

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Branko Z. Lukić

**SIMULTANO UPRAVLJANJE POZICIJOM I
KRUTOŠĆU ROBOTA POGONJENOG
AKTUATORIMA PROMENLJIVE KRUTOSTI**

doktorska disertacija

Beograd, 2022

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Branko Z. Lukić

**SIMULTANEOUS STIFFNESS AND POSITION
CONTROL OF ROBOTS WITH VARIABLE
STIFFNESS ACTUATORS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

dr Kosta Jovanović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Tomislav B. Šekara, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

dr Tadej Petrič, viši naučni saradnik
Institut Jožef Stefan, Ljubljana Slovenija

dr Mirko Raković, vanredni profesor
Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka

dr Aleksandar Rakić, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Zahvalnica:

Aktivnosti na izrade disertacije je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz projekat TR35003 i projekat bilateralne saradnje sa Slovenijom, kao i od strane Fonda za nauku Republike Srbije PROMIS, Grant #6062528, ForNextCobot.

Ovom prilikom želim da izrazim veliku zahvalnost mentoru dr Kostu Jovanoviću na vođenju ove disertacije, konsultacijama, na stalnoj podršci i strpljenju tokom mog rada, kao i dr Veljku Potkonjaku kod koga sam započeo doktorske studije na svim savetima koje sam dobio na početku naučno istraživačkog rada.

Hteo bih da se zahvalim dr Tomislavu Šekari za aktivno učešće pri realizaciji eksperimenta, kao i Predragu Todorovu za svu pomoć i sav trud koji je uložio u razvoj laboratorijske opreme potrebne za eksperimente.

Zahvalnost dugujem kolegama iz kancelarije Zaviši Gordiću, Vladimiru Petroviću, Nikoli Kneževiću i dr Maji Trumić za svu podršku, pomoć, savete diskusije i druženja u prethodnom period.

Eksperimentalni deo ove doktorske disertacije jednim delom je urađen je u Institutu Jožef Stefana u Laboratoriji za kolaborativni robotiku (CoBoTaT) gde su mi svesrdnu podršku pri realizaciji eksperimenata i analizi rezultata pružili dr Leon Žlajpah i dr Tadej Petrič.

Nezaboravan i prijatan boravak na Institutu Jožef Stefan ne bi bio moguć bez Rebeke Kropivšek Leskovar, dr Roka Pahiča, Zvezdana Lončarevića i Mihaela Simoniča.

Posebnu zahvalnost dugujemo svojoj porodici majci Zorici, ocu Zoranu i bratu Vladimiru, koji su uvek verovali u mene i bili mi podrška kroz ceo život.

Neizmernu zahvalnosti za pruženu podršku tokom doktorskih studija i za pokazano razumevanje i kada nije bilo lako i zato što je bila uvek kraj mene kada je bilo potrebno dugujem Neveni kojoj posvećujem ovu disertaciju.

SIMULTANO UPRAVLJANJE POZICIJOM I KRUTOŠĆU ROBOTA POGONJENOG AKTUATORIMA PROMENLJIVE KRUTOSTI

Sažetak: Doktorska disertacija obrađuje načine za ostvarivanje bezbedne interakcije robota sa okolinom primenom aktivne, pasivne, kao i kombinacijom aktivne i pasivne krutosti. Planiranje i upravljanje mehaničkom krutošću se razmatra kako na nivou zgloba, tako i na nivou završnog uređaja robota. U okviru disertacije je projektovana i realizovana hardverska postavka žičano pogonjenog antagonističkog aktuatora promenljive krutosti, za koju je predložena i implementirana kaskadna upravljačka struktura sa statičkim dekuplerom za simultanu kontrolu pozicije i krutosti. Projektovani su robusni PID kontroleri za potiskivanje poremećaja u formi I-PD i I-P na osnovu identifikacije dominantne dinamike sistema u zavisnosti od parametra λ , čijim se podešavanjem pravi kompromis između performansi i brzine sistema. Dekuplovanje pozicije i krutosti pomenutog pogonskog mehanizma je predloženo upotrebom matematičkog modela ili neuralnih mreža (u slučaju kompleksnog modela). Analiza ostvarivih opsega krutosti završnog uređaja je izvršena u odnosu na krutosti koje se ostvaruju u zglobu i kinematičke konfiguracije robotskog manipulatora, gde su rezultati prikazani numeričkom i vizualnom (grafičkom) metodom. U disertaciji je zatim predložena nova metoda za upravljanje krutošću završnog uređaja robota koja je eksperimentalno verifikovana na LWR KUKA kolaborativnom robotu sa integrisanim senzorima momenta u svakom zglobu koji omogućavaju emuliranje pasivne krutosti. Konkretno, metoda gradijenta je primenjena za oblikovanje krutosti duž pravca kretanja završnog uređaja robota promenom kinematičke konfiguracije redundantnog robota u nultom prostoru. Sve predložene metode su testirane u simulaciji i verifikovane na namenski razvijenim mehanizmima ili konvencionalnim kolaborativnim robotima u laboratorijskim uslovima.

Ključne reči: antagonistički pogon, aktuatori promenljive krutosti, žičano pogonjeni aktuatori, identifikacija dinamike sistema, krutost završnog uređaja, kaskadna upravljačka struktura, nulti prostor.

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Robotika i upravljanje sistemima

SIMULTANEOUS STIFFNESS AND POSITION CONTROL OF ROBOTS WITH VARIABLE STIFFNESS ACTUATORS

Abstract: The doctoral dissertation deals with the ways to achieve safe interaction of robots with the environment by applying active, passive, as well as a combination of active and passive stiffness. Planning and control of mechanical stiffness is considered both at the level of the joint and at the level of the robot's end-effector. Within the dissertation, a hardware setup of a tendon-driven antagonistic variable stiffness actuator was designed and realized, for which a cascade control structure with a static decoupler for simultaneous position and stiffness control was proposed and implemented. Robust PID controllers have been designed in forms I-PD and I-P to suppress disturbances. The controllers are tuned as a function of the parameter λ , the adjustment of which trade-off the performance and speed of the system according to the identification of the dominant dynamics of the system depending on. Decoupling of the position and stiffness of the developed actuator was proposed using a mathematical model or neural networks (in the case of a complex model). The analysis of the feasible ranges of stiffness of the end-effector was performed in relation to the stiffness realized in the robot's joints and the kinematic configuration of the robot manipulator, where the results are presented by the numerical and visual (graphic) methods. The dissertation then proposed a new method for controlling the stiffness of the end-effector robot, which was experimentally verified on an LWR KUKA collaborative robot with integrated torque sensors in each joint that allows emulation of passive stiffness. In particular, the gradient method was applied to shape the stiffness along the direction of movement of the robot end-effector by changing the kinematic configuration of the redundant robot in zero space. All proposed methods were tested in simulation and verified on developed mechanisms or conventional collaborative robots in laboratory conditions.

Key words; antagonistic actuators, variable stiffness actuators, tendon driven actuators, system dynamics identification, end effector stiffness, cascade control structure, null space.

Scientific field: Electrical and Computer Engineering

Scientific subfield: Robotics and Control Systems

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
1.1	Ključni rezultati i naučni doprinosi	4
1.2	Struktura doktorske disertacije	6
2	BEZBEDNA INTERAKCIJA IZMEĐU ČOVEKA I ROBOTA.....	7
2.1	Krutost na nivou zgloba robota	8
2.1.1	Aktivna krutost na nivou zgloba	9
2.1.2	Pasivna krutost na nivou zgloba	10
2.1.2.1	Aktuatori sa konstantnom krutošću	11
2.1.2.2	Aktuatori promenljive krutosti	13
	Strukturno kontrolisana krutost	13
	Podešavanje krutosti promenom momenta inercije	13
	Podešavanje krutosti promenom mehaničke impedanse:.....	14
	Mehanički kontrolisana krutost:.....	15
	Mehanizam sa podesivom dužinom poluge	15
	Aktuator mehanički podesive krutosti sa upravljivom ravnotežnom pozicijom	16
	Zglob promenljive krutosti – VS Joint.....	17
	Antagonistički kontrolisana krutost	19
	Nelinearne opruge	21
	Trougaoni mehanizmi.....	21
	CAM mehanizam sa linearnom oprugom.....	22
	Pneumatski veštački mišići	24
	Realizacije antagonističkih konfiguracija.....	24
	Žičano pogonjeni aktuatori	27
2.1.3	Kombinacija aktivne i pasivne krutosti.....	28
2.2	Krutost završnog uređaja robota.....	29
2.2.1	Aktivna krutost završnog uređaja.....	30
2.2.2	Pasivna krutost završnog uređaja	31
2.2.3	Kombinacija aktivne i pasivne krutost završnog uređaja	32
2.2.4	Grafička reprezentacija krutosti	33
3	UPRAVLJANJE KRUTOŠĆU NA NIVOU ZAVRŠNOG UREĐAJA ROBOTA.....	35
3.1	Aktivna krutost	36
3.2	Pasivna krutost	40
3.2.1	Upravljanje krutošću završnog uređaja robota zasnovano na promeni krutosti u zglobovima	42
3.2.2	Upravljanje krutosti završnog uređaja robota zasnovano na promeni kinematičke konfiguracije	46
3.2.2.1	Analiza stabilnosti algoritma zasnovanog na inverznoj kinematici sa projekcijom u nultom prostoru..	51
3.2.2.2	Implementacija algoritma za optimizaciju krutosti kroz kinematičku promenu konfiguracije robota...	53
3.2.2.3	Validacija algoritma za optimizaciju krutosti kroz kinematičku promenu konfiguracije robota	55
	Slobodni prostor (tegovi)	55
	Završni uređaj robota u kontaktu sa površinom (sunder)	58
3.2.2.4	Eksperiment „ <i>peg in hole</i> “	60
3.2.3	Upravljanje krutošću završnog uređaja robota zasnovano na simultanoj promeni kinematičke konfiguracije i krutosti u zglobovima	63
	Maksimiziranje krutosti duž pravca kretanja.....	64

Oblikovanje elipsoida krutosti	67
3.3 Kombinacija aktivne i pasivne krutosti.....	71
4 UPRAVLJANJE KRUTOŠĆU NA NIVOU ZGLOBA ROBOTA	73
4.1 Žičano pogonjeni antagonistički aktuatora promenljive krutosti: Razvoj prototipa.....	75
4.2 Matematički model antagonističkog aktuatora promenljive krutosti.....	77
4.2.1 Matematički model žičano pogonjenog antagonističkog unidirekcionog aktuatora promenljive krutosti.....	78
4.2.2 Matematički model žičano pogonjenog antagonističkog bidirekcionog aktuatora promenljive krutosti.....	80
4.3 Kaskadna upravljačka struktura unidirekcionih antagonističkih žičano pogonjenih VSA	81
4.3.1 Estimacija parametara žičano pogonjenog antagonističkog VSA.....	83
4.3.1.1 Estimacija funkcije motora-reduktor	84
4.3.1.2 Podešavanje parametara kontrolera unutrašnje petlje po pozicijama motora	85
4.3.1.3 Modeliranje parametara nelinearne opruge i projektovanje dekuplera.....	86
4.3.1.4 Podešavanje parametara kontrolera spoljašnjih petlji po poziciji i krutosti aktuatora	88
4.3.1.5 Postupak za izvođenje parametara kontrolera	92
4.3.2 Eksperimentalni rezultati kaskadne upravljačke strukture	94
4.4 Kaskadna upravljačka struktura “qb” aktuatora.....	97
4.4.1 Dekupler zasnovan na neuralnoj mreži	98
5 ZAKLJUČAK.....	103
LITERATURA	105
BIOGRAFIJA AUTORA.....	115

1 Uvod

Današnja generacija robota se odlikuje velikom preciznošću, brzinom i efikasnošću rada, međutim takva generacija robota nije bezbedna za rad u neposrednom okruženju čoveka. Zato takvi roboti moraju da rade u zaštićenim zonama koje troše nepotrebno veliki deo prostora. Sledeći izazov kako u industrijskoj tako i u servisnoj robotici jeste razvoj bezbedne fizičke interakcije robota i čoveka [1, 2] i samim tim osposobljavanje robota za mnogo širi spektar zadataka u direktnoj interakciji i saradnji sa čovekom [3, 4, 5]. Trenutna generacija kolaborativnih robota se pre svega odlikuje dodatnim senzorskim sistemima koji mogu da detektuju ostvarenu interakciju i po potrebi zaustave robota ili dovedu do određene akcije koja nije trenutna već zahteva određeno vreme procesiranja [6]. Da bi se ostvario cilj i konstruisao robot koji je bezbedan za interakciju sa okruženjem, potrebno je ostvariti bezbednost i na nivou aktuatora čija bi inercija bila raspregnuta od inercije same konstrukcije robota kroz upotrebu elastičnih elemenata i na taj način garantovala ograničenu silu interakcije i u trenutku kontakta. Istraživanja u oblasti servisne i kolaborativne robotike, dovela su do razvoja različitih pristupa u projektovanju aktuatora, najpre konstantne krutosti (SEA – engl. *serial elastic actuator*) [7, 8, 9, 10], a zatim i do aktuatora promenljive krutosti (VSA – engl. *variable stiffness actuator*) ili nešto opštije aktuatora promenljive mehaničke impedanse (VIA – engl. *variable impedance actuator*) [11, 12, 13, 14]. Sa razvojem različitih pristupa konstruisanju VSA [15, 16, 17], javila se izražena potreba za razvojem efikasnih pristupa za upravljanje ovakvim sistemima koji uključuju elastične elemente [18, 19, 20]. VSA/VIA aktuatori su sistemi sa više ulaza i izlaza (MIMO – engl. *multiple input-multiple output*), gde se osim pozicijom zgloba upravlja i njegovom krutošću, sa izrazito nelinearnim karakteristikama [11, 12, 13] i zbog toga predstavljaju izazov za razvoj upravljačkih algoritama.

Istraživanje prikazano u ovoj doktorskoj disertaciji može se predstaviti kroz dva pravca istraživanja:

- 1) Upravljanje mehaničkom impedansom (Kartezijanskom krutošću) završnog uređaja robota (EE – engl. *end-effector*) planiranjem krutosti pojedinih zglobova robota u kombinaciji sa promenom kinematičke konfiguracije kroz kretanje u nultom prostoru (eng. *null space*).
- 2) Razvoj metoda za efikasno simultano upravljanje pozicijom i krutošću aktuatora sa promenljivom krutošću na nivou zgloba robota, odnosno aktuatora i unapređenje mehaničke konstrukcije i upravljačke arhitekture ovakvih aktuatora.

Prvi deo disertacije se bavi višim nivoom upravljanja gde će se razvijati strategija za upravljanje Kartezijanskom krutošću završnog uređaja, dok je drugi deo disertacije fokusiran na upravljanje jednog zgloba robota pogonjenim VSA sa posebnim naglaskom na jednu od realizacija VSA – žičano pogonjenog VSA u antagonističkoj konfiguraciji. Ovakva konfiguracija zauzima bitno mesto u rešenjima VSA i nastala je kao rezultat bioloških sistema akcije [17, 21, 22, 23].

Prvi deo istraživanja je fokusiran na oblikovanje Kartezijanske krutosti završnog uređaja. Matrica krutosti završnog uređaja određuje (statičku) zavisnost između položaja završnog uređaja i sile interakcije koja se javlja na završnom uređaju u kontaktu sa okolinom. Matricom krutosti se može upravljati promenom kinematičke konfiguracije robota i/ili promenom krutosti pojedinih zglobova robota [24]. Za primenu pristupa zasnovanog na promeni kinematičke konfiguracije robota neophodno je da postoji kinematička redundansa [25], odnosno da robot ima više stepeni slobode (zglobova) nego što konkretni zadatak zahteva. Na taj način je, uz upravljanje pozicijom završnog uređaja kao primarnog zadatka, moguće uticati i na promenu matrice krutosti završnog uređaja eksploatacijom nultog prostora kinematike. U doktorskoj disertaciji analizirana su oba pristupa u oblikovanju matrice krutosti završnog uređaja. U slučajevima kada nije moguće ostvariti željenu matricu krutosti završnog uređaja (usled fizičkih ograničenja), neophodno je praviti kompromis

između vrednosti elemenata matrice krutosti koji su fizički ostvarive i željenih vrednosti. Kompromis se može predstaviti kao:

- 1) Upravljanje samo određenim elementima iz matrice krutosti koji su od interesa za zadatak (npr. elementi na glavnoj dijagonali matrice krutosti ili neki pojedinačni elementi poput krutosti duž ose kretanja),
- 2) Traženjem ostvarive matrice krutosti završnog uređaja koja je „najsličnija“ željenoj matrici pod određenim kriterijumima koji su prestavljeni kroz definisanu kriterijumsku funkciju.

U drugoj fazi istraživanja fokus je na razvoju upravljačkog algoritma za žičano pogonjene VSA (engl. *tendon driven*) [26, 27, 28]. Polazeći od pretpostavke da je precizan matematički model teško odrediti, ovaj nelinearan sistem sa dva ulaza i dva izlaza je analiziran iz perspektive eksperimentalne identifikacije modela i parametara sistema, kao i nelinearne multivarijabilne teorije upravljanja. Po ugledu na radove dostupne u literaturi razmotren je i implementiran kaskadni pristup upravljanja.

Predstavljeno istraživanje u disertaciji polazi od sledećih hipoteza:

- 1) Promena krutosti završnog uređaja redundantnog robota pogonjenog aktuatorima promenljive krutosti se može postići:
 - a) promenom kinematičke konfiguracije robota i/ili
 - b) pomenom krutosti u zglobovima robota.
- 2) Kada željena matrica krutosti nije ostvariva, potrebno je pristupiti postupku podešavanja matrice u mogućem prostoru optimizacije sa ograničenjima.
- 3) Oblikovanje krutosti završnog uređaja robota koja predstavlja problem optimizacije nelinearnih funkcija sa ograničenjem je moguće svesti na problem upravljanja u nultom prostoru, gde se krutost završnog uređaja menja sa promenom kinematičke konfiguracije robota zadržavajući željenu poziciju završnog uređaja.
- 4) Metode za grafičku analizu uticaja kinematičke konfiguracije robota na krutost završnog uređaja se mogu koristiti za analizu i oblikovanje karakteristike krutosti završnog uređaja (elipsa/ellipsoid krutosti engl. *stiffness ellipse/ellipsoid*).
- 5) Precizan matematički model VSA/VIA, koji predstavlja nelinearan MIMO sistem, je teško izvesti i menja se tokom vremena i eksploatacije.
- 6) Moguće je razviti robusno upravljanje pozicijom i krutošću VSA kada su parametri matematičkog modela aktuatora nepoznati.

Prilikom izrade disertacije urađen je sistematičan pregled dostupne literature i analiza dostupnih algoritama za upravljanje zglobovima sa promenljivom krutošću kao i algoritama za oblikovanje krutosti završnog uređaja. Istraživanje prikazano u doktorskoj disertaciji započinje sa razvojem algoritama za upravljanjem krutošću završnog uređaja robota, koristeći već postojeći matematički, kao i detaljni Matlab/Simulink model KUKA LWR robota sa 7 stepeni slobode [29]. Takođe, dostupni CAD model KUKA LWR robota implementiran je u MuJoCo HAPTIX grafičkom okruženju [30] u integraciji sa Matlab/Simulink modelom robota u cilju realizacije simulacionog okruženja za testiranje algoritama. Inicijalno testiranje razvijenih upravljačkih algoritama sprovedeno je u simulacijama, a zatim verifikovano na laboratoriskoj postavci. Za testiranje razvijenih upravljačkih algoritama kao hardverska platforma korišćen je robot KUKA LWR sa 7 stepeni slobode kao redundante kinematičke antropomorfne konfiguracije sa mogućnošću softverskog zadavanja krutosti pojedinih zglobova.

U oblasti simultanog upravljanja pozicijom i krutošću pojedinog VSA razvijen je matematički i simulacioni model kao i hardverska platforma unidirekcionog antagonističkog žičano pogonjenog VSA, na kojem je testiran upravljački algoritam za simultano upravljanje pozicijom i krutošću. Upravljački algoritam je realizovan kao kaskadna struktura sa dve unutrašnje petlje koje će regulisati

pozicije pogonskih motora, dve spoljašnje petlje za regulisanje pozicije i krutosti aktuatora, kao i statičkog dekuplera koji ima zadatak da preslika željenu poziciju i krutost VSA aktuatora na željene pozicije motora. Na primeru bidirekcinog antagonističkog žičano pogonjenog VSA isprojektovan je statički dekupler primenom neuralne mreže, koja se može koristiti kod kompleksnih modela kada nije moguće pronaći analitički model dekuplera. Podešavanje kontrolera u upravljačkoj strukturi zasniva se na identifikaciji dominantne dinamike delova sistema za koje se određeni kontroleri projektuju. Kontroleri u unutrašnjoj petlji se projektuju da regulišu poziciju pogonskih motora sa reduktorom, dok su kontroleri u spoljašnjoj petlji podešeni da kontrolišu poziciju i krutost osovine aktuatora. Kontroleri su podešeni na osnovu procenjene dominantne dinamike dela sistema koji kontrolišu.

1.1 Ključni rezultati i naučni doprinosi

Disertacija ima za cilj da doprinese sledećoj generaciji kolaborativnih robota koji će se zasnivati na novoj tehnologiji aktucije (VSA/VIA) kroz planiranje mehaničke impedanse [24, 31] završnog uređaja robota. Kod VSA/VIA aktuatora pozicija zgloba robota i pozicija aktuatora nisu kruto povezane i postoji elastični prenos koji u slučaju interakcije robota sa okolinom apsorbuje udar i na taj način sprečava da dođe do oštećenja robota, predmeta u njegovoj okolini i čini robota bezbednijim za rad u neposrednom okruženju čoveka.

Naučni doprinos autora se ogleda u sledećim relevantnim publikacijama:

Radovi u međunarodnim časopisima:

[A1] **B. Lukić**, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Control of Antagonistic VSA—An Engineering Control Approach to a Bioinspired Robot Actuator," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, no. 69, pp. 53-67, 2019. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00069

Radovi u domaćim časopisima:

[B1] N. Knežević, **B. Lukić**, K. Jovanović, L. Žlajpah and T. Petrič, "End-effector Cartesian stiffness shaping - sequential least squares programming approach," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, 2021. DOI: 10.2298/SJEE2101001K

[B2] Kosta Jovanović, **Branko Lukić**, and Veljko Potkonjak. "Feedback Linearization for Decoupled Position/Stiffness Control of Bidirectional Antagonistic Drives." *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics* Vol. 31, No 1, (March 2018): 51-61. DOI: 10.2298/FUEE1801051J

Međunarodne konferencije:

[C1] **Branko Lukić**, Kosta Jovanović, Nikola Knežević, Leon Žlajpah, Tadej Petrič (2020, June). Maximizing the End-Effector Cartesian Stiffness Range for Kinematic Redundant Robot with Compliance. *In International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region* (pp. 208-217). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_23

[C2] N. Knežević, **B. Lukić** and K. Jovanović, "Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning," in *Advances in Service and Industrial Robotics*, Cham, Springer, 2020, pp. 337-345. DOI: 10.1007/978-3-030-19648-6_39

[C3] **B. Lukić**, T. Petrič, L. Žlajpah and K. Jovanović, "KUKA LWR Robot Cartesian Stiffness Control Based on Kinematic Redundancy," in *The 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2019*, Kaiserslautern, Germany, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-19648-6_36

[C4] **B. Lukić**, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Gain Scheduling Control of Antagonistic Actuators Based on System Identification," in *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2018. Mechanisms and Machine Science*, Cham, Springer, 2018, pp. 425-435. DOI: 10.1007/978-3-030-00232-9_45

[C5] **B. Z. Lukić**, K. M. Jovanović and G. S. Kvašček, "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator," in *2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, 2016. DOI: 10.1109/NEUREL.2016.7800116

[C6] **Branko Lukić** and Kosta Jovanović. "Minimal Energy Cartesian Impedance Control of Robot with Bidirectional Antagonistic Drives." *International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*. Springer, Cham, 2016.p. 56-64. DOI 10.1007/978-3-319-49058-8_7

Domaće konferencije:

[D1] Nikola Knežević, **Branko Lukić**, Kosta Jovanović, Tadej Petrič and Leon Žlajpah. "End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadratic Programming Approach", *The 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019)*, Silver Lake, Serbia, Jun 3-5, 2019.

[D2] **Branko Lukić**, Kosta Jovanović, and Tomislav B. Šekara. "Cascade Control Design for Antagonistic Robot Joint Based on ARX Model Characterization." in *Proceedings of 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, Palić, Serbia, June 11 – 14, 2018.

[D3] B. Lukić, K. Jovanović and A. Rakić, "Realization and Comparative Analysis of Coupled and Decoupled Control Methods for Bidirectional Antagonistic Drives: QBmove maker pro," in *Proceedings of 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering*, Zlatibor, Serbia, 2016.

[D4] Kosta Jovanović, **Branko Lukić**, "Enhanced Puller-Follower Approach for Stiffness Control of Antagonistic Drives"), in *Proceedings of 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016)*, Zlatibor, Serbia, Jun 13-16, 2016.

[D5] **B. Lukić** and K. Jovanović, "Influence of Mechanical Characteristics of a Compliant Robot on Cartesian Impedance Control Design," in *Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering*, Silver Lake, Serbia, 2015.

[D6] Veljko Potkonjak, **Branko Lukić**, Zaviša Gordić, Predrag Milosavljević, "Development of Experimental Platform for Research in Robots Having Compliant Joints", in *Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2014)*, Vrnjačka Banja, June 2014.

Doprinosi predstavljani u disertaciji se mogu podeliti u dve grupe:

1) Na nivou završnog uređaja robota:

- a) Razvoj novih tehnika upravljanja matricom krutosti završnog uređaja robota rekonfiguracijom redundantne kinematičke strukture robota i/ili podešavanjem krutosti pojedinih zglobova robota uz očuvanje željene statičke pozicije završnog uređaja [B1], [C1], [C3], [D1], [D5].
- b) Razvoj novih tehnika upravljanja Kartezijanske krutosti završnog uređaja duž ose kretanja završnog uređaja robota [B1], [C1], [C3], [D1].
- c) Uvođenje novih formulacija oblikovanja Kartezijanske krutosti završnog uređaja robota kao problema optimizacije nelinearnih funkcija sa ograničenjem kroz iterativnu proceduru [B1], [C3], [D1].

2) Na nivou VSA:

- a) Realizacija upravljačkih pristupa za jednu klasu aktuatora sa promenljivom krutošću uz mogućnost simultanog upravljanja krutoću i pozicijom, [A1], [B2], [C2], [C4], [C5], [C6], [D2], [D3], [D4].
- b) Razvoj hadverske platforme [A1], [D6].

1.2 Struktura doktorske disertacije

Disertacija se sastoji od pet poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja sledi Poglavlje 2: „Bezbedna interakcija između čoveka i robota“, gde je dat pregled literature o načinima kako se bezbedna interakcija ostvaruje na nivou zglobova robota i na nivou završnog uređaja robota. Na nivou zgloba analizirana je aktivna krutost, pasivna krutost ostvarena kroz SEA i VSA/VIA, kao i uticaj kombinacije aktivne i pasivne krutosti na ukupnu krutost zgloba. Dat je pregled literature i opis najčešćih realizacija VSA/VIA sa posebnim naglaskom na antagonističku žičano pogonjenu klasu aktuatora. Na nivo završnog uređaja robota analizirana je aktivna, pasivna, kao i kombinacija aktivne i pasivne popustljivosti, kao i grafički alat za analizu matrice krutosti.

Poglavlje 3: „Upravljanje krutošću na nivou završnog uređaja robota“, analizira metode za upravljanje krutošću završnog uređaja, a koje su podeljene u tri grupe: 1) aktivna; 2) pasivna i 3) kombinacija aktivne i pasivne krutosti. Uticaj pasivne krutosti završnog uređaja je analiziran iz ugla promene kinematičke konfiguracije redundantnog robota i promenom krutosti u pojedinačnim zglobovima. Na kraju poglavlja 3 prikazana je grafička metoda za analizu krutosti završnog uređaja preko elipsi i elipsoida krutosti.

Poglavlje 4: „Upravljanje krutošću na nivou zgloba robota“ analizira postojeće metode za upravljanjem VSA/VIA, i prikazuje razvoj žičano pogonjenog antagonističkog VSA. U ovom poglavlju delu razmatra se razvoj algoritama za upravljanje antagonističkim VSA sa predloženom kaskadnom upravljačkom strukturom, gde se identifikacija parametara sistema realizuju identifikacijom dominantne dinamike sistema i podešavanjem kontrolera u skladu sa identifikovanom dominantnom dinamikom. Razmatra se realizacija statičkog dekuplera koji mapira vrednosti željenih krutosti i pozicija VSA sa jedne strane i pozicija motora sa druge. Dekupleri mogu biti u slučaju jednostavnijih matematičkih modela analitički projektovani, ili u slučaju kompleksnijih relacija ulazno-izlaznih karakteristika dekupler može biti određen numerički ili tehnikama mašinskog učenja koje mogu da interpoliraju ulazno-izlaznu karakteristiku VSA. Na primeru komercijalno dostupnog qbmove maker pro aktuator (u nastavku će biti korišćena samo oznaka „qb“ aktuator), projektovan je statički dekupler primenom neuralne mreže, gde se neuralna mreža kosritsi kao *feedforward* komponenta upravljanja. Kontroleri koji se projektuju za upravljanje VSA, predstavljaju kompromis između performansi upravljačkog sistema i robusnosti.

Poglavlje 5: „Zaključak“ sumira rezultate disertacije, analizira doprinose i iznosi konače zaključke.

2 Bezbedna interakcija između čoveka i robota

Današnji industrija i društvo imaju povećanu potrebu za kolaboracijom ljudi i robota na proizvodnim linijama [3, 5, 32, 33] u servisnoj robotici [34], za medicinski rehabilitacionim uređajima [4, 35] i egzoskeletima koji pomažu kod fizički teških zadataka [36]. Kako svi pomenuti uređaji i roboti moraju da rade u neposrednoj blizini čoveka neophodne bezbednosne mere moraju biti uzete u razmatranje da bi se obezbedila bezbedna fizička interakcija između čoveka i robota (pHRI – engl. *physical human-robot interaction*) i interakcija robota sa okruženjem [2]. Savremeni kolaborativni i servisni roboti [32, 33, 37] osim što obezbeđuju bezbednu interakciju ne zahtevaju dodatni bezbednosni hardver kao što su laserske zavese ili metalni kavez.

Različiti periodi tehnološkog razvoja imali su različite metode za osiguravanje bezbednosti ljudi. Najpre, roboti su instalirani u ograđenom prostoru koji je sprečavao fizički kontakt sa ljudima. Kako se javila potreba da ljudi rade u blizini sa robotima, okolina robota je postala nestruktuirana, a samim tim i nepredvidiva što je dovelo do novih izazova. Da bi se obezbedila bezbedna interakcija završnog uređaja robota sa okolinom razvijen je upravljački algoritam koji završni uređaj robota posmatra kao mehaničku impedansu [38, 39, 40]. Mana ovakvog pristupa je što se bezbedna interakcija ostvaruje samo u završnom uređaju robota, a u svim ostalim tačkama robot je i dalje krut. Razvojem nove generacije robota koji imaju senzore momenta u svim zglobovima, omogućeno je da se kontroliše krutost svakog segmenta robota pojedinačno kroz upravljačku strukturu [41]. Dodatni senzori su omogućili razvoj algoritama za bezbednu interakciju, ali postoje i dalje izazovi kad dolazi do kontakta pri velikim brzinama jer kontroler nije u stanju da trenutno kompezuje velike količine energije koja se unosi u sistem. Napuštanjem paradigme neophodnosti krutih veze između aktuatora i zgloba robota [42], kao i pokušaja eliminacije svih vrsta elastičnosti u prenosu mehaničkog sistema robota i posmatranja elastičnosti kao neželjene [43], dovelo je do razvoja popustljivih aktuatora. Nova generacija aktuatora koji imaju ugrađenu popustljivost, realizovanu upotrebom tehnologije fleksibilnih mehaničkih zglobova (pasivna popustljivost) prevaziđeni su nedostaci koji postoje kod popustljivost ostvarene kroz upravljačku strukturu. Iako VSA/VIA pružaju više slobode i mogućnosti u oblikovanju krutosti završnog uređaja robota od SEA, opravdanje za upotrebu SEA u odnosu na VSA leži u činjenici da su SEA jednostavnije mehaničke konstrukcije što ih čini lakšim za održavanje a samim tim pouzdanijim i pogodnijim za industrijsku upotrebu. Jedna od bitnih karakteristika popustljivih aktuatora je ta što se energija udara trenutno apsorbuje i skladišti u prenosnom sistemu aktuatora kroz deformaciju elastičnih elemenata. Ovo smanjuje efekte sile interakcije i obezbeđuje bezbednu interakciju između robota i okoline. Aktuatori sa pasivnom popustljivošću su energetski efikasniji jer mogu da iskoriste uskladištenu energiju, što je posebno korisno u slučaju repetitivnih zadataka. Kada aktuatori sa pasivnom popustljivošću oslobode uskladištenu energiju, oni premašuju performanse krutih aktuatora u pogledu maksimalne brzine [44, 45, 46].

U ovom poglavlju predstavljen je pojam aktivne i pasivne krutosti na nivou zgloba, kao i na nivou završnog uređaja. Takođe, dat je pregled i kratak opis principa rada mehanizama za ostvarivanje pasivne krutosti (aktuatori sa promenljivom krutošću), kao i opis metoda za aktivno upravljanjem krutošću. Kod pregleda aktuatora sa pasivnom krutošću, poseban naglasak je na žičano pogonjenim aktuatorima koji su jedan od fokusa ove disertacije.

2.1 Krutost na nivou zgloba robota

Krutost (engl. *stiffness*) i popustljivost (engl. *compliance*) predstavljaju inverzne fizičke veličine, ali se terminološki obe koriste da opišu aktuatora i zglobove kao i čitave robotske sisteme koji imaju elastično ponašanje, tj. ponašaju se kao opruge. Da bi se opisali aktuatori promenljive krutosti, u literaturi postoji više izraza kao što su podesiva popustljivost (engl. *adjustable compliance*) [15], promenjiva popustljivost (engl. *variable compliance*) [47], podesiva krutost (engl. *adjustable stiffness*) [48], promenjiva krutost (engl. *variable stiffness*) [49] ili kontrolisana krutost (engl. *controllable stiffness*) [50]. Sve to ukazuje da ne postoji standardizovana terminologija i da su izrazi zavisili od autora radova i naučnika koji su se bavili ovo tematikom i koji su realizovali pomenute aktuatora. U ovoj tezi ravnopravno se koriste svi pomenuti izrazi. Još jedan od izraza koji se sreće u literaturi, a opisuje krutost je (mehanička) impedansa [12, 38, 39, 40]. Impedansa se sastoji od krutosti, prigušenja i inercije pa samim tim kontrola impedanse predstavlja širi pojam od kontrole krutosti.

Popustljivost prestavlja sposobnost da se odreaguje na eksternu silu interakcije (sile i/ili momenti) tako što će osovina aktuatora ili segment robota odstupiti od ravnotežnog stanja srazmerno intenzitetu sile (veća sila veće odstupanje). To ponašanje omogućava da se kontroliše interakcija robota sa okolinom [51] i bezbedniju fizičku interakciju između robota i čoveka [2].

Popustljivost u zglobovima se može ostvariti na tri načina:

- 1) Oblikovanjem mehaničke impedanse upravljanjem obrtnim momentom na nivou zgloba (aktivna popustljivost);
- 2) Ugradnjom elastičnih elemenata u prenosni sistem robota (pasivna popustljivost); i
- 3) Kombinacijom aktivne i pasivne popustljivosti.

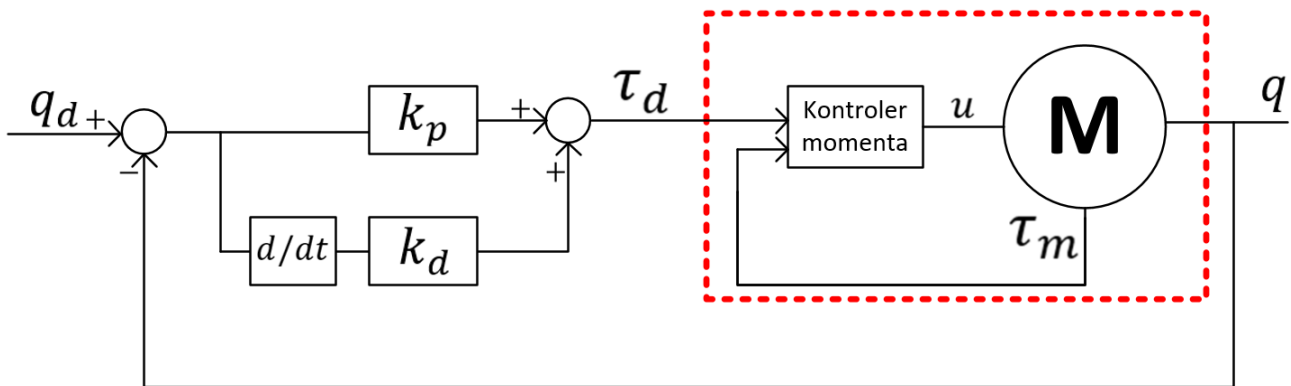
2.1.1 Aktivna krutost na nivou zgloba

Jedan od načina za bezbednu interakciju se ostvaruje aktivnom popustljivošću na nivou zglobova robota, gde se softverski, kroz upravljanje momentom pomoću PD regulatora ostvaruje željeno ponašanje koje odgovara elastičnom elementu (najčešće opruzi). Željeni upravljački momenat τ_d koji ostvaruje željeno ponašanje može se realizovati pomoću PD regulator gde proporcionalno pojačanje (k_p) odgovara željenoj krutosti a diferencijalno pojačanje (k_d) odgovara željenom prigušenju [52], i realizuje se kao

$$\tau_d = k_p(q_d - q) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}), \quad (1)$$

gde q_d i q predstavljaju željenu i ostvarenu poziciju zgloba, a \dot{q}_d i \dot{q} željenu i ostvarenu brzinu zgloba. Prednost aktivne popustljivosti je ta što omogućava promenu ponašanja aktuatora u toku rada (moguće je “*online*” promeniti krutost) promenom parametara PD kontrolera. Struktura kontrolne petlje na nivou zgloba robota prikazana je na Slika 1. Kontrolna struktura se sastoji od petlje za kontrolu momenta motora **M** (crvena isprekidana linija) koja računa kontrolni napon (u) na osnovu željenog momenta (τ_d) i ostvarenog momenta (τ_m). Drugi deo kontrolne strukture je PD kontroler pozicije čiji parametri utiču na krutost zgloba.

Za implementaciju aktivne popustljivosti neophodno je meriti poziciju motora (q) čija se impedansa kontroliše (videti jednačinu (1)), kao i ostvareni momenat (τ_m). Tako da za realizaciju upravljačke petlje neophodno je imati senzor momenta u zglobu (osovina motora **M**) ili estimaciju momenta i senzor položaja osovine motora (enkoder).



Slika 1. Struktura PD kontrolera za realizaciju aktivne popustljivosti na nivou zgloba. Kontrolna struktura se sastoji od dve petlje: petlja koja kontroliše moment na motoru (crvena isprekidana linija) i PD impedansni kontroler. Blok d/dt predstavlja blok za diferenciranje.

2.1.2 Pasivna krutost na nivou zgloba

Pored aktivne popustljivosti koja se ostvaruje kroz upravljačku petlju, postoji i pasivna popustljivost koja je realizovana kroz elastične elemente koji su ugrađeni u prenosnom sistemu robota između aktuatora i segmenta robota [13]. Mane i nedostaci koji se javljaju kod aktivne popustljivosti mogu se prevazići upotrebom pasivne popustljivosti, ali predstavljaju veći izazov sa stanovišta upravljanja i usložnjavaju kako upravljačku tako i mehaničku strukturu aktuatora i robota. Prednosti koje unose aktuatori sa pasivnom popustljivošću je skladištenje energije u elastičnim elementima i prevazilaženje performansi krutih aktuatora u smislu maksimalnih brzina, što doprinosi do veće dinamičnosti kod repetativnih zadataka [44, 45, 46]. Elastični element koji se ugrađuje u prenosni sistem dovodi to toga da pozicija aktuatora i segmenta robota nisu jednoznačno određene usled deformacija elastičnog elementa. Zato je za upravljanje ovakvim sistemima neophodno duplo merenje pozicije, na aktuatoru i na segment robota [43, 53]. Kada deluje eksterna sila, tradicionalni kruti aktuatori će zadržati poziciju (sve dok aktuator ne uđe u zasićenje) [54], dok će aktuator sa elastičnim elementima u prenosu omogućiti otklon od ravnotežnog stanja [13]. Pod ravnotežnim stanjem aktuatora sa popustljivošću se smatra stanje u kome aktuator generiše obrtni momenat jednak nuli pri odsustvu spoljašnjeg uticaja. Kada se naglo menja sila interakcije (npr. kada dođe do neželjene kolizije), elastičnost u prenosnom sistemu će apsorbovati udar čime će zaštititi krute mehaničke delove i smanjiti habanje mehaničkih komponenti prenosnog sistema [11]. Pasivna popustljivost se može realizovati tako da između aktuatora i segmenta robota postoji konstantna krutost (SEA) ili promenljiva krutost (VSA).

Pasivna krutost je lokalna karakteristika koja važi u okolini ravnotežnog stanja. Lokalna statička karakteristika krutosti zglobova robota se definiše kao negativni izvod momenta po uglu [24, 31]

$$k = -\frac{d\tau}{dq}, \quad (2)$$

gde je k krutost zgloba, τ je obrtni moment koji se razvija na zglobovima, a q je pozicija zgloba. Za aktuatore sa konstantnom krutošću važi

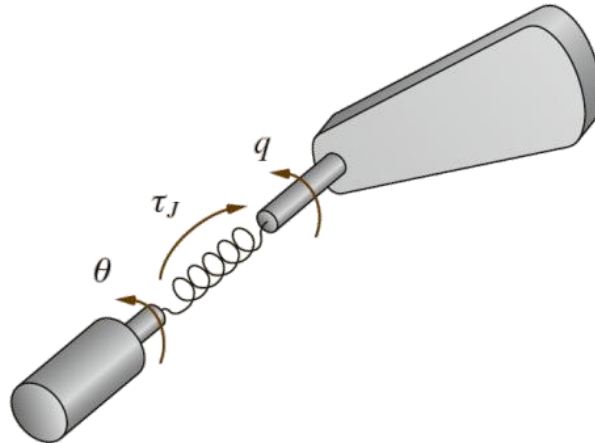
$$k = -\frac{d\tau}{dq} = \text{const}, \quad (3)$$

dok za VSA važi

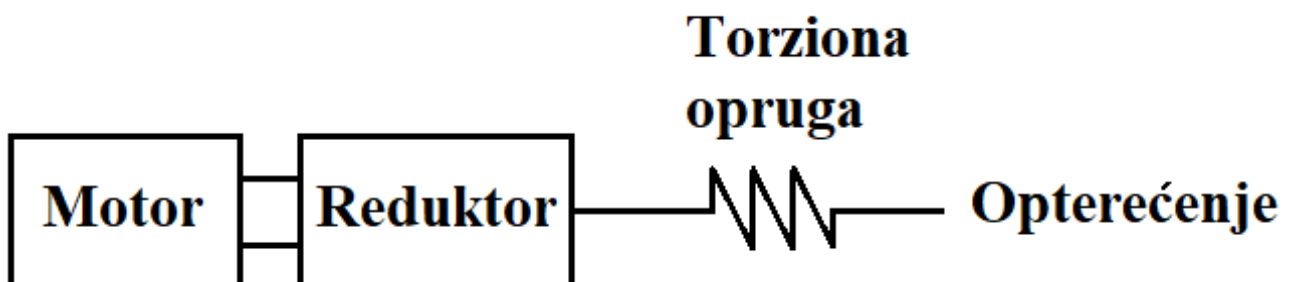
$$k = -\frac{d\tau}{dq} \neq \text{const}. \quad (4)$$

2.1.2.1 Aktuatori sa konstantnom krutošću

Aktuatori sa pasivnom konstantnom krutošću su realizovani kao SEA, gde se na red sa motorom vezuje torziona opruga konstantne krutosti [7, 8, 55]. Krutost SEA je određena karakteristikama izabrane opruge. Grafička reprezentacija zgloba sa elastičnim prenosom prikazan je na Slika 2. , a šematski prikaz SEA je dat na Slika 3. Kada postoji elastičnost u prenosu, pozicija zgloba i motora (aktuatora) nisu jednoznačno određene usled deformacije elastičnih elemenata u prenosnom sistemu. Pozicija aktuatora je označena sa θ , a pozicija segmenta robota sa q , dok je momenat koje se razvija u elastičnoj opruzi označen sa τ_j .



Slika 2. Grafička reprezentacija zgloba sa elastičnim prenosom pogonjenog sa SEA [56]. Pozicija aktuatora je označena sa θ , a pozicija segmenta robota sa q , dok je momenat koje se razvija u elastičnoj opruzi označen sa τ_j .



Slika 3. Šematski prikaz SEA.

Za zglob sa elastičnim prenosom sa Slika 2. važe relacije

$$I_j \ddot{q} + D_j \dot{q} = \tau_j, \quad (5)$$

$$I_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + \tau_j = \tau_m, \quad (6)$$

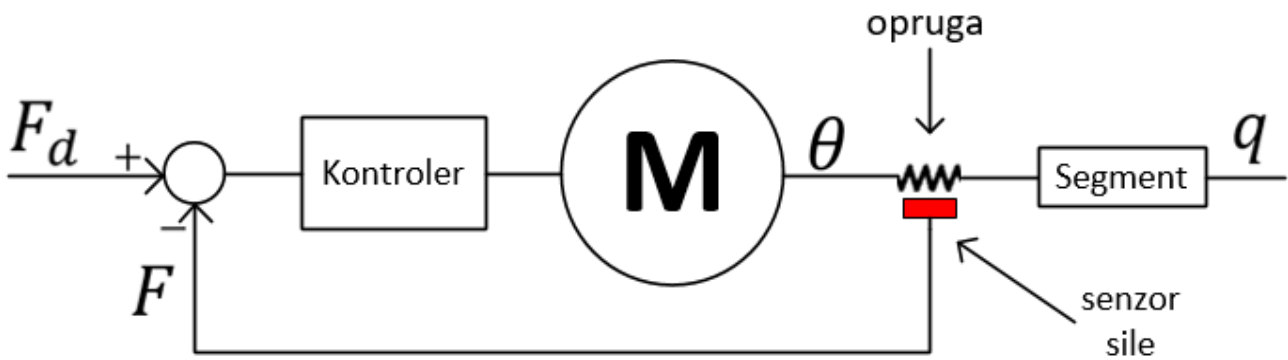
$$\tau_j = k(\theta - q), \quad (7)$$

gde I_j i I_m označavaju inercije zgloba i motora, D_j i D_m prigušenje zgloba i motora, dok je τ_m upravljački momenat motora, a τ_j momenat koji se razvija u elastičnom elementu. Krutost torziona opruge je označena sa k .

Prednost SEA u odnosu na tradicionalne krute aktuatora je taj što se ponaša kao nisko propusni filter za eksternu silu koja deluje na izlaznu osovinu aktuatora i na taj način amortizuje šok koji bi delovao na reduktore i ostale krute elemente u mehaničkom prenosu. Takođe, energija usled interakcije dovodi do deformisanja elastičnih elemenata u koje se skladišti energija koja može bit

iskorišćena i na taj način se mogu ostvariti performanse koje su bolje od krutog aktuatora koji pogoni SEA.

Na Slika 4. prikazana je struktura kontrolne šeme za SEA. F_d i F predstavljaju željenu i ostvarenu silu interakcije, a θ i q predstavljaju poziciju motora **M** i segmenta robota koje nisu jednake kao kod krutih aktuatora.



Slika 4. Strukturna kontrolna šema SEA.

2.1.2.2 Aktuatori promenljive krutosti

Kada je neophodno menjati svojstva aktuatora kako bi se uticalo na ponašanje robota pri interakciji sa okolinom možemo razlikovati dve vrste aktuatora: aktuatore sa promenljivom impedansom gde se modifikuju vrednosti mehaničke impedanse – VIA (inercija, prigušenje i krutost); i aktuatori sa promenljivom krutošću – VSA, gde se utiče samo na krutost kao statički deo mehaničke impedanse. Fokus u ovoj tezi je na krutosti aktuatora, kao karakteristici koja utiče na otklon koji nastaje usled interakcije sa okolinom, a samim tim i na performanse robota u kontaktnim zadacima. U [46] je prikazana analiza performansi krutih aktuatora, SEA i VSA gde je demonstrirana superiornost VSA.

SEA mogu da menjaju samo poziciju aktuatora, dok je krutost konstanta. Sa druge strane, kod VSA/VIA pored pozicije aktuatora moguće je kontrolisati i krutost izlazne osovine samog aktuatora, tako da oni predstavljaju sistem sa više ulaza i više izlaza (najčešće sa dva ulaza i dva izlaza). Postoji nekoliko različitih realizacija aktuatora sa promenljivom krutošću:

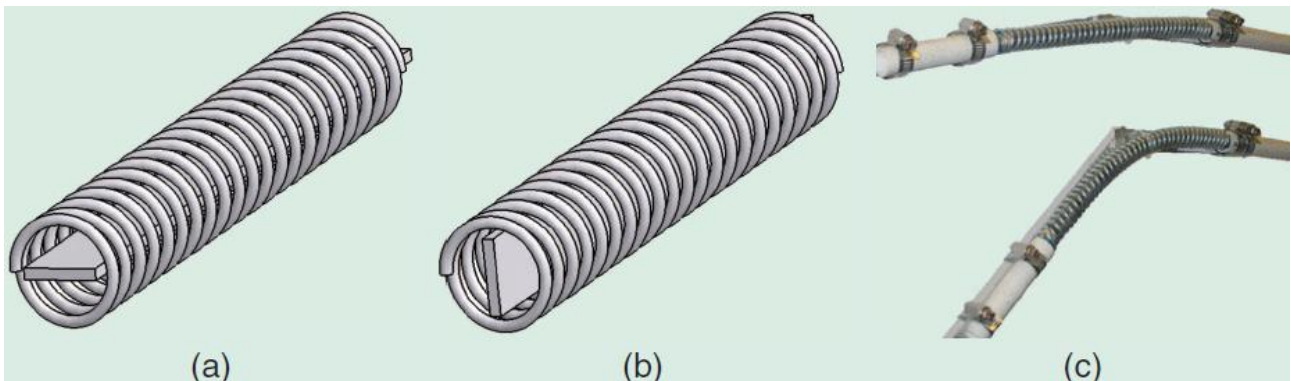
- 1) Strukturno kontrolisana krutost;
- 2) Mehanički kontrolisana krutost;
- 3) Antagonistički kontrolisana krutost.

Strukturno kontrolisana krutost

Promena krutosti aktuatora koja se ostvaruje promenom strukture mehanizma zove se strukturno kontrolisana krutost (engl. *Structure-controlled stiffness*). Da bi se kontrolisala krutost potrebno je menjati vrednost inercije, dužine elementa ili Jangov modul elastičnosti [13]. Jangov modul elastičnosti moguće je menjati promenom temperature (zagrevanjem i hlađenjem) elastičnog elementa, ali to nije moguće učiniti dovoljno brzo da bi moglo da se koristi u upravljanju VSA. Zato je realniji scenario za promenu krutosti promena inercije ili dužine elastičnih elemenata.

