



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



Mirko M. Raković

Sinteza i realizacija dvonožnog hoda putem primitiva

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2013.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :	
Идентификациони број, ИБР :	
Тип документације, ТД :	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација
Аутор, АУ :	Мирко Раковић
Ментор, МН :	Проф. др Бранислав Боровац
Наслов рада, НР :	Синтеза и реализација двоножног хода путем примитива
Језик публикације, ЈП :	Српски
Језик извода, ЈИ :	Српски
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија
Уже географско подручје, УГП :	Војводина
Година, ГО :	2013.
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт
Место и адреса, МА :	Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6/119/73/2/66/0/2
Научна област, НО :	Роботика
Научна дисциплина, НД :	Хуманоидна роботика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Хуманоидни роботи, двоножна локомоција, примитиви
УДК	
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН :	
Извод, ИЗ :	У тези је приказан нови метод за синтезу и реализацију двоножног вештачког хода који се заснива на употреби једноставних покрета чијим је комбиновањем могуће реализовати комплексне покрете као што је ход, а чији се параметри могу мењати током кретања. Тиме је омогућено да се на основу информација о намераваном кретању и стања околине изврши синтеза кретања избором и комбинацијом једноставних базичних покрета које се називају примитиви. Такође је омогућено да се, током извршавања хода без његовог прекида, мењају параметри кретања као што су брзина хода, дужина корака, правац кретања и висина подизања ноге током преносне фазе. Потврда је дата кроз експерименталне резултате који су спроведени симулацијом на динамичком моделу хуманоидног робота.
Датум прихватања теме, ДП :	11.12.2012.
Датум одбране, ДО :	
Чланови комисије, КО :	Председник: др Душан Сурла, професор емеритус
	Члан: др Вељко Поткоњак, редовни професор
	Члан: др Зора Коњовић, редовни професор
	Члан: др Филип Кулић, ванредни професор
	Члан: др Драган Шешлија, редовни професор
	Члан, ментор: др Бранислав Боровац, редовни професор
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Mirko Raković
Mentor, MN :	Prof. Branislav Borovac, PhD
Title, TI :	Synthesis and realization of biped walk using primitives
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2013.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/119/73/2/66/0/2
Scientific field, SF :	Robotics
Scientific discipline, SD :	Humanoid robotics
Subject/Key words, S/KW :	Humanoid robots, Humanoid and bipedal locomotion, Motion primitives
UC	
Holding data, HD :	The Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	This dissertation presents new method for the synthesis and realization of biped artificial walk based on the use of simple movements that can be combined in order to achieve complex movements such as walk, whereas it is possible to change the motion parameters at any time. It means that, based on the information about intended movement and current state of the environment, it is possible to synthesize motion by selecting and tying simple movements, i.e. motion primitives. It also enables the robot to change walking parameters online such as walking speed, direction of walk, foot length during swing phase and step length. Proof of this method is given by experimental results obtained during the simulation on a dynamic model of humanoid robot.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	11.12.2012.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Prof. Dušan Surla
Member:	Prof. Veljko Potkonjak
Member:	Prof. Zora Konjović
Member:	Prof. Filip Kulić
Member:	Prof. Dragan Šešlija
Member, Mentor:	Prof. Branislav Borovac
	Menthor's sign

Sadržaj:

1. Uvod	4
1.1. Motivacija i predmet istraživanja	6
1.2. Počeci sinteze i realizacije veštačkog dvonožnog hoda	7
1.3. Kratak pregled rada	9
Literatura	10
2. Osnovni pojmovi vezani za hod i njegove specifičnosti	11
2.1. Osnovni pojmovi	11
2.2. Dinamički balans i ZMP	14
Literatura	17
3. Pasivni hodači i dosadašnje metode za sintezu i realizaciju hoda dvonožnih robota	19
3.1. Pasivni hodači	19
3.2. Poluinverzni metod	21
3.3. Ostale metode za sintezu hoda savremenih humanoidnih robota	22
Literatura	25
4. Generisanje hoda korišćenjem primitiva	29
4.1. Predlog rešenja i uvedene novine	29
4.2. Pojam i karakteristike primitiva	35
4.3. Sinteza pokreta kombinovanjem primitiva	37
4.4. Realizacija primitiva korišćenjem dinamičkog modela dvonožnog robota	40
4.4.1. Upravljanje realizacijom primitiva primenom potpornih vektora	42
4.4.2. Upravljanje realizacijom primitiva zadavanjem ciljnog položaja	51
4.5. Opis uvedenih primitiva	58
4.5.1. Podizanje noge	58
4.5.2. Opuštanje noge	62
4.5.3. Naginjanje tela napred	64
4.5.4. Naginjanje tela na oslonućku nogu	67
4.5.5. Spuštanje stopala	69
4.5.6. Održavanje trupa u uspravnom položaju	72
4.5.7. Kretanje ruku tokom hoda	74
Literatura	77
5. Generisanje hoda za kretanje u nestruktuiranoj okolini	79
5.1. Struktura upravljačkog sistema	79
5.2. Kombinovanje primitiva za generisanje hoda	86
5.3. <i>On-line</i> modifikacija hoda	91

5.4. Učenje parametara primitiva za realizaciju hoda	98
Literatura	103
6. Zaključak	104
Dodatak A: Model humanoidnog robota	106
A.1 Model aktuatora u osnaženim zglobovima	107
A.2 Model stopala	110
A.3 Ukupni model humanoidnog robota	113
Literatura	114
Dodatak B: Aproksimacija funkcije primenom potpornih vektora	115
Literatura	119

1. Uvod

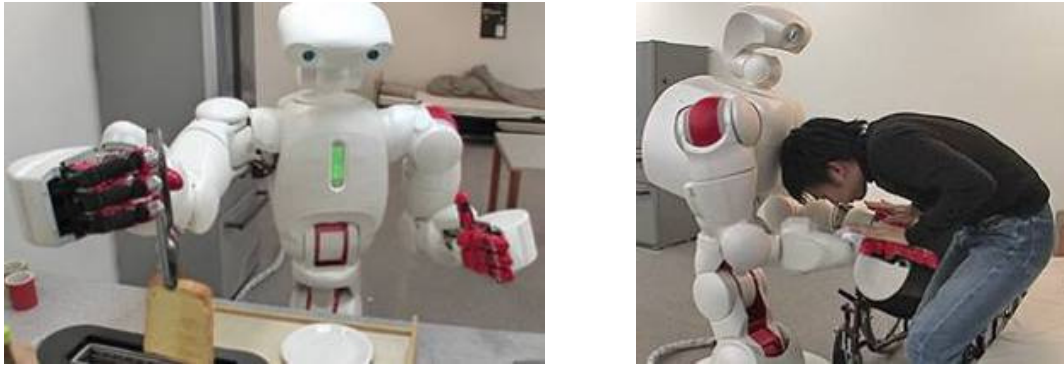
Već duže vreme se ulažu napori da se primena robota proširi i izvan industrijskih hala. Mada imamo primere uspešne primene (roboti vodiči u muzejima, robot-usisivač prašine u stanu, socijalni i terapijski roboti, ...) može se reći da je njihova komercijalizacija još uvek u početnoj fazi tj. da još praktično nije ni počela. Očekuje se da će roboti u skoroj budućnosti pronaći svoju primenu u životnom i radnom okruženju čoveka (Sl. 1.1 i Sl. 1.2.). Istraživački projekti iz ove oblasti se prevashodno bave razvojem robota za pomoć starim i nemoćnim osobama, osobama sa različitim vidovima invaliditeta kojima je pomoć neophodna [1, 2], kao i razvojem robota koji treba da zamene čoveka i u nekim, manje složenim zanimanjima, kao što su roboti konobari, sobarice u hotelima, roboti pomoćnici u kancelarijama, itd. [1, 3].



Slika 1.1 Humanoidni roboti koji su predviđeni da pomažu ljudima u svakodnevnim aktivnostima;

- a) testiranje primene Asimo robota firme Honda za posluživanje u restoranu,
- b) primena Nao robota firme Aldebaran za zabavu stanovnika doma za stare osobe.

U pomenutim poslovima ljudi će sve češće imati priliku da sa robotima dele svakodnevni životni i radni prostor što znači da se nameće zahtev da čovek i robot realizuju svoje aktivnosti u zajedničkom prostoru. Osnovne osobine prostora u kome



Slika 1.2 Robot Tvendivan (engl. *Twendy-one*) je predviđen da radi u kuhinji i da osobama sa invaliditetom pomaže u svakodnevnim obavezama.

čovjek živi i radi su da je u potpunosti podešen čoveku¹ i da je nestruktuiran (ili vrlo slabo struktuiran). Pri tome se od robota očekuje da u ovakvom okruženju „uspešno funkcioniše“. To znači da robot, pre svega, treba da bude dovoljno vešt u manipulaciji objektima iz čovekovog okruženja, kao i da se efikasno kreće u nestruktuiranoj okolini. Postavlja se pitanje kakva konfiguracija robota je najpogodnija za ovakve uslove?

Radno i životno okruženje čoveka ima nekoliko specifičnosti. Pre svega, u njemu nije moguće obezbediti apriornu informaciju o putanji kojom robot treba da se kreće jer nije moguće unapred znati tačan raspored i položaj objekata iz njegove neposredne okoline (tj. pojedinih delova nameštaja i drugih objekata koji se mogu naći na planiranoj putanji pri čemu ih treba smatrati, „preprekama“ i zaobići) jer se njihov položaj može menjati. Stoga nije moguće unapred planirati putanju. Sa druge strane, prisustvo stepenica, pragova i podova različitog nivoa praktično onemogućava primenu točkova. Osim toga, u bilo kojem zadatku je potrebno da manipuliše objektima iz čovekove okoline, npr. da dohvati čašu sa stola, da pomeri ili doda knjiga itd. To nameće potrebu da se objekat dosegne sa željenom orijentacijom šake (hvataljke) pa su ruke neophodne. Ovi uslovi implicitno zahtevaju: da robot ima ruke i noge pa se kao logičan izbor nameće antropomorfna konfiguracija.

Delovanje u neposrednom okruženju čoveka postavlja i dodatne zahteve u smislu da je neophodno da sveukupno delovanje robota bude „adekvatno“ i prihvatljivo za čoveka što implicira mnoštvo dodatnih zahteva kao što su npr. psihološki. U njih, ovde, nećemo ulaziti, ali pomenimo, ilustracije radi, da je za „koegzistenciju“ robota i čoveka

¹ Nije realno da se očekuje da će okolina biti značajnije prilagođena robotima jer bi se time smanjio stepen komfora koji čovek već ima. Realnija su očekivanja da će biti potrebno da se roboti prilagode postojećem prostoru i uslovima.

neophodno da prisustvo robota čoveku ne bude odbojno. Sa tog aspekta antropomorfna konfiguracija predstavlja moguću pogodnost jer se pretpostavlja da će ljudi u svom okruženju lakše prihvatiti robote koji imaju izgled i sposobnosti slične njihovim [4]. Pomenimo još jednom da realizacija dvonožnog kretanja u nestruktuiranoj okolini predstavlja zadatak koje se ne može zaobići, pri čemu *on-line* generisanje i realizacija kretanja pripada klasi veoma zahtevnih zadataka koji još uvek nisu rešeni na zadovoljavajući način.

1.1. Motivacija i predmet istraživanja

Kao što je već rečeno, za primenu robota u čovekovom okruženju preduslov je da se robot efikasno kreće² u nestruktuiranoj i da kretanje u što većoj meri liči na čovekovo. Trenutna situacija u kojoj se čovek može naći uslovljava odluku o daljem kretanju koje treba izvršiti, što se često ne može predvideti unapred. Kretanje treba realizovati praktično onog trenutka kada je odluka o njemu doneta.

Dvonožno kretanje humanoidnih robota se najčešće upoređuje sa kretanjem čoveka. Međutim, treba imati na umu da čovek praktično od rođenja svoju sposobnost kretanja neprestano i svakodnevno „uvežbava“ čime stiče veštinu i iskustvo. Pokret koji je ponovljen „dovoljan broj puta“ i „dobro uvežban“, prelazi u domen refleksne (nesvesne ili automatske) realizacije. Primer koji ovo veoma dobro ilustruje je hod, jer se hod po ravnoj podlozi kao i penjanje uz i silazak niz stepenice realizuje automatski. Pri tome se „u svesni domen“ prelazi samo u posebnim (nestandardnim) situacijama. Treba imati na umu i da je učenje hoda (koje je najintenzivnije u ranim fazama čovekovog života) dugotrajan, postepen (učenje napreduje od jednostavnijih lokomotornih aktivnosti ka složenijim) i vrlo složen proces koji nam još uvek nije u potpunosti poznat. Odluke koje se donose o načinu na koji će realizovati korak, njegovim parametrima, kao i o načinu kompenzacije stalno prisutnih poremećaja, su skoro trenutne, ali su veoma odgovarajuće. Zbog „stalnog uvežbavanja“ se može reći da je čovek savršeno utreniran za hod po različitim terenima i u različitim uslovima, pa je pad tokom hoda vrlo redak.

Neurološka ispitivanja hoda čoveka su potvrdila da se, tokom procesa učenja hoda, određeni načini pokretanja nogu³ pretvaraju u definisane obrasce (engl. *pattern*) jer se stalno i nanovo izvršavaju ali svaki put sa, u određenoj meri, modifikovanim

² U daljem tekstu ove teza će izlaganje biti ograničeno na dvonožni hod.

³ Jedan šablon pokretanja nogu može biti npr. hod po ravnom, drugi penjanje uz stepenice, itd.

parametrima. Kreirani obrasci se vremenom nadograđuju i usavršavaju [5-8]. Izučavanja hoda su takođe pokazala da kretanje noge pri različitim parametrima hoda (npr. za različite brzine hoda) ili pri realizaciji nestandardnih pokreta (kao što je prelazak preko prepreke prekoračivanjem) liče u velikoj meri na osnovni obrazac pokretanja noge. Ukoliko humanoidni robot ima antropomorfnu strukturu čije su karakteristike slične čovekovim, tada se i na njega može primeniti ovaj način realizacije kretanja.

U ovoj tezi se predlaže pristup sintezi i realizaciji hoda dvonožnih humanoidnih robota koji se zasniva na generisanju hoda korišćenjem skupa unapred definisanih osnovnih obrazaca pokretanja nogu koji se nazivaju primitivi, dok će se pri realizaciji kretanja parametri primitiva menjati u skladu sa trenutnom situacijom (promena brzine ili pravca kretanja, dužine koraka, ...) uz permanentni zahtev sprečavanja pada tj. očuvanja dinamičkog balansa. Osnovna hipoteza ovog rada je da je moguće, na osnovu informacija o nameravanom kretanju i stanja okoline, izvršiti sintezu kretanja izborom i kombinacijom odgovarajućih primitiva. Druga hipoteza je da se tokom izvršavanja hoda, bez njegovog prekidanja (tj. *on-line*), mogu menjati parametri kretanja kao što su brzina hoda, dužina koraka, visina podizanja noge tokom prelaska noge iz zadnjeg u prednji položaj (npr. tokom prekoračivanja preko prepreke), skretanje u stranu itd. Predloženo rešenje za generisanje hoda treba da obezbedi brz prelazak na izvršavanje novih putanja modifikacijom postojećeg kretanja, bez potrebe za generisanjem svih putanja od početka. Pri tome se podrazumeva da se kretanje ostvaruje tako da je stalno očuvan dinamički balans robota⁴.

1.2. Počeci sinteze i realizacije veštačkog dvonožnog hoda

Sinteza dvonožnog kretanja predstavlja ozbiljan i težak zadatak jer je potrebno odrediti simultano i sinhrono kretanje velikog broja zglobova tako da se zadovolje funkcionalni zahtevi kretanja nogu (tj. da se realizuje hod) i da lokomocioni sistem pri tome naprekidno bude dinamički balansiran. Pionirski rezultat u oblasti sinteze dvonožnog kretanja je postignut 1969. godine od strane profesora Miomira Vukobrtovića sa Instituta Mihajlo Pupin iz Beograda postavljanjem koncepta tačke nula momenta (engl. *Zero Moment Point* - ZMP⁵) [9]. Veličinu ovog doprinosa najviše ilustruje činjenica da većina današnjih humanoidnih robota, za realizaciju hoda koriste

⁴ Problematika očuvanja dinamičkog balansa će se detaljno razmotriti u poglavlju 2.

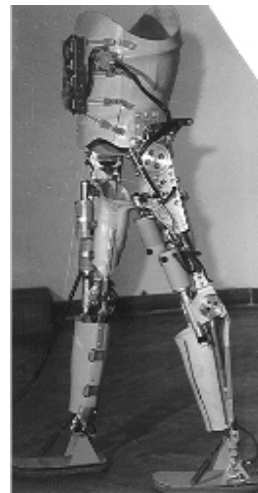
⁵ Koncept tačke nula momenta (ZMP-a) će detaljnije biti objašnjen u odeljku 2.2.

koncept ZMP-a.

Pored uvođenja koncepta ZMP-a⁶, još jedan od izuzetnih dobitnika profesora Vukobratovića je i poluinverzni metod za sintezu dvonožnog hoda koji je omogućio da se definiše kretanje svih zglobova dvonožnog humanoidnog robota tako da se realizuje željena vrsta hoda uz dodatni uslov obezbeđivanje dinamičkog balansa. Nakon toga je, takođe pod njegovim rukovodstvom, počeo i razvoj prvog u svetu aktivnog egzoskeleta [10]. Prva verzija aktivnog egzoskeleta, pogonjena pneumatskim aktuatorima, je realizovana 1971. godine (Sl. 1.3 a)), dok su kasnije realizovane i verzije sa elektromotornim pogonom (Sl. 1.3b)).



a)

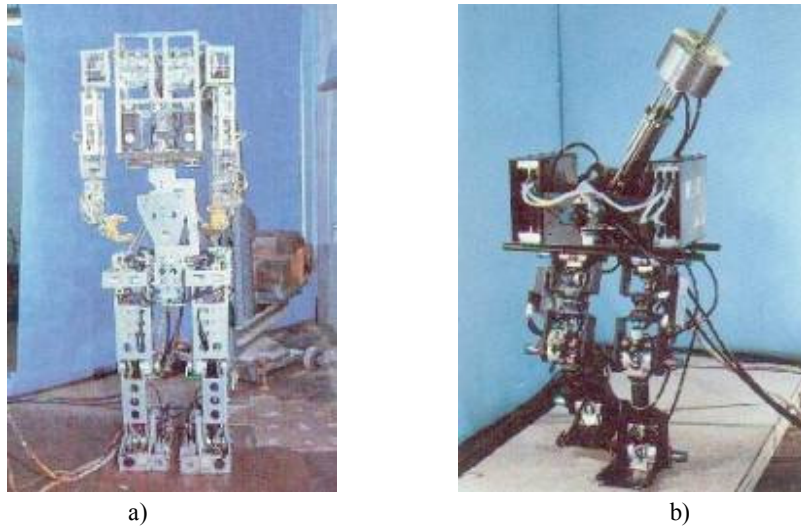


b)

Slika 1.3 Egzoskeleti realizovani na Institutu „Mihajlo Pupin“; a) primerak egzoskeleta koji je izložen u „Politehničkom muzeju“ u Moskvi b) najuspešnija verzija aktivnog egzskeleta realizovanog 1972. godine.

Prvi humanoidni robot koji je mogao da realizuje (statički) dvonožni hod je bio WABOT-1 (Sl. 1.4 a)) realizovan 1973. godine, a prvi robot koji je bio u stanju da realizuje potuno dinamički dvonožni hod (i za to je koristio koncept ZMP-a) je bio WL-12 (Sl. 1.4 b)) koji je realizovan 1986. godine. Oba robota su realizovana u Laboratoriji za Robotiku na Vaseda Univerzitetu iz Tokija kojom je rukovodio profesor Ichiro Kato [11].

⁶ Pomenimo samo još i doprinose prof. Vukobratovića u oblasti rekurzivna formulacija dinamike robota, upravljanja dvonožnim sistemima, ... koji su omogućili da se ova oblast razvije.



Slika 1.4 Fotografije prvih robota razvijenih na „Vaseda Univerzitetu“ u Tokiju; a) robot WABOT-1; b) robot WL-12

1.3. Kratak pregled rada

U nastavku teze je prvo dat pregled osnovnih pojmova vezanih za hod humanoidnih robota. Zatim su u trećoj glavi prvo opisani pasivni hodači, a nakon toga je dat pregled najvažnijih metoda za sintezu i generisanje dvonožnog hoda robota sa aktuiranim stepenima slobode. U četvrtoj glavi je uveden pojam i opisane su karakteristike primitiva. Prvo je opisan način generisanja hoda primenom primitiva na kinematskom nivou, a u nastavku ove glave su prikazana dva pristupa za realizaciju primitiva. Zatim je u petoj glavi detaljno opisan postupak realizacije hoda i sve je ilustrovano rezultatima dobijenih simulacijom kretanja korišćenjem dinamičkog modela humanoidnog robota primenom primitiva. Prvo je prikazan postupak za sintezu hoda pravo napred po ravnoj podlozi na osnovu čega je realizovan osnovni hod. Nakon toga su prikazane mogućnosti *on-line* modifikacije osnovnog hoda za kretanje u nestruktuiranoj okolini. Na kraju pete glave je opisan algoritam za učenje radi podešavanja parametara primitiva i dobijanja adekvatnijeg hoda. Na kraju rada je u zaključku dat osvrt na postignute rezultate i navedeni su pravci daljeg istraživanja. U dodacima A i B je dat opis korišćenog dinamičkog modela humanoidnog robota i objašnjenje postupka primene potpornih vektora za aproksimaciju funkcija.

Literatura

- [1] Asfour, T., Yokoi, K., Lee, C. G., & Kuffner, J. (2012). TC SPOTLIGHT•. *IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE*.
- [2] Sugaiwa, T., Iwata, H., & Sugano, S. (2008, December). Shock absorbing skin design for human-symbiotic robot at the worst case collision. In *Humanoid Robots, 2008. Humanoids 2008. 8th IEEE-RAS International Conference on*(pp. 481-486). IEEE.
- [3] Marder-Eppstein, E., Berger, E., Foote, T., Gerkey, B., & Konolige, K. (2010, May). The office marathon: Robust navigation in an indoor office environment. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*(pp. 300-307). IEEE.
- [4] Brooks, R. A. (1996, October). Prospects for human level intelligence for humanoid robots. In *Proceedings of the First International Symposium on Humanoid Robots (HURO-96)* (pp. 17-24).
- [5] Breniere, Y., & Bril, B. (1998). Development of postural control of gravity forces in children during the first 5 years of walking. *Experimental Brain Research*, 121(3), 255-262.
- [6] Evans, S., & Keenan, T. (2009). *An introduction to child development*. Sage Publications Limited.
- [7] Adolph, K. E., Vereijken, B., & ShROUT, P. E. (2003). What changes in infant walking and why. *Child development*, 74(2), 475-497.
- [8] Cheron, G., Bouillot, E., Dan, B., Bengoetxea, A., Draye, J. P., & Lacquaniti, F. (2001). Development of a kinematic coordination pattern in toddler locomotion: planar covariation. *Experimental brain research*, 137(3), 455-466.
- [9] Vukobratovic, M., & Juricic, D. (1969). Contribution to the synthesis of biped gait. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, (1), 1-6.
- [10] Vukobratović, M. (2008). Active exoskeletal systems and beginning of the development of humanoid robotics. *Facta universitatis-series: Mechanics, Automatic Control and Robotics*, 7(1), 243-262.
- [11] Takanishi, A. (1995). In memoriam: Professor Ichiro Kato. *Autonomous Robots*, 2(1), 7-10.

2. Osnovni pojmovi vezani za hod i njegove specifičnosti

U ovoj glavi će biti objašnjeni neki od osnovnih pojmova dvonožnog hoda kao što su: korak, hod i način hoda, oslonačka površina itd. Detaljnije će biti objašnjen pojam dinamičkog balansa i ZMP-a zbog njihove važnosti pri sintezi i realizaciji hoda humanoidnih robota.

2.1. Osnovni pojmovi

Već nekoliko decenija se veliki broj istraživača bavi analizom i sintezom dvonožnog hoda. Postoji veliki broj studija koje su verifikovane ili simulacijom ili praktičnim realizacijama hoda. Složenost lokomocionih sistema varira od jednostavnih ravanskih mehanizama pa do najnaprednijih humanoidnih robota. Nezavisno od strukture i broja stepeni slobode, osnovna karakteristika svakog dvonožnog lokomocionog mehanizma je mogućnost pada tj. rotacije čitavog sistema oko ivice stopla, što odgovara pojavi neosnaženih, pasivnih, stepeni slobode.

Tokom hoda, humanoidni robot sukcesivno prolazi kroz dve faze: dvooslonačku, u kojoj je robot oslonjen na obe noge istovremeno, i jednooslonačku, kada je samo jedna noga u kontaktu sa podlogom dok je druga u fazi prenosa iz zadnjeg u prednji položaj u odnosu na trup [1]. To znači da lokomocioni mehanizam, tokom hoda menja svoju strukturu. Tokom jednooslonačke faze, noge robota formiraju otvoreni, a tokom dvooslonačke faze, zatvoren kinematski lanac. Kod uobičajenih realizacija dvonožnih humanoidnih robota, svi stepeni slobode su aktuirani osim onih koji se javljaju u kontaktu stopala i podloge. Kontakt između stopala i podloge je značajan zato što položaj robota u odnosu na okolinu direktno zavisi od relativne pozicije i orijentacije stopala u odnosu na podlogu. Ukoliko dođe do neželjenog gubitka površinskog kontakta stopala sa podlogom preči opasnost od pada što treba na svaki način sprečiti.

Radi jasnoće izlaganja u nastavku teze, sada će biti dat kratak pregled osnovnih pojmova iz oblasti dvonožnog hoda⁷:

Hod (engl. *Walk*): Hod je proces pri kom se kretanje vrši stalnim prenošenjem nogu jedne ispred druge, pri čemu obe nogu ni u jednom trenutku nisu istovremeno odvojene od podloge.

Način hoda (engl. *Gait*): Iz iskustva je poznato da svaka osoba realizuje hod na drugačiji način. Čak, isti čovek različito hoda u različitim situacijama. Stoga se može reći da svaki različit hod predstavlja novi način hoda.

Korak: Tokom hoda po ravnoj podlozi pokreti nogu se ponavljaju. Oslonačka noga iz prednjeg položaja u odnosu na trup (posmatrano u pravcu kretanja) prelazi u zadnji. Nakon toga se noga odvaja od podloge, i tokom faze prenosa se ponovo dovodi u položaj ispred tela. Posle uspostavljanja kontakta, noga ponovo postaje oslonačka i ovi pokreti se tokom hoda ponavljaju za obe noge. Opisani pokreti predstavljaju osnovni ciklus hoda koji se zove korak. Vreme za koje se izvrši korak nije fiksno, i dužina koraka takođe može da varira. Treba naglasiti da svaki korak tokom hoda može biti različit.

Uslovi ponovljivosti: Uslovi ponovljivosti predstavljaju zahtev da su pozicije i brzine u svim zglobovima na početku i kraju koraka iste. To omogućava da se hod sintetizuje samo na jednom koraku, a da se realizacija hoda obavlja ponavljanjem osnovnog koraka. Uslovi ponovljivosti se matematički mogu izraziti na sledeći način:

$$q_j(t) = q_j(t_{i-1}), \dot{q}_j(t) = \dot{q}_j(t_{i-1}) \quad (2.1)$$

gde \mathbf{q} i $\dot{\mathbf{q}}$ predstavljaju uglove i ugaone brzine u zglobovima između segmenata robota, j označava redni broj zgloba dok je t_i je trenutak kada počinje i -ti korak. Dakle ista vrednost unutrašnjih koordinata na kraju prethodnog i početku narednog koraka omogućava ponavljanje prethodnog koraka.

Periodično kretanje: U literaturi se mogu naći definicije po kojima se periodičnost i ponovljivost koraka poistovećuju. Ponovljivost koraka je jasno zadata preko uslova (2.1) dok uslov periodičnosti zahteva dodatno objašnjenje. Uslov periodičnosti koraka je dovoljan za realizovanje hoda po idealno ravnoj podlozi bez prisustva bilo kakvih poremećaja. Ako se hod realizuje ponavljanjem koraka na identičan način, tada se naziva periodičnim. Matematički uslov periodičnosti je predstavljen preko vrednosti unutrašnjih koordinata zglobova q_j (indeks j označava redni broj zgloba). Uslov periodičnosti je:

⁷ . Uvedeni pojmovi su opširnije dati u [2].

$$q_j(t+T)=q_j(t), \forall j=1..n \quad (2.2)$$

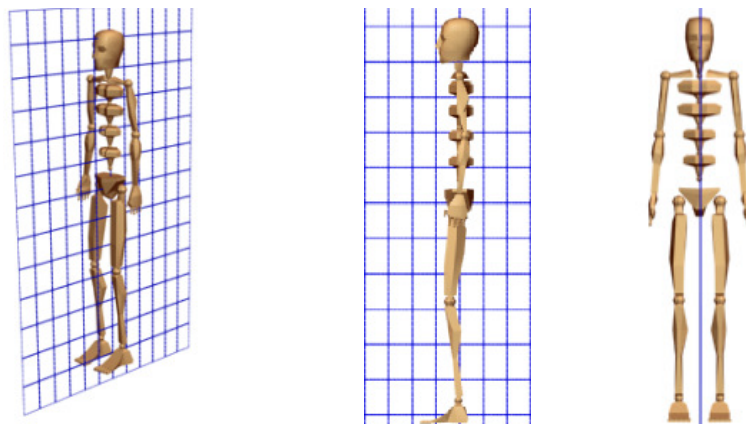
gde T predstavlja trajanje koraka, a n predstavlja broj zglobova robota, odnosno broj stepeni slobode robota ukoliko nije došlo do pojave pasivnih stepeni slobode. Veliki broj radova koji se bave dvonožnom lokomocijom razmatraju periodičan hod [3, 4]. Treba napomenuti da je periodičan hod moguće izvesti samo na ravnoj površini (bez prepreka) i u okolini koja ne zahteva kršenje uslova (2.2).

U slučaju kada robot koji realizuje periodičan hod naiđe na napredviđenu situaciju ili prepreku može da se zahteva napuštanje periodičnosti, npr. robot mora da podigne više nogu jer nailazi na objekat koji treba prekoračiti. Nakon uspešno savladane nepredviđene situacije robot može da se vrati na realizovanje periodičnog koraka, ali tek kada dostigne referentno kretanje ili stanje npr. kada na kraju koraka zadovolji uslove ponovljivosti (2.1).

Simetrični korak i hod: Simetrija je karakteristika hoda realizovanog simetričnim koracima. Preduslov simetrije koraka je simetrija humanoidnog robota u odnosu na sagitalnu ravan (Sl. 2.1.). Ako trajanje koraka može da se подели na dva jednaka vremenska perioda i ako se tokom prvog perioda jedna noga kreće na identičan način na koji se druga noga kreće tokom drugog perioda tada je korak simetričan. Pokret realizovan tokom prvog odnosno drugog vremenskog perioda se naziva polukorak. Uslov simetričnosti koraka tj. kretanja nogu je zadat jednačinom:

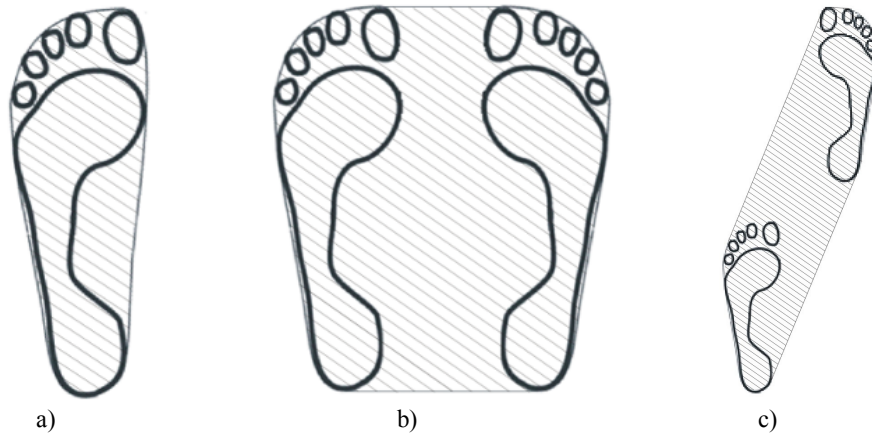
$$\mathbf{q}_{j_desna}(t+T/2)=\mathbf{q}_{j_leva}(t) \quad (2.3)$$

gde j_desna i j_leva predstavljaju indekse zglobova desne i leve noge, a $T/2$ je vreme trajanja polukoraka. Ukoliko je ispunjena simetrija u slučaju koraka, tada se realizuje hod po pravoj liniji. U slučaju simetričnog koraka, sve kinematske i dinamičke analize hoda mogu da se izvode na jednom polukoraku.



Slika 2.1. Simetrija humanoidnog robota u odnosu na sagitalnu ravan

Regularan hod: Pod pojmom regularnog hoda se smatra periodično kretanje u kojem je jedna noga tokom jednoosloničke faze u površinskom kontaktu sa podlogom (pri čemu je kontakt ostvaren čitavom površinom stopala ili samo delom stopala gde se nalaze prsti), a u slučaju dvoosloničke faze obe noge moraju da budu u kontaktu sa podlogom pri čemu površinski kontakt sa podlogom mora da ostvari bar jedna noga. Regularan hod može, a ne mora biti simetričan. Na primer, regularan hod je i hod pri kojem se skreće u stranu i koji nije simetričan.



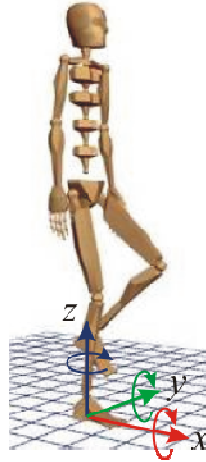
Slika 2.2. Oslonačka površina tokom a) jednoosloničke faze, b) dvoosloničke faze pri stajanju mirno i c) dvoosloničke faze pri kretanju

Oslonačka površina: Oslonačka površina je određena kontaktom između stopala i podloge. U slučaju regularnog hoda oslonička površina je uvek konačne veličine. U jednoosloničkoj fazi, oslonička površina odgovara površini dela stopala koji je u kontaktu sa podlogom, dok je u dvoosloničkoj fazi, oslonička površina dobijena kao konveksna površina određena površinama dela oba stopala koji su u kontaktu sa podlogom (Sl. 2.2.).

2.2. Dinamički balans i ZMP

Struktura svakog humanoidnog dvonožnog robota je sačinjena od segmenata koji su povezani zglobovima. Kretanje u zglobovima se realizuje aktuatorima i upravljanje kretanjem aktuatora direktno određuje vrednost uglova u zglobovima. Međutim, pošto stopalo nije fiksirano za podlogu, humanoidni roboti predstavljaju nedovoljno aktuirani

sistem (broj stepeni slobode sistema je veći od broja aktuatora), odnosno svaki humanoidni robot poseduje dodatnih šest neosnaženih stepeni slobode: tri rotacije i tri translacije⁸ (Sl. 2.3). Kretanjem neosnaženih stepeni slobode ne može da se upravlja direktno, već se to realizuje indirektno, odgovarajućim kretanjem dela robota koji se nalazi iznad stopala koje je u površinskom kontaktu sa podlogom.



Slika 2.3 Neosnaženi stepeni slobode između podloge i stopala humanoidnog robot
(crvene strelice predstavljaju rotaciju oko i translaciju duž x ose,
zelene oko i duž y ose, a plave strelice oko i duž z ose)

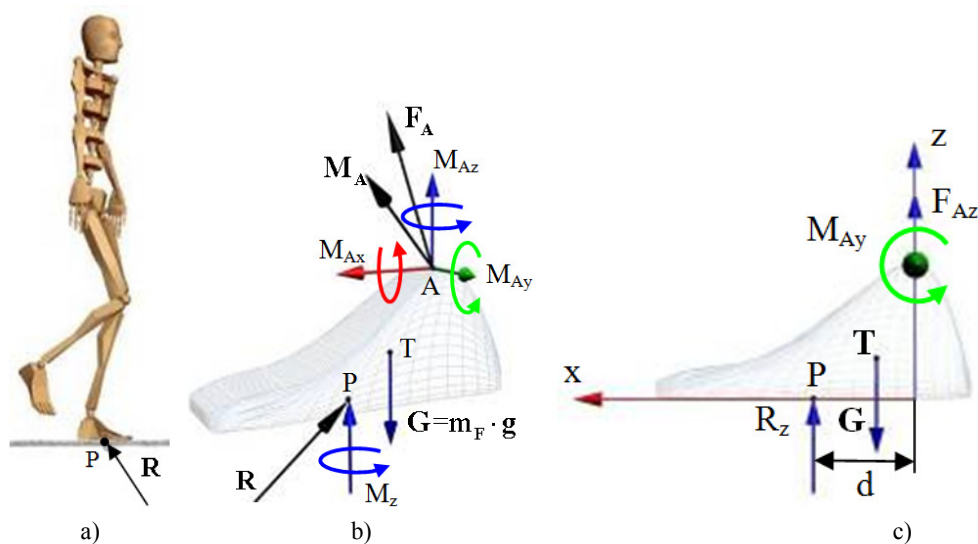
Zapravo, da bi obezbedili kretanje robota tokom kojeg je dinamički balans stalno očuvan, potrebno je sprečiti neželjeno kretanje u neosnaženim stepenima slobode između oslonačke noge i podloge. Ovaj uslov je ostvaren ukoliko nema proklizavanja i ukoliko stalno postoji površinski kontakt između podloge i stopala (ili dela stopala) oslonačke noge. Pošto stopalo nije pričvršćeno za podlogu, uticaj podloge na stopalo je ostvaren putem sile trenja i vertikalne sile reakcije podloge na stopalo.

Dakle, pod pretpostavkom da nema proklizavanja, humanoidni robot je dinamički balansiran ukoliko tokom kretanja postoji oslonačka površina (a ne linijski kontakt ivice stopala i podloge). U tom slučaju je kontakt između stopala i podloge postojan i ne postoji rotacija čitavog sistema oko ivice oslonačke površine (bilo da je sistem u jednooslonačkoj ili dvooslonačkoj fazi). Za održavanje dinamičkog balansa, potreban i dovoljan uslov je da se normalna komponenta sile reakcije između stopala i podloge nalazi unutar oslonačke površine (izuzimajući ivice). U tom slučaju se ukupna reakcija

⁸ Ukoliko je koeficijent trenja između stopala i podloge dovoljno veliki do translacije neće doći. Isto tako, dovoljno veliko trenje sprečava rotaciju oko ose upravne na podlogu, pa realnu opasnost predstavlja samo rotacija oko ivica stopala.

svodi samo na silu reakcije, a usmerena je naviše. Zbog odsustva momenata u tački u kojoj deluje sila reakcije ta tačka se zove tačka nula momenta (ZMP) [1].

Sada će se razmotriti dvonožni robot u jednooslonjačkoj fazi (Sl. 2.4), čije je stopalo čitavom svojom površinom u kontaktu sa podlogom. Da bi pojednostavili razmatranje, može se zanemariti ostatak mehanizma iznad skočnog zgloba oslonjačke noge (tačka A) i zameniti njegov uticaj silom \mathbf{F}_A i momentom \mathbf{M}_A (Sl. 2.4 b), pri čemu težina samog stopala deluje u svom težištu (tačka T). Na stopalo dodatno deluje sila reakcije podloge u tački P, čije delovanje održava čitav sistem u ravnotežnom položaju.



Slika 2.4 Dvonožni mehanizam sa silama i momentima koje deluju na stopalo u jednooslonjačkoj fazi

Sila reakcije podloge \mathbf{R} i vektor momenta \mathbf{M} se mogu razložiti na tri komponente (R_x , R_y i R_z) i (M_x , M_y i M_z), respektivno. Pošto trenje deluje u ravni kontakta stopala sa podlogom (pretpostavimo da stopalo ne proklizava u odnosu na podlogu) komponente sile i momenta koje deluju u horizontalnoj ravni su uravnotežene trenjem. Zbog toga, horizontalna sila reakcije (komponente R_x i R_y) uravnotežava horizontalnu komponentu sile \mathbf{F}_A , a vertikalna komponenta momenta reakcije podloge M_z uravnotežava vertikalnu komponentu momenta \mathbf{M}_A i momenta u tački P usled dejstva sile \mathbf{F}_A . Prema tome, statičko trenje uravnotežava horizontalne komponente sile reakcije podloge (R_x i R_y) i vertikalnu komponentu momenta reakcije podloge (M_z). Vertikalna sila reakcije podloge R_z uravnotežava zbir vertikalnih komponenti sile \mathbf{F}_A i težine stopala \mathbf{G} .

S obzirom na unilateralnu prirodu kontakta između stopala i podloge, horizontalne komponente svih aktivnih momenata mogu se kompenzovati samo promenom mesta delovanja sile reakcije \mathbf{R} unutar oslonjačke površine. Zbog toga će se, pod uticajem

horizontalne komponente momenta \mathbf{M}_A i usled dejstva sila \mathbf{F}_A i \mathbf{G} , napadna tačka sile reakcije podloge pomeriti u odgovarajući položaj, definisan veličinom d , da bi se sistem uravnotežio. To je prikazano na Sl. 2.4 c, na kojoj je radi jednostavnosti, predstavljen ravanski slučaj u x-z ravni.

Suma momenta M_{Ay} i momenta usled težine stopala \mathbf{G} je uravnotežena pomeranjem napadne tačke sile reakcije R_z . Potrebno je naglasiti da se sve vreme sila reakcije nalazi unutar oslonačke površine, tj. ispod stopala. Promena momenta u skočnom zglobu će biti kompenzovana menjanjem pozicije napadne tačke sile reakcije i neće se javljati horizontalne komponente momenta M_x i M_y sve dok se sila reakcije može kretati u okviru oslonačke površine. Ukoliko je moment koji sila reakcije \mathbf{R} treba da uravnoteži isuviše veliki, sila reakcije \mathbf{R} će delovati na ivici stopala (sila reakcije ne može da izađe izvan oslonačke površine) i neuravnoteženi deo horizontalne komponente momenta reakcije podloge će prouzrokovati rotaciju mehanizma oko ivice stopala što može da dovede do pada robota.

Dakle, da bi humanoidni robot bio dinamički balansiran potreban i dovoljan uslov je da je

$$M_x = 0, M_y = 0 \quad (2.4)$$

u tački P u kojoj deluje sila reakcije podloge na mehanizam. Drugim rečima, ukoliko su u tački P ispunjeni uslovi $M_x=0$ i $M_y=0$, u kojoj deluje sila reakcije tada P predstavlja tačku nula momenta (ZMP).

Prema tome, ukoliko pretpostavimo da nema proklizavanja stopala u odnosu na podlogu, indikator dinamičkog balansa robota je položaj ZMP-a u okviru oslonačke površine. Da bi dinamički balans bio očuvan, kretanje sistema iznad stopala treba da je takvo da se ZMP stalno nalazi unutar oslonačke površine. Bitno je napomenuti da je otkriće ZMP-a bila prekretnica za sintezu veštačkog hoda i upravljanje kretanjem humanoidnih robota.

Literatura

- [1] Vukobratović, M., & Borovac, B. (2004). Zero-moment point—thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(01), 157-173.
- [2] Vukobratovic, M., Borovac, B., & Potkonjak, V. (2007). Towards a unified understanding of basic notions and terms in humanoid robotics. *Robotica*, 25(1), 87-102.
- [3] Lim, H. O., Kaneshima, Y., Takanishi, A. (2002). Online walking pattern

generation for biped humanoid robot with trunk. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 3111-3116). IEEE.

- [4] Okada, M., Tatani, K., Nakamura, Y. (2002). Polynomial design of the nonlinear dynamics for the brain-like information processing of whole body motion. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1410-1415). IEEE.

