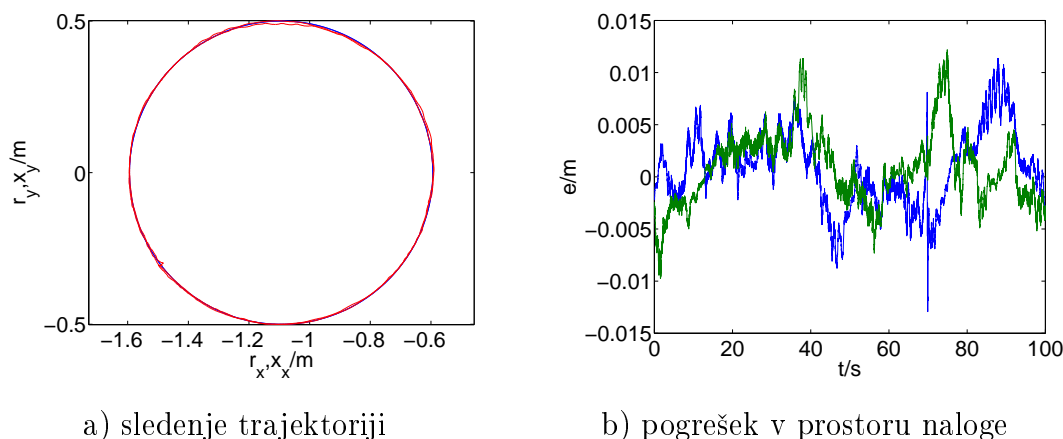
Analizirali smo gibanje mobilnega manipulatorja v prostoru z neznanimi ovirami. V prostoru se ovire nahajajo v okolici ploščadi in v okolici manipulatorja. Prve zaznavamo z ultrazvočnimi senzorji na ploščadi, drugih pa ne moremo zaznavati.

Ovire v okolici ploščadi

Ovire v okolici ploščadi generirajo odbojno hitrost v ničelnem prostoru, ki jo določimo z uporabo enačbe (4.1). Odbojna hitrost povzroči odmik ploščadi od ovir in ne vpliva na prostor naloge. Območje vpliva ovir v našem primeru znaša 40 cm, koeficient odboja pa 0,1. Slika 5.18 prikazuje gibanje vrha mobilnega manipulatorja v prostoru z ovirami. Ploščad se zaradi primarne in sekundarne naloge

(izogibanje oviram) giblje kot je prikazano na sliki 5.19 z zeleno barvo, na sliki modra krožnica označuje referenčno trajektorijo. Gibanje sekundarne naloge, ki ga določajo ovire, se razlikuje od dejanskega gibanja ploščadi, kar je prikazano na sliki 5.20. Zelena barva prikazuje dejansko gibanje ploščadi, modra pa gibanje, ki ga določa sekundarna naloga. Razlog, da sekundarna naloga ni natančno izpolnjena, je v preslikavi v ničelni prostor ter primarna naloga. To razliko lahko zmanjšamo s spremembo sekundarne naloge, tako da bo rezultat po preslikavi takšen, kot bi moral biti. Razliko lahko zmanjšamo tudi s primerno izbiro uteži inverza [49]. V primeru, kadar je sekundarna naloga izogibanje oviram, ni potrebno, da je ta naloga natančno izpolnjena. Zahtevamo le, da se sistem izogiblje oviram, ni pa tako pomembno s kakšno hitrostjo in smerjo.

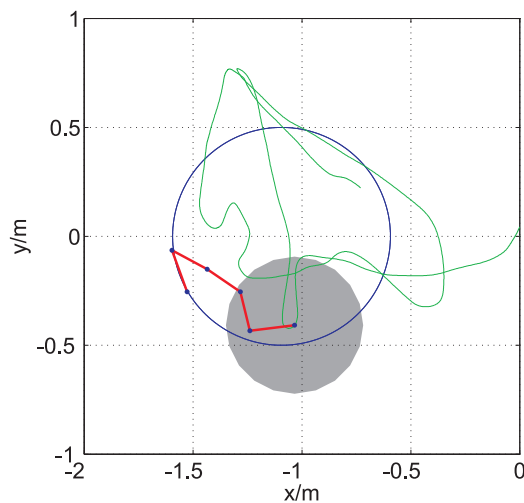
V našem primeru se ploščad uspešno izogiblje oviram. Sekundarna naloga ni imela vpliva na primarno nalogo, kar kaže pogrešek $AIAE$, ki je bil v istem velikostnem razredu in je znašal 9,0 mm.