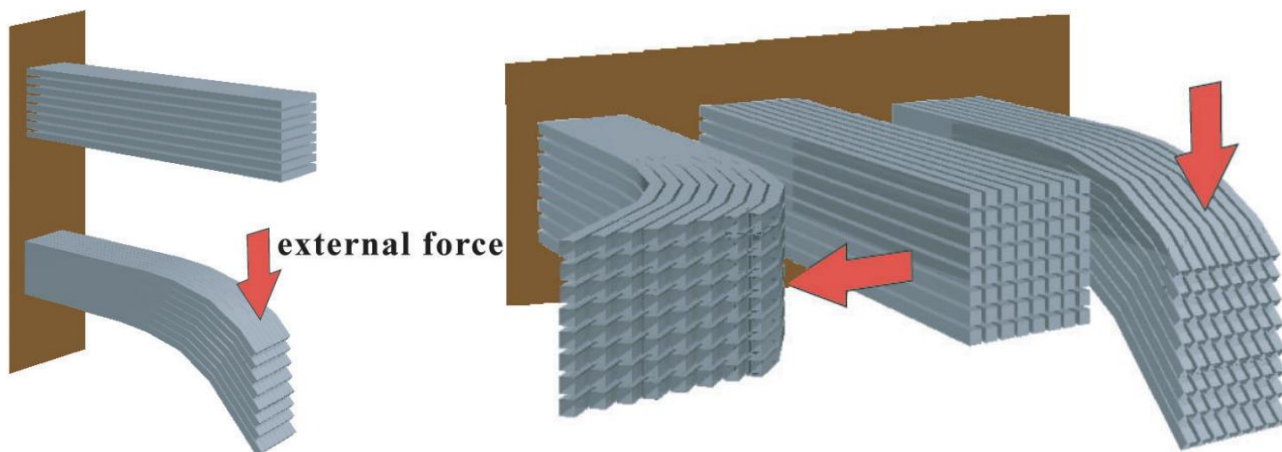
Podešavanje krutosti promenom momenta inercije

Aktuator promenljive krutosti se može konstruisati koristeći pasivne elemente sa promenljivom mehaničkom impedansom. Kada bi se posmatrala greda koja ima dimenzije različitih dužina, promena inercije se može ostvariti rotacijom grede za 90° stepeni oko aksijalne ose. Prototip spiralne opruge promenljive krutosti sa ugrađenom gredom [13] prikazan je na Slika 5. Na Slika 5. i Slika 5. vidi se greda koja je smeštena u spiralnu oprugu i čijom rotacijom se menja inercija. Funkcija spiralne opruge u ovom dizajnu je da smanji efekte bočnog izvijanja. Na Slika 5. je prikazan uticaj orijentacije grede na krutost mehanizma. Inercija mehanizma direktno je proporcionalna odnosu širine i debljine grede u opruzi. Adekvatnim izborom debljine i širine grede, moguće je definisati minimalnu i maksimalnu popustljivost. Vrednosti između minimalne i maksimalne vrednosti krutosti je teško ostvariti zbog bočnog izvijanja opruge.



Slika 5. Promena krutost promenom inercije rotacione grede [13]: a) horizontalna orijentacija grede; b) vertikalna orijentacija grede; c) uticaj orijentacije grede na krutost mehanizma.

U [57] predložen je dizajn gde je izvršena laminacija jedne metalne grede tako da je lamirana po jednoj osi i da se sastoji od tankih listova (Slika 6. levo), ili po dve ose tako da se sastoji od tankih igli (Slika 6. desno). Kada na naslagane lamirane elemente deluje sila oni se savijaju. Kada su lamirani elementi čvrsto pričvršćeni jedan uz drugi (ponašaju se kao greda od jednog komada), ne bi se klizali ni savijali zbog velike sile trenja. U tom slučaju, za njihovo deformisanje bila bi neophodna sila mnogo većeg intenziteta nego kada nisu čvrsto stegnuti. Odnos minimalne i maksimalne krutosti je srazmeran kvadratu elemenata koji čine lamiranu gredu, tako da sa većim brojem elemenata moguće je postići jako visok odnos minimalne i maksimalne krutosti. Prednost ovakvog mehanizma je ta što se postiže velik opseg krutosti, ali zbog trenja koje se javlja otežana je precizna kontrola. Postoje različite metode koje obezbeđuju da lamirani elementi budu čvrsto pričvršćeni kao što su elektrostatički pristup [57] ili upotreba vakuuma [58].



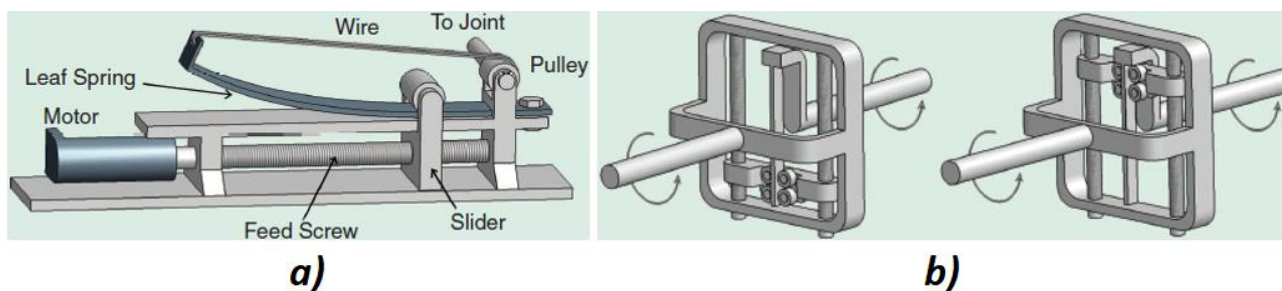
Slika 6. Lamirana struktura [57]: levo) laminacija po jednoj osi; b) laminacija po dve ose.

Podešavanje krutosti promenom mehaničke impedanse:

Realizacija promene krutosti promenom efektivne dužine elastičnog elementa data je u [13, 59] a njena ilustracija je data na Slika 7. . Lisnata opruga (engl. *Leaf spring*) povezana je sa zglobom pomoću žice i kotura. Kada se motor rotira, on rotira i vreteno sa navojem. Rotacija vretena sa navojem pomera klizač koji menja efektivnu dužinu opruge. Menjanjem efektivne dužine opruge menja se i sila i krutost koja deluje na zglob.

Dizajn promene impedanse na bazi rotacionog mehanizma [13, 60] prikazana je na Slika 7. . Tu je prikazan mehanizam koji pomoću motora pokreće dva vretena, koji pomeraju klizač sa četiri kotura. Između kotura se nalazi lisnata opruga čija se efektivna dužina menja pomeranjem klizača. Ovakvi mehanizmi su jednostavni za realizaciju, a kontrola pozicije i krutosti su nezavisni.

Velika prednost ovakvih realizacija je što omogućavaju kontrolu krutosti u celom opsegu (od minimalne do maksimalne).



Slika 7. Mehanizmi za podešavanje krutosti promenom mehaničke impedanse [13]: a) mehanizam sa navojeme i lisnatom oprugom; b) rotacioni mehanizam za promenu impedanse.

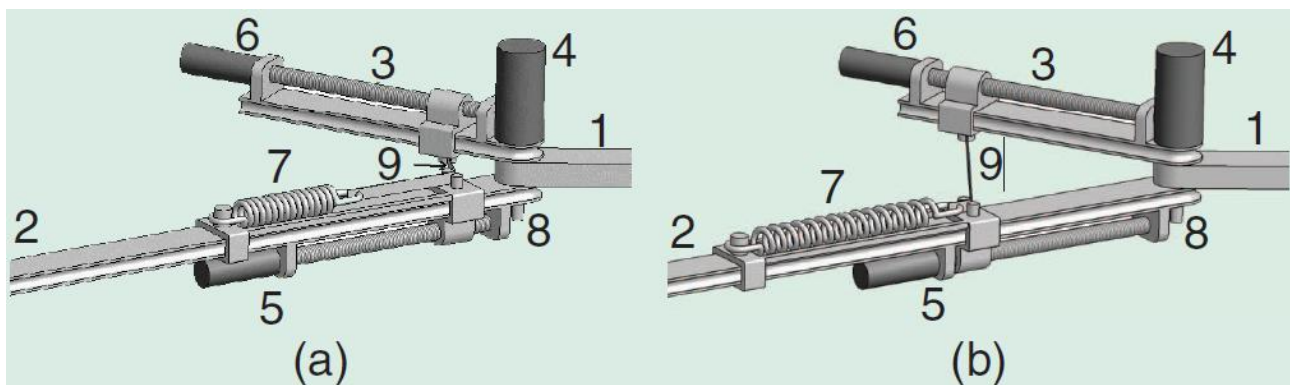
Mehanički kontrolisana krutost:

Kod mehanički kontrolisane krutost [12, 13] podešava se efektivna fizička krutost sistema tako da je cela dužina opruga u upotrebi za razlike od strukturno kontrolisane krutosti. Za realizaciju aktuatora sa mehanički kontrolisanom krutošću neophodan je samo jedan elastični element u prenosnom mehanizmu. To omogućava da se ceo aktuator ponaša kao torziona opruga, gde se pozicija u ravnotežnom stanju i krutost mogu nezavisno kontrolisati (jedan aktuator kontroliše poziciju dok drugi kontroliše krutost).

Mehanizam sa podesivom dužinom poluge

Na Sliku 8. ilustrovan je CAD model mehanizma za mehaničko kontrolisanje krutosti promenom dužine poluge (engl. *Lever Arm Length Adjustment*) [13]. Promena krutosti se zasniva na promeni efektivne dužine segmenta i poluge i upotrebom samo jednog pasivnog elementa (opruga). Mehanizam rotacionog zgloba sastoji se od referentnog segmenta (1), pokretnog segmenta (2) i poluge (3) koji su povezani zajedno preko rotacione ose (8). Relativni položaj poluge (3) u odnosu na referentni segment (1) se kontroliše pomoću servomotora (4). Opruga (7) stvara moment koji teži da pokretni segment (2) dovede u liniju sa polugom (3). Taj pokretački moment se prenosi pomoću sajle (9), koja je pričvršćen za nosače na pokretnom segmentu (2) i na polugu (3). Servomotori (5) i (6) rotiraju vretena sa navojem koja pokreću nosače na pokretnom segmentu (2) i poluzi (3) za koje je zakačena sajla (9), bliže ili dalje od ose rotacije (8) u zavisnosti od smera obrtanja. Pokretanje nosača će uticati na aktivnu dužinu poluge (3) i pokretnog segmenta (2), što će uticati na vrednost obrtnog momenta i krutosti u osi rotacije (8). Vreteno koje je pogonjeno servomotorom (5) takođe pomera i klizač za koji je zakačena opruga (7) i utiče na njenu dužinu. Konfiguracija sa manjom krutošću je prikazana na slici 8a, a sa većom krutošću na slici 8b.

Mana ovakve mehaničke realizacije je ta što za kontrolu dva stanja (pozicija i krutost zgloba) zahteva upotrebu tri servo motora. Upotreba tri servo motora znatno utiče na cenu ovakvog sistema. Moguće je napraviti jeftinije rešenje sa samo dva aktuatora gde bi se oba klizača povezala sa sajлом koja prolazi kroz rotacionu osu, ali to bi predstavljalo kompleksniji mehanizam sa značajnijim trenjem [13].

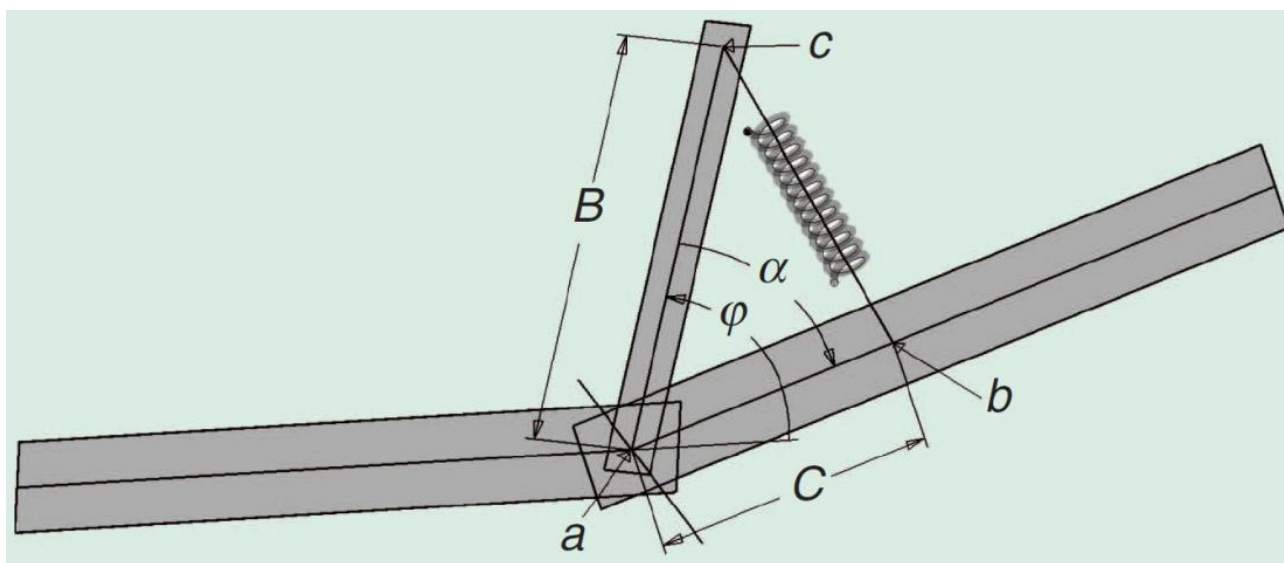


Slika 8. CAD model mehanizma sa podesivom dužinom poluge, za različite vrednosti krutosti. [13] a) Konfiguracija sa manjom krutošću; b) Konfiguracija sa većom krutošću.

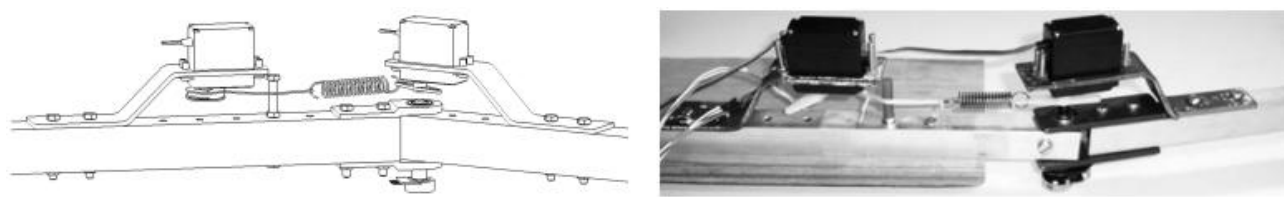
Aktuator mehanički podesive krutosti sa upravljivom ravnotežnom pozicijom

Jedna od realizacija VSA je i aktuator mehanički podesive krutosti sa upravljivom ravnotežnom pozicijom (MACCEPA – engl. *Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator*), čiji je princip rada demonstriran u [13, 61, 62], dok je njegova fizička realizacija predstavljena u [15]. MACCEPA aktuator pokreću tri servomotora od kojih je jedan zadužen za rotaciju zgloba, drugi za podešavanje inicijalne sile u opruzi, dok treći motor kontroliše silu u opruzi, a samim tim i krutost zgloba. Opruga je postavljena između fiksirane tačke na poluzi i sajle koja prolazi kroz drugu polugu i svojim zatezanjem isteže oprugu. Promena krutosti se ostvaruje promenom sile u opruzi. Kao i u prethodnom slučaju, MACCEPA se sastoji od tri segmenta koji rotiraju oko zajedničke ose, i predstavlja unapređenu verziju mehanizma sa podesivom dužinom poluge opisanog u prethodnom odeljku.

Princip rada MACCEPA aktuatora je prikazan na Slika 9. Segment najmanje dužine predstavlja rotirajuću polugu (slično kao na Slika 8. označena brojem 3). Pasivni element (opruga) se nalazi između fiksne tačke na poluzi (b) i sajle koja je zakačena za mehanizam koji utiče na stvaranje sile u opruzi (c). Ugao φ između poluge i segmenta podešava se pomoću servo motora. Kada ugao između poluge i referentnog segmenta (α) nije jednak nuli, usled istežanja opruga će generisati moment koji će težiti da dovede u istu osu polugu i referentni segment. U ravnotežnom stanje ($\alpha = 0$) generisani obrtni moment je jednak nuli. Drugi servomotor kontroliše prednaprezanje u opruzi kontrolišući dužinu sajle između tačaka b i c. Treći servomotor kontroliše krutost (istežanjem opruge) gde zbog geometrije postoji linearna zavisnost između ugla i momenta. Ovakva struktura omogućava nezavisno podešavanje krutosti i pozicije zgloba. Slika 10. ilustruje CAD model i hardversku realizaciju MACCEPA aktuatora.



Slika 9. Ilustracija principa rada MACCEPA-aktuatora [13].

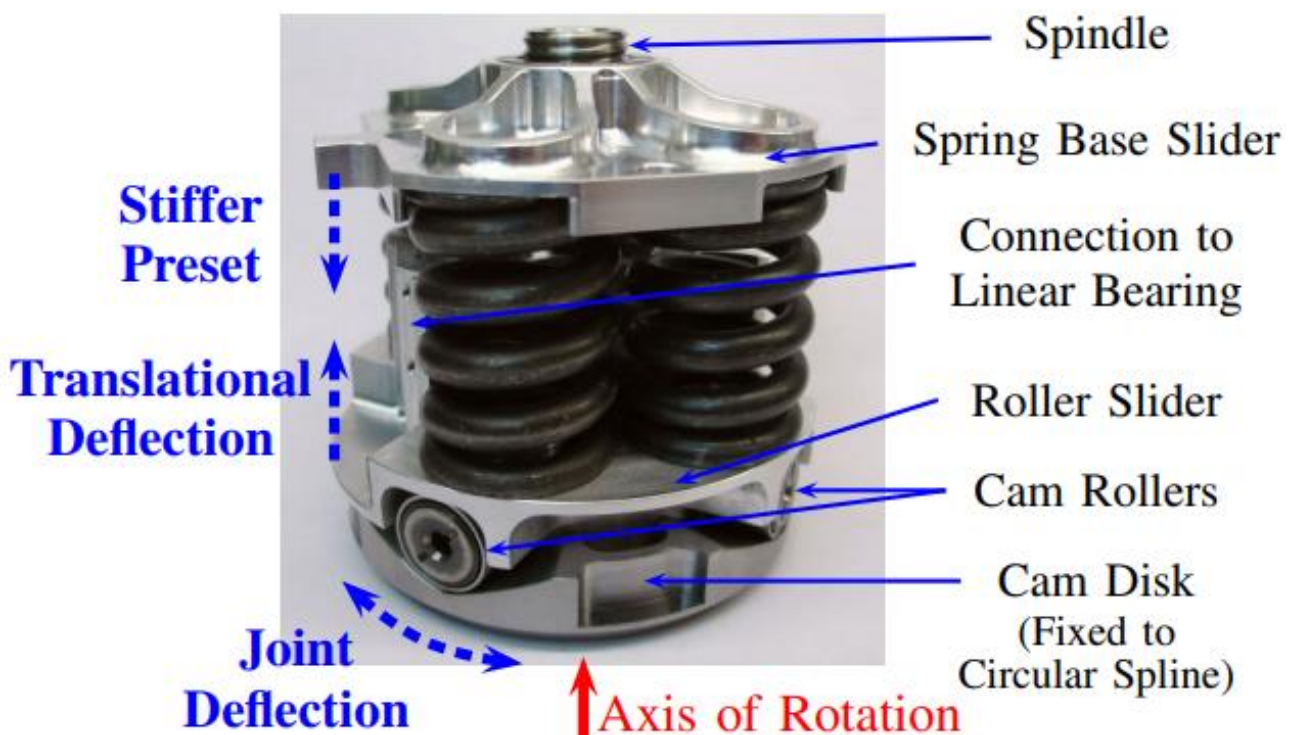


Slika 10. MACCEPA: levo) CAD model; desno) hardverska realizacija [15].

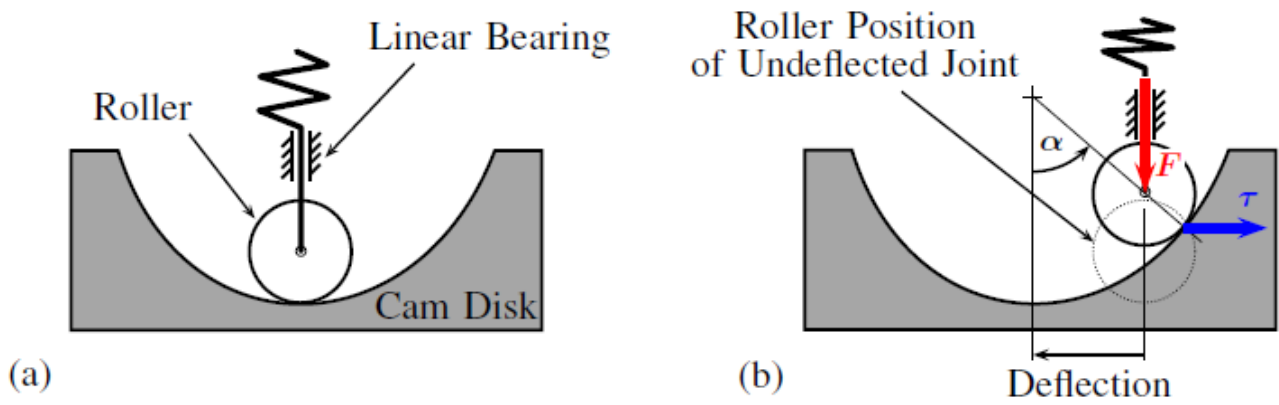
Zglob promenljive krutosti – VS Joint

Zglob sa mehanički kontrolisanom krutošću *VS-Joint* (engl. *Variable Stiffness Joint*) [63], razvijen je u Nemačkom centru za svemirska istraživanja DLR (nem. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*). Ova vrsta aktuatora koristi CAM disk koji je rotirajući ili klizni element u mehaničkom spoju koji se koristi posebno za pretvaranje rotaciono kretanje u linearno ili obrnuto. Prednost CAM diska je ta što se može realizovati da ima proizvoljni oblik.

Na Sliku 11. prikazana je realizacija VS Joint-a. Donji deo mehanizma na slici je CAM disk koji je povezan sa zglobom. Vertikalni položaj osnove opruge određen je vretenom koje pokreće motor za podešavanje krutosti. Kada se vreteno pokreće, ono pomera gornji disk koji sabija ili opušta opruge u zavisnosti od smera okretanja. Ugaoni položaj gornjeg diska se kontroliše posebnim motorom. Srednja ploča predstavlja klizni mehanizam na kojoj se nalaze koturovi koji klizaju po CAM disku. Na prikazanom zglobu, donji disk je napravljen tako da postoji CAM disk na 3 mesta. Za rad ovakvog aktuatora dovoljna je samo jedna opruga, ali zbog simetrije zglob je realizovan sa 3. Princip rada ovog CAM diska je prikazan na Sliku 12. Na Sliku 12. prikazana je ravnotežno stanje kada opruge guraju kotur u najnižu tačku u profilu CAM diska. Kada deluje moment na zglob, doći će do otklona od ravnotežnog stanja i kotur će se pomeriti iz najniže tačke (videti Sliku 12.). To će dovesti do pomeranja srednjeg diska koje pravi pritisak na oprugu, pa samim tim dolazi do sabijanja opruge. Opruga će pritiskati disk sa koturom naniže što će generisati silu u pravcu najniže tačke na CAM disku koja predstavlja ravnotežnu tačku. Promenom pozicije motora, ugao mehanizma krutosti se podešava kao i pozicija u kojoj se obrtni moment ne generiše.



Slika 11. Realizacija zgloba sa promenljivom krutošću—VS Joint [63].

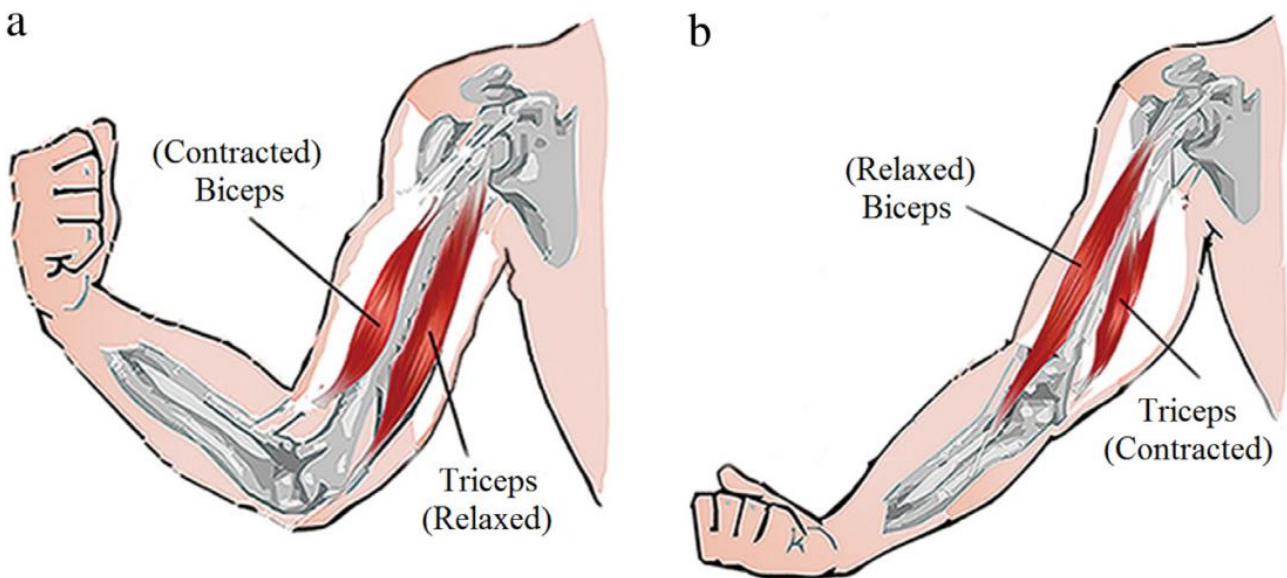


Slika 12. Šematski prikaz principa rada VS Joint-a [63]: a) ravnotežno stanje; b) odklon od ravnotežnog stanja.

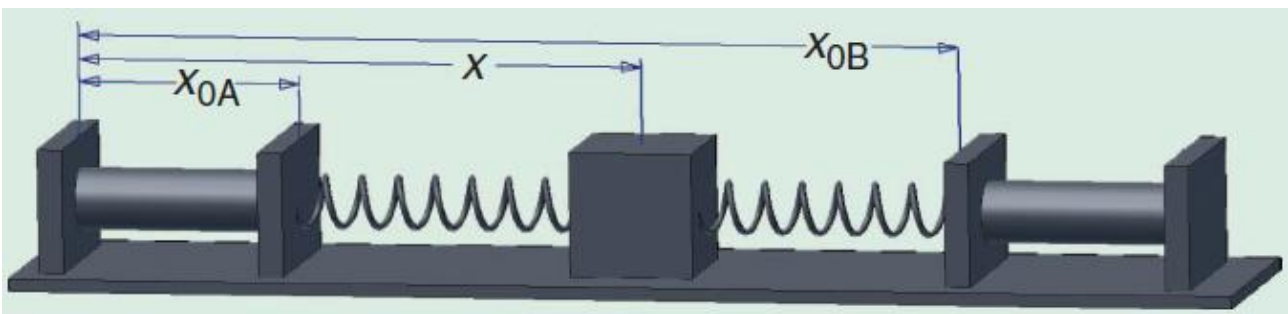
Antagonistički kontrolisana krutost

Antagonistički kontrolisana krutost svoju inspiraciju je pronašla u biološkim sistemima. Najpoznatiji primer antagonističkog principa je lakat ruke, koji se pokreće kontrakcijom mišićnog para biceps-triceps [17, 49, 64]. Ilustracija principa rada antagonizma na primeru bicepsa i tricepsa je prikazan na Slika 13. Kada se biceps kontrahuje, a triceps opusti dolazi do savijanja (fleksije) lakta. U suprotnom slučaju kada se triceps kontrahuje, a biceps opušta tada dolazi do ispružanja (ekstenzije) ruke. Simultanim opuštanjem bicepsa i tricepsa moguće je smanjiti krutost zgloba, dok se simultanom kontrakcijom povećava krutost zgloba. Kod biološki inspirisanog antagonističkog zgloba uočava se da mišići mogu proizvesti samo zateznu silu, tj. nemaju mogućnost da guraju već samo da vuku podlakticu.

Da bi mogla da se obezbedi promenljivost krutosti u mehaničkom zglobu neophodno je da funkcija između pogonskih aktuatora i izlazne osovine bude monotona i nelinearna [13]. To se lako može pokazati kroz linearnu antagonističku postavku prikazanu na Slika 14.



Slika 13. Šematski prikaz antagonističkog principa na primeru ponašanja lakta kod čoveka pri kontrakciji mišića [64]: a) Fleksija-biceps se kontrahuje, a triceps opušta; b) Ekstenzija-biceps se opušta, a triceps kontrahuje.



Slika 14. Grafički model linearne antagonističke postavke [13].

Za postavku prikazanu sa Slika 14. smatramo da je simetrična (da su obe opruge identičnih karakteristika), tako da obe opruge imaju istu karakteristiku krutosti. Za opruge sa linearnom karakteristikom sila F , koje deluje duž x ose se može modelirati superpozicijom sila F_A i F_B koje se razvijaju u oprugama usled istežanja opruga za Δ_A i Δ_B kao

$$F = -F_A + F_B, \quad (8)$$

$$F_A = k\Delta_A, \quad (9)$$

$$F_B = k\Delta_B, \quad (10)$$

$$\Delta_A = x - x_{0A}, \quad (11)$$

$$\Delta_B = x_{0B} - x,$$

$$F = -2kx + k(x_{0A} + x_{0B}), \quad (12)$$

gde x , x_{0A} i x_{0B} predstavljaју pozicije antagonističkog aktuatora i njegovih pogona. Translaciona krutost k_{lin} se definiše kao izvod sile po poziciji aktuatora

$$k_{lin} = \frac{dF}{dx} = -2k. \quad (13)$$

Za nelinearnu karakteristiku opruga, gde se sile u oprugama može modelirati u opštem slučaju kao polinom n -tog reda [65] kao

$$F_A = \sum_{i=1}^n k_i \Delta_A^i, \quad (14)$$

$$F_B = \sum_{i=1}^n k_i \Delta_B^i, \quad (15)$$

gde $i = 1 \dots n$, n je red polinoma, a k_i označava koeficijent opruge koja ide uz polinom i -og reda. Tada će krutost k_{poly} za polinomsku reprezentaciju sile biti

$$k_{poly} = \frac{dF}{dx} = \frac{d(-F_A + F_B)}{dx} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{k_i i}{2^{i-1}} (x_{0B} - x_{0A})^{i-1}. \quad (16)$$

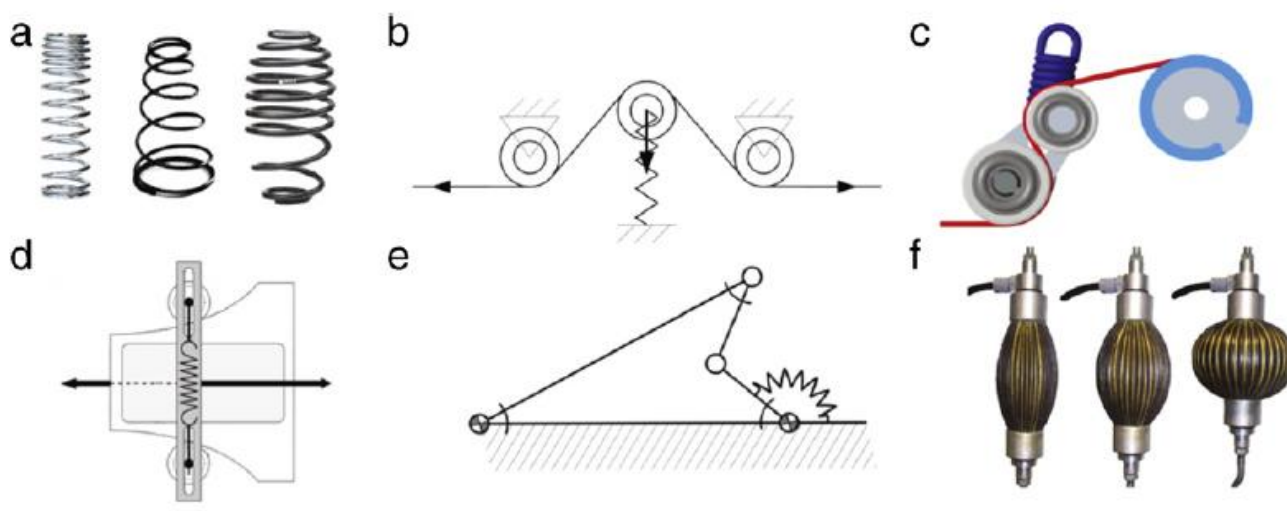
Izlazna pozicija aktuatora (x) se računa za ravnotežno stanje kada nema eksterne sile koja deluje. Tada su zatezne sile F_A i F_B u ravnotežnom stanju jednake. Bez obzira na karakteristiku opruga, ako je sistem simetričan (dve identične opruge), izlazna pozicija aktuatora se dobija izjednačavanjem izraza za izduženje obe opruge $\Delta_A = \Delta_B$, pa odatle sledi

$$x = \frac{x_{0A} + x_{0B}}{2}. \quad (17)$$

Kada se posmatra upravljanje pozicijom x i krutošću zgloba k_{lin} pomoću pozicija pokretačkih aktuatora x_{0A} i x_{0B} , na osnovu jednačina (13) i (17) se zaključuje da je moguće upravljati pozicijom aktuatora x , ali ne i njegovom krutošću k_{lin} koja je konstantna i zavisi od koeficijenta krutosti opruga k . Sa druge strane, kada postoje nelinearni model sile u oprugama, krutost k_{poly} postaje zavisna od pozicija kojima se upravlja, tako da jednačine (16) i (17) čine sistem sa dva ulaza i dva izlaza, pa je moguće simultano kontrolisati poziciju i krutost aktuatora.

Nelinearnost u prenosu je moguće ostvariti na dva načina:

- 1) Upotrebom opruga sa nelinearnom karakteristikom [49, 65, 66];
- 2) Upotrebom linearnih opruga sa nelinearnim prenosnim mehanizmom [12] prikazanih na Slika 15. :
 - a) trougaoni mehanizam (engl. *triangle mechanism*) [67],
 - b) prilagođeni trougaoni mehanizam (engl. *adapted triangle mechanism*) [68],
 - c) nelinearni mehanizam sa linearnom oprugom [17],
 - d) mehanizam sa 4 poluge [66], i
 - e) pneumatski mišići [69].



Slika 15. Primeri nelinearnih prenosa u mehanizmima antagonističkih aktuatora [12]: a) opruge sa nelinearnom karakteristikom; (b) trougaoni mehanizam; (c) adaptivni trougaoni mehanizam; (d) CAM mehanizam sa linearnom oprugom; (e) mehanizam sa 4 poluge; (f) pneumatski mišići.

Nelinearne opruge

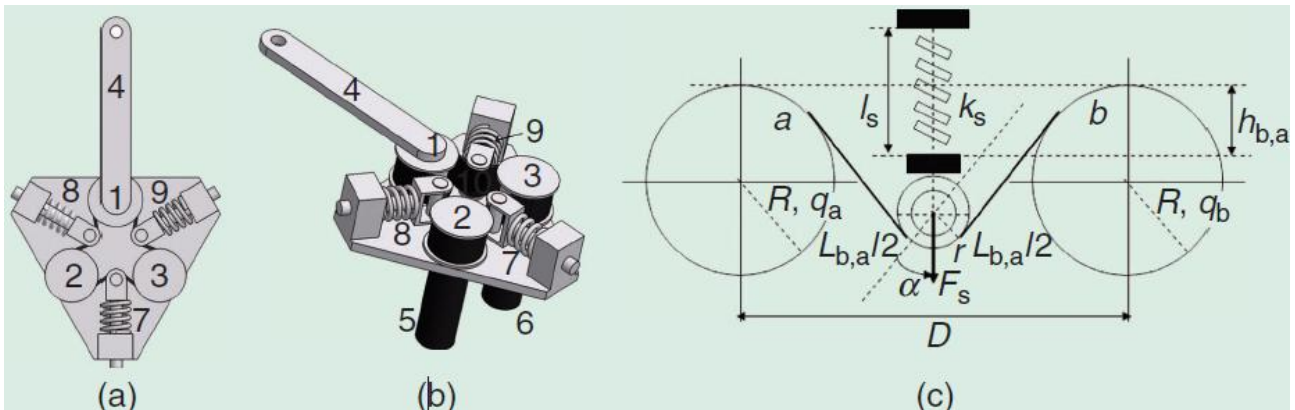
Mehanički najjednostavniji način da se ostvari nelinearnost u antagonističkim aktuatorima je upotreba nelinearnih opruga. Karakteristika opruga koje su izrađene kao kvadratne [65] ili eksponencijalne [70] matematički su najlakše za modeliranje i projektovanje upravljanja, mada mogu da imaju u drugačiju nelinearnu karakteristiku [49]. Mana upotreba opruga je što dolazi do zamora materijala i vremenom njihova karakteristika se menja, pa samim tim i simetričnost koja postoji u sistemu je narušena. Takođe, nije lako napraviti opruge da imaju identične nelinearne karakteristike i zato imaju određena odstupanja od željene karakteristike.

Trougaoni mehanizmi

Antagonistički aktuator zasnovan na trougaonom mehanizmu koristi linearne opruge, ali pomoću svoje mehaničke konstrukcije ostvaruje nelinearnu karakteristiku između pomeraja i sile [13, 67].

Na Slika 16. je prikazan CAD model aktuatora i mehanizam koji ostvaruje nelinearnost. Na Slika 16. a i Slika 16. b brojevima su označeni delovi mehanizma: sa (1) izlazna osovina aktuatora; sa (2) i (3) osovine servo motora (5) i (6) koji pogone aktuator; sa (10) je označen zupčasti kaiš koji je obmotan oko (1), (2); i (3); sa (4) je označena poluga pričvršćena na izlaznu osovinu aktuatora (1) (oponaša segment robota); sa (7) je označena opruga koja osigurava zategnutost zupčastog kaiša; sa (8) i (9) su označene linearne opruge između kojih je osovina aktuatora čiju krutost regulišu.

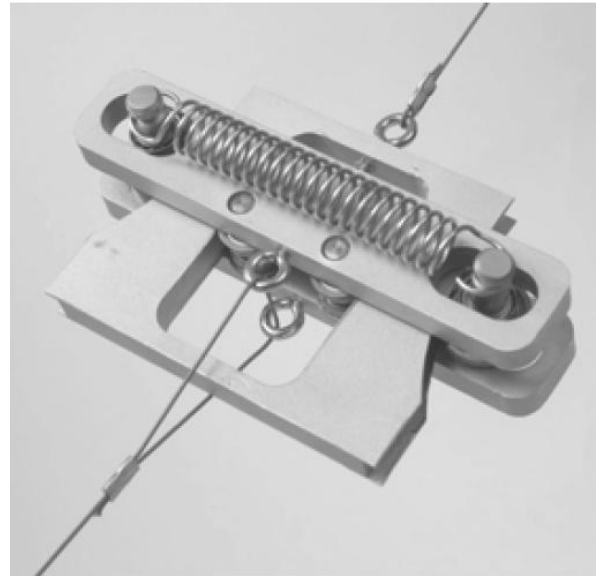
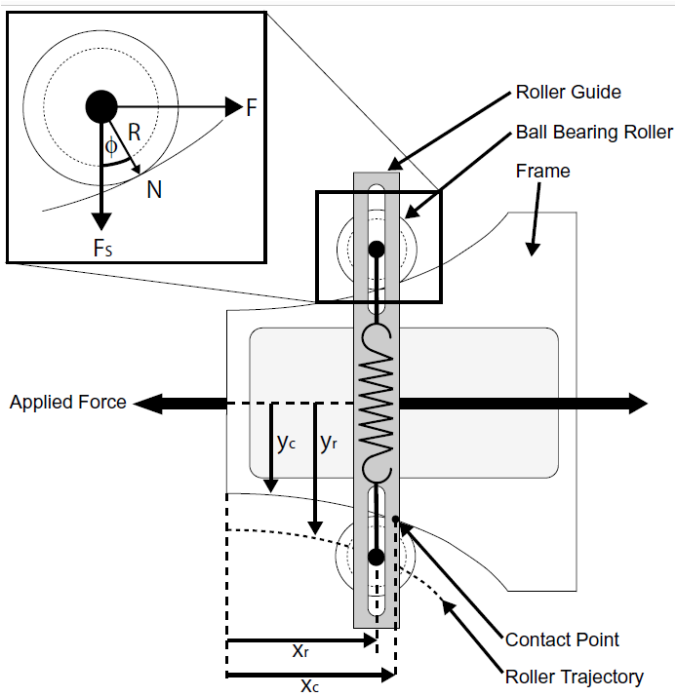
Rotiranjem obe osovine servo motora simultano u smeru kazaljke na satu ili u smeru suprotnom od kazaljke na satu, osovina aktuatora će se rotirati. Ako se osovina (2) okreće u smeru kazaljke na satu, a osovina (3) u smer kontra od skazaljke na satu, smanjiće se pritisak na opruge 8 i 9, a samim tim smanjiće se krutost izlazne osovine. U suprotnom, povećaće se pritisak na opruge i krutost izlazne osovine aktuatora. Mehanizam koji obezbeđuje nelinearnost u prenosu je prikazan na Slika 16. c i može da predstavlja bilo koji od parova (1); i (2) ili (1); i (3). Prilikom rotiranja osovine aktuatora, zateže se zupčasti kaiš između osovine aktuatora i izlazne osovine, čime se zateže zupčasti kaiš koji pritiska oprugu. Dužina linearne opruge (a samim tim i sile koja je proporcionalna dužini opruge) je nelinearna funkcija dužine zupčastog kaiša između osovine aktuatora i osovine motora. Jedna varijacija trougaonog mehanizma je korišćena u realizaciji humanoidnog robota Kojiro-a [71].



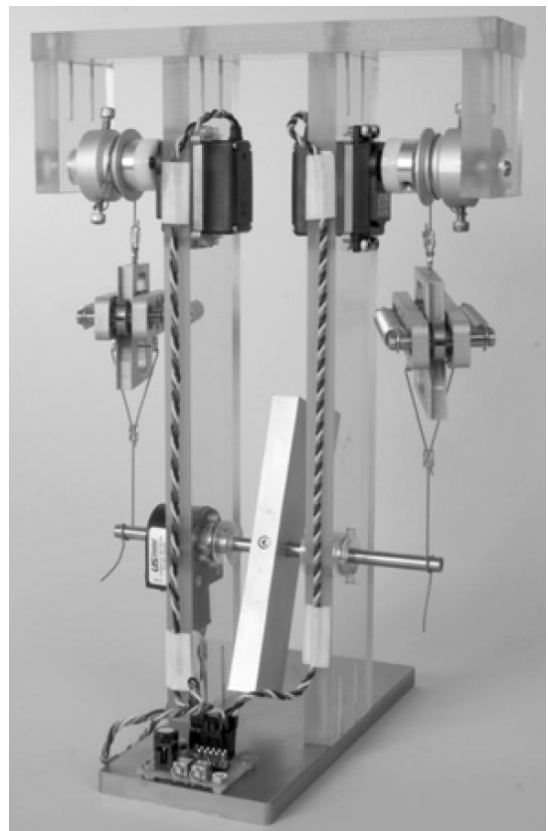
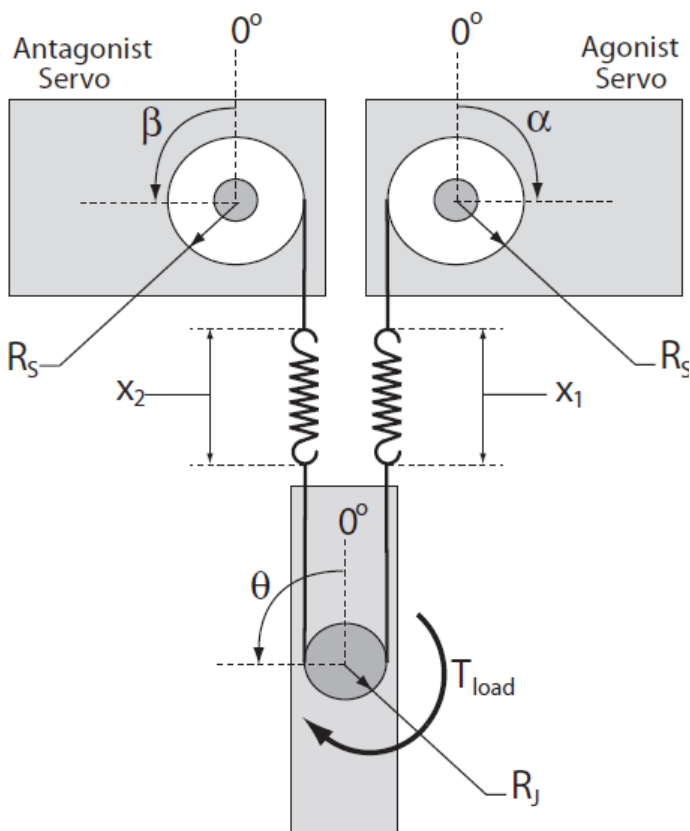
Slika 16. VSA aktuator sa trougaonim mehanizmom [13]: (a) i (b) CAD model aktuatora iz dva ugla; c) mehanizam koji ostvaruje nelinearnu karakteristiku sila/izduženje.

CAM mehanizam sa linearnom oprugom

Nelinearnost je moguće ostvariti korišćenjem CAM mehanizama sa linearnom oprugom [17], kao što je prikazano na Slika 17. Mehanizam se sastoji iz dva mehanička dela. Na jednom delu se nalaze dva kotura na koje je zakačena opruga sa linearnom karakteristikom. Drugi deo je oblikovan tako da njegove ivice odgovaraju željenoj karakteristici nelinearnog mehanizma (npr. kvadratna ili eksponencijalna karakteristika) i nalazi se između kotura prvog mehaničkog dela. Po oblikovanim ivicama koturi za koje je opruga zakačena se kotrljaju i na taj način se postiže da za istežanje sajle na koju su pričvršćena dva mehanička dela ima nelinearnu karakteristiku istežanja opruge, tj. postiže se nelinearna zavisnost istežanja sajle i sile koja se proizvodi. Na Slika 18. prikazana je antagonistička postavka za sistem pogonjen aktuatorima sa nelinearnih mehanizama sa linearnim oprugama. Ovakvim pristupom, moguće je jednostavno ostvariti željenu nelinearnu zavisnost između sile i istežanja sajle i na taj način funkciju krutosti izlazne osovine aktuatora. Mana ovakvog sistema je njegova glomaznost, kompleksna realizacija, kao i trenje koje se javlja u nelinearnom mehanizmu.



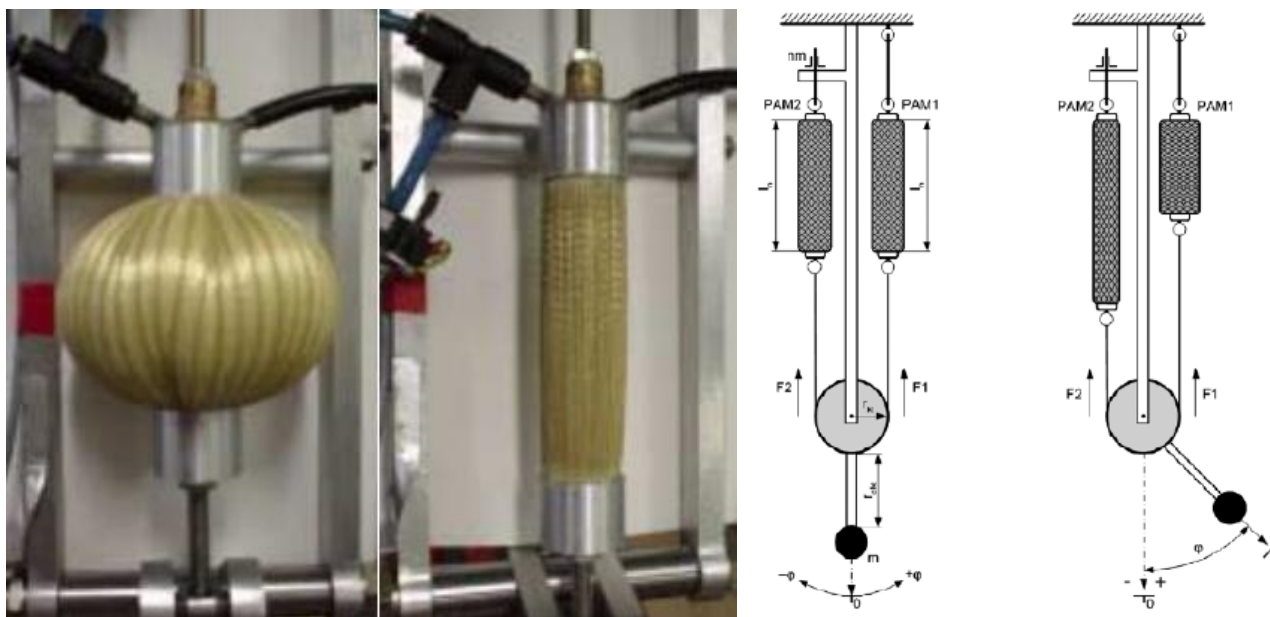
Slika 17. Princip rada nelinearnog mehanizma sa linearnim oprugama [17]: Kada deluje sila, koturi za koje je pričvršćena opruga se kotrljaju po mehanizmu koji dovodi do istezanja opruge i generisanje sile: levo) model mehanizma; desno) hardverska realizacija mehanizma.



Slika 18. Realizacija antagonističke konfiguracije sa nelinearni mehaničkim sistemom sa linearnim oprugama [17]: levo) model mehanizma; desno) hardverska realizacija mehanizma.

Pneumatski veštački mišići

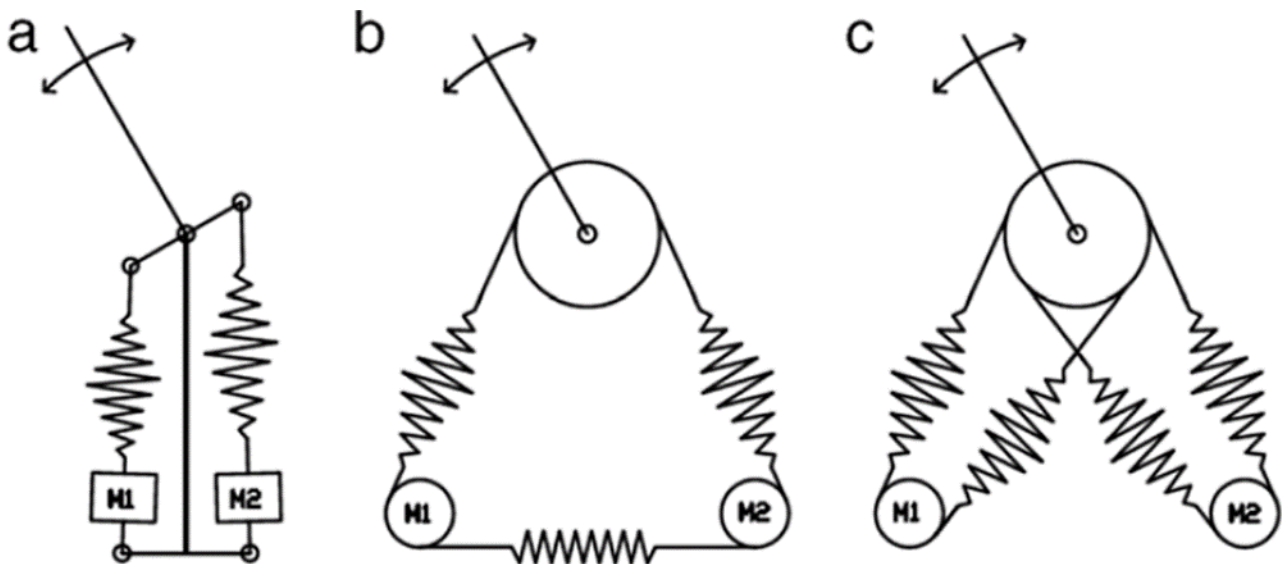
Kod antagonističkih aktuatora, kao zamena za SEA mogu se koristiti pneumatski veštački mišići (PAM – engl. *Pneumatic Artificial Muscle*). Kada su pod pritiskom, PAM se po dužini kontrahuju (grče) a po širini šire, kao pravi mišići. Stišljivost vazduha čini PAM popustljivim (elastičnim), odnosno da se ponaša kao opruga. PAM je aktuator sa visokim odnosom snage i mase i može biti direktno prikačen na izlaznu osovinu bez dodatnih reduktora koji bi sistem učinili kompleksnijim. Nedostaci PAM aktuatora je histerezis koji se javlja usled trenja i predstavlja problem za razvoj upravljačkog algoritma. Drugi veliki problem je veliki prag pritiska (minimalni pritisak), koji je potrebno generisati pre nego što se generiše sila. Najpoznatiji veštački mišić je McKibben mišić [72], a razvijena je i novija verzija PAM aktuatora PPAM (engl. *pleated PAM*) [73], koja ima manji histerezis i manji radni prag pritiska. Na Slika 19. je dat prikaz PAM aktuatora pod pritiskom i u opuštenom stanju, kao i princip rada antagonističke konfiguracije sa PAM aktuatorima. Pneumatski mišići su našli primenu različitim oblastima [74] kao što su industrijske aplikacije, medicinske aplikacije ili biološki inspirisani roboti.