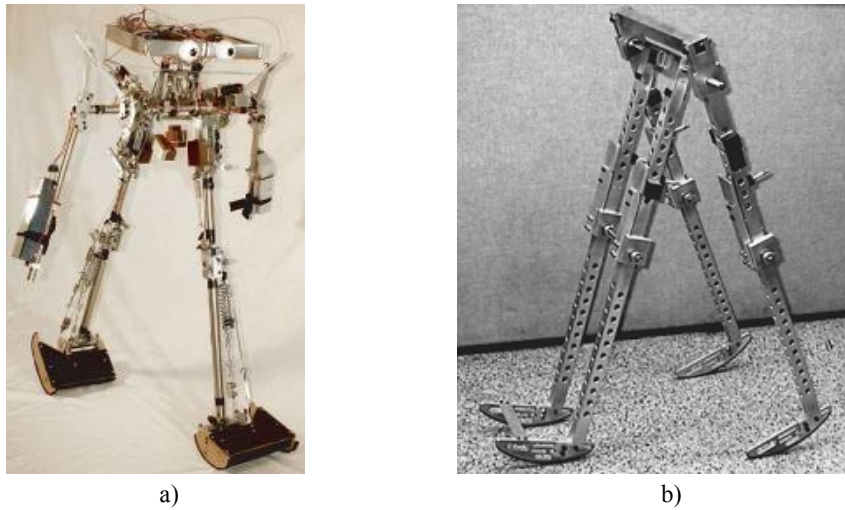
3. Pasivni hodači i dosadašnje metode za sintezu i realizaciju hoda dvonožnih robota

Velika većina dvonožnih robota poseduje aktuatore u svim zglobovima, dok su stepeni slobode koji se mogu javiti između stopala i podloge neosnaženi. Međutim, postoje i realizacije robota kod kojih je većina ili svi stepeni slobode neaktuirani. Takvi roboti se nazivaju pasivnim hodačima. U nastavku glave će prvo biti prikazan način na koji se realizuje hod kod nekih pasivnih hodača, a zatim će se prikazati metode za generisanje hoda robota sa aktuiranim zglobovima.

3.1. Pasivni hodači

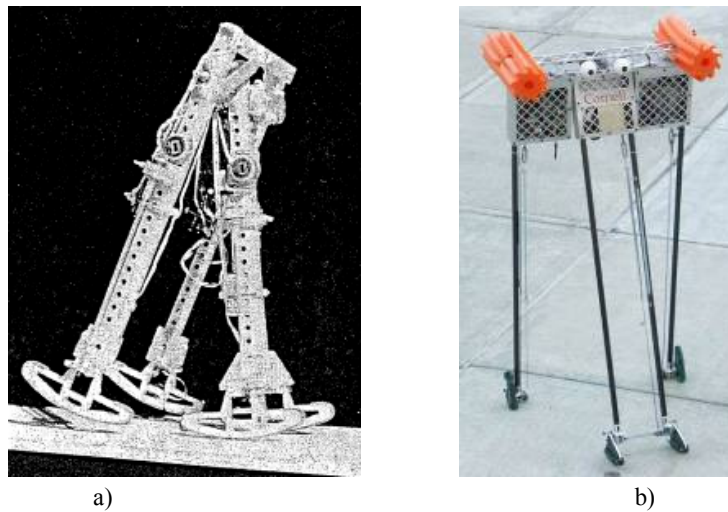
Pasivni dinamički hodači su jednostavni mehanički uređaji sastavljeni od segmenata spojenih zglobovima, koji mogu da hodaju bez spoljašnjeg pogona (tj. bez upotrebe aktuatora) ili sa minimalnim spoljašnjim pogonom. Oni poseduju zglobove koji nisu osnaženi motorima, ali hodaju na način sličan čovekovom [1, 2]. Upotrebom dodatnog izvora energije omogućeno je da pasivni hodači hodaju i po ravnoj podlozi. Hod pasivnih hodača se ostvaruje tako da, kada je mehanizam u jednooslonjačkoj fazi projekcija težišta sistema mora uvek biti ispred tačke oslonca, čime se u odnosu na tačku oslonca generiše moment, pa se gravitacija koristi kao pogon da bi inicirala rotaciju celog sistema oko oslonjačke noge. Stopalo je specijalno profilisano i kontakt sa podlogom je samo u jednoj tački, tako da je rotacija čitavog sistema oko stopala olakšana. Dok robot „pada unapred” druga noga se premešta u prednji položaj da bi se spremila za kontakt sa podlogom. Istraživači koji se bave pasivnim hodačima analiziraju lokomociju prvenstveno sa ciljem da se minimizuje potrošnja energije i da upravljanje bude što jednostavnije [1-6]. Ovi roboti prilikom hoda troše čak i manje energije nego čovek, za razliku od robota sa aktuiranim zglobovima koji troše za red veličine više energije.

Pasivni hodači kod kojih su svi zglobovi neaktuirani kao izvor energije koriste gravitaciju i mogu da hodaju samo niz blago nagnutu strmu ravan. Osim toga, to su uglavnom ravanski mehanizmi čije se bočno prevrtanje sprečava ili nesrazmerno velikim stopalima (Sl. 3.1a)) ili realizacijom nogu takvom da se svaka noga sastoji od dve istovetne noge koje se zajedno kreću, a međusobno su razmaknute (Sl. 3.1b)).



Slika 3.1 Primeri pasivnih hodača: a) sa širokim stopalima [3] b) sa parom nogu [4]

Manevarske sposobnosti pasivnih hodača su značajno ograničene, ali je potrošnja energije vrlo mala i to predstavlja osnovni motiv za izučavanje ovakvih mehanizama. Za razliku od pasivnih hodača, humanoidni dvonožni roboti sa svim aktuiranim stepenima slobode imaju neuporedivo veći potencijal za kretanje u čovekovom okruženju.



Slika 3.2 „Ted McGeer“-ov pasivni hodač (levo) i „Cornell Ranger“ pasivni hodač (desno)

Tod Mekgir je u radu [5], prvi pokazao, simulaciono i na realizovanom robotu (Sl. 3.2 a)), da je moguće čak i bez upravljanja i aktuacije (pri čemu su gubici usled trenja nadomešteni uticajem gravitacije), realizovati antropomorfan hod niz blago nagnutu strmu ravan. Za razliku od lokomocionih sistema kod kojih je hod zasnovan na

upravljanju kretanjem osnaženih zglobova, hod „*Ted McGeer*“-ovog pasivnog hodača je rezultat dobro usklađenih parametara mehanizma i pogonskog momenta generisanog gravitacijom.

Na Sl. 3.2 b) je predstavljen „*Cornell Ranger*“ čija konstrukcija je detaljno prikazana u [6]. Ovaj robot, za razliku od „*Ted McGeer*“-ovog hodača, poseduje tri aktuatora od kojih se dva koriste za akciju skočnih zglobova, a treći aktuator se koristi za akciju zgloba u kuku. Aktuatori u skočnim zglobovima imaju zadatak da odgurnu robota od podloge svaki put kada noga prelazi u fazu prenosa. Zanimljiva je činjenica da je ovaj robot uspešno hodao 65 km bez zaustavljanja i bez zamene i dopunjavanja baterija [7].

Najveća mana pasivnih hodača je da su parametri hoda tačno određeni mehaničkom konstrukcijom, pa roboti sa pasivnim zglobovima mogu da hodaju samo na jedan način i promena parametara hoda praktično nije moguća. To onemogućava i manevrisanje koje je neophodno ako hoćemo da realizujemo hod u čovekovom okruženju. Samo ova osobina uz nemogućnost da stoje u mestu sa skupljenim nogama je dovoljna da ih eliminiše kao kandidate za hodajuće robote u čovekovom okruženju. Stoga se na dalje u ovom radu neće pominjati pasivni hodači i razmataće se samo dvonožni roboti sa aktuiranim zglobovima.

3.2. Poluinverzni metod

Za sintezu veštačkog hoda humanoidnih robota sa aktuiranim zglobovima, dugo korišćen i još uvek aktuelan pristup je zasnovan na sračunavanju referentnih trajektorija svih zglobova robota koje je kasnije potrebno realizovati što je moguće tačnije. Prvi metod za sintezu dinamički balansiranog hoda robota je poluinverzni metod uveden od strane Vukobratovića i Juričića [8, 9]. Naziv poluinverzni metod je nastao zbog toga što se za deo sistema kretanje u zglobovima zadaje, dok se za ostatak sračunava uz zadovoljavanje dodatnih uslova (uslova ponovljivosti i propisane trajektorije ZMP-a).

Pretpostavimo da je kretanje u zglobovima nogu unapred definisano⁹. Neka postoji n_l zglobova u kojima su propisane trajektorija $\mathbf{q}_l(t)$. I kretanje ruku (n_a zglobova) i vrata (n_n zglobova) se takođe može unapred definisati tako da se ostvari željeno kretanje. Dakle u zglobovima $n_l+n_a+n_n$ kretanje je unapred propisano. Kretanje trupa i dalje nije definisano. Pretpostaviće se da u trupu postoje $n_t=2$ međusobno ortogonalna stepena slobode kojima se vrši rotacija trupa napred-nazad i levo-desno. Da bi se očuvao

⁹ Unapred definisano kretanje nogu može se npr. snimiti sa čoveka i primeniti na robotu.

dinamički balans, kretanje ova dva stepena slobode se može sračunati tako da se obezbedi željeno kretanje ZMP-a unutar oslonačke površine primenjujući uslove date jednačinom (2.4) uz dodatno zadovoljavanje uslova ponovljivosti. Na ovaj način se može odrediti kretanje svih n zglobova ($n=n_1+n_a+n_n+n_t$) čime se dobija referentno kretanje dvonožnog humanoidnog robota.

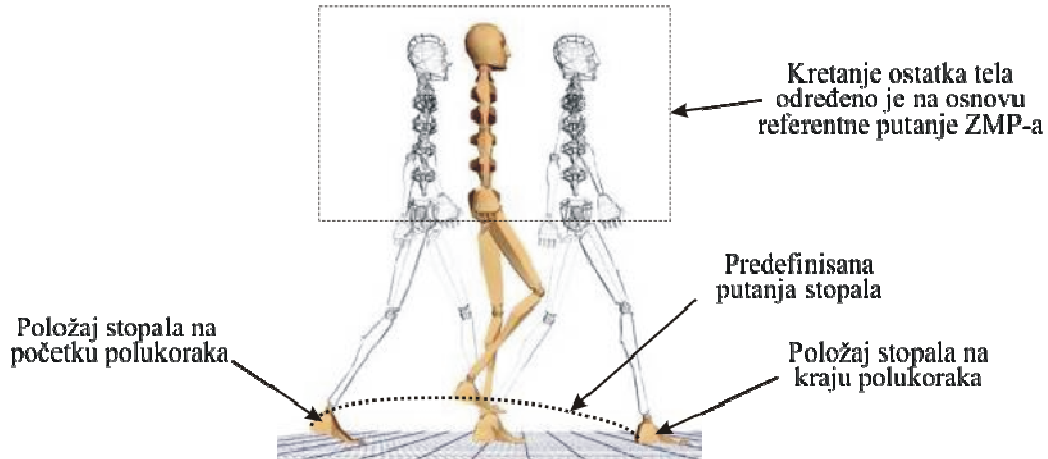
3.3. Ostale metode za sintezu hoda savremenih humanoidnih robota

Najčešće korišćena metoda za generisanje hoda humanoidnih robota se zasniva na propisivanju željenog položaja stopala na podlozi [10-16]. Najpre će biti opisana opšta procedura ove metode, a zatim će biti detaljno date specifičnosti izložene u pojedinim radovima. Procedura za generisanje hoda ovim metodom je sledeća. Prvo je potrebno duž odabrane putanje zadati željene položaje stopala na podlozi i vremenske trenutke kada stopalo robota treba da dostigne zadate položaje. Na osnovu ovih podataka se određuje trajektorija oba stopala. Primenom inverzne kinematike, a na osnovu kinematskog modela robota i trajektorija stopala, se određuju trajektorije uglova u zglobovima nogu. Takođe, na osnovu zadatog položaja stopala i vremenskih trenutaka kada će se oni dostići, zadaje se referentna trajektorija ZMP-a. Bitno je napomenuti da se može odabrati bilo koja putanja ZMP-a, sve dok se ZMP stalno nalazi unutar oslonačke površine. Izbor putanje ZMP-a je važan zadatak jer promena referentne trajektorije ZMP-a utiče na antropomorfnost hoda [18].

Da bi se generisao hod baziran na ovoj metodi potrebno je odrediti putanje u zglobovima $\mathbf{q}_{zelj}(t)$ tako da bude zadovoljena željena putanja ZMP-a $\mathbf{ZMP}_{zelj}(t)$. Pošto su trajektorije zglobova leve $\mathbf{q}_L(t)$ i desne $\mathbf{q}_D(t)$ određene predefinisanim kretanjem stopala, potrebno je odrediti kretanje u ostalim zglobovima $\mathbf{q}_T(t)$ tako da se ostvari željena putanja ZMP-a. Ukoliko je dimenzija vektora \mathbf{q}_T u ostalim zglobovima veća od 3 tada se moraju uvesti dodatna ograničenja da bi se prevazišao problem redundantnosti. U praksi se najčešće uvode ograničenja konstantne visine poze, održavanje trupa u vertikalnom položaju ili uvođenje međusobne zavisnosti u kretanje ostalih zglobova radi ostvarivanja što antropomornijeg hoda [17].

Kao što je već rečeno, većina savremenih humanoidnih robota generisanje hoda ostvaruje propisivanjem željenog položaja stopala na podlozi duž putanje kojom robot treba da hoda uz dodatno obezbeđivanje dinamičkog balansa. Uslov za primenu ove metode je da se sintetizovane trajektorije što tačnije realizuju u zglobovima kako bi se ostvario položaj ZMP-a koji odgovara njegovoj unapred propisanoj referentnoj trajektoriji. Jedina razliku u odnosu na poluinverzni metod Vukobratovića, je da se

umesto trajektorija zglobova nogu propisuju položaji stopala na kraju svakog polukoraka, na osnovu kojih se zatim računaju trajektorije u ostalim zglobovima nogu (ovaj pristup je ilustrovan na Sl. 3.3).



Slika 3.3 Generisanje hoda sa zadatim položajem stopala na kraju polukoraka

Autori su u [10] prikazali metod za propisivanje željenog položaja stopala na podlozi tako da se prilikom kretanja do cilja zaobiđu sve prisutne prepreke. Kretanje je realizovano u okruženju sa statičkim kao i sa pokretnim preprekama ali sa poznatim zakonom po kom se prepreke pomeraju. To znači da se unapred zna položaj svih prepreka u funkciji vremena. Raspored planiranog položaja stopala na podlozi zavisi od rasporeda prepreka kao i od trenutnog stanja humanoidnog robota. Generisanje hoda tako da se izbegnu prepreka se sastoji iz dva koraka. Prvo se prikupljaju informacije o cilju koji treba da se dostigne i o preprekama iz okoline. Na osnovu tih informacija pronalazi se jedno rešenje koje se sastoji od niza akcija koje robot treba da realizuje kako bi stigao do cilja. Zatim se u zadatom vremenskom periodu primenom A* algoritma traže dodatna rešenja optimizovana po parametrima kao što su rastojanje položaja stopala u odnosu na prepreke i izabrane akcije za dolazak do cilja (npr. favorizuje se akcija za hod pravo napred u odnosu na akciju za hod u stranu itd.).

U [11] su autori predstavili još jedan algoritam za *on-line* planiranje položaja stopala. Algoritam kao ulazne podatke koristi skup koji se sastoji od više varijanti diskretnih položaja stopala na osnovu kojih može da se stigne do cilja, mapu okruženja i kriterijumsku funkciju. Sve varijante položaja stopala se zajedno sa mapom okruženja koriste za proveru da li će doći do neželjenog kontakta sa objektima iz okruženjem. Na dalje se koristi samo one varijante koje prođu tu proveru. Ukoliko se rešenje pronade, rezultat je jedna varijanta iz polaznog skupa rasporeda stopala na podlozi za koje je dobijena minimalna vrednost kriterijumske funkcije. Kriterijumska funkcija uzima u obzir

broja koraka potrebnih da se dostigne cilj, odstupanja od hoda pravo i broj koraka koje je potrebno izvesti unazad.

U [12] su autori predstavili *on-line* metodu za generisanje hoda dvonožnog robota gde je za održavanje dinamičkog balansa korišćen regulator koji upravlja kretanjem trupa i karlice u zavisnosti od položaja ZMP-a i od trajektorija u zglobovima nogu. Predloženi algoritam za *on-line* generisanje hoda se sastoji iz dva dela. Prvi deo služi za generisanje trajektorija u zglobovima nogu propisivanjem 3 do 5 planiranih položaja stopala u zavisnosti od zadatih parametara hoda. U isto vreme drugi deo generiše trajektorije u ostalim zglobovima robota tako da se kompenzuju odstupanja ZMP-a usled kretanja nogu.

U radu [13] je prikazano rešenje zadavanja željenog položaja stopala bazirano na kontinuiranoj optimizaciji rasporeda stopala u zavisnosti od zadatka koji robot treba da izvrši. Kretanje robota je određeno rešavanjem inverznog kinematskog problema za virtuelnu strukturu sastavljenu od robota i virtuelne veze sa prethodnim položajima stopala. Generisanje pokreta ovim pristupom obezbeđuje mogućnost istovremene realizacije lokomocije i manipulacije objektima iz okoline što je potvrđeno primerom dohvatanja objekta sa poda tokom hoda robota. U [14, 15] je predložen nov način za brzo planiranje položaja stopala za hod po ravnoj površi uz izbegavanje prepreka. Za izbegavanje prepreka se koristi *off-line* sračunata oblast u kojoj se robot kreće i proverava se da li se unutar te oblasti nalazi bilo koji objekat iz okruženja. Međutim, ovaj pristup je moguće primeniti samo u slučajevima kada je scena statička.

U radu [16] autori su predstavili metodu za generisanja hoda po neravnom terenu zasnovanom na propisanom položaju stopala. Pošto se kretanje ne izvodi po ravnoj površi, oslonačke površine između dva stopala i podloge ne moraju se nalaziti u jednoj ravni. Zbog toga su, umesto ZMP-a i oslonačke površine, uvedeni novi pojmovi CVC (enlg. *Contact Wrench Sum*) i CWC (engl. *Contact Wrench Cone*). U slučaju kada robot hoda po ravnoj podlozi položaj CWS-a se poklapa sa položajem ZMP-a, a CWC se poklapa sa oslonačkom površinom. Generisanje hoda je realizovano zadavanjem položaja stopala i propisivanjem referentne trajektorije CWS-a tako da se stalno nalazi unutar CWC. Zatim se izračunava referenta trajektorija centra mase robota tako da se zadovolji propisana referentna trajektorija CWS-a. Pošto se propisana putanja stopala koristi za izračunavanje trajektorije u zglobovima nogu, preostaje da se trajektorija centra mase robota iskoristi za računanje kretanja segmenata trupa i ruku tako da se zadovolji propisana referentna trajektorija CWS-a.

U radovima [18-20] su prikazana poboljšanja osnovne metode za generisanje hoda propisivanjem željenog položaja stopala. Pri sintezi upravljanja radi očuvanja dinamičkog balansa, lokomocioni mehanizam u jednooslonačkoj fazi je modelovan kao

3D linearno inverzni klatno (engl. *3D Linear Inverted Pendulum Model* (3D LIPM)). 3D LIPM predstavlja uprošćenje dinamičkog modela humanoidnog robota čime se značajno smanjilo vreme za proračun kretanja. Masa i položaj centra mase 3D LIPM modela odgovara masi i položaju centra mase robota, a zglob kojim je inverzno klatno pričvršćeno za podlogu odgovara skočnom zglobov robota. U [20] su autori dodatno unapredili generisanje hoda u realnom vremenu primenom 3D-LIPM modela, uvođenjem regulatora koji koristi informaciju o budućim vrednostim referentne trajektorije ZMP-a (engl. *ZMP preview control*).

U [21] su autori predložili metod za planiranje hoda u realnom vremenu putem kojeg robot može promeniti naredni položaj stopala u svakom koraku. Metod je baziran na analitičkom rešenju inverznog klatna na osnovu kog se računaju parametri polinoma za sračunavanje referentne trajektorije centra mase i ZMP-a. Na početku svakog polukorka se unapred generišu sve potrebne referentne trajektorije za dva puna koraka, a na kraju svakog koraka se ponavlja procedura tako da se uvek generišu trajektorije za jedan novi korak. Kada se ukaže potreba, novi položaja stopala noge se može zadati čim noga iz dvoosloničke pređe u fazu prenosa. Ova promena dovodi do značajnog odstupanja ZMP-a od referentne trajektorije. Odstupanja može da se smanji podešavanjem trajanja jednoosloničke faze. Međutim, na ovaj način se smanjuje odstupanje samo u pravcu hoda, ali značajna odstupanja ostaju prisutna u bočnom pravcu. Za kompenzaciju tog odstupanja uvedeno je upravljanje koje koristi informaciju o budućim vrednostim referentne trajektorije ZMP-a.

Pored metode za generisanje hoda zadavanjem željenog položaja stopala istraživači su se u [22-27] bavili generisanjem kompleksnog kretanja humanoidnog robota na bazi snimljenih pokreta čoveka. Glavni problem, kada robot treba da ponavlja pokrete čoveka tako što direktno ponavlja snimljena kretanja svakog od zglobova, je razlika u kinematskim i dinamičkim parametrima čoveka i robota. S obzirom na ove razlike, snimljeni pokreti čoveka se moraju modifikovati da bi se zadovoljila ograničenja koja su nametnuta kinematskim i dinamičkim parametrima robota. Istraživači su u [25-27] prikazali različite metode kako se snimljene trajektorije zglobova čoveka koji pleše mogu mapirati u kretanja svih zglobova robota pri čemu je reprodukovano kretanje ostalo slično čovekovom, uz dodatni uslov da je dinamički balans stalno očuvan. Uglovi u zgobovima dobijeni na osnovu snimljenog kretanja su modifikovani tako da se ostvari zadati položaj ZMP-a i da se zadovolje kinematska i dinamička ograničenja robota.

Literatura

- [1] Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R., & Wisse, M. (2005). Efficient bipedal robots
-

- based on passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712), 1082-1085.
- [2] Wisse, M. (2004, November). Three additions to passive dynamic walking; actuation, an upper body, and 3D stability. In *Humanoid Robots, 2004 4th IEEE/RAS International Conference on* (Vol. 1, pp. 113-132). IEEE.
- [3] Collins, S. H., & Ruina, A. (2005, April). A bipedal walking robot with efficient and human-like gait. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 1983-1988). IEEE.
- [4] Collins, S. H., Wisse, M., & Ruina, A. (2001). A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7), 607-615.
- [5] McGeer, T. (1990). Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2), 62-82.
- [6] Karssen, J. D. (2007). Design and construction of the Cornell Ranger, a world record distance walking robot. *Internship Final Report*.
- [7] Bhounsule, P. A., Cortell, J., & Ruina, A. (2012, July). Design and control of Ranger: an energy-efficient, dynamic walking robot. In *Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines* (Vol. 23, p. 26).
- [8] Juricic, D., Vukobratovic, M. (1972). Mathematical modeling of a bipedal walking system. In Proc. ASME Winter Annual Meeting (pp. 26-30).
- [9] Vukobratovic, M. (1973). How to control artificial anthropomorphic systems. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (5), 497-507.
- [10] Morisawa, M., Harada, K., Kajita, S., Nakaoka, S., Fujiwara, K., Kanehiro, F., Kaneko, K., Hirukawa, H. (2007, April). Experimentation of humanoid walking allowing immediate modification of foot place based on analytical solution. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 3989-3994). IEEE.
- [11] Chestnutt, J., Lau, M., Cheung, G., Kuffner, J., Hodgins, J., Kanade, T. (2005, April). Footstep planning for the Honda ASIMO humanoid. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 629-634). IEEE.
- [12] Kuffner, J., Kagami, S., Nishiwaki, K., Inaba, M., Inoue, H. (2003, September). Online footstep planning for humanoid robots. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 932-937). IEEE.
- [13] Lim, H. O., Kaneshima, Y., Takanishi, A. (2002). Online walking pattern generation for biped humanoid robot with trunk. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 3111-3116). IEEE.
- [14] Kanoun, O., Laumond, J. P., & Yoshida, E. (2011). Planning foot placements for a humanoid robot: A problem of inverse kinematics. *The International Journal of*
-

Robotics Research, 30(4), 476-485.

- [15] Perrin, N., Stasse, O., Baudouin, L., Lamiroux, F., Yoshida, E. (2012). Fast humanoid robot collision-free footstep planning using swept volume approximations. *Robotics, IEEE Transactions on*, 28(2), 427-439.
 - [16] Perrin, N., Stasse, O., Lamiroux, F., Kim, Y. J., Manocha, D. (2012, May). Real-time footstep planning for humanoid robots among 3D obstacles using a hybrid bounding box. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* (pp. 977-982). IEEE.
 - [17] Vukobratović, M., Borovac, B., Raković, M., Potkonjak, V., Milinović, M. (2008). On some aspects of humanoid robots gait synthesis and control at small disturbances. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(01), 119-156.
 - [18] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2001). The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation. In *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 1, pp. 239-246). IEEE.
 - [19] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2002). A realtime pattern generator for biped walking. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*(Vol. 1, pp. 31-37). IEEE.
 - [20] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.
 - [21] Hirukawa, H., Hattori, S., Kajita, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., Nakaoka, S. (2007, April). A pattern generator of humanoid robots walking on a rough terrain. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2181-2187). IEEE.
 - [22] Pollard, N. S., Hodgins, J. K., Riley, M. J., & Atkeson, C. G. (2002). Adapting human motion for the control of a humanoid robot. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1390-1397). IEEE.
 - [23] A.P. Shon, K. Grochow, and R.P.N. Rao, "Robotic imitation for human motion capture using gaussian processes," in *Humanoid Robots, 2005 5th IEEE-RAS International Conference on*, 2005, pp. 129–134.
 - [24] Grimes, D. and Chalodhorn, R. and Rao, R," Dynamic imitation in a humanoid robot through nonparametric probabilistic inference", *Proceedings of Robotics: Science and Systems*,2006
 - [25] Huang, Q., Yu, Z., Zhang, W., Xu, W., & Chen, X. (2010). Design and similarity evaluation on humanoid motion based on human motion capture. *Robotica*,28(05), 737-745
-

- [26] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirukawa, and K. Ikeuchi, "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances," in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, 2003, pp. 3905–3910.
- [27] Ramos, O. E., Saab, L., Hak, S., & Mansard, N. (2011, October). Dynamic motion capture and edition using a stack of tasks. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2011 11th IEEE-RAS International Conference on* (pp. 224-230). IEEE.

4. Generisanje hoda korišćenjem primitiva

Postojeće metode za generisanje hoda polaze od pretpostavke da su sve trajektorije zglobova sračunat za nekoliko narednih polukoraka [1-8]. To znači da svaka promena u kretanju zahteva da se sve trajektorije u zglobovima od početka preračunaju za novo kretanje. Na primer, ukoliko se detektuje rupa preko koje treba preći realizacijom dužeg iskoraka, sistem za generisanje pokreta mora da računa nove referentne trajektorije¹⁰ koje će realizovati duži polukorak. Nakon toga se ponovo izračunavaju referentne trajektorije za vraćanje na uobičajenu dužinu polukoraka. Ovakav pristup zahteva upravljanje na nivou zglobova koje treba da obezbedi izuzetno precizno praćenje referentnih trajektorija u zglobovima i koje će uspeti da kompenzuje sve prisutne poremećaje. Naravno, ovakav pristup zahteva i velike memorijske kapacitete i procesorsku snagu, dok agilnost pri kretanju kroz nestruktuiranu i dinamičku okolinu nije moguće postići. Stoga postojeće metode za generisanje hoda robota nisu dovoljno efikasne, naročito za kretanje robota u nestruktuiranoj okolini.

4.1. Predlog rešenja i uvedene novine

Za uspešno realizovanje kretanja humanoidnih robota u nestruktuiranoj okolini u tezi je predložena metoda za sintezu hoda koja omogućava da se prilikom realizacije hoda, parametri hoda *on-line* menjaju u zavisnosti od trenutne situacije. Na primer, da bi robot savladao prepreku koja se našla na putanji (Sl. 4.1), potrebno je omogućiti da se podesi dužina koraka kako bi se pred preprekom robot našao u tačno određenom položaju i da zatim podigne nogu u fazi prenosa do potrebne visine kako bi prepreku prekoračio (ukoliko je prepreku moguće prekoračiti). U tom slučaju, treba što pre da se promeni postojeći način hoda i podesi se trenutnim potrebama. Ukoliko robot nije u stanju da prekorači preko prepreke potrebno je da je zaobiđe. I u ovom slučaju treba što pre modifikovati hod i podesiti ga trenutnim potrebama tako što će se modifikovati putanja i

¹⁰ Trajektorije u zglobovima treba da se izračunavaju uz uslov da je dinamički balans očuvan.

promeniti pravac kretanja robota tako da se prepreka zaobiđe i nakon toga da se vrati na prvobitni pravac kretanja (Sl. 4.2).



Slika 4.1 Savladivanja prepreke prelaskom preko prepreke



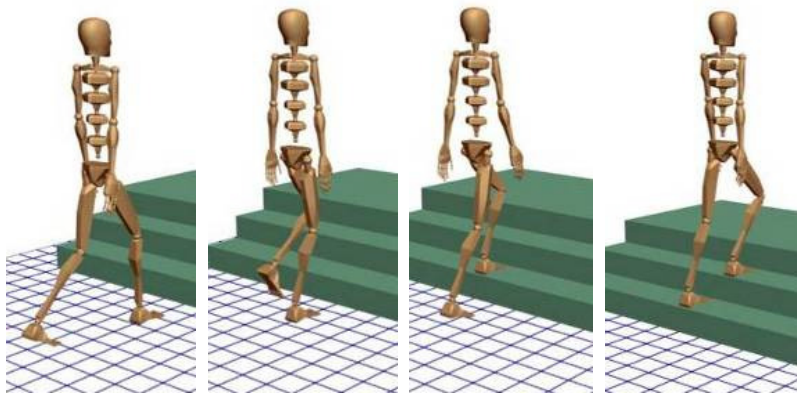
Slika 4.2 Savladivanje prepreke zaobilazanjem

Slična je situacija i u slučaju penjanja uz i silazak niz stepenice. Lako je zaključiti da čovek bez teškoće prelazi iz hoda po ravnoj podlozi na penjanje uz stepenice (Sl. 4.3). Čovek se ne zaustavlja svaki put ispred stepenica pre nego što počne da se penje¹¹, kao što to u ovom trenutku rade roboti. Da bi penjanje uz stepenice moglo da bude realizovano, potrebno je da se u završnom polukoraku hoda stopalo postavi na određeno rastojanje ispred stepenica kako bi se penjanje pravilno započelo i kako bi uobičajenim

¹¹ Roboti na današnjem stepenu razvoja koji su u stanju da se penju na stepenice prvo stanu ispred stepeni-ca, zatim sračunaju neophodne trajektorije za pokretanje nogu, pa tek onda počinju da se penju uz stepenice.

uvežbanim pokretima dovelo stopalo druge noge iznad naredne stepenice. Dakle podešavanje dužine koraka tokom prilaska stepanicama je veoma značajno i čovek to radi tokom nekoliko koraka pre stepenica tako da se to ni ne primećuje. Da bi se robot penjao na stepenice na sličan način potrebno je da upravljački sistem *on-line* može da izmeni parametre hoda (dužinu i brzinu hoda kao i visinu podizanja stopala noge u prenosnoj fazi) kako bi ih prilagodio prelasku sa jedne vrste kretanja na drugu.

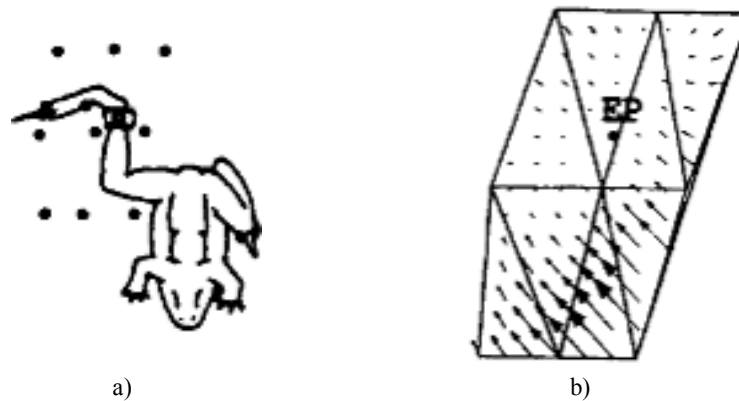
Za prelazak sa realizacije jednog „šablona hoda“ na drugi nije dovoljno samo adekvatno izmeniti kretanje nogu, već se mora prilagoditi kretanje čitavog mehanizma pošto bilo koja izmena kretanja utiče na dinamički balans robota kao celine. Zbog toga, da bi sprečili pad robota, potrebno je na adekvatan način izmeniti kretanje preostalog dela mehanizma. To znači da se trup i ruke robota mogu iskoristiti za realizaciju kompenzacije pa ne smeju da budu „ukočene ili zanemarene“ već treba da se kreću na takav način da „pomognu robotu“ da eliminiše uticaj poremećaja i spreči pad, a da se pri tom zadrži antropomorfnost kretanja u što je moguće većoj meri.



Slika 4.3 Kretanje robota tako da iz hoda pređe na penjanje uz stepenice

Bolji uvid u način na koji neka živa bića generišu pokrete se može naći u radovima [9, 10]. Autori su pokazali na primeru žabe, da električne mikrostimulacije na određenom mestu na kičmenoj moždini dovode do sinergetskog pokreta noge kojim se noga iz različitih početnih položaja pokreće uvek ka jednoj određenoj tački u prostoru. Prilikom realizovanja pokreta meren je intenziteta sile na kraju noge koja se dobija kao rezultat aktivacije mišića. Na Sl. 4.4 je prikazana eksperimentalna postavka sa različitim tačkama u kojima se kraj noge nalazio prilikom aktivacije izabrane tačke kičmene moždine. U trenutku stimulacije je meren intenzitet i pravac generisane sile na osnovu čega je linearnom interpolacijom dobijeno vektorsko polje sile. Ukoliko se stimuliše ista tačka na kičmenoj moždini, noga će bez obzira na trenutni položaj težiti uvek da ode u isti krajnji položaj koji su autori nazvali ravnotežna tačka u radnom prostoru noge. Na Sl. 4.4 b) ta tačka je označena sa EP (engl. *Equilibrium Point*).

Daljim istraživanjem je u [11] pokazano da postoji modularna organizacija lokomocionog sistema za pokretanje nogu koji se stimuliše iz kičmene moždine žabe. Eksperimentom je pokazano da samo nekoliko različitih tipova pokreta može da se generiše menjanjem tačke koja se stimuliše na kičmenoj moždini. Međutim, istovremenom stimulacijom dve ili više tačaka, dobija se sila koja odgovara vektorskom zbiru sila koje se dobijaju kada se stimulacije vrše nezavisno. Dakle, rezultujući pokret noge u slučaju više istovremenih stimulacija je jednostavna kombinacija pokreta dobijenih pojedinačnim stimulacijama. Ovi rezultati potvrđuju pretpostavku da je i kod živih bića moguće sintetizovati kompleksne pokreta kombinovanjem pokreta iz skupa jednostavnih.



Slika 4.4 Prikaz tačaka u radnom prostoru noge u kojima je meren intenzitet sile (a) i vektorsko polje dobijeno linearnom interpolacijom na osnovu izmerene sile u temenima trouglova (b) [9]

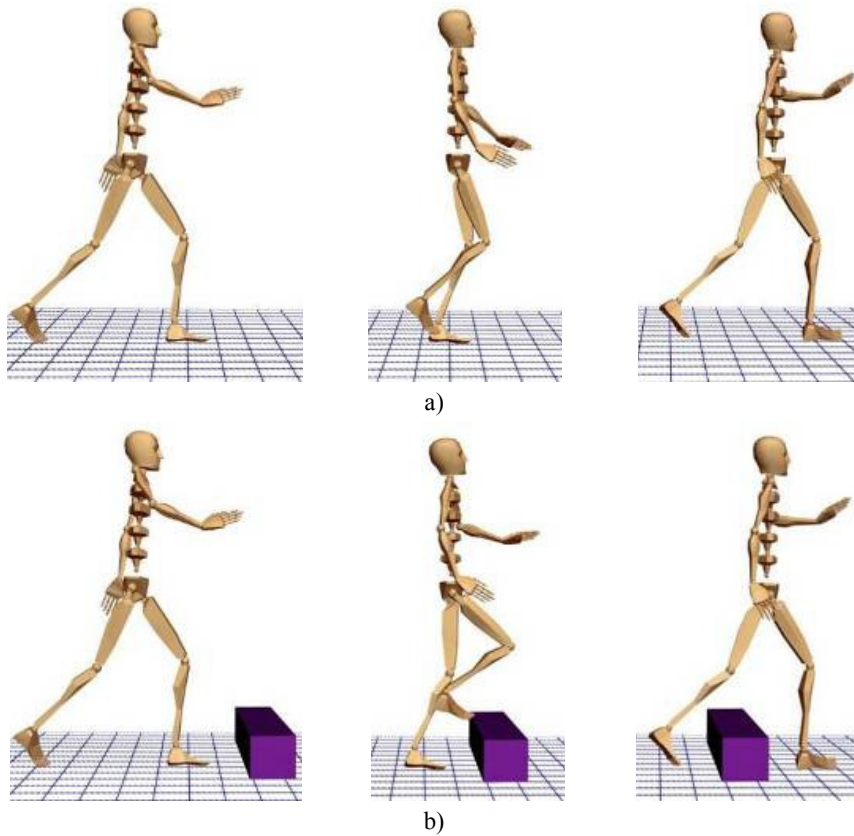
Korišćenje primitiva za generisanje pokreta humanoidnih robota nije potpuno nov pristup, ali razni autori pojam primitiva različito definišu. U [12-14] autori koriste kompleksne pokrete kao primitive (čitav korak, pokret za započinjanje koraka, penjanje uz stepenice itd.). Za generisanje kretanja u [12], autori su koristili biblioteku primitivnih pokreta gde je svaki primitiv jedan korak, a biblioteka primitivnih pokreta zapravo predstavlja skup različitih koraka. Na osnovu postavljenih zahteva i trenutnog stanja robota, svaki put se iz biblioteke bira novi korak koji odgovara trenutnim zahtevima. U [14] je opisan način generisanja baze primitivnih koraka. Baza se sastoji od primitiva, gde je svaki primitiv jedan novi korak za koji je ispunjen uslov periodičnosti. Stoga je kombinovanjem primitiva iz baze moguće ostvariti promenu pravca kretanja, podešavanje dužine koraka i prekoračene preko prepreke. U radu [15] je uveden pojam DMP (engl.: *Dynamic Movement Primitives*) kojim se definiše željeno stanje kinematike ekstremiteta, dobijeno propisivanjem vrednosti uglova, ugaonih brzina i ubrzanja za svaki zglobov robota unapred. DMP može da se opiše i u spoljašnjim koordinatama zadavanjem željenog kretanja poslednjeg segmenta u kinematskom lancu.

Prilaz predložen u ovoj tezi se suštinski razlikuje od prethodno navedenih u nekoliko važnih tačaka. Prvo, kretanje se komponuje od jednostavnih pokreta koji se mogu *on-line* birati i dodavati kako bi se izvršilo nameravano kretanje, a ne od čitavih kompleksnih pokreta koji su pripremljeni unapred. Drugo, svaki primitiv je parametrizovan pa se konkretna forma realizacije podešava trenutnim potrebama i izborom odgovarajućeg parametra se menja *on-line*. Na primer, realizacijom istog primitiva (ali sa različitim parametrima koji se mogu menjati) robot može da podigne nogu do različitih vrednosti uglova u kuku i kolenu iz različitih početnih pozicija. Ukupno kretanje koje robot izvršava se dobija nastavljanjem i kombinovanjem sa drugim primitivima. Treba naglasiti i da se u predloženom rešenju ne zadaju unapred referentne trajektorije koja treba da se izvršavaju, već se zadaju parametri primitiva i redosled izvršavanja primitiva koji određuju kretanje koje će se izvršiti.

Da bi se ilustrovala ideja generisanja i modifikacije pokreta *on-line* pomoću primitiva analiziraće se kretanje robota prikazano na Sl. 4.5 (kretanje je ilustrovano sa tri poze: na početku, sredini i kraju polukoraka). Na Sl. 4.5 a) su prikazane poze robota tokom hoda kada nema prepreke na podu, a na Sl. 4.5 b) je takođe prikazan hod, ali sa preprekom koju je robot prekoračio.

Sintetizovani hod u oba slučaja je potpuno isti, jedina razlika postoji u visini podizanja noge prilikom prekoračivanja preko prepreke. Dakle, nema nikakve razlike u vrsti primitiva koji se izvršavaju, kao ni u redosledu izvršavanja. To znači da robot, za prelazak preko prepreke, treba samo dodatno da podigne nogu, odnosno primitiv za podizanje noge treba realizovati samo sa većom vrednosti parametra koji određuje visinu do koje se podiže noga. Ukoliko je robot u stanju da realizuje primitive tada se pri sintezi pokreta za prelazak preko prepreke (kao i za svaku drugu modifikaciju hoda) ne računaju nove putanje već se samo menjaju parametri određenog primitiva i to od trenutku kada je to potrebno

Bitno je napomenuti da, ukoliko robot može uspešno da realizuje hod ilustrovan na Sl. 4.5 a) to nije garancija da će robot uspešno realizovati i hod ilustrovan na Sl. 4.5 b). Pretpostavimo da se u svim zglobovima sem u zglobovima noge u prenosnoj fazi izvršava identično kretanje u oba slučaja. Zbog razlike u kretanju u zglobovima noge koja se nalazi u prenosnoj fazi menja se dinamika sistema što može dovesti do gubitka dinamički balansa i pada robota. To zapravo znači da je potrebno u upravljačkom sistemu predvideti deo koji stalno vodi računa o dinamičkom balansu robota. Uloga tog dela upravljačkog sistema je da koriguje kretanje u svim zglobovima robota (trup, ruke i noge) tako da se spreči pad robota.



Slika 4.5 Poze tokom hoda u slučaju kada nema prepreke ispred robota (a)
i kada postoji prepreka ispred robota (b)

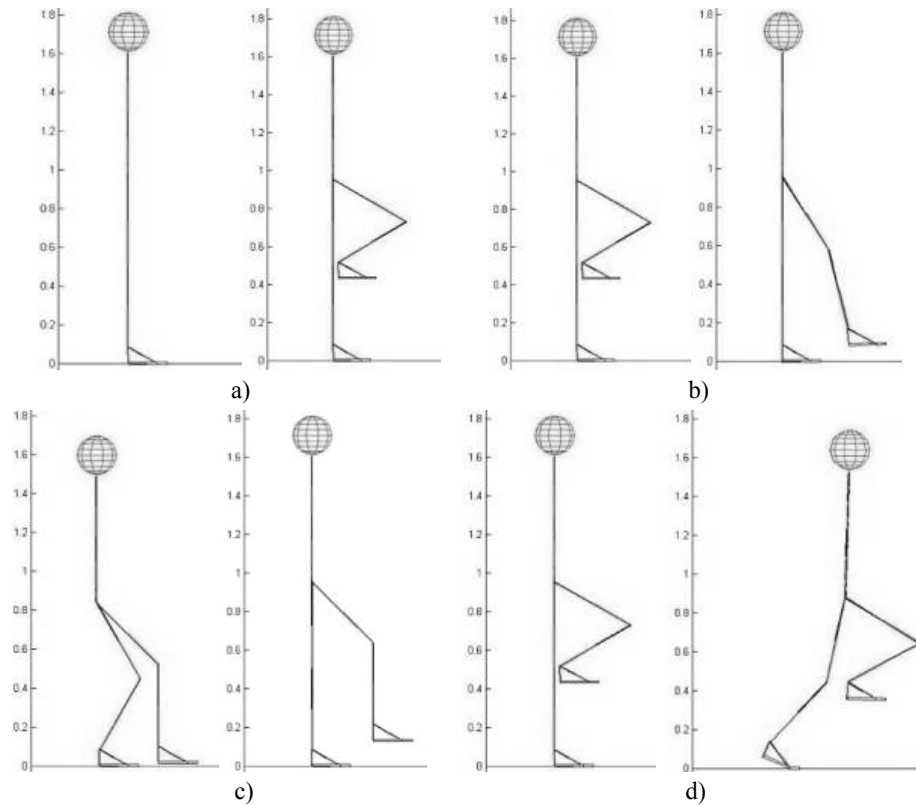
Dakle zadatak upravljačkog sistema humanoidnog robota je da odredi vrednosti upravljačkih veličina koje će dovesti do realizacije željenog kretanja i sprečiti ugrožavanje dinamičkog balansa. Treba imati na umu da je humanoidni robot, tokom izvršavanja pokreta, stalno izložen poremećajima. U [16] su poremećaji koji mogu da se pojave tokom kretanja podeljeni na male i velike na osnovu stepena ugrožavanja dinamičkog balansa. Malim se smatraju oni poremećaji koji ne zahtevaju prekid izvršavanja pokreta, već je poremećaj moguće kompenzovati modifikacijom pokreta koji se već izvršava. Međutim, kada na robot deluje veliki poremećaj, postoji direktna opasnost od pada robota, što zahteva prekid izvršavanja postojećeg kretanja i realizaciju novih, često veoma brzih, pokreta (npr. iskorak) radi očuvanja dinamičkog balansa. Kompenzacija poremećaja (malih i velikih) je posebna problematika koja je detaljno analizirana u [17, 18].