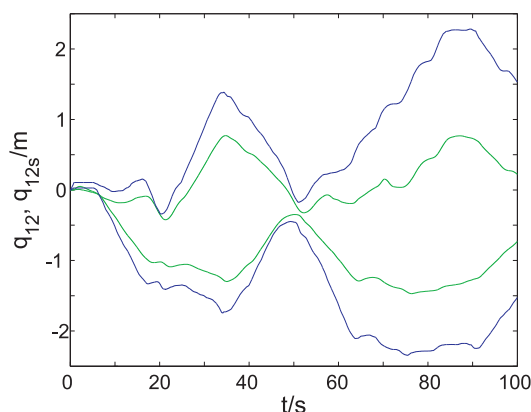
Slika 5.18: Gibanje vrha mobilnega manipulatorja v prostoru z ovirami v okolici ploščadi (krožnica $r=50$ cm)

Ovire v okolici manipulatorja in ploščadi

Gibanje vrha mobilnega manipulatorja v primeru, ko so v okolici ploščadi in manipulatorja ovire, je prikazano na sliki 5.21. Manipulator se odmakne oviri šele po kontaktu z oviro. Gibanje ploščadi zaradi ovir je podobno kot v prejšnjem primeru. Ovire, ki se dotaknejo manipulatorja, vplivajo posredno na gibanje ploščadi. Dotik povzroči pogrešek v prostoru naloge, regulator skuša pogrešek



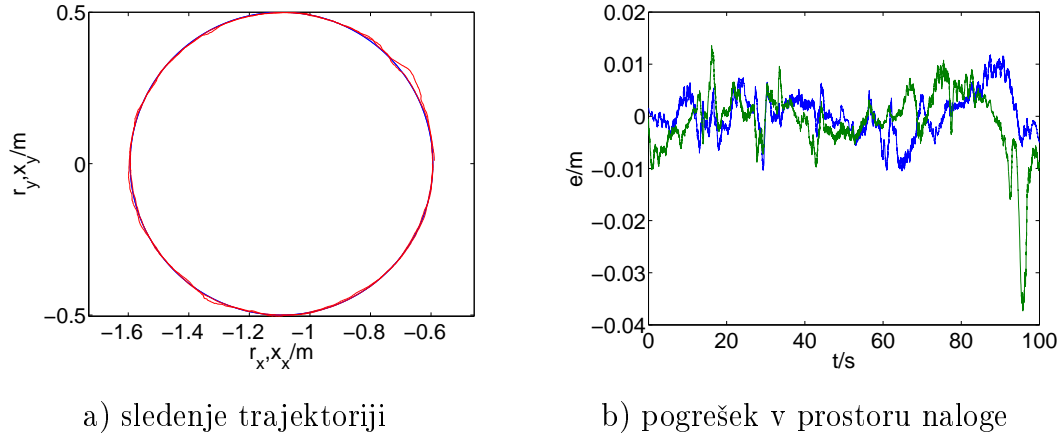
Slika 5.19: Gibanje mobilnega manipulatorja v prostoru z ovirami v okolici ploščadi



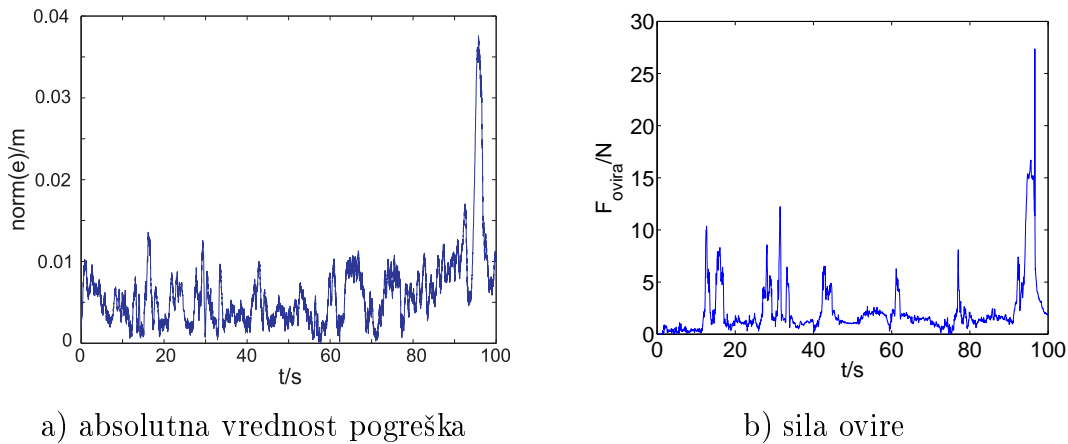
Slika 5.20: Dejansko gibanje ploščadi v prostoru z ovirami in gibanje, ki ga določajo ovire