Slika 19. PAM aktuator: Levo: Izgled veštačkog mišića pod pritiskom i u opušenom stanju [75]; Desno: princip rada antagonističke konfiguracije sa PAM aktuatorima [76].

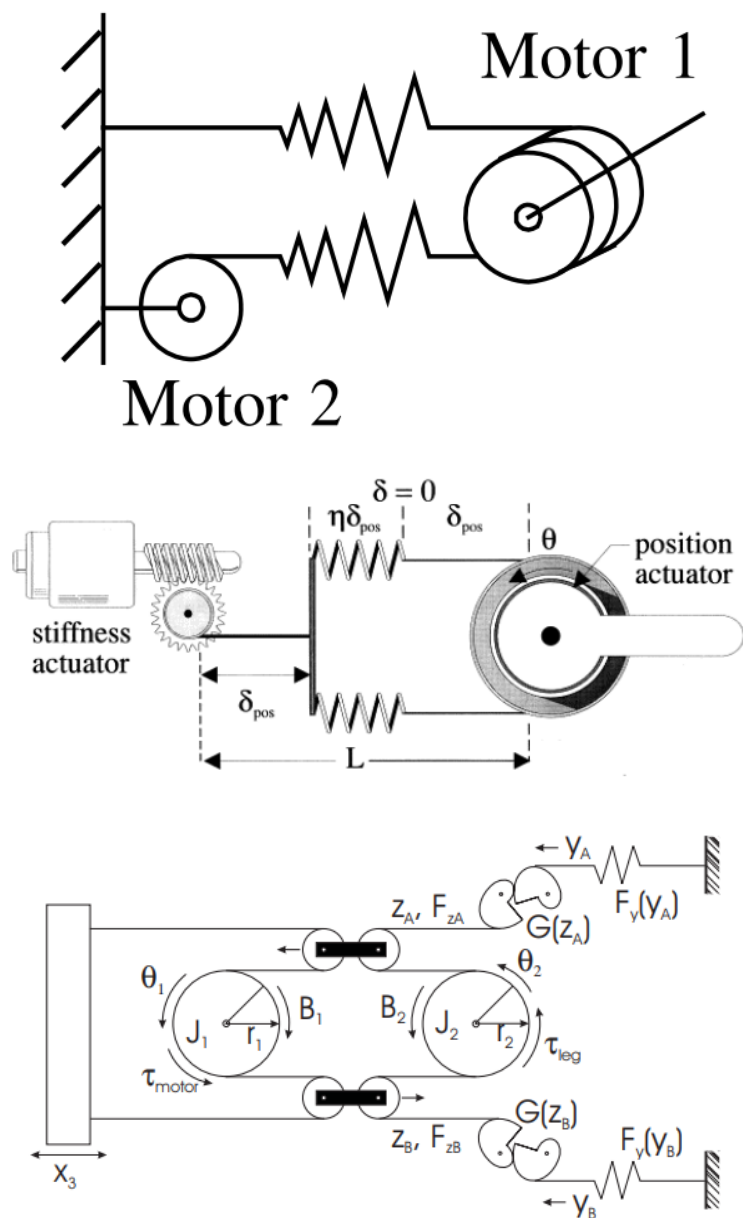
Realizacije antagonističkih konfiguracija

U praksi se susreću tri vrste antagonističkih konfiguracija [12], a koje su prikazane na Slika 20. . Unidirekciona konfiguracija (Slika 20.) je konfiguracija u kojoj aktuatori mogu da proizvode samo zateznu silu, tj. da mogu samo da vuku ka sebi osovinu i nemogu da proizvedu silu koja bi pogurala osovinu od aktuatora. Primer ovakve konfiguracije se može naći u [65, 77]. Uparena ili kuplovana konfiguracija (Slika 20.) u odnosu na unidirekcionu ima dodatnu elastičnu oprugu ugrađenu između pogonskih aktuatora [67, 71], koja obezbeđuje minimalno prednaprezanje u oprugama da se podesi nominalni radni režim. Kod bidirekcionne konfiguracije (Slika 20.) između motora (M1 i M2) i izlazne osovine nalaze se po dva elastična elementa. Ovakva konfiguracija omogućava da motor ima funkciju zatezanja osovine u oba smera koju ostvaruje sa dodatnom oprugom u zavisnosti od toga na koju stranu se motor okreće. [49, 78]. Prednost koju donosi bidirekciona konfiguracija je što omogućava da oba aktuatora istovremeno deluju na osovinu. Na taj način zajednička snaga oba motora omogućava da se nadmaše performanse koje bi postigao antagonistički aktuator sa unidirekcionom konfiguracijom.



Slika 20. Konfiguracije antagonističkih aktuatora [12]: a) unidirekciona; b) kuplovana; c) bidirekciona.

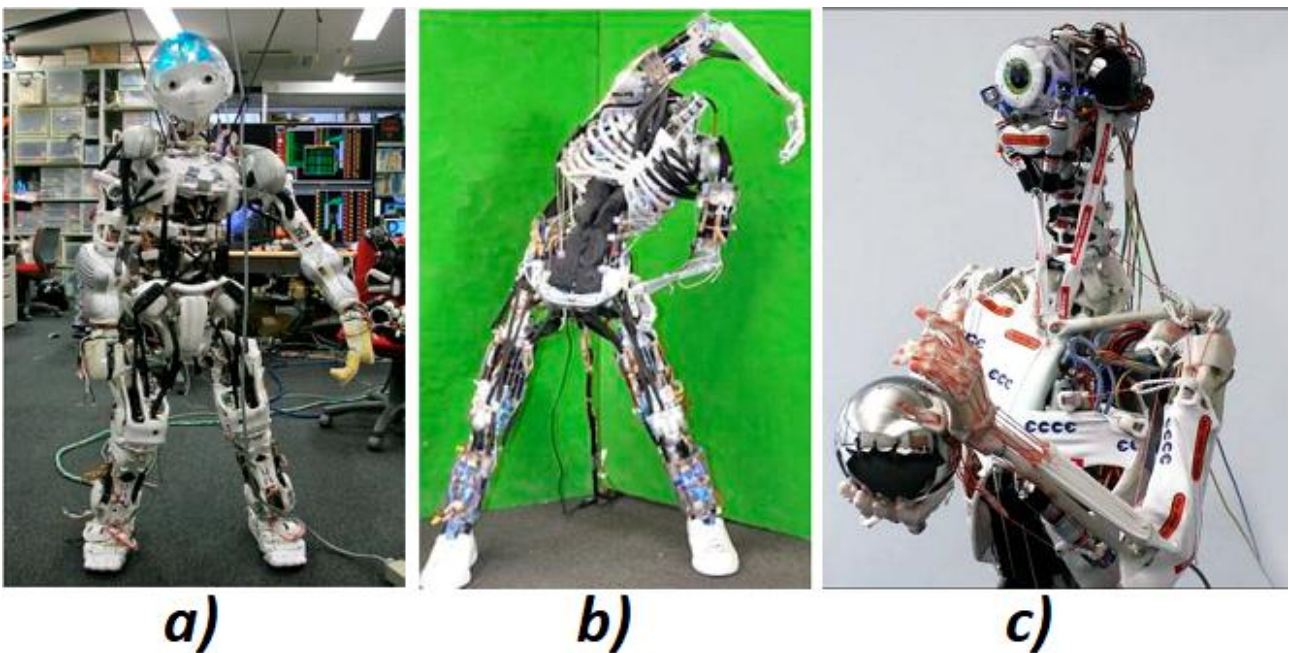
Pored klasičnih konfiguracija, antagonistički aktuatori se mogu realizovati u kvazi antagonističkim formama [12, 79, 80, 81] koje su prikazane na Slika 21. . Kod kvazi antagonističke konfiguracije simetrija je narušena, ali je zadržan princip da dva motora pokreću jedan antagonistički aktuator i da sa obe strane izlazne osovine antagonističkog aktuatora postoje elastični elementi. Pri tome dobija se sistem koji je delimično dekuplovan, tako da jedan motor podešava krutost, a drugi podešava poziciju, dok kod klasične antagonističke strukture oba motora moraju simultano da upravljaju pozicijom i krutošću.



Slika 21. Različite realizacije kvazi antagonističkih akuatora [79, 80, 81].

Žičano pogonjeni aktuatori

Kod popustljivih aktuatora izdvaja se posebna grupa aktuatora: žičano pogonjeni aktuatori (engl. *tendon driven* ili *wire driven*) [65, 82, 83]. Ovakva vrsta aktuatora omogućava da se iz konstrukcije robota izmeste pogonski aktuatori (npr. elektro motori, hidraulički i pneumatski pogoni...). Izmeštanje aktuatora iz ruku u telo robota smanjuje inerciju ruku, koje su tada lakše i zahtevaju manje energije za upravljanje, ali elastični elementi izazivaju izraženije oscilacije. Sa druge strane, pored ugrađene pasivne popustljivosti, roboti sa manjom inercijom i masom predstavljaju manji rizik po okolinu i čoveka kod kolaborativnih zadataka. Neki od izazova su da se dizajnira adekvatna strategija upravljanja za ovaj tip aktuatora, uzimajući u obzir njegovu nelinearnost koja potiče od uslova da sistem ima nelinearni prenos tako da se krutost može kontrolisati [13] i da se izbegne gužvanje sajli kroz minimalno prednaprezanje opruga [77]. Postoji nekoliko primera razvoja antropomimetičkih robota (humanoidnih robota koji oponašaju ljudsku strukturu i čija se aktuacija zasniva na žičano pogonjenim aktuatorima) [84, 85, 86] kao što su ECCEROBOT [87], Kojiro [71, 88] ili Kenshiro [21] prikazani na Slika 22.



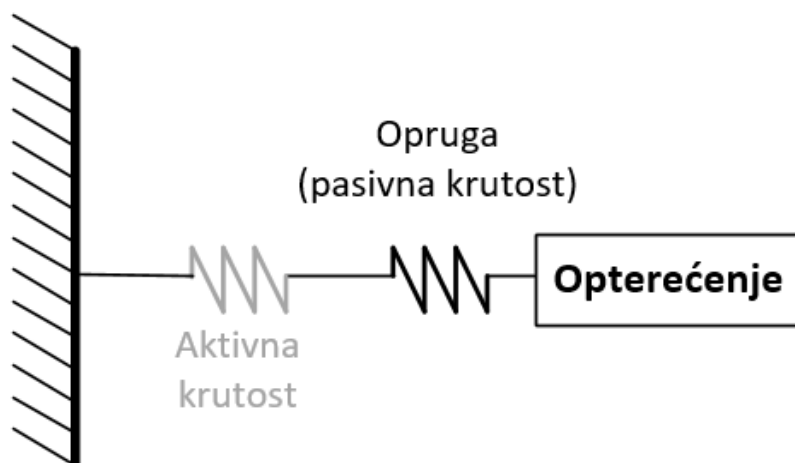
Slika 22. Prototipovi žičano pogonjenih humanoidnih robota [86]: a) Kojiro; b) Kenshiro; c) ECCEROBOT.

2.1.3 Kombinacija aktivne i pasivne krutosti

Kombinacija aktivne i pasivne popustljivosti omogućava da se iskoriste prednosti oba pristupa pri oblikovanju impedanse ili samo krutosti zglobova ili završnog uređaja robota. Pasivna popustljivost obezbeđuje bezbednu interakciju i zaštitu krutih mehaničkih delova u slučaju nagle promene eksterne sile interakcije, dok aktivna popustljivost doprinosi ostvarivanju popustljivosti što ima veliki doprinos kod oblikovanja krutosti završnog uređaja robota. Primer kombinovanja aktivne i pasivne krutosti prikazan je u [89, 90]. Kombinacija aktivne i pasivne popustljivosti se može predstaviti kao postojanje dve opruge između aktuatora i segmenta robota gde su opruge vezane na red. Na Slika 23. je prikazana ilustracija kombinacije aktivne i pasivne popustljivosti. Aktivna popustljivost se ponaša kao virtuelna opruga, dok pasivna popustljivost predstavlja oprugu koja fizički postoji u sistemu. Za kombinaciju aktivne krutosti (k_a) i pasivne krutosti (krutost opruge k_p), rezultujuća krutost k_r je data kao

$$\frac{1}{k_r} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_p}. \quad (18)$$

Na osnovu izraza (18), uočava se da je rezultujuća krutost uvek manja od pojedinačnih krutosti aktivne i pasivne popustljivosti $k_r < \min(k_a, k_p)$.



Slika 23. Ilustracija kombinacije aktivne pasivne popustljivosti.

2.2 Krutost završnog uređaja robota

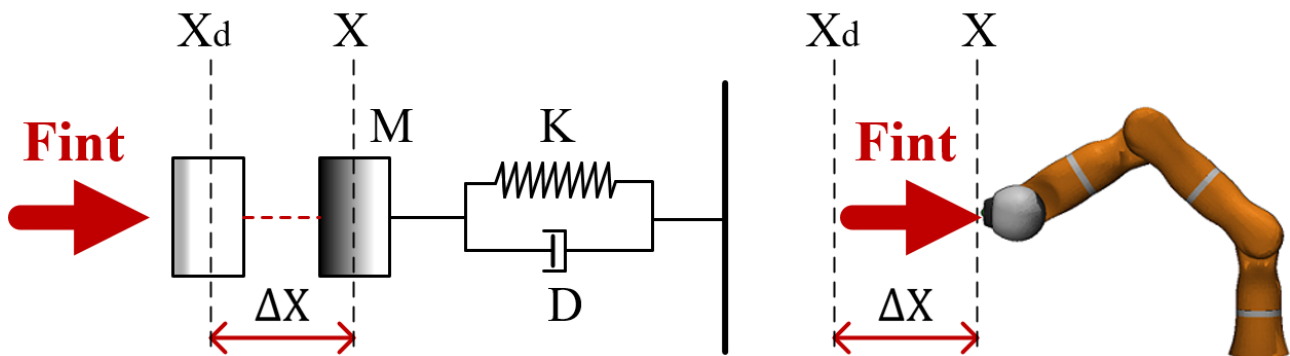
U poglavlju 2.1 predstavljena je i analizirana krutost na nivou jednog zgloba (jednog aktuatora), dok se u ovom poglavlju analizira uticaj krutosti pojedinačnih zglobova, kao i kinematičke konfiguracije redundantnih robota na krutost završnog uređaja. Krutost završnog uređaja igra glavnu ulogu u ostvarivanju bezbedne fizičke interakcije robota sa njegovom okolinom. Kao i na nivo jednog zgloba, popustljivost predstavlja inverznu vrednost krutosti koja se u slučaju krutost završnog uređaja računa kao inverzna matrica. Identična je situacija sa terminologijom u literaturi koja nije jedinstvena, tako da se upotrebljavaju termini krutost, popustljivost ili impedansa.

Krutost završnog uređaja prikazuje se u Dekartovom koordinatnom sistemu (Kartezijanska krutost) koji je vezan za neku referentnu tačku, najčešće bazu robota. U opštem slučaju sastoji se od 3 translacije, 3 rotacije i međusobno kuplovanih elemenata (simetrična matrica 6×6 sa ukupno 21 različitim elementom) Krutost završnog uređaja može se analizirati kroz matični oblik [24, 31], ili kroz grafičke interpretacije [54, 91]. Analizirano je ostvarivanje krutosti na sledeća tri načina:

- 1) primenom aktivne krutosti;
- 2) primenom pasivne krutosti;
- 3) kombinacija aktivne i pasivne krutosti.

2.2.1 Aktivna krutost završnog uređaja

Prvi koraci ka bezbednoj interakciji robota sa okolinom realizovani su kroz impedansno upravljanje tako da se završni uređaj robota ponaša kao zadata mehanička impedansa koja se sastoji od tri komponente: inercije (masa) M , prigušenja D i krutosti K (engl. *mass-spring-damper system*) [38, 39, 40]. Ponašanje završnog uređaja kao mehaničke impedanse ilustrovano je na Slika 24. gde je željeno ponašanje završnog uređaja ekvivalentno ponašanju mehaničke impedanse za svaku od osa translacije (x , y i z). Osim same krutosti K koje definiše stacionarno stanje završnog uređaja kada deluje sila/moment, moguće je kontrolisati ostale parametre impedanse inerciju (masa) M i prigušenje D koji utiču na dinamičke karakteristike.



Slika 24. Ilustracija impedansnog upravljanja. Robot na koji se primenjuje impedansno upravljanje se ponaša kao mehanički sistem koji se sastoji od inercije (masa M), prigušnice (prigušenje D) i opruge (krutost K) (engl. *mass-spring-damper system*).

2.2.2 Pasivna krutost završnog uređaja

Pored aktivne popustljivosti koja se ostvaruje kroz upravljačku petlju, postoji i pasivna popustljivost koja je realizovana kroz elastične elemente koji su ugrađeni u prenosnom sistemu robota između aktuatora i segmenta robota.

Lokalna statička karakteristika krutosti zglobova robota se definiše kao negativni izvod momenta po uglu [24, 31]

$$K_j = -\frac{\partial \tau}{\partial q}, \quad (19)$$

gde je K_j matrica krutosti zglobova, τ je vektor momenata koji se razvijaju na zglobovima, a q je vektor pozicija zglobova. Kako važi veza između jakobijan matrice $J(q)$, eksterne sile F_{ekst} koja deluje na završni uređaj robota i momenta u zglobovima $\tau = J(q)^T F_{ekst}$, a vektor sile je proporcionalan matrici krutosti završnog uređaja K_C i otklona iz ravnotežnog položaja Δx nastalog usled eksterne sile $F_{ekst} = K_C \Delta x$, tako da izraz (19) postaje

$$K_j = -\frac{\partial (J(q)^T K_C \Delta x)}{\partial q} = J(q)^T K_C J(q) - \frac{\partial J(q)^T}{\partial q} K_C \Delta x, \quad (20)$$

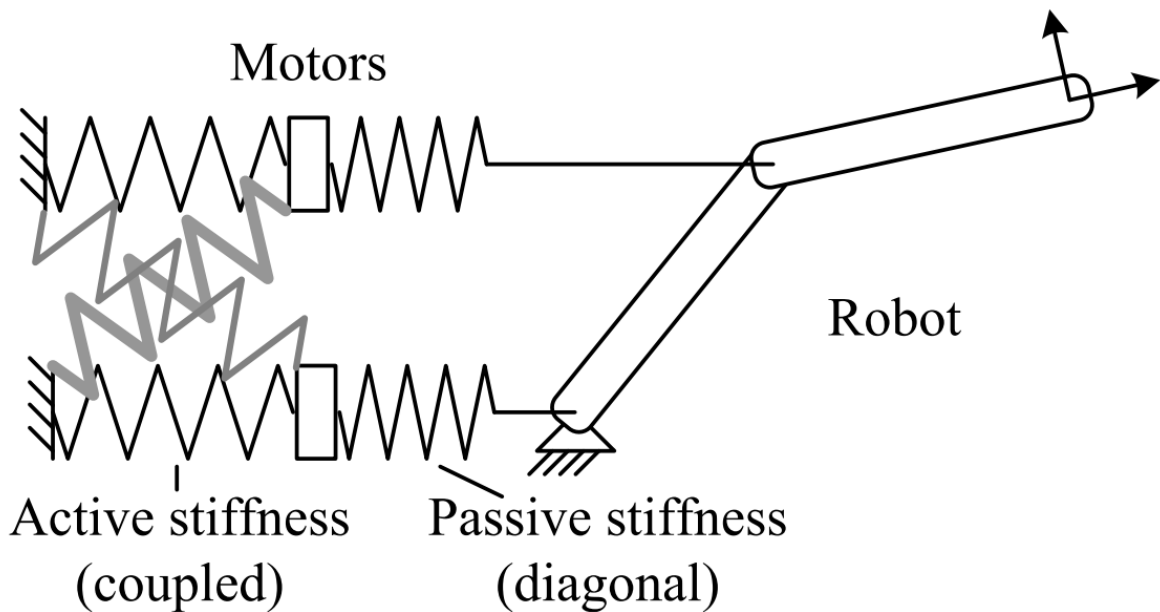
gde je $\partial \Delta x / \partial q = J(q)$. Kada nema otklona od ravnotežnog stanja $\Delta x = 0$, tako da izraz (20) postaje

$$K_j = J(q)^T K_C J(q). \quad (21)$$

Matrica pasivne krutosti zglobova (K_j) može i da ima nedijagonalnu strukturu sa van dijagonalnim elementima kada se koriste biartikulisani aktuatori [92, 93], gde jedan aktuator pogoni više od jednog segmenta robota, a koji su mehanički veoma komplikovani za realizaciju. U ovoj tezi fokus je na uniartikulisane aktuatore.

2.2.3 Kombinacija aktivne i pasivne krutost završnog uređaja

U prethodnom delu pojašnjene su prednosti i mane aktivne i pasivne popustljivosti. Kombinovanje aktivne i pasivne popustljivosti omogućava da se iz oba pristupa izvuče ono najbolje. Na slici Slika 25. je ilustrovan uticaj aktivne i pasivne popustljivosti na ponašanje završnog uređaja robota. Pasivna popustljivost završnog uređaja robota predstavljena je sa po jednom oprugom između aktuatora i upravljano segmenta robot za svaki par aktuator-segment tako da matrica pasivne krutosti K_P (kao i matrica pasivne popustljivosti C_P) ima dijagonalni oblik. Aktivna krutost se može predstaviti pomoću virtuelnih opruga tako da postoji po jedna opruga između svakog aktuatora i svakog segmenta tako da matrica aktivne krutosti K_A (kao i matrica aktivne popustljivosti C_A) može imati proizvoljni oblik koji ne mora biti dijagonalan.



Slika 25. Ilustracija kombinovanja aktivne i pasivne popustljivosti na ponašanje završnog uređaja robota [31]. Pasivna popustljivost predstavljena je elastičnom oprugom između segmenta robota i odgovarajućeg aktuatora. Aktivna je predstavljena virtuelnim oprugama koje su posledica upravljanja tako da postoji po jedna virtuelna opruga između svakog aktuatora i svakog segmenta.

Rezultujuća matrice krutost K_R i popustljivost C_R završnog uređaja opisuju se kao

$$C_R = C_A + C_P, \quad (22)$$

$$K_R^{-1} = K_A^{-1} + K_P^{-1}. \quad (23)$$

2.2.4 Grafička reprezentacija krutosti

Za robote sa krutim zglobovima postoje grafičke metode za prezentaciju elipse/elipsoida i politopa manipulabilnosti i sile [94, 95] koje omogućavaju analizi performansi. Za robote koji imaju bilo aktivnu ili pasivnu popustljivost, moguće je sprovesti određene analize koje se tiču performansi robota i krutosti završnog uređaja [54, 91, 96]. Generalno, elipsoidi daju jednu vrstu aproksimacija koliko i u kom pravcu robot može da razvije krutost, silu ili kolika mu je manipulabilnost. Evaluacija mogućnosti sile/pokreta nekog manipulatora je koristan alat u fazi dizajniranja kao i u operativnoj fazi.

Kod pasivne krutosti mogu se koristiti za analizu i oblikovanje matrice krutosti koja može da se predstavi preko elipsoida [96]. Elipsoidi i politopi imaju veliku primenu u analizi i dizajnu matrica krutosti kod aktivne popustljivosti, gde se kod kinematički redundantnih robota mogu koristiti da se maksimizira radni prostor [54, 91], a da pri tome aktuatori ne budu u zasićenju i željeno ponašanje ne bude narušeno. Takođe osim samih elipsoida i politopa moguće je uvesti i region ostvarive krutosti (SFR – *engl. stiffness feasibility region*) koji predstavlja oblik sa ne-politopskim granicama.

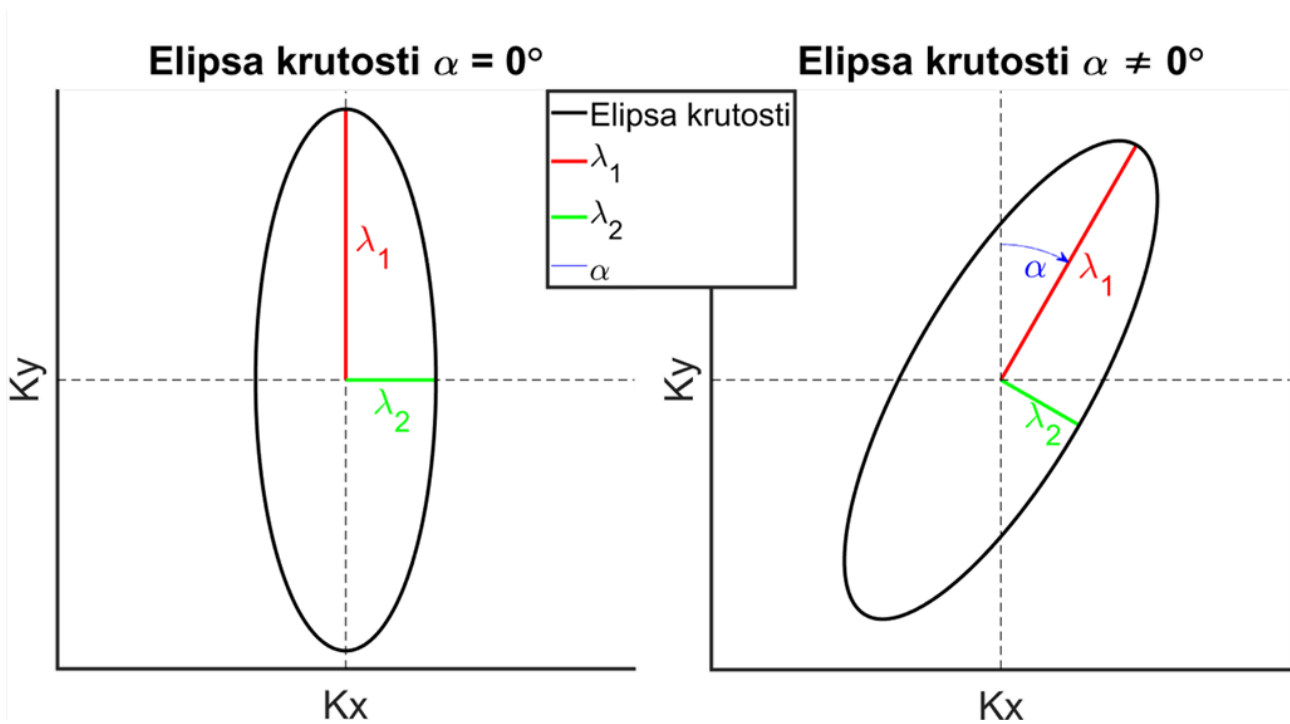
Kod sila interakcije, bez obrtnih momenata, koje deluju na završni uređaj, ulogu igraju samo elementi matrice krutosti koji se odnose na sile odnosno na translatorna kretanja. To je kvadratna matrica koja ima dimenzije 3×3 za trodimenzionalni prostor, ili 2×2 u ravanskom prostoru (2D). Kada je u pitanju trodimenzionalni prostor, matrica krutosti se može predstaviti pomoću elipsoida krutosti, ili u slučaju dvodimenzionalnog prostora pomoću elipse krutosti. Radi intuitivnijeg razumevanja na slici Slika 26. je dat prikaz elipse krutosti. Parametri koji opisuju elipsu krutosti su ose elipse λ_1 i λ_2 (u slučaju elipsoida postoji i λ_3) međusobno normalne, i ugao orijentacije elipse α (u slučaju elipsoida postojaće dodatni ugao orijentacije u odnosu xy ravan). Pravac orijentacije elipse i elipsoida je u pravcu najduže ose elipse ili elipsoida. Na levoj strani na slici Slika 26. prikazana je elipsa kada se ose elipse poklapaju sa osama koordinatnog sistema, dok na desnoj strani je prikazana elipsa koja je ukošena za ugao α . Kada se ose elipse (elipsoida) poklapaju sa osama koordinatnog sistema, tada nema kuplovanih elemenata i matrica krutosti ima dijagonalni oblik.

Dužine osa i ugao orijentacije elipsoida se dobija dekompozicijom matrice (SVD – *engl. singular value decomposition*) [94] krutosti kao

$$K_c = USV^T, \quad (24)$$

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

gde je K_c $n \times n$ simetrična pozitivno definitivna matrica, kolone ortogonalnih matrica U i V predstavljaju sopstvene vektore, a elementi na dijagonali dijagonalne matrice S predstavljaju sopstvene vrednosti. Sopstvene vrednosti matrice S predstavljaju intezitete krutosti duž osa elipse/elipsoida, a vrednosti kolona matrice V predstavljaju sopstvene vektore koji određuju pravac orijentacije elipse/elipsoida.



Slika 26. Elipsa krutosti je definisana dužinama osa λ_1 i λ_2 , kao i uglom rotacije α . Levo: Ose elipse krutosti se poklapaju sa osama koordinatnog sistema. Desno: Pravac u kome je elipsa krutosti usmerena je zarotiran za ugao α .

3 Upravljanje krutošću na nivou završnog uređaja robota

Krutost završnog uređaja u Dekartovom koordinatnom sistemu (*Kartezijanska krutost*), kao i za slučaj krutosti na nivou zgloba, predstavlja sposobnost robota da odreaguje na spoljašnju silu odstupanjem završnog uređaja od ravnotežnog položaja. Kako za nivo zgloba, tako i za završni uređaj terminologija koja opisuje interakciju sa okolinom nije jedinstvena ni usaglašena (*Cartesian compliance, Cartesian stiffness, adjustable compliance...*). Na krutost završnog uređaja može se uticati kroz aktivnu i pasivnu krutost ili njihovom kombinacijom [24, 31]. Aktivna krutost se ostvaruje kroz upravljačku strukturu, dok se pasivna ostvaruje kroz krutosti u zglobovima kroz elastičnosti u prenosnom sistemu i/ili redundansom (promenom konfiguracije robota u redundantnim zadacima), gde će više pojašnjenja biti dato u nastavku.

U ovom poglavlju su predstavljeni algoritmi za aktivnu, pasivnu i kombinaciju aktivne i pasivne krutosti na nivou završnog uređaja. Kao primer aktivne krutosti, prikazan je algoritam za implementaciju impedansnog upravljanja. Analiziran je uticaj krutosti u zglobovima i kinematičke konfiguracije robota na pasivnu krutost završnog uređaja. Kroz dva eksperimenta je prikazan algoritam za oblikvanje krutosti završnog uređaja zasnovan na promeni kinematičke konfiguracije kroz kretanje u nultom prostoru, a koji je implementiran na robotu KUKA LWR. Prikazan je optimizacioni algoritam za oblikovanje elipse krutosti koji kombinuje krutosti u zglobovima i nulti prostor, a koji je implementiran na simulacionom modelu robota KUKA LWR. Na kraju je dat algoritam koji implementira impedansno upravljanje na robot pogonjen sa SEA.

3.1 Aktivna krutost

Prvi koraci ka bezbednoj interakciji robota sa okolinom realizovani su kroz impedansno upravljanje tako da se završni uređaj robota ponaša kao zadata mehanička impedansa koja se sastoji od tri komponente: inercije (masa) M , prigušenja D i krutosti K [38, 39, 40]. Ponašanje završnog uređaja kao mehaničke impedanse ilustrovano je na slici Slika 24.

Dinamika robota opisana je jednačinom

$$H(q)\ddot{q} + C(q)\dot{q} + G(q) = \tau - J(q)^T F_{int}, \quad (26)$$

dok se željeno ponašanje završnog uređaja robota ilustrovano na slici Slika 24. može opisati kao

$$F_{int} = M(\ddot{X}_d - \ddot{X}) + D(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X), \quad (27)$$

gde H , C , G , F_{int} i τ redom označavaju matricu inercije robota, matricu centrifugalnih sila sa Koriolosovim silama (engl. *Coriolis forces*), vektor gravitacionih sila, vektor sile interakcije između robota i okoline i pokretačke momente zglobova robota. Vrednosti matrica inercije M , prigušenja D i krutosti K predstavljaju parametre impedansnog kontrolera koji se zadaju. Vektori pozicija sa odgovarajućim izvodima označeni su sa q , \dot{q} i \ddot{q} za pozicije zglobova; sa X , \dot{X} i \ddot{X} za ostvarene pozicije završnog uređaja; sa X_d , \dot{X}_d i \ddot{X}_d za željene pozicije završnog uređaja. Jakobijan matrica $J(q)$ koja mapira brzine zglobova u vektor brzina završnog uređaja definisana je jednačinom kinematike prvog reda

$$\dot{X} = J(q)\dot{q}. \quad (28)$$

Polazeći od izraza za kinematiku prvog i drugog reda dobijaju se izrazi za inverznu kinematiku (brzine i ubrzanja zglobova) kao

$$J(q)\dot{q} = \dot{X} \Rightarrow \dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X}, \quad (29)$$

$$J(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} = \ddot{X} \Rightarrow \ddot{q} = J^{-1}(q)(\ddot{X} - \dot{J}(q)\dot{q}). \quad (30)$$

Zamenom (29) i (30) u (26) i množenjem obe strane jednakosti sa leve strane izrazom $J(q)^{-T}$ dobija se

$$\Lambda(q)\ddot{X} + \Gamma(q, \dot{q})\dot{X} + \eta(q) = J(q)^{-T}\tau - F_{int}, \quad (31)$$

gde su

$$\Lambda(q) = J(q)^{-T}H(q)J^{-1}(q), \quad (32)$$

$$\Gamma(q, \dot{q}) = J(q)^{-T}C(q, \dot{q})J^{-1}(q) - \Lambda(q)\dot{J}(q)J^{-1}(q), \quad (33)$$

$$\eta(q) = J(q)^{-T}G(q). \quad (34)$$

Kombinujući jednačine (27) i (31) dobija se izraz za vektor željenih obrtnih momenata na zglobovima robota neophodnih za ostvarivanja željene mehaničke impedanse na završnom uređaju robota

$$\tau_d = J(q)^T(\Lambda(q)w(t) + \Gamma(q, \dot{q})\dot{X} + \eta(q) + F_{int}), \quad (35)$$

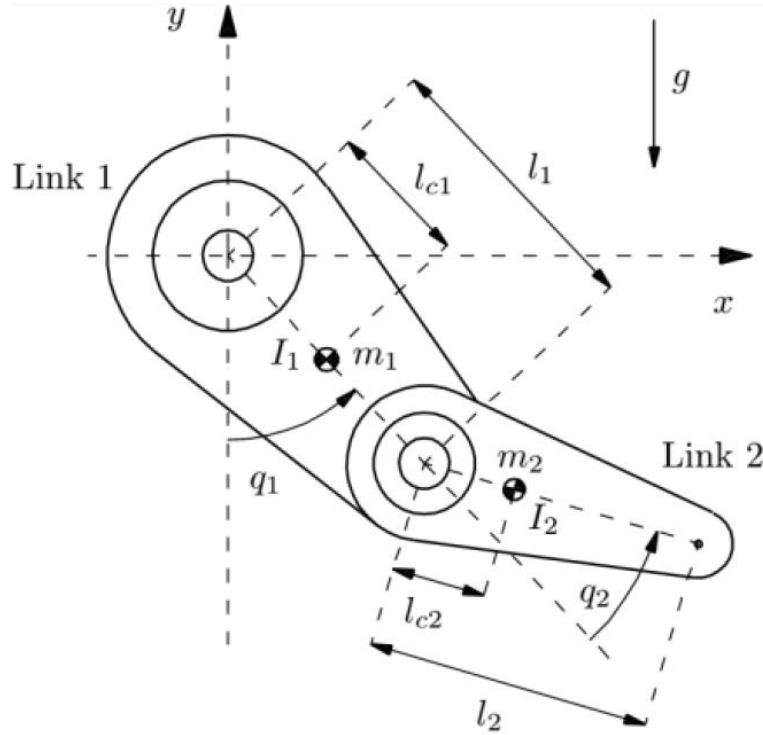
gde je

$$w(t) = \ddot{X}_d + M^{-1}(B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) - F_{int}). \quad (36)$$

Kada merenje sile interakcije nije dostupno, impedansno upravljanje se može primeniti u modifikovanom obliku i eliminisati silu iz upravljačkog algoritma tako što će se „žrtvovati” upravljanje inercijom tako da je $M = \Lambda(q)$. To će dovesti do računanja upravljačkih momenata kao

$$\tau_d = J(q)^T (\Lambda(q)\ddot{X}_d + B(\dot{X}_d - \dot{X}) + K(X_d - X) + \Gamma(q, \dot{q})\dot{X} + \eta(q)). \quad (37)$$

Kod kinematičkih redundantnih konfiguracija robota, primenjivaće se ista procedura kao i kod neredundantnih robota gde će se u jednačinama od (29)– (34) umesto inverzne Jakobijan matrice koristiti pseudo inverzija.



Slika 27. Ilustracija manipulatora sa 2 stepena slobode [97].

Na slici Slika 27. prikazan je model manipulatora sa 2 stepena slobode u „xy“ ravni, a koji je predmet analize. Bez gubljenja opštosti, usvojeno je da su segmenti istih dužina i da je centar masa na sredinama segmenata ($l_1 = l_2 = 1\text{m}$, $m_1 = m_2 = 1\text{kg}$, $l_{c1} = l_{c2} = 0,5\text{m}$). Parametri kontrolera K , B i M su dijagonalne matrice čiji uticaj se analizira u nastavku. Matematički model za 2 stepena slobode se može napisati kao

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

$$H_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_1 + I_2,$$

$$H_{12} = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2,$$

$$H_{21} = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(q_2)) + I_2,$$

$$H_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2,$$

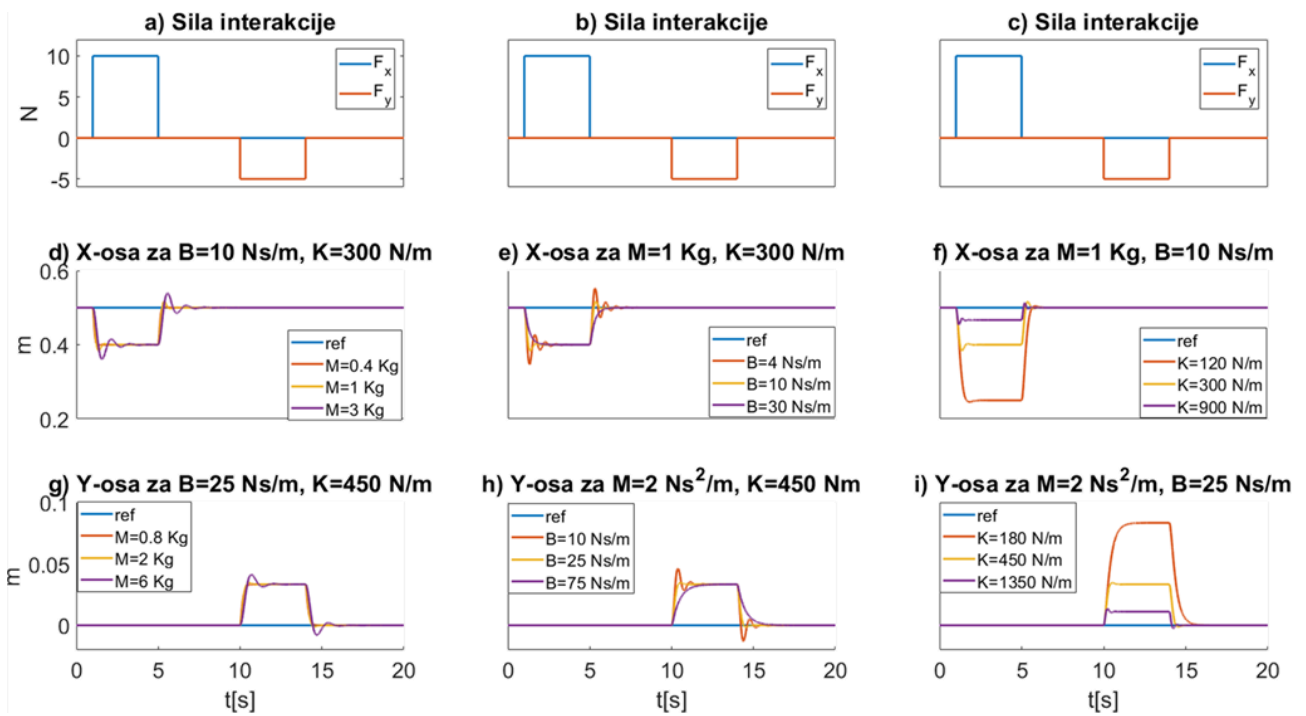
$$C = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (39)$$

$$G = \begin{bmatrix} g(m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \sin(q_1) + g m_2 l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \\ g m_2 l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T, \quad (41)$$

gde I_1 i I_2 predstavljaju inerciju u odnosu na centar mase.

Na slici Slika 28. prikazani su odzivi (položaji završnog uređaja) po x i y osi kada deluje eksterna sila. Sila je modelirana kao dva impulsa, prvo po „ x “, a zatim i po „ y “ osi. Grafici na a), b) i c) predstavljaju vremenski oblik eksterne sile koja je ista za sva tri slučaja. Grafici d) i g) predstavljaju pozicije kada se menja inercija/masa (M), e) i h) predstavljaju pozicije kada se menja prigušenje (B) i f) i i) predstavljaju pozicije kada se menja krutost (K).



Slika 28. Uticaj parametara kontrolera impedansnog upravljanja na odziv sistema. Promena inercije (M): a) sila interakcije. d) odziv x -ose, g) odziv y -ose. Promena prigušenja (B): b) sila interakcije. e) odziv x -ose, h) odziv y -ose. Promena krutosti (k): c) sila interakcije. f) odziv x -ose, i) odziv y -ose.

Impedansno upravljanje ima veliku primenu kod kolaborativnih robota koji rade zajedno sa čovekom i ne mora da ima potpunu strukturu opisanu jednačinom (27). Primer u [98] ilustruje zajednički rad čoveka i robota gde robot drži alat ili teret, a završni uređaj robota se može posmatrati kao alat kojim se rukuje a čovek ručno navodi završni uređaj. Upravljanja je realizovano tako da je mehanička impedansa modelirana kao kombinacija mase i prigušnice bez krutosti kao

$$F_{int} = M\ddot{X} + D\dot{X}. \quad (42)$$

Aktivno upravljanje omogućava da se ostvari proizvoljno željno ponašanje završnog uređaja [38, 39, 40, 99]. Ograničenje koje se javlja je maksimalni moment koji može da se razvije na osovini zgloba. Kada postoji redundansa, moguće je izvršiti rekonfiguraciju robota (kroz projekciju u nultom

prostoru [100]), tako da se maksimizira ostvariv otklon duž neke proizvoljne ose od ravnotežnog stanja, za koje zadato ponašanje završnog uređaja neće biti narušeno [54, 91]

Mana ovakvog pristupa je kada naglo deluje eksterna sila visokog intenziteta. Tada ni aktivni kontroler ni mehanizam za detekciju sudara nisu dovoljno brzi da na vreme odreaguju i umanje dinamiku udara brzih i krutih robota [1, 101] niti da apsorbujе indukovanu energiju [102], Tako da brzina robota prilikom kontakta predstavlja glavni faktor koji utiče na težinu povrede, a nagle promene eksterne sile mogu dovesti do bržeg habanja i oštećenja mehaničkih elemenata u prenosnom sistemu robota.

3.2 Pasivna krutost

Pored aktivne popustljivosti koja se ostvaruje kroz upravljačku petlju, postoji i pasivna popustljivost koja je realizovana kroz elastične elemente koji su ugrađeni u prenosnom sistemu robota između aktuatora i segmenta robota. Lokalna statička karakteristika krutosti zglobova robota i krutost u ravnotežnom stanju su izvedeni u jednačinama (19)–(21). Iz jednačine (21) se dobija statička relacija za mapiranje između matrice krutosti završnog uređaja robota K_C u Dekartovim koordinatama (engl. *Cartesian space*) sa jedne strane i sa druge strane matrice krutosti zglobova K_j i konfiguraciji robota predstavljene kroz jakobijan matricu $J(q)$ [24, 31] kao

$$K_C = (J(q)K_j^{-1}J(q)^T)^{-1}, \quad (43)$$

odnosno

$$K_C = J(q)^{\dagger T} K_j J(q)^{\dagger}, \quad (44)$$

gde je $J(q)^{\dagger}$ desna pseudo inverzija jakobijan matrice $J(q)$ za koju važi $J(q)J(q)^{\dagger} = I$, gde je I jedinična matrica. U opštem slučaju pseudo inverzija je definisana kao $J(q)^{\dagger} = Z^{-1}J(q)^T(J(q)Z^{-1}J(q)^T)^{-1}$, gde je Z pozitivno definitivna matrica. Za pravilno mapiranje krutosti u zglobu i krutosti završnog uređaja metrički tenzor (Z) mora imati vrednost matrice krutosti zglobova $Z = K_j$ [24].

Relacije koja opisuje vezu između popustljivosti završnog uređaja u Dekartovim koordinatama (C_C) i matrice krutosti zglobova (K_j) odnosno matrice popustljivosti ($C_j = K_j^{-1}$) u zglobovima i konfiguracije robota predstavljene kroz jakobijan matricu $J(q)$ date su kao

$$C_C = J(q)K_j^{-1}J(q)^T, \quad (45)$$

odnosno

$$C_C = J(q)C_j J(q)^T, \quad (46)$$

gde su K_C i C_C $m \times m$ simetrične matrice, K_j i C_j su $n \times n$ a dijagonalne matrice, J je $m \times n$ matrica i q je n -dimenzionalni vektor pozicija zglobova. Parametri m i n su dimenzije radnog prostora i broja zglobova robota.

Matrice krutosti i popustljivosti se mogu analizirati i preko relativnih odnosa vrednosti krutosti zglobova [103]. Kako je K_j u jednačinama (43) i (44) dijagonalna matrica, izraz za matricu krutosti završnog uređaja može biti napisan kao

$$K_C = A(q)\mathbf{k}, \quad (47)$$

gde je $A(q)$ funkcija $J(q)$ i samim tim u funkciji pozicija zglobova q ($A(q) = f_k(J(q))$), gde je f_k funkcija koja preslikava pozicije zglobova q preko Jakobijana $J(q)$ u matricu A . Matrica \mathbf{k} se sastoji od elemenata glavne dijagonale matrice krutosti zglobova K_j , i definisana je kao $\mathbf{k} = [k_1 I; k_2 I; \dots k_n I]$, gde je k_i krutost i -og zgloba, a I jedinična matrica $m \times m$. Izraz za matricu krutosti iz jednačine (47) se može zapisati u formi

$$K_C = \alpha A(q)\hat{\mathbf{k}}, \quad (48)$$

gde je $\alpha = \max(\mathbf{k})$, a $\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}/\alpha$, tako da $\hat{\mathbf{k}}$ predstavlja relativan odnos vrednosti krutosti u zglobovima tako da su sve vrednosti u matrici $\hat{\mathbf{k}}$ skalirane na vrednosti $\hat{k}_i \in (0 - 1]$, $\forall i = 1 \dots n$.

Na osnovu jednačina (45) i (46), identična analiza se može primeniti i za matricu popustljivosti C_c što dovodi do

$$C_c = \beta B(q) \hat{c}, \quad (49)$$

gde je C_c matrica popustljivosti završnog uređaja, $\beta = \max(\mathbf{c})$, je skalirajući faktor matrice popustljivosti $\mathbf{c} = [c_1 I; c_2 I; \dots c_n I]$, gde je c_i popustljivost i -og zgloba, $B(q)$ funkcija $J(q)$ i samim tim u zavisnosti od pozicija zglobova q ($B(q) = f_c(J(q))$), f_c je funkcija koja preslikava pozicije zglobova q u matricu $B(q)$, dok je \hat{c} matrica normalizovane vrednosti popustljivosti vektora \mathbf{c} tako da su sve vrednosti normalizovane u opsegu $\hat{c}_i \in (0 - 1]$, $\forall i = 1 \dots n$.

Jednačine (43)–(46) ukazuju da se na krutost i popustljivost završnog uređaja robota može uticati:

- 1) rekonfiguracijom robota kroz nulti prostor kinematički redundantnog robota,
- 2) promenom krutosti zglobova robota pogonjenih sa VSA,
- 3) simultanom rekonfiguracijom i promenom krutosti zglobova robota.

Svi nabrojani načini se mogu primeniti na robote pogonjene sa aktuatorima promenljive krutosti, dok samo rekonfiguracija robota kroz nulti prostor se može primeniti na robote pogonjene aktuatorima sa konstantnom krutošću. Zbog toga eksploatacija redundanse robota pogonjenog aktuatorima konstantne krutosti ima veliku važnost.

Iz jednačina (48) i (49) uočava se da na odnos maksimalne i minimalne krutosti, odnosno popustljivosti duž neke proizvoljne ose utiče $A(q) \hat{\mathbf{k}}$, odnosno $B(q) \hat{\mathbf{c}}$ ili preciznije vektori $\hat{\mathbf{k}}$ i $\hat{\mathbf{c}}$ kroz kretanje u nultom prostoru kroz kretanje u nultom prostoru, dok skalirajući parametri α i β skaliraju amplitudu krutosti i popustljivosti.