4.2. Pojam i karakteristike primitiva

Prilikom kretanja u nestruktuiranoj okolini, robot bi, kao i čovek trebalo da je u stanju da stalno menja svoj hod: da ga izvodi brže ili sporije, da skreće u stranu, podiže nogu više, produžava i skraćuje korak itd. Čak i kada čoveku dinamički balans nije direktno ugrožen, on realizuje niz pokreta i modifikuje svoje kretanje *on-line*. Na primer, kada čovek naiđe na rupu, na osnovu vizuelne informacije trenutno odlučuje da li rupu prekoračiti ili je zaobići. U slučaju da odluči da je prekorači, čovek realizuje duži iskorak, dok u slučaju zaobilaženja, izvrši skretanje u stranu i naknadno vraćanje na željeni pravac hoda. Da bi se hod generisan primenom primitiva mogao modifikovati, potrebno je omogućiti da se menjaju parametri primitiva koji se koriste za njegovu realizaciju. Prema tome svaki primitiv mora da ima izmenjive parametre koji definišu način na koji se taj primitiv izvršava. To znači da treba omogućiti da se parametri primitiva *on-line* menjaju, kako zbog sinteze novih pokreta, tako i zbog modifikacije pokreta koji robot trenutno izvršava.

U ovoj tezi, za primitive se smatraju jednostavni pokreti koji se ostvaruju simultanim i sinhronizovanim kretanjem više zglobova robota, čiji parametri mogu *on-line* da se menjaju i koji mogu međusobno da se kombinuju. To znači da se primitiv može koristiti u različitim pokretima (podizanje noge se može koristiti i za realizaciju hoda i za penjanje uz stepenice), pri čemu je svaki primitiv parametrizovan. Na primer primitiv za podizanje noge ima parametre: visina do koje se podiže stopalo i brzina realizacije primitiva. Skup primitiva, pomoću kojih robot realizuje osnovne pokrete (koje je i čovek u stanju da realizuje) će poslužiti kao baza za sinteza kompleksnih pokreta odgovarajućim izborom primitiva, podešavanjem njihovih parametara i njihovim kombinovanjem.

Na Sl. 4.6 su prikazani stik dijagrami početne i krajnje poze robota tokom relaizacije nekoliko različitih primitiva, pri čemu se svaki primitiva realizuje aktiviranjem jednog ili više zglobova. Tako, na primer, za podizanje noge aktivirani su zglobovi kuka, kolena i skočnog zgloba noge u prenosnoj fazi. Ovi dijagrami su samo ilustracija nekoliko primera primitiva. Ne postoji nikakvo ograničenje u definisanju novih primitiva kako u broju zglobova koji će biti aktivirani za realizaciju dotičnog primitiva tako i u pogledu broja parametara kojima će primitiv biti opisan. Do skupa primitiva korišćenih u ovoj tezi se došlo analizom i dekompozicijom hoda kojim ćemo se najviše baviti.



Slika 4.6 Stik diagram početne i krajnje poze robota pri realizaciji sledećih primitiva: a) podizanje noge u prenosnoj fazi , b) opružanje noge u prenosnoj fazi, c) opružanje oslonjačke noge, d) naginjanje robota napred

Sada se, na osnovu prethodnih objašnjenja, mogu navesti sledeće karakteristike primitiva:

- izvršavanje primitiva nije uslovljeno trenutnom pozom u kojoj se robot nalazi,
- primitiv je definisan parametarima koji određuju način na koji će se taj primitiv izvršiti,
- parametri primitiva se mogu u toku realizacije samog primitiva menjati i
- više primitiva se može izvršavati paralelno.

Navedene karakteristike ukazuju da robot, kada realizuje hod korišćenjem primitiva, može u bilo kom trenutku (tj. *on-line*) da modifikuje njihove parametre, a time i karakteristike hoda, može da realizuje primitive iz različitih početnih poza i može da

realizuje više primitiva istovremeno. To znači da, na primer, podizanje noge koja je u prenosnoj fazi može da se izvede bez obzira gde se trenutno noga nalazi¹². Ukoliko se tokom podizanja noge uoči prepreka na putu, moguće je trenutno promeniti parametar primitiva koji određuje do koje visine se podiže stopalo. Time će se obezbediti da primitiv koji sledi (to je u slučaju hoda primitiv za opružanje noge), započne svoje izvršavanje iz poze bezbedne za nastavak hoda.

4.3. Sinteza pokreta kombinovanjem primitiva

Pre nego što se pređe na simulaciju kretanja korišćenjem dinamičkog modela humanoidnog robota, prikazaće se mogućnost sinteze hoda kombinovanjem primitiva na kinematskom nivou. U svim simulacijama, bez obzira da li je razmatrana samo kinematika ili i dinamički efekti koji se javljaju prilikom kretanja robota, korišćen je model dvonožnog humanoidnog robota koji je detaljno objašnjen u Dodatku A. Pri simulaciji kretanja, pokreti u zglobovima se ostvaruju zadavanjem napona na krajevima rotora jednosmernog motora sa permanentnim magnetom. Za razmatranje kinematike pokreta, kretanje je realizovano zadavanjem uglova, ugaonih brzina i ubrzanja u zglobovima robota. Na taj način unapred se mogu zadati poze u kojima, tokom hoda, robot treba da se nađe.

Ukoliko razmatramo kinematiku podizanja noge, sa Sl. 4.6 a) se može zaključiti da je amplituda ugla u zglobu kolena suprotnog znaka i približno dva puta veća od amplitude ugla u kuku i skočnom zglobu. Na Sl. 4.7 su prikazane promene ugla u sva tri zgloba. Da bi se mogao menjati parametar primitiva kojim je određen intenzitet podizanja noge (I), krajnje vrednosti ugla u aktiviranim zglobovima se mogu odrediti na sledeći način:

$$q_{\text{kuk_krajnje}} = q_{\text{kuk_min}} + I(q_{\text{kuk_max}} - q_{\text{kuk_min}})$$

$$q_{\text{koleno_krajnje}} = -2q_{\text{kuk_krajnje}}$$

$$q_{\text{skzglob_krajnje}} = q_{\text{kuk_krajnje}}$$

Veličina $q_{\text{kuk_krajnje}}$ predstavlja krajnju vrednost ugla u kuku, veličine $q_{\text{kuk_max}}$ i $q_{\text{kuk_min}}$ određuju opseg dozvoljenih vrednosti ugla u zglobu kuka (ove vrednosti su definisane konstruktivnim parametrima), a veličine $q_{\text{koleno_krajnje}}$ i $q_{\text{skzglob_krajnje}}$ su krajnje vrednosti

¹² Kada robot stoji mirno i treba da započne hod tada se noga, koja treba da se podigne, nalazi pored noge koja će biti oslonjačka, dok se, u slučaju kada robot već realizuje hod, noga pre podizanja nalazi u zadnjem položaju u odnosu na telo.

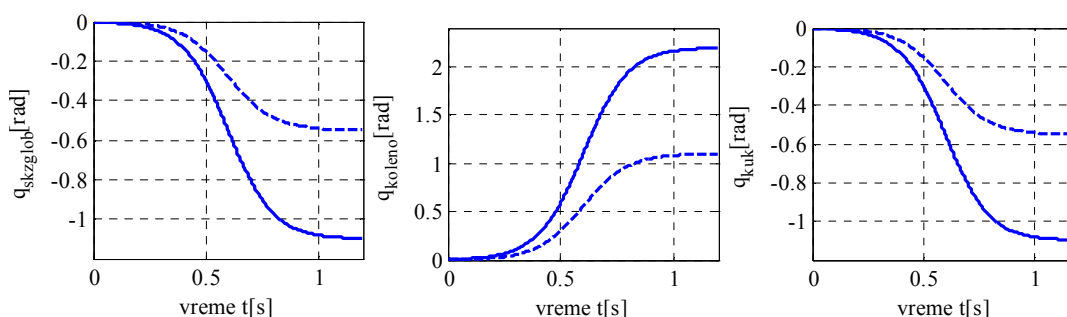
ugla u zglobu kolena i skočnom zglobu respektivno. Parametar primitiva kojim se određuje brzina izvođenja primitiva podizanja noge $t_{\text{Prim_kraj}}$ predstavlja vreme za koje se dostiže krajnja vrednost ugla. Tako se na primer, trajektorija ugla u kuku noge računa na sledeći način:

$$q_{\text{kuk}}(t) = (q_{\text{kuk_krajnje}} - q_{\text{kuk_trenutno}}) \cdot f(t) + q_{\text{kuk_trenutno}}$$

pri čemu je t diskretno vreme. Funkcija f je zadata jednačinom:

$$f(t) = \frac{1}{1 - e^{-2 \cdot \left(\frac{6-t}{t_{\text{Prim_kraj}}} - 3 \right)}}$$

Na Sl. 4.7 su prikazane trajektorije uglova u zglobovima kuka kolena i skočnog zgloba za intenzitete $I=0.5$ i $I=1$. Vreme potrebno da se izvrši primitiv $t_{\text{Prim_kraj}}$ je postavljeno na 1.2s.

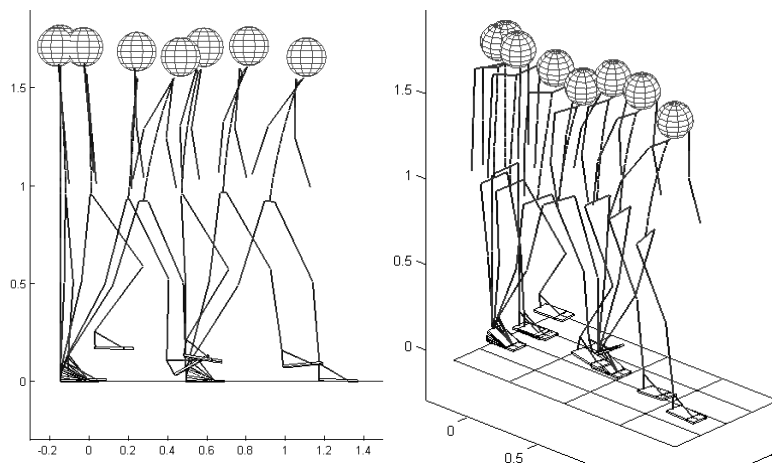


Slika 4.7 Trajektorija ugla u kuku, kolenu i skočnom zglobu za primitiv podizanja noge (isprekidana linija označava trajektoriju za $I=0.5$, a puna linija za $I=1$)

Sada će biti prikazan primer generisanja hoda po ravnoj podlozi koji je dobijen isključivo korišćenjem primitiva. U početnom položaju robot stoji mirno i stopala se nalaze jedno pored drugog. Primitivi koji su korišćeni za pokretanje zglobova leve noge su sledeći. Prvo je realizovano podizanje noge (primitiv sa Sl. 4.6 a)) praćeno primitivom za opuštanje noge u prenosnoj fazi (primitiv sa Sl. 4.6 b)). Kada stopalo leve noge (koja se nalazi u prenosnoj fazi) ostvari kontakt sa podlogom završava se prvi polukorak. Tokom drugog polukoraka realizuju se primitiv za opuštanje oslonačke noge (primitiv sa Sl. 4.6 c)), na koji je nastavljen primitiv za naginjanje robota napred (primitiv sa Sl. 4.6 d)). Generisan korak traje ukupno 4s.

Primitivi koji su korišćeni za pokretanje desne noge su isti, ali su u desnoj nozi prvo primenjeni primitivi za oslonačku nogu (opuštanje oslonačke noge i naginjanje robota napred), a u drugom polukoraku primitivi za nogu u prenosnoj fazi (podizanje i

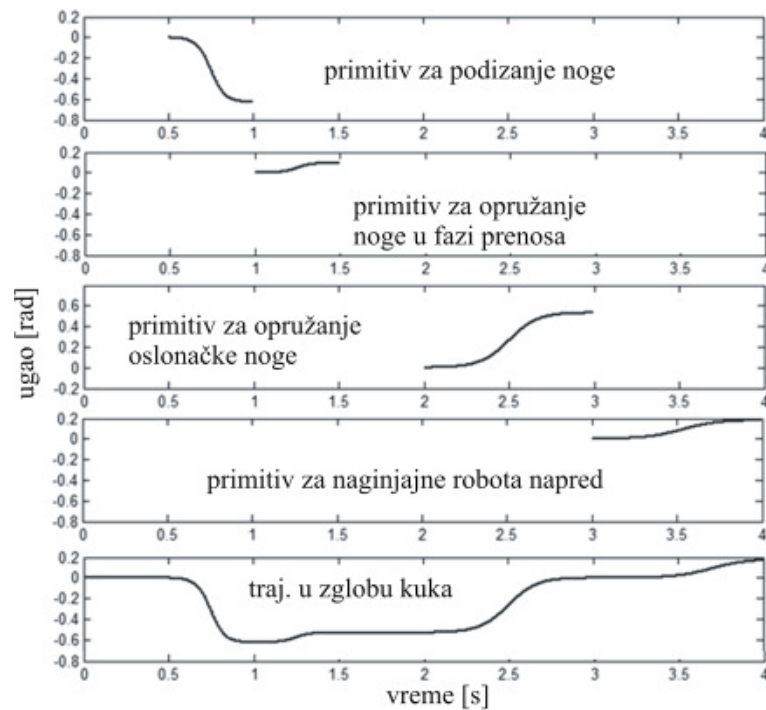
opružanje noge u prenosnoj fazi). Da bi se postigao veći stepen antropomorfnosti kretanje (pre svega tokom hoda) potrebno je uključiti i kretanje ruku i trupa. Zbog toga su uveden primitiv za održavanje trupa u uspravnom položaja i primitiv za njihanje ruku tokom čijeg su izvršavanja obe ruke aktivne. Na Sl. 4.8 je prikazan stik dijagram robota kojim se prikazuje izvršavanja opisanog hoda. U prikazanom primeru je kompletno kretanje sintetizovanom primenom primitivima uključujući i primitive za kretanje ruku i trupa.



Slika 4.8 Realizacija dva polukoraka sintetizovana primenom primitiva

Na Sl. 4.9 je prikazana sintetizovana trajektorija jednog stepena slobode kuka (rotacija oko y ose) kao i trajektorije koje odgovaraju svakom pojedinačnom primitivu. Vreme potrebno za izvršavanje svakog primitiva je podešeno empirijski. Poslednji dijagram predstavlja rezultujuće kretanje u zglobu kuka dobijeno nadovezivanjem primitiva. Sa Sl. 4.9 se vidi da je kombinacijom jednostavnih pokreta moguće dobiti znatno složenije kretanje u jednom zglobu. Ovim primerom je pokazano da je moguće, korišćenjem primitiva, sintetizovati kompleksan pokret, kao što je hod humanoidnog robota.

Ovaj primer je dat samo da bi se ilustrovala osnovna ideja generisanja pokreta korišćenjem primitiva. U prikazanom primeru je dinamičko ponašanje posledica zadatog kretanja i moguće je da dinamika neće biti odgovarajuća. Osim toga, kretanje na realnom robotu se realizuje zadavanjem momenata u zglobovima tj. zadavanjem odgovarajućih napona na polovima motora. Treba uočiti da pogonki momenti, pri realizaciji istog primitiva zavise od trenutne poze mehanizma, npr. od gravitacionog opterećenja, pa time i promena napona motora za istu promenu ugla u zglobu zavisi od trenutne poze robota. To znači da upravljačka vrednost pogona zgloba ne odgovara jednoznačno vrednostima unutrašnjih koordinata u zglobovima robota, pa je jasno da je i to potrebno uzeti u obzir.



Slika 4.9 Trajektorija u kuku oko y-ose za pokret sa Sl. 4.8

Drugim rečima, kada realizuje kretanje, čovek ne razmišlja o trenutnoj vrednosti svakog ugla u zglobovima već adekvatnim aktiviranjem mišića saopštava pogonske momente i realizuje željeni pokret. To znači da robot izvođenje primitiva treba da ostvari zadavanjem adekvatnih upravljačkih napona motorima, mada su u opisanom primeru definisane trajektorije u svim zglobovima što je poslužilo za lakše objašnjavanje koncepta. Međutim, važna osobina realizacije hoda primenom primitiva je da se ne koriste unapred sračunate referentne trajektorije uglova u zglobovima koje treba precizno realizovati, već se trajektorije *on-line* sračunavaju u skladu sa trenutnom situacijom. U nastavku su prikazana dva načina kako da se realizuju primitivi što je verifikovano simulacijom na dinamičkom modelu robota. Osim toga, analizirane su uočene prednosti i mane oba pristupa.

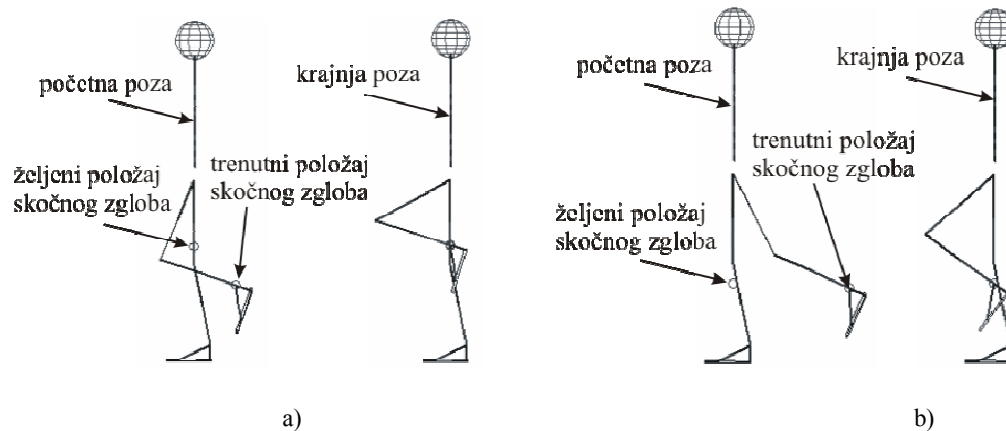
4.4. Realizacija primitiva korišćenjem dinamičkog modela dvonožnog robota

Čak i realizacija jednostavnog kretanja ekstremiteta, zahteva veoma kompleksnu, simultanu i dobro sinhronizovanu promenu pogonskih momenata odnosno napona motora u svim zglobovima. Ovaj zadatak je još kompleksniji ukoliko kretanje treba da se

sintetizuje i realizuje *on-line* na osnovu trenutnog stanja robota i okoline.

U ovom trenutku je važno da se istaknu problemi koji se javljaju pri realizaciji primitiva na dinamičkom nivou. Kada se primitivi kombinuju na kinematskom nivou, samo se vodi računa o obliku (izgledu) kretanja koje treba da se postigne, dok se na dinamičkom nivou zahteva saopštavanje upravljačke promenljive koja će dovesti do realizacije željenog kretanja i čija trajektorija (promena tokom kretanja) ne odgovara geometrijski našoj predstavi o željenom kretanju. Pri tome željeno kretanje nije zadato u vidu referentnih trajektorija u zglobovima već u vidu vrste primitiva koji je potrebno da se realizuje i načina na koji treba da se realizuje.

Takođe, tokom kretanja u nestruktuiranoj okolini nije potrebno da se primitiv izvršava uvek na isti način. Na primer intenzitet i brzina podizanja treba *on-line* da se odaberu (podese) na osnovu trenutnog stanja lokomocionog sistema i okoline. Na Sl. 4.10 su ilustrovana dva primera podizanja noge koji pokazuju da jedan isti primitiv može da se realizuje sa različitim parametrima kretanja i iz različitih početnih položaja. U oba slučaja, mali krugovi označavaju početnu i krajnju poziciju skočnog zgloba noge u prenosnoj fazi. Krajnja pozicija je određena intenzitetom podizanja noge i ukoliko je intenzitet podizanja veći, krajnja pozicija stopala će biti viša.



Slika 4.10 Primer podizanja noge iz različitih početnih poza i sa različitim intenzitetima: a) intenzitet podizanja noge je 91%, b) intenzitet podizanja noge je 50%

Drugi problem koji treba istaći se javlja u slučajevima kada pokret treba da se modifikuje ili kada treba da se započne sa izvršavanjem primitiva dok je robot u pokretu. Pretpostavimo da se tokom izvršavanja primitiva javi situacija u kojoj je robot primoran da prekine izvršavanje jednog primitiva i krene sa realizacijom narednog primitiva. Izvršavanje narednog primitiva treba da se započne odmah kada se javi potreba za njim i nepotrebno je prvo zaustaviti kretanje u zglobovima pa tek onda započeti izvršavanje novog primitiva. Dakle, takva situacija može da se uopšti kao situacija u kojoj primitiv

treba da se izvršava od trenutka u kom ugaone brzine u zglobovima nisu jednake nuli.

Imajući u vidu probleme o kojima treba voditi računa prikazana su dva rešenja za generisanje kretanja na osnovu odabranog primitiva. Prvo je predstavljeno rešenje u kojem robot uči da realizuje primitive sa različitim parametrima primenom potpornih vektora. Drugo rešenje je zasnovano na zadavanju ciljnog položaja i formiranju vektorskog polja brzine kojim se koordinatni sistem vezan za stopala (ili bilo koji drugi segment robota) navodi ka zadatom ciljnom položaju.

4.4.1. Upravljanje realizacijom primitiva primenom potpornih vektora

S obzirom na rezultate u [9, 10], pretpostavlja se da ljudi i životinje nauče samo osnovne pokrete i kada se javi potreba za njima ti pokreti se izvrše sa odgovarajućim parametrima. Sada će se prikazati jedan način učenja pogonskih momenata za realizacije primitiva koji inspirisan rezultatima eksperimenata iz [9]. Predloženo rešenje za određivanje pogonskih momenata u zglobovima koristi potporne vektore (engl. *Support Vector Machine* - SVM) [20]. Zapravo je potrebno pronaći nepoznatu vezu (regresiju) između ulaznih parametara primitiva i pogonskih momenata čijim saopštavanjem se realizuje primitiv koji odgovara oda-branim ulaznim parametrima.

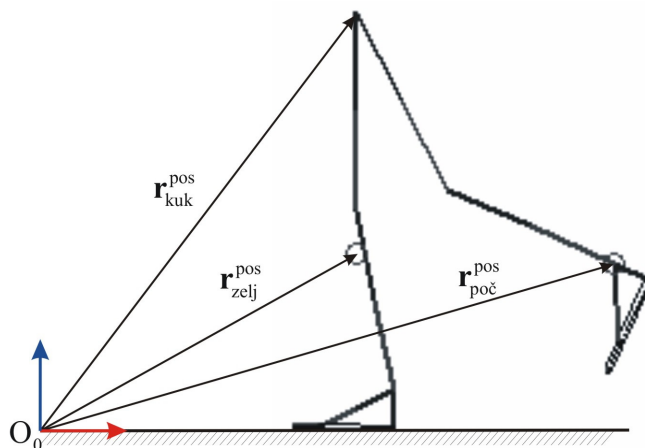
Da bi se primenili algoritmi za učenje potpornih vektora potrebno je da se pripremi skup odgovarajućih ulaznih i izlaznih podataka odnosno skup za obuku SVM-a. U primeru primitiva za podizanje noge u prenosnoj fazi, za ulazne podatke su odabrani: intenzitet podizanja noge I , vremena za koje je potrebno da se primitiv završi $t_{\text{Prim_kraj}}$ i trenutne vrednosti uglova \mathbf{q}_L i ugaonih brzina u zglobovima $\dot{\mathbf{q}}_L$. Izlazni podaci su pogonski momenti u zglobovima kuka i kolena $\boldsymbol{\tau}_L$. To znači da SVM, na osnovu željenog intenziteta I i vremena potrebnog za podizanja noge $t_{\text{Prim_kraj}}$, a na osnovu trenutnog stanja zglobova koji se koriste za realizaciju primitiva \mathbf{q}_L i $\dot{\mathbf{q}}_L$, treba da odredi pogonske momente u zglobovima $\boldsymbol{\tau}_L$ tako da se ostvari željeno i da se to kretanje „glatko“ nastavi na kretanje koje je izvršavano do tog trenutka. Vektori \mathbf{q}_L , $\dot{\mathbf{q}}_L$ i $\boldsymbol{\tau}_L$ sadrže vrednosti uglova, ugaonih brzina i momenata u zglobovima leve noge, tj. u zglobovima koji se koriste za realizaciju primitiva, dok su vektori uglova, ugaonih brzina i pogonskih momenata celokupnog robota označeni sa \mathbf{Q} , $\dot{\mathbf{Q}}$ i \mathbf{T} . Ovi vektori se koriste za definisanje ukupnog dinamičkog modela humanoidnog robota koji je detaljno objašnjen u Dodatku A.

Ulazni podaci I i $t_{\text{Prim_kraj}}$ su parametri na osnovu kojih se određuje način na koji se realizuje primitiv. Stoga se ove vrednosti zadaju dok se svi ostali ulazni i izlazni podaci (\mathbf{q}_L , $\dot{\mathbf{q}}_L$ i $\boldsymbol{\tau}_L$) računaju na osnovu početne poze i kretanja potrebnog da se noga na odabran način dovede u željeni položaj. Noga se na početku pokreta nalazi u pozi koja je

određena početnim položajem skočnog zgloba $\mathbf{r}_{\text{poč}}$ (na Sl. 4.11 je pozicija ovog vektora označena sa $\mathbf{r}_{\text{poč}}^{\text{poz}}$). Željeni položaj skočnog zgloba je označen sa \mathbf{r}_{zelj} i određuje se iz jednačine:

$$\mathbf{r}_{\text{zelj}} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{\text{zelj}}^{\text{poz}} \\ \mathbf{r}_{\text{zelj}}^{\text{or}} \end{bmatrix} = \mathbf{r}_{\text{kuk}} - [0 \ 0 \ (0.9 - 0.8 \cdot I) \cdot d_n \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

gde je \mathbf{r}_{kuk} trenutni položaj zgloba kuka noge koja se podiže, d_n je zbir dužina segmenta nadkolenice i potkolenice, a I je parametar kojim se zadaje intenzitet primitiva u opsegu $[0 \ 1]$. Iz prethodne jednačine se vidi da je z koordinata vektora \mathbf{r}_{zelj} najmanja kada je $I=0$, odnosno najveća kada je $I=1$ što odgovara najvišem položaju noge prilikom podizanja.



Slika 4.11 Vektori pozicije početnog i željenog položaja skočnog zgloba i trenutnog položaja kuka

Da bi odredili uglove \mathbf{q}_L i ugaone brzine $\dot{\mathbf{q}}_L$ u zglobovima nogu tako da se skočni zglob kreće linearno od početnog $\mathbf{r}_{\text{poč}}$ do željenog položaja \mathbf{r}_{zelj} potrebno je prvo odrediti brzinu skočnog zgloba $\mathbf{v}_{\text{SKZ}}(t)$. Brzina skočnog zgloba se određuje na sledeći način. Usvojeno je da profil brzine skočnog zgloba tokom kretanja ima trapezni oblik. Na osnovu vremena $t_{\text{Prim_kraj}}$ za koje je potrebno da se primitiv završi određuje se vreme ubrzavanja i usporavanja. Ova vremena su odabrana da budu po 10% od ukupnog vremena trajanja pokreta $t_{\text{Prim_kraj}}$, dok se u međuvremenu skočni zglob kreće

konstantnom brzinom. Vrednosti parametra $t_{\text{Prim_kraj}}$ se biraju iz opsegu $[t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Min}}, t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Max}}]$ ¹³. Dakle kada je $t_{\text{Prim_kraj}} = t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Min}}$ tada se primitiv izvodi najbrže, a kada je $t_{\text{Prim_kraj}} = t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Max}}$ najsporije. Ukupni put koji treba da pređe skočni zglob je $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{\text{zelj}} - \mathbf{r}_{\text{poč}}$. Maksimalna brzina $\mathbf{v}_{\text{SKZ}}^{\text{MAX}}$ kojom će se kretati zglob iznosi:

$$\mathbf{v}_{\text{SKZ}}^{\text{MAX}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{0.9 \cdot t_{\text{Prim_kraj}}}.$$

Brzina skočnog zgloba se sada može odrediti na osnovu sledeće jednačine:

$$\mathbf{v}_{\text{SKZ}}(t_i) = \begin{cases} \mathbf{v}_{\text{SKZ}}^{\text{MAX}} \cdot \left(\frac{t_i}{0.1 \cdot t_{\text{Prim_kraj}}} \right) & t_i \leq 0.1 \cdot t_{\text{Prim_kraj}} \\ \mathbf{v}_{\text{SKZ}}^{\text{MAX}} & 0.1 \cdot t_{\text{Prim_kraj}} < t_i < 0.9 \cdot t_{\text{Prim_kraj}} \\ \mathbf{v}_{\text{SKZ}}^{\text{MAX}} \cdot \left(\frac{t_{\text{Prim_kraj}} - t_i}{0.1 \cdot t_{\text{Prim_kraj}}} \right) & t_i \geq 0.9 \cdot t_{\text{Prim_kraj}} \end{cases} \quad (4.1)$$

Ukoliko se brzina skočnog zgloba računa na osnovu jednačine 4.1 tada noga kreće iz mirovanja, zatim noga ubrzava tokom 10% vremena zadatog za dostizanje željenog položaja. Nakon dostizanja maksimalne brzine, noga se kreće konstantnom brzinom narednih 80% vremena i na kraju se vrši usporavanje noge tako da se skočni zglob zaustavi u željenom položaju. Sada se na osnovu jednačine:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{L}}(t_i) = \mathbf{J}_{\text{L}}^{-1}(\mathbf{q}(t_i)) \cdot \mathbf{v}_{\text{SKZ}}(t_i) \quad (4.2)$$

moгу odrediti ugaone brzine $\dot{\mathbf{q}}_{\text{L}}$ u zglobovima koji učestvuju u podizanju noge. U jednačini 4.2 matrica \mathbf{J}_{L} predstavlja Jakobijan izračunat za skočni zglob noge kojom se realizuje primitiv. Integracijom i diferencijacijom brzine $\dot{\mathbf{q}}_{\text{L}}$ dobijaju se uglovi \mathbf{q}_{L} i

¹³ Vrednosti veličina $t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Min}}$ i $t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Max}}$ su postavljene na 0.1s i 1s, i one predstavlјaju najkraće i najduže vreme izvršavanja primitiva. Ukoliko se ukaže potreba opseg dozvoljenih vrednosti parametra $t_{\text{Prim_kraj}}$ se može menjati. Ukoliko je neki primitiv potrebno izvršavati jako sporo, $t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Max}}$ se može promeniti na znatno veću vrednost (na primer na 10s).

ugaona ubrzanja $\ddot{\mathbf{q}}_L$. Svi ostali uglovi, ugaone brzine i ubrzanja u matricama \mathbf{Q} , $\dot{\mathbf{Q}}$ i $\ddot{\mathbf{Q}}$ se ne menjaju. Pogonski momenti \mathbf{T} (u koje su uključeni i momenti $\boldsymbol{\tau}_L$) se računaju na osnovu dinamičkog modela robota:

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}(\mathbf{Q}) \cdot \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{h}_0(\mathbf{Q}, \dot{\mathbf{Q}}) - \sum_{i \in S} \mathbf{J}_i^T(\mathbf{Q}) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \boldsymbol{\delta}_i \times \mathbf{F}_i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

gde \mathbf{H} predstavlja matricu inercije sistema, \mathbf{h}_0 predstavlja vektor koji uključuje momente usled brzinskih efekata koji se javljaju u zglobovima i momente koji se javljaju usled gravitacionih sila, S predstavlja indekse tačaka na stopalima osloničke noge koje su u kontaktu sa podlogom, \mathbf{F}_i i $\boldsymbol{\delta}_i$ predstavljaju silu koja se javlja u i -toj kontaktnoj tački i deformaciju viskoelastičnog sloja dok \mathbf{J}_i predstavlja Jakobijan izračunat za i -tu kontaktnu tačku (pogledati Dodatak A). Iz vektora \mathbf{T} je sada moguće izdvojiti pogonske momente $\boldsymbol{\tau}_L$ koji predstavljaju izlazne podatke skupa za obuku SVM-a.

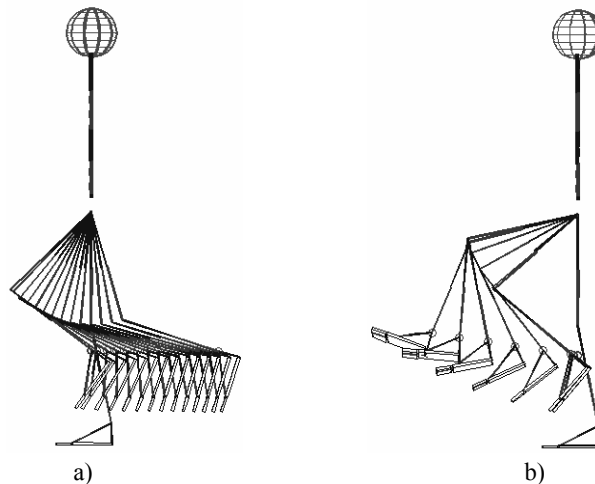
Imajući u vidu da je primitive moguće realizovati iz bilo koje početne poze, skup za obuku treba da sadrži što više različitih početnih položaja noge koji se mogu javiti. Takođe, skup za obuku treba da sadrži što više kombinacija intenziteta i brzine podizanja noge. Procedura za određivanje ulaznih i izlaznih vrednosti skupa za obuku je sledeća:

1. Nasumično se odredi $\mathbf{q}_L(0)$ iz opsega dozvoljenih uglova što predstavlja početnu pozu noge robota;
2. Nasumično se zadaju parametri I i $t_{\text{Prim_kraj}}$ iz opsega $[0-1]$ i $[t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Min}}, t_{\text{Prim_kraj}}^{\text{Max}}]$, čime su određeni intenzitet i vreme za koje treba da se završi primitiv;
3. Na osnovu jednačine 4.1 se izračuna brzina skočnog zgloba $\mathbf{v}_{\text{SKZ}}(t_i)$;
4. Zatim se počinje sa procedurom za određivanje uglova, ugaonih brzina i pogonskih momenata \mathbf{q}_L , $\dot{\mathbf{q}}_L$ i $\boldsymbol{\tau}_L$ u svim diskretnim vremenskim trenucima vremena t_i ¹⁴:
 - Na osnovu poznate brzine skočnog zgloba $\mathbf{v}_{\text{SKZ}}(t)$ u trenutku t_i i na osnovu jednačine 4.2 se računaju ugaone brzine u zglobovima noge $\dot{\mathbf{q}}_L$;

¹⁴ t je diskretno vreme u opsegu od 0 do $t_{\text{Prim_kraj}}$, a dt u ovom slučaju ima vrednost 1ms. t_i je diskretni vremenski trenutak u i -toj iteraciji, odnosno $t_i = i \cdot dt$.

- Nakon toga se računaju uglovi i ugaona ubrzanja \mathbf{q}_L i $\dot{\mathbf{q}}_L$;
- 5. Pošto je definisano kretanje u svim zglobovima robota (tokom ove procedure ostali zglobovi se ne kreću) iz jednačine 4.3 se računaju pogonski momenti \mathbf{T} iz kojih se izdvaja vektor $\boldsymbol{\tau}_L$. Na ovaj način su formirani ulazni i izlazni podaci skupa za obuku SVM-a. Koraci 4 i 5 se ponavljaju za sve vremenske trenutke za koje je sračunata brzina $\mathbf{v}_{SKZ}(t_i)$;
- 6. Kada se noga zaustavi (odnosno kada se dostigne željeni položaj) procedura se ponavlja od prvog koraka i formiranje skupa za obuku se završava kada se prikupi dovoljan broj različitih početnih poza i različitih parametara I i t_{Prim_kraj} .

Opisanom procedurom se zapravo realizuje podizanje noge zadavanjem unutrašnjih koordinata, na osnovu čega se računaju pogonski momenti koji bi doveli do takvog kretanja. Za svaki pokret su u svakom vremenskom odbirku izračunate ulazne i izlazne vrednosti potrebne za učenje SVM-a. Ulazni podaci u SVM su $[I \ t_{Prim_kraj} \ \mathbf{q}_L^T \ \dot{\mathbf{q}}_L^T]^T$ dok su izlazni podaci pogonski momenti $\boldsymbol{\tau}_L$ u zglobovima koji se koriste za realizaciju primitiva. Na Sl. 4.12 su prikazani primeri pokreta koji su ostvareni pri formiranju skupa za obuku. Prikazani su stik dijagrami dva različita primitiva podizanja noge pri čemu se razlikuju intenzitet i vreme potrebno za izvođenja primitiva kao i početna poza iz koje se započinje realizacija primitiva.



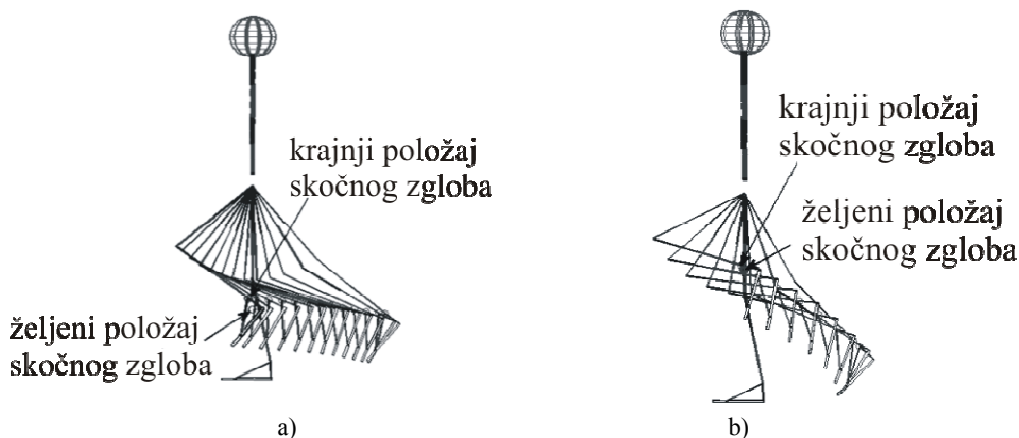
Slika 4.12 Primitiv podizanja noge: a) $I=0.48$, $t_{Prim_kraj}=0.74$ s; b) $I=0.46$, $t_{Prim_kraj}=0.22$ s

Ukupno je realizovano 178 različitih pokreta podizanja noge sa različitim parametrima i iz različitih početnih poza. Tokom izvršavanja tih pokreta prikupljeno je ukupno 100.000 parova ulaznih i izlaznih podataka. Skup za obuku SVM-a je formiran odabirom 10% nasumičnih parova ulaznih i izlaznih podataka iz čitavog skupa. Razlozi

zbog kojih je ovako formiran skup za obuku je objašnjen u [21, 22].

Iz jednačine (4.3) je očigledno da je veza između ulaznih (\mathbf{q}_L i $\dot{\mathbf{q}}_L$) i izlaznih ($\boldsymbol{\tau}_L$) veličina nelinearna. Da bi se odredila veza, primenjena je nelinearna SVM regresija korišćenjem „kernel“ trika. Za funkciju jezgra (engl.: *kernel*) je odabrana RBF funkcija (engl. *Radial Basis Function*), a za normu je odabrana funkcija sa ε -zonom neosetljivosti gde je $\varepsilon = 10^{-15}$ (pogledati Dodatak B).

Nakon završene obuke SVM-a izvršena je provera da li se na osnovu pogonskih momenata dobijenih iz SVM-a ostaruje željeni pokret. Provera je izvršena zadavanjem nasumično odabranih vrednosti intenziteta podizanja noge I i trajanja pokreta $t_{\text{Prim_kraj}}$. Na osnovu ovih podataka i na osnovu trenutnih vrednosti uglova \mathbf{q}_L i ugaonih brzina $\dot{\mathbf{q}}_L$ u zglobovima noge kojom se izvršava primitiv na izlazu iz SVM-a se sračunavaju pogonski momenti koji dovode do pokretanja noge. Početna poza noge je nasumično odabrana tako da bude unutar radnog prostora noge. Na Sl. 4.13 su prikazana dva primera podizanja noge izvedenih saopštavanjem pogonskih momenata dobijenih iz SVM-a. U primeru prikazanom na Sl. 4.13 a) parametar intenziteta podizanja noge I je 0.41, a vreme potrebno da se završi primitiv $t_{\text{Prim_kraj}}$ je 0.69s, dok je u primeri na Sl. 4.13 b) intenzitet podizanja noge I=0.92, a vreme potrebno da se primitive završi je 0.46s.



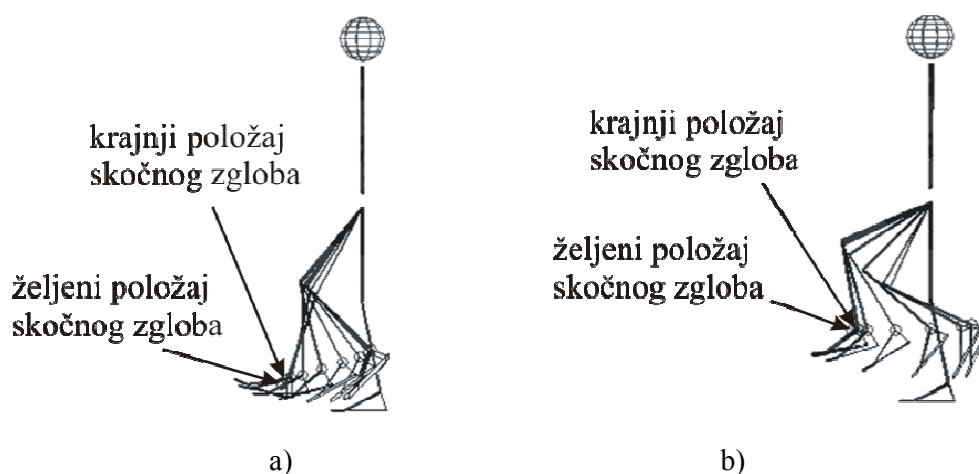
Slika 4.13 Podizanje noge iz različitih početnih poza zadavanjem pogonskih momenata dobijenih iz obučenog SVM-a, a) ulazni parametri su $I=0.41$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.69$ s;

b) ulazni parametri su $I=0.92$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.46$ s

Da bi se izvršila sinteza hoda potrebno je da se nakon podizanja noge (ili čak malo pre nego što se završi ovaj primitiv) započne sa realizacijom primitiva za opuštanje noge. Paralelno sa primitivima koji se izvršavaju nogom u prenosnoj fazi potrebno je

realizovati primitiv za naginjanje tela napred. Stoga je na identičan način, kao u primeru obučavanja SVM-a za podizanja noge, sproveden postupak obučavanje SVM-a koji se koriste pri realizaciji primitiva za opružanja noge i naginjanje tela napred.

Na Sl. 4.14 je prikazan stik dijagram tokom izvršavanja primitiva za opružanje noge. Ovaj primitiv, za razliku od primitiva za podizanje noge ima jedan parameter više. Za opružanje noge se, pored parametra $t_{\text{Prim_kraj}}$ kojim se definiše vreme za koje je potrebno da se primitiv završi, zadaju još dva parametra: D i V. Parametar D određuje koliko će se noga opružiti, a parametar V određuje do koje visine stopalo treba dovesti u odnosu na podlogu.

