

Konstruisanje robotskog aktuatora podesive krutosti sa spiralnim oprugama i *feedforward* upravljanje

Danilo Klasanović, Lazar Jugović i Nikola Knežević
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Apstrakt — U ovom radu predstavljena je jedna izvedba aktuatora sa promenljivom krutošću (engl. *Variable Stiffness Actuator (VSA)*). Ovakvi aktuatori svojim karakteristikama omogućavaju bezbednu interakciju robota sa okolinom i čovekom. Takođe, kod repetitivnih zadataka aktuatori sa promenljivom krutošću mogu postići veću efikasnost nego klasični kruti aktuatori. Konstrukcija predloženog aktuatora je realizovana korišćenjem spiralnih opruga, kao osnovni elementi kojima se postiže fleksibilnost samog aktuatora. U poređenju sa prethodnim realizacijama aktuatora sa promenljivom krutošću koje koriste fleksione opruge, predloženi tip aktuatora korišćenjem spiralnih opruga omogućava kompaktniji dizajn i efikasniju kontrolu krutosti na nivou aktuatora. Konceptualni dizajn aktuatora realizovan je korišćenjem *low-cost* komponenti napravljenih korišćenjem tehnologije 3D štampanja. Izvršena je karakterizacija ovakvog dizajna aktuatora i formiran je *feedforward* model upravljanja. Model aktuatora je izveden korišćenjem kvadratne regresije na osnovu sprovedenih eksperimenata.

Ključne reči—Aktuator; Podesiva krutost; Spiralne opruge; Čovek-robot interakcije; 3D štampač; Fleksibilna automatizacija; *Feedforward* upravljanje; Kvadratna regresija; *soft* roboti.

I. UVOD

Glavni cilj savremene robotike i automatizovanih procesa jeste razvoj robota koji mogu da rade i funkcionišu van struktuiranih i unapred poznatih okruženja, da komuniciraju sa ljudima i drugim robotima. Kako bi prethodni cilj bio ispunjen, potrebno je razviti adekvatnu akciju sistema za ovakve robote, što predstavlja najviše istraživanu temu. Kao rezultat prethodno pomenute teme se nameću nova elektro-mehanička rešenja, strategije upravljanja, senzorni sistemi i modeli samih aktuatora. [1]

Roboti koji predstavljaju veliki broj istraživanja, evoluciju u robotici i koji obezbeđuju sigurnost i ponašanje slično čoveku u prirodnim situacijama čine posebnu grupu robota koji se nazivaju *soft* roboti. *Soft* roboti predstavljaju robote fleksibilne strukture i različite impedansne karakteristike koji imaju glatke pomeraje i ostvaruju veliku energetska efikasnost. [2]

Kako bi se osigurao bezbedan kontakt robota sa čovekom i

drugim robotima, potrebno je formirati kvalitetno upravljanje pozicijom i rotacijom robota, kao i krutošću istog. U slučaju standardnih industrijskih robota, postoji veliki broj razvijenih metoda upravljanja, koje imaju svoje prednosti i mane u odnosu na određenu ulogu samog robota. *High-gain robust* kontrola, *feedback* linearizacija, *backstepping*, kontrola aktivnom impedansom predstavljaju jedne od primera klasičnih metoda upravljanja robotom. [2] Glavna mana pomenutih metoda jeste narušavanje dinamike sistema i smanjenje fleksibilnosti samog aktuatora. Usled pomenutih mana dolazi do ukidanja glavne uloge *soft* robota. Kako bi se sprečilo ukidanje dinamike sistema, potrebno je posmatrati čoveka i njegovo prilagođavanje novim situacijama, kao i uspostaviti ponašanje slično čoveku. Jedan od načina da se to postigne jeste uvođenje *feedforward* upravljanja, preko čega će se indirektno uvesti model robota, u koji je, iako teorijski nepoznat, ugrađeno gore pomenuto ponašanje.