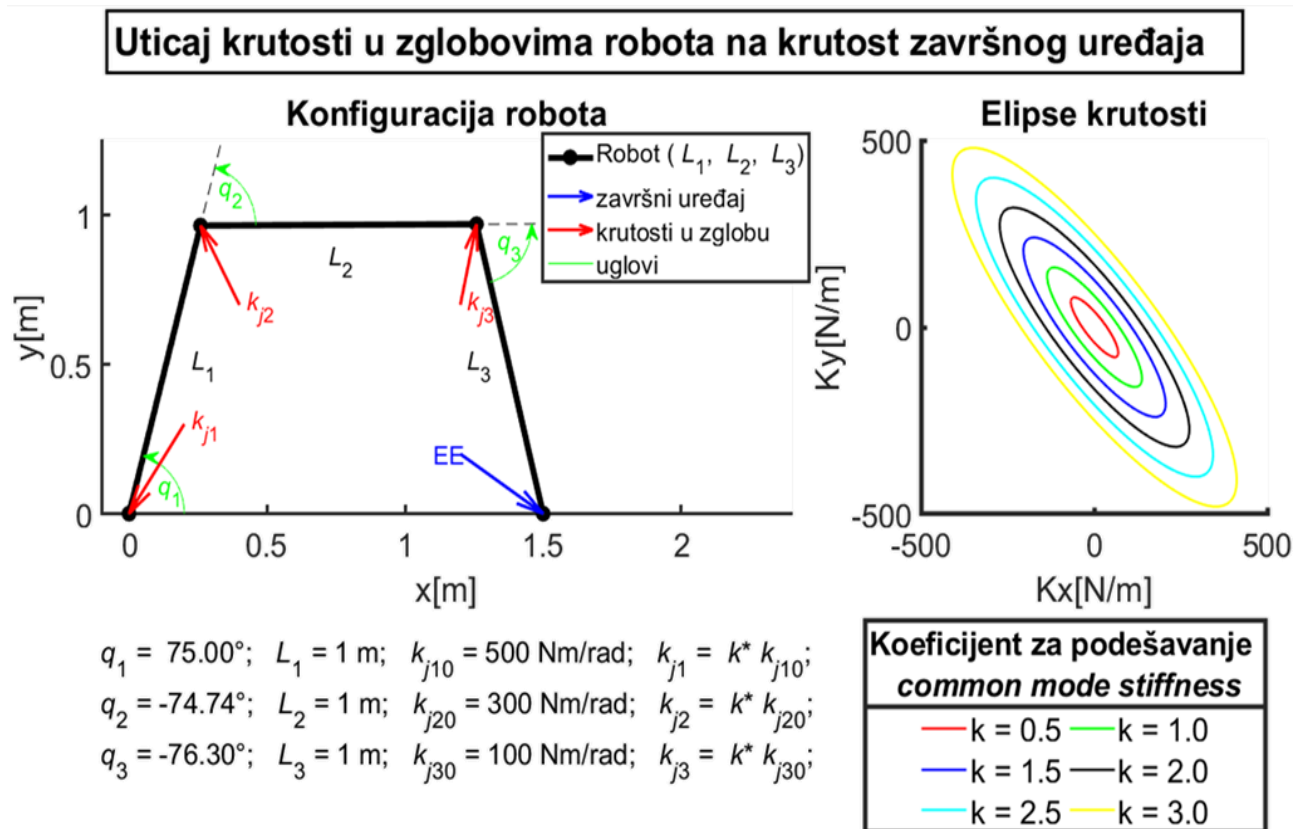
3.2.1 Upravljanje krutošću završnog uređaja robota zasnovano na promeni krutosti u zglobovima

Za kinematički redundantnog robota sa popustljivim aktuatorima, krutost i popustljivost završnog uređaja robota se može oblikovati promenom konfiguracije u nultom prostoru i/ili promenom krutosti zglobova. Oblikovanje krutosti završnog uređaja robota računanjem optimalnog seta krutosti u zglobovima za konstantnu poziciju završnog uređaja, gde su krutosti zglobova predstavljen kroz linearni sistem jednačina, a gde je linearnost ostvarena izborom odgovarajuće norme dato je u [24]. Nadogradnja računanja optimalnog seta krutosti u zglobovima prikazana je [31]. U njemu se razmatra iterativna procedura za rešavanje nelinearnih sistema jednačina sa ograničenjima (radni opsezi pozicija i krutosti zglobova). Istraživanja opisana u [24, 31], fokusiraju se na kontrolu svih šest pozicija i cele matricu krutosti završnog uređaja što ukupno čini 27 promenljivih (3 rotacije, 3 translacije i 21 različit element u matrici krutosti), što je sa stanovišta kontrole veoma zahtevno budući da postoji suviše promenljivih i fizičkih ograničenja (ograničen raspon pokreta zglobova i krutosti zglobova) i manjak kontrolnih ulaza. Za kontrolu svih 27 promenljivih veličina robota pogonjenog sa VSA minimalan broj aktuatora bi bio 14 [24], ne razmatrajući fizička ograničenja koja postoje i da bi realan broj bio daleko veći i kompleksniji za realizaciju i upravljanje. Stoga, kontrola cele matrice krutosti nije laka, niti je potpuno opravdan cilj [104], već da je kontrola dijagonalnih elemenata matrice krutosti neophodna u većini aplikacija. Za robote pogonjene sa VSA, moguće je proširiti problem redundantne inverzne kinematike tako da uključi popustljivost u svakom zglobu i da dobije proširenu inverznu kinematiku popustljivosti [105]. Oblikovanje krutosti završnog uređaja može se podeliti na krutost zavisnu od konfiguracije (CDS – engl. *configuration-dependant stiffness*) i krutost koja zavisi od krutosti zglobova (CMS – engl. *common mode stiffness*) [106]. CDS potiče od redundantne konfiguracije robota i koristi se za usmeravanje elipse ili elipsoida krutosti, dok CMS utiče na veličine osa elipse ili elipsoida. CMS predstavlja dodatni stepen slobode koji se može uključiti u inverznu kinematiku da bi se dobili bolji rezultati. Krutost završnog uređaja robota pogonjenog sa SEA može se promeniti samo rekonfiguracijom kada je robot kinematički redundantan. Matrica krutosti završnog uređaja ima nelinearnu zavisnost od konfiguracije robota preko jakobijan matrice (videti jednačine (43) i (44)). Za tipičnog robota sa 6-7 stepeni slobode, nemoguće je pronaći analitički skup pozicija zglobova koji će zadovoljiti željeni položaj završnog uređaja i matricu krutosti. Stoga su neophodne tehnike optimizacije koje koriste nulti prostor [52, 96, 107].

Na primeru planarne konfiguracije robota sa 3 stepena slobode (segmenti L_1 , L_2 i L_3) koja je ilustrovana slici Slika 29. (levo) prikazan je uticaj CMS na elipsu krutosti (slika Slika 29. desno). Pozicije zglobova (q_1 , q_2 i q_3) su konstantne i samim tim pozicija završnog uređaja (EE) je konstantna. Krutost zglobova (k_{j1} , k_{j2} i k_{j3}) dobija se kao proizvod početnih vrednosti krutosti (k_{j10} , k_{j20} i k_{j30}) i parametra CMS-a (k) kao $k_{j1} = k k_{j10}$, $k_{j2} = k k_{j20}$ i $k_{j3} = k k_{j30}$. CMS ne utiče na oblik (odnos osa) i usmerenje elipse krutosti, već samo na njen volumen odnosno samo linearno skalira elemente matrice krutosti.

Promena relativnih odnosa vrednosti krutosti će narušiti oblik elipse krutosti, ali kada su u pitanju roboti pogonjeni VSA, promenom odnosa krutosti zglobova može se uticati na relativni odnos minimalne i maksimalne krutosti koja može biti ostvarena po nekoj od osa kretanja u delu radnog opsega koji je od interesa za izvršenje zadatka [103]. Na slici Slika 30. prikazan je KUKA LWR robot montiran na platformu u MuJoCo Haptix grafičkom okruženju [30]. Parametri robota su dati u [108]. Transparentnom roze bojom označen je radni prostor koji se analizira. Radni prostor je izabran da se nalazi u sredini radnog prostora robota i da bude kocka ivice 20cm ograničenog sa x , y i z osom: $x \in [0.55 - 0.7]$ m, $y \in [0 - 0.2]$ m i $z \in [1.45 - 1.65]$ m. U okviru tog radnog prostora izabrano je 27 radnih tačaka koje se nalaze na na čoškovima, na sredinama ivica, na sredinama stranica i u centru kocke. Analizira se uticaj promene krutosti u prvom i četvrtom zglobu robota. Izbor analize samo 2 od 7 zglobova relativno mali deo radnog prostora su izabrani zbog računskih

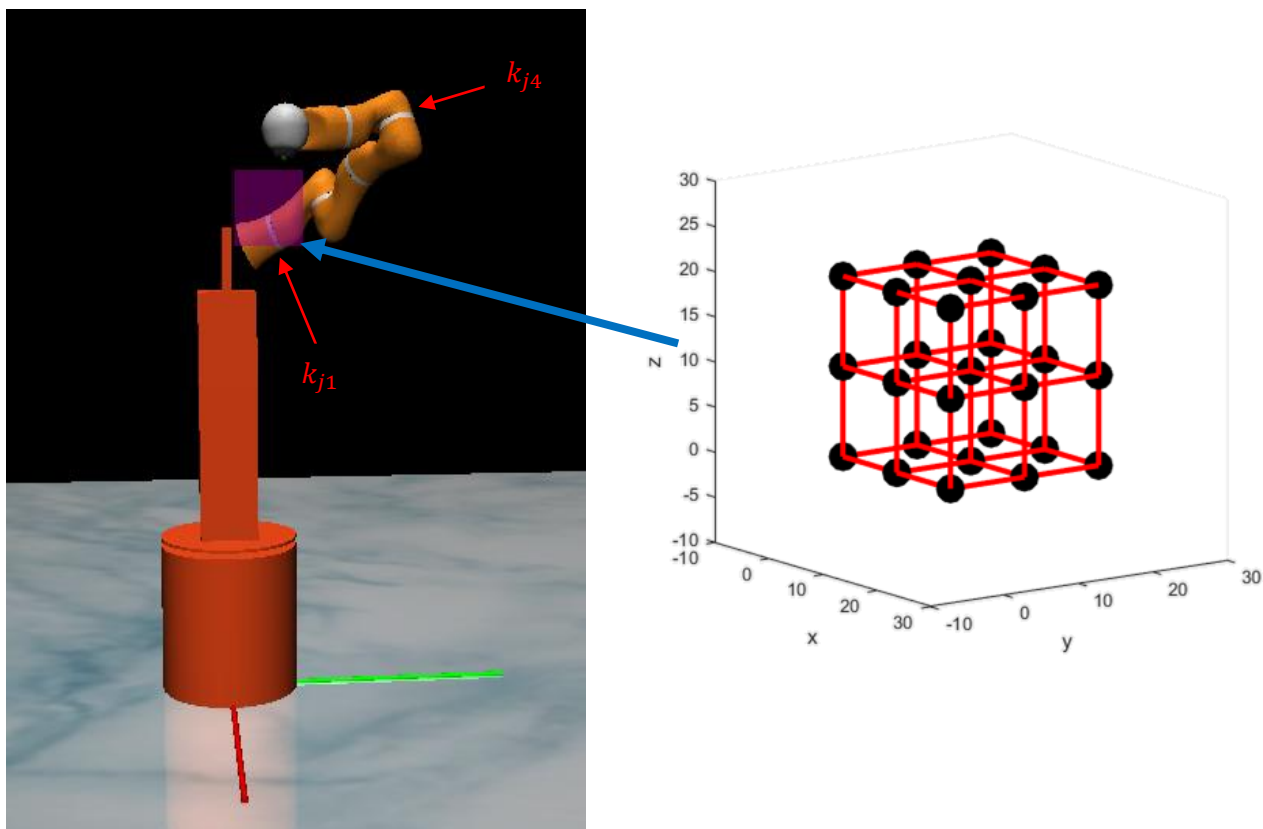
zahteva koji su preveliki u slučaju analize sedmodimenzionog prostora, ali i sa smanjenom dimenzionalnošću moguće je ilustrovati uticaj promene relativnih odnosa krutosti. Posmatra se samo relativan odnos jer se dodatno sa CMS parametrom može uticati na magnitudu krutosti završnog uređaja.



Slika 29. Uticaj *common mode stiffness*-a na krutost završnog uređaja robota. Levo: Planarna konfiguracija robota koja se sastoji od tri segmenta – L_1 , L_2 i L_3 (crno); pozicija završnog uređaja robota (plavo); krutosti u zglobovima k_{j1} , k_{j2} i k_{j3} (crveno); pozicije zglobova q_1 , q_2 i q_3 (zeleno).

Desno – Elipsoidi krutosti za fiksnu konfiguraciju ($q_1 = 75^\circ$, $q_2 = -74.74^\circ$ i $q_3 = -76.30^\circ$) različiti koeficijent *common mod stiffnes*-a $k \in [0.5 - 3]$. Krutost u zglobovima se računa kao proizvod početnih vrednosti krutosti (k_{j10} , k_{j20} i k_{j30}) i parametra *common mode stiffness*-a (k)

$$\text{kao } k_{j1} = k k_{j10}, k_{j2} = k k_{j20} \text{ i } k_{j3} = k k_{j30}.$$

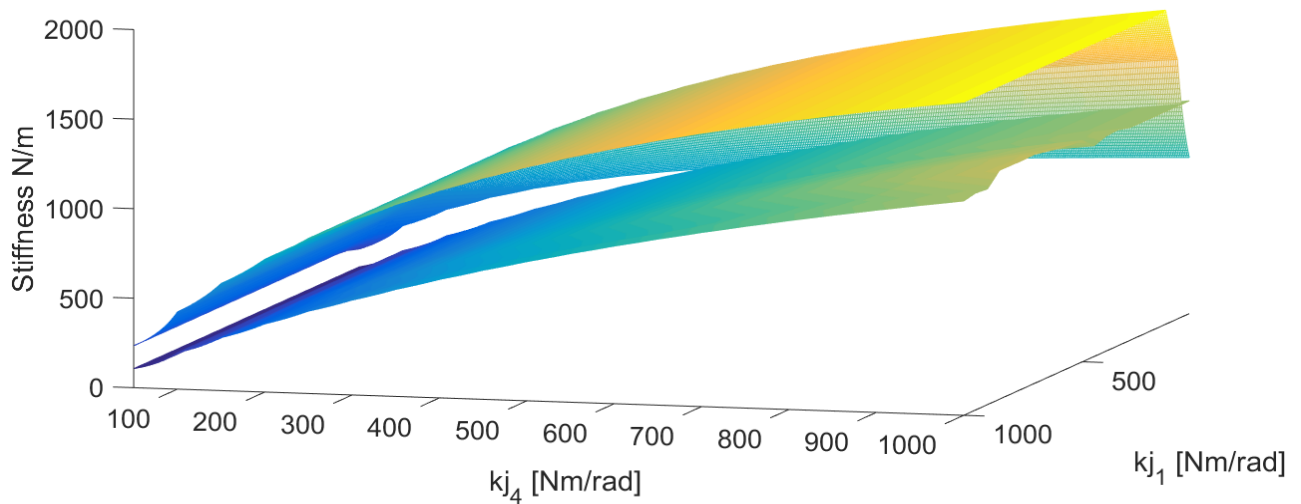


Slika 30. Simulacioni model KUKA LWR robota montiranog na platformu. Transparentna roze boja predstavlja izabrani deo radnog prostora za koji se vrši analiza uticaja krutosti u prvom i četvrtom zgobu (k_{j1} i k_{j4}). Na desnoj strani su prikazane radne tačke u okviru radnog prostora koje su izabrane za analizu uticaja varijacije krutosti zglobova.

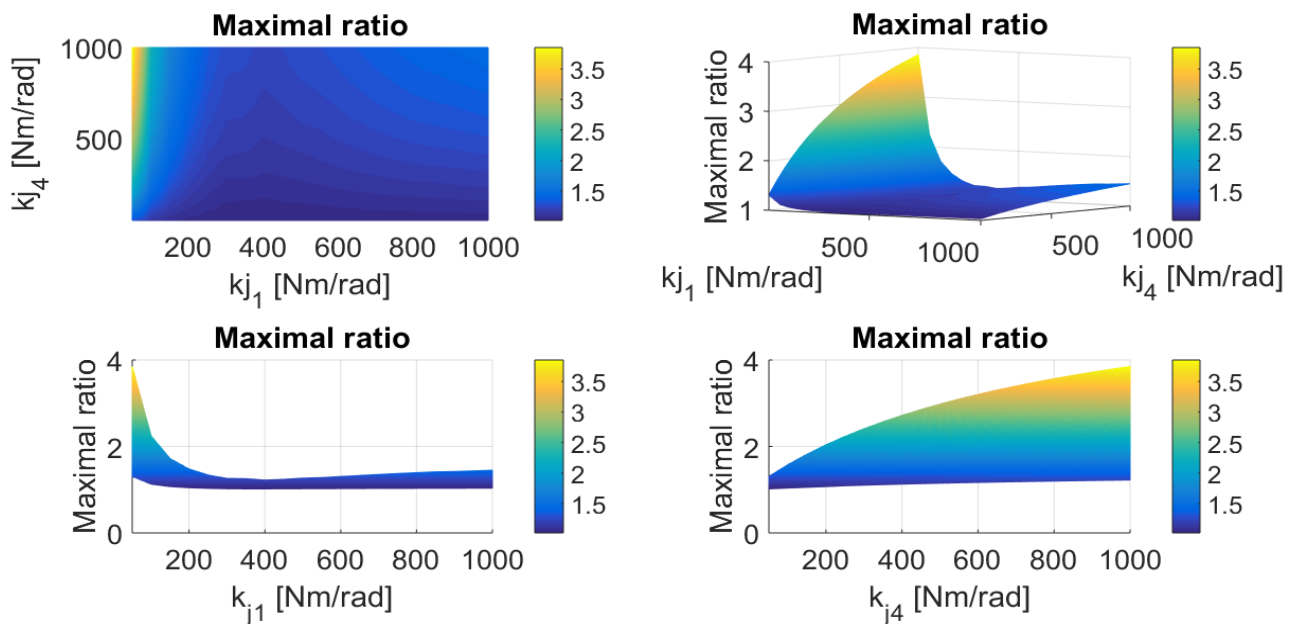
Vrednosti svih parametara koji su korišćeni u simulaciji su dati u Tabela 1. Simulacija je sprovedena tako što se završni uređaj robota pomera u svih 27 radnih tačaka menjajući poziciju, ali ne i orijentaciju završnog uređaja koja je usmerena duž z ose u negativnom smeru (normalno na površinu na kojoj je platforma postavljena). Vrednost prvog i četvrtog zglobova se menja opsegu od 50–1000 Nm/rad, dok je krutost u ostalim zglobovima konstantna i iznosi 500Nm/rad. Ovakva analiza ima smisla jer pri kretanju robota tokom izvršenja zadatka, u zavisnosti od kinematike robota krutosti nekih zglobova imaju manje uicaja koji može da bude zanemariv. Samim tim, moguće je problem pretrage svesti na problem sa manje dimenzija gde bi pojedini zglobovi imali konstantnu krutost sličnu ovoj analizi. Maksimalna i minimalna krutost duž z ose za svaku tačku su izračunati primenom kontrolera sa optimizacijom u nultom prostoru koji je objašnjen u 3.2.2. Maksimalni odnos između maksimalne i minimalne krutosti izračunava se kao srednja vrednost za sve odnose za sve tačke u okviru radne površine za koje je izračunata minimalna i maksimalna krutost. Metodologija izračunavanja maksimalnog koeficijenta može se takođe različito definisati, ali je za potrebu ove analize ograničena na srednju vrednost u okviru radne oblasti.

Za opisani scenario rezultati su prikazani na slici Slika 31. i slici Slika 32. . Slika Slika 31. ilustruje ostvarivu minimalnu i maksimalnu krutost duž z ose za zadate pozicije završnog uređaja i modulaciju krutosti zglobova u prvom i četvrtom zgobu. Slika Slika 32. ilustruje kako promena krutosti pojedinačnih zglobova (u zgobu jedan ili zgob četiri), i njihove vrednosti oblikuju odnos između minimalne i maksimalne krutosti završnog uređaja. Može se primetiti da se najveći odnos može postići kada prvi zgob (najbliži bazi robota) ima najmanju krutost, a četvrti zgob najveću krutost. Takođe, visoka vrednost krutosti prvog zglobova smanjuje mogućnost povećanja odnosa podešavanjem krutosti u četvrtom zgobu. Postignute minimalne i maksimalne krutosti nisu eksperimentalno ispitane u ovom istraživanju. Ovde se oslanjamo samo na matematički model za

krutost i virtuelnu krutost. Uticaj konfiguracije robota na krutost završnog uređaja duž z ose ilustrovan je na Slika 35.



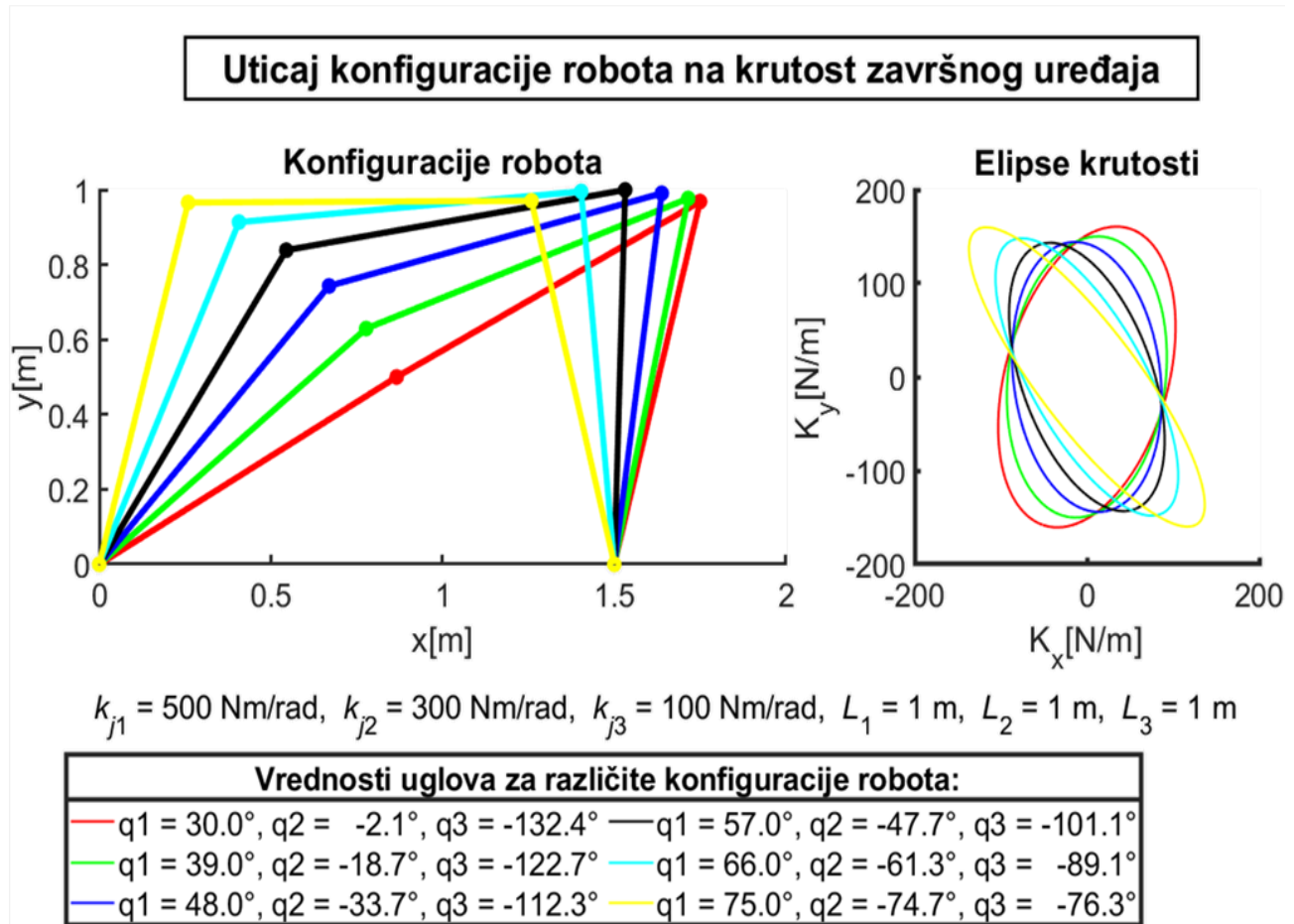
Slika 31. Površine koje ilustruju minimalnu i maksimalnu krutost završnog uređaja duž z ose kada se krutost u prvom i četvrtom zglobu robota (brojeći od baze robota ka završnom uređaju) menja u opsegu od 50 do 1000 Nm/rad za predefinisani radni prostor.



Slika 32. 3D prikaz uticaja krutosti u prvom i četvrtom zglobu na ukupnu krutost završnog uređaja duž z ose kada se krutost u prvom i četvrtom zglobu robota (brojeći od baze robota ka završnom uređaju) menja u opsegu od 50 do 1000 Nm/rad, dok je krutost u ostalim zglobovima podešena na 500Nm/rad.

3.2.2 Upravljanje krutosti završnog uređaja robota zasnovano na promeni kinematičke konfiguracije

Jedan od pristupa za oblikovanje matrice ili elipse (ili elipsoida u 3D prostoru) krutosti robota pogonjenog aktuatorima konstantne krutosti je kroz promenu kinematičke konfiguracije robota kada postoji kinematička redundansa. Promena konfiguracije se odvija u nultom prostoru. Kretanje u nultom prostoru se takođe naziva i unutrašnje kretanje. To znači da se kretanje odvija u unutrašnjim koordinatama (pozicijama zglobova) na način da ne dolazi do promene u spoljnim koordinatama (Dekartove koordinate završnog uređaja). To omogućava da robot pored primarnog zadatka (praćenje trajektorije) izvrši i sekundarni zadatak koji je u ovom slučaju oblikovanje krutosti završnog uređaja robota.



Slika 33. Uticaaj konfiguracije kinematički redundantnog na krutost završnog uređaja robota sa dužinama segmenata $L_1 = 1 \text{ m}, L_2 = 1 \text{ m}$ i $L_3 = 1 \text{ m}$, i krutostima u zglobovima $k_{j_1} = 500 \text{ Nm/rad}, k_{j_2} = 300 \text{ Nm/rad}$ i $k_{j_3} = 100 \text{ Nm/rad}$. Levo: Različite planarne konfiguracije robota sa istom pozicijom završnog uređaja; Desno – Elipsoidi krutosti za različite konfiguracije robota.

Primer oblikovanja krutosti završnog uređaja primenom kretanja u nultom prostoru je prikazan radu [96] gde autori pokušavaju da oblikuju matricu krutosti za planarnu konfiguraciju (matrica krutosti ima dimenzije 2×2). Planarna konfiguracija je ostvarena korišćenjem Yaskawa robota sa sedam stepeni slobode i sa krutim vezama između aktuatora i zglobova robota, dovođenjem robota u ravan paralelnu sa površinom i zaključavanjem četiri zglobova robota da se dobija minimalna potrebna konfiguracija sa tri stepena slobode, odnosno sa jednim stepenom redundanse. Oblikovanju matrice krutosti se pristupilo kroz projekciju u nultom prostoru. Zbog nedovoljnog broja stepeni redundanse, nije moguće ostvariti matricu krutosti koja bi imala dijagonalni oblik sa svim

elementima koji bi bili podesivi. Pored toga što je željeno usmerenje elipsoida krutosti ostvareno, željene vrednosti duž osa elipsoida nisu ostvarene usled nedovoljnog stepena redundanse. Bolji rezultati bi se mogli postići uvođenjem težinske matrice u kriterijumsku funkciju optimizacionog algoritma koji optimizaciji elemenata matrice krutosti [24, 31].

Za ralik od [96] gde je oblikovana matrica krutosti krutih industrijskih robota, pristup predložen u ovoj disertaciji, bazira se na oblikovanju elemenata matrice popustljivosti završnog uređaja kroz upravljanje inverznom kinematikom i kretanjem u nultom prostoru kinematički redundantnog robota pogonjenog aktuatorima sa konstantnom krutošću, a sve to zasnovano na matematičkom modelu popustljivosti [52]. Pristup optimizaciji kretanjem u nultom prostoru može dovesti do lokalno optimalnog rešenja. Postizanjem van dijagonalnih elemenata u matrici krutosti i popustljivosti, gde postoji kuplovanje sila i pomeraja u različitim smerovima korisno je za sprečavanje zaglavljivanja i vibracije izazvane kontaktom [104]. Kada se računa optimalna konfiguracija zgloba, projekcija nultog prostora će osigurati glatku putanju zgloba u poređenju sa metodama nelinearne optimizacije koji traže optimalno globalno rešenje koje se može značajno razlikovati od trenutne poze robota [109]. Budući da roboti obično imaju jedan stepen redundanse, nije moguće kontrolisati sve elemente unutar matrice krutosti ili popustljivosti završnog uređaja, stoga su istraživanja predstavljena u disertaciji ograničena na popustljivost samo duž ose kretanja. Predloženo rešenje eksperimentalno je testirano na KUKA LWR stavljanjem valjkastog objekta u kalup u otvor za rupu (engl. *peg in hole*), gde se pomoću podešavanja popustljivosti završnog uređaja sile trenja smanjuju i izbegava se zaglavljivanje. Za robote sa konstantnom krutošću u zglobovima, gde se krutost ne može promeniti tokom zadatka, unapred izračunavanje potrebne krutosti zgloba je veoma važno za postizanje većeg opsega krutosti unutar radnog prostor ili duž unapred određene trajektorije [103].

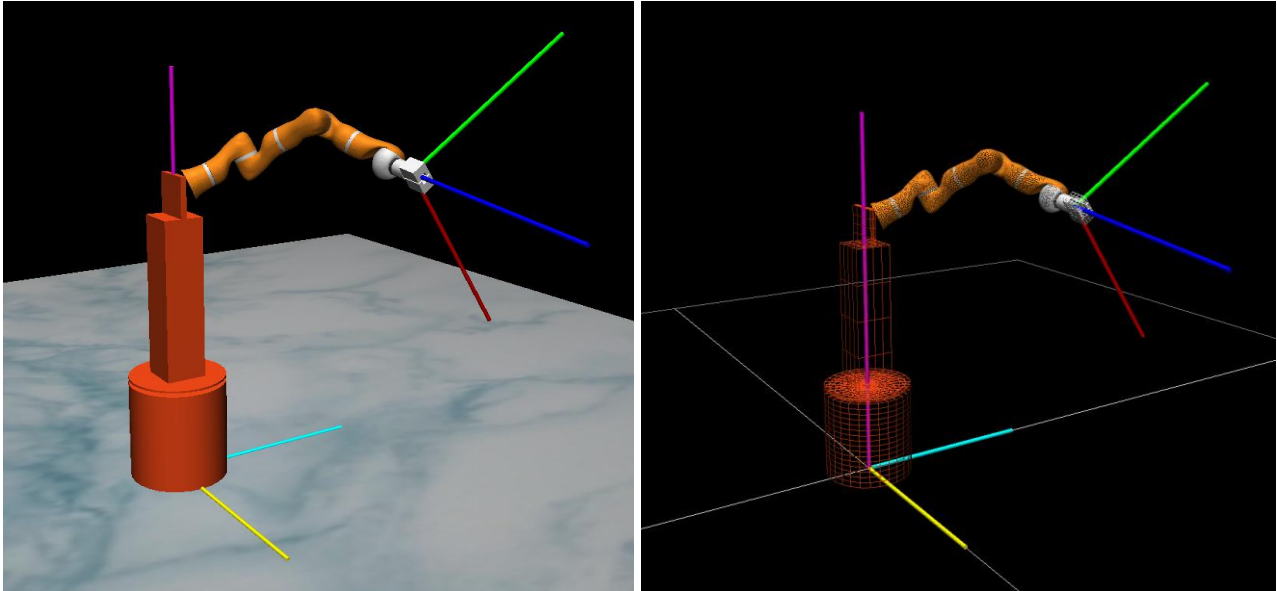
Na slici Slika 34. je prikazano simulaciono MuJoCo HAPTIX [30] okruženje robota montiranog na platformu, gde se pozicija, orijentacija i Jakobijan završnog uređaja u globalnom koordinatnom sistemu vezanom za bazu platforme računa kao

$$X_w = R_p X_r + X_p, \quad (50)$$

$$R_w = R_p R_r, \quad (51)$$

$$J_w = \begin{bmatrix} R_p & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & R_p \end{bmatrix} J, \quad (52)$$

gde X_w , R_w , J_w označavaju poziciju (x , y , i z komponenta), orijentacionu matricu i jakobijan matricu u koordinatnom sistemu vezanom za bazu platforme (globalni koordinatni sistem), respektivno. Uglovi orijentacije završnog uređaja (φ , ψ i θ) su izračunati na osnovu matrice orijentacije R_w . Stoga, vektor pozicija završnog uređaja je definisan kao $X = [x \ y \ z \ \phi \ \psi \ \theta]^T$. Položaj i orijentacija baze robota u odnosu na bazu platforme označeni su sa X_p i R_p , respektivno. Pozicija i orijentaciona matrica završnog uređaja u koordinatnom sistemu robota su označeni sa X_r i R_r , respektivno.



Slika 34. MuJoCo HAPTIX simulaciono okruženje za KUKA LWR robota montiranog na platformu koje odgovara laboratorijskoj postavci. Žuta, svetlo plava i roze boja označavaju x , y i z osu u globalnom koordinatnom sistemu, dok crvena, zelena i plava označavaju pokretni koordinatni sistem vezan za završni uređaj robota.

Usvajajući jakobijan matricu u formi datoj sa (52) i zamenom u (46), izraz za matricu popustljivosti završnog uređaja C_w u globalnom koordinatnom sistemu postaje

$$C_w = J_w C_j J_w^T, \quad (53)$$

$$C_w = \begin{bmatrix} R_p & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & R_p \end{bmatrix} J C_j J^T \begin{bmatrix} R_p & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & R_p \end{bmatrix}. \quad (54)$$

Matrica krutosti završnog uređaja u globalnom koordinatnom sistemu se računa kao

$$K_w = C_w^{-1}. \quad (55)$$

Indeks performansi (engl. *performance index*) optimizacije matrice popustljivosti ili matrice krutosti završnog uređaja predstavlja meru koliko je ostvarena vrednost bliska željenoj i može se definisati kao

$$H_s = \|K_{CD} - K_{CW}(K_j, q)\|, \quad (56)$$

$$H_c = \|C_{CD} - C_{CW}(K_j, q)\|, \quad (57)$$

gde su H_s and H_c indeksi performansi za krutost i popustljivost definisani kao norme greške između željene i ostvarene krutosti i popustljivosti, respektivno. Željene matrice krutosti i popustljivosti su označene sa K_{CD} i C_{CD} , respektivno, dok ostvarena krutost i popustljivost u globalnom koordinatnom sistemu su označeni K_{CW} i C_{CW} , respektivno.

Problem oblikovanja matrice krutosti završnog uređaja dok se kreće nekom trajektorijom može se posmatrati kao minimizacija norme H_s , ili H_c u slučaju matrice popustljivosti. Koristeći Euklidsku normu (moguće je koristiti i druge), H_s i H_c se mogu izračunati kao

$$H_s = \sum_{i,j} W_{ij} \left(K_{CDij} - K_{cw}(K_j, q)_{ij} \right)^2, \quad (58)$$

$$H_c = \sum_{i,j} W_{ij} \left(C_{CDij} - C_{cw}(K_j, q)_{ij} \right)^2, \quad (59)$$

gde je W $m \times m$ težinska matrica, a i i j označavaju indekse elementa odgovarajuće matrice. Uloga težinske matrice je da dodeli različite prioritete elementima matrica popustljivosti i krutosti u procesu optimizacije, uz uslov da postoji dovoljan stepen redundanse da se svi oni podese. U koliko ne postoji potreba za prioritizacijom, težinska matrica se može izostaviti. Prioritizacijom pojedinih elemenata u matrici krutosti ili popustljivosti moguće je uticati na ponašanje završnog uređaja u kontaktu sa okolinom tako da budu izabrane najbitnije ose za izvršavanje zadatka. Prioretizacija posebno dolazi do izražaja kada je na raspolaganju nedovoljno stepeni redundanse da se podese cela matrica krutosti ili popustljivosti, a najčešće je na raspolaganju samo jedan stepen redundanse. Prioretizacijom duž pravca kretanja ima primenu u zadacima sastavljanja, uzimajući u obzir da je najveća verovatnoća da dođe do kontakta upravu duž pravca kretanja.

Diferencijalna kinematika robota prvog reda u globalnom koordinatnom sistemu data je sa

$$\dot{X} = J_w \dot{q}, \quad (60)$$

dok je opšte rešenje inverzne kinematike [25, 110, 111] dato sa

$$\dot{q} = J_w^\dagger \dot{X} + (I - J_w^\dagger J_w) \dot{q}_N, \quad (61)$$

gde je \dot{X} vektor brzine završnog uređaja u globalnom koordinatnom sistemu, \dot{q}_N je proizvoljni vektor brzina zglobova, dok je J_w^\dagger desna pseudoinverzija matrice J_w . Korišćena je *Moore-Penrose*-ova pseudo inverzija. Za kinematički redundantnog robota, komponenta vektora brzina u zglobovima \dot{q}_N se može izračunati tako da ona zadovoljava sekundarni zadatak uz praćenje pozicije koje je i primarni zadatak. U ovom slučaju sekundarni zadatak je izabran da minimizira normu koja prestavlja indeks performansi definisanih sa (58) i (59), i da na taj način oblikuje matricu krutosti završnog uređaja. U nastavku norma koja se minimizira biće označena sa H (procedura je ista bez obzira na izabranu normu-kriterijumsku funkciju).

Za implementaciju sekundarnog zadatka koji minimizira normu H , komponenta vektora brzine zglobova \dot{q}_N se računa pomoću gradijenta norme H koja se minimizira [25] kao

$$\dot{q}_N = -K_n \nabla H(q), \quad (62)$$

gde je K_n pojačanje, a $\nabla H(q)$ je gradijent norme H . Kontroler inverzne kinematike na nivou brzina zglobova dat je sa

$$\dot{X} = K(X_d - X), \quad (63)$$

gde je K pojačanje, a X_d zadata pozicija u globalnom koordinatnom sistemu. Zamenom izraza (62) i (63) u (61), dobija se kontroler inverzne kinematike redundantnog robota sa optimizacijom krutosti završnog uređaja

$$\dot{q} = J_w^\dagger K(X_d - X) - K_n (I - J_w^\dagger J_w) \nabla H(q). \quad (64)$$

Vektor željenih pozicija zglobova q_d se računa integraljenjem \dot{q} kao

$$q_d = q_0 + \int \dot{q} dt, \quad (65)$$

gde je q_0 n -dimenzioni vektor početnih pozicija zglobova. Zamenom (64) u (65) dobija se konačan izraz za vektor željenih pozicija q_d

$$q_d = q_0 + \int \left(J_w^\dagger K(X_d - X) - K_n(I - J_w^\dagger J_w) \nabla H(q) \right) dt. \quad (66)$$

Kako se algoritam zasniva na gradijentu, konvergencija ka globalnom optimumu se ne može garantovati već samo ka lokalnom uz uslov da optimizacioni algoritam ne dovede do fizičkih limita pozicija zglobova. Takođe, vrednosti pojačanja K i K_n treba pažljivo razmotriti zato što utiču na brzinu konvergencije algoritma, dok znak K_n određuje da li se norma minimizira ili maksimizira.

3.2.2.1 Analiza stabilnosti algoritma zasnovanog na inverznoj kinematici sa projekcijom u nultom prostoru

Vektor greške (e) između željene (X_d) i ostvarene pozicije (X_w) završnog uređaja dat je sa

$$e = X_d - X_w. \quad (67)$$

Računajući izvod greške i koristeći relaciju $\dot{X}_w = J_w(q)\dot{q}$ (videti jednačinu (60)), dobija se dinamika greške pozicija završnog uređaja

$$\dot{e} = \dot{X}_d - J_w(q)\dot{q}. \quad (68)$$

Usvajajući kontroler inverzne kinematike za neredundantan slučaj u formi kao

$$\dot{q}_d = J_w^{-1}(q)(\dot{X}_d + Ke), \quad (69)$$

i usvajajući da je $\dot{q} = \dot{q}_d$, zamenom (69) u (68) dobija se dinamika greške pozicije završnog uređaja u formi

$$\dot{e} + Ke = 0. \quad (70)$$

Za kinematički redundantnog robota kontroler inverzne kinematike imaće generalizovani oblik

$$\dot{q}_d = J_w^\dagger(q)(\dot{X}_d + Ke) - (I_n - J_w^\dagger(q)J_w(q))K_n\dot{q}_N. \quad (71)$$

Zamenom (71) u (68) dobije se da dinamika greške pozicije završnog uređaja ima isti oblik kao i za neredundantni slučaj. Uslov da je sistem opisan sa (71) stabilan je da se svi polovi nalaze u levoj poluravni kompleksnih brojeva. To se može postići ako je matrica pojačanja K pozitivno definitivna [112], gde se pod pozitivno definitivnom matricom smatra ona matrica koja je simetrična i ima sve sopstvene vrednosti veće od 0 (engl. *Eigenvalues*).

Dokaz stabilnosti je moguće izvesti i primenom direktne metode Ljapunova. Da bi sistem bio stabilan izabrana kandidat funkcija V mora da ispunjava četiri uslova:

- 1) $V(e(t) = \mathbf{0}) = V(\mathbf{0}) = 0$,
- 2) $V(e(t)) > 0 \quad \forall e(t) \neq \mathbf{0}$,
- 3) $V(e(t)) \rightarrow \infty$ when $\|e(t)\| \rightarrow \infty$,
- 4) $\dot{V}(e(t)) = dV(e(t))/dt < 0$ for $\|e(t)\| \neq \mathbf{0}$.

Funkcija kandidat V može biti izabrana kao

$$V = e^T P e, \quad (72)$$

gde je P pozitivna definitivna matrica (pod pozitivno definitivnom matricom smatra ona matrica koja je simetrična i ima sve sopstvene vrednosti veće od 0). Sa ovakvim izborom matrice P prva tri uslova za stabilnost sistema su zadovoljena.

Računajući izvod funkcije V date u jednačini (72) dobija se

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{d(e^T P e)}{dt}, \quad (73)$$

$$\dot{V} = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e}, \quad (74)$$

$$\dot{V} = -e^T K^T P e - e^T P K e = -e^T (K^T P + P K) e \quad (75)$$

$$\dot{V} = -e^T Q e \quad (76)$$

gde je $Q = K^T P + P K$. Da bi se zadovoljio četvrti uslov za stabilnost direktne metode Ljapunova, matrica Q mora biti pozitivno definitivna. Kako je matrica K pozitivno definitivna, a samim tim i simetrična, a predstavlja parameter kontrolera koji se zadaje, izborom matrice P koja bi imala dijagonalnu formu koja bi u najprostijem slučaju bila pozitivan umnožak jedinične matrice (npr. $P = \alpha I$, gde je $\alpha > 0$) dobija se

$$Q = 2\alpha K. \quad (77)$$

Kako je 2α pozitivna konstanta za skaliranje, a matrica K pozitivno definitivna, sledi da je i matrica Q je pozitivno definitivna. Kontrolni algoritam predložen u (64) je specijalni slučaj algoritma (71) za $\dot{X}_d = 0$, tako da analiza stabilnosti koja važi za (71) važi i za (64).

3.2.2.2 Implementacija algoritma za optimizaciju krutosti kroz kinematičku promenu konfiguracije robota

Uzimajući u obzir da roboti kao što je KUKA LWR obično imaju antropomorfnu konfiguraciju sa sedam stepeni slobode u radnom prostoru sa šest stepeni, to obično rezultuje sa samo jednim stepenom redundanse. Očigledno je da za robote pogonjene aktuatorima konstantne krutosti nije uvek moguće podesiti sve elemente u matrici krutosti ili popustljivosti završnog uređaja. Zato, oblikovanje krutosti biće primenjeno samo duž jedne ose, u pravcu kretanja završnog uređaja, uzimajući u obzir da je pravac kretanja najverovatnija osa po kojoj će doći do kolizije u zadacima kao što su sastavljanje delova ili „*pick and place*”. To znači da su koordinate završnog uređaja i dalje predstavljene u globalnom koordinatnom sistemu, dok se krutost završnog uređaja predstavlja kroz pokretni koordinatni sistem vezan za završni uređaj robota. Popustljivost je izabrana pre krutosti i zanemareni su van dijagonalni elementi jer njih nije sve moguće podesiti sa samo jednim stepenom redundanse, a popustljivost je manje računski zahtevna i odstupanje završnog uređaja je proporcijalno eksternoj sili i popustljivosti duž izabrane ose.

Predložena optimizaciona metoda je verifikovana na KUKA LWR robotu koji nema popustljive zglobove već popustljivost ostvaruje kroz PD regulaciju momenata na nivou zglobova [52], gde se željeni vektor momenata τ računa kao

$$\tau = K_p(q_d - q) + K_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + g(q), \quad (78)$$

gde su K_p i K_d pozitivno definitivne dijagonalne matrice proporcionalnog i diferencijalnog pojačanja PD regulatora, a $g(q)$ je vektor gravitacione kompenzacije. Proporcionalno pojačanje K_p je dijagonalna matrica čija vrednost odgovara zadatoj matrici krutost zglobova robota $K_p = K_j$, dok je matrica diferencijalnih pojačanja podešena da maksimalno priguši oscilacije $K_d = 2\sqrt{K_p}$.

Vektor željenih pozicija zglobova robota q_d je numerički izračunata u dva koraka. U prvom koraku se gradijent ∇H numerički računa i zamenjuje u (62)

$$\nabla H(q) = [\nabla \hat{H}_1 \nabla \hat{H}_2 \nabla \hat{H}_3 \nabla \hat{H}_4 \nabla \hat{H}_5 \nabla \hat{H}_6 \nabla \hat{H}_7]^T, \quad (79)$$

gde je

$$\nabla \hat{H}_i = \frac{H(q + \Delta q_i) - H(q)}{\Delta q}, \text{ for } i = 1 \dots 7, \quad (80)$$

$$\Delta q_i(j) = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ \Delta q & i = j \end{cases}, \quad i, j = 1 \dots 7.$$

Vrednost koraka Δq u numeričkom diferenciranju gradijenta ∇H se eksperimentalno bira. U drugom koraku, željena brzina zglobova q_d se računa kao inkrement umesto integrala brzine kao

$$q_d = q_0 + \dot{q} \Delta t, \quad (81)$$

gde je Δt perioda odabiranja u kontrolnoj petlji.

Validacija predložene metode je izvršena na dva statička eksperimenta i na jednom eksperimentu sa kretanjem završnog uređaja po trajektoriji na primeru „*peg in hole*” eksperimenta koji simulira zadatak sastavljanja dva dela u proizvodnji. Vrednost parametara korišćenih u svim eksperimentima data je u Tabeli 1.

Tabela 1: Konstante i parametri LWR robota sa plaformom korišćeni u eksperimentima.

Parametar	Vrednost	Napomena
X_p	$[0, 0.0765, 1.44]^T$ m	Iz geometrije platforme
Uglovi rotacije platforme robota	$\alpha = -60^\circ, \beta = 35^\circ, \gamma = 120^\circ$	Iz geometrije platforme
R_p	$\begin{bmatrix} -0.8398 & -0.4610 & 0.2868 \\ 0.4330 & -0.2500 & 0.8660 \\ -0.3276 & 0.8514 & 0.4096 \end{bmatrix}$ *izračunato kao: $rot_y(\beta)*rot_x(\alpha)*rot_z(\gamma)$	$rot_x, rot_y,$ and rot_z označavaju funkcije za računanje matrica rotacije oko $x, y,$ i z ose, respektivno
Δq	0.0000001 rad	Eksperimentalno izabrana vrednost
Δt	0.01s	Frekvencija periode odabiranja u kontrolnoj petlji je 100hz
K_j [Nm/rad]	$diag(400,400,400,400,400,400,400)$	Eksperimentalno izabrana vrednost.
K_p [Nm/rad]	$diag(400,400,400,400,400,400,400)$	$K_p = K_j$
K_d [Nms/rad]	$diag(40,40,40,40,40,40,40)$	$K_d = 2\sqrt{K_p}$
K	$diag(10,10,10,10,10,10,10)$	Eksperimentalno izabrana vrednost
K_n	$diag(1,1,1,1,1,1,1)$	Eksperimentalno izabrana vrednost
granične vrednosti pozicija zglobova	$\pm[2.967 \ 2.094 \ 2.967 \ 2.094 \ 2.967 \ 2.094 \ 2.967]$ rad $\pm[170 \ 120 \ 170 \ 120 \ 170 \ 120 \ 170]$ deg $q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6 \quad q_7$	Fizička ograničenja robota

3.2.2.3 Validacija algoritma za optimizaciju krutosti kroz kinematičku promenu konfiguracije robota

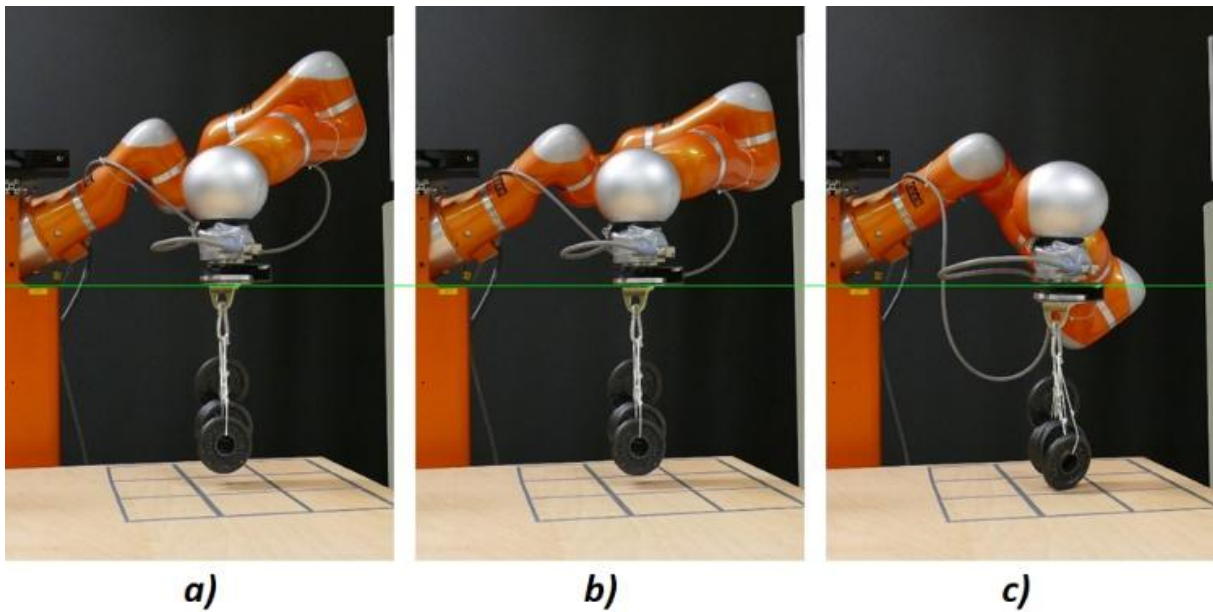
Optimizaciona metoda je primenjena na dva statička eksperimenta da bi se osim merenja i procene krutosti dobila vizuelna validacija. Radi bolje ilustracije i bez gubljenja opštosti, popustljivost završnog uređaja duž ose kretanja je optimizovana kao minimalna i kao maksimalna ostvariva vrednost za zadatu poziciju završnog uređaja, bez zadavanja numeričkih vrednosti. Uzimajući u obzir da postoji samo jedan stepen redundanse, optimizacija se završava kada jedan od zglobova dostigne svoj limit ili kada se postigne (lokalna ili globalna) optimalna vrednost.

U prvom statičkom eksperimentu, na završni uređaj robota su okačeni tegovi koji proizvode silu i dovode do otklona završnog uređaja od ravnotežnog stanja. U drugom statičkom eksperimentu robot generiše silu interakcije tako što dobija komandu da se kreće u središte predmeta u njegovoj okolini. Sila interakcije sprečava robota da ostvari željenu poziciju. U “*peg in hole*” eksperimentu, zadatak je da se valjkasti objekat ubaci predviđeni prorez u kalupu, a pri tome izbegavajući velike sile interakcije. To se postiže promenom krutosti završnog uređaja duž pravca kretanja. Ovaj eksperiment emulira tipičan primer proizvodnog procesa gde se sastavljaju dva dela.

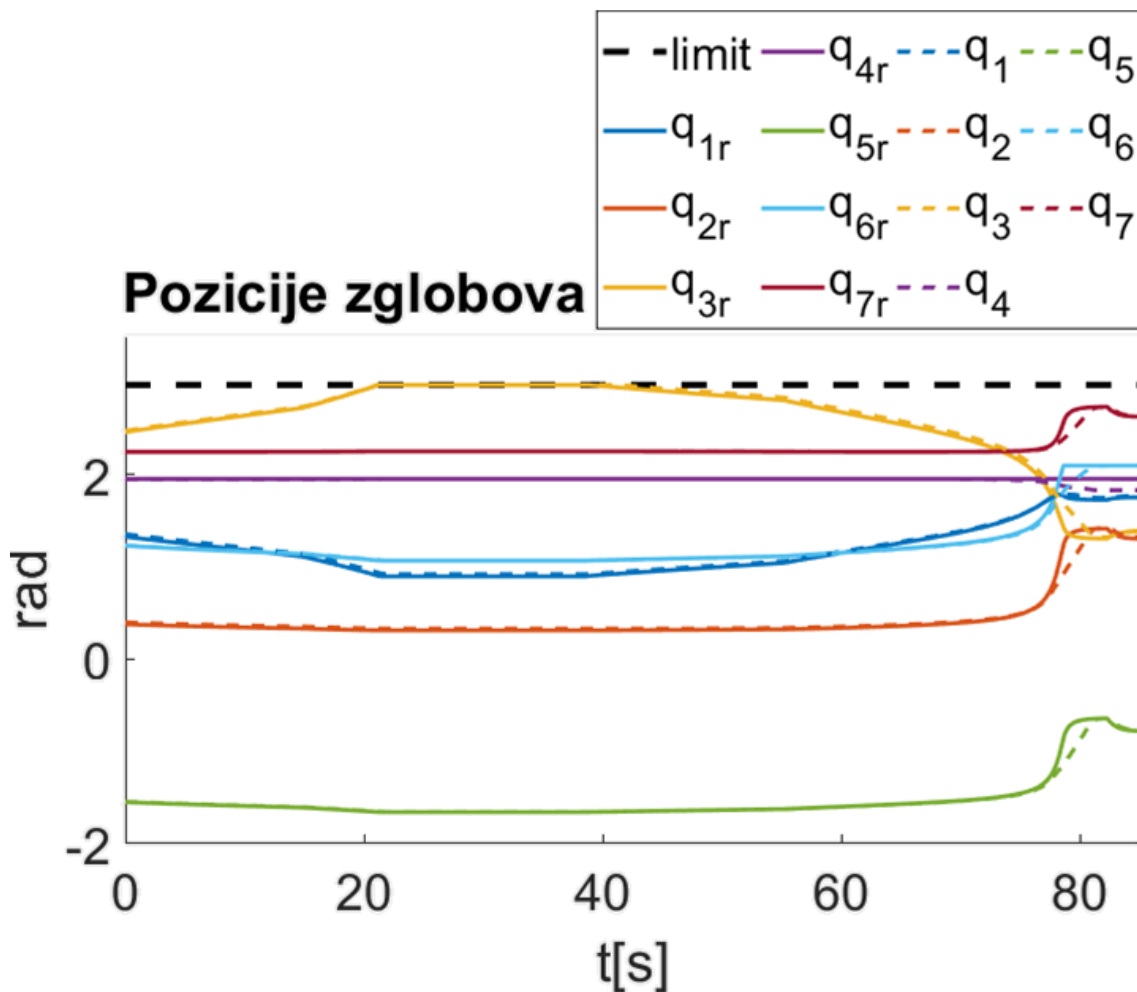
Slobodni prostor (tegovi)

U prvom eksperimentu, robot se postavlja u početni položaj, a zatim se na završni uređaj dodaje teret (tegovi), kao na Slika 35. . Slika 35. ilustruje minimalnu popustljivost duž z ose (osa normalna na površinu), dok Slika 35. ilustruje maksimalnu popustljivost. Minimalna popustljivost znači maksimalnu krutost duž z ose. Zelena linija predstavlja početni položaj prirubnice i koristi se da vizuelno ilustruje uticaj različitih položaja robota na krutost duž z ose kroz pomeraj prirubnice.