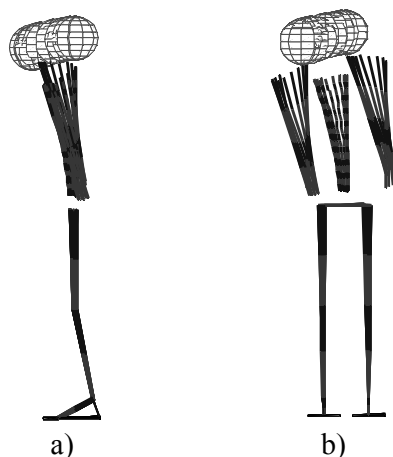


Slika 4.14 Opružanje noge zadavanjem pogonskih momenata dobijenih iz obučenog

SVM-a, a) ulazni parametri su $D=0.91$, $V=0.08$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.42$ s;

b) ulazni parametri su $D=0.76$, $V=0.28$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.28$ s

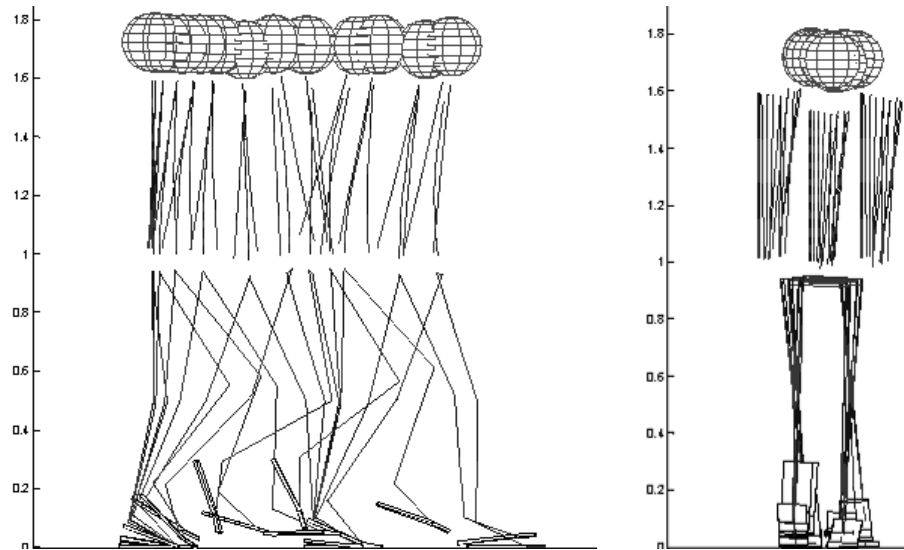
Pored primitiva za podizanje i opružanje noge, bilo je potrebno uvesti i primitiv za naginjanje tela (Sl. 4.15). Uloga primitiva za naginjanje tela je da se tokom dvoosloničke faze opterećenje prebaci na buduću osloničku nogu, a tokom jednoosloničke faze da se opterećenje prebaci ispod segmenta prsta stopala koje je u kontaktu sa podlogom. Primitiv za naginjanje tela ima tri parametra: $t_{\text{Prim_kraj}}$ kojim se definiše vreme za koje je potrebno da se primitiv završi, parametar S, čije se vrednosti zadaju u opsegu $[-1, 1]$, a kojim se određuje intezitet nagnutosti u napred nazad (sagitalna ravan) i parametar K, čije se vrednosti takođe zadaju u opsegu $[-1, 1]$, a kojim se određuje intezitet nagnutosti levo desno (koronalna ravan).



Slika 4.15 Naginjanje tela zadavanjem pogonskih momenata dobijenih primenom obučenog SVM-a, a) ulazni parametri su $S=1$, $K=0$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.58\text{s}$; b) ulazni parametri su $S=0$, $K=1$, $t_{\text{Prim_kraj}}=0.58\text{s}$

Sada će se opisati način na koji su primitivi kombinovani sa ciljem da se sintetizuje hod robota. Početna poza u kojoj se robot nalazi je stajanje u miru na dve noge. Prvi primitiv koji je realizovan je naginjanje tela tako da se projekcija centra mase (PCM) dovede ispod stopala noge koja će biti oslonačka. Kada se ZMP i PCM nađu u delu oslonačke površine koje formira stopalo buduće oslonačke noge sa podlogom, započinje se sa primitivom za podizanje noge. Po završetku podizanja noge prelazi se na opružanje noge u prenosnoj fazi i naginjanje tela napred tako da se PCM nađe u delu oslonačke površi ispod segmenta prstiju stopala oslonačke noge. Kada dođe do kontakta stopala sa podlogom i robot se nađe u dvooslonačkoj fazi ponavlja se izvršavanje svih primitiva ali drugom nogom. To znači da se nakon nastanka dvooslonačke faze prvo izvršava primitiv za naginjanje tela iznad stopala noge koja će biti oslonačka. Kada se ZMP nađe ispod stopala naredne oslonačke noge, započinje se sa primitivom za podizanje (tj. odvajanje od pogloge) druge noge. Nakon završenog podizanja nastavlja se primitiv za opružanje noge i istovremeno naginjanje tela unapred iznad segmenta prsta oslonačke noge. Kada se ponovo uspostavi kontakt stopala sa podlogom time je završen jedan korak. Na Sl. 4.16 je prikazan stik dijagram simulacije hoda koji je sintetizovan na opisani način.

Hod prikazan na Sl. 4.16 je dinamički balansiran, što znači da je položaj ZMP-a stalno unutar oslonačke površine. S obzirom da se tokom realizacije primitiva korišćenih za generiranje hoda ne vodi direktno računa o položaju ZMP-a, uveden je dodatni regulator koji koriguje upravljačke veličine (u ovom slučaju to su pogonski moment u zglobovima robota) radi očuvanja dinamičkog balansa. Pošto će u narednom poglavlju biti prikazan još jedan način za realizaciju primitiva kod kojeg se javlja sličan problem, način na koji se uvodi korekcija za održavanje dinamičkog balansa će detaljno biti opisan u Glavi 5.



Slika 4.16 Hod humanoidnih robota sintetizovan pomoću primitiva koji se izvršavaju primenom obučениh SVM-ova

Tokom realizaciji primitiva primenom SVM-a je uočeno nekoliko nedostataka. Pre svega, tokom formiranja skupa za obuku SVM-a i u fazi provere i upotrebe SVM-a korišćen je isti dinamički model robota. To znači da je dinamički model u potpunosti bio poznat. Međutim, dinamički model realnih robota je nemoguće poznavati tačno, jer se ne može odrediti tačan položaj centra mase svakog segmenta, tačne dužine segmenata itd. Drugi nedostatak realizacije primitiva pomoću SVM-a je uočen kada je trebalo kombinovati više primitiva i nastavljati ih tokom kretanja. Problem koji se javio je najlakše ilustrovati primerom kretanja noge u prenosnoj fazi tokom prebacivanja iz zadnjeg u prednji položaj u odnosu na trup. Tokom tog kretanja je prvo potrebno realizovati primitiv podizanja noge i na njega bez zaustavljanja¹⁵ nastaviti primitiv opružanja noge. U trenutku kada se završi primitiv podizanja i započne primitiv opružanja noge, brzine u zglobovima koji učestvuju u realizaciji primitiva su različiti od nule. Tokom prikupljanja skupa za obuku, noga je uvek mirovala u trenutku kada se započinje realizacija primitiva. Upravo to je razlog zašto se nisu dobili željeni pokreti, kada se pokušalo sa nastavljanjem primitiva bez zaustavljanja noge na početku realizacije primitiva. Naime, kada se nakon podizanja, bez prethodnog zaustavljanja, nastavi sa opružanjem, noga je nastavljala kretanje tako da ono nije odgovaralo primitivu za opružanje noge sa zadatim parametrima i robot je svaki put na kraju pao.

¹⁵ Potpuno je jasno da se pri kraju podizanja, noga ne mora zaustavljati pre opružanja.

Da bi se problem nastavljanja primitiva realizovanih primenom SVM-a rešio, razmotrene su dve opcije. Prva je bilo proširenje skupa za obuku tako da se skup za obuku proširi podacima kod kojih početna brzina noge nije nula, već ima nasumično odabranu vrednost iz skupa dozvoljenih vrednosti. Uvođenjem dodatnih podataka, skup za obuku je postao prevelik i sa postojećim memorijskim kapacitetima nije bilo moguće rešiti izvršiti obuku SVM-a koji bi dao zadovoljavajuće pokrete. Druga opcija je bilo uvođenje korekcije pogonskih momenata tako da se skočni zglobovi usmeri ka željenom položaju. U početnom trenutku noga ima brzinu koja odgovara kretanju noge ka prethodno postavljenom željenom položaju. Kada se promeni primitiv (ili parametri primitiva), menja se i željeni položaj noge, pa brzina kojom se u tom trenutku kreće noga, ne odgovara brzini koja bi dovela nogu u novi željeni položaj. Uvedena korekcija je sračunata primenom PID regulatora, kojim su korigovani pogonski momenti dobijeni iz SVM-a. Korekcija je vršena na osnovu odstupanja pravca vektora brzine skočnog zgloba od pravca koji spaja trenutni i novi željeni položaj stopala.

4.4.2. Upravljanje realizacijom primitiva zadavaljen ciljnog položaja

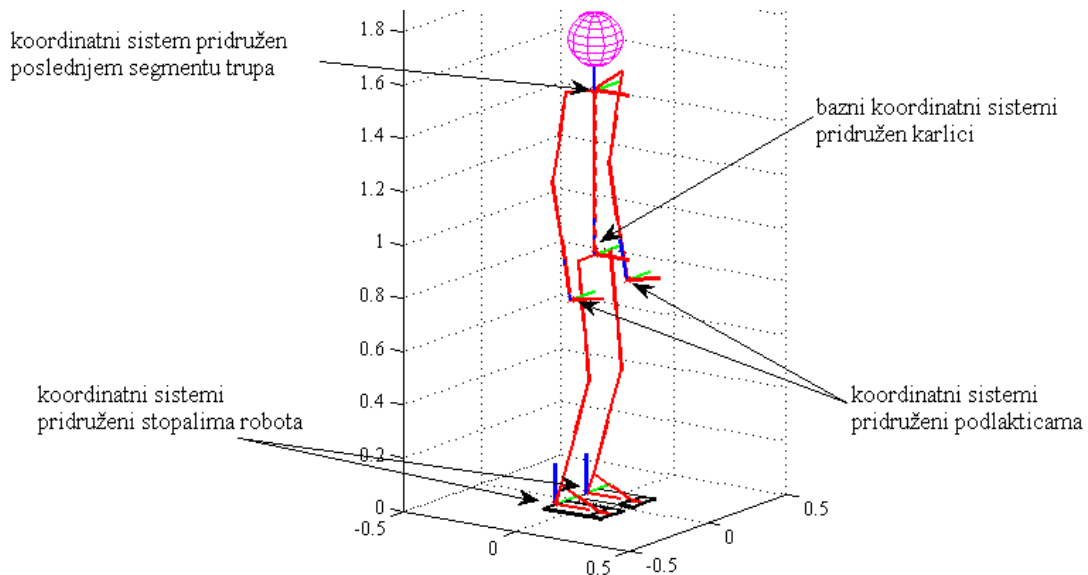
Imajući u vidu problem nastavljanja primitiva bez zaustavljanja koji se javio kod realizacije primenom SVM-a, predloženo je drugo rešenje koje se zasniva na zadavanju ciljnog položaja koji treba dostići. Da bi se postigla željena pozicija i orijentacija u ciljni položaj treba dovesti koordinatni sistem pridružen određenom segmentu robota¹⁶. U nastavku će prvo biti objašnjeno šta se smatra ciljnim položajem i koji koordinatni sistem treba u njega dovesti. Potom će se objasniti postupak za određivanje napon motora \mathbf{u} ¹⁷, tako da se ostvari primitiv sa zadatim parametrima. Ovaj prilaz je posebno pogodan za nastavljanje primitiva bez zaustavljanja. Dodatna prednost realizacije primitiva na ovaj način je da nije potrebno poznavati tačan dinamički model robota.

Pod ciljnim položajem se smatra 6-to komponenti vektor koji određuju poziciju i orijentaciju u koju želimo da dovedemo neki koordinatni sistem. Koordinatni sistem koji treba dovesti do ciljnog položaja je pridružen određenom (pogodnom) segmentu kinematskog lanca kojim treba da se realizuje primitiv. U slučaju primitiva koji se realizuju nogom, taj koordinatni sistem je najčešće (ali ne i obavezno) pridružen

¹⁶ Način na koji se realizuje primitiv nije bitan sve dok su zadržane karakteristike primitiva opisane u poglavlju 4.2.

¹⁷ U Dodatku A se može videti da su u ukupni model robota uključeni modeli motora jednosmerne struje sa stalnim magnetima za pogon osnaženih zglobova. Stoga se za upravljanje kretanjem u zglobovima kao upravljačka veličina zadaje napona koji se dovodi na krajeve rotora.

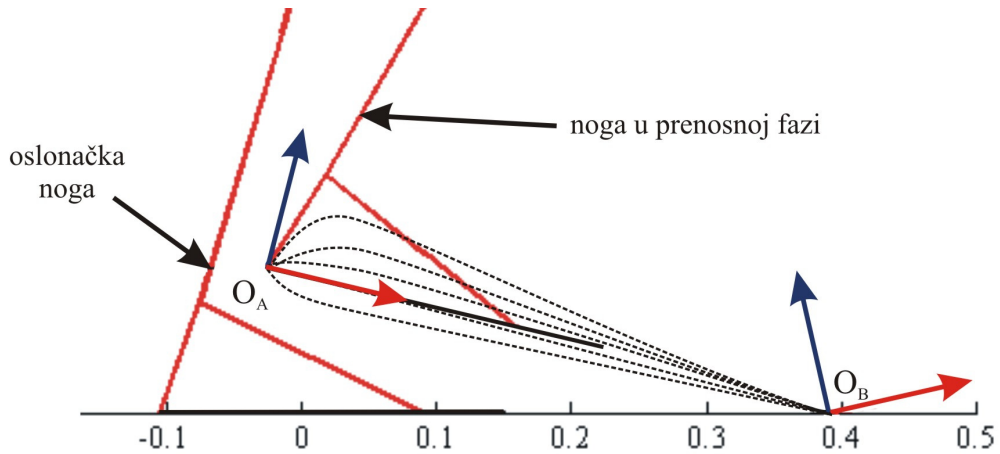
segmentu stopala i u ovom slučaju je postavljen u peti¹⁸. Kod primitiva koji se realizuju trupom koordinatni sistem je pridružen posljednjem segmentu trupa, a u sličaju primitiva koji se realizuju rukama koordinatni sistemi su pridruženi podlaktici i postavljeni su na kraj podlaktice (Sl. 4.17).



Slika 4.17 Položaj koordinatnih sistema korišćenih pri realizaciji primitiva zadavanjem ciljnog položaja

Sada će se objasniti postupak za određivanje upravljačkog napon motora u kojim se realizuje primitiv. Razmatraće se slučaju kada na početku izvršavanja primitiva noga nije u mirovanju. Ova situacija će se objasniti na primeru kada se robot nalazi u jednooslonjačkoj fazi (kao na Sl. 4.18) i zadatak je da se noga u prenosnoj fazi dovede ispred tela. Posmatraće se trenutni položaj koordinatnog sistema O_A (na Sl. 4.18 to je koordinatni sistem koji je pridružen stopalu i postavljen na vrhu pete) i ciljni položaj u koji želimo da ga dovedemo (na Sl. 4.18 označen sa O_B). Ovakvo kretanje se ostvaruje realizacijom primitiva za opružanje noge. Da bi se realizovalo glatko opružanje noge, potrebno je prvo odrediti željenu brzinu s_A koordinatnog sistema O_A , koja zavisi od brzine u trenutku kada se prethodni primitiv završi.

¹⁸ Ukoliko je to potrebno, koordinatni sistem je moguće pridružiti segmentu prstiju, skočnog zgloba ili bilo kom drugom segmentu ukoliko je to u skladu sa zahtevima koje primitiv treba da ispuni.



Slika 4.18 Stik dijagram robota u trenutku kada se započinje opružanje noge u prenosnoj fazi i moguće putanje koordinatnog sistema O_A u zavisnosti od početne brzine s_A^0

Na Sl. 4.18 je isprekidanim linijama prikazan skup mogućih putanja O_A do ciljnog položaja O_B u zavisnosti od početne brzine. Sa slike se vidi da se formira familija putanja koje spajaju O_A i O_B ¹⁹. Za određivanje željene brzine s_A krenuće se od pretpostavke da, u trenutku $t_{\text{prim_start}}$, kada se započinje sa opružanjem noge, stvarna brzina s_A^0 koordinatnog sistema O_A , može biti bilo kog intenziteta i smera. Sa \mathbf{r}_A i \mathbf{r}_B su označeni vektori koji određuju položaj koordinatnih sistema O_A i O_B . Vektori \mathbf{r}_A i \mathbf{r}_B imaju šest komponenti pa se mogu zapisati na sledeći način:

$$\mathbf{r}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_A^{\text{poz}} \\ \mathbf{r}_A^{\text{or}} \end{bmatrix} \text{ i } \mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \text{poz } \mathbf{r}_B \\ \text{or } \mathbf{r}_B \end{bmatrix}.$$

Vektor \mathbf{r}_A zavisi od trenutne vrednosti unutrašnjih koordinata robota, dok \mathbf{r}_B zavisi od parametara primitiva. Zbog jasnoće izlaganja će u ovom trenutku vektori \mathbf{r}_A i \mathbf{r}_B biti izraženi u globalnom koordinatnom sistemu. Međutim, ukoliko su tokom realizacije primitiva vektori \mathbf{r}_A i \mathbf{r}_B zadati u globalnom koordinatnom sistemu to bi značilo da se mora stalno računati trenutna pozicija i orijentacija koordinatnog sistema pridruženog

¹⁹ Ukoliko se umesto familija putanja ucrtaju vektori linearnih brzina koje navode O_A do ciljnog položaja O_B , formiraće se vektorsko polje brzina.

baznom segmentu²⁰ (ovaj koordinatni sistem će se u nastavku nazivati baznim koordinatnim sistemom i biće označen sa O_{Bazni}). Precizno računanje trenutnog položaja koordinatnog sistema O_{Bazni} nije moguće na realnom robotu pa se zbog toga, prilikom uvođenja svakog primitiva vodilo računa o tome da se jedino z-komponenta ciljnog položaja \mathbf{r}_B može zadati relativno u odnosu na podlogu (tj. globalni koordinatni sistem), dok se sve ostale komponente vektora \mathbf{r}_B zadaju relativno u odnosu na bazni koordinatni sistem. Zadavanje z-komponente vektora \mathbf{r}_B u globalnom koordinatnom sistemu je moguće samo ukoliko je stalno očuvan dinamički balans robota. U tom slučaju je stopalo, koje ostvaruje površinski kontakt, u ravni sa podlogom ($z=0$) pa je moguće odrediti z-komponentu u globalnom koordinatnom sistemu svih ostalih segmenata robota.

Kao što je već rečeno, sa $\mathbf{s}_A(t_i)$ je označena željena brzina koordinatnog sistema O_A u trenutku t_i . Vektor \mathbf{s}_A takođe ima šest komponenti i može se zapisati sa:

$$\mathbf{s}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_A \\ \boldsymbol{\omega}_A \end{bmatrix}.$$

Vrednosti \mathbf{v}_A i $\boldsymbol{\omega}_A$ određuju željenu linearnu i ugaonu brzinu koordinatnog sistema koji je pričvršćen za petu. Da bi se obezbedila glatka promena tokom realizacije ili nastavljanja primitiva, za računanje željene brzine stopala \mathbf{s}_A uvedena je sledeća jednačina:

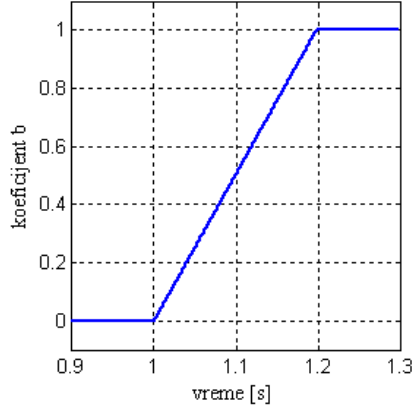
$$\mathbf{s}_A(t_i) = (1-b(t_i)) \cdot \mathbf{s}_A^0 + b(t_i) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{int}} \cdot \Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{pos}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} \cdot \Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{or}} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

U jednačini (4.4), $\Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{pos}}$ i $\Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{or}}$ su ortovi vektora $\Delta \mathbf{r}^{\text{pos}} = \mathbf{r}_B^{\text{pos}} - \mathbf{r}_A^{\text{pos}}$ i $\Delta \mathbf{r}^{\text{or}} = \mathbf{r}_B^{\text{or}} - \mathbf{r}_A^{\text{or}}$, odnosno razlike u poziciji i orijentaciji između koordinatnih sistema O_A i O_B . U jednačini (4.4) koeficijent b se menja tokom vremena tako da se obezbedi postepena promena brzine $\mathbf{s}_A(t)$ od početne vrednosti \mathbf{s}_A^0 do brzine koja će voditi koordinatni sistem O_A ka ciljnom položaju. Koeficijent b se računa po formuli:

²⁰ Za bazni segment je odabrana karlica i položaj baznog koordinatnog sistema O_{Bazni} se može videti na Sl. 4.17.

$$b(t_i) = \text{satlin} \left(\frac{t_i - t_{\text{Prim_start}}}{0.2 \text{ s}} \right),$$

gde je satlin linearna funkcija sa saturacijom. Na Sl. 4.19 je prikazana promena koeficijenta b u slučaju kada je $t_{\text{Prim_start}} = 1 \text{ s}$.



Slika 4.19 Promena koeficijenta b u slučaju kada je $t_{p0}=1 \text{ s}$

Sa Sl. 4.19 se vidi da se koeficijent b linearno menja od 0 do 1. Kada je $b=0$ tada se iz jednačine (4.4) vidi da je brzina $\mathbf{s}_A(t_i)$ jednaka početnoj brzini \mathbf{s}_A^0 . Kako vreme teče, koeficijent b postepeno raste dok ne dostigne vrednost 1. Kada je $b=1$, tada brzina $\mathbf{s}_A(t_i)$ postaje:

$$\mathbf{s}_A(t_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{int}} \cdot \Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{pos}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} \cdot \Delta \mathbf{r}_{\text{ort}}^{\text{or}} \end{bmatrix}.$$

Intenziteti linearne i ugaone brzine v_{int} i ω_{int} zavise od brzine krstarenja v_{kr} i ω_{kr} koji su određeni parametrima primitiva. Da bi se obezbedila postepena promena brzine $\mathbf{s}_A(t_i)$, intenziteti linearne i ugaone brzine v_{int} i ω_{int} se određuju na sledeći način:

$$\mathbf{v}_{\text{int}} = \begin{cases} v_{\text{int}} + dv_{\text{int}} & \text{ako je } v_{\text{int}} < v_{\text{kr}} - dv_{\text{int}} \\ v_{\text{int}} - dv_{\text{int}} & \text{ako je } v_{\text{int}} > v_{\text{kr}} + dv_{\text{int}} \\ v_{\text{kr}} & \text{ako nisu ispunjena prethodna dva uslova} \end{cases}, \quad (4.5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{int}} = \begin{cases} \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} + d\boldsymbol{\omega}_{\text{int}} & \text{ako je } \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} < \boldsymbol{\omega}_{\text{kr}} - d\boldsymbol{\omega}_{\text{int}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} - d\boldsymbol{\omega}_{\text{int}} & \text{ako je } \boldsymbol{\omega}_{\text{int}} > \boldsymbol{\omega}_{\text{kr}} + d\boldsymbol{\omega}_{\text{int}} \\ \boldsymbol{\omega}_{\text{kr}} & \text{ako nisu ispunjena prethodna dva uslova} \end{cases}$$

gde vrednosti dv_{int} i $d\omega_{int}$ iznose 0.01m/s i 0.01rad/s i usvojene su probanjem. Korekcije brzina v_{int} i ω_{int} se po prethodnoj formuli vrše u svakoj iteraciji simulacije. Pošto je vreme između dve iteracije $\Delta t=0.667ms$, dobija se da linearno i ugaono ubrzanje iznose $1.51m/s^2$ i $1.51rad/s^2$. Primenom jednačine (4.5) je, u slučaju *on-line* promene brzine krstarenja, obezbeđena postepena promena intenziteta linearne i ugaone brzina koordinatnog sistema O_A .

Da bi se obezbedilo i kontinualno zaustavljanje noge potrebno je adekvatno smanjiti intenzitete brzina v_{int} i ω_{int} kada se O_A dovoljno približi ciljnom položaju O_B . Uslov da se započne usporavanje je zadat u zavisnosti od brzine kojom se kreće stopalo, jer veća brzina zahteva duže zaustavljanje. U slučaju opružanja noge, postepeno smanjivanje brzina v_{int} i ω_{int} započinje kada su ispunjeni uslovi $v_{int} > 100 \cdot |\Delta \mathbf{r}^{pos}|$ i $\omega_{int} > 100 \cdot |\Delta \mathbf{r}^{or}|$. Na primer ukoliko je intenzitet linearne brzine stopala $v_{int} = 1m/s$, zaustavljanje počinje kada je rastojanje O_A do O_B manje od 0.01m. Tokom usporavanja, brzine v_{int} i ω_{int} se određuju iz jednačina:

$$\begin{aligned} v_{int} &= 100 \cdot |\Delta \mathbf{r}^{pos}| \\ \omega_{int} &= 100 \cdot |\Delta \mathbf{r}^{or}| \end{aligned}$$

Pošto je poznato kako se određuje brzina $\mathbf{s}_A(t_i)$, sada se mogu odrediti željene ugaone brzine u zglobovima noge $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_j}$. To je moguće uraditi primenom sledeće jednačine:

$$\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_j}(t_i) = \mathbf{J}_A^+ \left(\mathbf{q}^{S_j} \right) \cdot \mathbf{s}_A(t_i), \quad (4.6)$$

gde je \mathbf{J}_A^+ Mur-Penrouz-ov (engl. *Moore-Penrose*) pseudo-inverzni Jakobijan izračunat za segment za koji je vezan O_A . Vektori \mathbf{q}^{S_j} i $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_j}$ predstavljaju uglove i željene ugaone brzine u zglobovima noge koji učestvuju u realizaciji primitiva. Skup S_j sadrži indekse zglobova koji učestvuju u realizaciji primitiva. Za svaki primitiv je moguće birati koji zglobovi se koriste tokom njegove realizacije. Na primer, tokom opružanje noge kreću se svi zglobovi noge sem zgloba između tela stopala i prstiju. Ugaone brzine u ostalim zglobovima se ne menjaju ili se mogu menjati usled simultanog izvršavanja nekog drugog primitiva. Ta znači da su ostale ugaone brzine ili postavljene na 0 ili su određene iz drugih primitiva. Na osnovu opisane procedure se u svakom trenutku, za k primitiva koji se trenutno izvršavaju, mogu odrediti ugaone brzine $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_1}, \dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_2} \dots \dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_3}$. Za sada se istovremeno ne mogu izvršavati dva primitiva koji koriste iste zglobove, ali je plan za

budući rad da se uvede mogućnost da se jedan zglob može koristiti od strane dva ili više primitiva istovremeno, npr. uvođenjem prioriteta između primitiva.

U prethodnom poglavlju smo već napomenuli da se primitivi služe za realizaciju određenih funkcionalnih pokreta (koji moraju biti ostvareni baš u takvom obliku), pa se tokom njihove realizacije ne vodi računa o dinamičkom balansu odnosno o položaju ZMP-a kao ni o položaju zglobova koji nisu uključeni u realizaciju primitiva. Stoga se pri upravljanju kretanjem čitavog robota koriste regulatori koji vode računa o robotu kao celini, tj. o dinamičkom balansu i o opštoj pozi robota. Ovi regulatori su uvedeni tako da se dodaje korekcija na ugaone brzine u zglobovima $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}(t)$ koje su dobijene iz jednačine (4.6) za svaki primitiv koji se trenutno izvršava. Nakon dodate korekcije dobija se referentna brzina u zglobovima:

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref}(t_i) = \dot{\mathbf{q}}_{zelj}(t_i) + \Delta\dot{\mathbf{q}}_{kor} \quad (4.7)$$

Način na koji se formira korekcija $\Delta\dot{\mathbf{q}}_{kor}$ će detaljno biti objašnjen u glavi 5. Da bi robot, čiji su zglobovi pogonjeni motorima, ostvario kretanje zadato jednačinom (4.7) primenjeni su PID regulatori za svaki zglob. Stoga se upravljački naponi za motore $\mathbf{u}(t)$ izračunavaju po formuli:

$$\mathbf{u}(t_i) = \mathbf{u}(t_{i-1}) - \left(\mathbf{K}_P \cdot \Delta\dot{\mathbf{q}}_e(t_i) + \mathbf{K}_I \cdot \sum_{k=1}^i \Delta\dot{\mathbf{q}}(t_k) + \mathbf{K}_D \cdot (\Delta\dot{\mathbf{q}}(t_i) - \Delta\dot{\mathbf{q}}(t_{i-1})) \right) \quad (4.8)$$

gde je $\Delta\dot{\mathbf{q}}(t_i)$ razlika između referentne i trenutne vrednosti ugaonih brzina u zglobovima robota, a \mathbf{K}_P , \mathbf{K}_I i \mathbf{K}_D su matrice sa koeficijentima proporcionalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva PID regulatora.

Za sintezu hoda bilo je potrebno uvesti 5 različitih primitiva koji se realizuju nogama, jedan primitiv koji se realizuju trupom i i jedan koji se realizuje rukama. Primitivi koji se realizuju nogama su podeljeni u dve grupe. To su primitivi koji se realizuju kada se robot nalazi u dvoosloničkoj i jednoosloničkoj fazi.

Primitivi koji se realizuju kada se robot nalazi u jednoosloničkoj fazi su:

- odvajanje stopala od podloge (podizanje noge),
- opružanje noge i
- naginjanje tela unapred.

Primitivi koji se realizuju tokom dvoosloničke faze su:

- naginjanje tela na osloničku nogu i

- rotacija stopala oko pete radi ostvarivanja površinskog kontakta (spuštanje stopala).

Primitivi koji se realizuju trupom i rukama su:

- održavanje trupa u uspravnom položaju i
- kretanje ruku tokom hoda.

4.5. Opis uvedenih primitiva

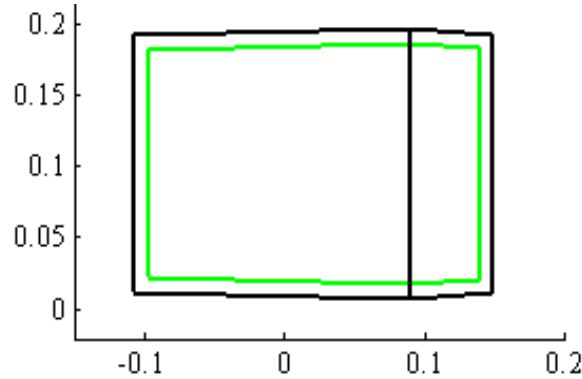
Za svaki primitiv su propisani uslovi kada može da se započne sa izvršavanjem i kada je primitiv završen. Takođe svaki primitiv ima skup parametara (označenih sa C) koji jednoznačno određuju ciljni položaj i brzinu kojom se izvršava. Osim toga su uvedene i dodatne oznake. U donjem desnom uglu uz oznaku C se unosi skraćenica primitiva na koji se parametar C odnosi (npr. PN za podizanje noge, C_{PN}). U gornjem levom uglu se unosi oznaka kojom se definiše na koju osobinu primitiva dotični parametar utiče (npr. oznakom $^{Brzina}C_{PN}$ se definiše da ovaj parametar utiče na brzinu izvođenja primitiva). U gornjem desnom uglu se unosi oznaka u kojoj fazi hoda se dotični primitiv izvršava (npr. parametar $^{Brzina}C_{PN}^{Faza_2}$ se odnosi na fazu dva, tj. opružanje noge i pripremu za dvoosloničku fazu). I na kraju, bilo je potrebno da se definiše osnovni hod u odnosu na koji će se posmatrati modifikacije. Zbog toga se u levom donjem uglu unosi oznaka o kakvom hodu se radi (oznaka $^{Brzina}_{OH}C_{PN}^{Faza_2}$ označava da se radi o osnovnom hodu). U nastavku sledi opis svakog primitiva sa prikazom stik dijagrama koji ilustruje kretanje robota tokom izvršavanja primitiva.

4.5.1. Podizanje noge (PN)

Uloga primitiva je da odvoji stopalo od podloge i dovede ga dovoljno visoko da tokom prenosne faze ne dođe do zapinjanja stopala za prepreku ili pod. Tokom realizaciji ovog primitiva aktivirana su 3 stepena slobode u zglobu kuka, 1 stepen slobode u kolenu i 3 stepena slobode u skočnom zglobu noge koja se nalazi u prenosnoj fazi. Stepen slobode između segmenta prstiju i tela stopala ne učestvuje u realizaciji ovog primitiva. Uslov za početak realizacije primitiva za podizanje desne noge²¹ je da se leva noga

²¹ Radi lakšeg izlaganja će se opisati realizacija primitiva za podizanje desne noge, pri čemu je leva noga oslonička. Kada se podiže leva noga realizacija je istovetna pa se stoga neće odvojeno opisivati realizacije istog primitiva obema nogama.

nalazi u kontaktu sa podlogom. Ovaj uslov je ispunjen ukoliko su bar 3 kontaktne tačke stopala leve noge u kontaktu sa podlogom. Pored toga, uslov je i da se PCM (projekcija centra mase robota) i ZMP nalaze unutar bezbednog dela oslonačke površine²² (Sl. 4. 20) koje levo stopalo formira sa podlogom. Ako se ZMP sasvim približi ivici stopala dovoljni su veoma mali poremećaji da dovedu do prevrtanja sistema.



Slika 4.20 Oslonačka površina (crna linija) i bezbedna zona unutar oslonačke površine (zeleno linija) kada je svih šest tačaka jednog stopala u kontaktu sa podlogom

Parametri primitiva za podizanje noge su $Brzina_{C_{PN}}$, $Visina_{C_{PN}}$ i $Pravac_{C_{PN}}$. Parametar $Brzina_{C_{PN}}$ određuje brzinu izvršavanja primitiva odnosno brzine krstarenja v_{kr} i ω_{kr} koordinatnog sistema O_A koji je pridružen stopalu desne noge i nalazi se na vrhu pete (Sl. 4.21). Brzine krstarenja su:

$$\begin{aligned} v_{kr} &= Brzina_{C_{PN}} \\ \omega_{kr} &= Brzina_{C_{PN}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

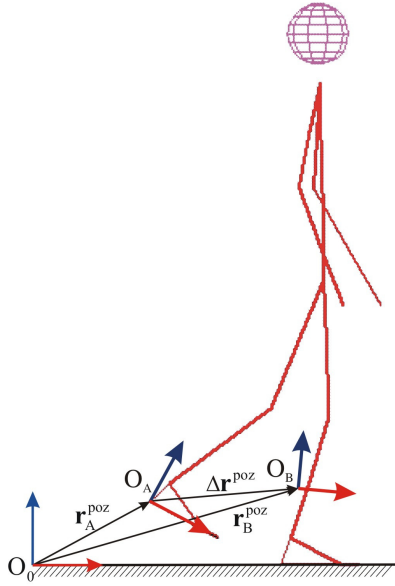
Parametri $Visina_{C_{PN}}$ i $Pravac_{C_{PN}}$ određuju ciljni položaj \mathbf{r}_B (Sl. 4. 21) i to na sledeći način:

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_B^{poz} \\ \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [x_{Bazni} \quad y_{Bazni} \quad 0]^T + \mathbf{R}_{Bazni} \cdot [0 \quad 0.1019 \quad Visina_{C_{PN}}]^T \\ A_{xyz} \left(\mathbf{R}_{Bazni} \cdot \mathbf{R}_Z \left(Pravac_{C_{PN}} \right) \cdot \mathbf{R}_{Bazni}^T \right) \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

U jednačini (4.10) x_{Bazni} i y_{Bazni} su x i y koordinata baznog koordinatnog sistem au

²² Bezbedna oslonačka površina predstavlja deo oslonačke površine koja se formira zadavanjem margine u iznosu od 10mm u odnosu na ivicu oslonačke površine.

odnosu na globalni, $\mathbf{R}_{\text{Bazni}}$ je matrica rotacije baznog koordinatnog sistema u odnosu na globalni, \mathbf{R}_z je elementarna matrica rotacije oko z-ose, a A_{xyz} je funkcija kojom se izračunavaju XYZ Ojlerovi uglovi za datu matricu rotacije²³.



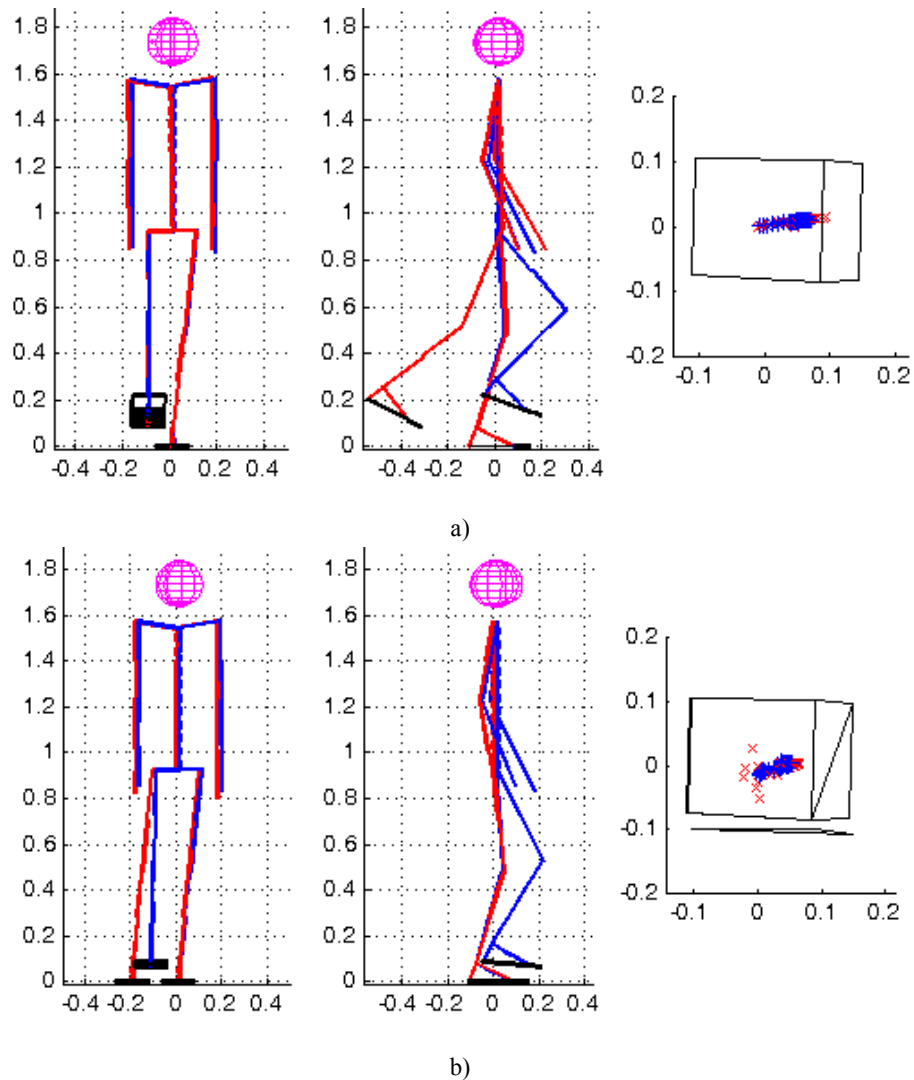
Slika 4.21 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnog i ciljnog položaj tokom podizanja noge

Sada se za izračunavanje željenih ugaonih brzina u zglobovima za primitiv podizanja noge može uvesti funkcija Prim_{PN} gde je:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{zelj}}^{\mathbf{S}_j}(t_i) = \text{Prim}_{\text{PN}} \left(\text{Brzina } C_{\text{PN}}, \text{ Visina } C_{\text{PN}}, \text{ Pravac } C_{\text{PN}}, L \right). \quad (4.11)$$

Iz jednačine (4.11) se vidi da $\dot{\mathbf{q}}_{\text{zelj}}^{\mathbf{S}_j}$ zavisi od parametara primitiva. Poslednji argument u funkciji (4.11) je parametar L koji određuje da li se primitiv realizuje levom ili desnom nogom, pa se u zavisnosti od ovog parametra menja skup \mathbf{S}_j koji sadrži indekse zglobova koju učestvuju u realizaciji primitiva. Ugaone brzine u zglobovima koji ne učestvuju u realizaciji primitiva se ne menjaju. Prema tome, u svakoj iteraciji simulacije, funkciji Prim_{PN} prosleđuju parametri primitiva, a kao rezultat se dobijaju vrednosti $\dot{\mathbf{q}}_{\text{zelj}}^{\mathbf{S}_j}$.

²³ Prilikom izvršavanja primitiva za podizanje leve noge u jednačini (4.10) se menja predznak ispred konstante 0.1019.



Slika 4.22 Stik dijagram početne i kranje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom podizanja noge:

- a) u početnoj pozi robota se nalazi u jednooslonjačkoj fazi;
- b) u početnoj pozi robota se nalazi u dvooslonjačkoj fazi

Da bi noga započela podizanje, parametar $^{Brzina}C_{PN}$ treba da je veći od 0, tj. treba da postoji „namera“ da se noga podigne (noga se neće podići ako je brzina podizanja jednaka nuli). Što je vrednost parametra $^{Brzina}C_{PN}$ veća to će se primitiv brže izvršavati. Iz jednačine (4.9) vidimo, na primer, da će, ukoliko je $^{Brzina}C_{PN} = 0.5$, O_A težiti da se do ciljnog položaja kreće linearnom brzinom 0.5m/s i ugaonom brzinom 0.5 rad/s. Realizacija primitiva je završena ukoliko je rastojanje koordinatnog sistema O_A od ciljnog položaja O_B manje od 2cm. Kada je ovaj uslov ispunjen, ukoliko se pozove funkcija $Prim_{PN}$, dobiće se nepromenjene vrednosti željenih ugaonih brzina \dot{q}_{zelj} .

Na Sl. 4.22 su prikazana dva slučaja realizacije primitiva za podizanje noge. Razlika je i u početnoj pozi i u parametrima primitiva. Crveni stik dijagrami predstavljaju početnu a plavi krajnju poze robota tokom realizacije primitiva. Takođe, na slici su prikazane putanje PCM-a i ZMP-a. Crvenim krstićem je prikazana putanja ZMP-a, a plavim krstićem je prikazana putanja PCM-a.

Sa Sl. 4.22 b) se vidi da podizanje desne noge može da se izvršava i u slučaju kada je ona na početku u kontaktu sa podlogom. Zbog toga je izuzetno važno da trenutni položaji PCM i ZMP (\mathbf{PCM}_{tr} i \mathbf{ZMP}_{tr}) već budu u bezbednoj zoni unutar oslonačke površine ispod leve noge. Razlog za to je što, u trenutku odvajanja desnog stopala od podloge, dolazi do značajnog smanjivanja oslonačke površine. Ukoliko ZMP već nije ispod oslonačke površine leve noge može doći do obrtanja čitavog sistema oko ivice oslonačke površine i pada robota.

4.5.2. Opužanje noge (ON)

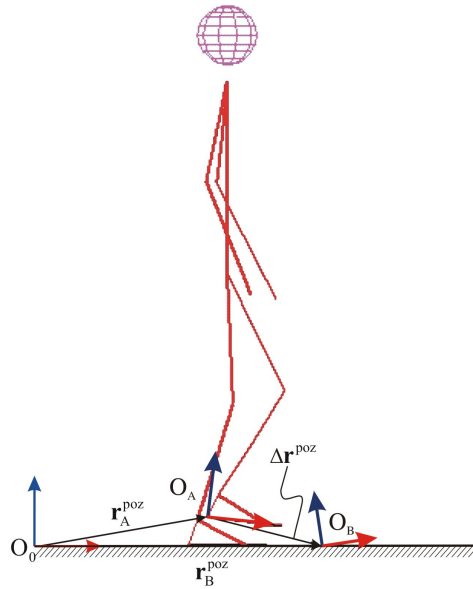
Realizacijom primitiva za opušanje noge se stopalo dovodi u prednji položaj radi nastavka kretanja. Za realizaciju opušanja noge aktivirana su (kao i za podizanje noge) 3 stepena slobode u zglobu kuka, 1 stepen slobode u kolenu i 3 stepena slobode u skočnom zglobu noge koja se nalazi u prenosnoj fazi. Parametri primitiva za opušanje noge su $Brzina_{C_{ON}}$, $Duzina_{C_{ON}}$, $Visina_{C_{ON}}$, $Ugao_stopala_{C_{ON}}$ i $Pravac_{C_{ON}}$. Parametar $Brzina_{C_{ON}}$ određuje brzinu izvršavanja primitiva odnosno brzine krstarenja v_{kr} i ω_{kr} tokom opušanja noge. Brzine krstarenja se računaju po formuli:

$$\begin{aligned} v_{kr} &= Brzina_{C_{ON}} \\ \omega_{kr} &= 3 \cdot Brzina_{C_{ON}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Ugaona brzina ω_{kr} je tri puta većeg intenziteta od linearne, pošto je tokom realizacije ovog primitiva izuzetno važno da se stopalo što pre dovede u željenu orijentaciju koja je pogodna za ostvarivanje kontakta pete sa podlogom i na taj način „pripremi“ za dvooslonačku fazu.