Postoje različiti modeli i tipovi *soft* robota koji obezbeđuju pomenute karakteristike. Kao dva glavna problema se nameću garantovanje optimalnih performansi i dinamičnost, kao i uspostavljanje bezbedne interakcije sa okruženjem i čovekom. Kako bi se rešili prethodno pomenuti problemi, došlo se do potrebe za fleksibilnošću, elastičnošću i prigušenjem. Prethodni radovi su uveli različite vrste *soft* robota, kao što su *serial elastic actuators (SEA)*[3], koji imaju *link* mase *m* povezan elastičnim elementom na aktuator, kao i *variable-stiffness actuators (VSA)*[4] o kojima će biti reči u ovom radu. Posebna klasa *soft* robota predstavljaju roboti koji sadrže kontinualne deformabilne strukture, tj. pipke. Zajedničko za sve pomenute robote jeste postojanje simultane kontrole momenta i fleksibilnosti u ograničenjima realnog sveta, koje može da se vrši na dva načina, aktivno i pasivno[5]. Aktivno upravljanje predstavlja kontrolu momenta svakog zgloba, dok pasivno upravljanje predstavlja kontrolu fizičkih karakteristika robota i njegovih materijala.

Usled nedovoljno jednostavne kontrole momenata svakog zgloba *soft* robota, koji mogu imati ogroman broj stepeni slobode i zglobova, pasivna kontrola se javlja kao kvalitetna opcija upravljanja robotom[5]. Posmatranjem biomorfoloških

Danilo Klasanović – dipl. inž, master studije, br. indeksa 2022/3010, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: kd223010m@student.etf.bg.ac.rs).

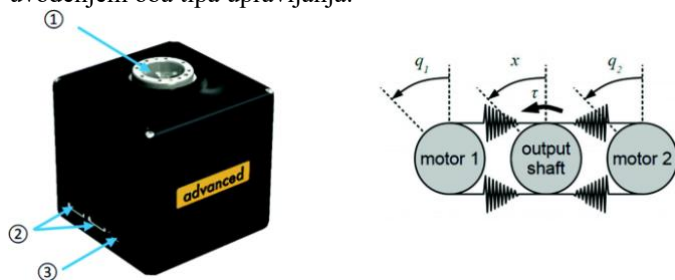
Lazar Jugović – dipl. inž, master studije, br. indeksa 2022/3147, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra

73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: jl223147m@student.etf.bg.ac.rs).

Nikola Knežević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: knezevic@etf.bg.ac.rs).

osobina čoveka i strukture istog, došlo se do dizajna *soft* robota koji sadrži dva motora koji predstavljaju antagonistički par mišića kod čoveka i deluju antagonistički (suprotni smerovi dejstva), povezani nelinearnom oprugom koja predstavlja elastičnu vezu između svakog od motora i aktuisanog linka [6,7]. U [8], [9], [10] su prikazani koncepti antagonističke akcije u teorijskom i eksperimentalnom delu u okviru prvog prototipa VSA.

U radu [11], prikazan je *qb* actuator kao jedna vrsta VSA aktuatora koji imaju antagonističko dejstvo svojih motora. Robot koji je prikazan u tom radu ima dva stepena slobode i uvedeno je *feedforward* upravljanje pomoću neuralne mreže, kao i metodama mašinskog učenja. Podaci koji su služili za obučavanje mreže i modela mašinskog učenja dobijeni su eksperimentalnim putem pretpostavljajući određeni model samog aktuatora u koga su ugrađene pretpostavke kako bi se lakše odredili parametri. Takođe, usled nedovoljno dobro određenog modela, potrebno je bilo uvesti i *feedback* upravljanje, čime se dodatno popravljala pozicija samog linka. *Feedback* upravljanje ima najveću ulogu na početku procesa dok *feedforward* model ne nauči dovoljno o samom aktuatoru. Posmatrajući dobijene grafike se zaključuje da je greška upravljanja najmanja kada se koristi i *feedforward* i *feedback* upravljanje, s tim da se složenost samog procesa usložnjava uvođenjem oba tipa upravljanja.