odpraviti tudi z gibanjem ploščadi. Zaradi visoke podajnosti v ničelnem prostoru in razmeroma visoke togosti v prostoru naloge sila nima velikega vpliva na pogrešek. Pogrešek $AIAE$ je v istem velikostnem razredu in znaša 6,0 mm. Velikost sile ovire na segmente manipulatorja je prikazana na sliki 5.22, kjer je prikazana tudi absolutna vrednost pogreška. S slike lahko opazimo korelacijo med silo in pogreškom. To se najbolj vidi pri času okrog 95 s, kjer je bila sila mnogo večja, posledično tudi pogrešek. Razlog za veliko silo je ta, da je bil del med točko, kjer je delovala sila, in vrhom v singularnosti. V tem primeru se sila direktno prenese na vrh manipulatorja in ima tako večji vpliv na gibanje v prostoru na-

loge [46]. Vpliv sile na prostor naloge je odvisen od konfiguracije in od lastnosti manipulatorja (poglavje 3.2.2).

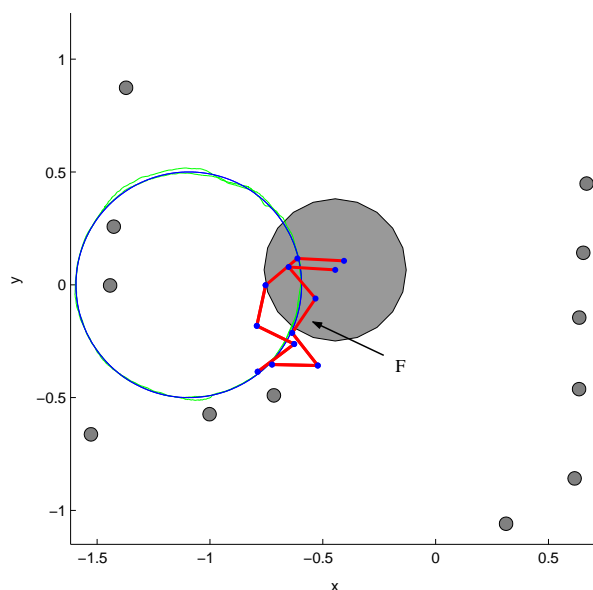


Slika 5.21: Gibanje vrha mobilnega manipulatorja v prostoru z ovirami v okolici ploščadi in manipulatorja (krožnica $r=50$ cm)



Slika 5.22: Pogrešek in sila ovire na manipulator

Slika 5.23 prikazuje tlorisni pogled na konfiguracijo mobilnega manipulatorja pred in po kontaktu z oviro. Manjši črni krogi predstavljajo ovire, ki jih detektiramo z ultrazvočnimi senzorji. Skupina ovir na desni strani, ki so postavljene v ravni črti, predstavlja steno. Nedetektirana ovira v okolici manipulatorja povzroči silo na manipulator. Ovira ni prikazana, smer in položaj sile ovire F pa sta samo približno ocenjena, saj teh veličin ne merimo. Opazimo lahko odmik manipulatorja v smeri stran od sile. Na sliki je prikazana tudi trajektorija gibanja vrha z zeleno barvo.