Parametri $Duzina_{C_{ON}}$, $Visina_{C_{ON}}$, $Ugao_stopala_{C_{ON}}$ i $Pravac_{C_{ON}}$ određuju ciljni položaj \mathbf{r}_B (Sl. 4.23) i to na sledeći način:

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_B^{poz} \\ \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Bazni}^{poz} + \mathbf{R}_{Bazni} \cdot \begin{bmatrix} Duzina_{C_{ON}} & 0.08 & Visina_{C_{ON}} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{A}_{xyz} \left(\mathbf{R}_{Bazni} \cdot \mathbf{R}_Y \left(Ugao_stopala_{C_{ON}} \right) \cdot \mathbf{R}_Z \left(Pravac_{C_{ON}} \right) \cdot \mathbf{R}_{Bazni}^T \right) \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$



Slika 4.23 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnog i ciljnog položaj tokom opružanja noge

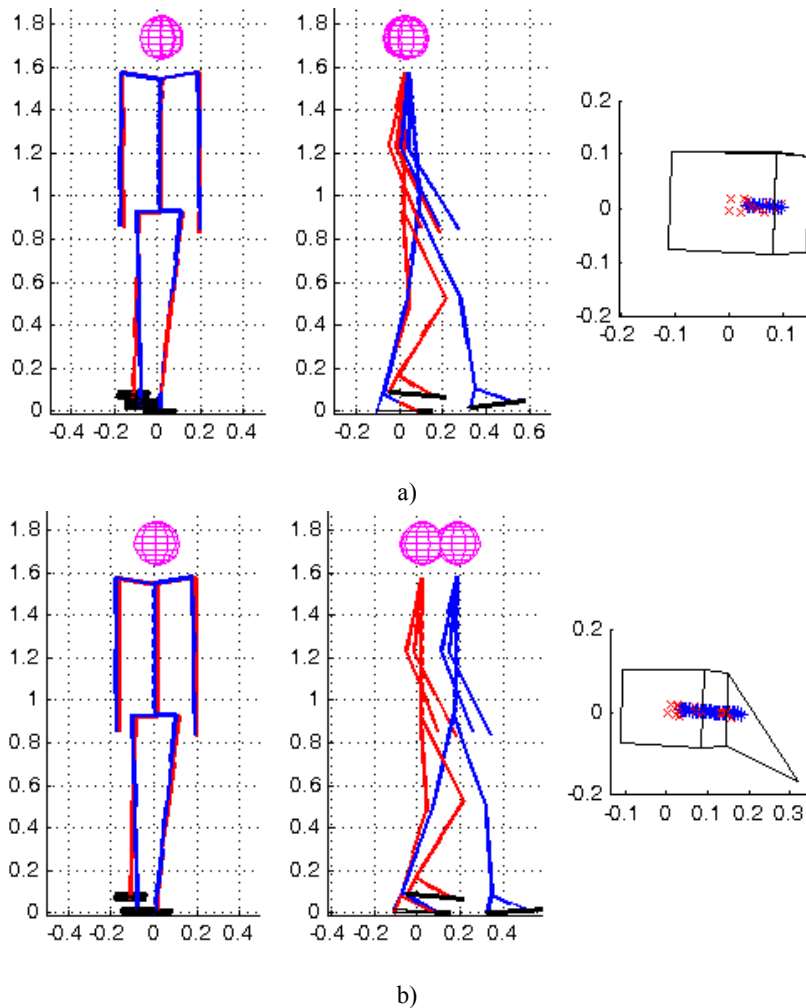
Iz jednačine (4.13) se vidi da se parametrom $^{Duzina}C_{ON}$ određuje koliko daleko stopalo treba da se postavi ispred tela. Parametar $^{Visina}C_{ON}$ određuju koliko će se peta spustiti u odnosu na bazni koordinatni sistem. U slučaju hoda po ravnom ovaj parametar je podešen tako da peta po dostizanju ciljnog položaja bude do 5cm iznad. Razlog zbog kojeg ova vrednost nije konstanta, je taj što primitiv za opružanje noge treba da se koristi i za penjanje uz i silazak niz stepenice, kada će ciljni položaj zavisiti od visine stepenika.

Sada se kao i u slučaju primitiva za podizanje noge može uvesti jednačina:

$$\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_j}(t_i) = \text{Prim}_{ON} \left(\text{Brzina } C_{ON}, \text{ Duzina } C_{ON}, \text{ Visina } C_{ON}, \text{ Ugao_stopala } C_{ON}, \text{ Pravac } C_{ON}, L \right) \quad (4.14)$$

gde je Prim_{ON} funkcija za izračunavanje željenih ugaonih brzina u zglobovima za primitiv opružanje noge. Razlika u odnosu na funkciju Prim_{PN} je u broju parametara primitiva koji određuju ciljni položaj \mathbf{r}_B .

Da bi se započelo opružanje noge potrebno je da bude ispunjen uslov da noga kojom se realizuje primitiv za opružanje nije u kontaktu sa podlogom. Uslov da se primitiv za opružanje noge završi je da su intenziteti vektora $\Delta \mathbf{r}^{poz}$ i $\Delta \mathbf{r}^{or}$ manji od 0.01m i 0.01rad respektivno. Realizacija ovog primitiva se završava i ukoliko noga koja se opruža ostvari kontakt sa podlogom, odnosno ukoliko nastupi dvooslonička faza.



Slika 4.24 Stik dijagram početne i krajnje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom opružanja noge: a) opružanje je završeno zbog dostizanja ciljnog položaja; b) opružanje je završeno zbog kontakta pete sa podlogom i nastavak dvoosloničke faze uz primenu primitiva za naginjanje tela napred

Na Sl. 4.24 su prikazani stik dijagrami početne i krajnje poze robota za dva slučaja opružanja noge. Takođe, na slici su prikazane putanje PCM-a i ZMP-a tokom realizacije ovih primitiva. Na Sl. 4.24 a) se realizacija primitiva završila usled dostizanja ciljnog položaja, dok je na Sl. 4.24 b) primitiv završen usled nastanka dvoosloničke faze.

4.5.3. Naginjanje tela napred (NN)

Za razliku od primitiva za podizanje i opružanje noge koji se izvršavaju nogom koja se nalazi u prenosnoj fazi, primitiv za naginjanje tela napred se realizuje osloničkom nogom koja se nalazi u kontaktu sa podlogom. Osim toga, u slučaju primitiva za podizanje i opružanje noge koordinatni sistem koji se dovodio u ciljni položaj je bio

pridružen peti, dok se tokom realizacije primitiva za nagnjanje tela napred u ciljni položaj dovodi bazni koordinatni sistem. Uloga ovog primitiva je da dovede do adekvatnog kretanja oslonačke noge tako da se tokom jednooslonačke faze opterećenje prebaci ispod segmenta prsta.

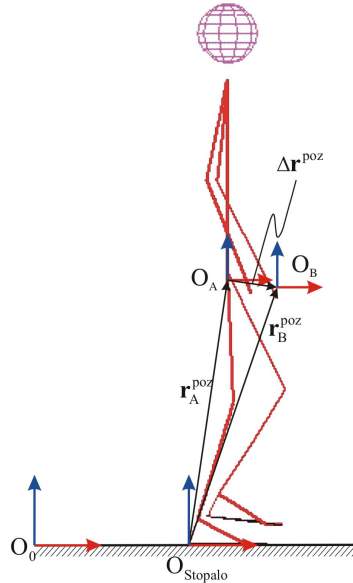
Parametrima primitiva se određuje ciljni položaj \mathbf{r}_B (Sl. 4.25) relativno u odnosu na koordinatni sistem koji se nalazi u peti stopala koje je u kontaktu sa podlogom. Parametri primitiva su $^{Brzina}C_{NN}$, $^{Bazni-x}C_{NN}$, $^{Bazni-y}C_{NN}$, i $^{Visina}C_{NN}$. Parametar $^{Brzina}C_{NN}$ se, kao i kod prethodno opisanih primitiva, koristi za određivanje brzina krstarenja v_{kr} i ω_{kr} :

$$\begin{aligned} v_{kr} &= ^{Brzina}C_{NN} \\ \omega_{kr} &= ^{Brzina}C_{NN} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Ciljni položaj \mathbf{r}_B je određen na sledeći način:

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_B^{poz} \\ \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Stopalo}^{poz} + \mathbf{R}_{Stopalo} \cdot \begin{bmatrix} ^{Bazni-x}C_{NN} & ^{Bazni-y}C_{NN} & ^{Visina}C_{NN} \end{bmatrix}^T \\ A_{xyz}(\mathbf{R}_{Stopalo}) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

gde parametri $^{Bazni-x}C_{NN}$ i $^{Bazni-y}C_{NN}$ određuju koliko će se telo nagnuti napred i u stranu u odnosu na stopalo, dok parametar $^{Visina}C_{NN}$ određuje koliko će se noga opružiti tokom realizacije primitiva.

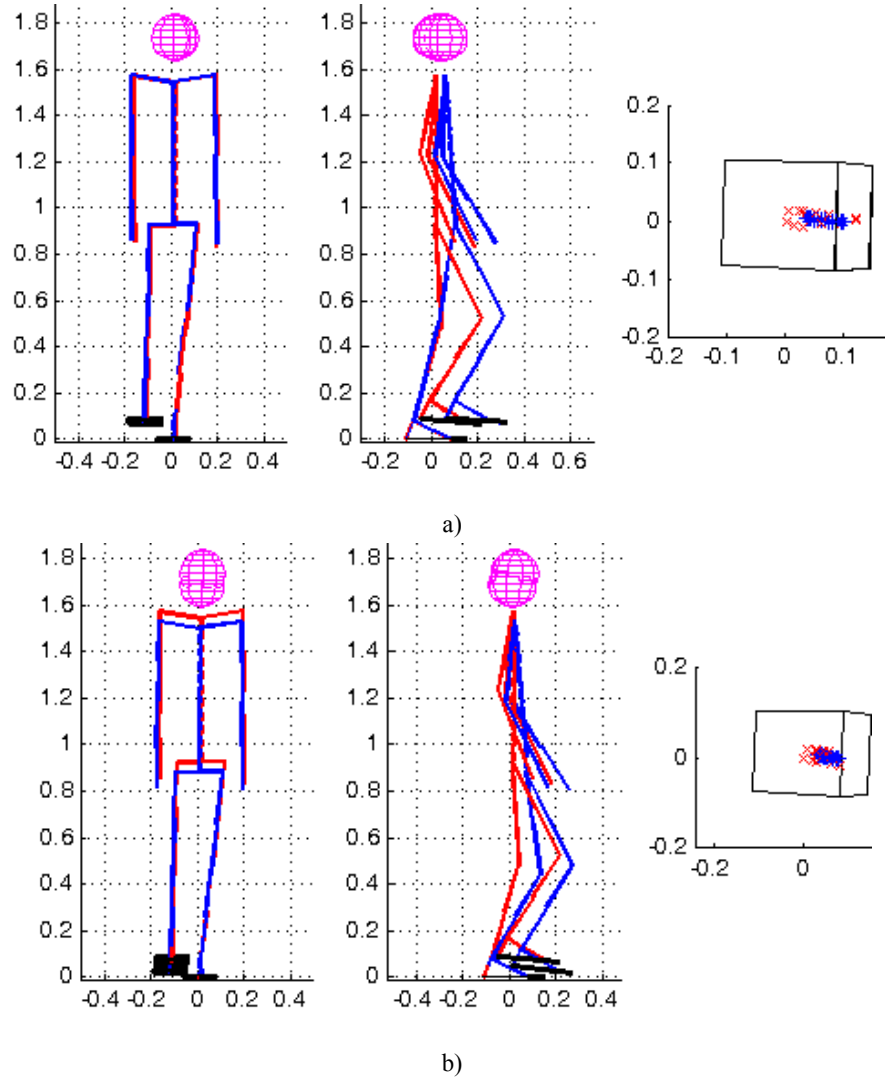


Slika 4.25 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnog i ciljnog položaj tokom nagnjanja tela napred

Funkcija za izračunavanje željenih ugaonih brzina u zglobovima za primitiv naginjanja tela napred je data funkcijom Prim_{NN} :

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{želj}}^{S_j}(t_i) = \text{Prim}_{\text{NN}} \left(\text{Brzina } C_{\text{NN}}, \text{Bazni-x } C_{\text{NN}}, \text{Bazni-y } C_{\text{NN}}, \text{Visina } C_{\text{NN}}, L \right) \quad (4.17)$$

U jednačini (4.17) parametar L određuje kojom nogom se realizuje primitiv, što određuje u kojim zglobovima se željene ugaone brzine $\dot{\mathbf{q}}_{\text{želj}}^{S_j}$ računaju.



Slika 4.26 Stik dijagram početne i krajnje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom naginjanja tela napred: a) naginjanje tela iznad segmenta prstiju; b) naginjanje tela napred i spuštanje na dole

Uslov da se započne naginjanje tela napred je da se robot nalazi u jednooslonjačkoj fazi, odnosno da je u kontaktu sa podlogom samo noga kojom se realizuje primitiv. Uslov da se primitiv završi je da su intenziteti vektora $\Delta \mathbf{r}^{\text{pos}}$ (Sl. 4.25) i $\Delta \mathbf{r}^{\text{or}}$ manji od 0.01m i 0.02rad respektivno. Realizacija ovog primitiva se završava i ukoliko robot dođe u dvooslonjačku fazu.

Na Sl. 4.26 su prikazana dva slučaja realizacije primitiva za naginjanja tela napred. U prvom slučaju je parametar $^{\text{Bazni-x}}C_{\text{NN}}$, podešen tako da se bazni koordinati sistem dovede iznad segmenata prsta oslonjačke noge. U drugom slučaju je taj parametar takav da koordinatni sistem bude iznad položaja gde se segment prsta nastavlja na stopalo. Takođe, u drugom slučaju je smanjena vrednost parametra $^{\text{Visina}}C_{\text{NN}}$, tako da je u krajnjoj pozi oslonjačka noga manje opružena, odnosno koleno je savijeno za razliku od prvog slučaja gde je koleno skoro do kraja opruženo. Pošto je jednačinom (4.16) zadato da orijentacija koordinatnog sistema O_{Bazni} bude ista kao i orijentacija koordinatnog sistema smeštenog u peti, sa Sl. 4.26 se vidi da je trup robota uspravan bez obzira na orijentaciju segmenta natkolenice.

4.5.4. Naginjanje tela na oslonjačku nogu (NON)

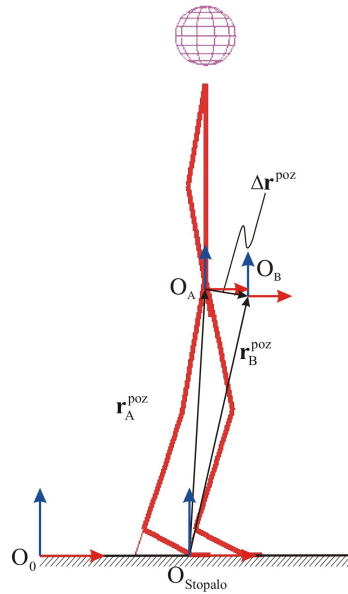
Primitiv za naginjanje tela na oslonjačku nogu je skoro identičan kao i prethodno opisani primitiv za naginjanje tela napred. Parametri primitiva su $^{\text{Brzina}}C_{\text{NON}}$, $^{\text{Bazni-x}}C_{\text{NON}}$, $^{\text{Bazni-y}}C_{\text{NON}}$, i $^{\text{Visina}}C_{\text{NON}}$. Parametar $^{\text{Brzina}}C_{\text{NON}}$ određuje brzine krstarenja v_{kr} i ω_{kr} :

$$\begin{aligned} v_{\text{kr}} &= ^{\text{Brzina}}C_{\text{NON}} \\ \omega_{\text{kr}} &= ^{\text{Brzina}}C_{\text{NON}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Ciljni položaj \mathbf{r}_B (Sl. 4.27) se računa na sledeći način:

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_B^{\text{poz}} \\ \mathbf{r}_B^{\text{or}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{\text{Stopalo}}^{\text{poz}} + \mathbf{R}_{\text{Stopalo}} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{BxNON}} & P_{\text{ByNON}} & P_{\text{VNON}} \end{bmatrix}^T \\ A_{\text{xyz}}(\mathbf{R}_{\text{Stopalo}}) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

gde parametri $^{\text{Bazni-x}}C_{\text{NON}}$ i $^{\text{Bazni-y}}C_{\text{NON}}$ određuju koliko će se telo nagnuti napred i u stranu u odnosu na stopalo nad koje se nagine robot, dok parametar $^{\text{Visina}}C_{\text{NON}}$ određuje koliko će se noga opružiti tokom realizacije primitiva takođe u odnosu na stopalo nad koje se nagine robot.



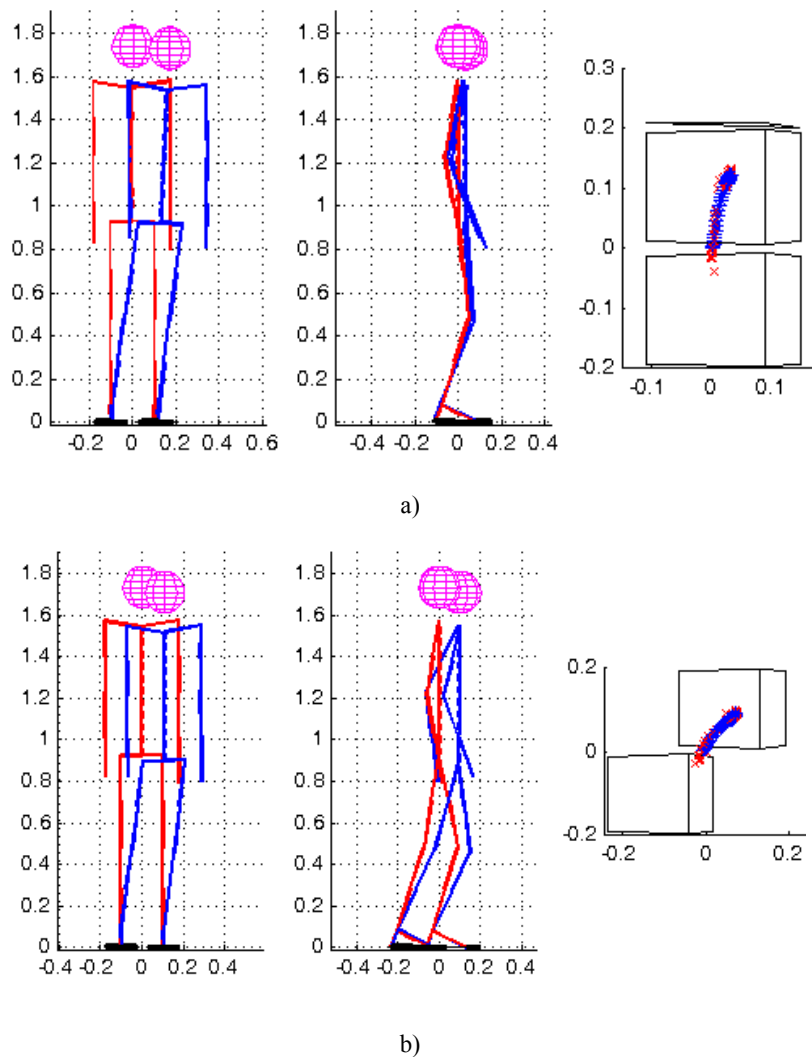
Slika 4.27 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnog i ciljnog položaj tokom nagnjanja tela na oslonućku nogu

Funkcija za izračunavanja željenih ugaonih brzina u zglobovima za nagnjanje tela napred je:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{želj}}^{\text{S}_j}(t_1) = \text{Prim}_{\text{NON}} \left(\text{Brzina } C_{\text{NON}}, \text{Bazni-x } C_{\text{NON}}, \text{Bazni-y } C_{\text{NON}}, \text{Visina } C_{\text{NON}}, L \right) \quad (4.20)$$

U jednačini (4.20) parametar L određuje na koju nogu se oslanja robot. Glavna razlika u odnosu na primitiv za nagnjanje tela napred je što za se realizaciju ovog primitiva koriste i leva i desna noga. Uslov da se započne realizacija primitiva je da se robot nalazi u dvooslonućkoj fazi. Realizacija primitiva se završava kada je intenzitet vektora $\Delta \mathbf{r}^{\text{pos}}$ manji od 0.02m.

Na Sl. 4.28 su prikazana dva slučaja realizacije primitiva nagnjanja tela na levu oslonućku nogu. U oba slučaja su parametri primitiva isti, a poza robota iz koje se počinje sa realizacijom primitiva je različita. Prikazani su slučajevi kada robot realizuje primitiv tako da mu u početnom trenutku stopala nisu paralelna pri čemu su početne brzine u zglobovima različite od nule i iz položaja kada su noge jedna pored druge i robot stoji mirno. Na Sl. 4.28 su prikazani i putanja PCM-a i ZMP-a. Kao što se vidi sa slike putanje su takve da se na kraju primitiva položaj PCM-a i ZMP-a nalazi na približno istom mestu u odnosu na stopalo na koje se osloni robot.



Slika 4.28 Stik dijagram početne i krajnje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom nagnjanja na oslonućku nogu: a) u početnoj pozi robot stoji mirno; b) u početnoj pozi robota stoji u raskoraku i brzine u zglobovima robota su različite od nule

4.5.5. Spuštanje stopala (SS)

Uloga ovog primitiva je da u dvooslonućkoj fazi, stopalo robota koje je tek ostvarilo kontakt sa podlogom, dovede u površinski kontakt sa podlogom u kom su najmanje tri tačke stopala u kontaktu sa podlogom. Ovaj primitiv je karakterističan po tome što se tokom realizacije dva koordinatna sistema istovremeno dovode u dva ciljna položaja. Prvi je bazni koordinatni sistem koji se dovodi u ciljni položaj zadat relativno u odnosu na koordinatni sistem vezan za segment prstiju stopala noge koja je tokom realizacije pokreta bila oslonućka. Drugi koordinatni sistem je vezan za stopalo koje treba spustiti.

Ciljni položaj ovog koordinatnog sistema se zadaje takođe u odnosu na koordinatni sistem segmenta prstiju noge koja je tokom realizacije pokreta bila oslonačka (Sl. 4.29). Parametri primitiva su $^{Brzina}C_{SS}$, $^{Bazni-x}C_{SS}$, $^{Bazni-y}C_{SS}$ i $^{Visina}C_{SS}$. Parametar $^{Brzina}C_{SS}$ određuje brzine krstarenja za oba koordinatna sistema koje treba dovesti u njihove ciljne položaje:

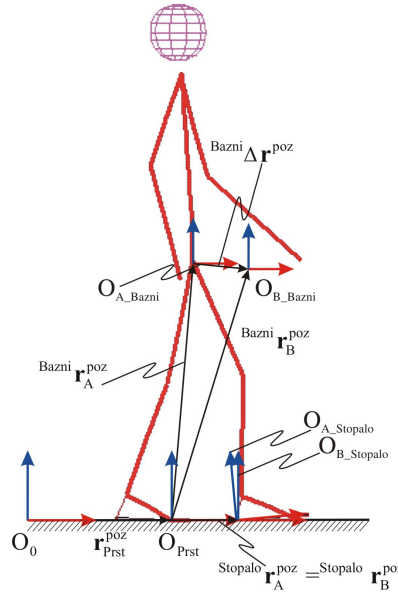
$$\begin{aligned} \text{Bazni } \mathbf{v}^{kr} &= \mathbf{P}_{BSS}; & \text{Bazni } \boldsymbol{\omega}^{kr} &= \mathbf{P}_{BSS} \\ \text{Stopalo } \mathbf{v}^{kr} &= \mathbf{P}_{BSS}; & \text{Stopalo } \boldsymbol{\omega}^{kr} &= \mathbf{P}_{BSS} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Ciljni položaj baznog koordinatnog sistema (Sl. 4.29) se računa na sledeći način:

$$\text{Bazni } \mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \text{Bazni } \mathbf{r}_B^{\text{poz}} \\ \text{Bazni } \mathbf{r}_B^{\text{or}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Prst}^{\text{poz}} + \mathbf{R}_{Prst} \cdot \begin{bmatrix} \text{Bazni-x } C_{SS} & \text{Bazni-y } C_{SS} & \text{Visina } C_{SS} \end{bmatrix}^T \\ A_{xyz}(\mathbf{R}_{Prst}) \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

gde parametri $^{Bazni-x}C_{SS}$ i $^{Bazni-y}C_{SS}$ određuju x i y koordinatu ciljnog položaj baznog koordinatnog sistema u odnosu na stopalo koje je u kontaktu sa podlogom, dok parametar $^{Visina}C_{SS}$ određuje koliko će se noga opružiti tokom realizacije primitiva. Ciljni položaj koordinatnog sistema stopala koje se spušta se računa na sledeći način:

$$\text{Stopalo } \mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \text{Stopalo } \mathbf{r}_B^{\text{poz}} \\ \text{Stopalo } \mathbf{r}_B^{\text{or}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Stopalo } \mathbf{r}_A^{\text{poz}} \\ A_{xyz}(\mathbf{R}_{Prst}^{\text{Stopalo}}) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$



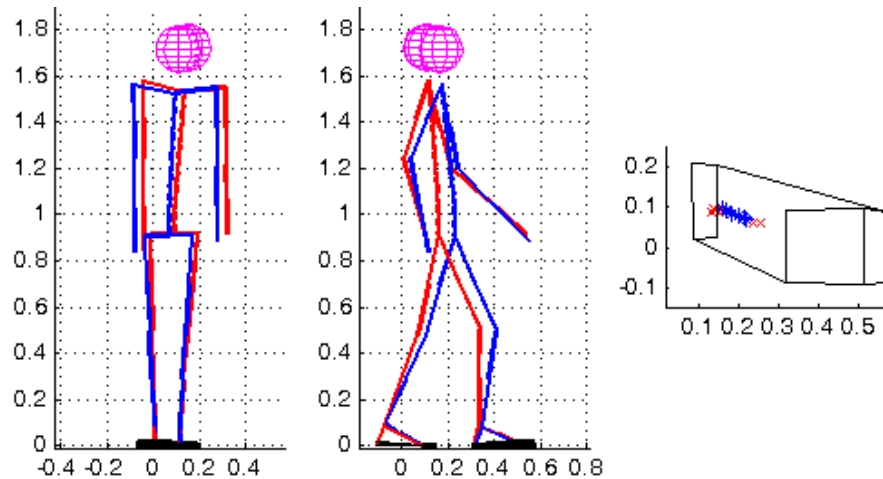
Slika 4.29 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnih i ciljnih položaj tokom spuštanja stopala

Iz jednačine (4.23) se vidi da ${}^{\text{Stopalo}}\mathbf{r}_B$ ne zavisi od parametara primitiva. Ovo je i očekivano s obzirom da stopalo ne treba da menja svoju poziciju u odnosu na drugo stopalo, već samo orijentaciju i to tako da ostvari kontakt sa podlogom. Zbog toga prve tri komponente vektora ${}^{\text{Stopalo}}\mathbf{r}_B$, tj. ${}^{\text{Stopalo}}\mathbf{r}_A^{\text{poz}}$, ima vrednost trenutne pozicije stopala koje se spušta i zapravo se zadaje ciljna orijentacija u koju treba dovesti stopalo robota koja je jednaka orijentaciji koordinatnog sistema vezanog za segment prsta druge noge (Sl. 4.29).

Sada se može uvesti funkcija za izračunavanje željenih ugaonih brzina u zglobovima na sledeći nači:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{želj}}^{\text{S}_j}(t_i) = \text{Prim}_{\text{SS}} \left(\text{Brzina } C_{\text{SS}}, \text{Bazni-x } C_{\text{SS}}, \text{Bazni-y } C_{\text{SS}}, \text{Visina } C_{\text{SS}}, L \right). \quad (4.24)$$

U jednačini (4.24) parametar L određuje nogu stopala koje se spušta na podlogu. Uslov da se započne realizacija primitiva je da se robot nalazi u dvoosloničkoj fazi. Realizacija primitiva se završava kada je stopalo ostvarilo kontakt sa podlogom u tri tačke odnosno kada je stopalo ostvarilo površinski kontakt sa podlogom.



Slika 4.30 Stik dijagram početne i kranje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom spuštanja stopala

Na Sl. 4.30 je prikazana realizacija primitiva za spuštanje stopala. Prikazani su stik dijagrami robota na početku i kraju realizacije primitiva i putanje PCM-a i ZMP-a. Na početku realizacije primitiva PCM i ZMP se nalaze ispod segmenta prstiju levog stopala dok je desno u kontaktu sa podlogom samo petom. Parametri za bazni koordinatni sistem su podešeni tako da se O_{Bazni} u horizontalnoj ravni kreće prema stopalu desne noge. Sinhrono sa kretanjem baznog koordinatnog sistema, spušta se stopalo desne noge dok ne ostvari površinski kontakt sa podlogom. Nakon toga je realizacija primitiva završena.

4.5.6. Održavanje trupa u uspravnom položaju (TU)

Tokom kretanja robota izuzetno je važno da ukupan izgled robot bude što antropomorfni. Da bi se to postiglo, veoma je važno da se trup u što većoj meri održi u uspravnom položaju. Ipak, višesegmentni trup ima značajnu ulogu i za održavanje dinamičkog balansa. Održavanje dinamičkog balansa je zadatak višeg prioriteta. Ukoliko je ZMP udaljen više od 3cm od željenog položaja tada se smatra da je dinamički balans ugrožen pa se trup „koristi“ da se vrati ZMP u željenu zonu i na taj način spreči pad. Kada je ZMP udaljen manje od 3cm od željenog položaja tada se smatra da dinamički balans nije ugrožen i može se pristupiti korekciji odstupanja trupa od vertikalnog položaja.

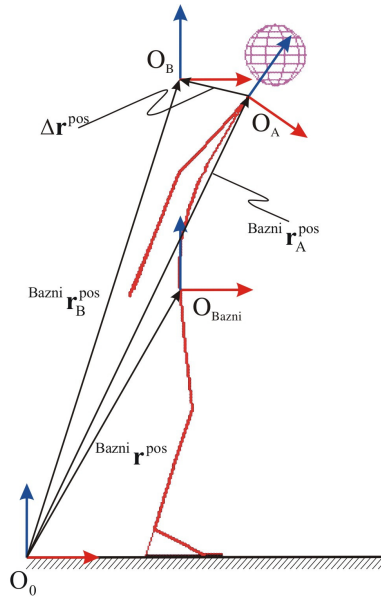
Zbog toga je uveden primitiv za održavanje trupa u uspravnom položaju tako da bude podređen zadatku očuvanja dinamičkog balansa. Koordinatni sistem koji se dovodi u ciljni položaj je vezan za poslednji segment trupa. Ciljni položaj trupa je zadat relativno u odnosu na bazni koordinatni sistem. Parametri primitiva su $^{Brzina}C_{TR}$ i $^{Visina}C_{TR}$. Parametar $^{Brzina}C_{TR}$ određuje brzine krstarenja v_{kr} i ω_{kr} koordinatnog sistema vezanog za segment trupa na sledeći način:

$$\begin{aligned} v_{kr} &= K_{TR} \cdot ^{Brzina}C_{TR} \\ \omega_{kr} &= K_{TR} \cdot ^{Brzina}C_{TR} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Koeficijent K_{TR} je promenljivi koeficijent u opsegu $[0 \ 1]$, koji je uveden da bi se omogućilo davanje prioriteta održavanju dinamičkog balansa. Ukoliko je dinamički balans ugrožen tada se vrednost ovog koeficijenta smanjuje do 0, a kretanje trupa je podređeno zadatku održavanja dinamičkog balansa. Kada dinamički balans nije ugrožen tada se vrednost koeficijenta postepeno povećeva do 1 i tada se prioritet vraća zadatku održavanja trupa u uspravnom položaju.

Ciljni položaj koordinatnog sistema vezanog za segment trupa (Sl. 4.31) se računa na sledeći način:

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_B^{poz} \\ \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ^{Bazni} \mathbf{r}^{poz} + \mathbf{R}_{Bazni} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & ^{Visina}C_{TR} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{bmatrix}. \quad (4.26)$$



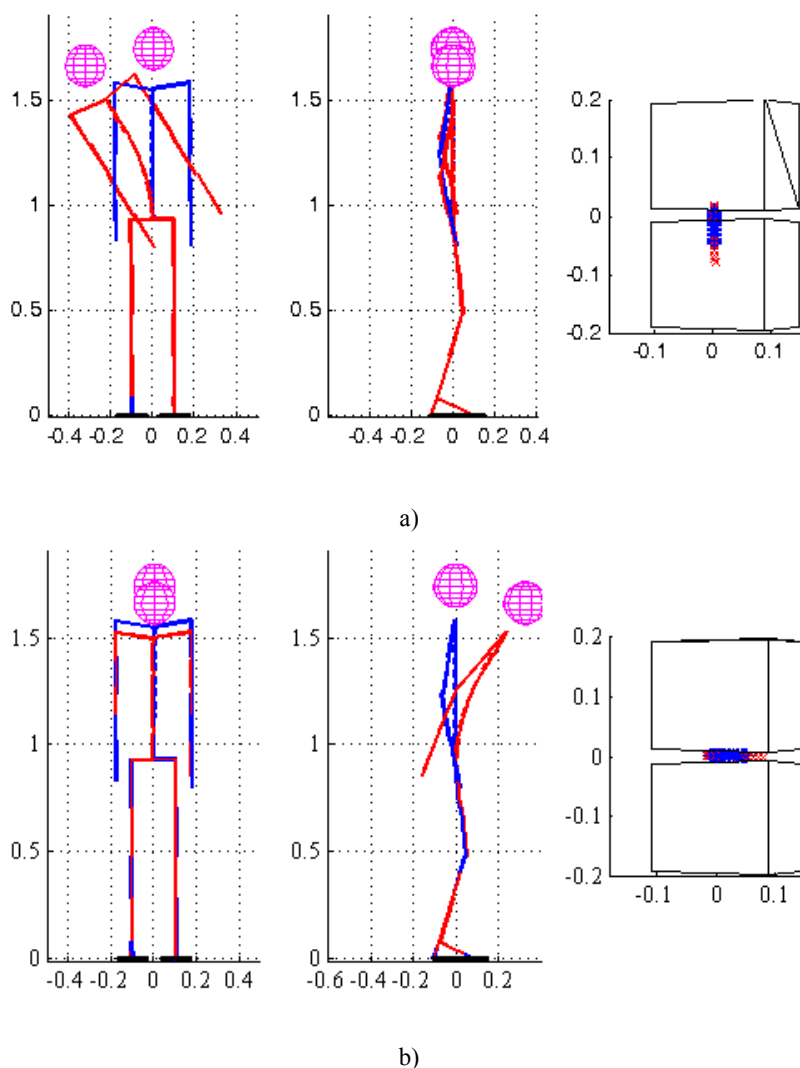
Slika 4.31 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnih i ciljnih položaja tokom održavanja trupa u uspravnom položaju

Funkcija za izračunavanja željenih ugaonih brzina u zglobovima za primitiv održavanja trupa u uspravnom položaju se može uvesti na sledeći način:

$$\dot{\mathbf{q}}_{zelj}^{S_j}(t_i) = \text{Prim}_{TR} \left(\begin{matrix} \text{Brzina} \\ \text{Visina} \end{matrix} C_{TR}, C_{TR} \right). \quad (4.27)$$

Na Sl. 4.32 su prikazana dva slučaja realizacije primitiva za održavanje trupa u uspravnom položaju. Prikazani su stik dijagrami robota na početku i kraju realizacije primitiva i prikazana je putanja PCM-a i ZMP-a. U prvom slučaju je robot nagnut napred, a u drugom slučaju je robot nagnut na desnu stranu. Sa slike se vidi da se u oba slučaja robot uspešno vratio u uspravan položaj.

Uslov da se započne i završi realizacija primitiva za održavanje trupa u uspravnom položaju nije uveden. To znači da će ovaj primitiv stalno biti aktivan dok robot bude hodao ali se uloga trupa neprestano menja između zadatka održavanja dinamičkog balansa i zadatka održavanja trupa u uspravnom položaju. Međutim ukoliko je potrebno da robot trupom izvrši neki posebno važan zadatak, uslov za prestanak izvršavanja primitiva može da se uvede. Jedan od uslova za prestanak izvršavanja ovog primitiva bi na primer mogao biti pojava velikog poremećaja, kada robot trenutno mora da prestane sa izvršavanjem postojećih pokreta i započne izvršavanje pokreta za sprečavanje pada.



Slika 4.32 Stik dijagram početne i krajnje poze robota i putanja PCM-a i ZMP-a prilikom održavanja trupa u uspravnom položaju a) u početnoj pozi robot je u trupu nagnut napred; b) u početnoj pozi robota je u trupu nagnut na stranu

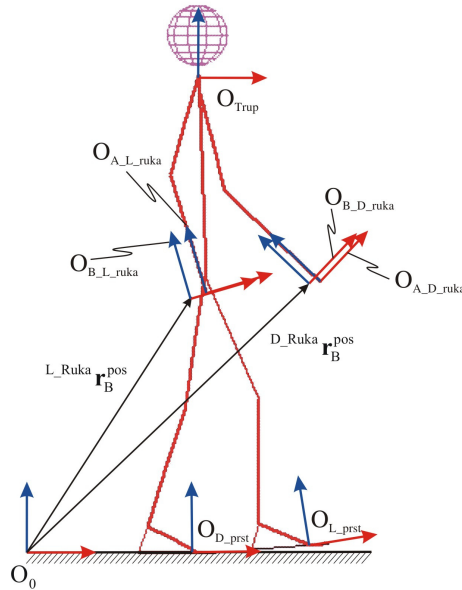
4.5.7. Kretanje ruku tokom hoda (KR)

Da bi se u što većoj meri postiglo antropomorfno kretanje (pre svega tokom hoda) potrebno je uključiti i kretanje ruku. Zbog toga je uveden primitiv za kretanje ruku tokom hoda, tokom čijeg su izvršavanja obe ruke aktivne. Koordinatni sistemi koji se dovode u ciljne položaje su vezani za segment podlaktice i postavljeni su na kraj podlaktice (Sl. 4.17). Ciljni položaji su zadati relativno u odnosu na koordinatni sistem koji je vezan za poslednji segment trupa. Ovaj primitiv ima samo jedan parametar C_{KR} brzina krstarenja v_{kr} i ω_{kr} za oba koordinatna sistema koje treba simultano

dovesti u svoje ciljne položaje:

$$\begin{aligned} L_Ruka \mathbf{v}_{kr} &= Brzina C_{KR} ; & L_Ruka \omega_{kr} &= Brzina C_{KR} \\ D_Ruka \mathbf{v}_{kr} &= Brzina C_{KR} ; & D_Ruka \omega_{kr} &= Brzina C_{KR} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Ciljni položaji koordinatnih sistema vezanih za podlaktice zavise od trenutnog položaja koordinatnih sistema (Sl. 4.33) vezanih za stopala naspramne noge u odnosu na bazni koordinatni sistem. Zavisnost je takva da kada je desno stopalo ispred tela, tada i leva ruka treba da je ispred tela i obrnuto.



Slika 4.33 Stik dijagram početne poze i vektori trenutnih i ciljnih položaja za njihanje ruku tokom hoda

Ciljni položaj leve $L_Ruka \mathbf{r}_B$ i desne $D_Ruka \mathbf{r}_B$ ruke (Sl.4.33) su određeni sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned} L_Ruka \mathbf{r}_B &= \begin{bmatrix} L_Ruka \mathbf{r}_B^{poz} \\ L_Ruka \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Trup}^{poz} + \mathbf{R}_{Trup} \cdot \left(\begin{bmatrix} D_prst \mathbf{r}_{Bx}^{poz} & -0.17 & L_Ruka \mathbf{r}_{Bz}^{poz} \end{bmatrix}^T \right) \\ L_Ruka \mathbf{r}_A^{or} \end{bmatrix} \\ D_Ruka \mathbf{r}_B &= \begin{bmatrix} D_Ruka \mathbf{r}_B^{poz} \\ D_Ruka \mathbf{r}_B^{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{Trup}^{poz} + \mathbf{R}_{Trup} \cdot \left(\begin{bmatrix} L_prst \mathbf{r}_{Bx}^{poz} & 0.17 & D_Ruka \mathbf{r}_{Bz}^{poz} \end{bmatrix}^T \right) \\ D_Ruka \mathbf{r}_A^{or} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

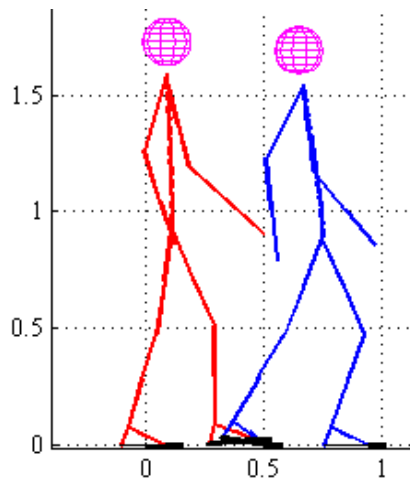
gde su $L_prst \mathbf{r}_{Bx}^{poz}$ i $D_prst \mathbf{r}_{Bx}^{poz}$ x koordinatne položaja levog i desnog segmenta prsta noge u odnosu na bazni koordinatni sistem, a $L_Ruka \mathbf{r}_{Bz}^{poz}$ i $D_Ruka \mathbf{r}_{Bz}^{poz}$ su z-koordinate ciljnih

položaja leve i desne podlaktice izračunate tako da ruke u laktu budu uvek isto savijene i tako da se ciljni položaji uvek nalaze unutar radnih prostora ruku.

Sada se može uvesti funkcija za izračunavanja željenih ugaonih brzina u zglobovima za kretanje ruku:

$$\dot{\mathbf{q}}_{\text{želj}}^{S_i}(t_i) = \text{Prim}_{\text{KR}} \left(\text{Brzina } C_{\text{KR}} \right). \quad (4.30)$$

Na Sl. 4.34 je prikazan stik dijagram robota tokom hoda. Sa slike se vidi da je kretanje ruku takvo da desna ruka prati kretanje prsta levog stopala i da leva ruka prati kretanje prsta desnog stopala. Uslov da se započne i završi kretanje ruku nije uveden. To znači da se ruke stalno kreću dok se izvršava hod. Naravno, moguće je uvesti uslove da se primitiv završi, ukoliko je potrebno da tokom hoda, robot rukama izvršava neki zadatak. To može biti dohvaćanje ili nošenje nekog predmeta tokom hoda, otvaranje vrata bez zaustavljanja itd.



Slika 4.34 Stik dijagram početne i kranje poze robota tokom jednog polukoraka kojim je ilustrovano kretanje ruku

Tokom realizaciji primitiva zadavanjem ciljnog položaja otklonjeni su nedostaci koji se javljaju u slučaju kada se primitivi realizuju primenom SVM-a. Prvo, dinamički model robota ne mora u potpunosti da bude poznat. Drugo, primitive koji se realizuju zadavanjem ciljnog položaja, je moguće nastavljati bez zaustavljanja neposredno pre započinjanja primitiva. To je obezbeđeno, pre svega, uvođenje jednačine (4.4), kojom je obezbeđen postepen prelazak sa početne brzine kretanja stopala \mathbf{s}_λ^0 na brzinu koja vodi stopalo ka novom ciljnom položaju.

Literatura

- [1] Nishiwaki, K., Sugihara, T., Kagami, S., & Inoue, H. (2001). Online mixture and connection of basic motions for humanoid walking control by footprint specification. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 4110-4115). IEEE.
 - [2] Peng, Z., Huang, Q., Zhang, L., Jafri, A. R., Zhang, W., & Li, K. (2005, April). Humanoid on-line pattern generation based on parameters of off-line typical walk patterns. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 3758-3763). IEEE.
 - [3] Park, J., & Youm, Y. (2007, April). General ZMP preview control for bipedal walking. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2682-2687). IEEE.
 - [4] Ogura, Y., Kataoka, T., Aikawa, H., Shimomura, K., Lim, H. O., & Takanishi, A. (2005, April). Evaluation of various walking patterns of biped humanoid robot. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on* (pp. 603-608). IEEE.
 - [5] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.
 - [6] Takubo, T., Tanaka, T., Inoue, K., & Arai, T. (2007, April). Emergent walking stop using 3-D ZMP modification criteria map for humanoid robot. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2676-2681). IEEE.
 - [7] Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., & Hirukawa, H. (2003, September). Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1620-1626). IEEE.
 - [8] KOYACHF, N., Hirohiko, A. R. A., IMAMURA, N., KOMORIYA, K., & TANIE, K. Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification.
 - [9] Giszter, S. F., Mussa-Ivaldi, F. A., & Bizzi, E. (1993). Convergent force fields organized in the frog's spinal cord. *The journal of neuroscience*, 13(2), 467-491.
 - [10] Lemay, M. A., Calagan, J. E., Hogan, N., & Bizzi, E. (2001). Modulation and vectorial summation of the spinalized frog's hindlimb end-point force produced by intraspinal electrical stimulation of the cord. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 9(1), 12-23.
 - [11] Mussa-Ivaldi, F. A., Giszter, S. F., & Bizzi, E. (1994). Linear combinations of primitives in vertebrate motor control. *Proceedings of the National Academy of*
-

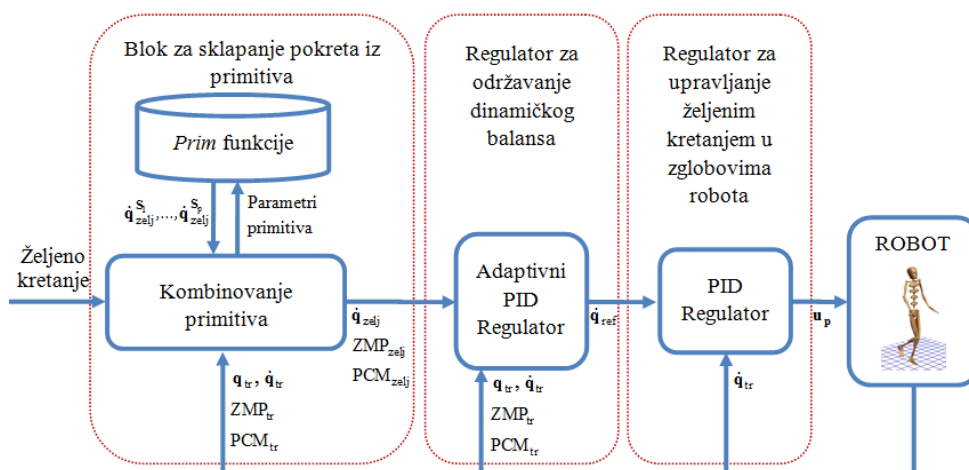
Sciences, 91(16), 7534-7538.