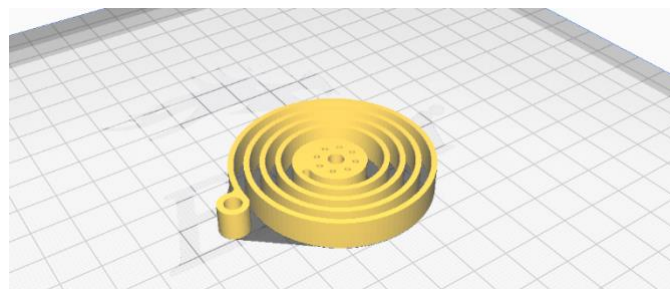
Sl. 1. Qb aktuator i njegov model

U velikom broju prethodnih radova, formirani modeli aktuatora su se zasnivali na korišćenju elastičnih fleksionih opruga, koje se savijaju ili izdužuju. Cilj ovog rada jeste uvođenje aktuatora podesive krutosti sa spiralnim oprugama, koje se uvijaju, čime se može postići kompaktniji dizajn aktuatora i fleksibilnija automatizacija pri proizvodnji. Korišćenjem 3D štampe moguće je podešavati različit nivo krutosti opuga, što omogućava proizvodnju aktuatora različitih krutosti za različita opterećenja.

II. MODEL AKTUATORA

Formirani model aktuatora promenljive krutosti sastoji se od dva *stepper* motora 28BYJ-48 (1) (2048 step koraka koji odgovaraju punom krugu jednog *stepper* motora), dve spiralne opruge pokretane pomoću *stepper* motora (2), nosača za kompletan model (3), nosača za *stepper* motor (4), proširenja za pozicioniranje linka (5), prirubnice za *stepper* motor (6) i poluge koja predstavlja link formiranog *soft* robota (7), teg (8). Link robota, prirubnica, nosači za model i *stepper* motore, proširenje kao i spiralne opruge su napravljene pomoću 3D štampe, "Creality Ender 3". Korišćen je program *Fusion 360*

za projektovanje modela, a zatim su isti učitani u programu *Cura Slicer* koji vrši pripremu za štampu. Na slici 2 prikazan je model spiralne opruge koja je korišćena kao osnovni izvor fleksibilnosti kod predloženog dizajna aktuatora.



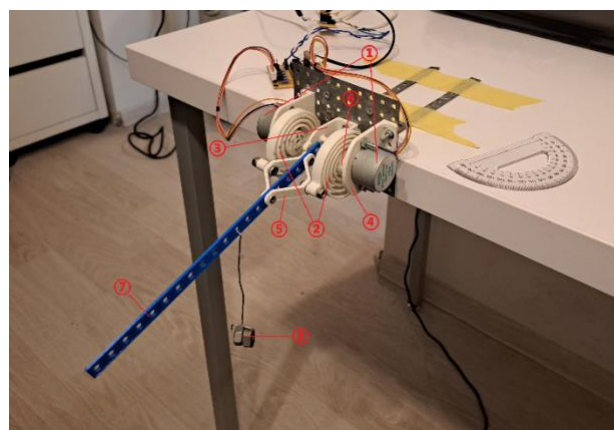
Sl. 2. Elastična spiralna opruga

Prečnik spiralne opruge iznosi 55 mm, širina opruge iznosi 8 mm, dok debljina iste iznosi 1.5 mm.

Dimenzije linka, iznose 210 mm x 2 mm x 10 mm, gde su date dimenzije, redom, dužina, širina i debljina.

Kako bi *stepper* motori mogli da pokreću opruge, potrebno je ugraditi određeno električno kolo koje upravlja ovim motorima. U okviru pomenutog kola postoji *driver* kolo za napajanje motora za napon od 5V, koje se sastoji od 8 bipolarnih tranzistora sa zaštitnim otpornicima (po 4 tranzistora koja upravljaju kalemovima od svakog motora). Pored pomenutih delova, postoji i *STM32F103C8T6* mikrokontroler koji upravlja opisanim električnim kolom, pri čemu je kod za programiranje mikrokontrolera pisan u programskom jeziku C++, u programskom okruženju *Arduino IDE*. Kako bi grafičko-korisnički interfejs, o kome će biti reči u odeljku V, funkcionisao, potrebno je da se priključi *PL2303* kolo za USB komunikaciju sa računarom. Ovo kolo serijsku USB komunikaciju prevodi u *UART* protokol razumljiv mikrokontroleru.