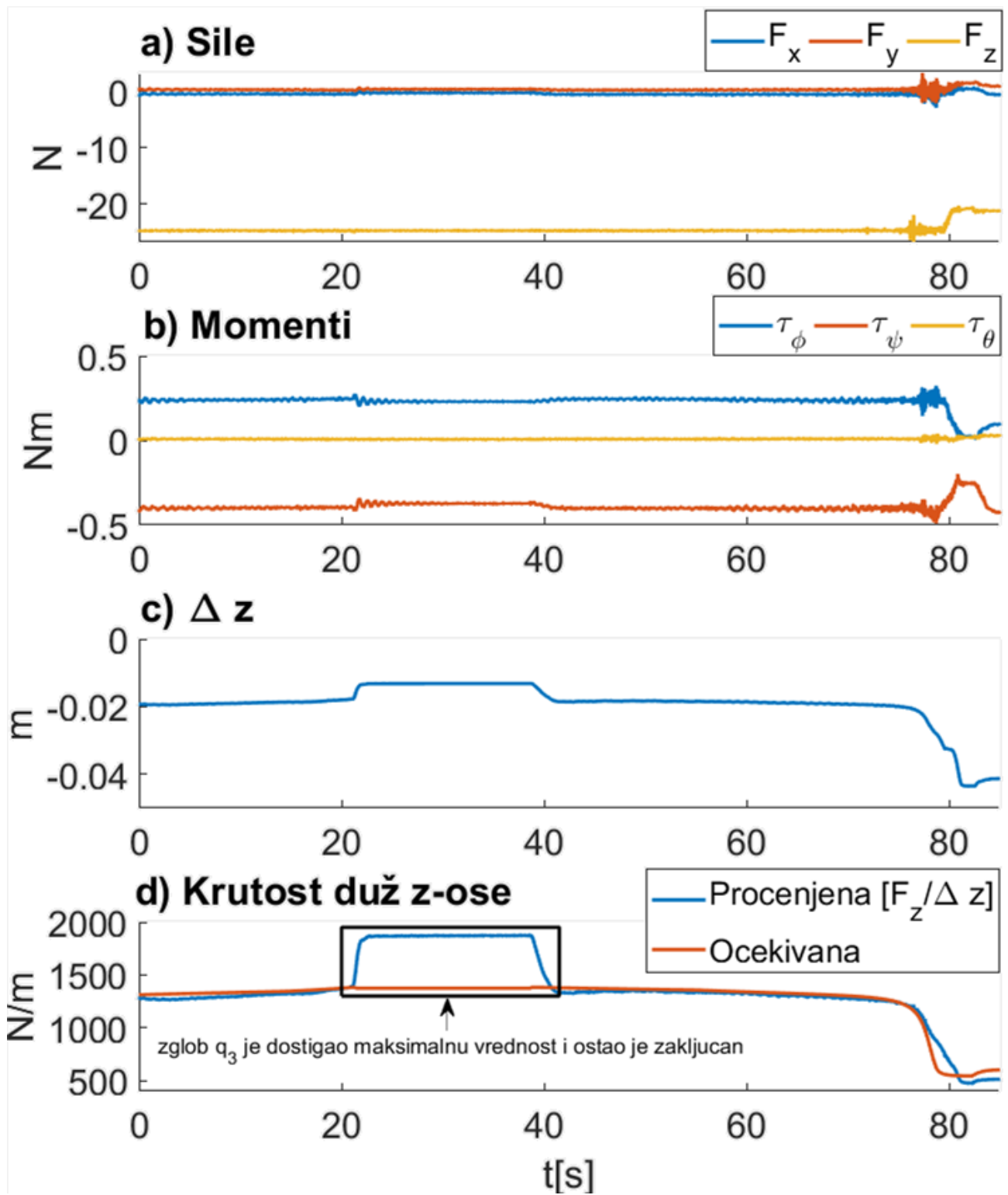
Merenja u eksperimenta sa tegovima prikazana su na Slika 36. i Slika 37. Na Slika 36. prikazan je dijagram praćenja položaja zglobova, pri čemu se položaji zglobova menjaju da bi se optimizovala popustljivost završnog uređaja. Na Slika 37. i na Slika 37. prikazana je primenjena sila i obrtni moment na završni uređaj. Sve sile i obrtni momenti, osim sile na z osi imaju zanemarljivu amplitudu, kako se i očekivalo. Oni su konstantni do $t = 78s$ kada zbog povećane popustljivost robot povinuje eksternoj sili i tegovi udaraju u sto i smanji ukupnu primenjenu silu kao što je prikazano na Slika 35. . Pomeraj duž z ose koju unosi spoljna sila dat je na Slika 37. , dok je upoređivanje procenjene krutosti kao odnosa primenjene sile i pomeraja i inverzne vrednosti popustljivosti duž z ose dato na Slika 37. . Na Slika 37. postoji odstupanje od očekivanog ponašanja za procenjenu krutost u vremenskom rasponu od $t = 20s$ do $t = 40s$. Kao što je ranije spomenuto na kraju optimizacije jedan od zglobova je dostigao svoju mehaničku graničnu vrednost i ostao zaključan, tako da robot ne može da zadrži svoja svojstva i procenjena krutost ima veću vrednost od teorijski zadate vrednosti. Ovo se može izbeći smanjenjem radnog ugla zglobova robota i pravljenjem bezbednosnog regiona, međutim, to će oslabiti performanse optimizacije zbog manjeg radnog opsega zgloba.



Slika 35. KUKA LWR robot: Uticaj konfiguracije robota na krutost duž z ose za konstantnu poziciju završnog uređaja a) minimizirana popustljivost (maksimizirana krutost); b) inicijalna konfiguracija; c) maksimizirana popustljivost (minimizirana krutost). Zelena linija označava inicijalni položaj prirubnice robota i daje vizuelni prikaz uticaja različitih konfiguracija robota na krutost završnog uređaja. z osa je osa normalna na površinu stola.



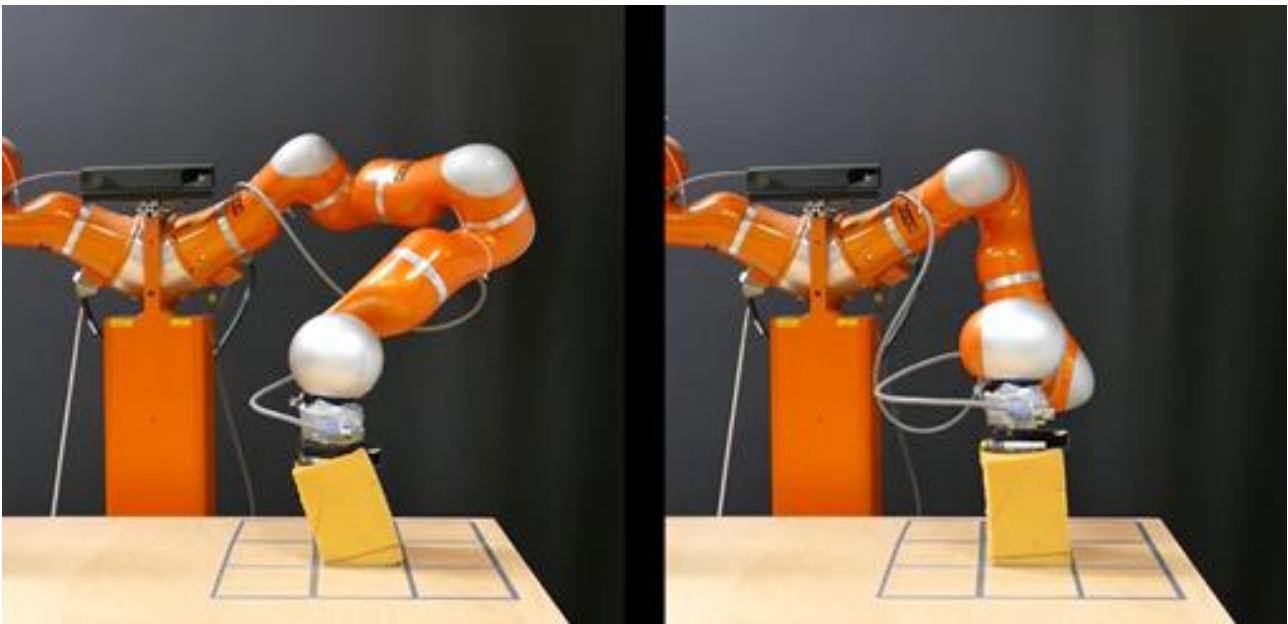
Slika 36. Praćenje trajektorije pozicija zglobova kada se robot rekonfiguriše da optimizuje popustljivost završnog uređaja pri konstantnoj poziciji završnog uređaja. Slovo „r“ u indeksu označava referentnu vrednost.



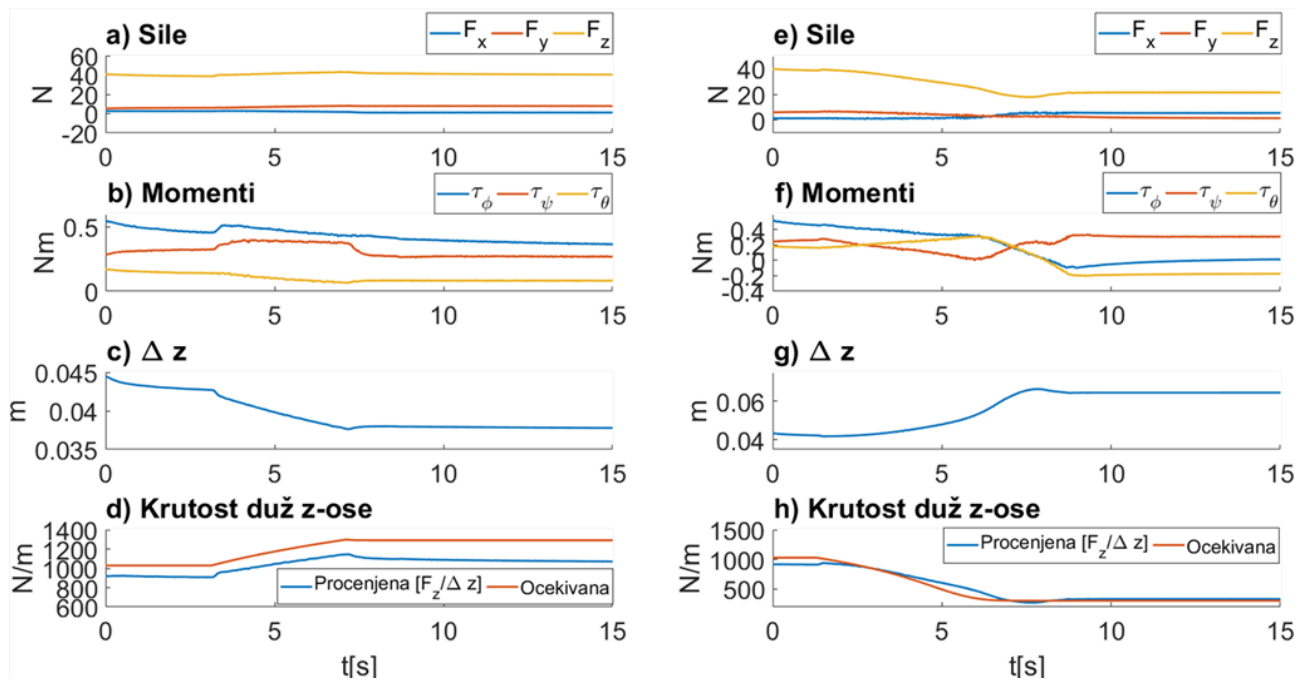
Slika 37. Eksperiment procene krutosti završnog uređaja sa tegovima. a) Ostvarena eksterna sila na završnom uređaju robota; b) Ostvareni momenti na završnom uređaju robota; c) Pomeraj duž z ose usled ostvarene sile i momenata d) Poređenje procenjene krutosti kao količnik ostvarene sile i pomeraja duž z ose i inverzne vrednosti popustljivosti duž z ose. Crni kvadrat označava konfiguraciju robota kada je zglob q_3 dostigao svoj limit i ostao zaključan uprkos primenjenoj sili, tako da robot gubi teorijski izračunata svojstva.

Završni uređaj robota u kontaktu sa površinom (sunder)

Drugi eksperiment prikazan na Slika 38. , pokazuje završni uređaj u kontaktu sa površinom. U ovom eksperimentu, završni uređaj robota kreće se prema sunderu sa referencom za krajnju tačku 5cm u područje sundera, a zatim završni uređaj podešava svoju krutost. To se ponavlja za minimiziranje i maksimiziranje krutosti duž z ose. Uticaj promene krutosti završnog uređaja ilustruje se upoređivanjem obe slike na kraju optimizacije date na Slika 38. . Merenja snimljena u toku eksperimenta su prikazana na Slika 39. Sposobnost podešavanja krutosti je takođe ograničena lokacijom radne tačke. Za poziciju na kraju radnog prostora robota manevarska sposobnosti je manja u poređenju s onom u sredini radnog prostora. Rezultati pokazuju da postoji visok stepen korelacije između procenjene i očekivane krutosti završnog uređaja. Za veću krutost, greška je nešto veća nego za nižu vrednost krutosti. Ipak, procenjene i teorijske vrednosti imaju visoku korelaciju. Takođe, mora se napomenuti da u oba slučaja jedan zglobov dostiže svoj limit i ostaje zaključan, pa deo grešaka potiče odatle.



Slika 38. Robot u kontaktu sa površinom. Levo: Konfiguracija sa manjom popustljivošću duž z ose: Desno: Konfiguracija sa većom popustljivošću duž z ose.



Slika 39. Merenja kada robot ostvari kontakt sa površinom: Optimizacija za povećavanje krutosti (levo): a) sila interakcije; b) momenti interakcije; c) pomeraj duž z ose; d) poređenje ostvarene i očekivane krutosti. Optimizacija za smanjivanje krutosti (desno): e) sila interakcije; f) momenti interakcije; g) pomeraj duž z ose; h) poređenje ostvarene i očekivane krutosti.

3.2.2.4 Eksperiment „peg in hole“

Eksperiment „peg in hole“ oponaša zadatak montaže. Zadatak robota je da stavi klip u prorez u kalupu izbegavajući velike sile interakcije. To se postiže promenom popustljivosti robota duž pravca kretanja. Valjkasti objekat se postavlja u hvataljku robota i pričvršćuje se trakom, dok se kalup stegama pričvršćuje za sto. Hvataljka sa valjkastim objektom, ukupne dužine 20cm, i kalup sa prorezom prikazani su na Slika 40. , dok je eksperimentalno okruženje prikazano na Slika 41. kao niz sekvenci koje se izvršavaju. Primenjena je strategija tako da se valjkasti objekat približava prorezu na kalupu pod uglom, zatim se rotira da valjak bude iznad proreza, a na kraju se valjak ubacuje. U ovom eksperimentu, popustljivost se podešava duž ose kretanja klipa koji se u završnoj fazi kretanja gde postoji sila interakcije poklapa sa z osom.

Trajektorija završnog uređaja se snima primenom kinestetičkog učenja [113]. Robot se ručno vodi i beleži se trajektorija u Dekartovim koordinatama u globalnom koordinatnom sistemu. Zatim se putanja kodira sa RBF (engl. “Radial Basis Functions“) [114]. RBF kodiranje trajektorije omogućava podešavanje brzine kretanja i kretanje prema napred i nazad duž snimljene putanje podešavanjem samo jednog parametra “R” koji definiše relativno stanje putanje.

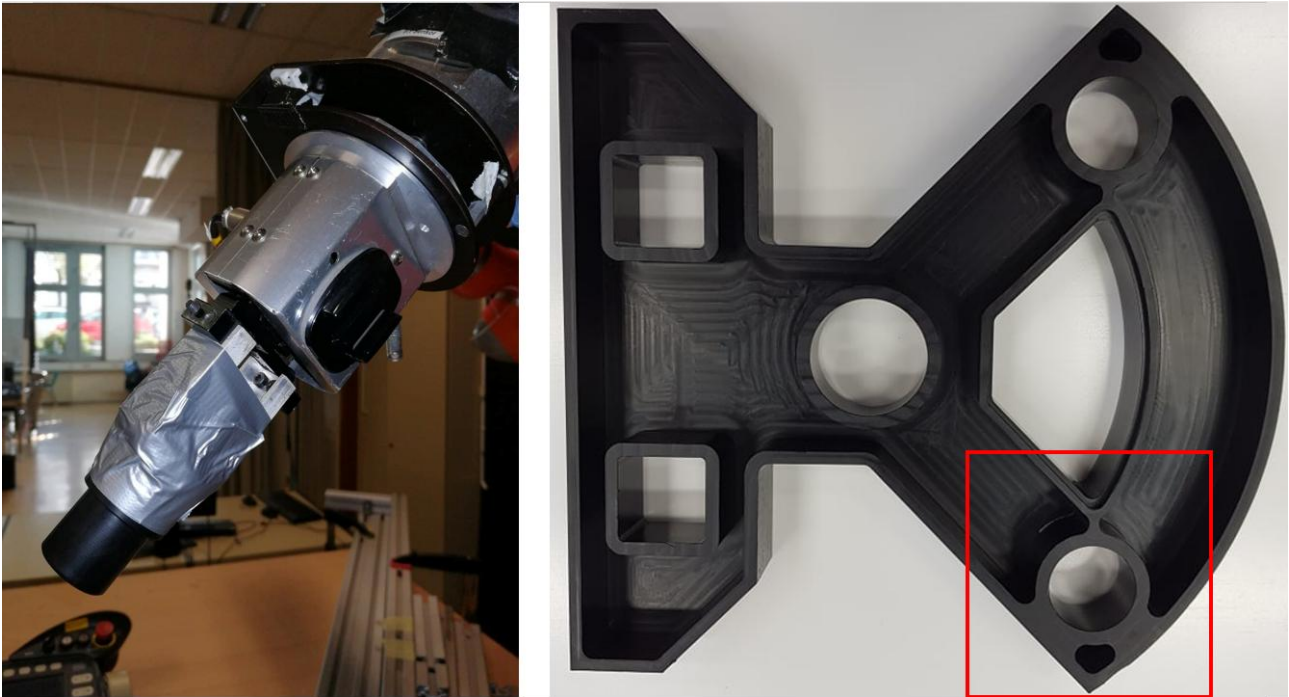
Eksperiment se sprovodi na sledeći način: Prvo definišemo maksimalni prag interakcije F_{thres} . Sve dok je intenzitet sile interakcije niži od F_{thres} , završni uređaj će nastaviti napred snimljenom trajektorijom, ako sila interakcije dosegne F_{thres} , robot će zadržati položaj i optimizacija će se aktivirati i biće aktivna sve dok se ne postigne poza sa nižom silom interakcije. Dimenzije proreza na kalupu je izabran tako da ima oštre ivice kako bi se izbeglo lako klizanje valjkastog objekta unutar proreza i da bude malo širi od klina kako bi se osiguralo da trenje postoji.

Trajektorija svih šest koordinata u globalnom koordinatnom sistemu je kodirana R parametrom $R \in [0 - 1]$, gde vrednosti 0 i 1 označavaju početak i kraj putanje. Parametar R se izračunava u diskretnom obliku kao

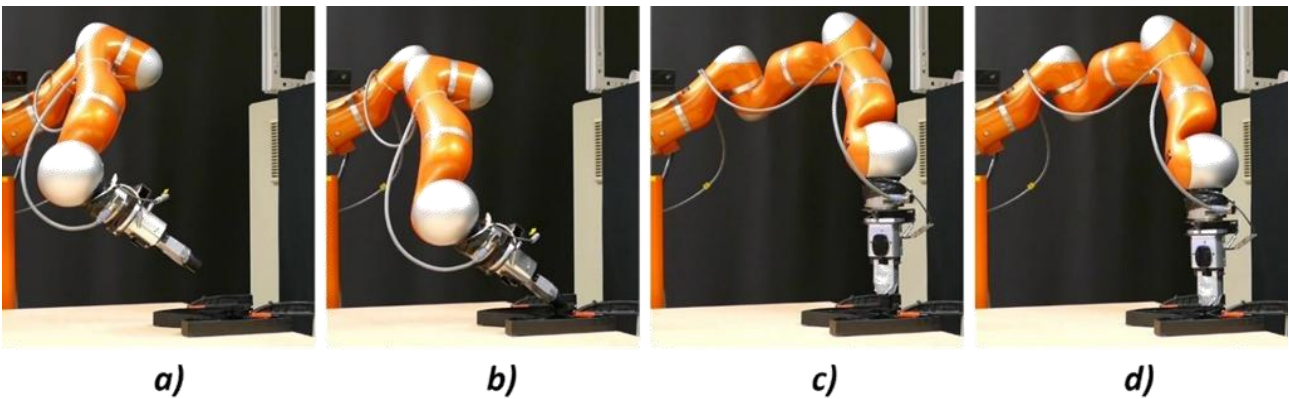
$$R_{k+1} = \begin{cases} R_k + k_f(F_{thres} - |F_z|)\Delta T, & |F_z| \leq F_{thres} \\ s_k, & |F_z| > F_{thres} \end{cases} \quad (82)$$

Parametar k_f utiče koliko brzo će se referenca napredovati kroz trajektoriju. U ovom eksperimentu parametar $k_f = 1$. Optimizacija se aktivira samo kada sila interakcije prevazilazi vrednost zadanog praga.

Merenja za „peg in hole“ eksperiment su prikazana na Slika 42. Trajektorije zglobova robota su prikazane na Slika 42. Parametar trajektorije R je prikazan na Slika 42. Aktivnost optimizacije je prikazana na Slika 42. koja se može uporediti sa trenucima kada sila interakcije prelazi zadati prag što je prikazano na Slika 42. Slika 42. prikazuje teorijski očekivanu vrednost krutosti. Vrednost se menja tokom kretanja, a naročito tokom intervala kada je optimizacija aktivna što je i zadato ponašanje.



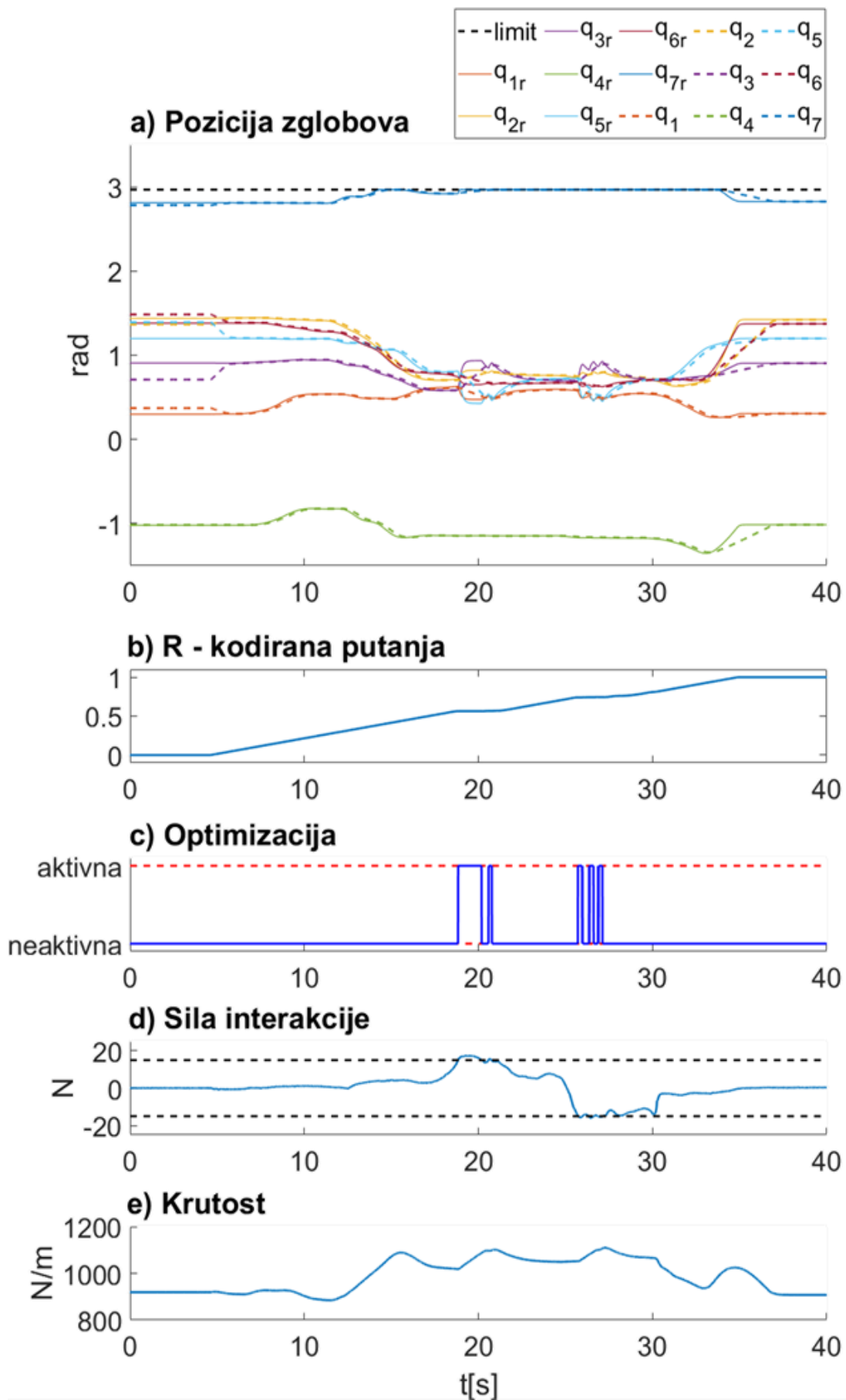
Slika 40. : Oprema korišćena za peg in hole eksperiment. Levo: Valjkasti objekat (engl. *peg*) pričvršćen u hvataljci montiran na pribudnicu robota. Desno: Kalup sa oštrim ivicama na prorezima u koji se stavlja valjkasti objekat (označeno crvenim kvadratom).



Slika 41. : Ilustracija korak po korak „*peg in hole*“ eksperimenta: a) inicijalna pozicija; b) kretanje objekta ka prorezu u kalupu pod oštrim uglom; c) Rotiranje završnog uređaja u položaj direktno iznad proreza; d) ubacivanje objekta u prorez.

Demonstracija rade je prikazana na linku:

<http://fornextcobot.etf.bg.ac.rs/sr/naslovna/2021/05/17/video-materijal/>



Slika 42. Merenja za „peg in hole“ eksperiment: a) ostvarene i zadate vrednosti pozicije zglobova; b) stanje putanje; c) aktivnost optimizacionog algoritma; d) sila interakcije; e) procena krutosti na osnovu modela.

3.2.3 Upravljanje krutošću završnog uređaja robota zasnovano na simultanoj promeni kinematičke konfiguracije i krutosti u zglobovima

Osim preko matrice krutosti, krutost završnog uređaja je moguće oblikovati preko elipse krutosti. U ovom podpoglavlju predložen je *offline* pristup oblikovanja krutosti završnog uređaja robota, priomenom optimizacionih algoritama, koji je predviđen za planiranja kada je zadatak u napred poznat, pa samim tim i trajektorija završnog uređaja. Primenjena su dva kriterijuma koji kombinuju oblik i grešku orijentacije elipsoida. Oblikovanje elipsoida krutosti se ostvaruje kombinacijom nultog prostora i krutosti u zglobovima. Optimizacioni algoritmi su primenjeni na simulacionom modelu KUKA LWR robota na primeru ravanskog kretanja u „xy” ravni, kada se završni uređaj robot i kada se kreće po krivoj putanji.

Optimizacioni algoritmi koji su korošćeni su zasnovani na SLSQP (engl. *Sequential Least Square Programming*) [107, 115, 116], a implementirani su Matlab-u. SLSQP je algoritam koji optimizuje vrednosti nelinearnih kriterijumskih funkcija sa linearnim i nelinearnim ograničenjima. Ograničenja koja postoje u predloženim optimizacionim algoritmima se odnose na vrednosti zglobova robota koje su date u Tabela 1, i na definisani opseg krutosti koje robot može da ostvaruje. Nelinearna ograničenja koja moraju biti zadovoljena se odnose na kinematiku. Optimizacioni algoritam uvek mora da zadovolji željenu poziciju završnog uređaja robota.

Kako zbog prirode zadatka, pozicija zadnjeg zgloba ne utiče na položaj završnog uređaja, već samo na ugao orijentacije oko z ose, njegova vrednost je zaključana na 0°. Na taj način robot ima 6 stepeni slobode na raspolaganju za izvršavanje zadatak. Usvojen je da raspon krutosti zglobova bude 1-100Nm/rad. Ovo se može usvojiti bez gubljenja opštosti, jer bitan je relativan odnos krutosti u zglobovima za orijentaciju i odnos osa elipsoida krutosti. Naknadno preko CMS-a se podešava i volumen.

Prvi predloženi kriterijum (f_1) usmerava elipsoid i maksimizira krutost duž pravca kretanja, zadavajući minimalni odnos dijagonala elipsa. Drugi kriterijum (f_2) usmerava elipsoid duž pravca kretanja, ali zadajući tačan odnos dijagonala elipse. Predložene optimizacione metode imaju za cilj da doprinesu planiranju trajektorije i krutosti zglobova prilikom izvršavanja zadataka.

Maksimiziranje krutosti duž pravca kretanja

Oblikovanje elipsoida krutosti moguće je ostvariti primenom kriterijumske funkcije definisane kao

$$f_1 = \frac{|\alpha_{error}| + c}{\min\left(\frac{r_{max}}{r_{min}}, r\right) / r} \quad (83)$$

gde α_{error} označava grešku orijentacije elipsoida u stepenima, r je minimalni željeni odnos osa elipsoida, r_{max} i r_{min} su najduža i druga po dužini osa elipsoida, dok je c pozitivna konstanta koja omogućava optimizaciju kada je apsolutna greška orijentacije elipsoida $|\alpha_{error}| = 0^\circ$. Usvojena je vrednost $c = 0.01$.

U svakoj iteraciji računaju se pozicije i krutosti zglobova koje minimiziraju vrednost funkcije f_1 kao

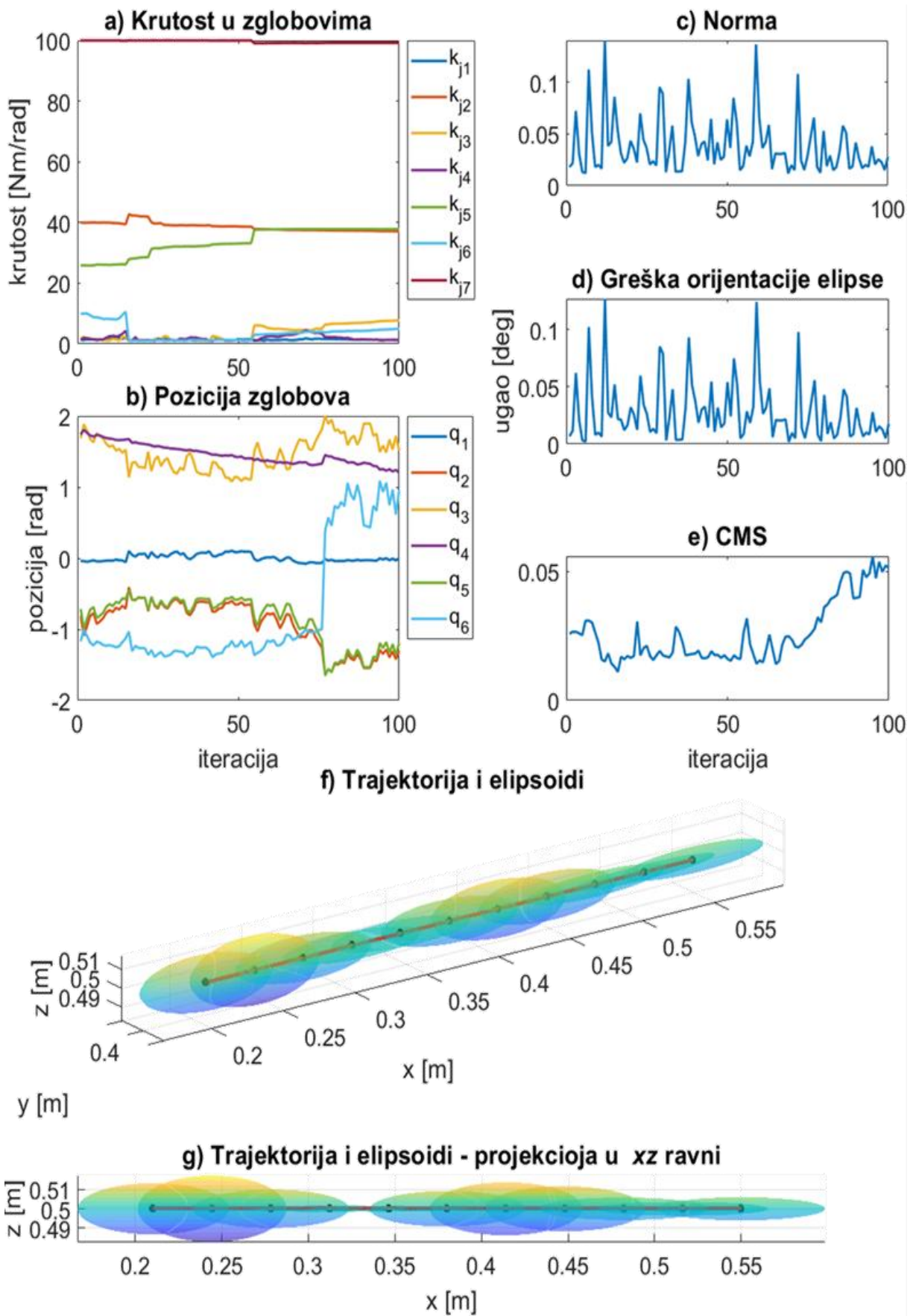
$$\begin{bmatrix} q[p] \\ k_j[p] \end{bmatrix} = \underset{\substack{q \in [q_{min}, q_{max}] \\ k_j \in [k_{j_{min}}, k_{j_{max}}]}}{\operatorname{argmin}} f_1(q, k_j), \quad (84)$$

gde je p redni broj iteracije, a $q_{min}, q_{max}, k_{j_{min}}$ i $k_{j_{max}}$ su minimalne i maksimalne vrednosti pozicija i krutosti zglobova. Opseg vrednosti promenljivih u optimizacionom algoritmu se može dodatno suziti, i samim tim smanjiti prostor pretrage i ubrzati algoritam pretrage u svakoj iteraciji. Nove granične vrednosti varijabli ($q_{min_iter}, q_{max_iter}, k_{j_{min_iter}}$ i $k_{j_{max_iter}}$) u svakoj iteraciji se računaju uzimajući u obzir maksimalne brzine promene koje robot može da ostvari u okviru jedne iteracije (za pozicije zglobova - Δq , za krutost zglobova - Δk_j) i fizički ostvarive vrednosti kao

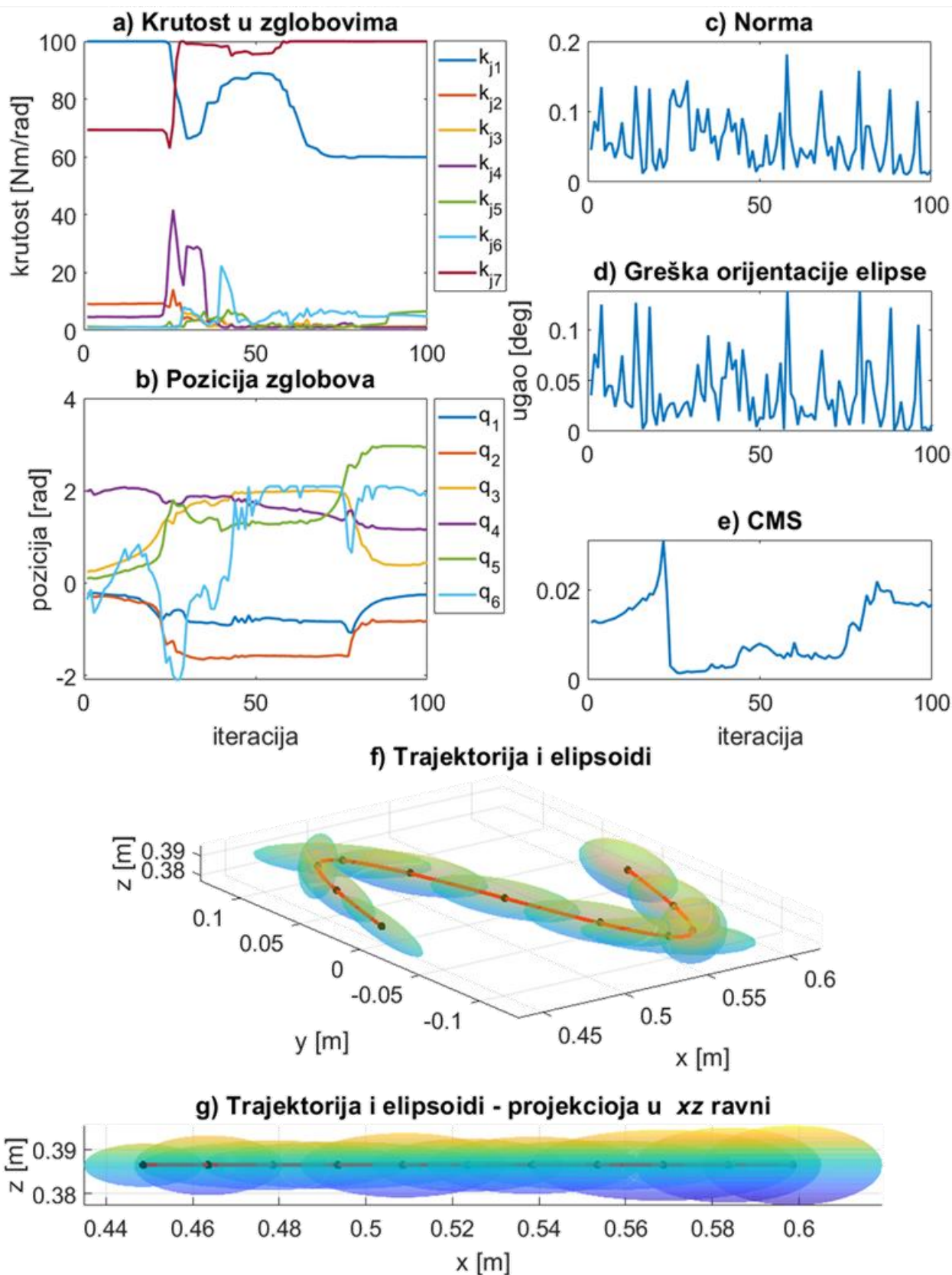
$$\begin{aligned} q_{min_iter}[p] &= \max(q_{min}, & q[p-1] - \Delta q), \\ q_{max_iter}[p] &= \min(q_{max}, & q[p-1] + \Delta q), \\ k_{j_{min_iter}}[p] &= \max(k_{j_{min}}, & k_j[p-1] - \Delta k_j), \\ k_{j_{max_iter}}[p] &= \min(k_{j_{max}}, & k_j[p-1] + \Delta k_j). \end{aligned} \quad (85)$$

To je računski zahtevan posao i nije ga jednostavno implementirati da radi u realnom vremenu, ali moguće ga je iskoristiti u fazi planiranja krutosti i trajektorije zglobova i završnog uređaja. Simlacioni rezultati su prikazani na slici Slika 43. Za primer pravolinijskog kretanja i na slici 44 za primer krivolinijskog kretanja. Na slici Slika 43. je prikazana krutosti u zglobovima, a na Slika 43. pozicija zglobova. Slika Slika 43. prikazuju vrednost (normu) optimizacione funkcije, dok Slika 43. ilustruje grešku orijentacije. Slika 43. je CMS kojim su skalirane elipsoidi krutosti sa slike Slika 43. da bi se dobili skalirane elpsoidi. Slika 44. predstavlja rezultate za krivolinijsko kretanje. Redosled grafika na slici Slika 44. je identičan onima sa slike Slika 43. .

Primenjena optimizaciona funkcija i algoritam su ostvarili zadati cilj, da elipsoid ima željeno usmerenje i minimalni odnos osa. Dobijeni CMS skalira elipse da bi bile uporedive. Dobijene elipsoide moguće je dodatno preskalirati da se dobije željena amplituda, ali samo po jednoj od osa. Da bi bilo moguće potpuno oblikovati elipsoid krutosti, potrebno je modifikovati kriterijumsku funkciju.



Slika 43. Simulacioni rezultati za oblikovanje elipsoida krutosti na primeru pravolinijskog kretanja kada je zahtev da odnos osa elipsa bude minimalno 5:1: a) krutost u zglobovima; b) pozicija zglobova; c) norma (vrednost kriterijumske funkcije); d) greška orijentacije; e) CMS; f) trajektorija i elipsoidi; g) trajektorija i elipsoidi- projekcija u xy ravni.



Slika 44. Simulacioni rezultati za oblikovanje elipsoida krutosti na primeru krivolinijskog kretanja kada je zahtev da odnos osa elipsa bude minimalno 5:1: a) krutost u zglobovima; b) pozicija zglobova; c) norma (vrednost kriterijumske funkcije); d) greška orijentacije; e) CMS; f) trajektorija i elipsoidi; g) trajektorija i elipsoidi- projekcija u xz ravni.

Oblikovanje elipsoida krutosti

Da bi se elipsoid krutosti potpuno oblikovala neophodno je da budu ostvareni sledeći zahtevi:

- 1) željeni pravac orijentacije elipsoida,
- 2) tačan odnos osa elipsoida,
- 3) magnitude osa elipsoida.

Kada su prva dva uslova zadovoljena, treći se ostvaruje primenom CMS-a na već oblikovanu elipsu. Da bi prva dva uslova mogla simultano da se optimizuju, predložena je modifikovana kriterijumska funkcija koja kombinuje grešku orijentaciju i odnos osa elipse

$$f_2 = (1 + |\alpha_{error}|) \left(1 + \left| r - \frac{r_{max}}{r_{min}} \right| \right). \quad (86)$$

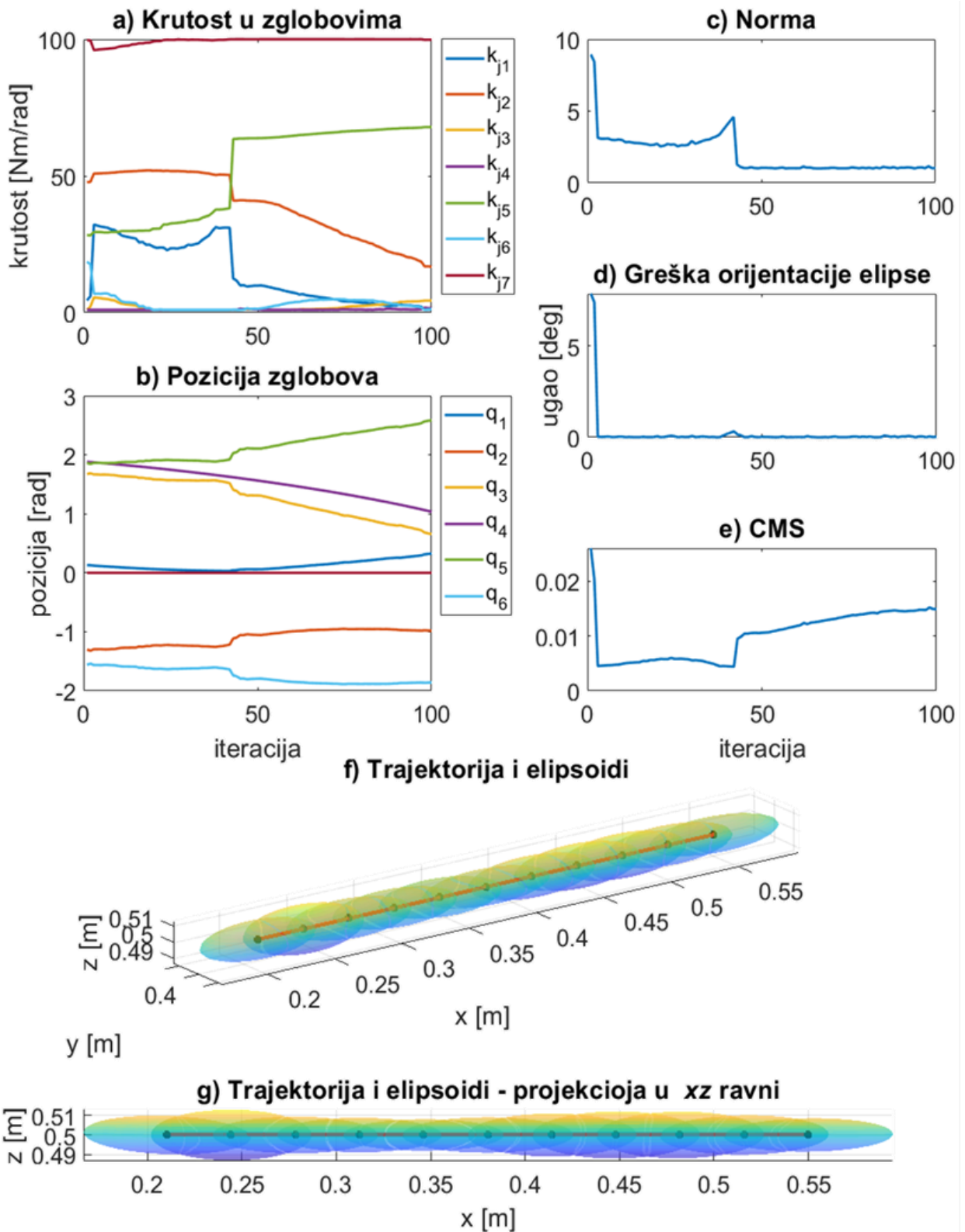
Pozicije i krutosti zglobova u svakoj iteraciji se računaju identično kao i u prethodnom primeru opisanom u jednačinama (84) i (85) samo je optimizaciona funkcija promenjena i definisana kao f_2 .

Funkcija je modifikovana tako da penalizuje svaku grešku orijentacije, i svako odstupanje odnosa osa od željenog odnosa. Zadati su zahtevi da je greška orijentacije $\alpha_{error} = 0^\circ$, a odnos osa elipse $r = 5$.

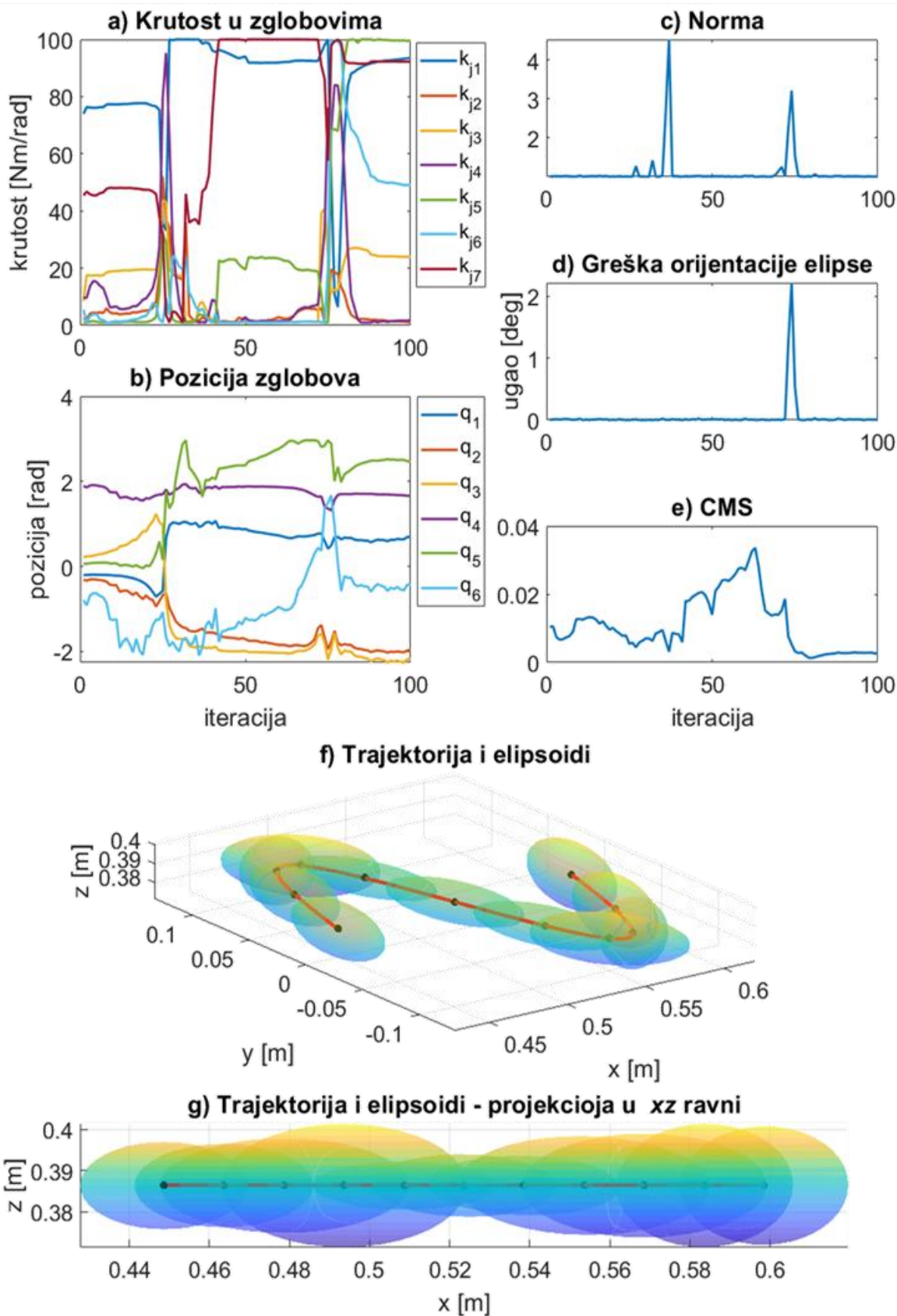
Simlacioni rezultati su prikazani na slici Slika 43. Za primer pravolinijskog kretanja i na slici 46 za primer krivolinijskog kretanja. Na slici Slika 43. je prikazana krutosti u zglobovima, a na Slika 43. pozicija zglobova. Slika 43. prikazuju vrednost (normu) optimizacione funkcije, dok Slika 43. ilustruje grešku orijentacije. Slika 43. je CMS kojim su skalirane elipsoidi krutosti sa slike Slika 43. da bi se dobili skalirane elpsoidi. Slika 44. predstavlja rezultate za krivolinijsko kretanje. Redosled grafika na slici Slika 44. je identičan onima sa slike Slika 43. .