- [12] Hauser, K., Bretl, T., Harada, K., & Latombe, J. C. (2008). Using motion primitives in probabilistic sample-based planning for humanoid robots. *Algorithmic Foundation of Robotics VII*, 507-522.
- [13] Zhang, L., Bi, S., & Liu, D. (2008). Dynamic Leg Motion Generation of Humanoid Robot Based on Human Motion Capture. *Intelligent Robotics and Applications*, 83-92.
- [14] Denk, J., & Schmidt, G. (2003, September). Synthesis of walking primitive databases for biped robots in 3D-environments. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 1343-1349). IEEE.
- [15] Schaal, S. (2006). Dynamic movement primitives-a framework for motor control in humans and humanoid robotics. In *Adaptive Motion of Animals and Machines* (pp. 261-280). Springer Tokyo.
- [16] Vukobratović, M., Borovac, B., Raković, M., Potkonjak, V., & Milinović, M. (2008). On some aspects of humanoid robots gait synthesis and control at small disturbances. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5 (01), 119-156.
- [17] Vukobratović, M., Hugh, H., Borovac, B., Raković, M., Popovic, M., Hofmann, A., Jovanović, M., Potkonjak, V. (2008). Biological principles of control selection for a humanoid robot's dynamic balance preservation. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(04), 639-678.
- [18] Borovac, B., Nikolić, M., & Raković, M. (2011). How to Compensate for the Disturbances That Jeopardize Dynamic Balance of a Humanoid Robot?. *International Journal of Humanoid Robotics*, 8(03), 533-578.
- [19] Vukobratovic, M., Borovac, B., Rakovic, M. (2009, September). Generation of bipedal gait suitable for use in unstructured environments. In *Intelligent Systems and Informatics, 2009. SISY'09. 7th International Symposium on* (pp. 21-31). IEEE.
- [20] Kecman, V. (2001). *Learning and soft computing: support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models*. MIT press.
- [21] Raković, M., Nikolić, M., & Borovac, B. (2011). Humanoid Robot Reaching Task Using Support Vector Machine. *Research and Education in Robotics-EUROBOT 2011*, 263-276.
- [22] Branislav, B., Raković, M., & Nikolić, M. (2013). Online Generation of Biped Robot Motion in an Unstructured Environment. In *Intelligent Systems: Models and Applications* (pp. 93-114). Springer Berlin Heidelberg.

5. Generisanje hoda radi ostvarivanja kretanja u nestrukturanoj okolini

5.1. Struktura upravljačkog sistema

Ukoliko se za generisanje pokreta koriste primitivi, sinteza upravljanja se može prikazati blok dijagramom kao na Sl. 5.1 koji se sastoji iz tri dela. Prvi deo predstavlja blok u kojem se vrši kombinovanje primitiva pozivom funkcija uvedenih jednačinama (4.11), (4.14), (4.17), (4.20), (4.24), (4.27) i (4.30). Ulaz u prvi blok je željeno kretanje sa parametrima koji ga određuju (hod po ravnoj površini sa definisanom brzinom i pravcem hoda itd.). U slučaju da je željeno kretanje hod²⁴, koriste se četiri parametra koji su označeni sa H . To su brzina hoda H_{Brzina} , visina do koje se stopalo podiže tokom prenosne faze H_{St_visina} , dužina koraka H_{Duzina} i željeni pravac hoda H_{Pravac} .



Slika 5.1 Blok dijagram upravljanja robotom za realizaciju kretanja sintetizovanog putem primitiva

²⁴ Čovek određuje parametre svog hoda na osnovu trenutne situacije u kojoj se nalazi. Moguće je definisati nekoliko uopštenih kategorija. Moguće je definisati nekoliko uopštenih kategorija (normalan hod po ravnom, penjanje uz i silazak niz stepenice, hod uz i niz strmu ravan,...) pri čemu bi za svaki bio definisan skup odgovarajućih parametara kojima se takav hod specificira. Smatrano je da je jasnije ukoliko se na ulaz u upravljački sistem odvah specificiraju ovi parametri. Još jednom se napominje da je ovaj deo moguće značajno proširiti što predstavlja jedan od budućih pravaca rada.

Ulaz u prvi blok su i vrednosti koje se dobijaju putem povratne sprege o trenutnom stanju robota (vrednostima uglova \mathbf{q}_{tr} i ugaonih brzina zglobova $\dot{\mathbf{q}}_{tr}$ i o trenutnom položaju ZMP-a i PCM-a, \mathbf{ZMP}_{tr} i \mathbf{PCM}_{tr}). Ove vrednosti se koriste za proveru ispunjenosti uslova za započinjanje i završetak realizacije svakog primitiva. Izlaz iz prvog bloka su željene vrednosti ugaonih brzina u zglobovima $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}(t_i)$ kao i željeni položaj ZMP-a i PCM-a: \mathbf{ZMP}_{zelj} i \mathbf{PCM}_{zelj} , tako da se naredni primitiv može nastaviti na odgovarajući način. Redosled poziva i način na koji se kombinuju primitivi za generisanje hoda će detaljno biti opisan u narednom poglavlju.

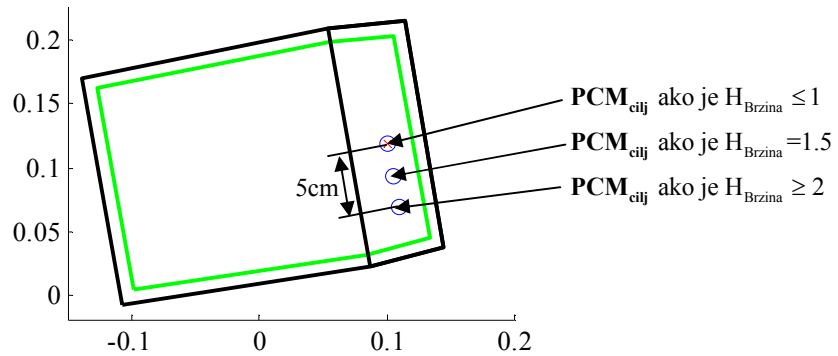
Željeni položaj projekcije centra mase \mathbf{PCM}_{zelj} se određuje na osnovu zadatog ciljnog položaja \mathbf{PCM}_{cilj} . Potom se, u zavisnosti od trenutne brzine hoda H_{Brzina} , vrši korekcija željenog položaja projekcije centra mase $\mathbf{PCM}_{zelj}(t_i)$ na sledeći način:

$$\mathbf{PCM}_{zelj}(t_i) = \begin{cases} \mathbf{PCM}_{zelj}(t_{i-1}) + \left(\frac{\mathbf{PCM}_{cilj} - \mathbf{PCM}_{zelj}(t_{i-1})}{500} - (t_i - t_{Prim_start}) \right) & \text{ako } \frac{500}{(dt \cdot H_{Brzina})} > (t_i - t_{Prim_start}) \\ \mathbf{PCM}_{cilj} & \text{ako } \frac{500}{(dt \cdot H_{Brzina})} \leq (t_i - t_{Prim_start}) \end{cases}$$

gde je $\mathbf{PCM}_{cilj} - \mathbf{PCM}_{zelj}(t_{i-1})$ preostalo rastojanje do ciljnog položaja PCM-a, a $500 / (dt \cdot H_{Brzina}) - (t_i - t_{p0})$ je preostalo vreme za dovođenje željenog položaj do ciljnog položaja PCM-a. Na ovaj način je izbegnuta skokovita promena željenog položaja ZMP-a i PCM-a.

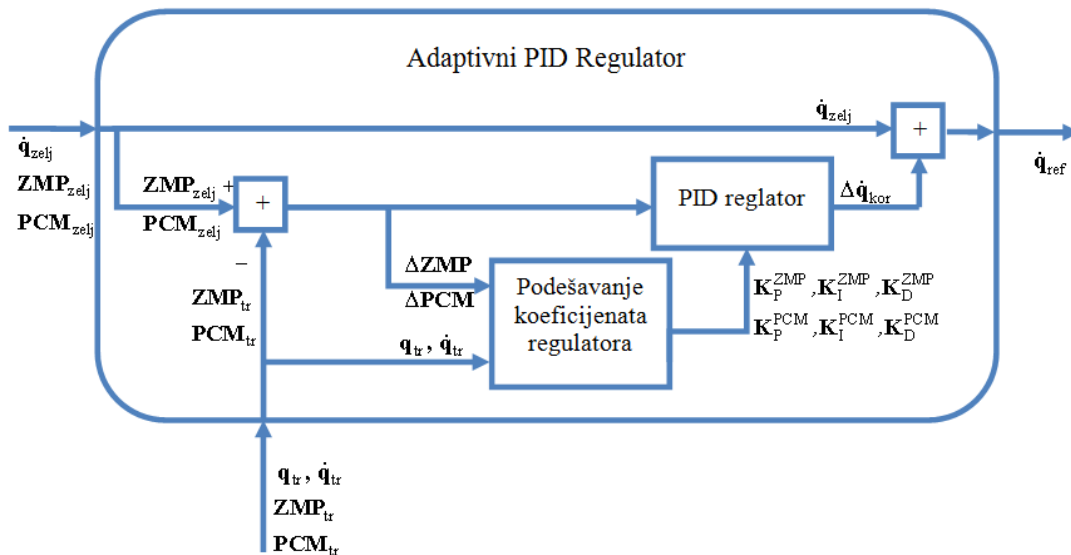
Položaj \mathbf{PCM}_{cilj} nije fiksna već zavisi od poze u koju treba da se dovede robot i od trenutne brzine kojom robot hoda. Na primer, tokom realizacije primitiva za naginjanje tela napred, \mathbf{PCM}_{cilj} treba da se postavi ispod segmenta stopala, ili ukoliko je potrebno da se robot osloni na prste, \mathbf{PCM}_{cilj} treba postaviti ispod segmenta prsta. Brzina hoda utiče na položaj \mathbf{PCM}_{cilj} na sledeći način. Ukoliko je $H_{Brzina} < 1$ tada je tokom naginjanja tela treba da bude takvo da se \mathbf{PCM}_{cilj} nađe tačno ispod težišta segmenta prstiju. Kada se podesi veća brzina hoda tada se uvodi pomeraj položaja \mathbf{PCM}_{cilj} ka unutrašnjem delu stopala, tj. ka drugom stopalu. Kako se povećava brzina hoda tako se povećava i pomeraj ka drugom stopalu. Pomeraj PCM-a ka dugom stopalu je najviše 5cm. Ukoliko je brzina hoda u opsegu od 1-2 tada se pomeraj linearno menja od 0-5cm. Kada je brzina hoda

veća od 2, tada se pomeraj zadržava na 5cm. Podešavanje položaja \mathbf{PCM}_{cij} je ilustrovano na Sl. 5.2. Crvenim krstićem, na Sl. 5.2., je predstavljeno težište segmenta prsta levog stopala.



Slika 5.2 Položaj \mathbf{PCM}_{cij} za različite brzine hoda tokom nagnjanja tela napred tako da se robot nagne iznad segmenta prsta levog stopala

Izlazi iz prvog bloka sa Sl. 5.1. predstavljaju ulazne vrednosti za naredni (drugi) blok. Uloga drugog bloka je da obezbedi održavanje dinamičkog balansa. Ovaj blok na osnovu željenih vrednosti uglova i ugaonih brzina u zglobovima i na osnovu položaja tačke nula momenta $\mathbf{ZMP}_{tr}(t_i)$ i projekcije centra mase $\mathbf{PCM}_{tr}(t_i)$, kao i na osnovu trenutnih



Slika 5.3 Blok dijagram korekcije željenih ugaonih brzina u zglobovima za održavanje dinamičkog balansa

vrednosti uglova i ugaonih brzina u zglobovima \mathbf{q}_{tr} i $\dot{\mathbf{q}}_{tr}$ vrši korekciju željenih ugaonih brzina $\dot{\mathbf{q}}_{zelj}(t_i)$. Izlaz iz ovog bloka su referentne vrednosti ugaonih brzina u zglobovima $\dot{\mathbf{q}}_{ref}(t_i)$ koje sada uzimaju u obzir očuvanje dinamičkog balansa. Korekcija ugaonih brzina se formira primenom adaptivnog PID regulatora čija je struktura data na Sl. 5.3.

Sa slike se vidi da je:

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref}(t_i) = \dot{\mathbf{q}}_{zelj}(t_i) + \Delta\dot{\mathbf{q}}_{kor}(t_i) .$$

Korekcija u zglobovima se računa po sledećoj formuli:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\mathbf{q}}_{kor}(t_i) = & \mathbf{a}_{ZMP} \cdot \left(\mathbf{K}_P^{ZMP} \cdot \Delta\mathbf{ZMP}(t_i) + \mathbf{K}_I^{ZMP} \cdot \sum_{k=0}^i \Delta\mathbf{ZMP}(t_k) + \right. \\ & \left. + \mathbf{K}_D^{ZMP} \cdot (\Delta\mathbf{ZMP}(t_i) - \Delta\mathbf{ZMP}(t_{i-1})) \right) + \\ & + \mathbf{a}_{PCM} \cdot \left(\mathbf{K}_P^{PCM} \cdot \Delta\mathbf{PCM}(t_i) + \mathbf{K}_I^{PCM} \cdot \sum_{k=0}^i \Delta\mathbf{PCM}(t_k) + \right. \\ & \left. + \mathbf{K}_D^{PCM} \cdot (\Delta\mathbf{PCM}(t_i) - \Delta\mathbf{PCM}(t_{i-1})) \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Iz jednačine (5.1) se vidi da korekcija zavisi od odstupanja ZMP-a i PCM-a ($\Delta\mathbf{ZMP}$ i $\Delta\mathbf{PCM}$) od željenih vrednosti. Željena vrednost ZMP-a (\mathbf{ZMP}_{zelj}) je jednaka trenutnoj vrednosti projekcija centra mase $\mathbf{PCM}_{tr}(t_i)$. To znači da se odstupanje ZMP-a od željene vrednosti računa po sledećoj formuli:

$$\Delta\mathbf{ZMP}(t_i) = \mathbf{PCM}_{tr}(t_i) - \mathbf{ZMP}_{tr}(t_i) . \quad (5.2)$$

Odstupanje projekcije centra mase od željenog položaja je dato izrazom:

$$\Delta\mathbf{PCM}(t_i) = \mathbf{PCM}_{zelj}(t_i) - \mathbf{PCM}_{tr}(t_i) . \quad (5.3)$$

U (5.1) \mathbf{K}_P^{ZMP} , \mathbf{K}_I^{ZMP} , \mathbf{K}_D^{ZMP} , \mathbf{K}_P^{PCM} , \mathbf{K}_I^{PCM} i \mathbf{K}_D^{PCM} predstavljaju matrice sa promenljivim koeficijentima proporcijalnog, integralnog i diferencijalnog dejstva PID regulatora. Blok za podešavanje koeficijenata regulatora određuje u kojim zglobovima će se vršiti korekcija i na koji način. Korekcija za održavanje dinamičkog balansa se uvodi u zglobovima čije su ose rotacije na Sl. A.1. označene ortovima $\bar{\mathbf{e}}_8$, $\bar{\mathbf{e}}_9$, $\bar{\mathbf{e}}_{11}$, $\bar{\mathbf{e}}_{13}$, $\bar{\mathbf{e}}_{16}$, $\bar{\mathbf{e}}_{17}$, $\bar{\mathbf{e}}_{19}$, $\bar{\mathbf{e}}_{21}$ i $\bar{\mathbf{e}}_{23}$ do $\bar{\mathbf{e}}_{42}$. Ortovi $\bar{\mathbf{e}}_8$ i $\bar{\mathbf{e}}_9$ određuju ose rotacije oko x i y ose u kuku desne noge, ortovi $\bar{\mathbf{e}}_{11}$ i $\bar{\mathbf{e}}_{13}$ određuju ose rotacije oko x i y ose u skočnom zglobu desne noge, ortovi $\bar{\mathbf{e}}_{16}$ i $\bar{\mathbf{e}}_{17}$ određuju ose rotacije oko x i y ose u kuku leve noge, $\bar{\mathbf{e}}_{17}$ i $\bar{\mathbf{e}}_{19}$ određuju

ose rotacije oko x i y ose u skočnom zglobu leve noge. Ortovi \bar{e}_{24} , \bar{e}_{26} do \bar{e}_{42} određuju ose rotacije koje su paralelne sa x osom nepotrebnog koordinatnog sistema, a \bar{e}_{23} , \bar{e}_{25} do \bar{e}_{41} određuju ose rotacije oko y ose u trupu robota. Simulacionim eksperimentima u [1] je pokazano da se pokretom u skočnom zglobu u jednu stranu, a kukom u suprotnu stranu vrlo efikasno može upravljati položajem PCM-a i ZMP-a. U jednačini (5.1) koeficijenti u matricama \mathbf{a}_{ZMP} i \mathbf{a}_{PCM} upravo imaju ulogu da odrede smer u kom će se vršiti kompenzacija i mogu imati vrednosti -1 ili 1. U tabeli 5.1 su prikazane vrednosti koeficijenata \mathbf{a}_{ZMP} i \mathbf{a}_{PCM} za sve zglobove u kojima se vrši korekcija.

Tabela 5.1 Vrednosti koeficijenata \mathbf{a}_{ZMP} i \mathbf{a}_{PCM}

Zglob	\mathbf{a}_{ZMP}	\mathbf{a}_{PCM}
\bar{e}_8 - rotacija oko x -ose u desnom kuku	+1	-1
\bar{e}_9 - rotacija oko y -ose u desnom kuku	+1	-1
\bar{e}_{11} - rotacija oko x -ose u sk. zglobu desne noge	-1	+1
\bar{e}_{13} - rotacija oko y -ose u sk. zglobu desne noge	-1	+1
\bar{e}_{16} - rotacija oko x -ose u levom kuku	+1	-1
\bar{e}_{17} - rotacija oko y -ose u levom kuku	+1	-1
\bar{e}_{19} - rotacija oko x -ose u sk. zglobu leve noge	-1	+1
\bar{e}_{21} - rotacija oko y -ose u sk. zglobu leve noge	-1	+1
\bar{e}_{23} , \bar{e}_{25} do \bar{e}_{41} - rotacija oko y -ose u zglobovima trupa	+1	-1
\bar{e}_{24} , \bar{e}_{26} do \bar{e}_{42} - rotacija oko x -ose u zglobovima trupa	+1	-1

Kao što se vidi iz tabele 5.1, korekcija se uvodi u 8 zglobova koji se nalaze u nogama i u sve zglobove trupa. Koeficijenti \mathbf{K}_p^{ZMP} , \mathbf{K}_l^{ZMP} , \mathbf{K}_d^{ZMP} , \mathbf{K}_p^{PCM} , \mathbf{K}_l^{PCM} i \mathbf{K}_d^{PCM} koji se odnose na zglobove nogu se menjaju se na sledeći način. Prvo se proverava da li stopala leve i desne noga ostvaruju površinski kontakt sa podlogom. Ukoliko neko stopalo ne ostvaruje površinski kontakt sa podlogom tada su svi koeficijenti za tu nogu jednaki nuli. Ako stopalo ostvaruje kontakt sa podlogom tada uvod korekcija u nogama tako što se podešavaju koeficijenti regulatora u zavisnosti od intenziteta grešaka $\Delta ZMP(t_i)$ i $\Delta PCM(t_i)$. Promena koeficijenata se vrši tako što se u svakoj iteraciji koeficijenti uvećavaju ili umanjuju za 1% od maksimalne vrednosti koeficijenta. Da li se koeficijenti uvećavaju ili umanjuju zavisi od sledećih uslova. Ukoliko je intenzitet greške $\Delta ZMP(t_i)$ veći od 3cm tada koeficijenti \mathbf{K}_p^{ZMP} , \mathbf{K}_l^{ZMP} i \mathbf{K}_d^{ZMP} rastu ka maksimalnim vrednostima, čime se prioritarno vodi o računa da greška ΔZMP bude što manja. Kada

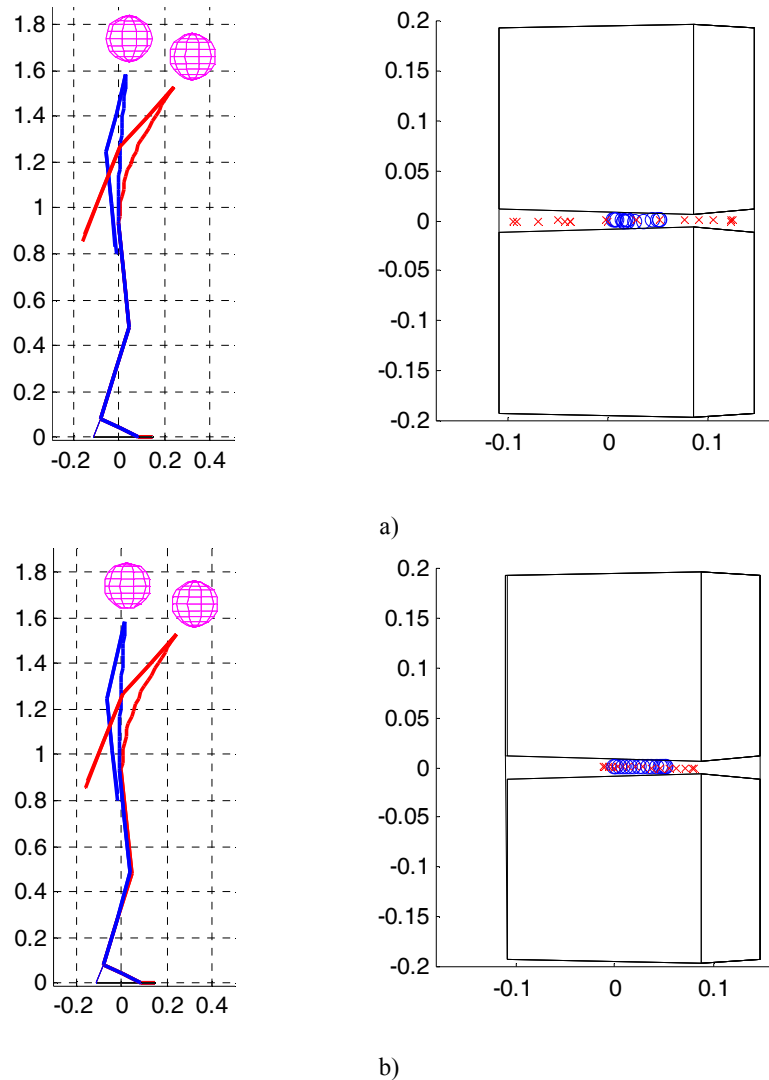
je intenzitet greške $\Delta ZMP(t_i)$ manji od 3cm tada se koeficijenti K_p^{ZMP} , K_I^{ZMP} i K_D^{ZMP} smanjuju do 0. Isto pravilo je uvedeno i za koeficijente K_p^{PCM} , K_I^{PCM} i K_D^{PCM} . Ukoliko je intenzitet greške $\Delta PCM(t_i)$ veći od 3cm tada koeficijenti K_p^{PCM} , K_I^{PCM} i K_D^{PCM} rastu ka maksimalnim vrednostima, a kada je intenzitet greške $\Delta PCM(t_i)$ manji od 3cm tada se koeficijenti K_p^{PCM} , K_I^{PCM} i K_D^{PCM} smanjuju do nule. Ukoliko su, npr. i $\Delta ZMP(t_i)$ i $\Delta PCM(t_i)$ veći od 3 cm tada će i koeficijenti K_p^{ZMP} , K_I^{ZMP} i K_D^{ZMP} kao i koeficijenti K_p^{PCM} , K_I^{PCM} i K_D^{PCM} rasti ka maksimalnim vrednostima. Koeficijenti K_p^{ZMP} , K_I^{ZMP} , K_D^{ZMP} , K_p^{PCM} , K_I^{PCM} i K_D^{PCM} u zglobovima trupa se menjaju po istim pravilima kao i koeficijenti u zglobovima nogu.

Na Sl. 5.4 su prikazana dva slučaja izvršavanja primitiva za održavanje trupa u uspravnom položaju kada je korekcija ugaonih brzina za očuvanje dinamičkog balansa uključena i isključena. Robot je u oba slučaja podjednako nagnut napred. Tokom eksperimenta je zadato da se izvršava samo primitiv za održavanje trupa u uspravnom položaju. U oba slučaja je zadata ista brzina realizacije primitiva $^{Brzina}C_{TR}$. Sa slike se vidi, kada je isključena korekcija (Sl. 5.4 a)), da položaj ZMP-a značajno osciluje i približava se ivici oslonačke površine. To znači da je dinamički balans bio ugrožen i ukoliko bi se povećala brzina izvođenja pokreta, došlo bi do pada robota. Na Sl. 5.4 b) je prikazan slučaj za istu brzinu izvođenja primitiva kada je uključena korekcija za održavanje dinamičkog balansa. Jasno se vidi da ZMP ne prilazi ivici oslonačke površine i postoji značajna rezerva za povećanje brzine izvođenja primitiva. Na Sl. 5.4 b) se vidi i da je došlo do minimalnog kretanja u zglobovima nogu koje takođe učestvuju u održavanju dinamičkog balansa. Ovaj primer dobro ilustruje pozitivne efekte kompenzacije radi očuvanja dinamičkog balansa koji su postižu čak i pri malim pokretima u skočnom zglobovima i kuku.

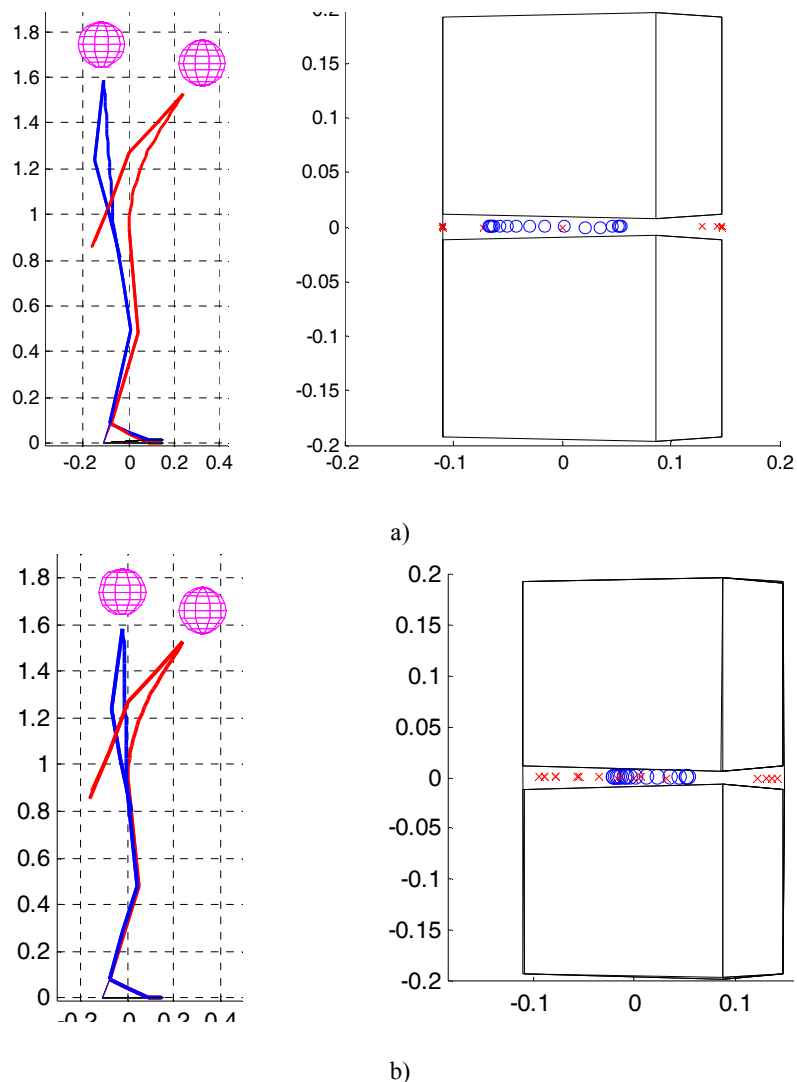
Na Sl. 5.5 je ponovljen opisani eksperiment ali je vrednost parametra $^{Brzina}C_{TR}$ sada bila 5 puta veća. Na Sl. 5.5 a) je prikazan slučaj kada je isključena korekcija za održavanje dinamičkog balansa, a na Sl. 5.5 b) je prikazan slučaj kada je korekcija uključena. Sa Sl. 5.5 a) se vidi da je robot uspravio trup ali je ZMP došao do ivice oslonačke površine i robot je počeo da rotira oko ivice stopala (oko pete) čime je započeo pad robota. Na Sl. 5.5 b) se vidi da je ZMP stalno unutar oslonačke površine i sprečen je pad robota.

Izlaz iz drugog bloka na Sl. 5.1. su referentne ugaone brzine $\dot{q}_{ref}(t_i)$ u svim zglobovima robota koje su dobijene kada je na željene ugaone brzine $\dot{q}_{zelj}(t_i)$ dodata

korekcija $\dot{\mathbf{q}}_{\text{kor}}(t_i)$. Ove vrednosti predstavljaju ulaz za poslednji blok u kojem se sračunavaju naponi motora za pogon zglobova. Kao što je već navedeno u poglavlju 4.4, da bi se ostvarilo referentno kretanje u zglobovima $\dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}}(t_i)$, potrebno je da se sračuna upravljačka veličina, tj. naponi motora \mathbf{u} . Iz jednačine (4.8), koja se koristi za računanje napona motora, se vidi da su primenjeni PID regulatori za svaki aktuiran zglob robot.



Slika 5.4 Stik dijagram robota i putanja PCM-a i ZMP-a tokom izvršavanja primitiva za održavanje trupa u uspravnom položaju pri manjim brzinama izvršavanja primitiva; a) korekcija željenih ugaonih brzina za održavanja dinamičkog balansa je isključen, b) korekcija željenih ugaonih brzina za održavanja dinamičkog balansa je uključen



Slika 5.5 Stik dijagram robot i putanja PCM-a i ZMP-a tokom izvršavanja primitiva za održavanje trupa u uspravnom položaju pri većim brzinama izvršavanja primitiva; a) korekcija željenih ugaonih brzina za održavanja dinamičkog balansa je isključen, b) korekcija željenih ugaonih brzina za održavanja dinamičkog balansa je uključen

5.2. Kombinovanje primitiva za generisanje hoda

Da bi se izvršila sinteza hoda potrebno je uvesti faze i odrediti koji se primitivi izvršavaju u svakoj fazi i sa kojim parametrima. Karakteristike hoda su zadate preko parametara hoda (H_{Brzina} , H_{Duzina} , H_{St_visina} i H_{Pravac}). Da bi se obezbedilo adekvatno izvršavanje primitiva u slučaju *on-line* promene karakteristika hoda, uvedena je zavisnost između parametara primitiva i parametara hoda. Tako na primer, brzina hoda H_{Brzina}

direktno utiče na brzinu izvođenja svakog primitiva, dužina koraka H_{Duzina} utiče na parametre primitiva za opružanje noge, visina do koje se podiže noga H_{St_visina} utiče na parametre primitiva za podizanje i opružanje noge, dok željeni pravac hoda H_{Pravac} takođe utiče na primitiv za podizanje i opružanje noge.

Kao što je već navedeno, pored izbora primitiva koji se izvršavaju po fazama, potrebno je podesiti sve parametre primitiva tako da se realizuje željeno kretanje, tj. hod. Tokom podešavanja parametara primitiva, parametri hoda se ne menjaju i postavljeni su na sledeće vrednosti: $H_{Brzina} = 1$, $H_{Duzina} = 1$, $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$. Hod koji se realizuje sa ovim parametrima će se nazivati osnovni hod (OH). Sve modifikacije hoda će se upoređivati sa osnovnim hodom. Pored podešavanja parametara primitiva, potrebno je u svakoj fazi zadati ciljni položaj projekcije centra mase \mathbf{PCM}_{cij} .

Osnovni hod je sintetizovan u 8 faza koje se ciklično ponavljaju. U svakoj fazi se utvrđenim redosledom izvršavaju odgovarajući primitivi koji se realizuju nogama. Takođe, u svakoj fazi se zadaje ciljni položaj projekcije centra mase robota \mathbf{PCM}_{cij} . Istovremeno sa primitivima koji se realizuju nogama, bez obzira na trenutnu fazu, stalno se izvršavaju primitivi za održavanje trupa u uspravnom položaju i primitiv za kretanje ruku tokom hoda. U nastavku će se objasniti koji primitivi se izvršavaju u svakoj od faza i koji parametri primitiva zavise od parametara hoda.

U simulacionim primerima koji su u ovoj tezi prikazani, hod počinje iz poze u kojoj robot stoji mirno u dvoosloničkoj fazi. Najpre se (tokom prve faze) izvršava primitiv za nagnjanje tela na osloničku nogu. Da bi brzina izvođenja primitiva $^{Brzina}C_{NON}^{Faza_1}$ bila srazmerna brzini hoda H_{Brzina} , uvedena je sledeća zavisnost:

$$^{Brzina}C_{NON}^{Faza_1} = H_{Brzina} \cdot ^{Brzina}_{OH}C_{NON}^{Faza_1} \quad (5.4)$$

gde je $^{Brzina}_{OH}C_{NON}^{Faza_1}$ brzina nagnjanja tela na osloničku nogu tokom faze 1 podešena za osnovni hod. U fazi 1, ciljni položaj \mathbf{PCM}_{cij} je postavljen ispod težišta stopala noge koja tokom jednoosloničke faze treba da bude oslonička. Položaj \mathbf{PCM}_{cij} zavisi od trenutne brzine hoda i određuje se na način koji je prikazan na Sl. 5.2. Vrednosti parametara primitiva $^{Baza-x}C_{NON}^{Faza_1}$ i $^{Baza-x}C_{NON}^{Faza_1}$ su postavljeni na vrednosti ciljnog položaja projekcije centra mase \mathbf{PCM}_{cij} , što znači da se tokom izvođenja ovog primitiva, bazni koordinatni sistem dovodi iznad stopala buduće osloničke noge. Prva faza je završena kada se ispuni uslov za završetak primitiva za nagnjanje tela na osloničku nogu.

Tokom druge faze se paralelno izvršavaju primitiv za podizanje noge i primitiv za

naginjanje tela napred. Svi parametri primitiva za podizanje noge zavise od parametara hoda na sledeći način:

$$\begin{aligned} \text{Brzina } C_{\text{PN}}^{\text{Faza}_2} &= H_{\text{Brzina}} \cdot \text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2} \\ \text{Visina } C_{\text{PN}}^{\text{Faza}_2} &= H_{\text{S_Visina}} \cdot \text{Visina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2} \\ \text{Pravac } C_{\text{PN}}^{\text{Faza}_2} &= H_{\text{Pravac}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

gde su $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2}$ i $\text{Visina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2}$ parametri primitiva za podizanja noge tokom faze 2 podešeni za osnovni hod. Kod primitiva za naginjanje tela napred parametar koji zavisi od parametara hoda je samo brzine izvođenja primitiva. Prema tome $\text{Brzina } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_2}$ se računa iz jednačine:

$$\text{Brzina } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_2} = H_{\text{Brzina}} \cdot \text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2} \quad (5.6)$$

gde je $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2}$ brzina naginjanja napred tokom faze 2 podešena za osnovni hod. Ciljni položaja PCM_{cij} se tokom druge faze nalazi na sredini između težišta stopala i težišta segmenta. Parametri primitiva za naginjanje napred, $\text{Baza-x } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_2}$ i $\text{Baza-x } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_2}$ su postavljeni na vrednosti ciljnog položaja projekcije centra mase PCM_{cij} . Druga faza je završena kada su ispunjeni uslovi za završetak oba primitiva.

Pošto se tokom druge faze simultano izvršavaju primitivi za podizanje noge i naginjanje tela napred, praktično je nemoguće podesiti brzinu izvođenja oba primitiva $\text{Brzina } C_{\text{PN}}^{\text{Faza}_2}$ i $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_2}$, tako da se oni završe u istom trenutku. Zbog toga će se krajem druge faze pojaviti situacija da se jedan primitiv završi pre drugog. Usled nesinhronizacije se nepotrebno zaustavlja jedna noga tokom hoda što pri većim brzinama može dovesti do trzaja. Trzaji su nepoželjni jer dovode do naglih skokova ZMP-a i ugrožavaju dinamički balansa. Takođe, ukoliko se javljaju trzaji tada hod nije antropomorfan. Način na koji je umanjen problem nesinhronizacije primitiva umanjen će se objasniti u poglavlju 5.3.

U trećoj fazi se paralelno izvršavaju primitivi za opružanje noge i za naginjanje tela napred. Parametri primitiva za opružanje noge koji zavise od parametara hoda su $\text{Brzina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3}$, $\text{Duzina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3}$, $\text{Visina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3}$, i $\text{Pravac } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3}$. Ovi parametri se u zavisnosti od parametara hoda računaju sledećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
\text{Brzina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3} &= H_{\text{Brzina}} \cdot \text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3} \\
\text{Duzina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3} &= H_{\text{Duzina}} \cdot \text{Duzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3} \\
\text{Visina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3} &= H_{\text{St_visina}} \cdot \text{Visina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3} \\
\text{Pravac } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3} &= H_{\text{Pravac}}
\end{aligned} \tag{5.7}$$

gde su $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3}$, $\text{Duzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3}$ i $\text{Visina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3}$ vrednosti parametar za opružanje noge tako da se ostvari osnovni hod. I brzina izvođenja primitiva za nagnjanje tela napred, koji se simultano izvršava sa opružanjem noge, je i dalje srazmerna brzini hoda i računa se jednačinom:

$$\text{Brzina } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_3} = H_{\text{Brzina}} \cdot \text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3} \tag{5.8}$$

pri čemu je $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_3}$ brzina nagnjanja napred tokom faze 3 podešena za osnovni hod. Tokom treće faze ciljni položaj PCM_{cilj} se nalazi ispod segmenta prsta. Vrednosti parametara primitiva $\text{Baza-x } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_3}$ i $\text{Baza-x } C_{\text{NON}}^{\text{Faza}_3}$ su postavljeni na vrednosti ciljnog položaj projekcije centra mase PCM_{cilj} , što znači da se tokom izvođenja ovog primitiva, bazni koordinatni sistem dovodi iznad segmenta prsta oslonačke noge. Treća faza je završena kada su ispunjeni uslovi za završetak oba primitiva. I tokom treće faze se javlja problem nesinhronizacije parametara, zbog nemogućnosti da se ručno podese parametri brzine primitiva $\text{Brzina } C_{\text{ON}}^{\text{Faza}_3}$ i $\text{Brzina } C_{\text{NN}}^{\text{Faza}_3}$ tako da se oni završe u istom trenutku.

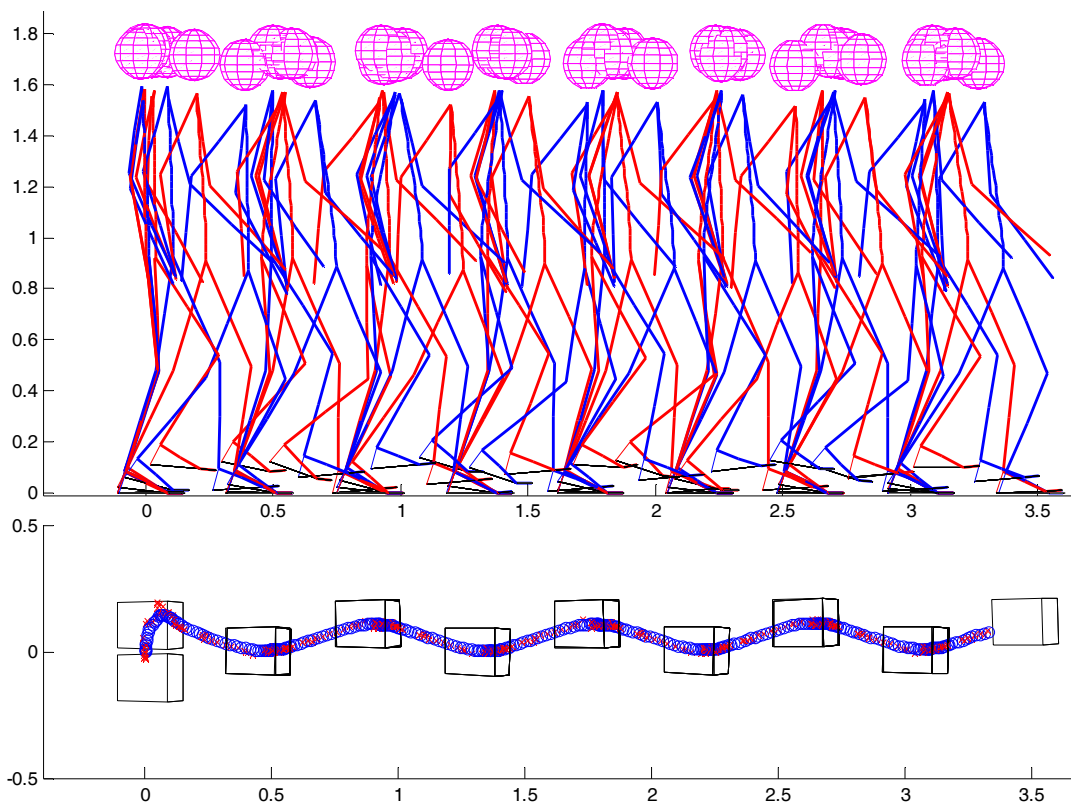
Tokom četvrtre faze izvršava se primitiv za spuštanje stopala (rotacija oko pete i ostvarivanje površinskog kontakta sa podlogom). Jedini parametar primitiva za spuštanje stopala koji zavisi od parametara hoda je $\text{Brzina } C_{\text{SS}}^{\text{Faza}_4}$ i proporcionalan je sa željenom brzinom hoda B_H . Parametar P_{BSS} se računa po formuli:

$$\text{Brzina } C_{\text{SS}}^{\text{Faza}_4} = H_{\text{Brzina}} \cdot \text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_4} \tag{5.9}$$

gde je $\text{Brzina } C_{\text{OH}}^{\text{Faza}_4}$ brzina spuštanja stopala tokom četvrtre faze podešena za osnovni hod. Ciljni položaj projekcije centra mase PCM_{cilj} je postavljen na sredini između težišta segmenta prsta i težišta stopala suprotne noge i parametri $\text{Baza-x } C_{\text{SS}}^{\text{Faza}_4}$ i $\text{Baza-y } C_{\text{SS}}^{\text{Faza}_4}$ imaju vrednosti položaja PCM_{cilj} . Četvrtre faza je završena kada je ispunjen uslov za završetak spuštanja stopala. Nakon završene četvrtre faze, slede faze 5-8 koje su iste kao i prve četiri faze, s tim što se menjaju noge kojima se primitivi izvršavaju. Ovih 8 faza, tokom kojih se smenjuju primitiva koji se izvršavaju nogama, se ciklično ponavljaju dokle god je potrebno (i moguće) da robot hoda.

Na Sl. 5.6 je prikazan stik dijagram robota kao i raspored stopala i položaj ZMP-a i

PCM-a tokom hoda koji je generisan po prethodno opisanoj proceduri. Da bi dijagram bio pregledniji, prikazana je poza u kojoj se robot nalazi na svakih 0.667 s i svaka naredna poza je prikazana drugom bojom. Na slici je prikazan osnovni hod, što znači da su parametri hoda imali vrednosti $H_{Brzina} = 1$, $H_{Duzina} = 1$, $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$. Tokom realizacije sintetizovanog hoda robot je zadato da napravio ukupno 8 polukoraka i tom prilikom je prešao rastojanje od oko 3.5m. Robotu je za realizaciju 8 polukoraka bilo potrebno 23.33s, što znači da je hodao prosečnom brzinom od 0.54km/h. Kao što se vidi sa Sl. 5.6, putanja ZMP-a i PCM-a su stalno unutar oslonačke površine, odnosno dinamički balans robota je stalno očuvan.