Kompletan model aktuatora sa povezanim svim pomenutim delovima označenim brojevima je prikazan na Sl. 3.



Sl. 3. Kompletan model aktuatora.

Zadavanjem pomeraja *stepper* motora za određeni broj koraka (tj. stepeni koji daju pozicije motora) vrši se pozicioniranje linka, kao i uspostavljanje određene krutosti samog aktuatora. Detalji o akciji će biti dati u narednom

poglavlju.

III. METOD I EKSPERIMENT

Na Sl. 3 se može videti kompletan model formiranog aktuatora. Kako bi se aktuatorom moglo upravljati na svrsishodan način neophodno ga je opisati odgovarajućim modelom i izvršiti estimaciju parametara predloženog modela.

Prilikom uspostavljanja modela uvedene su određene pretpostavke kako bi opisani model imao jednostavnu formu pogodnu za implementaciju na mikrokontroleru.

Prva pretpostavka se zasniva na ekvilibrijumskoj poziciji aktuatora (x_e). Pretpostaviće se da je ona jednaka srednjoj vrednosti pozicija dva *stepper* motora koji upravljaju linkom.

$$x_e = \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (1)$$

gde su q_1 i q_2 pozicije prvog i drugog *stepper* motora.

Nakon određene ekvilibrijumske pozicije, potrebno je proceniti krutost c sistema. Kako bi se pomenuta krutost procenila, potrebno je odrediti vezu između momenata koji deluju na link i otklona koji link napravi prilikom delovanja istih momenata. U ovom radu pretpostavlja se linearna veza između momenata i nastalog otklona usled delovanja istih, kako bi se dobili podaci neophodni za učenje modela aktuatora. Kod klasične elastične fleksione opruge, važi sledeća relacija:

$$F = k\Delta l \quad (2)$$

gde je F sila koja deluje na oprugu, k koeficijent krutosti, tj. elastičnosti same opruge i Δl pomeraj opruge duž x ose koji se dogodio prilikom delovanja sile F . Kako se kod formiranog modela aktuatora koriste spiralne opruge, potrebno je prethodnu relaciju transformisati na oblik koji predstavlja rotaciono kretanje. Kod rotacionog kretanja sila F postaje moment τ (engl. *torque*), translatorni pomeraj Δl postaje ugaoni pomeraj $\Delta\phi$, dok koeficijent krutosti sada se obeležava sa oznakom c . Na osnovu prethodno opisane analogije između fleksionih i spiralnih opruga, dolazi se do potrebne formule za vezu između krutosti aktuatora, momenta i otklona linka koji se formira delovanjem momenta τ :

$$\tau = c\Delta\phi \quad (3)$$

Kako bi se dobile pojedinačne vrednosti za krutost c i pripremili podaci za učenje modela koji će kasnije predstavljati *feedforward* model upravljanja, potrebno je izvršiti eksperiment.

Eksperiment se sastoji u postavljanju malog tega mase $m = 10g$ na link formiranog modela *soft* robota, na način koji je prikazan na Sl. 4. Kako bi se dobili što precizniji rezultati, teg iste mase je postavljan na različite pozicije duž linka l , čime se dobijaju različiti momenti delovanja na sam link. Momen τ koji stvara teg mase m na link postavljen na l rastojanje od ose rotacije linka iznosi

$$\tau = mgl \quad (4)$$

gde g predstavlja gravitaciono ubrzanje koje deluje na teg mase m .