Primenjena optimizaciona funkcija i algoritam su ostvarili zadati cilj, da elipsoid ima željeno usmerenje i odnos osa. Dobijeni CMS skalira elipse da bi bile uporedive. Dobijene elipsoide moguće je dodatno preskalirat da se dobije željena amplitude, ali samo po jednoj od osa. Da bi bilo moguće potpuno oblikovati elipsoid krutosti, potrebno je modifikovati kriterijumsku funkciju.

Algoritam je ostvario zadati cilj da elipsa ima željeno usmerenje i odnos osa. Dobijene rajektorije zglobova slične onima sa slike Slika 43. Krutost ima manje promene vrednosti, ali izraženije od onih sa slike Slika 43. Dobijeni CMS skalira elipse da bi bile uporedive. Rezultati pokazuju da svi elipsoidi imaju željeni oblik ili oblik koji je jako blizak željenom. Dobijene elipsoide moguće je dodatno preskalirat da se dobije željena amplitude osa.

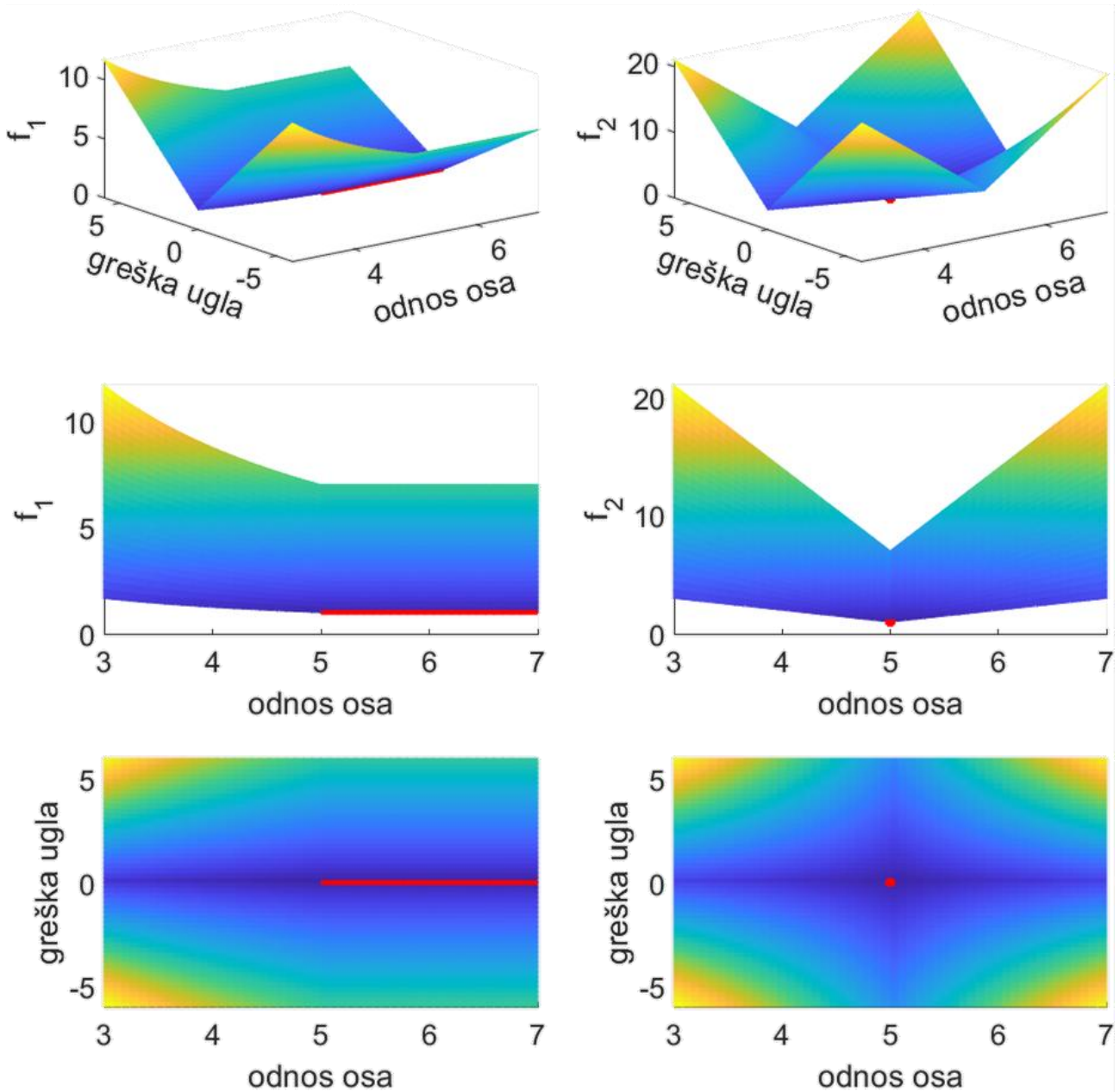


Slika 45. Simulacioni rezultati za oblikovanje elipsoida krutosti na primeru pravolinijskog kretanja kada je zahtev da odnos osa elipsa bude tačno 5:1: a) krutost u zglobovima; b) pozicija zglobova; c) norma (vrednost kriterijumske funkcije); d) greška orijentacije; e) CMS; f) trajektorija i elipsoidi; g) trajektorija i elipsoidi- projekcija u xy ravni.



Slika 46. Simulacioni rezultati za oblikovanje elipsoida krutosti na primeru krivolinijskog kretanja kada je zahtev da odnos osa elipsa bude tačno 5:1: a) krutost u zglobovima; b) pozicija zglobova; c) norma (vrednost kriterijumske funkcije); d) greška orijentacije; e) CMS; f) trajektorija i elipsoidi; g) trajektorija i elipsoidi- projekcija u xy ravni.

Slika 47. ilustruje vrednosti funkcija u zavisnosti od greške orijentacije i odnosa osa elipse, a crvena boja označava minimum funkcije koji je u slučaju f_1 definisan kao prava, dok u slučaju f_2 kao jedna tačka. Samim tim je jasno da je optimalni set za f_2 koji je konzervativniji mnogo teže zadovoljiti nego u slučaju labavijih zahteva kriterijumske funkcije f_1 . Ostvarivanje optimalnog rešenja u svakoj iteraciji uslovljeno je fizičkim ograničenjima samog robota.



Slika 47. Oblici kriterijumskih funkcija u zavisnosti od greške orijentacije i odnosa osa elipsi. Crvena boja označava minimum funkcije koji je u slučaju f_1 definisan kao prava, dok u slučaju f_2 kao jedna tačka

3.3 Kombinacija aktivne i pasivne krutosti

Analiza data u ovom podpoglavlju oslanja se na istraživanja prikazana u [89, 90, 117]. Korišćeno je impedansno upravljanje koje je zasnovan na tačnom deкупlovanju dinamike obrtnog momenta za robote sa popustljivim zglobovima. Prikazani rezultati demonstriraju kako SEA utiče na dinamiku kontrole Kartezijanske impedance završnog uređaja. Naveden je doprinos SEA ukupnoj dinamici obrtnog momenta zgloba kojim se postiže Kartezijanska kontrola impedanse. Bez obzira na to da li se krutost postiže sa SEA – torzionom oprugom, antagonistički spregnutim pogonima ili na neki drugi način, postavljaju se neka ograničenja u upravljanju. Ova ograničenja nameće mehanika sistema i ona se mora uzeti u obzir pri dizajniranju robota koji su popustljivi.

Ovde će biti analiziran model robota sa dva stepena slobode koji je prikazan na slici Slika 27. , a koji je umesto krutih aktuatora pogonjen sa SEA tako da je veza između aktuatora i segmenta robota istovetna onoj sa Slika 2. . Dinamika robota sa SEA je ista kao i za robot pogonjen krutim aktuatorima, kao i jednačine koje opisuju kontroler za impedansno upravljanje. Tako da za robot pogonjen sa SEA važe jednačine (26)-(41). Za robot pogonjen sa SEA u odnosu na robot pogonjen sa krutim aktuatorom pokretački momenat koji se razvija na segmentima robota nije jednak momentu motora, već zavisi od parametara elastičnog prenosa. Jednačine (5)-(7) koje opisuju dinamiku jednog SEA se mogu za uprošćeni model (bez prigušenju u oprugama $D_m = 0$) napisati u matricnom obliku za robot koji ima više stepeni slobode, pa za primer sa dva stepena slobode važi $I_j = \text{diag}(I_{j1}, I_{j2})$

$D_j = \text{diag}(D_{j1}, D_{j2})$, $\tau_j = [\tau_{j1} \ \tau_{j2}]^T$, $I_m = \text{diag}(I_{m1}, I_{m2})$, $\tau_m = [\tau_{m1} \ \tau_{m2}]^T$, $K_s = \text{diag}(k_1, k_2)$, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ i $q = [q_1 \ q]^T$. Na osnovu jednačina (5), (6) i (26) potpuni dinamički model će imati oblik

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ H(q)^{-1} (K(\theta - q) - J(q)^T F_{int} - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q))_{2 \times 1} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ I_m^{-1} (\tau_m - K_s(\theta - q))_{2 \times 1} \end{bmatrix}. \quad (87)$$

Vektor obrtnog momenta koji deluje na segmente robota definisan je kao $\tau_j = K_s(\theta - q)$, pa je njegov drugi izvod jednak

$$\ddot{\tau}_j = K_s(\ddot{\theta} - \ddot{q}), \quad (88)$$

odakle sledi

$$\ddot{\theta} = K_s^{-1} \ddot{\tau}_j + \ddot{q}. \quad (89)$$

kombinovanjem (26) i (89) za upravljačke obrtne momente motora

$$\tau_m = u + I_m H^{-1} \left(\tau_j - J(q)^T F_{int} - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) \right), \quad (90)$$

$$u = I_m K_s^{-1} \ddot{\tau}_j + \tau_j, \quad (91)$$

gde je u nova upravljačka varijabla.

Uvođenjem greške aktuacije (τ_e) kao posledica sile interakcije, koja predstavlja razliku ostvarenog momenta koji deluje na zglobove robota (τ_j) i željenog momenta (τ_d), tako da važi $\tau_e = \tau_j - \tau_d$. Jednačine koje opisuju sistem kojim se upravlja (26), (31) i (91) postaju

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau_d + \tau_e - J(q)^T F_{int}, \quad (92)$$

$$\Lambda(q)\dot{X} + \Gamma(q, \dot{q})\dot{X} + \eta(q) = J(q)^{-T}(\tau_d + \tau_e) - F_{int}, \quad (93)$$

$$u = I_m K_s^{-1}(\ddot{\tau}_d + \dot{\tau}_e + K_s I_m^{-1} \tau_e) + \tau_d, \quad (94)$$

gde se dobija da je nova upravljačka varijabla u u funkciji drugog izvoda greške upravljačkog momenta. Usvajajući da željeno ponašanje varijable u ima oblik

$$u = \tau_d + I_m K_s^{-1}(\ddot{\tau}_d - K_v \dot{\tau}_e - K_p \tau_e), \quad (95)$$

i zamenom u (94) dobija se

$$\ddot{\tau}_e + K_v \dot{\tau}_e + (K_p + K_s I_m^{-1}) \tau_e = 0, \quad (96)$$

gde su K_v i K_p parametri kontrolera. Na ovaj način se obezbeđuje dekoplovano upravljanje dinamikom momenta, tako da jednačine (92) i (96) definišu sistem u kaskadnoj formi, dok je dinamika sistema sa zatvorenim povratnim spregama definisana sa (93) i (96).

4 Upravljanje krutošću na nivou zgloba robota

Novija istraživanja se fokusiraju na razvoj kontrolnih metoda za istovremenu kontrolu položaja i krutosti, kao što je feedback linearizacija za dekuplovanu kontrolu pozicije i krutosti sa detekcijom sudara zasnovanom na momentu [6, 118], kontrola impedanse sa statičkim dekuplerom [19], ili koncept puller–follower gde se problemi upravljivosti prevazilaze prelaskom na kontrolu položaj-sila [26, 119]. Međutim, svi navedeni pristupi propuštaju eksperimentalnu validaciju, koja bi omogućila širu upotrebu prikazanih rezultata. Adaptivna kontrola neuronom mreže žičano pogonjenih mehanizma je eksperimentalno potvrđena [27], ali je istakla i probleme stabilnosti uz prisustvo nemodelirane dinamike.

Postoje istraživanja koja predstavljaju uspešne primenjene simulacije kontrole pozicije i krutosti antagonističkog VSA: „*backstepping*“ kontrola primenjena na antagonistički pogonjen prst sa fleksibilnim tetivama [120], ili impedansni kontroler zgloba sa kontrolom zatezne sile sajle koji je predložen u [20]. U oba slučaja, struktura upravljanja je izvedena korišćenjem analitičkog modela. Nijedna široko prihvaćena praktična primena ovih metoda nije postignuta zbog velike zavisnosti od modela upravljanja, tako da rezultati istraživanja prikazani u disertaciji predstavljaju nadogradnju ka primeni simultane kontrole krutosti i pozicije. Problemi u praktičnoj implementaciji upravljanja antagonističkim aktuatorima sa elastičnim prenosom sa kaskadnom šemom ukazani su u [121, 122]. U ovom radu, problemi su rešeni identifikacijom parametara zatvorene petlje i posledično, projektovanjem robusne upravljačke šeme sa smernicama za podešavanje parametara. Upravljačka struktura sa dekuplerom omogućava nezavisne regulacione petlje za položaj i krutost aktuatora, gde se parametri kontrolera u svakoj petlji podešavaju sa varijacijom samo jednog parametra λ (uopšteno govoreći, petlja pozicije i krutosti imaju različite λ). Prema tome, kompromis između performansi i robusnosti je napravljen podešavanjem λ . Detaljnije objašnjenje podešavanja kontrolera i njegovog uticaja na performanse biće predstavljeno u poglavlju 4.3.1.5.

Decentralizovano praćenje putanje [123, 124] je metod gde se komponenta unapred uči u iterativnoj proceduri da bi imala dobre performanse praćenja putanje uz minimiziranje uticaja komponente povratne sprege. *Feedforward* ne utiče na krutost robota; tako je očuvana prirodna mekoća robota. Nedostaci ove metode, u odnosu na predloženu metodu su što je za svaku novu putanju potrebno ponavljati metod učenja, što može potrajati.

Pristupi očuvanja elastične strukture (ESP) i ESP+ [125] manje menjaju dinamiku sistema od kontrole zasnovane na linearizaciji sa povratnom spregom i imaju za cilj da minimiziraju dinamičko oblikovanje i očuvaju elastičnu strukturu sistema. Ograničenje ovog pristupa je to što zakon upravljanja zasnovan na modelu zahteva izvode višeg reda pozicija sementa, dok je u predloženoj strukturi zakon upravljanja bez modela i koristi samo informacije o aktuatorima i pozicijama segmenta.

U skladu sa svim što je prethodno rečeno, istraživanje predstavljeno u tezi uvodi konvencionalni inženjerski pristup kontroli bioinspirisanog žičano pogonjenog antagonističkog popustljivog aktuatora kao koncept novog široko prihvaćenog bezbednog i efikasnog robotskog rešenja u okruženju usmerenom na čoveka. Upravljanje se sprovodi bez poznavanja tačnog matematičkog modela aktuatora (tj. parametara nelinearnih karakteristika opruge, funkcije prenosa jednosmernog motora, koeficijenta efikasnosti prenosa, trenja, itd.) ali korišćenjem široko prihvaćenih alata za identifikaciju modela aktuatorskog sistema. Dakle, pristup se lako može primeniti na druge tipove antagonističkih VSA jer se tačni VSA parametri retko proizvode da u potpunosti odgovarali njegovom mehaničkom dizajnu zbog složenosti njihove strukture. U radu se predlaže kontrolna šema i postupak za podešavanje kontrolera antagonističkih VSA koji je lak za implementaciju dok se sajle drže pod tenzijom kako bi se sprečilo opuštanje. Identifikovane funkcije prenosa predstavljaju lokalno linearno ponašanje sistema; prema tome, kontroleri su podešeni da zadovolje kriterijume stabilnosti za linearne sisteme sa određenom dozom robusnosti. Dizajn upravljanja je

pojednostavljen na izbor jednog parametra za ustupak između performansi i robusnosti, koji oblikuje sve parametre u uvedenoj strukturi upravljanja.

U ovom pristupu, predstavljena je kaskadna kontrolna struktura za kontrolu poziciju i krutosti antagonističkih VSA, gde se podešavanje kontrolera postiže na osnovu identifikovane dinamike sistema. Kaskadna kontrolna struktura daje bolje performanse za praćenje reference od klasičnog sistema kontrole sa jednom petljom [126]. Predloženi pristup daje jednostavnu proceduru za projektovanje upravljanja kroz podešavanje parametra λ . Neki radovi [127, 128, 129] daju uvid u to kako se parametri kontrolera podešavaju kao funkcija parametra λ . Predloženi pristup ne zahteva prethodno poznavanje modela sistema niti izvoda višeg reda i lako ga je implementirati u realnu postavku.

U ovom poglavlju biće prikazan razvoj, modeliranje i kaskadna upravljačka struktura žičano pogonjenog antagonističkog VSA. Modeliranje je izvedeno identifikacijom parametara sistema, za koji su projektovani robusni kontroleri. Kako predložena upravljačka struktura zahteva dekupler između pogonskih motora i pozicija i krutosti aktuatora koji može biti nelinearan i kompleksan da nije moguće analitički projektovati dekupler, predloženo je rešenje u vidu neuralne mreže. Neuralna mreža na osnovu seta za obuku mapira parameter pogonskih motora i osovine aktuatora igra ulogu dekuplera.

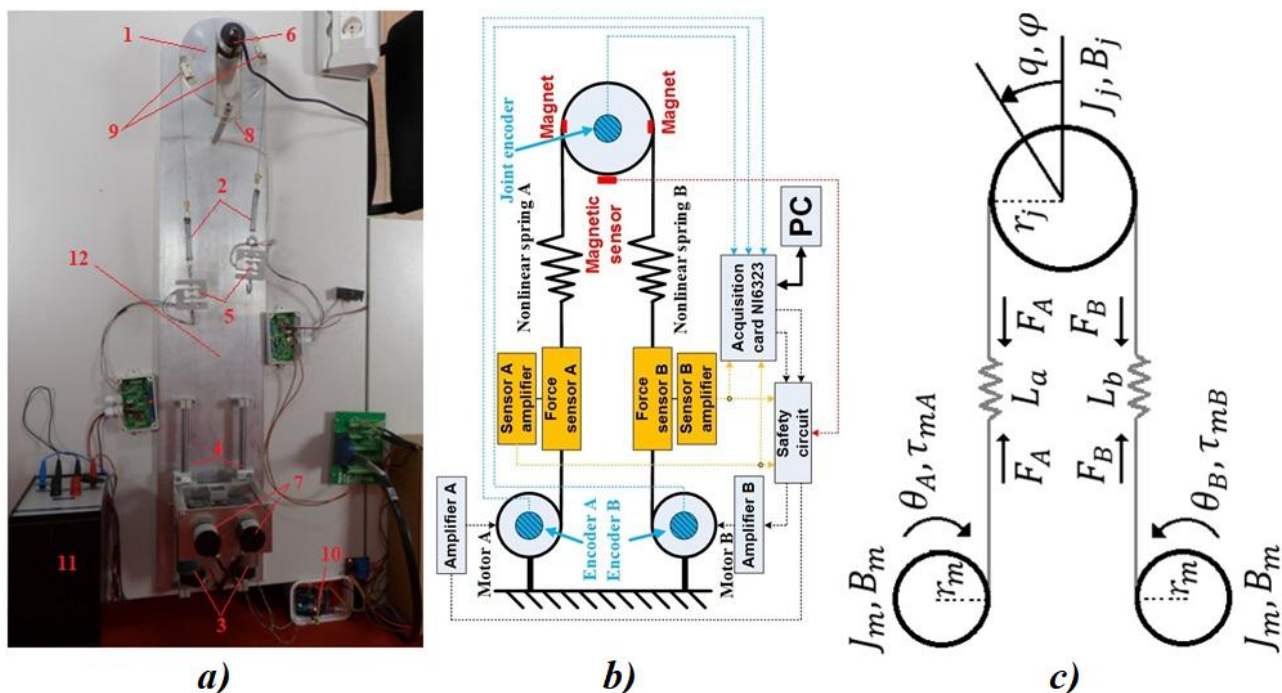
4.1 Žičano pogonjeni antagonistički aktuatora promenljive krutosti: Razvoj prototipa

Slika 48. prikazuje hardversku realizaciju konstrukcije žičano pogonjenog antagonističkog VSA, konstruisanog na Univerzitetu u Beogradu na Elektrotehničkom fakultetu u Laboratoriji za robotiku. Laboratorijska postavka se sastoji od sledećih komponenti:

- 1) izlazna osovina,
- 2) nelinearne kompresione opruge (sa kvadratnom karakteristikom),
- 3) dva Dunker GR42X25 DC motora sa Dunker SG45 reduktorom odnosa 15:1,
- 4) klizni mehanizam za podešavanje početne zatezne sile,
- 5) dva TAL501L senzora sile proizvedena od strane HT Sensor Technology, koji mere zateznu silu,
- 6) ISC3806-003E-1000BZ3-5-24F inkrementalni enkoder za praćenje pozicija izlazne osovine,
- 7) dva inkrementalna enkodera DHC40M6-2000 za praćenje pozicija na izlazu iz reduktora,
- 8) magnetni senzor krajnjeg položaja osovine aktuatora,
- 9) magneti postavljeni na graničnim pozicijama osovine aktuatora,
- 10) sigurnosni modul,
- 11) izvor napajanja i
- 12) postolja.

Struktura aktuatora je pričvršćena za aluminijumsku ploču koja služi kao postolja aparature. Sam antagonistički aktuator je pozicioniran na klizačima koji se koriste za podešavanje zatezanja opruge (podešavanje početne zatezne sile), kao i za lakšu zamenu opruga ako se koriste opruge različitih dužina i karakteristika ili je neka od opruga oštećena. Opruge su realizovane kao kompresione da bi se sprečile neželjene deformacije usled većih neželjenih sila i sa nelinearnom karakteristikom sila/izduženje koja je neophodna da bi se ostvarila promena krutosti na izlaznoj osovini aktuatora. Aparatura je dimenzionisan tako da poluprečnik osovine na izlazu iz reduktora bude $r_m = 7.5$ mm, a poluprečnik osovine na izlazu aktuatora $r_j = 75$ mm. Merenja sa enkodera se očitavaju preko National Instruments NI-PCIE6323 akvizicione kartice koja poseduje analogne izlaze za kontrolu motora.

Slika 48. je blok struktura žičano pogonjenog antagonističkog VSA. Sile (isprekidane narandžaste linije) i pozicije aktuatora i motora (isprekidane plave linije) mere se pomoću NI-PCIE6323 akvizicione kartice koja je povezana sa računarom. Upravljački signali se prosleđuju preko analognih izlaza akvizicione kartice do sigurnosnog modula. Sigurnosni modul radi nezavisno i prikuplja podatke senzora sile i podataka sa magnetnog senzora krajnjeg položaja (isprekidana crvena linija). Ako su svi signali u propisanim granicama, upravljački signali se prosleđuju motorima, a ako položaj ili zatezna sila saji pređu dozvoljeni nivo, motori se odmah isključuju kako bi se sprečilo oštećenje aparature. Kontrolna struktura je implementirana u Matlab/Simulink Real-Time okruženju.

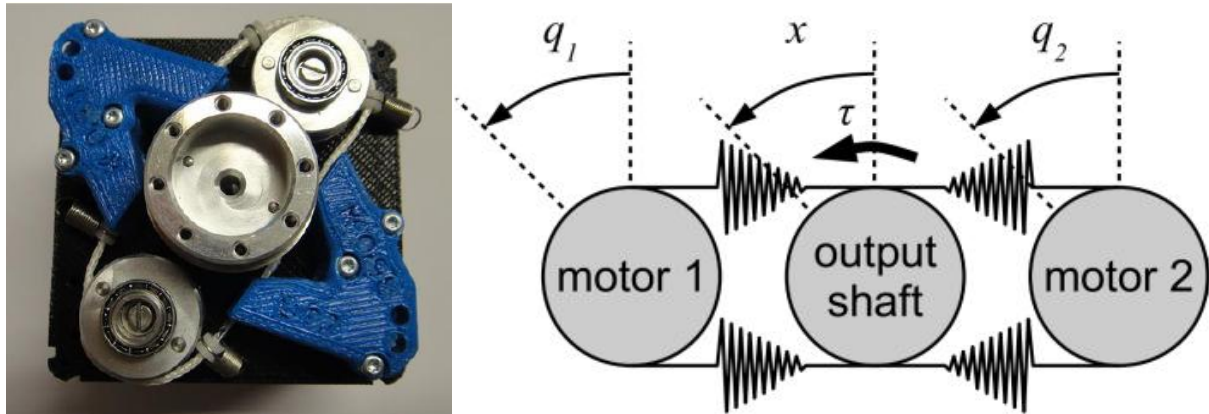


Slika 48. Laboratorijska realizacija antagonističkog žičanog pogonjenog aktuatora sa promenljivom krutošću: a) Hardverska realizacija: (1) izlazna osovina; (2) nelinearne kompresione opruge (sa kvadratnom karakteristikom); (3) dva Dunker GR42X25 DC motora sa Dunker SG45 reduktorom odnosa 15:1; (4) klizni mehanizam za podešavanje početne zatezne sile; (5) dva TAL501L senzora sile proizvedena od strane HT Sensor Technology, koji mere zateznu silu; (6) ISC3806-003E-1000BZ3-5-24F inkrementalni enkoder za praćenje pozicija izlazne osovine; (7) dva inkrementalna enkodera DHC40M6-2000 za praćenje pozicija na izlazu iz reduktora; (8) magnetni senzor krajnjeg položaja osovine aktuatora; (9) magneti postavljeni na graničnim pozicijama osovine aktuatora; (10) sigurnosni modul; (11) izvor napajanja i (12) postolje. b) Blok dijagram.

Plavo označava enkodere, crveno magnetne i magnetni senzor krajnjeg položaja, a narandžastosenzore sile. Merenja sila (isprekidana narandžasta linija), pozicije motora i aktuatora (isprekidana plava linija). Merenja se očitavaju na računaru preko interfejsa akvizicione kartice NI-PCIe632. Upravljački signali se prosleđuju preko analognih izlaza akvizicione kartice na sigurnosni modul. Sigurnosni modul radi nezavisno i prikuplja podatke senzora sile i podatke magnetnog senzora krajnjeg položaja (isprekidana crvena linija). c) Skica.

4.2 Matematički model antagonističkog aktuatora promenljive krutosti

Kao što je ilustrovano na slici Slika 20. postoje različite vrste antagonističkih realizacija žičano pogonjenih aktuatora. U nastavku će biti analizirane 2 vrste, unidirekcion i bidirekcion antagonistički aktuator. Za analizu su uzeti unidirekcion antagonistički zglob koji je konstruisan (videti Slika 48.), i komercijalno dostupni bidirekcion antagonistički VSA-„qb“ [49], čija struktura je prikazana na slici Slika 49.



Slika 49. Komercijalno dostupni antagonistički žičano pogonjeni VSA-„qb“ [130]: Unutrašnja struktura (levo) i šematski prikaz (desno).

Razlika između unidirekcionog i bidirekcionog aktuatora je u broju elastičnih elemenata u mehaničkom prenosu i njihovim doprinosima na silu koja deluje na osovinu aktuatora. Kod unidirekcionih, veza između motora i osovine aktuatora je ostvarena sa po jednom sajlu i oprugom koja može da proizvodi samo zateznu silu u jednom smeru. Kod bidirekcionih, postoje po dve sajle sa oprugama između motora i osovine aktuatora, tako da kada se motor okreće uvek je jedan od dva elastična elementa generisati zateznu silu. Na taj način bidirekcion aktuatori proizvode zateznu silu u oba smera tako da oba motora daju doprinos okretanju osovine zgloba i ostvaruju se bolje performanse dok kod unidirekcionih to nije slučaj.

4.2.1 Matematički model žičano pogonjenog antagonističkog unidirekcionog aktuatora promenljive krutosti

Žičano pogonjeni antagonistički VSA funkcioniše na takav način da rotacija motora oko žlebova izlazne osovine izaziva namotavanje/odmotavanje sajli i na taj način kompresiju/dekompresiju opruge. Istovremena simultana kompresija obe opruge povećava krutost aktuatora, dok namotavanje jedne sajle i odmotavanje druge menjaju položaj izlazne osovine. Da bi se kontrolisala krutost antagonističkog aktuatora, krutost u prenosnom mehanizmu (u ovom slučaju opruge) između motora i izlazne osovine treba da bude nelinearna, tj. funkcija zavisnosti sile od promene dužine sajle sa oprugom treba da bude monotono inkrementalna [13]. Par opruga korišćenih u aparaturi je napravljen sa zahtevom da opruge budu identične i da imaju monotonu karakteristiku rastuće sile/izduženja. Izduženje opruge Δl_A i Δl_B antagonističkog aktuatora sa Slika 48. definisano je kao

$$\Delta l_A = r_m \theta_A - r_j q, \quad (97)$$

$$\Delta l_B = r_m \theta_B + r_j q, \quad (98)$$

gde su pozicije osovine aktuatora, motora A i motora B q , θ_A , i θ_B , respektivno.

Karakteristika sila/izduženje se može predstaviti u polinomskom obliku kao

$$F_A = \sum_{i=0}^n k_i \Delta l_A^i, \quad (99)$$

$$F_B = \sum_{i=0}^n k_i \Delta l_B^i, \quad (100)$$

gde F_A i F_B označavaju sile koje sabijaju opruge, gde je k_i za $i = 1 \dots n$, koeficijenti polinoma, a n je red polinoma.

Šema antagonističkog aktuatora promenljive krutosti prikazane su na slici Slika 48., dok je model koji opisuje dinamiku aktuatora i dinamiku motora A i B dat u jednačinama (101) do (103)

$$J_j \ddot{q} + B_j \dot{q} = \varphi(\theta_A, \theta_B, q), \quad (101)$$

$$J_m \ddot{\theta}_A + B_m \dot{\theta}_A + \phi(\theta_A, q) = \tau_{mA}, \quad (102)$$

$$J_m \ddot{\theta}_B + B_m \dot{\theta}_B + \psi(\theta_B, q) = \tau_{mB}, \quad (103)$$

gde su J_j i J_m inercija aktuatora i motora, respektivno, a B_j i B_m označavaju ekvivalentno viskozno trenje u aktuatoru i motorima, respektivno. Obrtni momenti motora A i motora B su označeni sa τ_{mA} i τ_{mB} respektivno, i mogu se predstaviti kao

$$\tau_{mA} = \mu N \frac{K_{mu}}{LS + R} U_A, \quad (104)$$

$$\tau_{mB} = \mu N \frac{K_{mu}}{LS + R} U_B, \quad (105)$$

gde su L i R induktivnost i otpor motora, respektivno. K_{mu} , N , i μ simbolizuju konstantu obrtnog momenta motora, odnos redukcije i koeficijent efikasnosti reduktora, respektivno. U_A i U_B su

naponski ulazi na motor A i motor B, respektivno. “s” je operator Laplasove transformacije.

Ekvivalentni obrtni moment aktuatora i komponente obrtnih momenta aktuatora koji potiču od elastičnih opruga povezanih sa motorima A i B su φ , ϕ i ψ , respektivno definisani su kao

$$\phi(\theta_A, q) = r_m F_A, \quad (106)$$

$$\psi(\theta_B, q) = r_m F_B, \quad (107)$$

$$\varphi(\theta_A, \theta_B, q) = \frac{r_j}{r_m} (\phi(\theta_A, q) - \psi(\theta_B, q)), \quad (108)$$

kombinovanjem jednačina (106) - (108) dobija se jednačina za obrtni moment osovine aktuatora

$$\varphi(\theta_A, \theta_B, q) = r_j (F_A - F_B). \quad (109)$$

Krutost aktuatora po definiciji je negativni izvod momenta po uglu, tako da izraz za krutost postaje

$$S = - \frac{\partial \varphi(\theta_A, \theta_B, q)}{\partial q}. \quad (110)$$

Ravnatežna pozicija aktuatora q_e za simetrični sistem prikazan na slici Slika 48. , na osnovu poznatih geometrijskih odnosa i simetrije iznosi

$$q_e = \frac{r_m(\theta_A - \theta_B)}{2r_j}. \quad (111)$$

Izraz za krutost aktuatora u ravnotežnom stanju kombinovanjem jednačina (99) i (100) sa jednačinama (109) - (111) postaje

$$S = 2r_j^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{2^i - 1} k_i r_m^{i-1} (\theta_A + \theta_B)^{i-1}. \quad (112)$$

4.2.2 Matematički model žičano pogonjenog antagonističkog bidirekcionog aktuatora promenljive krutosti

„qb“ je biderkcioni antagonistički VSA gde su ulazni parametri položaji motora (q_1 i q_2), a izlazni položaj i krutost izlazne osovine (x i S). Jednačine koje opisuju ravnotežni položaj izlazne osovine (x_e) i krutost bidirekcionog antagonističkog zgloba „qb“ dobijene su iz specifikacija proizvođača kao

$$x_e = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad (113)$$

$$S = ak \cosh(a(x - q_1)) + ak \cosh(a(x - q_2)), \quad (114)$$

gde su parametri $a = 6.8465$ i $k = 0.0223$ dobijeni identifikacijom opisanom u [11].

„qb“ ima kontrolni interfejs (razvijen za *Matab-Simulnik*) i strukturu tako da se može kontrolisati samo postavljanjem željenih pozicija motora i oslanjanjem na interne PID petlje unutar „qb“ da bi se postigao željeni položaj. Nekoliko pristupa u kontroli „qb“ eksperimentalno je testirano u [131], a rezultati su pokazali potrebu za novom identifikacijom sistema za svaki pojedinačni aktuator radi boljih performansi.

Umesto rešavanja jednačina sa hiperboličkim funkcijama kojim je modelirana krutost „qb“ aktuatora, može se koristiti aproksimacija razvijanjem funkcije u Tejlorov red gde je $\cosh(x) \approx 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!}$. Tejlorov red unosi grešku zbog aproksimacije, ali značajno smanjuju složenost proračuna. Razlike između pozicije izlazne osovine i primarnih pokretača su jednake (simetrični sistem). Dakle, izraz za krutost se može napisati u obliku bikvadratne jednačine

$$S = A + B\Delta q^2 + C\Delta q^4, \quad (115)$$

gde Δq predstavlja razliku između položaja motora i željenog izlaza osovine. Koristeći (113)-(115), izvedeni su izrazi za željene pozicije motora i njihovu razliku od položaja izlazne osovine

$$q_1 = \frac{2x_{desired} + \Delta q}{2}, \quad (116)$$

$$q_2 = \frac{2x_{desired} - \Delta q}{2}, \quad (117)$$

$$\Delta q = \sqrt{\frac{\left(-\frac{B}{C} + \sqrt{\frac{B^2}{C^2} - \frac{4(A - S_{desired})^2}{C^2}}\right)}{2}}, \quad (118)$$

gde $x_{desired}$ i $S_{desired}$ predstavljaju željenu poziciju i krutost aktuatora.

4.3 Kaskadna upravljačka struktura unidirekcionih antagonističkih žičano pogonjenih VSA

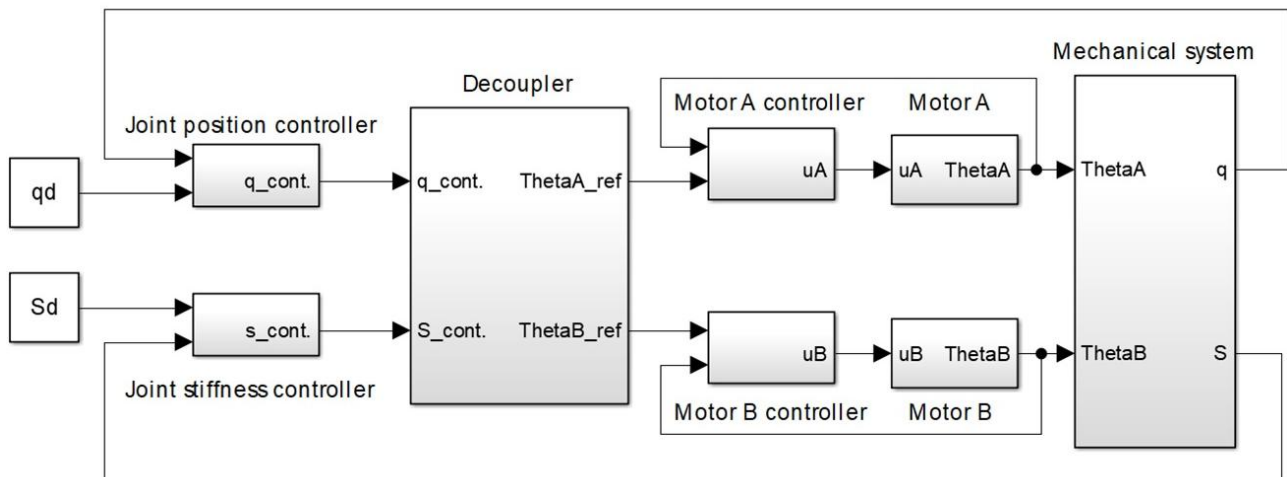
Za konstruisanu hardversku platformu antagonističkog VSA predložena i realizovana je kaskadna upravljačka struktura za simultanu kontrolu pozicije i krutosti, što je prikazano na slici Slika 50. i sastoji se od:

- 1) mehaničkog sistema sa antagonističkim pogonom;
- 2) dve unutrašnje petlje za pozicije motora;
- 3) spoljašnja petlja pozicije aktuatora;
- 4) spoljašnja petlja krutosti aktuatora; i
- 5) statički deкупler koji izračunava referentne pozicije motora za željeni položaj i krutost aktuatora.

Svi kontroleri koji se koriste u unutrašnjoj i spoljašnjoj petlji su realizovani kao integralno-proporcionalni diferencijalni (I-PD) ili integralno proporcionalni (IP) kontroleri, sa filterom (koji filtrira merni šum senzora i obezbeđuje kauzalnost funkcije prenosa kontrolera) [132, 133]. Korišćeni I-PD/I-P kontroleri olakšavaju podešavanje parametara, tako da performanse sistema zatvorene petlje budu zadovoljavajuće u smislu propusnog opsega, praćenja trajektorije, robusnosti i potiskivanje poremećaja. Treba imati na umu da je propusni opseg sistema ograničen, a odziv sistema ne može da se ubrza više nego što to dozvoljavaju mehanička svojstva.

Statički deкупler D (Slika 50.) proračunava položaj aktuatora i krutost na izlazu kontrolera spoljne petlje q_{cont} i S_{cont} u referentnim pozicijama motora θ_{Aref} i θ_{Bref} . Zasnovan je na procenjenim odnosima za položaj (111) i polinom drugog reda za krutost (112) aktuatora u stanju ravnoteže.

U poređenju sa kontrolnom strukturu sa samo spoljašnjim petljama povratne sprege i imajući u vidu da se unutrašnja i spoljašnja petlja oslanjaju na iste upravljačke elemente (jednosmerne motore), kaskadna struktura doprinosi boljim performansama sistema jer je unutrašnja petlja dizajnirana da deluje lokalno i da uvek bude brža od spoljne petlje [134]. Štaviše, zbog svoje brže dinamike, unutrašnja petlja prilagođava ponašanje DC motora kako bi se uhvatila u koštac sa nelinearnostima (uključujući trenje) ispred spoljašnje petlje, čime se minimiziraju negativni efekti opuštanja sajle, što je ključno pitanje kontrole u žičano pogonjenim aktuatorima [121]. Kaskadna struktura efikasnije uklanja smetnje, čime se postiže brži odziv celog sistema i smanjuju oscilacije, koje su sve od velike važnosti za žičano pogonjene robote kako bi se omogućila praktična implementacija. Dakle, pošto se unutrašnja petlja izvršava brže, spoljašnja petlja se može podesiti konzervativnije [126]. Ovo je od posebnog značaja pošto teorijski pristupi kontroli zahtevaju glatku trajektoriju za poziciju i krutost za izvode višeg reda.



Slika 50. Kaskadna upravljačka struktura za antagonistički VSA.

Da bi predloženi metod bio implementiran potrebno je proceniti nekoliko glavnih karakteristika aktuatora. U početku, svaki pojedinačni motor i reduktor moraju biti identifikovani kao deo unutrašnje petlje. Elementi elastičnog prenosa određuju dinamiku aktuatora, pa se stoga moraju dobro proceniti za potrebe upravljanja kao i za procenu performansi aktuatora. Konačno, radi pouzdane i robusne kontrole pozicije i krutosti, spoljne petlje koje se sastoje od unutrašnjih petlji, elastičnog prenosa i mehaničkog dizajna aktuatora moraju biti identifikovane. Brzu dinamiku sistema određuju električni aktuator i njegov reduktor. Cilj kontrolnog pristupa je precizna i brza kontrola pozicija motora antagonističkog aktuatora kako bi se spoljna pozicija i kontrolne petlje aktuatora očuvale.

4.3.1 Estimacija parametara žičano pogonjenog antagonističkog VSA

Za realizaciju upravljačke strukture potrebno je projektovati:

- 1) Pozicioni kontroler za motore,
- 2) Projektovanje dekuplera,
- 3) Pozicioni kontroler osovine aktuatora i
- 4) Kontroler krutosti pozicije aktuatora.

Za projektovanje pozicionih kontrolera neophodno je izvršiti identifikaciju motora sa reduktorima, dok za projektovanje dekuplera je neophodno izvršiti identifikaciju parametara opruge i modeliranja krutosti osovine. Identifikacijom funkcije prenosa motora sa zatvorenom kontrolnom petljom po poziciji, dobijaju se parametri potrebni za projektovanje kontrolera pozicije i krutosti aktuatora.

4.3.1.1 Estimacija funkcije motora-reduktor

Da bi se podesila unutrašnja petlja za poziciju motora, identifikovani su parametri za pretpostavljeni model funkcije prenosa motora i reduktora $G_m(s)$. Pretpostavljeno je da je prenosna funkcija prenosna funkcija drugog reda bez vremenskog kašnjenja, gde je napon ulaz, a pozicija motora izlaz. Parametri su procenjeni u nekoliko radnih tačaka tako što je prvo procenjena funkcije prenosa brzine motora, bez opterećenja, opisane kao prenosna funkcija prvog reda bez vremenskog kašnjenja, što je uobičajena aproksimacija u inženjerstvu. Generalno, prenosna funkcija brzine/napona motora sa reduktorom je prenosna funkcija drugog reda sa dva realna pola na levoj strani kompleksne ravni, gde je jedan pol određen električnim karakteristikama, a drugi pol je određen mehaničkim karakteristikama. Mehanička komponenta sistema je znatno sporija od električne; stoga je njegovo dinamičko ponašanje dominantno i prenosna funkcija se može proceniti kao prenosna funkcija prvog reda [135, 136]. Pojačanje K_m i vremenska konstanta T_m su procenjene iz odskočnog odziva brzine. Zatim je rezultujućoj funkciji prenosa dodat integrator jer pozicija je integral brzine. U skladu sa usvojenom prenosnom funkcijom prvog reda, pojačanje K_m se procenjuje kao odnos između ulaznog napona i izlazne brzine, dok vremenska konstanta T_m predstavlja vreme potrebno da motor dostigne 63,21% vrednosti stacionarnog stanja. Eksperimenti identifikacije su izvedeni za nekoliko različitih vrednosti kontrolnih signala. Parametri K_m i T_m su procenjeni kao srednje vrednosti svih eksperimentalnih rezultata, pri čemu nije bilo značajnijih odstupanja od srednjih vrednosti. Dakle, funkcija prenosa motora $G_m(s)$ sa procenjenim parametrima je

$$G_m(s) = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}, \quad (119)$$

gde su $K_m = 2.86$ procenjeni faktor pojačanja i $T_m = 0.22$ s procenjena vremenska konstanta.

4.3.1.2 Podešavanje parametara kontrolera unutrašnje petlje po pozicijama motora

Ovaj odeljak predstavlja smernice za podešavanje unutrašnje kontrolne petlje – kontrole pozicije motora. Uzimajući parametre funkcije prenosa, dizajniran je robustan I-PD kontroler da potiskuje poremećaj i minimizira integral apsolutne greške prema postojećim analitičkim formulama za nekoliko tipičnih sistema drugog reda, koje su opisane u [127, 128, 129]. U tabeli Tabela 2 prikazani su parametri kontrolera kao funkcije parametara sistema (motora) i parametra λ , čije podešavanje utiče na performanse i robusnost sistema. Kontroler je dizajniran da zadovolji željenu funkciju osetljivosti ms_m , definisanu kao $ms_m = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1+G_m(j\omega)C_m(j\omega)} \right|$, gde je $C_m(j\omega)$ kontroler koji reguliše rad motora. Dakle, komplementarno oblikovanje funkcije osetljivosti omogućava lak dizajn kontrolera, njegovo lako prilagođavanje promenama u sistemu i željeno ponašanje promenom parametra λ . Niže vrednosti λ znače bržu dinamiku zatvorene petlje, ali veće pojačanje i samim tim veće pikove amplitude u kontrolnom signalu, dok će niže λ obezbediti sporiju dinamiku sistema sa dužim, ali nižim amplitudama kontrolnog signala. Radni opseg aktuatora korišćen u eksperimentima je 180 stepeni. Još jedno ograničenje u eksperimentima je opseg krutosti (8–15 Nm/rad). Ograničenja su uzrokovana mehaničkim dizajnom aktuatora. Maksimalni poremećaj uveden kao dodatna nategnutost opruge u ispitivanju robusnosti iznosi 50N, što odgovara poremećaju obrtnog momenta od 0.375Nm na izlazu iz reduktora. Eksperimentalno je određena vrednost $ms_m = 1.4$; na takav način da predstavlja dobar kompromis između performansi praćenja trajektorije i robusnosti. Željena vrednost ms_m za identifikaciju funkcije prenosa motora postiže se za $\lambda = 0.0854$. Parametar kontrolera k_r se može podesiti u opsegu $(0 - k_p)$, a vrednost parametra b je u opsegu $(0-1)$. Ako je b veće, kada se referenca promeni, sistem će brže reagovati, ali će i preskok biti veći. Bez gubitka performansi u smislu potiskivanja poremećaja i robusnosti, izabrano je $b = 0$ i, stoga, $k_r = 0$. Potiskivanje preskoka je suštinski zahtev u unutrašnjoj petlji, koji bi trebalo da spreči oscilacije u žičano pogonjenom popustljivom aktuatoru. Pošto je sistem simetričan, oba motora imaju iste parametre za kontrolere.

Tabela 2: Analitičke formule za podešavanje parametara I-PD i I-P kontrolere za identifikovane modele transfer funkcije motora ($G_m(s)$) i pozicije ($G_q(s)$) i krutosti ($G_s(s)$) aktuatora.

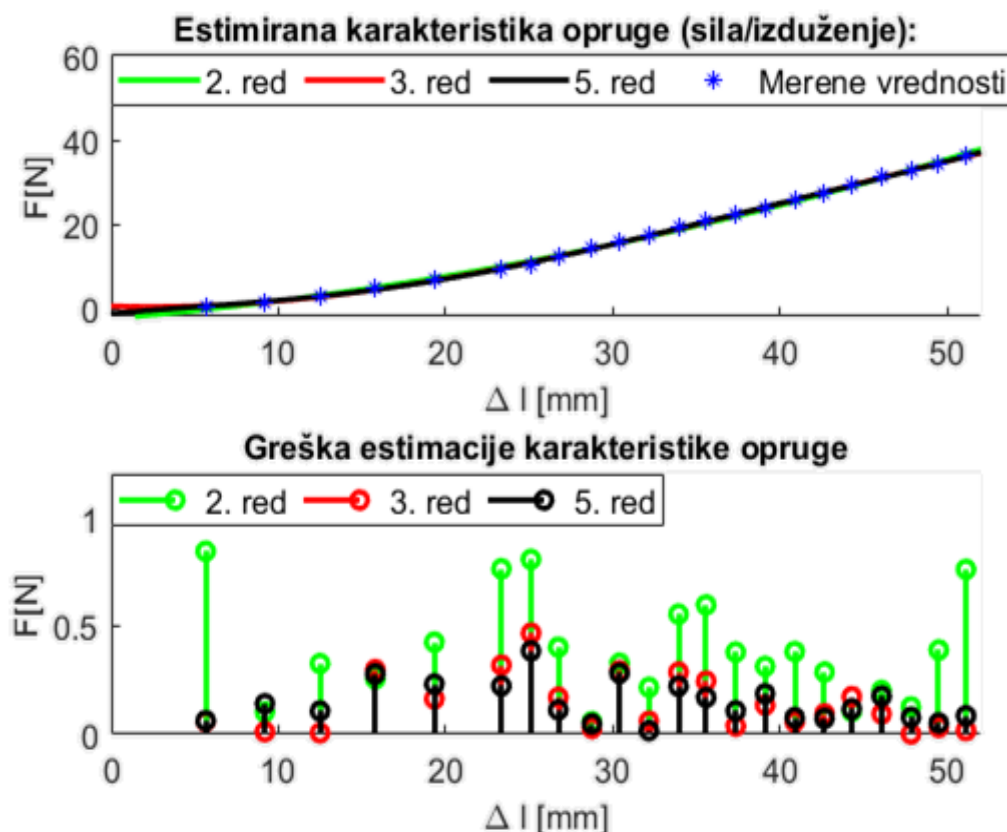
Transfer funkcija [model]	$G_m(s)$ $\left[\frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \right]$	$G_s(s)/G_q(s)$ $\left[\frac{K}{T s + 1} \right]$
k_p	$\frac{4T_m^2}{K_m \lambda^2 (4T_m - \lambda)}$	$\frac{2T - \lambda}{K \lambda}$
k_i	$\frac{T_m^2}{K_m \lambda^3 (4T_m - \lambda)}$	$\frac{T}{K \lambda^2}$
k_d	$\frac{6T_m^2 - \lambda(4T_m - \lambda)}{K_m \lambda (4T_m - \lambda)}$	–
k_r	$b k_p; b \in [0 - 1]$	
t_f	$\frac{T_m \lambda}{4T_m - \lambda}$	–

4.3.1.3 Modeliranje parametara nelinearne opruge i projektovanje dekuplera

Dinamiku aktuatora i njegovu krutost određuju elastični elementi koji se koriste u transmisiji. Da bi se procenila krutost aktuatora prema (112), potrebno je estimirati i parametre opruge. Ako se menjaju elastični elementi/opruge aktuatora, parametri opruge se moraju ponovo proceniti. Da bi se tačno odredili koeficijenti opruga, karakteristika opruge je snimljena merenjem sila i izduženja opruga pri različitim opterećenjima. Fitovanjem funkcije opruge sa polinomima 2., 3. i 5. reda koji zadovoljavaju najmanju kvadratnu grešku i greške estimacije prikazani su na slici Slika 51. Kao što se očekivalo, sa povećanjem reda polinoma preciznost modela se povećava, a greška u estimaciji se smanjuje.

Posmatrajući merenja i aproksimacije preko polinomskih funkcija, greška za polinom drugog reda je manja od 0.85N dok polinommi višeg reda ne smanjuju značajno grešku. Za upravljanje žičano pogonjenih aktuatora neophodna je minimalna napetost u nitima (nelinearne opruge); tako će amplituda grešaka biti relativno mala u poređenju sa amplitudama radnih sila [26]. Polinomski model 2. reda predstavlja kompromis između tačnosti na jednoj strani i njegove lake implementacije na drugoj strani. U slučajevima kada ova amplituda greške nije zanemarljiva, mora se koristiti model višeg reda. Dobijeni koeficijenti su $k_0 = -2.498 \text{ N}$, $k_1 = 331.4838 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ i $k_2 = 8543.8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.

Po svojoj prirodi koeficijent k_0 bi trebao da bude 0 i da za nulto izduženje opruga generiše silu od 0N. Kako opruga nema idealnu kvadratnu karakteristiku dolazi do ovakve pojave usled greške modeliranja, a kako je radni opseg sila veći od 10N, ova pojava ne predstavlja problem.