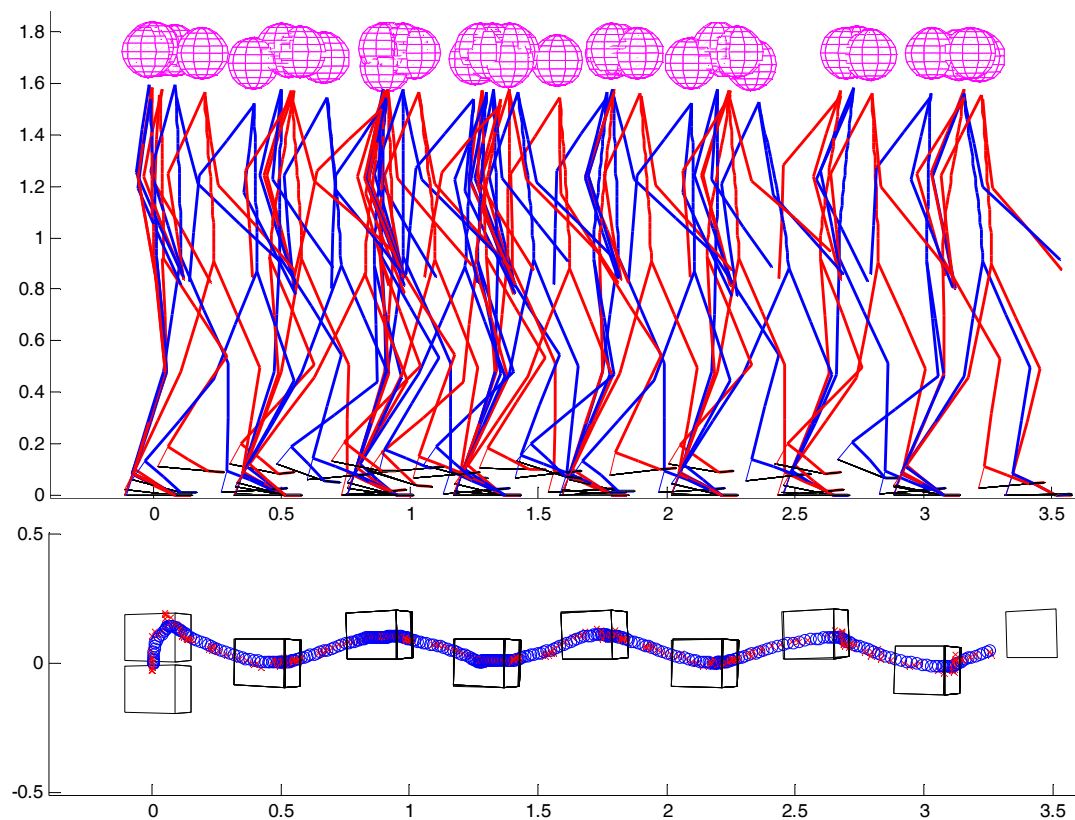
Slika 5.6 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a tokom hoda koji je generisan primenom primitiva

Pošto je položaj ZMP-a stalno blizu položaja PCM-a to znači da postoji prostor za brže kretanje robota. Povećavanje brzine hoda je moguće dok je korekcija za održavanje dinamičkog balansa u stanju da zadrži položaj ZMP-a unutar oslonačke površine. Takođe, tokom ubrzavanja hoda stalno se mora voditi računa o sveukupnom izgledu hoda. Kao što je već navedeno, parametri primitiva zavise od parametara hoda, čime je omogućeno da se promenom parametara hoda, automatski izmene parametri korišćenih primitiva. Stoga se promenom bilo kog parametra hoda u bilo kom trenutku (tj. *on-line*)

promeni odmah menjaju i parametri primitiva, tj. *on-line* se modifikuje kretanje u zglobovima koje odgovara zadatim parametrima hoda.

5.3. *On-line* modifikacija hoda

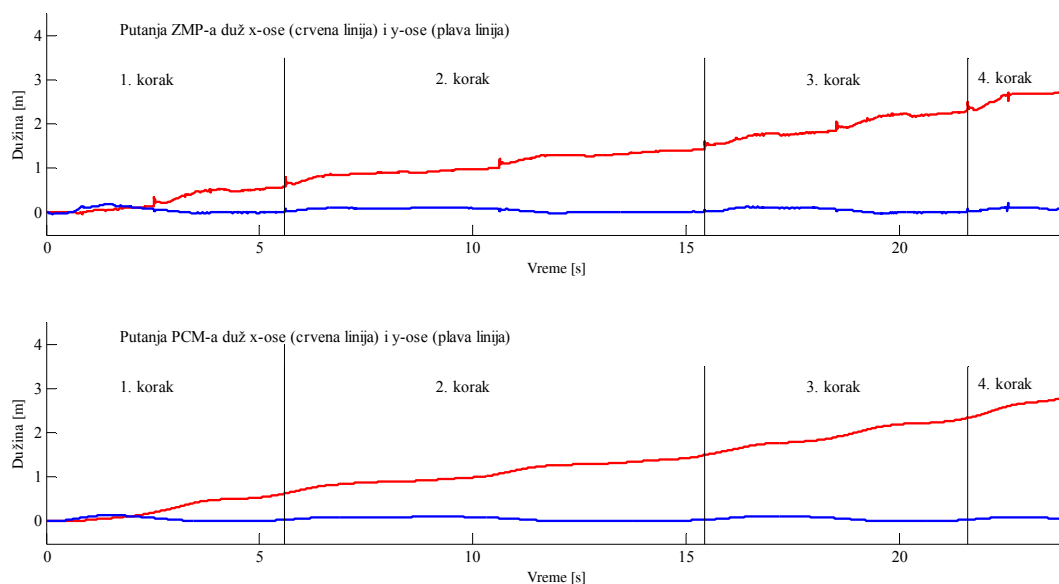
Hod koji je generisan primenom primitiva ima četiri osnovna parametra²⁵ pri čemu je svaki parametar moguće menjati *on-line*. Vrednosti parametara je moguće promeniti u bilo kom trenutku, pri čemu parametri hoda mogu imati vrednosti iz opsega koji su određeni eksperimentalno i koji su unapred propisani: U ovom poglavlju će se prikazati simulacioni rezultati dobijeni kada se *on-line* menjaju parametara hoda. Prvo će se prikazati simulacioni rezultati kada se menja samo jedan parametar hoda, a zatim će se prikazati rezultati kada se istovremeno menja više parametara hoda.



Slika 5.7 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja brzina hoda

²⁵ Ovi parametri utiču na parametre primitiva od kojih je hod komponovan.

Na Sl. 5.7 je prikazan hod tokom kojeg se *on-line* menja brzina hoda. Tokom prvog koraka $H_{Brzina} = 1$. Kada se završio prvi korak brzina hoda je postavljena na $H_{Brzina} = 0.5$, što znači da je hod usporen. Tokom trećeg koraka brzina hoda je ponovo postavljena na $H_{Brzina} = 1$. Od četvrtog koraka je brzina hoda postavljena na $H_{Brzina} = 1.5$. Ostali parametri hoda su postavljeni na sledeće vrednosti: $H_{Duzina} = 1$, $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$. Na Sl. 5.8 je prikazana promena ZMP-a i PCM-a u vremenu duž x i y ose, gde se vidi kako promena brzine hoda utiče na promenu ZMP-a i PCM-a i na vreme potrebno da robot realizuje jedan korak. Sa slike se vidi da je vreme potrebno da robot realizuje drugi korak najduže, odnosno promena ZMP-a i PCM-a duž x ose (tj. u pravcu hoda) je najsporija, a vreme potrebno za realizaciju četvrtog koraka je najkraće, a promena ZMP-a i PCM-a duž x ose je najbrža. Položaj ZMP-a i PCM-a duž y ose ne raste jer se pravac hoda robota poklapa sa x osom.

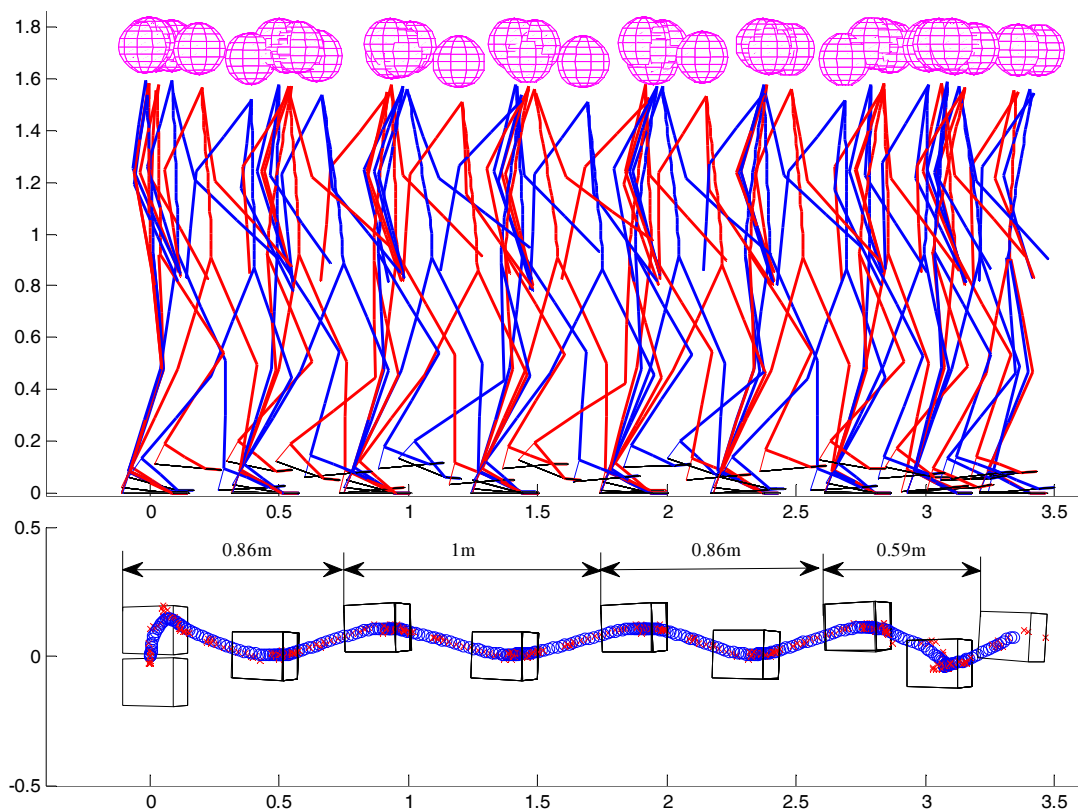


Slika 5.8 Putanja ZMP-a i PCM-a duž x i y-ose a kada se *on-line* menja brzina hoda

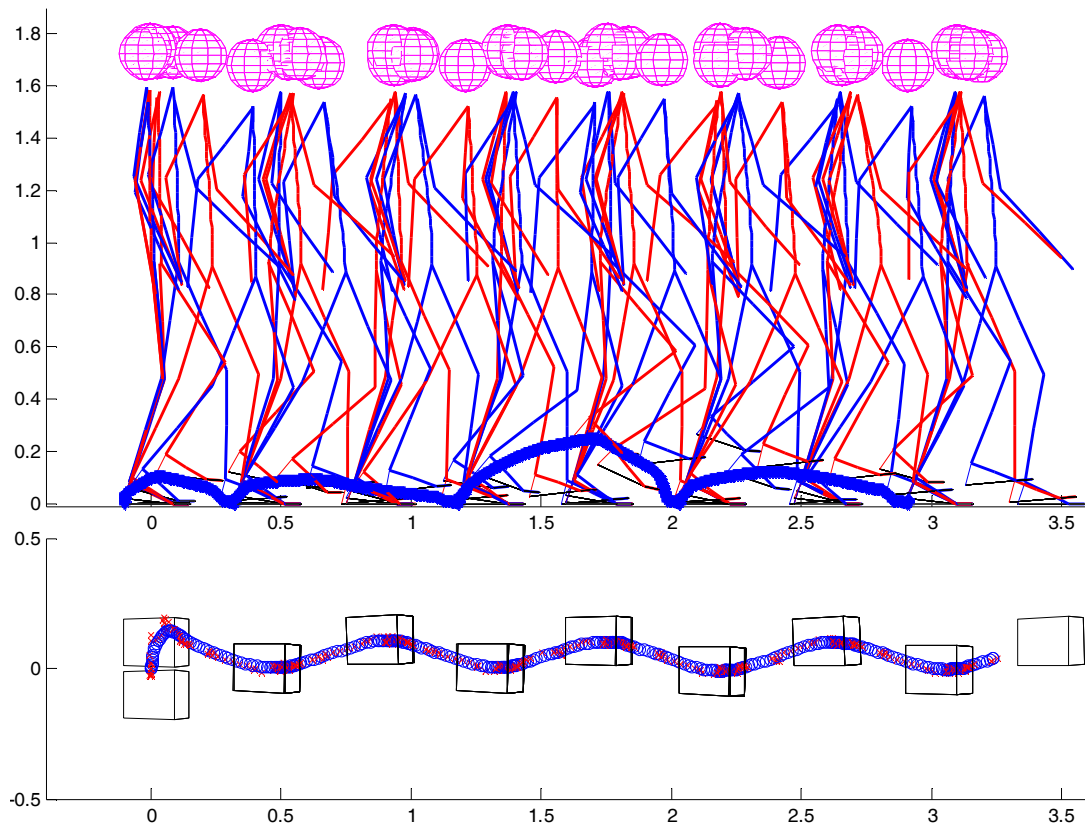
Na Sl. 5.9 je prikazan hod tokom kojeg se *on-line* menja dužina koraka tokom hoda. Tokom prvog koraka $H_{Duzina} = 1$. Kada se završi prvi korak, dužina koraka se postavlja na $H_{Duzina} = 1.25$, što znači da je korak produžen. Tokom trećeg koraka dužina koraka je ponovo postavljena na $H_{Duzina} = 1$, dok je tokom četvrtog koraka dužina koraka postavljena na $H_{Duzina} = 0.5$. Ostali parametri hoda su postavljeni na sledeće vrednosti: $H_{Brzina} = 1$, $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$. Na osnovu položaja stopala sa Sl. 5.9 se vidi da je rastojanje između levog i desnog stopala tokom drugog koraka najveće, tj. realizovan je

najduži korak, dok je rastojanje između levog i desnog stopala tokom četvrtog koraka najmanje odnosno realizovan je najkraći korak.

Na Sl. 5.10 je prikazan hod tokom kojeg se *on-line* menja visina do koje se podiže stopalo tokom prenosa noge iz zadnjeg u prednji položaj. Tokom prvog koraka visina do koje se podiže stopalo je $H_{St_visina} = 1$. Kada se završi prvi korak, visina do koje se podiže stopalo se postavlja na $H_{St_visina} = 0.5$, što znači da je stopalo spušteno u odnosu na prvi korak. Tokom trećeg koraka visina do koje se podiže stopalo je postavljena na $H_{St_visina} = 1.5$, dok je od četvrtog koraka visina do koje se podiže stopalo postavljena na $H_{St_visina} = 1$. Ostali parametri hoda su postavljeni na sledeće vrednosti: $H_{Brzina} = 1$,



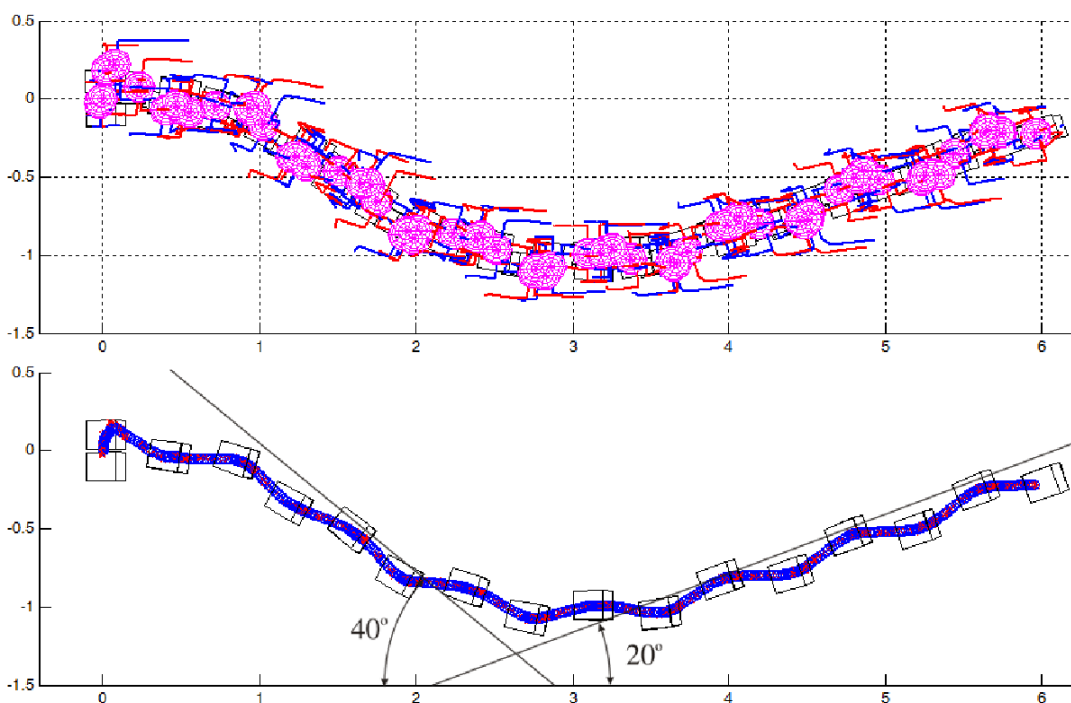
Slika 5.9 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja dužina koraka tokom hoda



Slika 5.10 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja visina stopala tokom hoda

$H_{Duzina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$. Na osnovu putanje stopala sa Sl. 5.10 se vidi je položaj do kojeg je podignuto stopalo tokom drugog koraka najniži, dok je položaj do kojeg je podignuto stopala tokom trećeg koraka najviši.

Na Sl. 5.11 je prikazan hod tokom kojeg se *on-line* menjan pravac hoda. U početku, posle svakog polukoraka robot skreće desno za 10° . Nakon 4 polukoraka (kada se skrene desno za 40°) robot se vraća na prvobitni pravac hodanja pa se pravac kretanja tokom narednih 6 polukoraka menja svaki put za 10° levo. Ostali parametri hoda su postavljeni na sledeće vrednosti: $H_{Brzina} = 1$, $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Duzina} = 1$. Na osnovu stik dijagrama sa Sl. 5.11 se vidi kako robot menja pravac tako da skrene u desnu stranu za 40° stepeni, a zatim postepeno skrene u levo za 60° i na dalje nastavi hod u pravcu koji u odnosu na početni pravac zaklapa ugao od 20° .

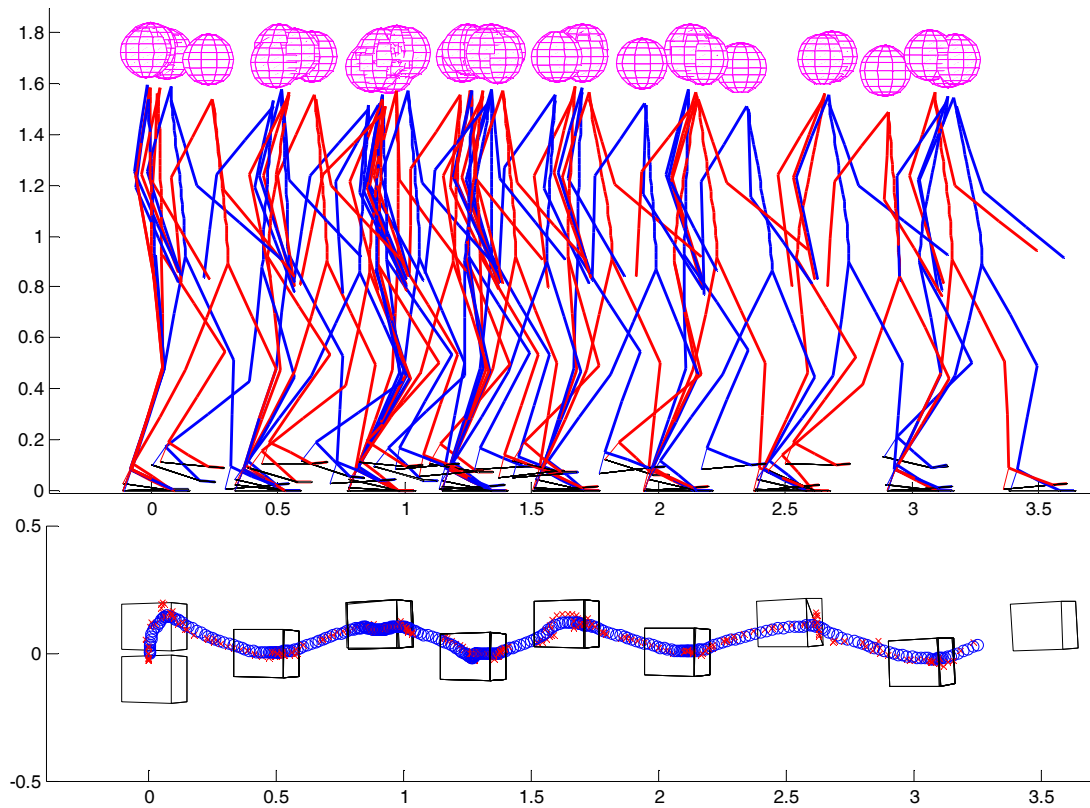


Slika 5.11 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja pravac hoda

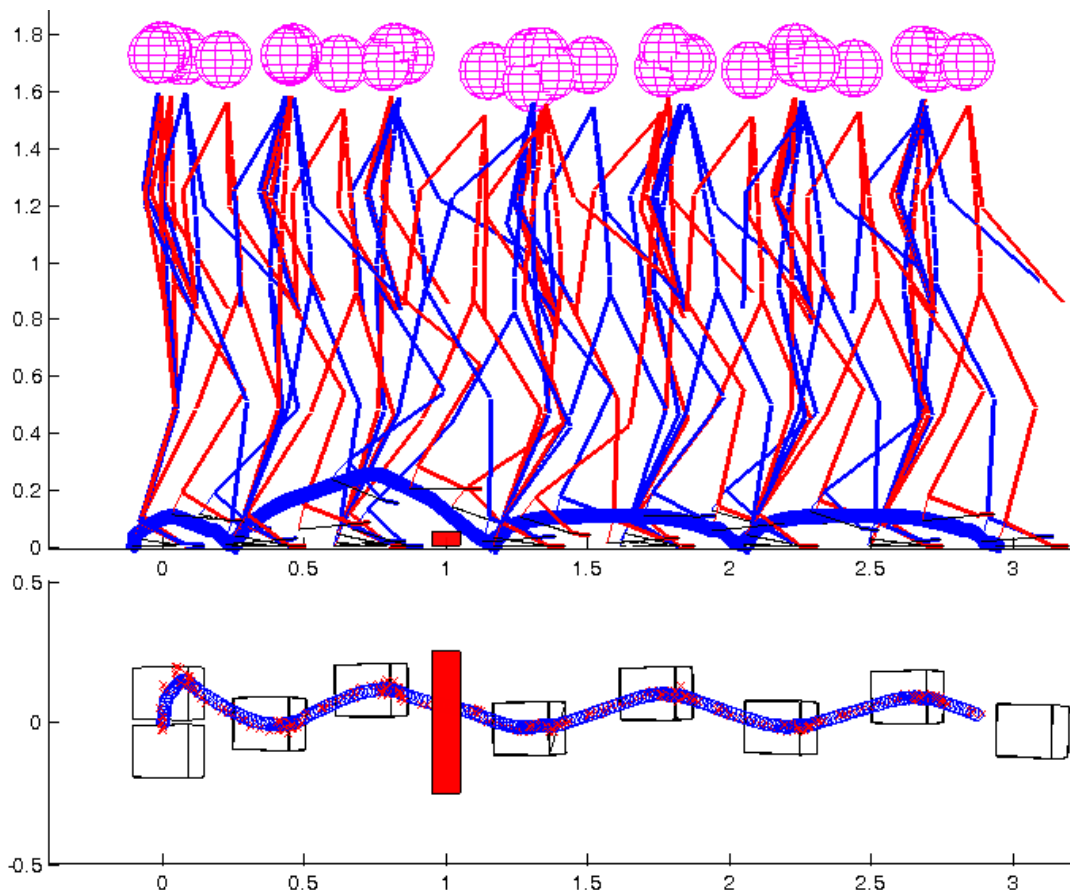
Čovek tokom hoda najčešće menja više parametara. Na primer kada čovek pravi kraće korake, tada u isto vreme i uspori hod odnosno kada hoda brže, tada se poveća i dužina koraka. Takođe, kada hoće da prekorači neku prepreku, čovek priđe preprici podešavajući *on-line* dužinu koraka, a zatim podigne stopalo do visine potrebne da je prekorači. Na Sl. 5.12 i Sl. 5.13 su prikazani slučajevi kada robot *on-line* tokom hoda menja istovremeno više parametara. Na Sl. 5.12 je prikazan slučaj kada robot podešava brzinu i dužinu koraka istovremeno. Tokom prvog koraka $H_{Brzina} = 1$ i $H_{Duzina} = 1$. Kada se završio prvi korak brzina hoda je postavljena na $H_{Brzina} = 0.5$, a dužina koraka je postavljena na $H_{Duzina} = 0.7$. To znači da je hod usporen, a istovremeno je korak kraći. Tokom trećeg koraka brzina hoda i dužina koraka su ponovo postavljeni na $H_{Brzina} = 1$ i $H_{Duzina} = 1$. Od četvrtog koraka je brzina hoda postavljena na $H_{Brzina} = 1.5$, a dužina koraka je postavljena na $H_{Duzina} = 1.25$. Ostali parametri hoda su postavljeni na sledeće vrednosti: $H_{St_visina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$.

Na Sl. 5.13 je prikazan slučaj kada robot podešava dužinu koraka tako da adekvatno priđe preprici koju je potrebno prekoračiti. Tokom prvog koraka je dužina koraka podešena na $H_{Duzina} = 0.5$. Kada je robot prišao preprici, ne zaustavlja se ispred nje, već

nastavlja hod, pri čemu su parametri za visinu stopala i dužinu koraka postavljene na sledeće vrednosti: $H_{St_visina} = 1.5$ i $H_{Duzina} = 1.25$. Nakon uspešno savladane prepreke parametri hoda kojima se definišu dužina koraka i visina do koje se podiže stopalo su postavljeni na vrednosti $H_{Duzina} = 1$ i $H_{St_visina} = 1$. Ostali parametri hoda su postavljeni na: $H_{Brzina} = 1$ i $H_{Pravac} = 0$.



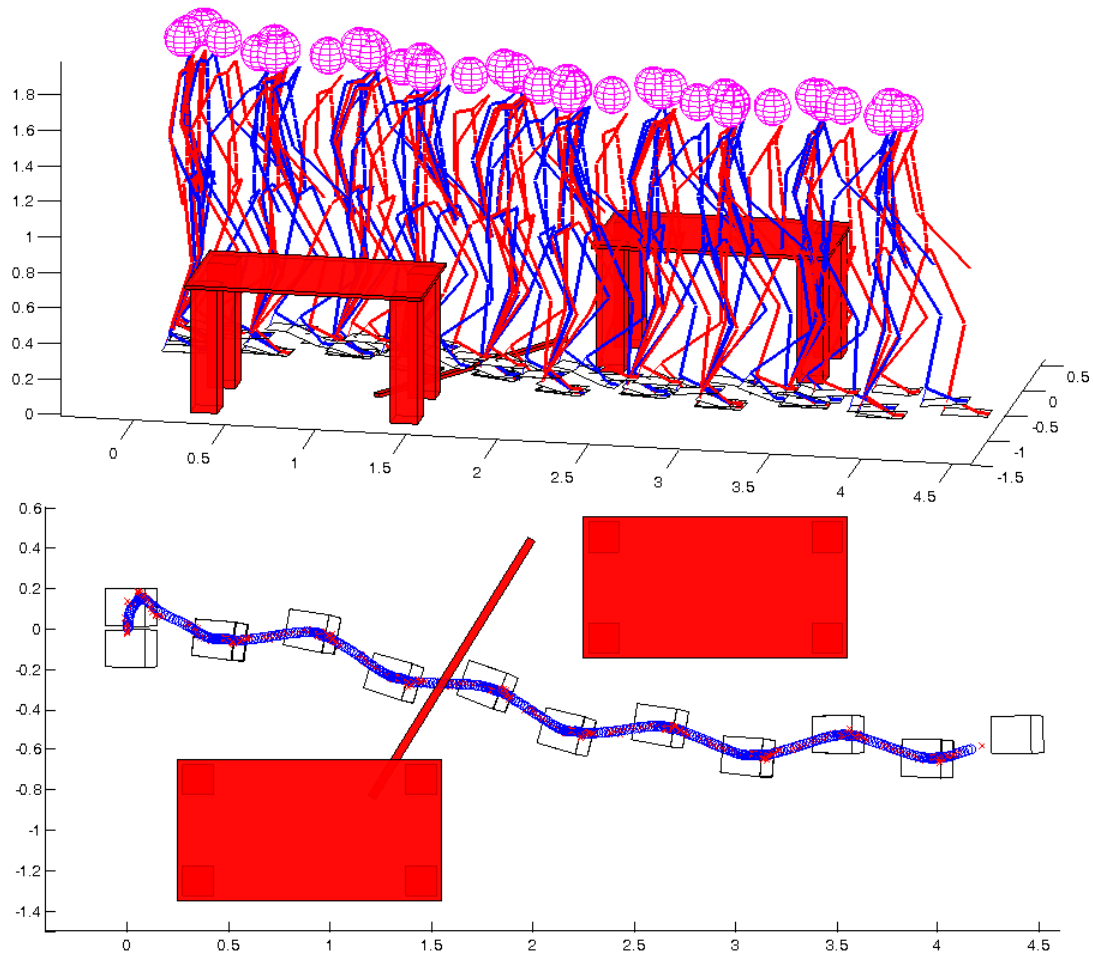
Slika 5.12 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menjaju brzina hoda i dužina koraka



Slika 5.13 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja dužina koraka i visina stopala tako da se prekorači prepreka ispred robota

Na Sl. 5.14. je prikazan primer u kom su *on-line* podešeni brzina hoda, pravac hoda i visina do koje se podiže stopalo kako bi robot prošao između stolova i prekoračio prepreku koja mu se nalazi na putu. Tokom prvih 4 polukoraka robot skreće u desno svaki put za 5° . Tokom narednih 4 polukoraka robot skreće u levo svaki put za 5° tako da se posle 8 polukoraka vraća na prvobitni pravac hoda. Tokom prvih osam polukoraka brzina hoda je postavljena na $H_{\text{Brzina}} = 0.8$. Kada se robot vratio na prvobitni pravac, brzina hoda je postavljena na $H_{\text{Brzina}} = 1$. Na taj način je robot uspešno prošao između stolova. Takođe, da bi robot prekoračio prepreku koja mu se nalazi na putu, tokom četvrtog i petog polukoraka visina do koje se podiže stopalo tokom hoda $H_{\text{St_visina}}$ je postavljena na vrednost 1.5. U prvih tri polukoraka i nakon petog polukoraka ovaj parametar je postavljen na 1.

U svim prethodno prikazanim primerima u kojima su menjani parametri hoda, promena je vršena na početku polukoraka. To je urađeno samo da bi se lakše uočilo



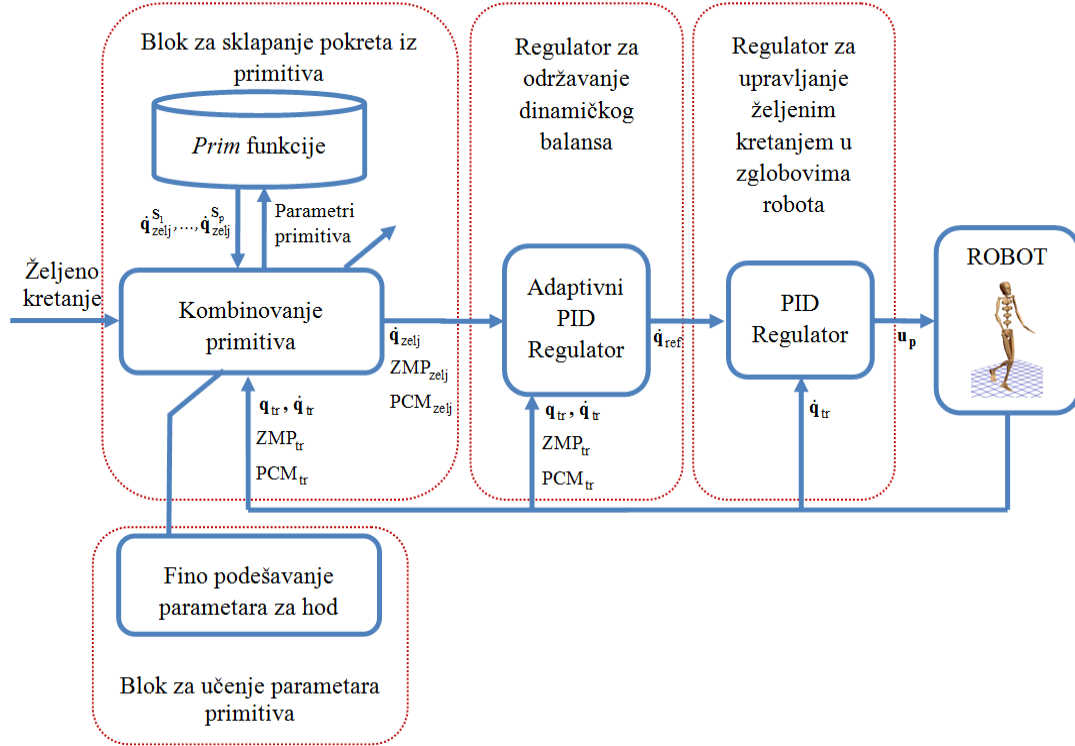
Slika 5.14 Stik dijagram robota, položaj stopala i putanja ZMP-a i PCM-a kada se *on-line* menja pravac i brzina hoda tako da se zaobiđe prepreka ispred robota

efekat promene parametara. Međutim, promena parametara može da se izvrši u bilo kom trenutku tokom hoda i na bilo koju vrednost iz opsega dozvoljenih vrednosti.

5.4. Učenje parametara primitiva za realizaciju hoda

Vrednosti parametara primitiva za osnovni hod (OH) tokom simulacija prikazanih u prethodnom poglavlju su podešeni na osnovu iskustva i probanja. Podešavanjem parametara primitiva na ovaj način skoro nije moguće postići sinhronizaciju tokom izvršavanja više primitiva istovremeno. Tokom realizacije hoda, u četiri od ukupno osam faza izvršavaju se dva primitiva istovremeno. To su faze 2, 3, 6 i 7. Tokom 2. i 6. faze paralelno se izvršavaju primitiv za podizanje noge i primitiv za naginjanje tela napred, dok se tokom 3. i 7. faze paralelno izvršavaju primitivi za opružanje noge i naginjanje

tela napred. Bolja sinhronizacija u izvršavanju primitiva je moguća ukoliko se fino podese parametri koji utiču na brzinu izvođenja primitiva. Zbog toga je uveden blok za učenje početnih vrednosti brzine kojom se izvršavaju primitivi. Tokom procesa učenja početnih vrednosti parametara primitiva upravljački blok je proširen i prikazan je na Sl. 5. 15.



Slika 5.15 Upravljački blok proširen sa blokom za učenje parametara primitiva

Učenje parametara primitiva se vrši na kraju svakog koraka. Tokom trajanja svake faze u kojoj se izvršava više primitiva istovremeno, meri se vreme koje protekne od završetka jednog do završetka drugog primitiva. Na kraju svake od faze izračunavaju se vremena na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 \Delta t^{\text{Faza}_2} &= t_{\text{PN_kraj}}^{\text{Faza}_2} - t_{\text{NN_kraj}}^{\text{Faza}_2} \\
 \Delta t^{\text{Faza}_3} &= t_{\text{ON_kraj}}^{\text{Faza}_3} - t_{\text{NN_kraj}}^{\text{Faza}_3} \\
 \Delta t^{\text{Faza}_6} &= t_{\text{PN_kraj}}^{\text{Faza}_6} - t_{\text{NN_kraj}}^{\text{Faza}_6} \\
 \Delta t^{\text{Faza}_7} &= t_{\text{ON_kraj}}^{\text{Faza}_7} - t_{\text{NN_kraj}}^{\text{Faza}_7}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

U jednačini (5.10), $t_{\text{PN_kraj}}^{\text{Faza}_2}$ je vremenski trenutak kada se tokom 2. faze završi primitiv

za podizanje noge, $t_{NN_kraj}^{Faza_2}$ je trenutak kada se tokom 2. faze završi naginjanje tela napred, $t_{ON_kraj}^{Faza_3}$ je trenutak kada se tokom 3. faze završi opružanje noge, $t_{NN_kraj}^{Faza_3}$ je trenutak kada se tokom 3. faze završi naginjanje tela napred, $t_{kraj_PN}^{faza_6}$ je trenutak kada se tokom 6. faze završi primitiv za podizanje noge, $t_{NN_kraj}^{Faza_6}$ je trenutak kada se tokom 6. faze završi naginjanje tela napred, $t_{ON_kraj}^{Faza_7}$ je trenutak kada se tokom 7. faze završi opružanje noge i $t_{NN_kraj}^{Faza_7}$ je trenutak kada se tokom 7. faze završi naginjanje tela napred.

Vrednosti brzine izvođenja primitiva za osnovni hod se uče (menjaju tokom realizacije hoda) primenom sledećih jednačina:

$$\begin{aligned}
 \text{Brzina}_{OH} C_{PN}^{Faza_2} &= \text{Brzina}_{OH} C_{PN}^{Faza_2} + 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_2} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_2} &= \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_2} - 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_2} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{ON}^{Faza_3} &= \text{Brzina}_{OH} C_{ON}^{Faza_3} + 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_3} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_3} &= \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_3} - 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_3} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{PN}^{Faza_6} &= \text{Brzina}_{OH} C_{PN}^{Faza_6} + 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_6} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_6} &= \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_6} - 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_6} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{ON}^{Faza_7} &= \text{Brzina}_{OH} C_{ON}^{Faza_7} + 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_7} \\
 \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_7} &= \text{Brzina}_{OH} C_{NN}^{Faza_7} - 0.02 \cdot \Delta t^{Faza_7}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Primenom prve dva izraza iz jednačine (5.11) povećava se brzina izvođenja primitiva koji se završio kasnije, a smanjuje se brzina primitiva koji se završio pre, tokom druge faze. Po istom principu je uvedeno podešavanje ostalih brzina izvođenja primitiva tokom faza 3, 6 i 7.

Posle ručnog podešavanja vrednosti parametara primitiva za osnovni hod, vremena iz jednačine (5.10) su bile:

$$\begin{aligned}
 \Delta t^{Faza_2} &= 0.2087s \\
 \Delta t^{Faza_3} &= -0.3627s \\
 \Delta t^{Faza_6} &= 0.2973s \\
 \Delta t^{Faza_7} &= 0.3513s
 \end{aligned}$$

A nakon učenjem parametara dostignute su sledeće vrednosti vremena :

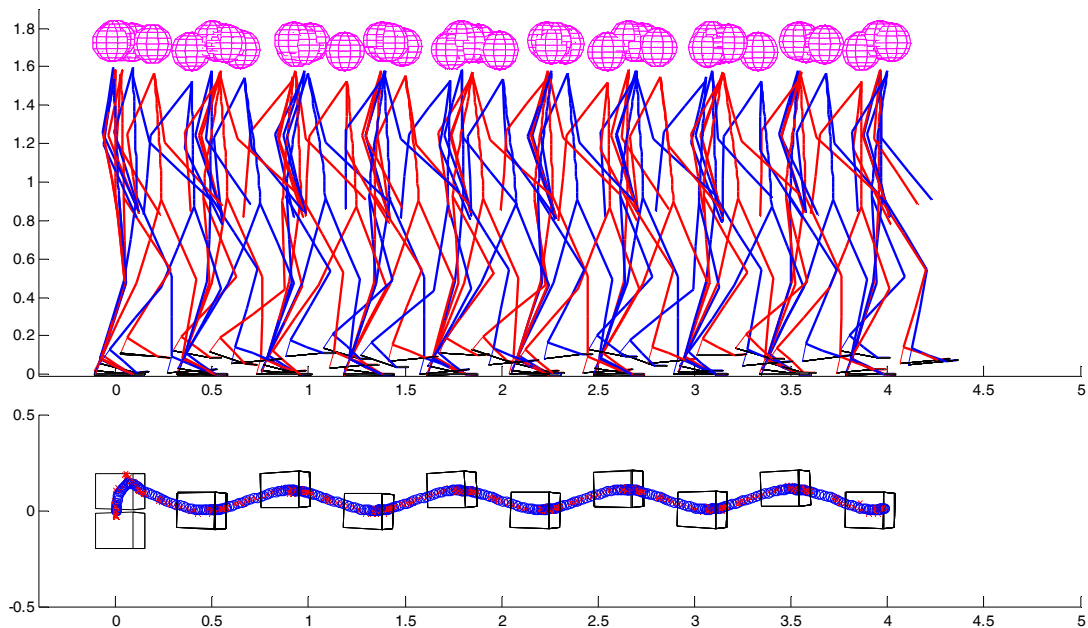
$$\Delta t^{\text{Faza}_2} = 0.084\text{s}$$

$$\Delta t^{\text{Faza}_3} = -0.02\text{s}$$

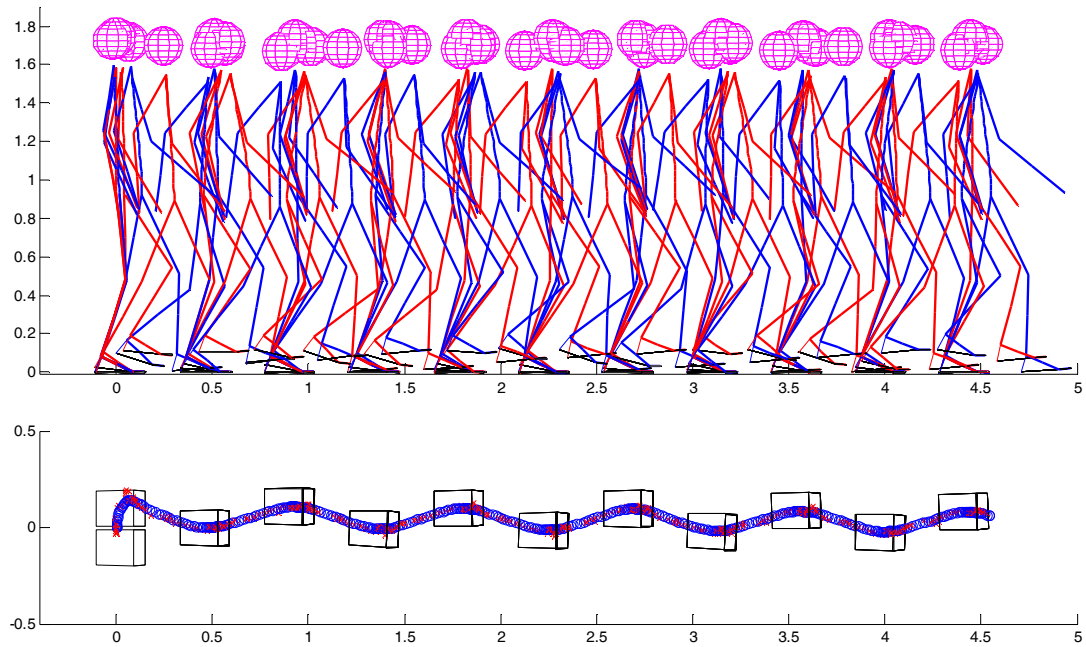
$$\Delta t^{\text{Faza}_6} = 0.066\text{s}$$

$$\Delta t^{\text{Faza}_7} = 0.0287\text{s}$$

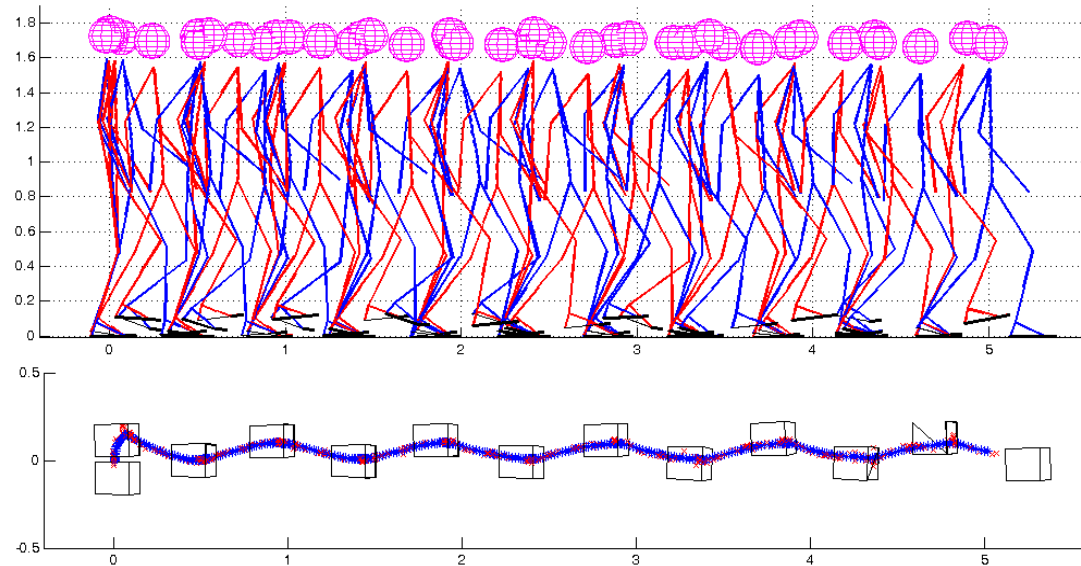
Na Sl. 5.16 i Sl. 5.17 su prikazani stik dijagrami hoda koji je dobijen kada su korišćeni primenjeni parametri koji su ručno podešeni, i kada su primenjeni parametri koji su dobijeni nakon učenja. Kada su primenjene ručno podešene vrednosti parametara, robot je tokom realizacije osnovnog hoda, za 30s uspeo da pređe ukupno 4.45m. Stik dijagram ovog hoda je prikazan na Sl. 5.16. Kada su primenjene naučene vrednosti parametara brzine, robot je tokom realizacije osnovnog hoda, sada za 30s uspeo da pređe 4.96m i da napravi jedan polukorak više. Stik dijagram robota koji hoda sa naučenim parametrima primitiva je prikazan na Sl. 5.17.