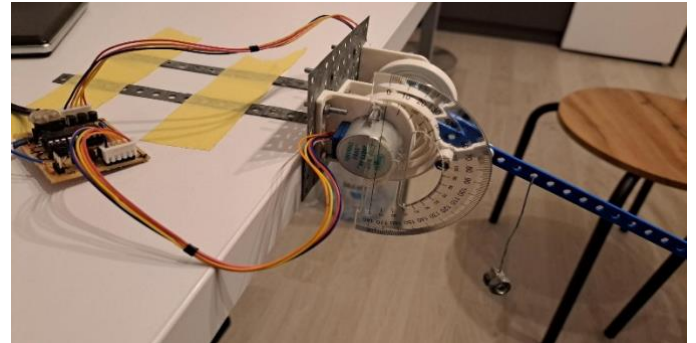
Na osnovu prethodnih razmatranja, dolazi se do zaključka da se krutost c aktuatora može proceniti pomoću sledeće relacije:

$$c = \frac{mgl}{\Delta\phi} \quad (5)$$

Promena krutosti aktuatora se vrši promenom razlike pozicija motora Δq , pri čemu i jedan i drugi motor imaju istu vrednost pozicije, samo drugačijeg znaka, čime se održava ista ekvilibrijumska pozicija linka. Za 10 različitih vrednosti razlika pozicija motora, vrši se procena krutosti u 7 različitih pozicija tega duž linka i to na 6, 8, 10, 12, 14, 16 i 18 cm distance od ose rotacije, pri čemu se razlike pozicija motora kreću od 0° do 405° sa korakom od 45° .

Prilikom realizacije eksperimenta, primećeno je da se nakon razlike od 405° između pozicija dva motora dostiže maksimalna krutost aktuatora, koja je posledica maksimalnog navijanja opruga. Usled ovakvih primećenih osobina, razlika između pozicija motora se nije više povećavala, kako bi merenja ostala validna.

Merenje otklona, $\Delta\phi$, se vršilo pomoću uglomera tako što se isti postavio na stranu jednog od dva *stepper* motora, kao što se može videti na Sl. 4.



Sl. 4. Prikaz eksperimenta – aktuator zajedno sa tegom mase 10 g i postavljenim uglomerom za merenje otklona linka usled delovanja momenta.

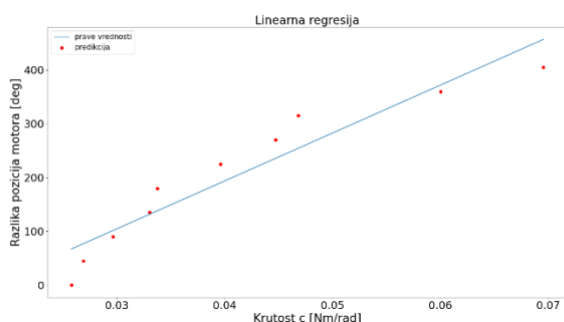
IV. FEEDFORWARD UPRAVLJANJE

Na osnovu podataka koji su prikupljeni u izvršenom eksperimentu, prikazanom u poglavlju III, formiran je *feedforward* model za upravljanje aktuatorom. Kako opšti, teorijski, model nije unapred poznat, potrebno je naučiti aktuator kako da na pravi način proceni poziciju svojih motora tako da se postigne željena pozicija linka, tj. završnog uređaja, kao i željena krutost sistema.

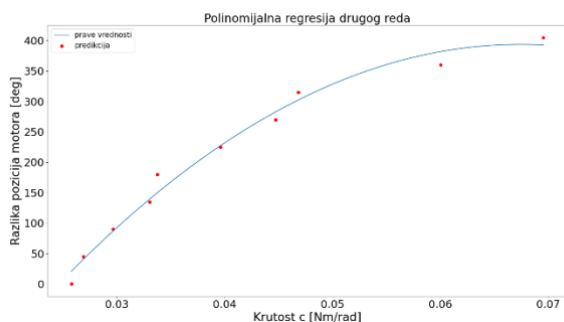
Usled nedovoljnog broja podataka učenje *feedforward* modela korišćenjem neuralne mreže nije dalo dobre rezultate (tačnost 20%), pa se zbog toga primenio drugi vid učenja modela.