Slika 5.23: Konfiguracija mobilnega manipulatorja pred in po kontaktu z oviro

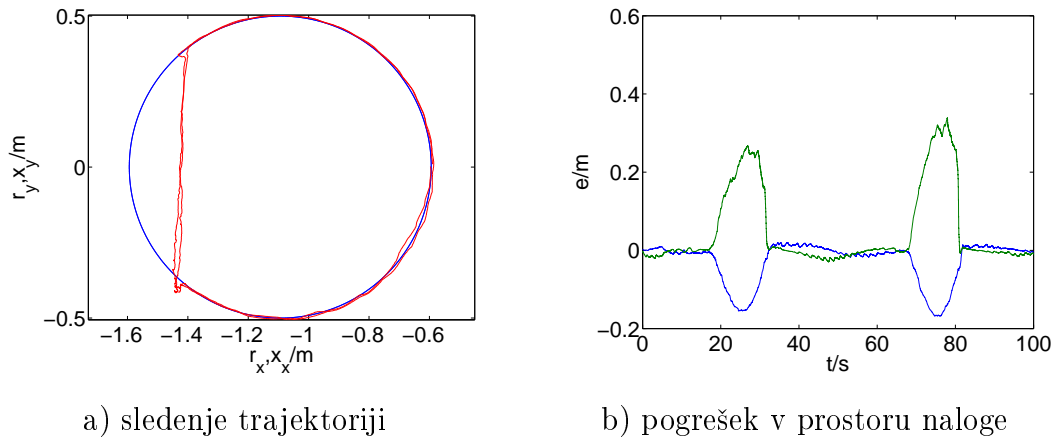
5.2.4 Gibanje v primeru kontakta vrha manipulatorja z okoljem

Do kontakta vrha manipulatorja z okoljem pride, ko se del referenčne trajektorije nahaja znotraj predmeta. Vrh mobilnega manipulatorja sledi trajektoriji do dotika, potem drsi po predmetu in pritiska z določeno silo, nato pa se spet oddalji od predmeta. Na sliki 5.24 je prikazano gibanje vrha, kjer se del referenčne krožnice nahaja znotraj zelo togega predmeta-stene. Stena na sliki ni prikazana, saj ne vemo točne lokacije, vendar pa lahko s slike očitno vidimo, kje se stena nahaja.

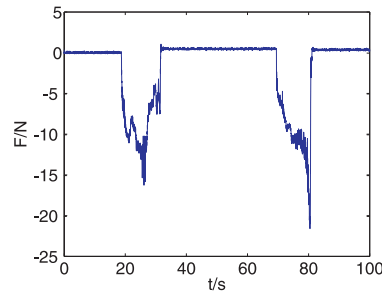
Ob dotiku se pojavi sila, ki je odvisna od pogreška, parametrov regulatorja ter tudi od konfiguracije manipulatorja (poglavje 3.2.2). Velikost normalne komponente sile na steno je prikazana na sliki 5.25. Oblika odziva sile močno korelira s pogreškom. Meritev sile je bila izvedena samo za prikaz in ne za namene regulacije.

5.3 Drugi algoritmi za kombinirano vodenje

Iz literature je znan še en algoritem vodenja, ki združuje hitrostno in navorno vodenje [21]. Opisani pristop temelji na združitvi dveh različnih načinov vodenja,



Slika 5.24: Gibanje vrha mobilnega manipulatorja v kontaktu z okoljem (krožnica $r=50$ cm)



Slika 5.25: Normalna komponenta sile na steno

namenjenim redundantnim robotom. Prvi je navorni, ki ga je predlagal Khatib [55]. Gre za hibridni regulator v zunanjih koordinatah. Drugi pa je hitrostni regulator. Pri opisanem pristopu izračunamo regulirne navori za vse sklepe ter regulirne hitrosti za vse sklepe. Nato se pri ploščadi uporabi le tisti del hitrosti, ki se nanašajo na ploščad, na manipulatorju pa tisti del navorov, ki se nanašajo na manipulator. Zaradi dualnosti med prostoroma hitrosti in navorov algoritem zagotavlja sledenje trajektoriji primarne naloge, pri čemer mora biti posplošeni inverz v obeh regulatorjih utežen z vztrajnostno matriko mobilnega manipulatorja.

Ta algoritem je zmožen sledenja primarni nalogi le v primeru, ko ni sekundarne naloge. V primeru, da podamo tudi sekundarno nalogo, se izkaže, da oba regulatorja med seboj nista skladna. V tem primeru navorni regulator določa drugačne pomike kot hitrostni, kar povzroča pogrešek v prostoru naloge in ničelnem

prostoru. Zaradi tega ta način vodenja ni primeren.