Slika 5.16 Stik dijagram osnovnog hoda sa ručno podešenim parametrima primitiva



Slika 5.17 Stik dijagram osnovnog hoda sa naučenim parametrima primitiva

Slika 5.18 Stik dijagram robota kada je brzina hoda $H_{\text{Brzina}} = 2.3$
pri čemu se dostiže brzinu hoda od 1.24km/h

Takođe, nakon naučenih parametara, omogućeno je zadavanje veće brzine hoda. Pre učenja parametara primitiva, najveća dozvoljena brzine hoda je bila $H_{\text{Brzina}} = 1.6$ što je odgovaralo brzini hoda od oko 0.86km/h. Nakon učenja parametara za osnovni hod,

omogućeno je da se zada brzina hoda do $H_{\text{Brzina}} = 2.3$. Na Sl. 5.18 je prikazan hod robota kod kojeg se parametar brzine hoda postepeno povećava nakon svakog polukoraka dok ne dostigne vrednost 2.3, što odgovara brzini hoda od oko 1.24km/h.

Literatura

- [1] Borovac, B., Nikolić, M., & Raković, M. (2011). How to Compensate for the Disturbances That Jeopardize Dynamic Balance of a Humanoid Robot?. *International Journal of Humanoid Robotics*, 8(03), 533-578.

6. Zaključak

U okviru ove teze razmatran je problem sinteze i realizacije hoda dvonožnog humanoidnog robota u nestruktuiranoj okolini. Pošto je čovekova okolina dinamička i visoko nestruktuirana, *on-line* modifikacija hoda je neophodna ukoliko želimo da se roboti kreću u čovekovom okruženju. Stoga je u tezi predloženo novo rešenje za realizaciju hoda primenom primitiva koje omogućava *on-line* modifikaciju hoda.

Predloženo rešenje omogućava da se parametri hoda (brzina hoda, dužina koraka, pravac hoda i visina podizanja noge u fazi prenosa) menjaju. To je omogućeno uvođenjem primitiva (jednostavnih pokreta) čijim se kombinovanjem može postići realizacija znatno složenijih kretanja. Data su dva predloga upravljanja kretanjem za realizaciju primitiva na dinamičkom modelu robota. Prvi predlog koristi potporne vektore za učenje pogonskih momenata tako da se ostvari željeni pokret. U drugom predlogu upravljanja se za zadaju ciljni položaji za noge, trup i ruke. U oba predloga su ispoštovane sve karakteristike koje primitiv treba da ispuni. Jedna od najbitnijih karakteristika primitiva je da su pokreti parametrizovani, čime je omogućeno menjanje pokreta tokom njegovog izvođenja. Pošto su se pojavili problemi prilikom nadovezivanja primitiva i modifikacije realizacije primitiva primenom potpunih vektora, drugi predlog je usvojen kao način za upravljanje kretanjem zglobova robota za realizaciju primitiva.

Tokom izvođenja pokreta koji su kombinovani od više primitiva, ne vodi se računa o očuvanju dinamičkog balansa (odnosno sprečavanju pada). Stoga je predložen upravljački blok koji uvodi potrebne korekcije tokom izvršavanja pokreta. Ovaj blok na osnovu željenog kretanja koje se dobije nakon kombinovanja primitiva i na osnovu željenog položaja ZMP-a i PCM-a uvodi korekciju u odabrane zglobove. Očuvanje dinamičkog balansa i dovođenje ZMP-a u željeni položaj ima najveći prioritet. Stoga je uveden adaptivni regulator koji vodi računa o ugroženosti dinamičkog balansa praćenjem intenziteta odstupanja ZMP-a od željenog položaja. Ukoliko je dinamički balans ugrožen vrednosti svih koeficijenata vezanih za održavanje dinamičkog balansa se povećavaju. Tek kada dinamički balans nije ugrožen, koeficijenti za održavanje dinamičkog balansa se smanjuju, a koeficijenti za održavanje trupa u uspravnoj poziciji povećavaju.

Ovako formiran upravljački sistem je iskorišćen za realizaciju dinamički balansirano hoda robota. Sinteza hoda kombinovanjem primitiva je izvršena tako da parametri primitiva zavise od parametara hoda. Na taj način je omogućeno da se menjanjem parametara hoda, automatski menjaju parametri primitiva čime se dobija željeno kretanje prilagođeno novim parametrima hoda. Prikazani su primeri hoda kada se menja samo

jedan parametar hoda, a nakon toga su prikazani primeri kada se menja više parametara istovremeno. Primerima je pokazano, da se modifikacija sintetizovanog pokreta vrši lako, samo izmenom parametra hoda u bilo kom trenutku. Na taj način se izbeglo zahtevno računanje trajektorija u zglobovima unapred za koje mora biti ispunjen uslov da je očuvan dinamički balans.

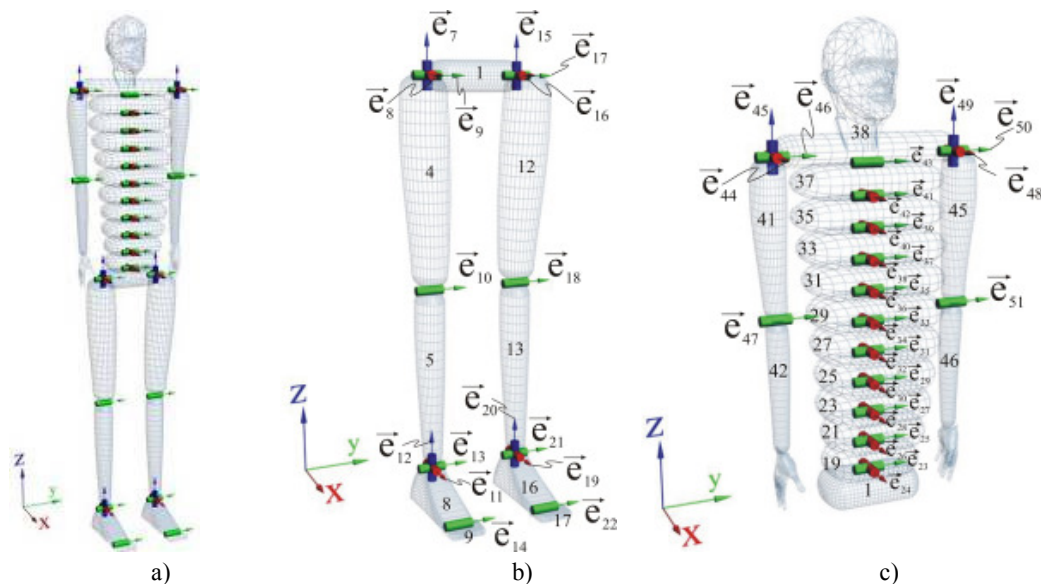
Kombinovanje primitiva je na početku potrebno uraditi „ručno“ izborom primitiva i određivanjem redosleda izvršavnaja primitiva. Nakon toga se podešavaju vrednosti parametara primitiva za osnovni hod. Kod ovako sintetizovanog hoda se javlja problem nesinhronizacije primitiva koji se izvode paralelno. Da bi se minimizovala nesinhronizacija, uveden je algoritam za učenje vrednosti parametara primitiva osnovnog hoda. Nakon procesa učenja dobijeni su novi parametri primitiva na osnovu kojih je ostvaren efikasniji hod.

Dalji rad će biti usmereni na uvođenju novih primitiva potrebnih za ostvarivanje zadataka kao što je manipulacija objektima tokom hoda (hvatanje objekta, premeštanje objekata itd.), bez potrebe za zaustavljanjem robota. Takođe će se raditi na sintetizovanju pokreta za penjanje uz i silazak niz stepenice. Pri tome će se postaviti cilj da kretanje tokom prelaza sa jednog sintetizovanog pokreta na drugi bude glatko i bez nepotrebnog zaustavljanja.

Dodatak A: Model humanoidnog robota

Model humanoidnog robota je artikulisani sistem koji se sastoji od baznog segmenta na koji je povezano nekoliko otvorenih kinematskih lanaca. Softvera koji je korišćen za modelovanje robota omogućava formiranje dinamičkog modela humanoidnog robota koji se sastoji od proizvoljnog broja otvorenih i zatvorenih kinematskih lanaca. Model robota je baziran na konceptu slobodno letećeg mehanizma [1] koji se sastoji od jednog ili više kinematskih lanaca čiji su segmenti povezani rotacionim zglobovima sa jednim stepenom slobode (SS). Jedan od segmenata je potrebno da se odredi za bazni segment iz kog se vrši dalje formiranje kinematskih lanaca.

Na Sl. A.1 je prikazan mehanička struktura sa 46 segmenata koja je korišćena za simulacije u ovom radu. Zglobovi sa više stepeni slobode (kuk, skočni zglob, rame i zglobovi u trupu) su modelovani kao više segmenata sa jednim SS. Dodatni segmenti koji su uvedeni da bi se modelovali zglobovi sa više SS su bez mase i infinitezimalne dužine. Ovakvi segmenti se nazivaju fiktivni segmenti. Na primer, sferni zglob u kuku desne noge je modelovan od tri segmenta sa po jednim SS. Ortovi osa oko kojih se vrše rotacije (na Sl. A.1 b) označeni sa \vec{e}_7 , \vec{e}_8 i \vec{e}_9) su međusobno ortogonalni i povezani su sa fiktivnim segmentima 2 i 3 koji zbog jednostavnosti na Sl. A.1 nisu prikazani.



Slika A.1 Prikaz kinematskog modela robota; a) model čitavog robota; b) detaljan kinematski model nogu; c) detaljan kinematski model trupa i ruku

Bazni segment modela je karlica (bazni segment je na Sl. A.1 označena sa 1) i njegova pozicija i orijentacija u prostoru je određena vektorom \mathbf{X} koji se sastoji od 6 koordinata: 3 translacije duž x , y i z ose i tri rotacije θ , φ i ψ oko x , y i z ose respektino. Na karlicu su vezana četiri otvorena kinematska lanca. Prvi kinematski lanac (segmenti 1-9) predstavljaju desnu nogu, drugi kinematski lanac (segmenti 1, 10-17) predstavlja levu nogu, treći kinematski lanac (segmenti 1, 18-42) predstavlja 10-segmentni trup, ključnu kost sa glavom i desnu ruku, dok četvrti kinematski lanac (segmenti 1, 18-38, 43-46) predstavljaju trup, ključnu kost sa glavom i levu ruku. Stopala su modelovana od dva segmenta tako da poseduje i segment koji predstavlja prste na stopalu. Levo stopalo se sastoji od segmenata 8 i 9, a desno stopalo se sastoji od segmenata 16 i 17. Između tela stopala (segmetni 8 i 16) i prsta (segmetni 9 i 17) postoji po jedan SS.

Položaj svakog segmenta u odnosu na segment za koji je vezan opisan je sa jednom koordinatom (q_7, q_8, \dots, q_{51}) koja predstavlja ugao u odgovarajućem zglobu. Označavanje uglova u zglobovima počinje od indeksa 7, zato što je položaj prvog, baznog segmenta određen vektorom $\mathbf{X} = [x, y, z, \theta, \varphi, \psi]^T$ koji se sastoji od 6 koordinata. Dakle ukupan broj stepeni slobode čitavog mehanizma je 51 (6 SS baznog segmenta i 45 SS u svakom zglobu) i položaj robota u prostoru je određen vektorom

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{X}^T \mathbf{q}^T]^T = [x, y, z, \theta, \varphi, \psi, q_7, q_8, \dots, q_{51}]^T \quad (\text{A.1})$$

Svi stepeni slobode robota poseduju aktuatore pomoću kojih se ostvaruje pogonski moment τ_i u zglobovima, osim prvih šest stepeni slobode koji su neaktuirani. To znači da je humanoidni robot nedovoljno aktuiran sistem (engl. *underactuated system*) odnosno broj aktuatora je manji od broja stepeni slobode. Sa $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_{45}]^T$ je označen vektor pogonskih momenata u zglobovima dok je sa $\mathbf{T} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \tau_1, \dots, \tau_{45}]^T$ označen prošireni vektor generalizovanih sila.

A.1 Model aktuatora u osnaženim zglobovima

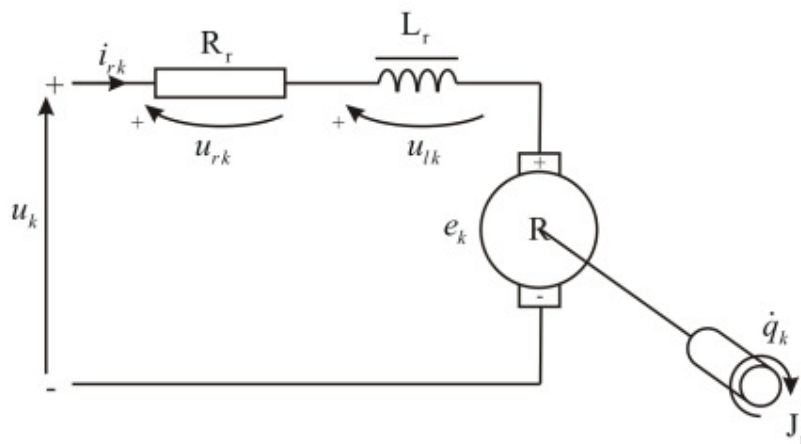
Za aktuatore u osnaženim stepenima slobode je odabran model drugog reda motora jednosmerne struje sa permanentnim magnetom. Radi pojednostavljenja ukupnog modela, bez gubitka opštosti, za sve zglobove je iskorišten isti model motora. U tabeli A.1 su prikazani parametri motora za modelovanje aktuatora u zglobovima.

Ovaj tip motora se koristi u velikom broju dinamičkih sistema i često se primenjuje u

robotskim aplikacijama. Da bi se izveo ukupni model humanoidnog robota, potrebno je izvesti diferencijalne jednačine kojima se modeluje dinamički rad motora korištenih za akciju u zglobovima robota. Na Sl. A.2 je prikazano ekvivalentno kolo motora koje može da se posmatra kao kolo sa naponskim izvorom u_k iz kog se napaja rotor motora. Kolo rotora se može predstaviti kao serijska veza otpornosti kola rotora R_r , induktivnosti kola rotora L_r i indukovane kontraelektromotorne sile e_k . Indukovana kontraelektromotorna sila se javlja kao rezultat kretanja namotaja rotora unutar magnetnog polja konstatnog fluksa koji stvaraju permanentni magneti.

Tabela A.1 Parametari motora jednosmerne struje sa permanentim magnetom

Naziv parametra	Oznaka	Vrednost	Jedinica
Mehanička konstanta motora	C_m	4.1910	N·m/A
Električna konstanta motora	C_e	4.1794	rad/V·s
Otpornost kola rotora	R_r	0.3630	Ω
Induktivnost kola rotora	L_r	$161 \cdot 10^{-6}$	H
Moment inercije rotora	J_r	0.1459	kg·m ²
Koeficijent viskoznog trenja	B	$1.268 \cdot 10^{-3}$	N·m/s



Slika A.2 Ekvivalentno kolo motora jednosmerne struje sa permanentnim magnetom

Diferencijalna jednačina za kolo prikazano na Sl. A.2 može se izvesti iz drugog Kirhofovog zakona:

$$u_k - u_{R_r} - u_{L_r} - e_k = 0 \quad (\text{A.2})$$

Pad napona na otporniku u_{rk} i kalemu u_{lk} su:

$$u_{rk} = i_{rk} \cdot R_r \quad u_{lk} = L_r \frac{di_{rk}}{dt} = L_r \cdot \dot{i}_{rk} \quad (\text{A.3})$$

gde je i_{rk} struja koja protiče kroz kolo rotora. Kontraelektromotorna sila koja se indukuje u namotaju rotora je srazmerna ugaonoj brzini kojom se obrće rotor i iznosi:

$$e_k = C_e \frac{dq_k}{dt} = C_e \cdot \dot{q}_k \quad (\text{A.4})$$

gde je C_e električna konstanta motora. Uvrštavanjem jednačina (A.3) i (A.4) u (A.2) dobija se prva diferencijalna jednačina:

$$u_k = R_r \cdot i_{rk} + C_e \cdot \dot{q}_k + L_r \cdot \dot{i}_{rk} \quad (\text{A.5})$$

Da bi se izvela druga jednačina potrebno je primeniti zakon održanja mehaničke energije po kojem je suma svih momenata u motoru jednaka nuli. Na osnovu toga se može napisati jednačina:

$$\tau_e - \tau_{\dot{q}} - \tau_{\ddot{q}} - \tau_k = 0 \quad (\text{A.6})$$

gde je τ_e moment koji nastaje usled postojanja elektromagnetnog polja, $\tau_{\dot{q}}$ je moment koji nastaje usled ugaonog ubrzanja rotora, $\tau_{\ddot{q}}$ je moment koji nastaje usled ugaone brzine rotora, a τ_k je moment koji predstavlja spoljašnje opterećenja motora.

Moment koji nastaje usled postojanja elektromagnetnog polja je proporcionalan struji rotora i iznosi:

$$\tau_e = C_m \cdot i_r \quad (\text{A.7})$$

gde je C_m mehanička konstanta motora. Moment $\tau_{\ddot{q}}$ zavisi od ugaonog ubrzanja rotora i iznosi:

$$\tau_{\ddot{q}} = J_r \cdot \ddot{q}_k \quad (\text{A.8})$$

gde je J_r moment inercija rotora. Moment koji nastaje usleb brzine rotora je:

$$\tau_{\dot{q}} = B \cdot \dot{q}_k \quad (\text{A.9})$$

gde je B koeficijent viskoznog trenja osovine rotora. Uvrštavanjem jednačina (A.7-A.9) u jednačinu (A.5) dobija se sledeća diferencijalna jednačina:

$$\tau_k = C_m \cdot \dot{i}_{rk} - B \cdot \dot{q}_k - J_r \cdot \ddot{q}_k \quad (\text{A.10})$$

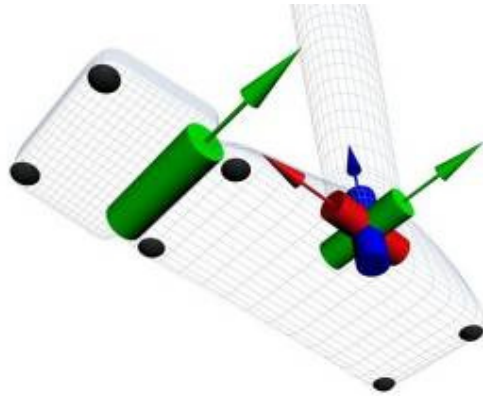
Jednačine (A.5) i (A.10) u potpunosti opisuju rad motora korišćenog za aktuaciju zglobova robota i koristiće se za formiranje ukupnog modela humanoidnog robota.

A.2 Model stopala

Robot svojim stopalima tokom hoda ostvaruje i raskida kontakt sa podlogom. Stoga, tokom hoda robota, stalno se naizmenično smenjuju jednooslonička i dvooslonička faza. Robot se nalazi u jednoosloničkoj fazi kada je samo jedno stopalo u kontaktu sa podlogom, a dvooslonička faza nastupa kada su oba stopala u kontaktu sa podlogom. Prilikom prelaska iz dvoosloničke u jednoosloničku fazu prekida se kontakt jednog stopala sa podlogom, a prilikom prelaska iz jednoosloničke faze u dvoosloničku dolazi do ostvarivanja kontakta stopala sa podlogom. Takođe dok je ostvaren kontakt stopala sa podlogom može doći do proklizavanja stopala u odnosu na podlogu. Zbog toga je od velikog značaja adekvatno modelovanje kontakta između stopala i podloge.

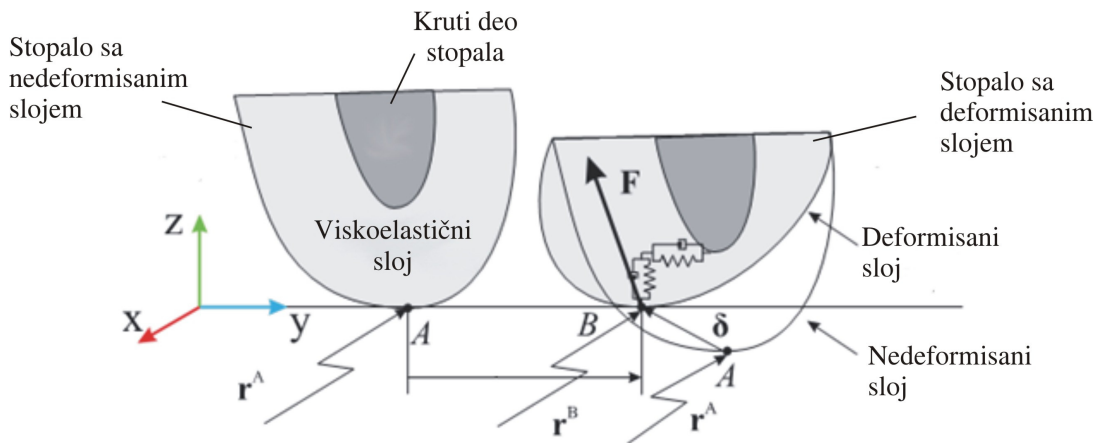
Stopalo je modelovano kao dvosegmentno i donja površina stopala je odabrana da bude u obliku dva trapeza. Zbog toga je dovoljno da se kontakt između stopala i podloge modeluje u 6 karakterističnih tačaka (crni krugovi na Sl. A. 3). Četiri kontaktne tačke se nalaze na ivice dela stopala bez segmenta prsta, dok se ostale dve tačke nalaze na kraju segmenta prsta. Posmatranjem ovih šest kontaktnih tačaka moguće je opisati sve moguće konfiguracije kontakta stopala sa podlogom. Ukoliko je broj tačaka koji je u kontaktu sa podlogom veći ili jednak od tri²⁶ tada postoji oslonička površina između stopala i podloge. U slučaju da su u kontaktu sa podlogom jedna ili dve tačke tada ne postoji oslonička površina između tog stopala i podloge. Pošto postoje dva stopala, ukupan broj tačaka koje treba da se uzmu u obzir je 12. Dakle za postojanje osloničke površine potrebno je da su u kontaktu sa podlogom minimalno 3 nekolinearne tačke na stopalima od ukupno 12 raspoloživih tačaka.

²⁶ Ukoliko su tri tačke u kontaktu sa podlogom, tada je ostvarena kontaktna površ, samo ukoliko te tačke nisu kolinearne.



Slika A.3 Ilustracija viskoelastičnih elemenata preko kojih se ostvaruje kontakt stopala sa podlogom (pogled sa donje strane stopala)

U toku simulacije prilikom kretanja robota dolazi do uspostavljanja i raskidanja kontakta između tačaka na stoplu i podloge. Trenutak kada nastupa ili kada se prekida kontakt je izračunat korišćenjem „slek“ promenljive (engl. *slack variable*) [2]. Da bi se uključili efekti koji nastaju prilikom uspostavljanja i raskidanja kontakta stopala sa podlogom stopala je modelovano kao kruto telo sa viskoelastičnim slojem.



Slika A.4 Model kontakta između podloge i krutog tela sa viskoelastičnim slojem

Kruto telo sa viskoelastičnim slojem je modelovano kao nedeformabilno telo sa tankim deformabilnim slojem zanemarljive mase (Sl. A.4). Pretpostavimo da tačka A na Sl. A.4 treba da uspostavi kontakt sa podlogom. Pre uspostavljanja kontakta pretpostavljamo da viskoelastični sloj nije deformisan. Kada tačka A ostvari kontakt sa podlogom viskoelastični sloj se deformiše i nastaje proklizavanje stopala u odnosu na podlogu. Nakon deformacije, tačka u kojoj je ostvaren kontakt sa podlogom je označena

sa B , a sa tačkom A je označeno mesto gde bi se nalazila kontaktna tačka da nije bilo deformacije viskoelastičnog sloja. Sa \mathbf{r}_A i $\dot{\mathbf{r}}_A$ ćemo označiti položaj i brzinu tačke A . Položaj ove tačke ne zavisi od deformacije viskoelastičnog sloja već samo od kretanja krutog tela.

Između tačke B i podloge postoji Kulonovo trenje sa koeficijentom trenja μ . Vektori δ i $\dot{\delta}$ predstavljaju deformaciju i prvi izvod deformacije. Pozicija i brzina tačke B je data sa:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_B &= \mathbf{r}_A + \delta \\ \dot{\mathbf{r}}_B &= \dot{\mathbf{r}}_A + \dot{\delta}\end{aligned}\quad (\text{A.11})$$

Viskoelastični sloj je modelovan kao izotropni Kelvin-Voitov materijal sa koeficijentom elastičnosti K i koeficijentom progušenja C . Sila koja deluje na telo je data jednačinom:

$$\mathbf{F} = K \cdot \delta + C \cdot \dot{\delta} \quad (\text{A.12})$$

Zbog postojanja Kulonovog trenja, sledeća nejednakost mora biti zadovoljena:

$$F_x^2 + F_y^2 \leq \mu^2 \cdot F_z^2 \quad (\text{A.13})$$

Sada je potrebno da se izvedu jednačine za računanje intenziteta sile reakcije podloge \mathbf{F} i za računanje izvoda deformacije $\dot{\delta}$, čijom integracijom se određuje vektor deformacije δ . Na osnovu jednačina prikazanih u [3-5] i jednačina (A.11-A.13) mogu se izvesti sledeće jednačine:

- za slučaj kada nije ostvaren kontakt između stopala i podloge:

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= 0 \\ \dot{\delta} &= -C^{-1} \cdot K \cdot \delta\end{aligned}\quad (\text{A.14})$$

- za slučaj kada je ostvaren kontakt između stopala i podloge bez proklizavanja:

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= K \cdot \delta - C \cdot \dot{\mathbf{r}}_A \\ \dot{\delta} &= -\dot{\mathbf{r}}_A\end{aligned}\quad (\text{A.15})$$

- za slučaj kada je ostvaren kontakt između stopala i podloge i postoji proklizavanje:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} &= (C^{-1} \cdot \lambda)^{-1} \cdot \mathbf{M}, \quad F_z = \mathbf{K} \cdot \delta_z - C \cdot \dot{r}_z^A \\ \begin{bmatrix} \dot{\delta}_x \\ \dot{\delta}_y \end{bmatrix} &= \lambda \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{r}_x^A \\ \dot{r}_y^A \end{bmatrix}, \quad \dot{\delta}_z = -\dot{r}_z^A \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

gde je:

$$\mathbf{M} = C^{-1} \cdot \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{r}_x^A \\ \dot{r}_y^A \end{bmatrix}, \quad \lambda = C^{-1} - \sqrt{\frac{\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M}}{\mu^2 \cdot F_z^2}}.$$

Postupak za određivanje sile reakcije podloge i izvoda deformacije je sledeći:

1. Odredi se pozicija i brzina tačke A i proveri se da li je u kontaktu sa podlogom
2. Ako tačka A nije u kontaktu tada se primenjuje jednačina (A.14) i završava se procedura
3. Ako tačka A jeste u kontaktu primenjuje se jednačina (A.15)
4. Proverava se uslov (A.13) i ukoliko je uslov ispunjen, nema proklizavanja i završava se procedura.
5. Ako uslov (A.13) nije ispunjen, postoji proklizavanje i primenjuje se jednačina (A.16)

A.3 Ukupni model humanoidnog robota

Dinamički model humanoidnog robota je opisan sa sledećim skupom diferencijalnih jednačina:

$$\mathbf{H} \cdot \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{h}_0 = \mathbf{T} + \sum_{i \in S} \mathbf{J}_i^T \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \boldsymbol{\delta}_i \times \mathbf{F}_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

gde \mathbf{H} predstavlja matricu inercije sistema, $\ddot{\mathbf{Q}}$ predstavlja vektor generalisanih ubrzanja robota, \mathbf{h}_0 predstavlja vektor koji uključuje momente nastale usled brzinskih efekata u zglobovima i momente koji se javljaju usled gravitacionih sila, \mathbf{T} predstavlja vektor generalisanih pogonskih momenata, S predstavlja indekse tačaka na stopalima koje su u kontaktu sa podlogom, \mathbf{F}_i i $\boldsymbol{\delta}_i$ predstavljaju silu koja se javlja u i -toj kontaktnoj tački i deformaciju viskoelastičnog sloja dok \mathbf{J}_i predstavlja Jakobijan izračunat za i -tu kontaktnu tačku.

Pogonski momenti u zglobovima robota su izračunati na osnovu matematičkog modela motora jednosmerne struje datog jednačinama:

$$\begin{aligned} u_k &= R_r \cdot i_{rk} + C_e \cdot \dot{q}_k + L_r \cdot \dot{i}_{rk} \\ \tau_k &= C_m \cdot i_{rk} + B \cdot \dot{q}_k + J_r \cdot \ddot{q}_k \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

gde u_k predstavlja napon na krajevima rotora k-tog motora, τ_k predstavlja pogonski moment u zglobu k, i_{rk} je struja rotora k-tog motora, a \dot{q}_k i \ddot{q}_k su ugaona brzina i ugaono ubrzanje u k-tom zglobu. Parametri motora R_r , C_e , L_r , C_m , B i J_r su dati u Tabeli A.1. Dakle, ukupni model sistema je dat jednačinom (A.17) zajedno sa 45 diferencijalnih jednačina drugog reda predstavljenih jednačinom (A.18).

Literatura

- [1] Potkonjak, V., Vukobratović, M., Babković, K., Borovac, B. (2006). General model of dynamics of human and humanoid motion: feasibility, potentials and verification. *International Journal of Humanoid Robotics*, 3(01), 21-47.
- [2] Turner, J. D. (2001). On the simulation of discontinuous functions. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF APPLIED MECHANICS*, 68(5), 751-757.
- [3] Song, P., Kraus, P., Kumar, V., & Dupont, P. (2001). Analysis of rigid-body dynamic models for simulation of systems with frictional contacts. *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF APPLIED MECHANICS*, 68(1), 118-128.
- [4] Goyal, S., Pinson, E. N., Sinden, F. W. (1994). Simulation of dynamics of interacting rigid bodies including friction I: General problem and contact model. *Engineering with computers*, 10(3), 162-174.
- [5] Goyal, S., Pinson, E. N., Sinden, F. W. (1994). Simulation of dynamics of interacting rigid bodies including friction II: Software system design and implementation. *Engineering with computers*, 10(3), 175-195.

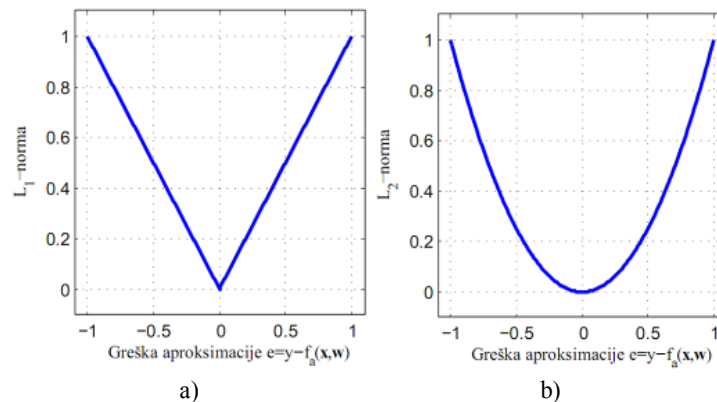
Dodatak B: Aproksimacija funkcije primenom potpornih vektora

Mašinsko učenje primenom potpornih vektora (engl. *Support Vector Machine* - SVM) može da se predstavi kao postupak određivanje nepoznate zavisnosti između ulaznih veličina i njihovih odziva dobijenih na osnovu eksperimentalnih podataka. Ulazni i željeni izlazni podaci nekog sistema za koji se traži nepoznata zavisnost predstavljaju skup za obuku algoritma mašinskog učenja, koji kao rezultat daje funkciju $f_a(\mathbf{x}, \mathbf{w})$, gde su \mathbf{x} ulazi, a \mathbf{w} težinske matrice. U slučaju klasifikacije izlaznih podataka to je razdvajajuća funkcija (engl. *decision boundary function*), dok je kod regresije (odnosno aproksimacije) to funkcija zavisnosti izlaznih od ulaznih promenljivih.

Da bi se dobila aproksimaciona funkcija učenjem SVM-a, potrebno je izvršiti minimizaciju očekivane greške $R(\mathbf{w})$. (engl. *expected error*):

$$R(\mathbf{w}) = \int L(y, o) dP(\mathbf{x}, y) = \int L(y, f_a(\mathbf{x}, \mathbf{w})) dP(\mathbf{x}, y). \quad (\text{B.1})$$

U jednačini (B.1) $L(y, f_a(\mathbf{x}, \mathbf{w}))$ je funkcija greške (engl. *loss function*) računata nad skupom podataka za obuku. To može biti jedna od standardnih normi (kvadratna norma, apsolutna greška, ...) izabrana u skladu sa vrstom problema. Najčešće korištene funkcije greške u inženjerskim aplikacijama su apsolutna greška odnosno L1 norma i kvadratna L2 norma (Sl. B.1).

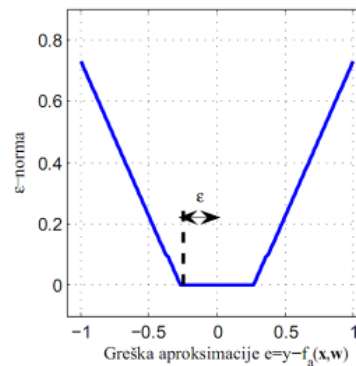


Slika B.1 Najčešće korišćene funkcije greške: a) L1 norma, b) L2 norma

Međutim za obuku SVM-a se koristi linearna funkcija greške sa ε -zonom neosetljivosti (B.2) koju je u [1] uveo Vapnik.

$$|y - f(\mathbf{x})|_{\varepsilon} = \begin{cases} 0, & |y - f(\mathbf{x})| \leq \varepsilon \\ |y - f(\mathbf{x})| - \varepsilon, & |y - f(\mathbf{x})| > \varepsilon \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

U jednačini (B.2) greška je jednaka nuli ako je rastojanje između predviđene vrednosti $f_a(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ i merene vrednosti manje od ε (Sl. B.2). Vapnikovom funkcijom greške sa ε -zonom neosetljivosti definiše se zapravo ε -tuba oko izlaznih vrednosti iz skupa za obuku.



Slika B.2 Funkcija greške sa ε -zonom neosetljivosti

Za dobijanje aproksimacionih funkcija većinom algoritama se minimizuje greške aproksimacije (engl. *empirical risk*), ali dobijeni rezultat ne mora istovremeno imati i dobru sposobnost generalizacije odnosno malu stvarnu (engl. *true risk*), očekivanu (engl. *expected risk*) ili garantovanu grešku (engl. *guaranteed risk*) [2]. Pod generalizacijom se podrazumeva sposobnost mašine da za ulazne podatke koji nisu bili deo skupa za obuku sračuna izlaze zadovoljavajuće tačnosti. Za obuku mašina tako da imaju dobru sposobnost generalizacije uobičajeno se koriste dva načina. Prvi je biranje odgovarajuće strukture modela, održavanje fiksne vrednosti greške estimacije i minimizacija greške obuke. Drugi način, koji se koristi kod SVM-a, je održavanje fiksne vrednosti greške aproksimacije, koja se postavlja na proizvoljnu pozitivnu vrednost ε . Za tako odabranu grešku aproksimacije, vrši se minimizacija VC intervala poverenja, tj. greške estimacije [1]. To se ostvaruje minimizacijom strukturne greške (engl. *Structural Risk Minimization* (SRM)), čija je osnovna ideja da iz velikog broja mogućih algoritama izabere algoritam koji ima odgovarajući kapacitet da opiše dati skup podataka za obuku. Osnovna ideja za SRM je da se pretpostavi oblik funkcija H koje mogu da reše zadatak aproksimacije. Povećavanjem broja parametara formira se ugnježdena struktura $H_1 \subset H_2 \subset H_3 \subset \dots \subset H_{n-1} \subset H_n \subset \dots \subset H$. Skup H_n može biti skup polinoma jedne

promenljive reda n , višeslojni perceptron sa n neurona u skrivenom sloju itd. Iz skupa ugnježdene strukture H_n , bira se funkcija čiji kapacitet odgovara kompleksnosti podataka za obuku. Tako algoritam za obuku bira optimalni red polinoma, broj neurona skrivenog sloja...

Iako su prvenstveno razvijene za rešavanje problema klasifikacije, tehnike SVM se uspešno mogu primeniti i za pronalaženje aproksimacije funkcije. Pronalaženje aproksimacione funkcije podrazumeva pronalaženje ulazno-izlaznih relacija za neke zadate skupove podataka. Tačnije rečeno, algoritam za učenje SVM-a na ulazi prima skup za obuku u vidu parova podataka $\{\mathbf{x}_i, y_i\} \in R^n \times R$, $i = 1, \dots, l$. Dakle, ulazi su n -dimenzionalni vektori $\mathbf{x}_i \in R^n$, dok su $y_i \in R$ izlazne vrednosti. Na osnovu ovih podataka, algoritam „učič“ ulazno-izlazne relacije sistema, tj. zavisnost izlaza od ulaza u vidu neke funkcije. Kada se nađe ova zavisnost, problem regresije se najčešće koristi za estimaciju, odnosno predviđanje toka nekog procesa.

Kada se veza između ulaznih i izlaznih podataka može zapisati u obliku $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b$ potrebno je rešavati problem linearne regresije pri čemu se minimizira funkcija:

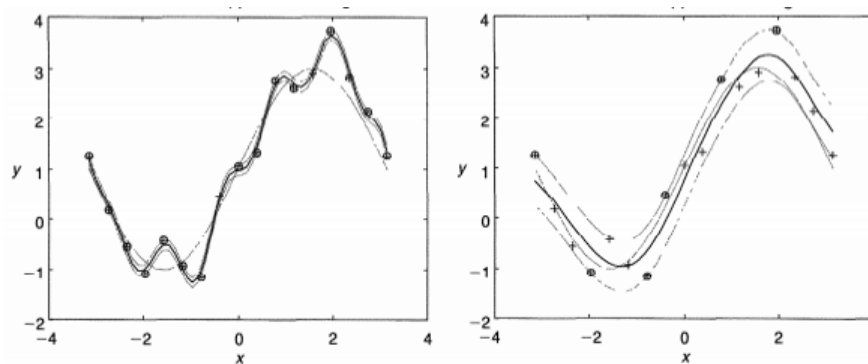
$$R = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \left(\sum_{i=1}^l |y_i - f_a(\mathbf{x}_i, \mathbf{w})|_{\varepsilon} \right). \quad (\text{B.3})$$

U jednačini (B.3) \mathbf{x}_i i y_i su ulazi i željeni izlaz, $f_a(\mathbf{x}_i, \mathbf{w})$ je aproksimirana vrednost izlaza, a \mathbf{w} je težinska matrica. C i $|\cdot|_{\varepsilon}$ su kazneni parametar i ε -zona neosetljivosti.

U realnim problemima češće je potrebno rešavati nelinearnu nego linearnu zavisnost između ulaza i izlaza. Prilikom određivanja nelinearne aproksimacione funkcije korišćenjem potpornih vektora vrši se preslikavanje ulaznog vektora $\mathbf{x} \in R^n$ u vektor $\mathbf{z} \in R^f$, gde vektor \mathbf{z} pripada prostoru više dimenzije od prostora kom pripada vektor \mathbf{x} . Dakle $\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x})$ pri čemu Φ predstavlja funkcije jezgra koja vrši preslikavanje $R^n \rightarrow R^f$. Zatim se u prostoru veće dimenzije rešava linearna regresija. Funkcija Φ se bira unapred i predstavlja fiksnu funkciju za neki problem. Cilj uvođenja ovakvog preslikavanje je da se u prostoru vektora \mathbf{z} dobije problem koji se može rešiti linearnom regresijom. Rešenje regresione hiperpovrši $f = \mathbf{w}^T \mathbf{z}(\mathbf{x}) + \mathbf{b}$, koje je linearno u prostoru R^f dovodi do nelinearne hiperpovrši u polaznom prostoru R^n kojem pripada ulazni vektor \mathbf{x} . Najčešće korišćene funkcije jezgra Φ (engl. *kernel function*) za preslikavanje u prostor veće dimenzije su polinomi i RBF (engl. *Radial Basis Functions*).

Postoji niz parametara koji mogu da se menjaju u procesu rešavanja problema

regresije korišćenjem SVM. Dva parametra u jednačini (B.3) koji direktno utiču na rešenje aproksimacije su ε -zona neosetljivosti i kazneni parametar C . Na Sl. B.3 je prikazano kako povećavanje ε -zone neosetljivosti ima uticaj na to da funkcija bude više ili manje glatka pri aproksimaciju sinusne funkcije na koju je dodat šum [2]. Sa kružicama su obeleženi ulazno izlazni podaci korišćeni za učenje SVM-a. Punom linijom je prikazana aproksimacija funkcije oko koje je prikazana ε -zone. Povećavanje ε -zone neosetljivosti zapravo dovodi do smanjenja tačnosti aproksimacije. Takođe se smanjuje i broj vektora podrške čime se dobija funkcija koja je više glatka i koja ima bolju generalizaciju. Prema tome potrebno je naći kompromis između tačnosti aproksimacije i generalizacije aproksimacione funkcije.



Slika B.3 Uticaj promene parametra ε -zone neosetljivosti na kvalitet aproksimacione funkcije (na levoj slici je $\varepsilon=0.1$, a na desnoj je $\varepsilon=0.5$) [2]

Koraci koje je potrebno sprovesti za aproksimaciju funkcije pimenom SVM-a su:

1. Izabrati funkciju jezgra koja određuje oblik razdvajajuće funkcije pri klasifikaciji ili aproksimacione funkcije pri regresiji.
2. Izabrati složenost funkcije jezgra (npr. red polinoma, varijansa RBF sa Gausovom funkcijom raspodele...).
3. Izabrati kazneni parametar, i izabrati željenu tačnost definisanjem ε -zone neosetljivosti
4. Nad skupom za obuku rešiti kvadraturni optimizacioni problem (engl. *quadratic programming problem*) na osnovu kog se određuje broj potpornih vektora i težinska matrica \mathbf{w} .

Algoritmi za obučavanje SVM daju odlične rezultate za skupove podataka koji nisu previše veliki. Međutim, kada broj parova podataka iz skupa za obuku poraste ($l > 2000$), kvadraturni optimizacioni problem postaje izuzetno komplikovan za rešavanje što upravo i predstavlja glavnu manu modela sa potpornim vektorima. Za prevazilaženje ovog problema razvijene su različite metode, ali se one sada neće detaljnije objašnjavati.

Literatura

- [1] V. Vapnik, The nature of statistical learning theory, 2ed., Springer, 2000.
- [2] V. Kecman, Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models, The MIT Press, 2001.