Kako se neuralnom mrežom ne mogu dobiti zadovoljavajući rezultati, nad dobijenim podacima izvršeno je usrednjavanje duž ose eksternog momenta. Pomenuto usrednjavanje dobijene procene krutosti se vrši duž svih izračunatih momenata delovanja (tj. duž različitih vrednosti pozicije tega na linku) za jednu poziciju motora aktuatora. Ovakvim postupkom se dobija skup od 10 tačaka, što predstavlja vrednost usrednjene krutosti za svaku od 10 različitih vrednosti razlika pozicija motora. Plotovanjem pomenutih tačaka dobija se 1D grafik, Sl. 5, na osnovu koga se zaključuje da postoji mogućnost formiranje modela mašinskog učenja na osnovu koga se može dobiti adekvatan *feedforward* model samog aktuatora. Nad

novodobijenim skupom podataka primenjena je linearna regresija, kako bi se dobio inicijalni model aktuatora. Ulazna veličina za regresiju predstavlja odgovarajuću krutost aktuatora, dok je izlazna veličina bila potrebna razlika između dva stepper motora kako bi se ta krutost ostvarila. Ukupna srednja apsolutna greška za ovakav formirani model iznosi 17.3 %. Da bi se greška smanjila, primenjena je kvadratna regresija. Kvadratnom regresijom je povećana kompleksnost modela aktuatora, ali je znatno smanjena greška. U slučaju kvadratne regresije, srednja apsolutna greška iznosi 5.2 %. Na Sl. 5-6 su prikazani rezultati primenjene linearne i kvadratne regresije nad dobijenim podacima, što predstavlja model *feedforward* upravljanja dobijen mašinskim učenjem.



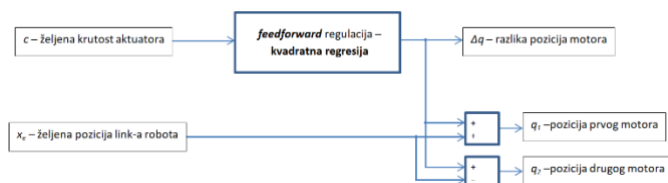
Sl. 5. Rezultat linearne regresije primenjen nad podacima dobijenim u eksperimentu (ulazni podaci – procenjena krutost, izlazni podaci – razlika pozicija motora)



Sl. 6. Rezultat kvadratne regresije primenjen nad podacima dobijenim u eksperimentu (ulazni podaci – procenjena krutost, izlazni podaci – razlika pozicija motora)

Posmatrajući prethodne grafike, uočava se vizuelnom inspekcijom da greška modela kvadratne regresije daje manju grešku na datom skupu podataka u odnosu na linearnu regresiju, čime se potvrđuju dobijene brojne vrednosti greške.

Ovakvim pristupom se dobija željeni *feedforward* model. Kako je potrebno upravljati i pozicijom i krutošću aktuatora, potrebno je izlaz modela kvadratne regresije (razliku između stepper motora) konvertovati, korišćenjem informacije o referentnoj krutosti i poziciji aktuatora, u željene pozicije stepper motora. Blok dijagram *feedforward* upravljanja prikazan je na Sl. 7.



Sl. 7. Blok dijagram *feedforward* upravljanja

V. GRAFIČKO-KORISNIČKI INTERFEJS I KOMUNIKACIJA

Feedforward model upravljanja implementiran je u programskom jeziku *python*. Po pokretanju programa, od korisnika se očekuje da unese željenu referentnu vrednost krutosti c u $\text{Nm}/^\circ$ u opsegu od $0.02 \text{ Nm}/^\circ$ do $0.07 \text{ Nm}/^\circ$, kao i željenu referentnu vrednost pozicije x_e u stepenima u opsegu od -90° do 90° . Nakon unošenja, program poziva funkciju *predict* koja vrši predikciju potrebne razlike pozicija motora na osnovu zadate krutosti, uz pomoć već optimalno postavljene krive koja predstavlja kvadratnu regresiju kao vrstu mašinskog učenja. Korisniku se nakon predikcije ispisuju informacije o potrebnom kretanju i pokreću se motori. Kada motori izvrše potrebno kretanje, na *command window*-u se ispisuje pozicija na koju su motori došli. Primer opisanog grafičko-korisničkog interfejsa je prikazan na Sl. 8.