Slika 51. Gore) Estimacija nelinearne karakteristike (sila/izduženje) kompresione opruge kao polinom 2., 3., i 5. reda metodom minimalne kvadratne greske. Dole) Greška estimacije merenja i polinomskih funkcija.

Na osnovu geometrije aktuatora i parametara opruge moguće je izvesti model za statički deкупler. Deкупler u upravljačkoj strukturi prikazan na slici Slika 50. poseduje dva ulaza (q_{cont} i

S_{cont}) i dva izlaza (θ_{Aref} i θ_{Bref}). Ulazi su kontrolni signali dobijeni iz spoljašnjih petlji, dok su izlazi željene vrednosti pozicija motora i ujedno referentne vrednosti za unutrašnju petlju. Na osnovu jednačina (111) i (112) izvode se jednačine za referentne pozicije motora na osnovu zadatih pozicija i krutosti aktuatora kao

$$\theta_{Aref} = \frac{r_j}{r_m} q_{cont} + \frac{S_{cont} - 2k_1 r_j^2}{4k_2 r_j^2 r_m}, \quad (120)$$

$$\theta_{Bref} = \frac{-r_j}{r_m} q_{cont} + \frac{S_{cont} - 2k_1 r_j^2}{4k_2 r_j^2 r_m}. \quad (121)$$

Jednačine (120) i (121) mogu se zapisati u matricnom obliku kao:

$$\begin{bmatrix} \theta_{Aref} \\ \theta_{Bref} \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} q_{cont} \\ S_{cont} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (122)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{r_j}{r_m} & \frac{1}{4r_j^2 r_m k_2} & \frac{-k_1}{2k_2 r_m} \\ \frac{-r_j}{r_m} & \frac{1}{4r_j^2 r_m k_2} & \frac{-k_1}{2k_2 r_m} \end{bmatrix}. \quad (123)$$

gde je matrica D dekupler, a $2k_1 r_j^2$ je minimalna krutost aktuatora izvedena na osnovu estimiranog modela opruge.

U slučajevima kada se krutost predstavlja kao polinom višeg reda ili složena nelinearna jednačina [49], nije moguće predstaviti analitičko rešenje za dekupler. Dakle, mapiranje između položaja motora i krutosti aktuatora može se postići pretragom lukap tabele (*engl. look up*) ili korišćenjem nekog računarskog alata kao što je neuralna mreža [130], o čemu će biti više reči u nastavku.

4.3.1.4 Podešavanje parametara kontrolera spoljašnjih petlji po poziciji i krutosti aktuatora

Performanse aktuatora zavise od njegovog elektromehaničkog dizajna u celini. Na slici Slika 52. prikazana je struktura sistema čija je dominantna dinamika identifikovana. Sistem se sastoji od mehaničkog dela antagonističkih VSA i unutrašnjih petlji položaja motora. Ulazi sistema su referentni položaji motora, a izlazi su krutost i položaj aktuatora. Funkcije prenosa realnih sistema, koje su po prirodi kontinualne, zasnovane na periodičnim diskretnim izmerenim podacima (sa računara ili mikrokontrolera), mogu se lako predstaviti diskretnim ekvivalentom kao što je ARX model (engl. *Auto-Regressive model with eXogenous inputs*) [137]. Identifikacija je sprovedena u zatvorenoj petlji po proceduri kako je opisano u [138, 139], a prikazana je na slici Slika 53. Identifikacija zatvorene petlje je potrebna da bi se smanjio efekat mernog šuma senzora i izbeglo odstupanje (engl. *drift*) izlaza [134], što se ne može postići identifikacijom u otvorenoj petlji.

Slika 53. prikazuje petlju za kontrolu sile koja se koristi samo za identifikaciju funkcija prenosa spoljne petlje — izlazne pozicije aktuatora $[G_q(s)]$ i krutost $[G_S(s)]$. Upravljačka petlja za identifikaciju sastoji se od kontrolera $C_p(s)$ i funkcije prenosa $G_p(s)$ koje uključuju i poziciju aktuatora i funkciju prenosa krutosti: $G_q(s)$ i $G_S(s)$. Funkcija prenosa $G_p(s)$ uključuje mehanički dizajn antagonističkog aktuatora sa elementima elastičnog prenosa i unutrašnjim petljama kao što je prikazano na slici Slika 52. Kontroler $C_p(s)$ kontroliše silu zatezanja sajle u spoljašnjoj petlji oko nominalne tačke. U cilju identifikacije, kontroler $C_p(s)$ u spoljnoj petlji ne mora biti optimalno podešen već stabilan. Generalno, povratna sprega ne mora da bude ista kao izlazna varijabla, koja se identifikuje, samo treba da bude stabilna da bi se izbeglo pomeranje izlaza i zadržao sistem oko nominalne zadate vrednosti. Na osnovu ulaza (θ_{Aref} i θ_{Bref}) i izlaza (q i S) sistema $G_p(s)$, identifikuje se dominantna dinamika pozicije i krutosti aktuatora.

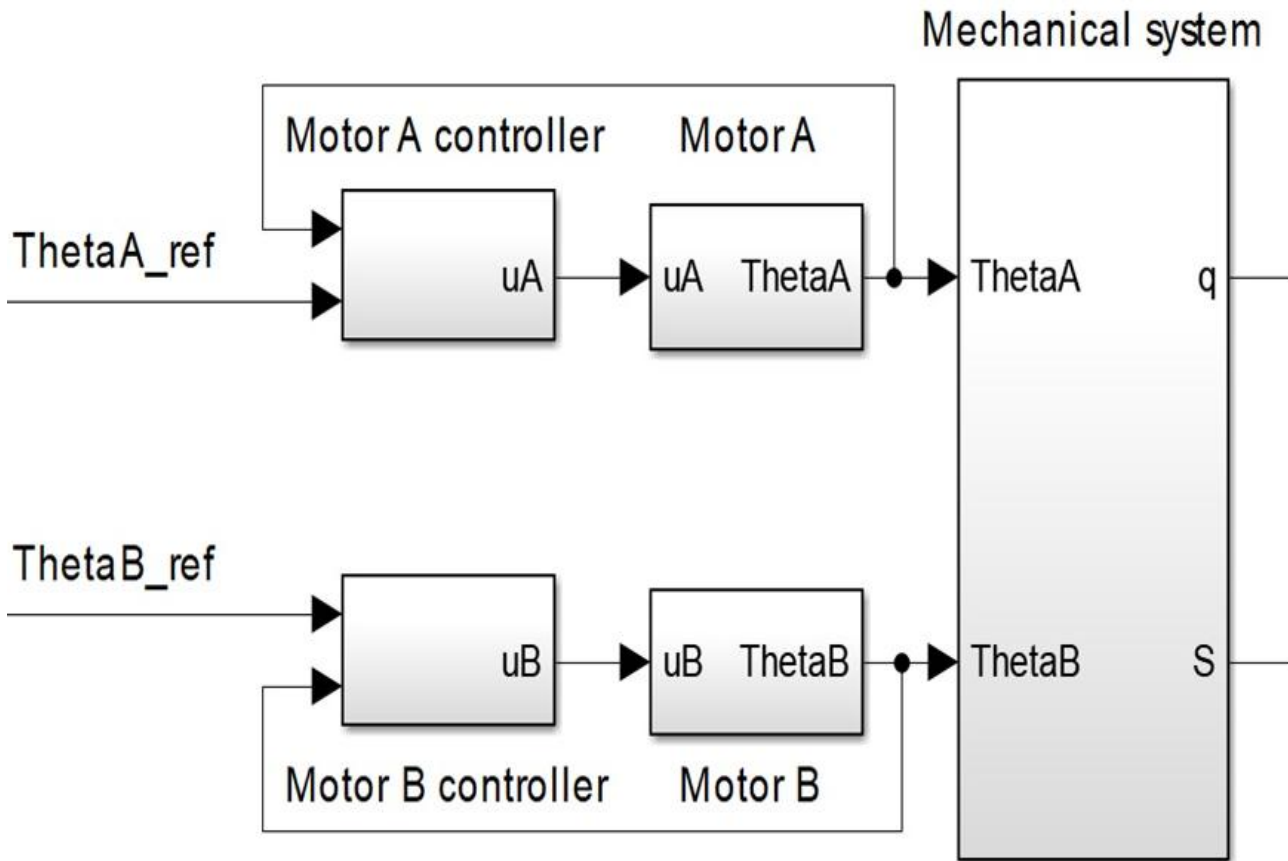
Sistem prikazan na slici Slika 52. ima dva ulaza: pozicije motora A i motora B i dva izlaza: položaj aktuatora q i krutost S . S obzirom da je sistem simetričan i da oba ulaza podjednako doprinose izlazu, identifikacija se vrši u odnosu na samo jedan motor, dok je drugi nepomičan. Bez gubitka opštosti može se postaviti $\theta_B = 0$.

Kako je sistem nelinearan, identifikovan je u blizini nekoliko radnih tačaka, za sile zatezanja od 10N, 20N, 30N i 40N, koje odgovaraju procenjenoj krutosti od 8.24Nm/rad, 10.55Nm/rad, 12.43Nm/rad i 14.06Nm/rad. Opseg krutosti je ograničen svojstvima dizajna aktuatora i kompresionih opruga, koje su potpuno sabijene pri sili od 50N. Međutim, predloženi pristup kontroli ostaje isti i za veći opseg krutosti.

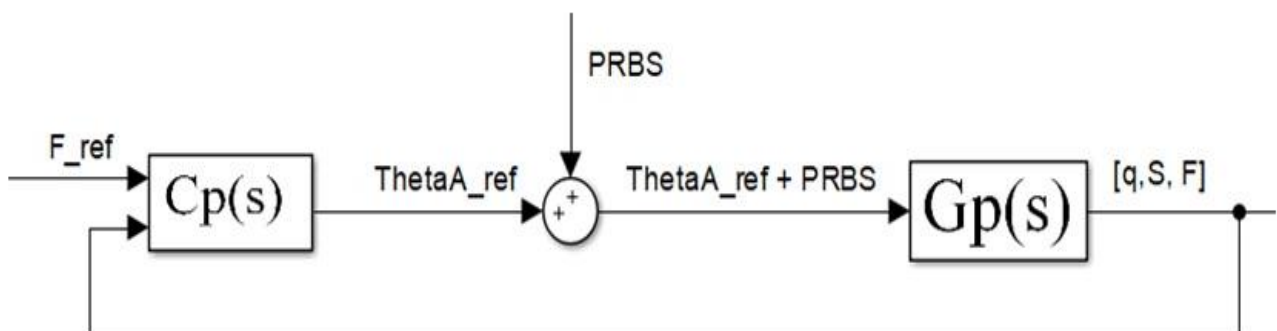
Dok spoljna petlja održava sistem na nominalnoj sili zatezanja u sajli, PRBS (engl. *Pseudo Random Binary Sequence*) signal male amplitude se dodaje na željenu poziciju motora, tek toliko da njegov efekat bude vidljiv na izlazu i razlikuje se od šuma senzora [140]. Primenjen je PRBS sa periodom odabiranja od 1 ms. Jednu sekvencu PRBS signala čine binarni signali generisani prema definisanim pravilima (pravila za generisanje PRBS signala odnose se na registar pomeranja i polinomska pravila zasnovana na dužini signala – broju uzoraka u jednoj sekvenci) [141], sa osobinom da mu je amplitudski spektar konstantne amplitude i koji pobuđuje sistem na svim frekvencijama podjednako.

Na osnovu izmerenog ulaza sistema $G_p(s)$ (referentna pozicija motora A— θ_{Aref}) i izlaza (položaj aktuatora, q ; krutost, S ; i sila zatezanja sajle, F), ARX model je korišćen za identifikaciju dominantne dinamike položaja i krutosti aktuatora na svakoj od nominalnih vrednosti. Dominantna dinamika je polinomska funkcija prenosa najnižeg reda čiji odziv adekvatno oponaša stvarni odziv sistema. U Tabela 3 prikazane su procenjene funkcije prenosa sistema za poziciju $G_q(s)$ i krutost $G_S(s)$ antagonističkog aktuatora u različitim nominalnim tačkama dobijenim identifikacijom, gde su $G_q(s)$ i $G_S(s)$ grupisani u $G_p(s)$ sa Slika 53.

Rezultati su podeljeni u dve grupe: procene prenosne funkcije prvog i trećeg reda. Sve estimirane funkcije trećeg reda imaju jedan realan pol i jedan par konjugovanih kompleksnih polova. Par konjugovanih kompleksnih polova proizvodi neku oscilatornu dinamiku, ali realni pol je na mnogo nižim frekvencijama; stoga je ova dinamika dominantna i prenosna funkcija sistema se može aproksimirati kao prenosna funkcija prvog reda. Savladavanje oscilatorne dinamike može se objasniti postojanjem kontrolera unutrašnje petlje, koji oblikuje ukupnu ulazno/izlaznu dinamiku.



Slika 52. Deo kaskadne kontrolne strukture čija dinamika se identifikuje, a sastoji se od mehaničkih komponenti i kontrolera unutrašnjih petlji po pozicijama motora.



Slika 53. Petlja po zateznoj sili u sajli. Blok dijagram za eksperimentalnu estimaciju spoljašnjih petlji aktuatora—(položaj i krutost aktuatora). Identifikovanje dominantne dinamike predstavljeno kao prenosna funkcija za položaj— $G_q(s)$ i krutost $G_S(s)$ su grupisani u $G_p(s)$.

Tabela 3: Estimirane funkcije prenosa pozicije ($G_q(s)$) i krutosti ($G_s(s)$) aktuatora kao transfer funkcije I i III reda.

Nominala	$G_q(s)$	
	I red	III red
$F = 10\text{N}$	$\frac{0.0498}{0.64s + 1}$	$\frac{0.0498}{(0.64s + 1)(7.33 * 10^{-5}s^2 + 0.0575s + 1)}$
$F = 20\text{N}$	$\frac{0.0484}{0.78s + 1}$	$\frac{0.0484}{(0.78s + 1)(4.92 * 10^{-5}s^2 + 0.0469s + 1)}$
$F = 30\text{N}$	$\frac{0.0495}{1.58s + 1}$	$\frac{0.0495}{(1.58s + 1)(3.48 * 10^{-5}s^2 + 0.0331s + 1)}$
$F = 40\text{N}$	$\frac{0.0491}{2.98s + 1}$	$\frac{0.0491}{(2.98s + 1)(2.2 * 10^{-6}s^2 + 1.07 * 10^{-2}s + 1)}$
Nominala	$G_s(s)$	
	I red	III red
$F = 10\text{N}$	$\frac{1.17}{0.57s + 1}$	$\frac{1.17}{(0.57s + 1)(2.3 * 10^{-5}s^2 + 1.6 * 10^{-3}s + 1)}$
$F = 20\text{N}$	$\frac{2.2826}{1.19s + 1}$	$\frac{2.2826}{(1.19s + 1)(2.1 * 10^{-5}s^2 + 2.2 * 10^{-3}s + 1)}$
$F = 30\text{N}$	$\frac{1.821}{0.62s + 1}$	$\frac{1.821}{(0.62s + 1)(1.3 * 10^{-5}s^2 + 4.2 * 10^{-3}s + 1)}$
$F = 40\text{N}$	$\frac{1.47}{0.43s + 1}$	$\frac{1.47}{(0.43s + 1)(7.7 * 10^{-6}s^2 + 7.4 * 10^{-4}s + 1)}$

Za funkcije prenosa prvog i trećeg reda za položaj i krutost date u Tabela 3 dominantno ponašanje je dobro definisano sa njegovom prenosnom funkcijom prvog reda; tako se dominantna dinamika može predstaviti kao prenosna funkcija prvog reda bez vremenskog kašnjenja, sa statičkim pojačanjem K i vremenskom konstantom T . Vrednost parametara K i T su uzete iz estimacije funkcija prvog reda u okolinama radnih tačaka u formi $K/(Ts + 1)$.

S obzirom da su funkcije prenosa identifikovane kao prenosne funkcije prvog reda bez vremenskog kašnjenja, kontroleri spoljne petlje su podešeni kao I-P kontroleri prema [129]. I-PD/IP kontroleri su varijacije PID/PI kontrolera, gde su proporcionalna i diferencijalna pojačanja iz direktne grane premeštene u granu povratne sprege, i neće imati preskoke u odzivu čak ni za brze promene reference (npr. step signal). Na taj način će zadržati sajle pod tenzijom i sprečiti opuštanje. Ovde je λ parametar koji se koristiti za podešavanje brzine odziva. Prednost ovih kontrolera je u tome što je podešavanjem samo jednog parametra moguće napraviti balans između performansi i robusnosti. λ je monotoni parametar, što znači da niža vrednost uvek znači nižu vremensku konstantu sistema zatvorene petlje i, prema tome, brži odziv, ali manju robusnost. Za veće vrednosti λ , rezultati su obrnuti. Još jedna prednost centralizovanog podešavanja kontrolera je izbegavanje zasićenja aktuatora, što bi moglo da pogorša ograničenje performanse žičano pogonjenog sistema pri održavanju minimalne zatezne sile u sajlama, posebno ako sadrži elastičnost. U tom cilju, smanjenje λ vodi ka granicama aktuatora i korišćenju celog propusnog opsega aktuatora. Promena λ u toku rada omogućava implementaciju online promena pojačanja (*engl. gain scheduling*) u zavisnosti od željenih performansi i vreme odziva za različite radne tačke. Ako proces identifikacije

otkrije složeniju dominantnu dinamiku, sa više polova, analitičke formule za parametre kontrolera mogu se izvesti kao što je opisano u [127]. U Tabela 2 prikazane su analitičke formule za podešavanje I-P kontrolera. Da bi se postigla zadovoljavajuća brzina odziva bez preskoka, $\lambda = 0.2$ i $b = 0$ su usvojeni za sve kontrolere položaja i krutosti i predstavljaju početno podešavanje.

S obzirom na to da dekupler uvodi pojačanje između izlaza kontrolera spoljašnje petlje i referentne pozicije motora, kako bi se zadržale performanse projektovanih kontrolera, pojačanja k_p , k_i , i k_r treba skalirati (podeliti) sa uvedenim pojačanjima dekuplera. Prema vrednostima dekuplera iz (123), pojačanja kontrolera pozicije aktuatora treba podeliti sa $\frac{r_j}{r_m}$, a pojačanja kontroleraa krutosti sa $\frac{1}{4r_j^2 r_m k_2}$.

U slučaju nelinearnih sistema, zbog različite dinamike u različitim radnim tačkama, kontroleri se mogu projektovati za linearizovani model, za svaku od radnih tačaka iz skupa, formirajući tako banku kontrolera. Skup kontrolera može da se koristi za upravljanje sistemom na način da svaki od kontrolera bude zadužen za deo radnog opsega krutosti. Na primer, kontroler 1 pokriva krutost od S1 do S2, kontroler 2 od S2 do S3, kontroler 3 od S3 do S4 i tako dalje. U ovom istraživanju je korišćeno neometano prebacivanje između kontrolera (integralna komponenta preuzima kontrolnu vrednost pri prebacivanju između dva različita kontrolera unutar banke kontrolera). Drugi način primene je korišćenje određenog pravila online promena pojačanja (*gain scheduling*), gde se pojačanja kontrolera izračunavaju kao linearna kombinacija dva najbliža kontrolera, u zavisnosti od nominalne vrednosti za koju su projektovani i od željene vrednosti.

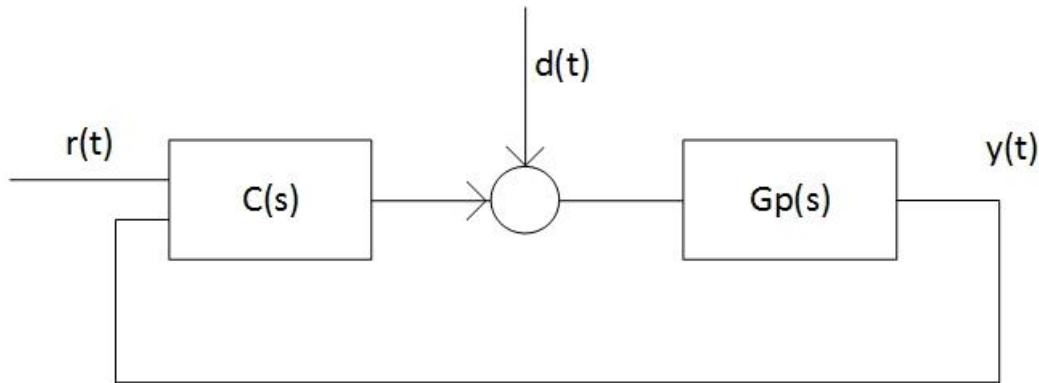
Najvažnije je osigurati minimalno zatezanje i izbeći opuštanje sajli. Stoga, spoljne petlje mogu biti prioretizovane tako da se obezbedi ograničenje zatezanja tako što će kontrola položaja biti sporija od kontrole krutosti, što garantuje da nema naglog opuštanja i na taj način, omogući validaciju na laboratorijskoj postavci. Ovo se može postići podešavanjem parametra λ posebno za svaku od spoljnih petlji, pošto je vreme odziva proporcionalno parametru λ za svaku petlju pojedinačno [128]. Dakle, ovaj parametar diktira dinamiku odziva tako što se balansira između robusnosti i performansi.

4.3.1.5 Postupak za izvođenje parametara kontrolera

U ovom odeljku biće pojašnjena metodologija za izvođenje analitičkih formula koje su date u Tabela 2. U slučaju kada je potrebno projektovati složeni kontroler postupak koji se primenjuje ostaje isti. Kontrolna struktura zatvorene petlje sa Slika 54. se sastoji od modela procesa $G_p(s)$, kontrolera $C(s)$, reference $r(t)$, izlaza $y(t)$ i poremećaja $d(t)$. Struktura kompleksnog kontrolera je podešena da potiskuje poremećaj. Bez gubitka opštosti, može se smatrati da je referenca jednaka 0 ($r(t) = 0$). Transfer funkcija koja opisuje uticaj poremećaja $d(t)$ na izlaz $y(t)$ definisana je kao

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)}, \quad (124)$$

gde su $Y(s)$ i $D(s)$ transfer funkcije poremećaja $d(t)$ i izlaza $y(t)$, respektivno.



Slika 54. Primer kontrolne strukture sa poremećajem na ulazu sistema.

Jednačina (124) može biti zapisana u obliku

$$Y(s) = (1 - T(s))G_p(s)D(s), \quad (125)$$

gde je $T(s)$ komplementarna funkcija osetljivosti definisana kao:

$$T(s) = \frac{C(s)G_p(s)}{1 + C(s)G_p(s)}. \quad (126)$$

Da bi se oblikovalo izlaz $Y(s)$ iz jednačine (125), željena komplementarna funkcija osetljivosti $T_d(s)$ ima oblik

$$T_d(s) = \frac{\eta(s)}{\lambda(s)}, \quad (127)$$

$$\eta(s) = 1 + \sum_{i=1}^n \eta_i s^i, \quad (128)$$

$$\lambda(s) = (\lambda s + 1)^{2n}, \quad (129)$$

gde je n red polinoma imenioca transfer funkcije modela procesa $G_p(s)$. Polinom $\eta(s)$ je n -og reda, a $\lambda(s)$ is je $2n$ -og reda. Ovi redovi polinoma su neophodni da bi se obezbedila kauzalnost pri dizajniranju kontrolera. Za željenu komplementarnu funkciju osetljivosti $T_d(s)$, željena izlazna funkcija $Y_d(s)$ koja predstavlja odziv na poremećaj $D(s)$ dobija se kao

$$Y_d(s) = \left(\frac{\lambda(s) - \eta(s)}{\lambda(s)} \right) G_p(s) D(s). \quad (130)$$

Izjednačavajući desne strane jednakosti u jednačinama (126) i (127) dobija se željeni oblik kontrolera $C(s)$

$$C(s) = \frac{\eta(s)}{\lambda(s) - \eta(s)} \frac{1}{G_p(s)}. \quad (131)$$

Poremećaj je definisan kao step signal ($D(s) = 1/s$) što predstavlja slučaj sa najgorim scenriom. Za željeno λ (korisnički definisano za zatvaranje petlje sistema koji postiže željeno dinamičko ponašanje i/ili robusnost), parametri polinoma $\eta(s)$ su podešeni da ponište polove uvedene funkcijom prenosa sistema $G_p(s)$ i poremećajem $D(s)$ u jednačini (130).

Dve transfer funkcije su analizirane u ovom poglavlju. Prva je transfer funkcija između ulaznih napona i pozicija na izlazu iz reduktora motora je funkcija drugog reda. Tako da je $n = 2$, i $G_p(s) = K_m/s(T_m s + 1)$. Druga je dominantna dinamika pozicije i krutosti aktuatora identifikovane kao sistem prvog reda. Tako da je $n = 1$ i $G_p(s) = K_m/(T_m s + 1)$

Za $G_p(s)$ koje je definisano kao model prvog reda, željena izlazna funkcija $Y_{d1}(s)$ i željeni kontroler $C_1(s)$ su definisani kao

$$Y_{d1}(s) = \left(\frac{(\lambda s + 1)^2 - (1 + \eta s)}{(\lambda s + 1)^2} \right) \frac{K_m}{T_m s + 1} \frac{1}{s}, \quad (132)$$

$$C_1(s) = \frac{(1 + \eta s)}{(\lambda s + 1)^2 - (1 + \eta s)} \frac{T_m s + 1}{K_m}, \quad (133)$$

dok za $G_p(s)$ kao sistem drugog reda željena izlazna funkcija $Y_{d2}(s)$ i željeni kontroler $C_2(s)$ su

$$Y_{d2}(s) = \left(\frac{(\lambda s + 1)^4 - (1 + \eta_1 s + \eta_2 s^2)}{(\lambda s + 1)^4} \right) \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \frac{1}{s}, \quad (134)$$

$$C_2(s) = \frac{(1 + \eta_1 s + \eta_2 s^2)}{(\lambda s + 1)^4 - (1 + \eta_1 s + \eta_2 s^2)} \frac{s(T_m s + 1)}{K_m}. \quad (135)$$

Zamenom vrednosti za polinom $\eta(s)$ koji zadovoljava jednačinu (130), poništavaju se polovi iz jednačina (133) i (135) i dobijaju se parametri kontrolera prikazani u tabeli Tabela 2. Jednačine (133) i (135) su oblik prenosne funkcije parametara kontrolera.

4.3.2 Eksperimentalni rezultati kaskadne upravljačke strukture

Performanse kontrolera su verifikovane u dva eksperimenta. Prvi eksperiment je praćenje položaja i krutosti dok se njihove reference menjaju nezavisno. U ovom scenariju, krutost aktuatora se procenjuje na osnovu (137). U drugom eksperimentu, kontrola krutosti/popustljivosti aktuatora je potvrđena merenjima sile u sajlama, i stoga se krutost procenjuje direktno iz merenja obrtnog momenta aktuatora i položaja (139).

Na Slika 55. prikazani su rezultati prvog eksperimenta. Grafici sa Slika 55. i Slika 55. prikazuju pozicije aktuatora i praćenje krutosti, gde je kontroler projektovan za nominalnu radnu tačku od $S = 10.55 \text{ Nm/rad}$. Prvo je referenca pozicije specificirana kao sekvenca step signala u opsegu od $-\pi/3$ do $\pi/3$, dok je krutost ostala na 10 Nm/rad , a zatim je pozicija održavana konstantnom dok je krutost varirala kao step signal u opseg od 8 do 14 Nm/rad . Slika 55. prikazuje kontrolne signale motora. Kao što se i očekivalo u slučaju praćenja položaja aktuatora, jedan motor namotava sajlu, dok je drugi odmotava, o čemu svedoče kontrolni signali koji imaju istu amplitudu sa različitim predznacima. Kada se krutost promeni, oba motora imaju identične amplitude upravljačkog signala jer istovremeno kompresuju i dekompresuju opruge, tako da su rezultati očekivani. Slika 55. prikazuju rezultate kada se reference pozicije aktuatora i krutosti menjaju naizmenično, bez vremenskog kašnjenja, tako da su obe varijable bile stacionarne pre promene referentne vrednosti. Rezultati opisuju praćenje pozicije i krutosti, kao i dekuplovanje sistema, sve zajedno sa upravljačkom veličinom.

U drugom eksperimentu, praćenje krutosti aktuatora se procenjuje merenjem zateznih sila u sajlama i položaja aktuatora. Da bi se testirala krutost, referentna pozicija aktuatora je postavljena na 0° , a referentna krutost na 10 Nm/rad . U ovom slučaju, samo regulator krutosti se koristi u spoljnoj petlji da bi se postigla željena krutost. Kontrola položaja aktuatora je u otvorenoj petlji, gde se regulacija oslanja na geometrijsku relaciju (110) realizovanu preko statičkog dekuplera D. Prema tome, spoljašnja petlja pozicije nema informaciju o spoljnom delovanju obrtnog momenta. Performanse praćenja trajektorije zavisice od tačnosti poluprečnika motora i aktuatora kao geometrijskih parametara aktuatora, koje je lako izmeriti. Obrtni moment koji deluje na osovinu u stanju ravnoteže jednak je 0 Nm , tako da je poremećaj F_{ext} , kojim je ručno uneta sila koja deluje tangencijalno na osovinu aktuatora, merena kao razlika sila koje deluju na aktuator izmerenih u antagonističkim sajlama, merenih u stacionarnom stanju:

$$F_{ext} = F_A - F_B \quad (136)$$

Umesto kao izvod, jednačina (110) se može predstaviti pomoću linearne aproksimacije, kao količnik promene obrtnog momenta i promene ugla:

$$S = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta q} \quad (137)$$

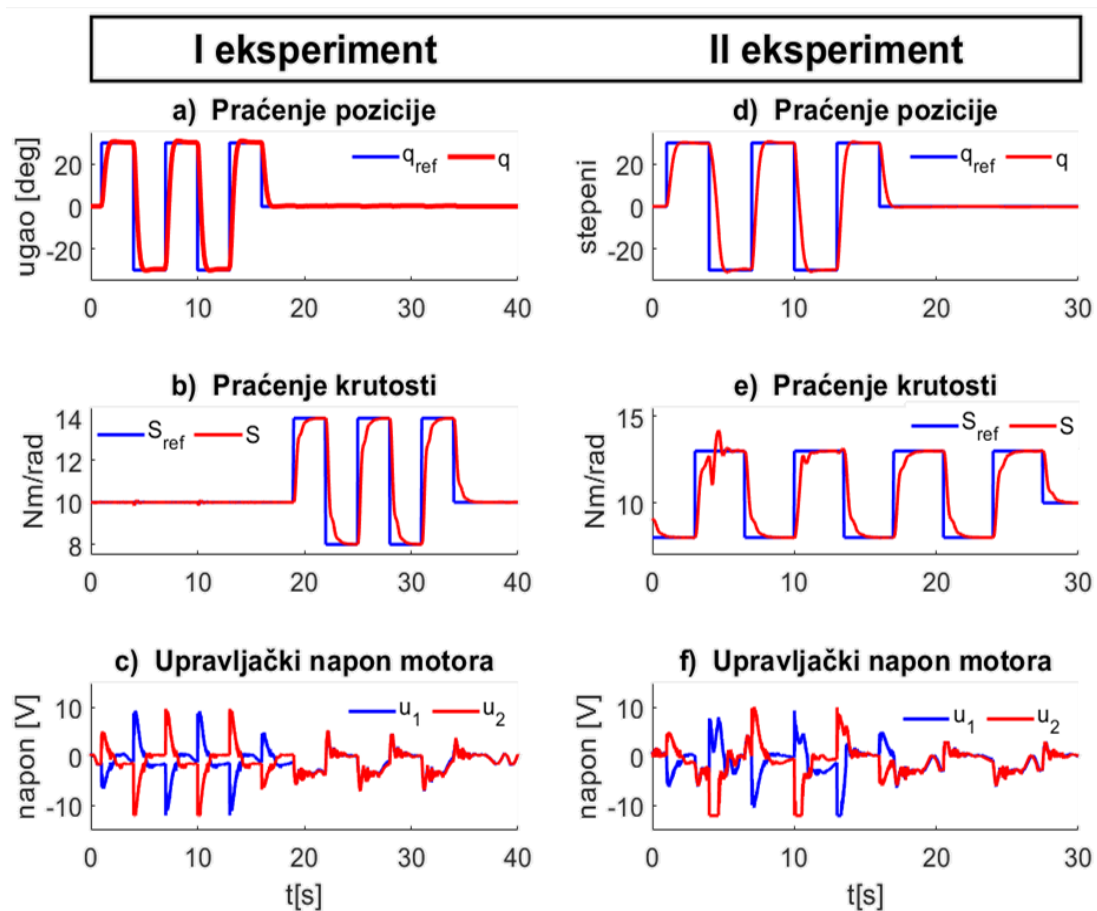
Treba imati na umu da je eksterni obrtni moment proporcionalan eksternoj sili za dužinu kraka sile r_j , tako da će krutost aktuatora biti procenjena na osnovu eksterne sile, koja se može direktno meriti sensorima. Pošto je nominalni ugao 0° , tada je $\Delta q = q_m$, gde je q_m trenutno izmerena pozicija aktuatora (pomeranje položaja usled spoljne sile F_{ext}), a moment koji deluje na aktuator je $r_j(F_A - F_B)$, tako da (137) postaje

$$S = -\frac{r_j F_{ext}}{q_m} \quad (138)$$

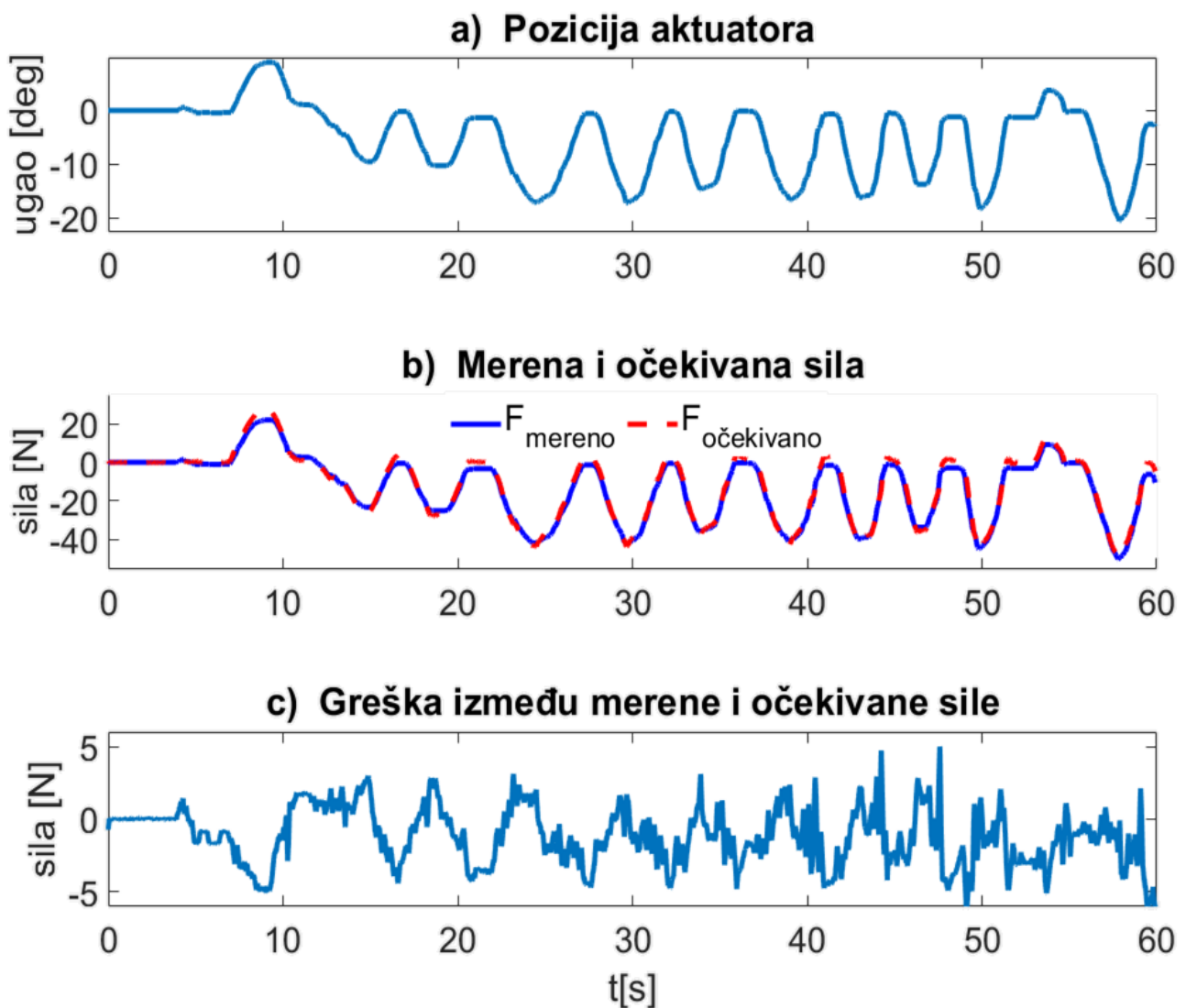
Prema tome, očekivana spoljašnja primenjena sila se može proceniti na osnovu izmerenog položaja aktuatora i zadate krutosti kao

$$F_{expected} = -\frac{Sq_m}{r_j} \quad (139)$$

S obzirom da je poluprečnik aktuatora r_j konstantan i da se krutost održava konstantnom, korelacija između sile i promene položaja je takođe konstantna. Slika 56. prikazuje izmerene pozicije aktuatora q . Spoljna sila F_{ext} , koja je razlika između izmerenih sila F_A i F_B , i očekivana sila $F_{expected}$ na osnovu (137) za izmerenu poziciju i zadatu krutost su prikazane na Slika 56. . Očigledno je da je oblik svih grafika isti i da postoji visok nivo korelacije, ali da postoje manja odstupanja između izmerenih i očekivanih sila, kao što je prikazano na Slika 56. Amplituda razlika je relativno mala. Razlike nastaju jer su (136) i (137) samo linearne aproksimacije i izraz krutosti je izveden prema (109), koji se zasniva na aproksimaciji parametara opruge. Izračunata srednja kvadratna greška za signal sa Slika 56. je 2.239N. Ovo može izgledati kao relativno visoka vrednost, ali s obzirom na to da korišćeni senzori sile imaju vremensko kašnjenje (10–15ms), a očekivana sila se procenjuje na osnovu merenja enkodera koja nemaju vremensko kašnjenje, ova dva signala nisu potpuno usklađena i stoga izmerene greške i dobijeni RMSE su predstavljeni većim nego što zaista jesu. Slično, dve opruge nisu potpuno identične i to unosi dodatne greške u modelovani sistem. Ovaj eksperiment demonstrira praktičnu procenu praćenja krutosti antagonista VSA.



Slika 55. Merenja dobijena u eksperimentima kaskadne kontrolne strukture. Vremenski profili a) praćenja položaja aktuatora pri konstantnoj krutosti; b) praćenje krutosti aktuatora u konstantnoj poziciji; c) upravljački naponi kada se položaj i krutost menjaju pojedinačno; d) praćenje položaja aktuatora kada je krutost promenljiva; e) praćenje krutosti aktuatora kada se pozicija menja; i f) upravljački naponi kada se položaj i krutost menjaju istovremeno.



Slika 56. Merenja dobijene primenom spoljne sile. Sila se primenjuje ručno da bi se stvorilo otklon od nominalnog položaja aktuatora. Vremenski profili: (A) položaja aktuatora; (B) interakcijska sila F_{ext} i očekivana sila $F_{expected}$; i (C) razlika između sile interakcije F_{ext} i očekivane sile $F_{expected}$

Demonstracija rade je prikazana na linkovima:

Upravljanje pozicijom antagonističkog žičano pogonjenog VSA

<https://www.youtube.com/watch?v=kdn8Dyw2qEU>

Upravljanje pozicijom antagonističkog žičano pogonjenog VSA

<https://youtu.be/W6FN9O82qcU>

4.4 Kaskadna upravljačka struktura “qb” aktuatora

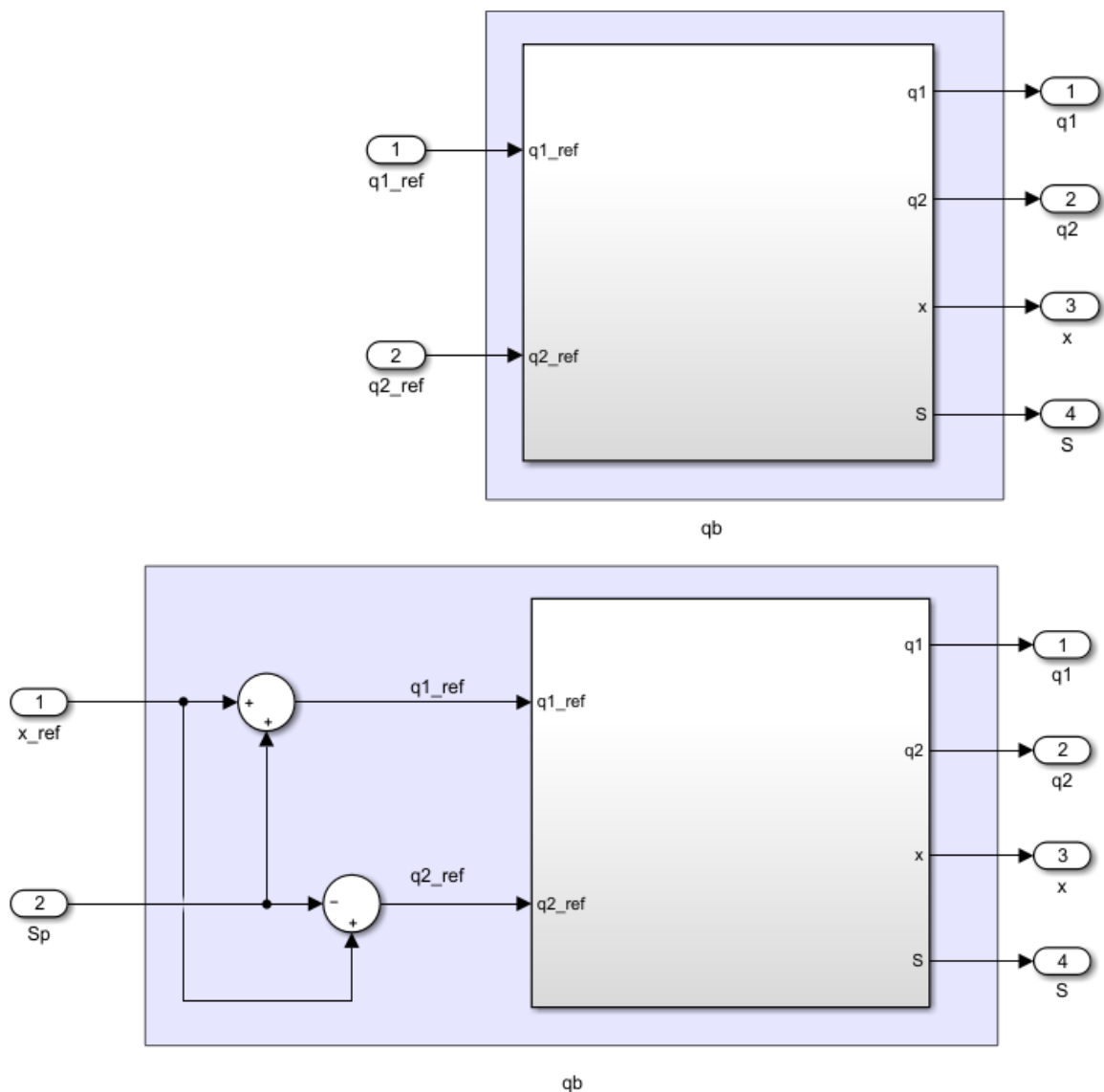
“qb” je komercijalno dostupan žičano pogonjeni bidirekcionni antagonistički VSA. Aktuator ima upravljačku strukturu, prikazanu na slici Slika 57. gde mu se komanduje na jedan od dva načina:

- 1) Zadaju se pozicije motora koje pokreću aktuator,
- 2) Zadaje se željena pozicija izlazne osovine i neka vrsta unapred definisane krutosti (engl. *stiffness preset-SP*) u stepenima koja označava kolika je apsolutna razlika u pozicijama motora i pozicije aktuatora.

Drugi način upravljanja polazi da je sistem simetričan i da važi jednačina stacionarnog stanja izlazne pozicije opisane u (113). Na osnovu relacije (113), zadate pozicije aktuatora (x) “stiffness preset”-a (Δq), preračunavaju se željene pozicije motora (q_{1ref} i q_{2ref}) koje se prosleđuju kao

$$q_{1ref} = x + \Delta q, \quad (140)$$

$$q_{2ref} = x - \Delta q. \quad (141)$$

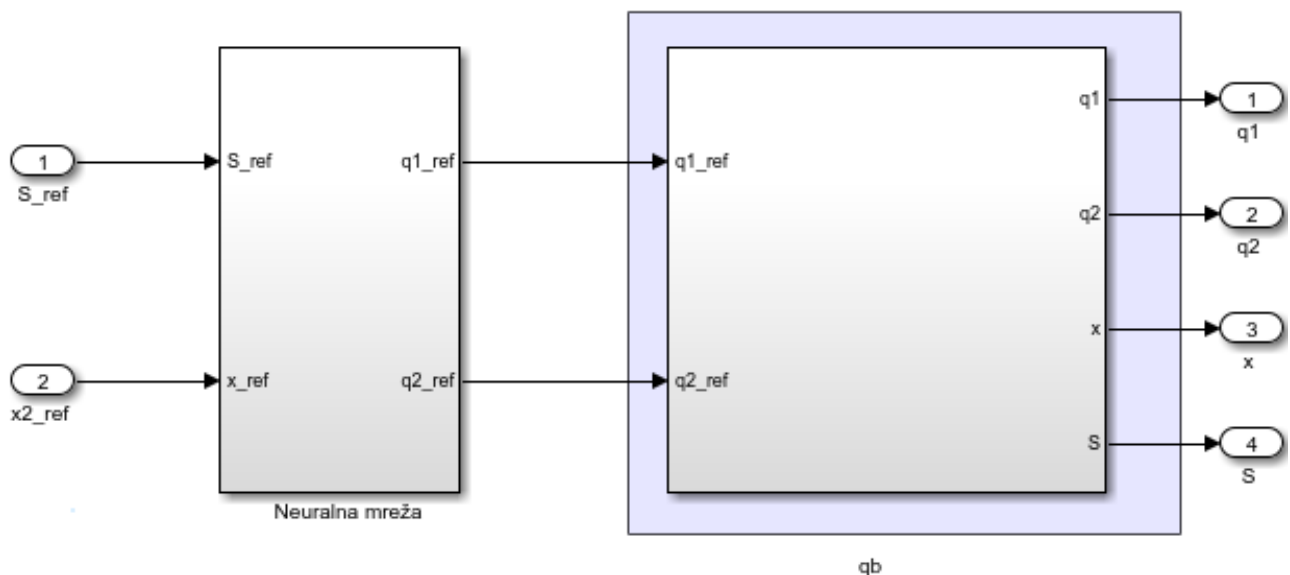


Slika 57. Upravljačka struktura “qb” aktuatora: Gore) upravljanje preko pozicija motora; Dole) upravljanje preko pozicije aktuatora i *stiffness preset*-a

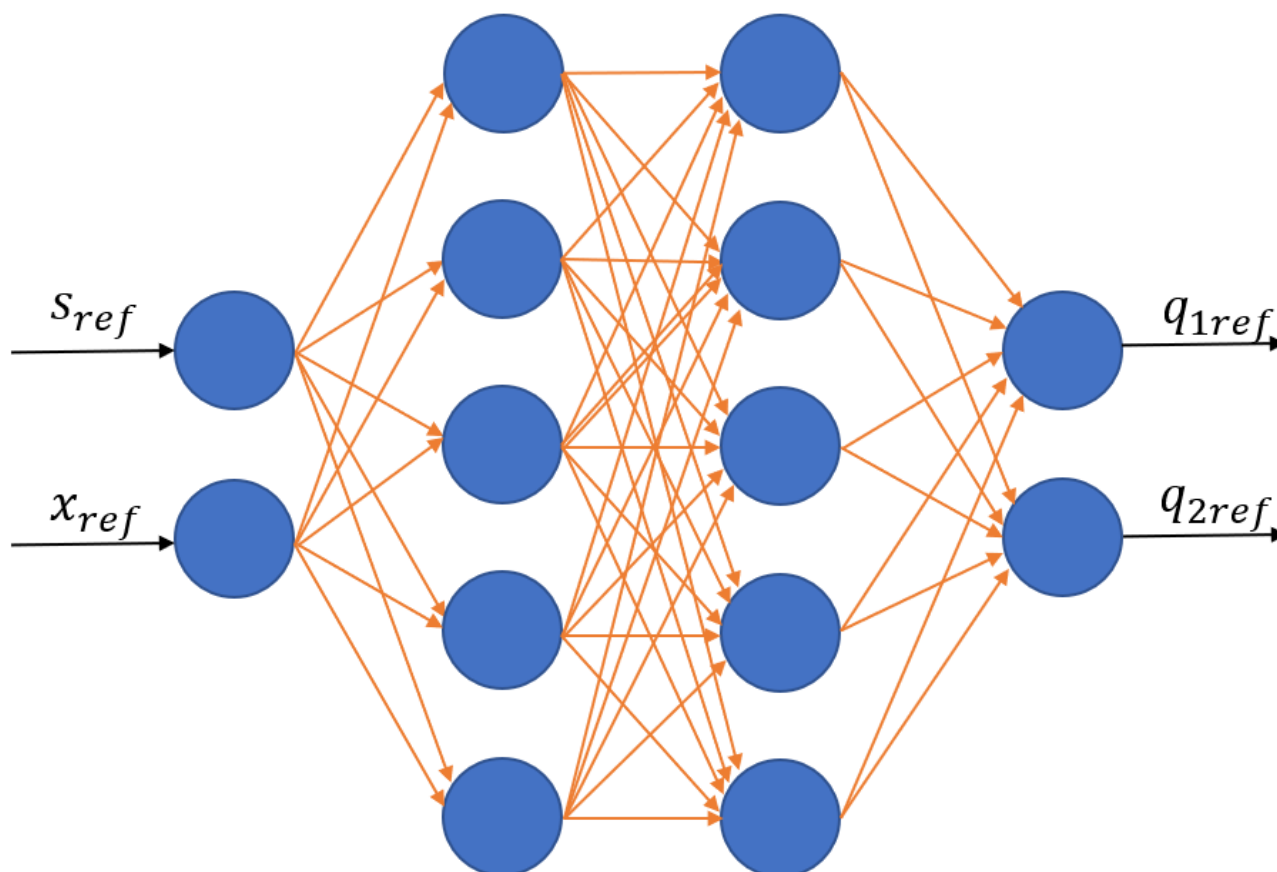
4.4.1 Dekupler zasnovan na neuralnoj mreži

„qb“ aktuator, kao i aktuator opisan u poglavlju 4.3 ima unutrašnje PD kontrolere za upravljanje pozicijama motora koji su podešeni od strane proizvođača. Kontroleri su podešeni da imaju dobro praćenje pozicija, ali bez integralnog dejstva koje otklanja grešku stacionarnog stanja koja se javlja prilikom koišćenja „qb“ aktuatora. To dovodi do toga da zadate pozicija motora ne budu ostvarene, usled opterećenja i trenja. Kako zadate vrednosti nisu ostvarive, a da bi se dobili bolji rezultati pristupa se mapiranju ulaza i izlaza preko neuralne mreže, gde se kao ulazi uzimaju ostvarene vrednosti pozicija i krutosti aktuatora, a izlaz su zadate vrednosti pozicija motora. Na taj način neuralna mreža će se ponašati kao inverzna statička funkcija „qb“ aktuatora [130].

U eksperimentima, neuralna mreža emulira željeno ponašanje statičke karakteristike sistema, tako da se koristi kao *feedforward*, dok dinamika sistema može biti kompenzovana povratnom spregom kao što je slučaj sa aktuatorom opisanom u poglavlju 4.3. Veličina neuralne mreže je određena eksperimentalno. Heuristički kriterijum vodi do najmanje mreže koja nadmašuje *feedforward* vezu zasnovanu na matematičkom modelu. Položaj neuralne mreže u odnosu na „qb“ aktuator je prikazana na slici Slika 58.



Slika 58. Položaj neuralne mreže kao *feedforward* komponente „qb“ aktuatora.