6. Sklep

V delu smo predstavili povsem nov način vodenja robotskega sistema, ki kombinira dva načina vodenja. Robotski sistem, ki ga lahko vodimo z opisanim načinom, je razdeljen v dva podsistema, od katerih enega vodimo z navorom in drugega s hitrostjo. Predstavljeni način vodenja je primeren tudi za redundantne sisteme, pri čemer omogoča izvajanje primarne naloge skupaj s sekundarno, ki jo določajo dodatni kriteriji.

Za predlagani način vodenja smo izvedli analizo sledenja trajektoriji v prostoru naloge ter v ničelnem prostoru. Analizirali smo tudi vpliv zunanje sile, pri čemer smo obravnavali primere, ko zunanja sila deluje v prostoru naloge ali v ničelnem prostoru. Pri tem smo pokazali vpliv parametrov na togost sistema v ničelnem prostoru ter prostoru naloge. Dokazali smo tudi, da je sistem, voden s takšnim načinom vodenja, lahko dinamično konsistenten. Utež, ki zagotavlja dinamično konsistenco, je enaka vztrajnostni matriki manipulatorja, pri kateri so na določenih mestih elementi enaki nič. S to matriko delno ločimo oba podsistema, kar se izkaže kot slabost pri vodenju. Zaradi tega dinamična konsistenca ni primerna v primeru kombinirano vodenega robotskega sistema.

Predlagani način vodenja smo realizirali na realnem sistemu, ki je sestavljen iz mobilne ploščadi in robotskega manipulatorja. Tak sistem imenujemo mobilni manipulator. V našem primeru ploščad omogoča samo hitrostno vodenje, manipulator pa tudi navorno. Predstavili smo metodo določitve dinamičnega modela manipulatorja na mobilni ploščadi. Opisana metoda temelji na predpostavki, da je dinamični model manipulatorja znan, in omogoča določitev le tistih elementov v dinamičnem modelu, ki jih prispeva gibanje ploščadi. Metoda je v primerjavi z drugimi metodami, ki določajo dinamični model v celoti, mnogo hitrejša in enostavnejša, manjša pa je tudi možnost napak.

Primarno in sekundarno nalogo ter parametre regulatorja smo definirali tako,

da je sistem mobilnega manipulatorja primeren za uporabo in delo v okolju s človekom. Primarno nalogo smo podali kot sledenje trajektoriji. To trajektorijo poda zunanji sistem, ki ni vključen v obseg tega dela. Sekundarno nalogo smo podali tako, da smo zagotovili izogibanje oviram v okolici ploščadi. Te ovire detektiramo z uporabo ultrazvočnih senzorjev na ploščadi. S sekundarno nalogo ne moremo zagotoviti izogibanja oviram v okolici manipulatorja, saj teh ovir ne moremo detektirati. Za ta namen smo priredili parametre regulatorja tako, da ima sistem visoko podajnost v ničelnem prostoru. Visoka podajnost sistema v ničelnem prostoru ter nesamozaporna zgradba manipulatorja omogočata odmikanje od ovir v okolici manipulatorja, ki jih ni možno zaznati. S takšnim pristopom smo zagotovili odmikanje od vseh ovir v prostoru ter primerno obnašanje v dotiku z okoljem, kar je nujno potrebno pri uporabi robota v človekovem okolju.

Razvili in predstavili smo še nekaj izboljšav k vodenju. Podali smo algoritem za spreminjanje uteži inverza, s katerim dosežemo bolj usklajeno gibanje ploščadi in manipulatorja. Definirali smo gibalno območje, znotraj katerega se mora gibati ploščad. V odvisnosti od pozicije ter hitrosti ploščadi v gibalnem območju vplivamo na gibanje ploščadi in zagotavljamo, da se bo ploščad nahajala znotraj gibalnega območja. Podali smo še algoritem za popolno kompenzacijo presežka hitrosti oz. pospeškov. Z vsemi temi izboljšavami k vodenju dosežemo bolj usklajeno delovanje obeh podsistemov, zmanjšamo pogrešek v prostoru naloge, ki nastane zaradi končnih hitrosti in pospeškov ploščadi, ter odpravimo singularne konfiguracije manipulatorja.