Željene pozicije motora se šalju pomoću *USB* kabl-a i *PL2303* kola, o kome je bilo reči u odeljku II, pri čemu je komunikacija između programskog jezika *python* i pomenutog kola implementirana pomoću *serial* biblioteke u *python*-u.

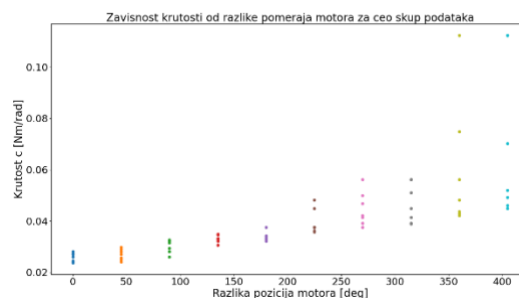
```

Zelite li da nastavite: Da
Unesite željenu krutost aktuatora [Nm/deg]: 5e-4
Unesite željenu poziciju završnog uređaja [deg]: 45
Potrebna razlika pomeraja motora za vasu željenu krutost je: 70.18012887484281 stepeni
Potrebna pozicija prvog motora je: 115 stepeni
Potrebna pozicija drugog motora je: -25 stepeni
    
```

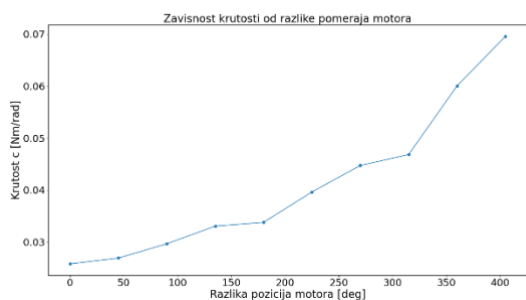
Sl. 8. Primer grafičko-korisničkog interfejsa

VI. REZULTATI

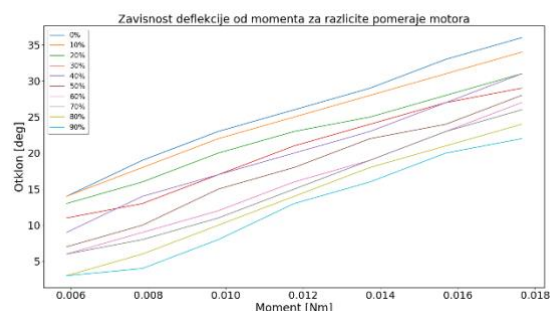
Na Sl. 9-13 su prikazani rezultati izvršenog eksperimenta.



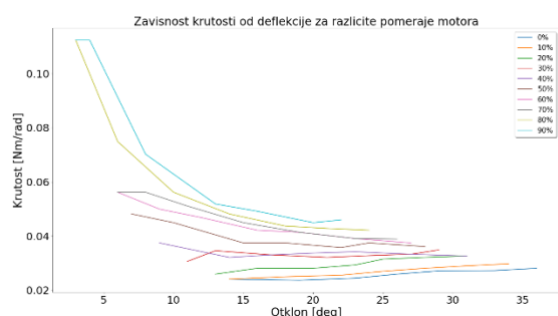
Sl. 9. Zavisnost krutosti od razlike pomeraja motora za ceo skup podataka



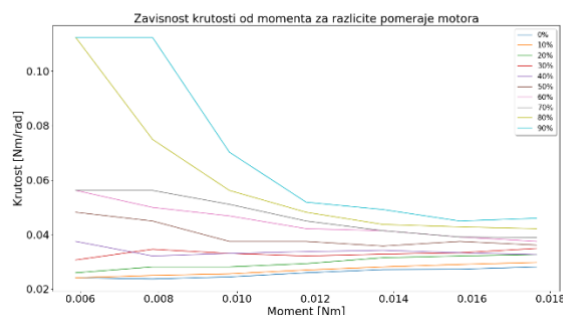
Sl. 10. Zavisnost krutosti od razlike pomeraja motora (usrednjeno duž momenata)



Sl. 11. Zavisnost otklona linka od nultog položaja od momenta delovanja na isti za različite pomeraje motora, tj. krutosti aktuatora