Slika 59. Ilustracije neuralne mreže korišćene kao statički dekupler „qb“ aktuatora. Mreža se sastoji od ulaznog sloja sa 2 ulaza, dva skrivena sloja sa po pet nerona i izlaznog sloja od dva izlaza.

Izabrana neuralna mreža prikazana na slici Slika 59. poseduje ulazni sloj sa dva ulaza, dva skrivena sloja sa po pet neurona i izlazni sloj sa dva izlaza. Skriveni sloj ima funkciju „sigmoid“-ne aktivacije kako bi mogao da realizuje nelinearni model, dok izlazni sloj ima funkciju aktivacije „purlin“ da bi proizveo analogne izlaze potrebne za simulaciju ponašanja „qb“ aktuatora. Rezultati dobijeni korišćenjem obučene neuralne mreže za *feedforward* pokazuju ponašanje veoma blisko izmerenim/estimiranim vrednostima. Ovo je posebno važno kada se neuralne mreže primenjuju na sistem sa više zglobova koji aktiviraju „qb“ aktuatori. Iako svaki blok aktuatora ima sličnu dinamiku, postupak obuke treba uraditi za svaki posebno.

Skup podataka za obuku je odabran da pokrije različite vrednosti za krutost i položaj izlazne osovine aktuatora. Skup za obuku neuralne mreže sadrži reference pozicija motora i prosečna merenja položaja i krutosti izlazne osovine na osnovu deset ponavljanja eksperimenata. Na ovaj način, neuralna mreža se ponaša kao inverzna funkcija „qb“ aktuatora. To znači da će neuralna mreža transformisati referentne vrednosti za izlaznu poziciju i krutost u željenu poziciju motora koji će biti prosleđeni „qb“ aktuatoru. U idealnom slučaju referentne i izmerene vrednosti treba da se poklapaju. Tačnost je ograničena skupom za obuku, veličinom neuralne mreže i repetitivnošću zglobova.

Skup podataka za obuku neuralne mreže je prikazan na slici Slika 60. Sekvenca je podeljena u pet sekvenci razdvojenih vertikalnim crvenim linijama. Prvi deo je dodatno podeljen na pet podsekcija odvojenih vertikalnim isprekidanim crvenim linijama.

I sekvenca: Za svaki pododeljak, postavljena je konstantna razlika između položaja motora (0° , 20° , 40° , 60° i 70°) dok su njihove referentne vrednosti pozicije aktuatora pomeraju za 5° od -90° do 90° i nazad do -90° . Teoretski su se očekivale konstantne vrednosti krutosti u ovim segmentima, ali to nije bio slučaj.

II sekvenca: Željani (teoretski) položaj izlazne osovine se menja od -90° do 90° sa korakom od

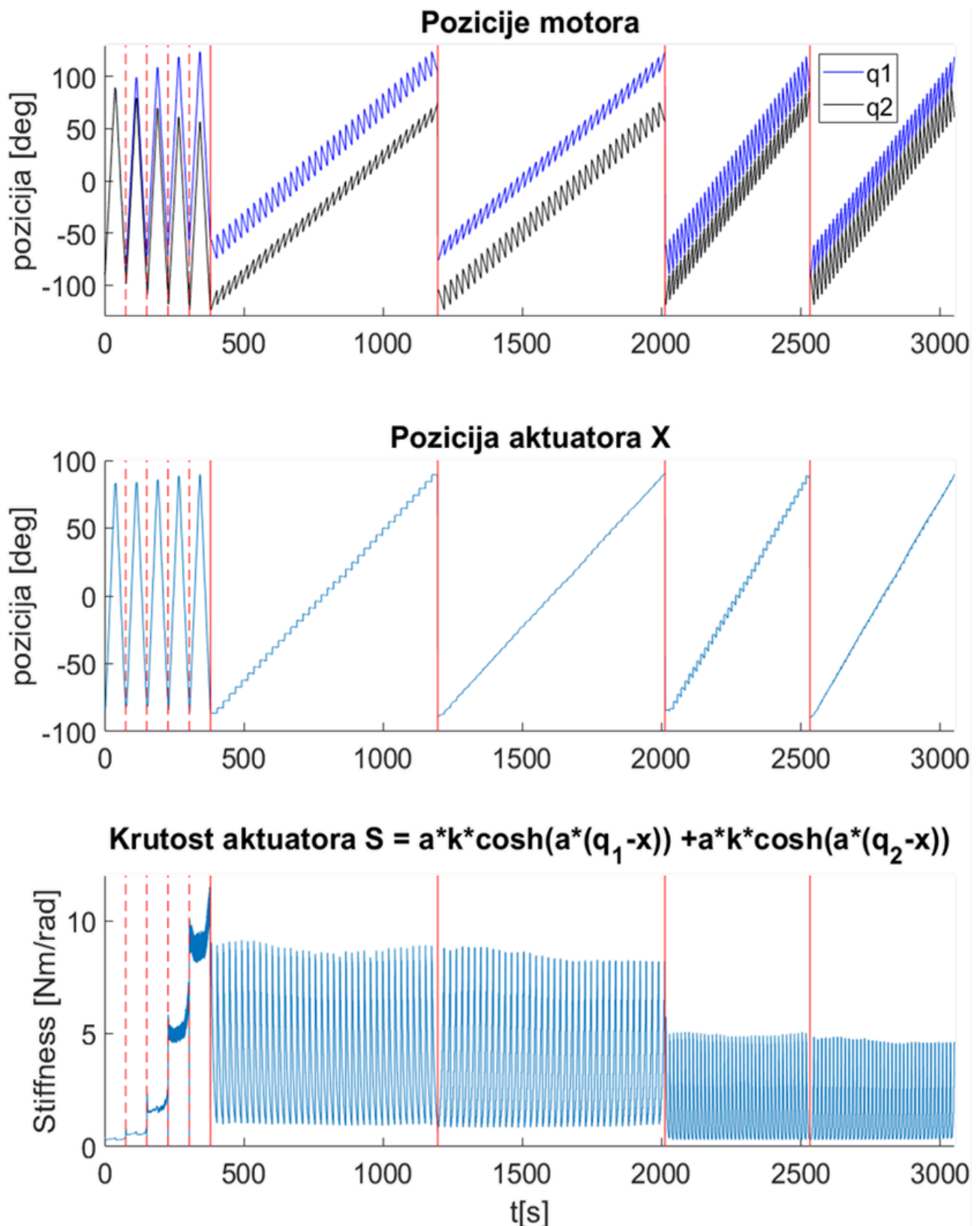
5°, dok se razlika između pozicija motora povećava od 30° do 70° sa korakom od 4° za svaku vrednost izlazne pozicije.

III sekvenca: Željeni (teoretski) položaj izlazne osovine se menja od -90° do 90° sa korakom od 5°, dok se razlika između pozicija motora smanjuje od 70° do 30° sa korakom od 4° za svaku vrednost izlazne pozicije.

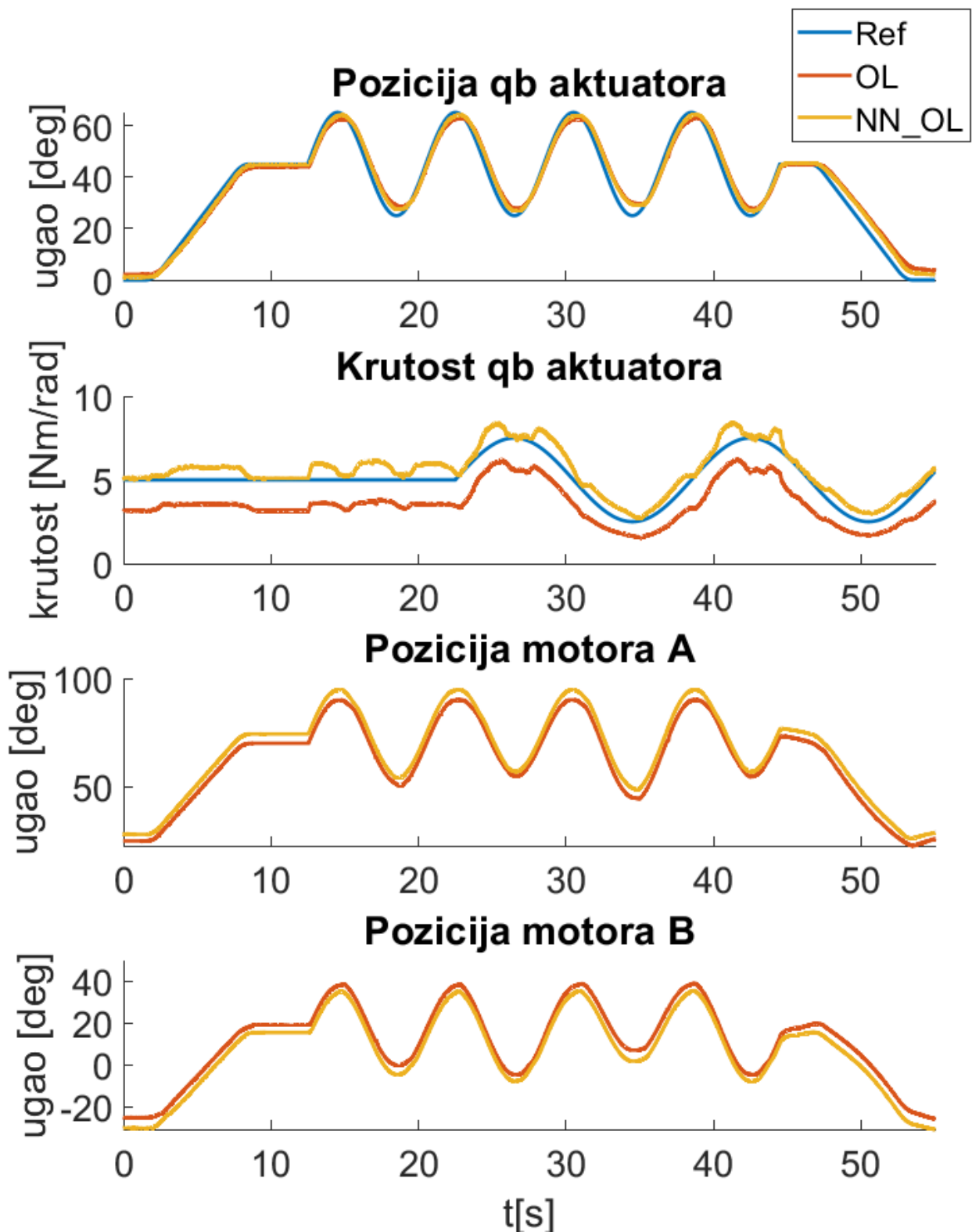
IV sekvenca: Željeni (teoretski) položaj izlazne osovine se menja od -90° do 90° sa korakom od 5°, dok se razlika između pozicija motora povećava od 0° do 60° sa korakom od 10° za svaku vrednost izlazne pozicije.

V sekvenca: Željeni (teoretski) položaj izlazne osovine je promenjena sa -90° na 90° sa korakom od 5°, dok se razlika između pozicija motora smanjuje od 60° do 0° postepeno za 10° za svaku vrednost izlazne pozicije.

Položaje motora kontrolišu samo interne petlje sa PD kontrolerom. Eksperimentalni rezultati za *feedforward* kontrolu sa neuralnom mrežom i za *feedforward* zasnovan na postojećem matematičkom modelu korišćenjem aproksimacije Tejlorovog niza prikazani su na Slika 61. Sa „ref” su označene referentne vrednosti, sa „OL” rezultati za otvorenu petlju zasnovanu na Tejlorovom nizu i sa „OLNN“ otvorenom petljom sa *feedforward* neuralnom mrežom. Upoređivanjem izmerene pozicije aktuatora sa njegovim referentnim vrednostima može se primetiti da oba pristupa pokazuju dobre performanse. Međutim, neuralna mreža pokazuje bolje rezultate od aproksimacije Tejlorovim nizom za praćenje krutosti. Ovo se može objasniti činjenicom da neuralna mreža ima znanje o sistemu zasnovano na realnom merenju suprotno (aproksimiranom) matematičkom modelu koji je teorijski izveden i neključuje uticaj PD kontrolera ili trenja koja se javljaju. Upoređivanjem referentnih pozicija motora za oba pristupa sa teorijskim, može se zaključiti da su rezultati sa neuralnom mrežom veoma blizu teorijskih vrednosti, dok rezultati zasnovani na aproksimaciji od njih odstupaju.



Slika 60. Set za obuku neuralne mreže. Gore) Zadate pozicije motora koji kontrolišu aktuator. Sredina) Izlazna pozicija aktuatora; Dole) procena krutosti aktuatora na osnovu modela.



Slika 61. Eksperimentalni rezultati za *feedforward* zasnovan na neuralnoj mreži u otvorenoj petlji (OLNN), i *feedforward* kontrole zasnovane na aproksimaciji modela Tejlorovim redom (OL).

5 Zaključak

Doktorska disertacija ima za cilj da da doprinos bezbednoj fizikoj interakciji između robota i čoveka kroz razvoj algoritama za upravljanje krutošću kako na nivou zgloba, tako i na nivou završnog uređaja robota eksploatacijom pasivne krutosti. U okviru doktorske disertacije razvijen je algoritam za optimizaciju krutosti duž pravca kretanja završnog uređaja robota, kao i pristupi za oblikovanje elipse krutosti završnog uređaja u fazi planiranja trajektorije i krutosti zglobova i završnog uređaja. Realizovana je laboratorijska postavka žičano pogonjenog antagonističkog VSA za koji je razvijen algoritam za simultano upravljanje pozicijom i krutošću.

U disertaciji je predstavljen pristup oblikovanja krutosti/popustljivosti završnog uređaja robota, zasnovan na matematičkom modelu Kartezijanske krutosti. Na primeru kinematički redundantnih robota oblikovanje krutosti završnog uređaja je iz oblasti optimizacije prebačeno u oblast upravljanja eksploatacijom nultog prostora. Predložena metoda je testirana na robotu KUKA LWR koji ima krute zglobove opremljene senzoria momenta, što omogućava da robot emulira ponašanje robota pogonjenog pasivnim aktuatorima (SEA i VSA). Algoritam je testiran sa konstantnom krutošću u zglobovima kroz statičke eksperimente, kao i na primeru „peg in hole“ gde je krutost optimizovana duž pravca kretanja završnog uređaja robota. Algoritam koristi dva koordinatna sistema, jedan statički vezan za bazu robota u odnosu na koji se računa pozicija u prostoru i drugi pokretni koordinatni sistem vezan za završni uređaj robota u odnosu na koji se upravlja krutošću. Rezultati su pokazali da se teorijska i ostvarena popustljivost dobro podudaraju, uz manja odstupanja koja su posledica fizičkih ograničenja robota (pozicije zglobova su dostigle limit.). Dobijeni rezultati važni su za robote pogonjene aktuatorima konstantne krutosti koji nemaju dodatne stepene slobode za podešavanje krutosti završnog uređaja u odnosu na robote pogonjene aktuatorima promenljive krutosti. Sa robotima pogonjenim aktuatorima konstantne krutosti nije moguće istovremeno upravljati svim elementima u matrici (zbog nedovoljnog stepena kinematičke redundantnosti većine robota i konstrukcijskih ograničenja robota), već se samo kontrola pojedinačnih ključnih ciljanih elemenata unutar matrice krutosti može postići. Predloženi ključni element, kao što je popustljivost duž pravca kretanja, može se različito odabrati u zavisnosti od potreba zadatka.

Predložene su dve *offline* metode, zasnovane na SLSQP algoritmu, za oblikovanje krutosti završnog uređaja u ravanskom prostoru primenom elipsi krutosti, koje kombinuju nulti prostor i varijaciju krutosti u zglobovima. Cilj je da se algoritmi koriste u fazi analize i planiranja krutosti i trajektorije robota pogonjenih sa VSA. Obe metode usmeravaju elipsu krutosti duž željenog pravca (npr. duž pravca kretanja) i definišu odnose osa elipse. Jedna metoda je manje konzervativna i ona definiše minimalni odnos osa, dok druga konzervativnija definiše tačan odnos osa elipsi. Simulacioni rezultati su pokazali da sa malim varijacijama krutosti i nultim prostorom moguće usmeriti elipsu krutosti sa rasponom krutosti većim od minimalno zadatog, ali da je potrebno i variranje krutosti u zglobovima da bi se postigao željeni oblik elipse krutosti (orijentacija i odnos osa elipse). Kada se ostvari željeni oblik, pomoću CMS moguće je skalirati volumen krutosti na željenu vrednost.

Očekivano je da će budući robotski aktuatori imati ugrađenu pasivnu popustljivost kao žičano pogonjeni antagonistički aktuatori. To je struktura koja će osim bezbednije interakcije ostvarivati i energetska efikasnost i manju inerciju robota. Ova teza elaborira dizajn i kontrolu žičano pogonjenih antagonističkih aktuatora sa promenljivom krutošću, a koji će moći da se primene i na širu klasu aktuatora sa promenljivom krutošću.

Pošto antagonistički dizajn VSA, koji je priroda savladala kroz evoluciju, predstavlja osnovu za kretanje ljudi i sisara uopšte, ovo je nesumnjivo dizajn budućih robotskih aktuatora, koji imaju za cilj da rade u okruženju usmerenom na čoveka. Ovo istraživanje uvodi konvencionalni pristup

inženjerskoj kontroli zasnovan na kaskadnoj strukturi prema bioinspirisanoj krutosti antagonističkih aktuatora.

U radu je prikazana i eksperimentalno ispitana kaskadna struktura za simultanu kontrolu položaja i krutosti antagonističkog VSA. Kaskadna struktura je doprinela stabilnosti sistema jer je pravilan dizajn kontrolera unutrašnje petlje smanjio oscilacije na izlazu iz sistema, koje se mogu javiti posebno u mehaničkim sistemima koji imaju elastični prenos. Robusni kontroleri su dizajnirani za pozicije motora na osnovu eksperimentalne identifikacije prenosne funkcije motora sa reduktorom. Pored toga, lokalno linearizovane funkcije prenosa pozicija i krutosti aktuatora identifikovane su sa unutrašnjim zatvorenim petljama pozicija motora, tako da je dinamika kontrolera unutrašnje petlje uključena u identifikaciju. Primenjena je teorija upravljanja linearnim sistemom za podešavanje kontrolera. Statički dekupler je projektovan na osnovu procenjenog modela opruge i mehaničkog dizajna aktuatora. Za slučaj komplikovanih modela kada nije moguće analitičko rešenje za dekupler, predložena je i testirana *feedforward* neuralna mreža na “qb” aktuatoru, koja imitira dekupler i preračunava željene pozicija motora na osnovu zadatih pozicija i krutosti aktuatora.

Prednost ovog pristupa koji uključuje identifikaciju sistema je u tome što ne zahteva prethodno znanje o modelu sistema i informacije o sistemskim parametrima, kao što su trenje i inercija motora i aktuatora, efikasnost reduktora, masa senzora sile, itd. Još jedna prednost je da nije potrebno meriti ili kontrolisati obrtne momente motora. Upravljanje se ostvaruje preko napona, a veza između napona i obrtnog momenta je uključena u dinamiku koja se identifikuje. Potreban je samo deo modela sistema koji se odnosi na krutost i položaj aktuatora (jednačine (109) - (111)), čiji su odnosi utvrđeni eksperimentalno. Shodno tome, sličan princip dizajna kontrolnog sistema može se primeniti na različite tipove antagonističkih VSA.

Struktura I-PD/I-P kontrolera koji su korišćeni je odabrana da zadovolji ograničenje zatezne sile u sajlama povezanim na aktuator. Kontroleri su projektovani sa željenom robusnošću, tako da osim dinamike koja se zanemaruje u procesu identifikacije zbog njihovog manjeg uticaja, i u slučaju nemodelirane dinamike koja se javlja tokom kontinuiranog rada sistema usled promene nekog od parametara sistema, kontroleri će održavati stabilnost i dobre performanse praćenja putanje. Glavna karakteristika primenjenih kontrolera je lako podešavanje performansi sistema kao kompromis između robusnosti i brzine/performanse, promenom samo jednog parametra— λ . Stoga, promenom λ online, velika fleksibilnost za prilagođavanje sistema različitim scenarijima i promena robusnosti/performansi za različite radne tačke su lako ostvarive. Robusnost je od velike važnosti u sistemima popustljivošću i elastičnošću, tako da je ograničenje zatezanja uspešno rešeno.

Da bi se na odgovarajući način kontrolisao antagonistički VSA, posebno kada je dostupan širi opseg krutosti, koristi se banka kontrolera. Svaki kontroler u banci ima zadatak da pokrije raspon oko nominalne tačke za koju je projektovan, dok se koristi neometano prebacivanje između kontrolera (*engl. bumpless*).

Performanse kontrolera su verifikovane u dva eksperimenta: istovremeno praćenje pozicije i krutosti, dok se njihove reference menjaju odvojeno, dok se krutost aktuatora procenjuje iz modela, a kontrola krutosti/popustljivosti aktuatora je validirana krutošću izračunatom direktno iz merenja sile.

Literatura

- [1] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger, "Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis and New Insights," in *Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 395-407.
- [2] A. De Santis, B. Siciliano, A. De Luca and A. Bicchi, "An atlas of physical human-robot interaction," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 43, no. 3, pp. 253-270, 2008.
- [3] A. Edsinger and C. C. Kemp, "Human-Robot Interaction for Cooperative Manipulation: Handing Objects to One Another," in *RO-MAN 2007 - The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Jeju, South Korea, 2007.
- [4] H. Yu, S. Huang, G. Chen, Y. Pan and Z. Guo, "Human-robot interaction control of rehabilitation robots with series elastic actuators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1089 - 1100, 2015.
- [5] N. Pedrocchi, F. Vicentini, M. Matteo and L. M. Tosatti, "Safe Human-Robot Cooperation in an Industrial Environment," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 1, 2013.
- [6] A. De Luca, F. Flacco, A. Bicchi and R. Schiavi, "Nonlinear decoupled motion-stiffness control and collision detection/reaction for the VSA-II variable stiffness device," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [7] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," in *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Pittsburgh, PA, USA, USA, 1995.
- [8] D. W. Robinson, J. Pratt, D. Paluska and G. A. Pratt, "Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot," in *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, GA, USA, 1999.
- [9] Q. Zhang, D. Sun, W. Qian, X. Xiao and Z. Guo, "Modeling and Control of a Cable-Driven Rotary Series Elastic Actuator for an Upper Limb Rehabilitation Robot," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 14, 2020.
- [10] D. Dong, W. Ge, B. Convens, Y. Sun, T. Verstraten and B. Vanderborght, "Design, Optimization and Energetic Evaluation of an Efficient Fully Powered Ankle-Foot Prosthesis With a Series Elastic Actuator," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 61491 - 61503, 2020.
- [11] G. Grioli, S. Wolf, M. Garabini, M. Catalano, E. Burdet, D. Caldwell, R. Carloni, W. Friedl, M. Grebenstein, M. Laffranchi, D. Lefeber, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, M. van Damme, B. Vanderborght, A. Albu-Schaeffer and A. Bicchi, "Variable stiffness actuators: The user's point of view," *International Journal of Robotics Research*, vol. 34, no. 6, pp. 727-743, 2015.
- [12] B. Vanderborght, A. Albu-Schaeffer, A. Bicchi, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. Ganesh, M. Garabini, M. Grebenstein, G. Grioli, S. Haddadin, H. Hoppner, A. Jafari, M. Laffranchi, D. Lefeber, F. Petit, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, M. Van Damme, R. Van Ham, L. C. Visser and S. Wolf, "Variable impedance actuators: A review," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, no. 12, pp. 1601-1614, 2013.
- [13] R. Van Ham, T. G. Sugar, B. Vanderborght, K. W. Hollander and D. Lefeber, "Compliant actuator designs," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 81-94, 2009.

- [14] S. Wolf, G. Grioli, O. Eiberger, W. Friedl, M. Grebenstein, H. Höppner, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. G. Catalano, D. Lefeber, S. Stramigioli, N. Tsagarakis, R. Van Ham, B. Vanderborght, L. C. Visser, A. Bicchi and A. Albu-Schäffer, "Variable Stiffness Actuators: Review on Design and Components," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 5, pp. 2418 - 2430, 2016.
- [15] R. Van Ham, B. Vanderborght, M. Van Damme, B. Verrelst and D. Lefeber, "MACCEPA, the mechanically adjustable compliance and controllable equilibrium position actuator: Design and implementation in a biped robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 761-768, 2007.
- [16] A. De and U. Tasch, "A two-DOF Manipulator With Adjustable Compliance Capabilities and Comparison With the Human Finger," *Journal of Robotic Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 25-34, 1996.
- [17] S. A. Migliore, E. A. Brown and S. P. DeWeerth, "Biologically Inspired Joint Stiffness Control," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Spain, 2005.
- [18] G. Palli, C. Melchiorri and A. De Luca, "On the Feedback Linearization of Robots with Variable Joint Stiffness," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [19] T. Wimböck, C. Ott, A. Albu-Schaffer, A. Kugi and G. Hirzinger, "Impedance control for variable stiffness mechanisms with nonlinear joint coupling," in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 2008.
- [20] M. Chalon, W. Friedl, J. Reinecke, T. Wimboeck and A. Albu-Schaeffer, "Impedance control of a non-linearly coupled tendon driven thumb," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 2011.
- [21] Y. Nakanishi, S. Ohta, T. Shirai, Y. Asano, T. Kozuki, Y. Kakehashi, H. Mizoguchi, T. Kurotobi, Y. Motegi, K. Sasabuchi, J. Urata, K. Okada, I. Mizuuchi and M. Inaba, "Design Approach of Biologically-Inspired Musculoskeletal Humanoids," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 4, 2013.
- [22] K. Koganezawa, T. Nakazawa and T. Inaba, "Antagonistic control of multi-DOF joint by using the actuator with non-linear elasticity," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, Orlando, FL, USA, 2006.
- [23] K. Jovanović, V. Potkonjak and O. Holland, "Dynamic modeling of an anthropomorphic robot in contact tasks," *Advanced Robotics*, vol. 28, no. 11, pp. 793-806, 2014.
- [24] A. Albu-Schäffer, M. Fischer, G. Schreiber, F. Schoeppe and G. Hirzinger, "Soft robotics: what Cartesian stiffness can obtain with passively compliant, uncoupled joints?," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sendai, Japan, 2004.
- [25] S. Chiaverini, G. Oriolo and A. A. Maciejewski, "Redundant robots," in *Springer Handbook of Robotics*, Cham, Springer, 2016, pp. 221-242.
- [26] V. Potkonjak, B. Svetozarević, K. Jovanović and O. Holland, "The Puller-Follower Control of Compliant and Noncompliant Antagonistic Tendon Drives in Robotic Systems," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, no. 5, 2011.
- [27] H. Kobayashi and R. Ozawa, "Adaptive neural network control of tendon-driven mechanisms with elastic tendons," *Automatica*, vol. 39, no. 9, pp. 1509-1519, 2003.
- [28] I. Mizuuchi, R. Tajima, T. Yoshikai, D. Sato, K. Nagashima, M. Inaba, Y. Kuniyoshi and H. Inoue, "The design and control of the flexible spine of a fully tendon-driven humanoid

- "Kenta"," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [29] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppel, A. Albu-Schaeffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald and G. Hirzinger, "The KUKA-DLR Lightweight Robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing," in *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, Munich, Germany, 2010.
- [30] E. Todorov, T. Erez and Y. Tassa, "MuJoCo: A physics engine for model-based control," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura-Algarve, Portugal, 2012.
- [31] F. Petit and A. Albu-Schäffer, "Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 2011.
- [32] C. Loughlin, A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck and G. Hirzinger, "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *Industrial Robot: an international journal*, 2007.
- [33] S. Haddadin and S. Parusel, "Franka Emika," 2020. [Online]. Available: <https://www.franka.de/>.
- [34] F. Ferro and L. Marchionni, "REEM: A Humanoid Service Robot," in *First Iberian Robotics Conference*, Madrid, 2013.
- [35] W. Huo, S. Mohammed, J. C. Moreno and Y. Amirat, "Lower Limb Wearable Robots for Assistance and Rehabilitation: A State of the Art," *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 1068 - 1081, 2014.
- [36] A. Mauri, J. Lettori, G. Fusi, D. Fausti, M. Mor, F. Braghin, G. Legnani and L. Roveda, "Mechanical and Control Design of an Industrial Exoskeleton for Advanced Human Empowering in Heavy Parts Manipulation Tasks," *Robotics*, vol. 8, no. 3, p. 65, 2019.
- [37] O. Stasse, T. Flayols, R. Budhiraja, K. Giraud-Esclasse, J. Carpentier, J. Mirabel, A. del Prete, P. Souères, N. Mansard, F. Lamiroux, J.-P. Laumond, L. Marchionni, H. Tomé and F. Ferro, "TALOS: A new humanoid research platform targeted for industrial applications," in *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, Birmingham, UK, 2017.
- [38] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I—Theory," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 1-7, 1985.
- [39] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II-implementation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 8-16, 1985.
- [40] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part III—Applications," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, no. 1, pp. 17-24, 1985.
- [41] A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger, "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots," in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, USA, 2002.
- [42] G. A. Pratt, M. M. Williamson, P. Dillworth, J. Pratt and A. Wright, "Stiffness isn't everything," in *Experimental Robotics IV*, Stanford, California, USA, 1997.
- [43] V. Potkonjak, "Contribution to the dynamics and control of robots having elastic transmissions," *Robotica*, vol. 6, no. 1, pp. 63-69, 1988.
- [44] D. Lakatos, F. Petit and A. Albu-Schäffer, "Nonlinear Oscillations for Cyclic Movements in

- Human and Robotic Arms," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, no. 4, pp. 865 - 879, 2014.
- [45] M. Garabini, A. Passaglia, F. Belo, P. Salaris and A. Bicchi, "Optimality principles in stiffness control: The VSA kick," in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, 2012.
- [46] M. Garabini, A. Passaglia, F. Belo, P. Salaris and A. Bicchi, "Optimality principles in variable stiffness control: The VSA hammer," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, 2011.
- [47] C. C. Beltran-Hernandez, D. Petit, I. G. Ramirez-Alpizar and K. Harada, "Variable Compliance Control for Robotic Peg-in-Hole Assembly: A Deep-Reinforcement-Learning Approach," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, 2020.
- [48] A. Jafari, N. G. Tsagarakis, B. Vanderborght and D. G. Caldwell, "A novel actuator with adjustable stiffness (AwAS)," in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, 2010.
- [49] M. G. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, F. Bonomo, M. Mancini, N. Tsagarakis and A. Bicchi, "VSA-CubeBot: A modular variable stiffness platform for multiple degrees of freedom robots," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011.
- [50] Y. Liu, Y. Yang, Y. Peng, S. Zhong, N. Liu and H. Pu, "A Light Soft Manipulator With Continuously Controllable Stiffness Actuated by a Thin McKibben Pneumatic Artificial Muscle," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 4, pp. 1944-1952, 2020.
- [51] X. Li, Y. Pan, G. Chen and H. Yu, "Adaptive Human–Robot Interaction Control for Robots Driven by Series Elastic Actuators," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 1, pp. 169-182, 2017.
- [52] B. Lukić, T. Petrič, L. Žlajpah and K. Jovanović, "KUKA LWR Robot Cartesian Stiffness Control Based on Kinematic Redundancy," in *The 28th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2019*, Kaiserslautern, Germany, 2019.
- [53] V. Potkonjak, B. Lukić, Z. Gordić and P. Milosavljević, "Development of Experimental Platform for Research in Robots Having Compliant Joints," in *Proceedings of the 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2014)*, Vrnjačka Banja, 2014.
- [54] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis and A. Bicchi, "On the role of robot configuration in Cartesian stiffness control," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015.
- [55] C. Lee, S. Kwak, J. Kwak and S. Oh, "Generalization of Series Elastic Actuator Configurations and Dynamic Behavior Comparison," *Actuators*, vol. 6, no. 3, p. 26, 2017.
- [56] A. De Luca and W. J. Book, "Robots with Flexible Elements," in *Springer Handbook of Robotics 2nd edition*, Cham, Springer, 2016, pp. 243-282.
- [57] S. Kawamura, T. Yamamoto, D. Ishida, T. Ogata, Y. Nakayama, O. Tabata and S. Sugiyama, "Development of Passive Elements with Variable Mechanical Impedance for Wearable Robots," in *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 2002.
- [58] O. Tabata, S. Konishi, P. Cusin, Y. Ito, F. Kawai, S. Hirai and S. Kawamura, "Micro fabricated tunable bending stiffness devices," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 89, no. 1-2, pp. 119-123, 2001.

- [59] T. Morita and S. Sugano, "Design and development of a new robot joint using a mechanical impedance adjuster," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, 1995.
- [60] T. Morita and S. Sugano, "Development of An Anthropomorphic Force-Controlled Manipulator WAM-10," in *1997 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97*, Monterey, CA, USA, 1997.
- [61] R. Van Ham, B. Vanderborght, M. Van Damme, B. Verrelst and D. Lefeber, "MACCEPA: the Actuator with Adaptable Compliance for Dynamic Walking Biped," in *Climbing and Walking Robots*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006, pp. 759-766.
- [62] R. Van Ham. United States Patent US 8,950,967 B2, 10 February 2015.
- [63] S. Wolf and G. Hirzinger, "A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [64] T. Lu, Z. Shi, Q. Shi and T. J. Wang, "Bioinspired bicipital muscle with fiber-constrained dielectric elastomer actuator," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 6, pp. 75-81, 2016.
- [65] B. Lukić, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Control of Antagonistic VSA—An Engineering Control Approach to a Bioinspired Robot Actuator," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, no. 69, pp. 53-67, 2019.
- [66] R. Schiavi, G. Grioli, S. Sen and A. Bicchi, "VSA-II: a Novel Prototype of Variable Stiffness Actuator for Safe and Performing Robots Interacting with Humans," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, 2008.
- [67] G. Tonietti, R. Schiavi and A. Bicchi, "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, Spain, 2005.
- [68] M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, T. Bahls, M. Chalon, O. Eiberger, W. Friedl, R. Gruber, S. Haddadin, U. Hagn, R. Haslinger, H. Höppner, S. Jörg, M. Nickl, A. Nothhelfer, F. Petit, J. Reill, N. Seitz, T. Wimböck, S. Wolf, T. Wüsthoff and G. Hirzinger, "The DLR hand arm system," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011.
- [69] D. Villegas, M. Van Damme, B. Vanderborght, P. Beyl and D. Lefeber, "Third-Generation Pleated Pneumatic Artificial Muscles for Robotic Applications: Development and Comparison with McKibben Muscle," *Advanced Robotics*, vol. 26, no. 11-12, pp. 1205-1227, 2011.
- [70] K. Jovanović, *Modeling And Control of the Anthropomorphic Robot With Antagonistic Joints in Contact and Non-Contact Tasks*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beograd, 2015.
- [71] M. Osada, N. Ito, Y. Nakanishi and M. Inaba, "Realization of flexible motion by musculoskeletal humanoid "Kojiro" with add-on nonlinear spring units," in *2010 10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Nashville, TN, USA, 2010.
- [72] C.-P. Chou and B. Hannaford, "Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 90-102, 1996.
- [73] B. Verrelst, R. Van Ham, B. Vanderborght, F. Daerden, D. Lefeber and J. Vermeulen, "The Pneumatic Biped "Lucy" Actuated with Pleated Pneumatic Artificial Muscles," *Autonomous Robots*, vol. 18, pp. 201-213, 2005.
- [74] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos and S. Manesis, "A Survey on Applications of Pneumatic Artificial Muscles," in *2011 19th Mediterranean Conference on Control &*

Automation (MED), Corfu, Greece, 2011.

- [75] B. Verrelst, F. Daerden, D. Lefeber, R. Van Ham and T. Fabri, "Introducing Pleated Pneumatic Artificial Muscles for the Actuation of Legged Robots : a One-dimensional Set-up," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, 2000.
- [76] B. Jobbágy, D. Šimšík, J. Marek, J. Karchňák and D. Onofrejová, "Robotic Exoskeleton for Rehabilitation of the Upper Limb," *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 7, pp. 299-302, 2014.
- [77] V. Potkonjak, K. M. Jovanović, P. Milosavljević, N. Bašcarević and O. Holland, "The puller-follower control concept in the multi-jointed robot body with antagonistically coupled compliant drives," in *IASTED international conference on robotics. 2011*, Pittsburgh, USA, 2011.
- [78] F. Petit, M. Chalon, W. Friedl, M. Grebenstein, A. Albu-Schaffer and G. Hirzinger, "Bidirectional Antagonistic Variable Stiffness Actuation: Analysis, Design & Implementation," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
- [79] O. Eiberger, S. Haddadin, M. Weis, A. Albu-Schäffer and G. Hirzinger, "On Joint Design with Intrinsic Variable Compliance: Derivation of the DLR QA-Joint," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA, 2010.
- [80] J. W. Hurst, J. E. Chestnutt and A. A. Rizzi, "The Actuator With Mechanically Adjustable Series Compliance," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 597-606, 2010.
- [81] C. E. English and D. Russell, "Mechanics and stiffness limitations of a variable stiffness actuator for use in prosthetic limbs," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 34, no. 1, pp. 7-25, 1999.
- [82] T. Lens and O. von Stryk, "Design and dynamics model of a lightweight series elastic tendon-driven robot arm," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [83] S. Mohamaddan and T. Komeda, "Wire-driven mechanism for finger rehabilitation device," in *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Xi'an, China, 2010.
- [84] O. Holland and R. Knight, "The anthropomimetic principle," in *Proceedings of the AISB06 symposium on biologically inspired robotics*, Bristol, UK, 2006.
- [85] A. Diamond, R. Knight, D. Devereux and O. Holland, "Anthropomimetic Robots: Concept, Construction and Modelling," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, no. 5, 2012.
- [86] V. Potkonjak, "Is Artificial Man Still Far Away: Anthropomimetic Robots Versus Robomimetic Humans," *Robotics*, vol. 9, no. 3, 2020.
- [87] H. G. Marques, M. Jäntschi, S. Wittmeier, O. Holland, C. Alessandro, A. Diamond, M. Lungarella and R. Knight, "ECCE1: The first of a series of anthropomimetic musculoskeletal upper torsos," in *2010 10th IEEE-RAS International Conference on humanoid Robots*, Nashville, TN, USA, 2010.
- [88] Y. Nakanishi, Y. Namiki, K. Hongo, J. Urata, I. Mizuuchi and M. Inaba, "Realization of large joint movement while standing by a musculoskeletal humanoid using its spine and legs coordinately," in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France, 2008.

- [89] B. Lukić and K. Jovanović, "Influence of Mechanical Characteristics of a Compliant Robot on Cartesian Impedance Control Design," in *Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering*, Silver Lake, Serbia, 2015.
- [90] C. Ott, A. Albu-Schäffer, A. Kugi and G. Hirzinger, "Decoupling based Cartesian impedance control of flexible joint robots," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [91] A. Ajoudani, N. G. Tsagarakis and A. Bicchi, "Choosing Poses for Force and Stiffness Control," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1483-1490, 2017.
- [92] W. Roozing, Z. Ren and N. G. Tsagarakis, "An efficient leg with series-parallel and biarticular compliant actuation: design optimization, modeling, and control of the eLeg," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, no. 1, pp. 37-54, 2021.
- [93] A. Nejadfard, S. Schütz, K. Mianowski, P. Vonwirth and K. Berns, "Moment Arm Analysis of the Biarticular Actuators in Compliant Robotic Leg Carl," in *Biomimetic and Biohybrid Systems*, Cham, Springer, 2018, pp. 348-360.
- [94] P. Chiacchio, "Force polytope and force ellipsoid for redundant manipulators," *Journal of Robotic Systems*, vol. 14, no. 8, pp. 613-620, 1997.
- [95] T. Yoshikawa, "Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms," in *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, MO, USA, 1985.
- [96] N. Lukić and P. B. Petrović, "Complementary projector for null-space stiffness control of redundant assembly robot arm," *Assembly Automation*, vol. 39, no. 4, pp. 696-714, 2019.
- [97] R. Kelly, V. S. Davila and A. Loría, "Case Study: The Pelican Prototype Robot," in *Control of Robot Manipulators in Joint Space*, London, Springer, 2005, pp. 113-132.
- [98] F. Ficuciello, A. Romano, L. Villani and B. Siciliano, "Cartesian impedance control of redundant manipulators for human-robot co-manipulation," in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, USA, 2014.
- [99] A. Albu-Schäffer, C. Ott, U. F. and G. H. , "Cartesian impedance control of redundant robots: recent results with the DLR-light-weight-arms," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003.
- [100] A. Dietrich, C. Ott and A. Albu-Schäffer, "An overview of null space projections for redundant, torque-controlled robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 34, no. 11, pp. 1385-1400, 2015.
- [101] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer and G. Hirzinger, "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing," in *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, Atlanta, GA, USA, 2007.
- [102] B. Vanderborght, B. Verrelst, R. Van Ham, M. Van Damme, D. Lefeber, B. M. Y. Duran and P. Beyl, "Exploiting Natural Dynamics to Reduce Energy Consumption by Controlling the Compliance of Soft Actuators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 4, pp. 343-358, 2006.
- [103] B. Lukić, T. Petrič, L. Žlajpah and K. Jovanović, "Maximizing the End-Effector Cartesian Stiffness Range for Kinematic Redundant Robot with Compliance," in *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2020. Mechanisms and Machine Science, vol 84*, Cham, Springer, 2020, pp. 208-217.
- [104] M. H. Ang and G. B. Andeen, "Specifying and achieving passive compliance based on manipulator structure," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 4, pp.

504-515, 1995.

- [105] J. J. Rice and J. M. Schimmels, "Passive Compliance Control of Redundant Serial Manipulators," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 10, no. 4, p. 044507, 2018.
- [106] A. Ajoudani, M. Gabbicini, N. Tsagarakis, A. Albu-Schäffer and A. Bicchi, "TeleImpedance: Exploring the role of common-mode and configuration-dependant stiffness," in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, Osaka, Japan, 2012.
- [107] N. Knežević, B. Lukić, K. Jovanović, L. Žlajpah and T. Petrič, "End-effector Cartesian stiffness shaping - sequential least squares programming approach," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 1-14, 2021.
- [108] C. Gaz, F. Flacco and A. De Luca, "Identifying the dynamic model used by the KUKA LWR: A reverse engineering approach," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China, 2014.
- [109] N. Knežević, B. Lukić and K. Jovanović, "Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning," in *Advances in Service and Industrial Robotics*, Cham, Springer, 2020, pp. 337-345.
- [110] G. Antonelli, "Stability Analysis for Prioritized Closed-Loop Inverse Kinematic Algorithms for Redundant Robotic Systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 5, pp. 985 - 994, 2009.
- [111] M. H. Arbo and J. T. Gravdahl, "Stability of the Tracking Problem with Task-Priority Inverse Kinematics," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 22, pp. 121-125, 2018.
- [112] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani and G. Oriolo, "Differential Kinematics and Statics," in *Robotics: modelling, planning and control*, Berlin/Heidelberg, Germany, Springer Science & Business Media, 2010, pp. 105-160.
- [113] K. Kronander and A. Billard, "Learning Compliant Manipulation through Kinesthetic and Tactile Human-Robot Interaction," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 3, pp. 367-380, 2014.
- [114] L. Žlajpah and T. Petrič, "Generation of Smooth Cartesian Paths Using Radial Basis Functions," in *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2020*, Cham, Springer, 2020, pp. 171-180.
- [115] P. T. Boggs and J. W. Tolle, "Sequential quadratic programming for large-scale nonlinear optimization," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 124, no. 1-2, pp. 123-137, 2000.
- [116] N. Knežević, B. Lukić, K. Jovanović, T. Petrič and L. Žlajpah, "End-Effector Cartesian Stiffness Optimization: Sequential Quadratic Programming Approach," in *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019)*, Silver Lake, Serbia, 2019.
- [117] B. Lukić and K. Jovanović, "Minimal Energy Cartesian Impedance Control of Robot with Bidirectional Antagonistic Drives," in *Advances in Robot Design and Intelligent Control. RAAD 2016. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Belgrade, Serbia, 2016.
- [118] K. Jovanović, B. Lukić and V. Potkonjak, "Feedback Linearization for Decoupled Position/Stiffness Control of Bidirectional Antagonistic Drives," *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 31, no. 1, pp. 51-61, 2018.
- [119] K. Jovanović and B. Lukić, "Enhanced Puller-Follower Approach for Stiffness Control of Antagonistic Drives," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical,*

Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2016), Zlatibor, Serbia, 2016.

- [120] M. Chalon and B. d'Andréa-Novel, "Backstepping experimentally applied to an antagonistically driven finger with flexible tendons," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 217-223, 2014.
- [121] B. Lukić, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Gain Scheduling Control of Antagonistic Actuators Based on System Identification," in *Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2018. Mechanisms and Machine Science*, Cham, Springer, 2018, pp. 425-435.
- [122] B. Lukić, K. Jovanović and T. B. Šekara, "Cascade Control Design for Antagonistic Robot Joint Based on ARX Model Characterization," in *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2018)*, Palić, Serbia, 2018.
- [123] C. Della Santina, M. Bianchi, G. Grioli, F. Angelini, M. G. Catalano, M. Garabini and A. Bicchi, "<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnbot.2019.00069/full#:~:text=Controlling%20soft%20robots%3A%20balancing%20feedback%20and%20feedforward%20elements,>" *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 75-83, 2017.
- [124] F. Angelini, C. Della Santina, M. Garabini, M. Bianchi, G. M. Gasparri, G. Grioli, M. G. Catalano and A. Bicchi, "Decentralized Trajectory Tracking Control for Soft Robots Interacting With the Environment," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 924 - 935, 2018.
- [125] M. Keppler, D. Lakatos, C. Ott and A. Albu-Schäffer, "Elastic Structure Preserving (ESP) Control for Compliantly Actuated Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 2, pp. 317-335, 2018.
- [126] S. Song, W. Cai and Y.-G. Wang, "Auto-tuning of cascade control systems," *ISA Transactions*, vol. 42, no. 1, pp. 63-72, 2003.
- [127] M. R. Mataušek and T. B. Šekara, "PID controller frequency-domain tuning for stable, integrating and unstable processes, including dead-time," *Journal of Process Control*, vol. 21, no. 1, pp. 17-27, 2011.
- [128] T. B. Šekara, M. B. Trifunović and V. Govedarica, "Frequency Domain Design of a Complex Controller under Constraints on Robustness and Sensitivity to Measurement Noise," *Electronics*, vol. 15, no. 1, pp. 41-44, 2011.
- [129] M. Č. Bošković, T. B. Šekara, M. R. Rapačić and V. Govedarica, "Tuning rules of PI/PID controllers with robustness constraint for industrial processes without dead-time," in *Proceedings in 23th International Scientific-Professional Information Technology Conference 2017*, Žabljak, 2017.
- [130] B. Z. Lukić, K. M. Jovanović and G. S. Kvaščev, "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator," in *2016 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, 2016.
- [131] B. Lukić, K. Jovanović and A. Rakić, "Realization and Comparative Analysis of Coupled and Decoupled Control Methods for Bidirectional Antagonistic Drives: QBmove maker pro," in *Proceedings of 3th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering*, Zlatibor, Serbia, 2016.
- [132] K. J. Åström and T. Hägglund, "Chapter 6: PID design," in *Advanced PID control*, Durham, NC, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, pp. 158-225.
- [133] M. Shamsuzzoha and M. Lee, "IMC-PID Controller Design for Improved Disturbance Rejection of Time-Delayed Processes," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.

46, no. 7, pp. 2077-2091, 2007.

- [134] S. Skogestad and I. Postlethwaite, "Chapter 10: Control Structure Design,," in *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, 2nd Edition*, New York, NY, Wiley, 2001, pp. 405-458.
- [135] W. Leonhard, "Control of a Separately Excited DC Machines," in *Control of Electrical Drives*, Berlin, Springer Science & Business Media, 2001, pp. 77-96.
- [136] K. Ogata, "Mathematical Modeling of Mechanical Systems and Electrical Systems," in *Modern Control Engineering*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2009, pp. 63-73.
- [137] M. Jansson, "Subspace Identification and ARX Modeling," in *IFAC Proceedings Volumes*, 2003.
- [138] M. R. Mataušek and T. B. Šekara, "A fast closed-loop process dynamics characterization," *ISA Transactions*, vol. 53, no. 2, pp. 489-49, 2014.
- [139] H. Hjalmarsson, "From experiment design to closed-loop control," *Automatica*, vol. 41, no. 3, pp. 393-438, 2005.
- [140] T. Polóni, T. A. Johansen and B. Rohal'-Ilkiv, "Modeling of air-fuel ratio dynamics of gasoline combustion engine with ARX network," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 13, no. 6, p. 061009, 2008.
- [141] F. J. MacWilliams and N. J. A. Sloane, "Pseudo-random sequences and arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no. 12, pp. 1715-1729, 1976.

BIOGRAFIJA AUTORA

Branko Lukić, master inženjer elektrotehnike i računarstva, rođen je 30.03.1990. godine u Loznici. Osnovnu školu je završio u Lešnici, a srednju Tehničku školu u Loznici kao učenik generacije. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2008 godine. Diplomirao je na Odseku za signale i sisteme 2012. godine. Iste godine upisao je master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Master studije je završio 2013. godine na temu “Razvoj eksperimentalne platforme za ispitivanje uticaja popustljivosti u zglobovima na ponašanje robota” pod mentorstvom prof. Veljka Potkonjaka. Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na Modulu upravljanje sistemima i obrada signala upisao je 2013. godine.

Od aprila 2014. do decembra 2016. godine angažovan je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na projektu ministarstva kao stipendista Ministarstva, a od januara 2017. godine angažovan je kao istraživač pripravnik na projektu ministarstva „Istraživanje i razvoj ambijentalno inteligentnih servisnih robota antropomorfnih karakteristika”. U septembru 2020. godine izabran je u zvanje istraživač saradnik.

Učesnik je srpsko–slovenačkog bilateralnog projekta “Razvijanje novih pristupa za olakšavanje kolaborativnog rada robota najnovije generacije i čoveka u zadacima zajedničke manipulacije objektima”, između Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i Instituta Jožef Stefan u Ljubljani u periodu 2018.–2019. godina. U periodu jul 2020.–jul 2022. godine učesnik je na naučnoistraživačkom projektu *Mechanical Impedance Estimation and Planning for the Next Generation Robots–ForNextCobot*, u okviru Programa za izvrsne projekte mladih istraživač–PROMIS Fonda za nauku Republike Srbije.

U avgustu 2016. godine učestvovao je na letnjoj školi robotike “IS3 HRC 2016: Italian-Serbian Summer School On Human-Robot Coworking - Master Classes on Human-Robot Coworking and Advanced Robotic Grasping”, održane na Mašinskom fakultetu u Beogradu. U periodu novembar–decembar 2018. godine kao i u periodu septembar – novembar 2019. godine, proveo je studentski istraživački boravak na institutu Jožef Stefan u Ljubljani u Laboratoriji za kolaborativnu robotiku (*CoBoTaT Laboratory*). U januaru 2019. godine pohađao je kurs “Sliding Mode Control and Observation”, održan na Centrale Supélec u Parizu, u organizaciji European Embedded Control Institute.

U 2014., 2015. i 2016. godini, dobitnik je Stipendije Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja namenjene studentima doktorskih studija, kao i Gradske nagrade grada Loznice za najbolje studente. Jedan od koautora je na dva rada koji su proglašeni za najbolji rad na konferenciji IcETRAN u sesiji za robotiku i fleksibilnu automatizaciju 2016. i 2019. godine, kao i autor rada koji je proglašen za najbolji rad u studentskoj kategoriji na *International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region* (RAAD 2019), u Kajzerslauternu u Nemačkoj.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Бранко Лукић

Број индекса 5018/2013

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2022.

Бранко Лукић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бранко Лукић

Број индекса 5018/2013

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости

Ментор Коста Јовановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2022.

Бранко Лукић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Симултано управљање позицијом и крутошћу робота погоњеног актуаторима променљиве крутости

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

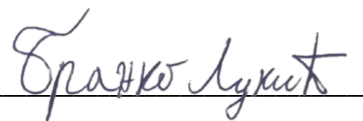
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 28.03.2022.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.