Rezultati meritev na realnem sistemu mobilnega manipulatorja so pokazali, da sistem zagotavlja sledenje trajektoriji v prostoru naloge z natančnostjo, ki je primerljiva z natančnostjo samega manipulatorja. Pokazali smo, da se sistem izogiba oviram v okolici ploščadi, ne da bi to vplivalo na gibanje v prostoru naloge. Podajnost manipulatorja v ničelnem prostoru omogoča odmikanje od ovir v okolici manipulatorja. Sila ovire po trku je majhna, tako da ni nevarnosti za poškodbo manipulatorja ali okolja. Zaradi visoke togosti v prostoru naloge ter majhne sile ob dotiku, dotik z oviro ne povzroči velikega pogreška v prostoru naloge.

Celoten sistem mobilnega manipulatorja zadosti zahtevam, podanim v začetku dela:

- Robotski sistem združuje dva podsistema in pri tem izkorišča prednosti obeh podsistemov.
- Vodenje zagotavlja avtonomno gibanje v nestrukturiranih okoljih z neznanimi ovirami. Pri tem smo za detekcijo ovir uporabili le senzorje razdalje, ki se nahajajo v/na robotu. Ker je sistem redundanten, smo dosegli, da hkrati z odmikanjem od ovir robot sledi predpisani trajektoriji vrha.
- V primeru dotika z okoljem je sistem podajen.
- Predelava krmilnika ploščadi ni potrebna, saj je vodenje kombinirano in združuje navorno in hitrostno vodenje.
- Vodenje deluje v realnem času na realnem sistemu z dovolj veliko frekvenco vzorčenja.

6.1 Izvirni prispevki

Na podlagi raziskav, objavljenih v literaturi, ter rezultatov meritev menimo, da raziskava, opisana v doktorski disertaciji, med drugim vsebuje sledeče izvirne prispevke k znanosti:

- Razvili smo sistem za kombinirano vodenje robotskega sistema. To je povsem nov pristop k vodenju in združuje dva načina vodenja, to sta hitrostni in navorni način. Ta način vodenja uporabimo, kadar želimo del sistema voditi z navorom in del s hitrostjo. S takšnim načinom vodenja dosežemo rezultate, ki so primerljivi z navornim načinom vodenja, pri tem pa ni potrebno spreminjati krmilnika v hitrostno vodenem delu sistema.
- Predstavili smo učinkovitejšo metodo določanja dinamičnega modela manipulatorja z v ravnini premikajočo bazo.
- Za predstavljeni način vodenja smo naredili matematično analizo sledenja trajektoriji in vpliva zunanjih sil.
- Podali smo algoritem za kompenzacijo presežka hitrosti ter dosegli, da ploščad ostane znotraj gibalnega območja.

Literatura

- [1] K. Lay, E. Prassler, R. Dillmann, G. Grunwald, M. Hägele, G. Lawitzky, A. Stopp, and W. von Seelen. Morpha: Communication and interaction with intelligent, anthropomorphic robot assistants. In *Tagungsband Statustage Leitprojekte Mensch-Technik-Interaktion in der Wissensgesellschaft*, Saarbrücken, Germany, October, 2001.
- [2] O. Khatib. Mobile manipulation: The robotic assistant. *Robotics and Autonomous Systems*, 26:175–183, 1999.
- [3] Y. Yamamoto and X. Yun. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(6):1326–1332, 1994.
- [4] O. Khatib, K. Yokoi, O. Brock, K. Chang, and A. Casal. Robots in human environments: Basic autonomous capabilities. *The International Journal of Robotics Research*, 18(7):684–696, 1999.
- [5] G. Grunwald, G. Schreiber, A. Albi-Schaffer, and G. Hirzinger. Programming by touch: The different way of human-robot interaction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(4):659–666, 2003.
- [6] E. Prassler, A. Ritter, C. Schaeffer, and P. Fiorini. A short history of cleaning robots. *Autonomous Robots*, 9(3):211–226, 2000.
- [7] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A.B. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hähnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte, and D. Schulz. Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva. *International Journal of Robotics Research*, 19(11):972–999, 2000.

-
- [8] Bum-Jae You, Myung Hwangbo, Sung-On Lee, Sang-Rok Oh, Young Do Kwon, and San Lim. Development of a home service robot "issac". In *Proceedings of Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2630–2635, Las Vegas, Nevada, USA, October, 2003.
- [9] B. Nemec, D. Omrčen, and B. Prihavec. Mobilni roboti za obisk galerij preko interneta. In *Informacijska družba IS '01 : zbornik A 4. mednarodne multi-konference*, pages 456–459, Ljubljana, Slovenija, Austria, oktober, 22.-26., 2001.
- [10] Y. Yamamoto and X. Yun. Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(5):816–824, 1996.
- [11] G. Schreiber and G. Hirzinger. Realtime coordinated redundant motion of nonholonomic mobile manipulator. In *Proc. of Int. Symposium on Advances in Robotics and Kinematics; Theory and Application*, Spain, 2002.
- [12] C. Altafini. Inverse kinematic along a geometric spline for a holonomic mobile manipulator. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1265–1270, Seoul, 2001.
- [13] L. Petersson, P. Jensfelt, D. Tell, M. Strandberg, D. Kragic, and H. Christensen. Systems integration for real-world manipulation tasks. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, USA, 2002.
- [14] R. S. Oropeza and M. Devy. Motion control using visual servoing and potential fields for a rover-mounted manipulator. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 233–240, Detroit, Michigan, May 1999.
- [15] D. Omrčen, L. Žlajpah, and B. Nemec. Autonomous motion of a mobile manipulator using a combined torque and velocity control. *Robotica*, 22(6):623–632, 2004.
- [16] K. Nagatani and S. Yuta. Designing a behavior of mobile robot equipped with a manipulator to open and pass through a door. *Robotics and Autonomous Systems*, (17):53–64, 1996.

-
- [17] Q. Huang, K. Tanie, and S. Sugano. Coordinated motion planning for a mobile manipulator considering stability and manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 19(8):732–742, August 2000.
- [18] R.F. Abo-Shanab and N. Sepehri. On dynamic stability of manipulators mounted on mobile platforms. *Robotica*, 19(4):439–449, 2001.
- [19] H. G. Tanner and K. J. Kyriakopoulos. Mobile manipulator modeling with kane’s approach. *Robotica*, 19(6):675–690, 2001.
- [20] R. Holmberg and O. Khatib. Development and control of a holonomic mobile robot for mobile manipulation tasks. *The International Journal of Robotics Research*, 19(11):1066–1074, Nov. 2000.
- [21] D. Oetomo, M. Ang Jr., R. Jamisola, and O. Khatib. Integration of torque controlled arm with velocity controlled base for mobile manipulation: An application to aircraft canopy polishing. In *Fourteenth CISM-IFTToMM Symposium on Robotics RoManSy*, pages 308–317, Udine, Italy, Jul. 2002.
- [22] B. Bayle, J.-Y. Fourquet, and M. Renaud. Manipulability of wheeled mobile manipulators: Application to motion generation. *The International Journal of Robotics Research*, 22(7-8):565–581, 2003.
- [23] C. Altafini. Geometric motion control for a kinematically redundant robotic chain: application to a holonomic mobile manipulator. *Journal of Robotic Systems*, 20(5):211–227, 2003.
- [24] A. Bowling and O. Khatib. Design of macro/mini manipulators for optimal dynamic performance. In *International Conference on Robotics and Automation (ICRA ’97)*, volume 1, pages 449–454, Albuquerque, New Mexico, April 1997.
- [25] O. Khatib. Inertial properties in robotic manipulation: An object-level framework. *International Journal of Robotic Research*, 14(1):19–36, 1995.
- [26] D. N. Nenchev. Redundancy resolution through local optimization: A review. *The Journal of Robotic Systems*, 6(6):769–798, 1989.

-
- [27] J. M. Hollerbach. Redundancy resolution of manipulators through torque optimization. *Journal of Robotics and Automation*, 3(4):308–316, 1987.
- [28] C. A. Klein and C.-H. Huang. Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3):245–250, 1983.
- [29] Ping Hsu, John Hauser, and Shankar Sastry. Dynamic control of redundant manipulators. *Journal of Robotic Systems*, 6(2):133–148, 1989.
- [30] Y. C. Chen and I. D. Walker. A consistent null-space based approach to inverse kinematics of redundant robots. In *Proceedings of IEEE Int. Symp. on Robotics and Automation ICRA 1993*, pages 347–381, 1993.
- [31] B. Nemeč and L. Žlajpah. Experiments with force control of redundant robots in unstructured environment using minimal null-space formulation. *Journal of advanced computational intelligence*, 5:263–268, 2002.
- [32] B. Nemeč and L. Žlajpah. Force control of redundant robots in unstructured environments. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 49(1):233–240, 2002.
- [33] O. Brock and O. Khatib. Elastic strips: A framework for motion generation in human environments. *International Journal of Robotics Research*, 21(12):1031–1052, 2002.
- [34] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98, 1986.
- [35] A. A. Maciejewski and C. A. Klein. Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments. *The International Journal of Robotics Research*, 4(3):109–117, 1985.
- [36] L. Žlajpah and B. Nemeč. Force strategies for on-line obstacle avoidance for redundant manipulators. *Robotica*, 21:633–644, 2003.
- [37] T. Woesch and W. Neubauer. Collision avoidance and handling for a mobile manipulator. In *Proc. of the 7th. International Conference Intelligent Autonomous Systems (IAS 2002)*, pages 388–391, Marina del Rey, California, USA, March 25-27, 2002.

-
- [38] J. M. Hollerbach C. H. An. The role of dynamic models in cartesian force control of manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 8(4):51–71, 1989.
- [39] M.H. Raibert and J.J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102:126–133, June, 1981.
- [40] D. Whitney. Force feedback control of manipulator fine motions. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 99:91–97, June, 1977.
- [41] J. Salisbury. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates. In *Proceedings of the 19th IEEE Int. Conference on Decision and Control*, pages 95–100, Albuquerque, New Mexico, USA, September 1980.
- [42] J. Luh, M. Walker, and R. Paul. Resolved-acceleration control of mechanical manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25(3):468– 474, June 1980.
- [43] L. Žlajpah. Simulation of n-r planar manipulators. *Simulation Practice and Theory*, 6(3):305 – 321, 1998.
- [44] H. Asada and J.-J. E. Slotine. *Robot Analysis and Control*. A Wiley Interscience publication, John Wiley and Sons, Inc., 1986.
- [45] J.E.Nethery and M.W. Spong. Robotica: A mathematica package for robot analysis. *IEEE Robotic and Automation Magazine*, 1(1):13–20, 1994.
- [46] L. Žlajpah. Influence of external forces on the behaviour of redundant manipulators. *Robotica*, 17:283–292, 1999.
- [47] L. Žlajpah. Compliant motion control of redundant manipulators in constraint space. In *Fifth IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'97)*, pages 657–663, Nantes, France, Sept. 3-5, 1997.
- [48] Yoshihiko Nakamura. *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.
- [49] J. Lenarčič. On the execution of the secondary task of redundant manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 30:231–236, 2000.

- [50] Oliver Brock. *Generating Robot Motion: The Integration of Planning and Execution*. The University of Stanford - doktorsko delo, 1999.
- [51] D. Omrčen. *Vodenje redundantnega sistema robotskega manipulatorja in mobilnega robota*. diplomsko delo, 2000.
- [52] L. Žlajpah and B. Nemec. Kinematic control algorithms for on-line obstacle avoidance for redundant manipulators. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, pages 1898–1902, Lausanne, 2002.
- [53] D. Omrčen, L. Žlajpah, B. Nemec, and J. Babič. Torque-velocity control of mobile manipulator in unstructured environment. In *12th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD '03*, pages 1–6, Cassino, Italy, 2003.
- [54] Murray R. Spiegel. *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*. McGraw Hill, 1968.
- [55] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *Journal of Robotics and Automation*, 3(1):43–53, 1987.
- [56] J. Lenarčič and T. Bajd. *Robotski mehanizmi*. 1. izdaja. Fakulteta za elektrotehniko, 2003.
- [57] T. Bajd and A. Kralj. *Robotika*. 2. dopolnjena izdaja. Fakulteta za elektrotehniko, 1997.
- [58] Jonghoon Park, Wan Kyun Chung, and Youngil Youm. Weighted decomposition of kinematics and dynamics of kinematically redundant manipulators. In *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 480–486, Minneapolis, Minnesota, USA, April, 1996.
- [59] D. Omrčen and J. Lenarčič. Vodenje redundantnega sistema mobilne platforme z manipulatorjem. In *Electrotechnical and Computer Science Conference (ERK 2001)*, volume B, pages 425–426, Portorož, Slovenija, 2001.

Izjava

Izjavljam, da sem doktorsko disertacijo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Jadrana Lenarčiča, univ. dipl. inž. el. Izkazano pomoč ostalih sodelavcev sem navedel v zahvali.

V Ljubljani, 16. 5. 2005

Damir Omrčen