Sl. 12. Zavisnost krutosti aktuatora od otklona linka od nultog položaja za različite pomeraje motora



Sl. 13. Zavisnost krutosti aktuatora od momenta delovanja na link za različite pomeraje motora

Posmatrajući dobijene grafike, može se uočiti da postoji zavisnost između krutosti i razlike pozicija motora, pri čemu se sa povećavanjem razlike, krutost povećava. Sa dodatnim povećavanjem apsolutne razlike pozicije motora, krutost se ne bi značajno promenila, čime karakteristika ulazi u oblast zasićenja. Takođe, posmatrajući Sl. 9, uočava se da su izmerene krutosti približno konstantne za jednu vrednost razlike pozicija

motora i ne zavise mnogo od eksternog momenta, čime se potvrđuje prethodno odrađeno usrednjavanje duž ose eksternog momenta, usvojeno kao pretpostavka pri kreiranju modela mašinskog učenja.

Posmatrajući Sl. 11-13, uočava se da se sa povećavanjem momenta koji deluje na link robota, otklon od ravnotežnog položaja povećava, pri čemu je otklon veći pri većoj elastičnosti aktuatora. Takođe, pri većim otklonima linka od ravnotežnog položaja, kao i većim delovnim momentima, krutost sistema ostaje približno slična, što predstavlja očekivani rezultat. Može se primetiti odstupanje od prethodnog pravila pri velikoj krutosti samog aktuatora, usled velike nelinearnosti, gde ne postoji mogućnost tačne detekcije otklona.

Usled nepostojanja *feedback* upravljanja, kao ni određenih senzora na samom aktuatoru, ne postoji mogućnost računanja proizvedenih momenata na motorima pri određenim pozicijama istih. Takođe, ne postoji mogućnost popravke pozicije link-a robota usled neidealnosti opruga i poluge pri određenoj vrednosti krutosti aktuatora. Vizuelnom inspekcijom, može se uočiti ispravno funkcionisanje sistema, upravljanog *feedforward* regulacijom.

VII. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata, uočavaju se očekivane karakteristike elastičnog aktuatora, koje su opisane u odeljku VI. Takođe, primenom kvadratne regresije nad dobijenim podacima kao metodom mašinskog učenja za formiranje *feedforward* modela regulacije dobija se manja srednja kvadratna greška u odnosu na primenu obične linearne regresije. Vizuelnom inspekcijom ponašanja linka *soft* robota nad kojim je primenjena dobijena regulacija, uočava se da se isti ponaša na očekivani način. Usled nepostojanja senzora, ne postoji mogućnost povratne informacije o ostvarenoj poziciji i krutosti aktuatora. Takođe, usled nepostojanja *feedback* regulacije, ne postoji mogućnost popravke pozicije.

Uočeno je da je primena fleksibilne automatizacije (3D štampača) značajna u robotskim sistemima i *soft* robotima, koji smanjuju svoju cenu, a kvalitet ostaje na približnom nivou kao kod robota sa čeličnim i metalnim delovima. Takođe, uočeno je da primena spiralnih opruga kod *soft* robota nije smanjila performanse u odnosu na fleksione opruge, kao i da je primena samih *soft* robota značajna u komunikaciji robota sa čovekom i drugim robotima.

Planovi za buduća istraživanja predstavlja uvođenje senzornih elemenata na sam aktuator, kao što su senzori momenta i enkoderi. Takođe, potrebno je uvesti *feedback* regulaciju sistema, kako bi se poboljšala preciznost, usled nesavršenosti *feedforward* modela.

ZAHVALNICA

Autori rada žele da se zahvale dr. Kostu Jovanoviću, vanrednom profesoru na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu koji je svojim korisnim savetima i diskusijama doprineo boljim i kvalitetnijim rezultatima rada.

LITERATURA

- [1] M. G. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, F. Bionomo, M. Mancini, N. Tsagarakis, and A. Bicchi, "VSA-CubeBot: a modular variable stiffness platform for multiple degrees of freedom robots," *2011 IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Shanghai, China, pp. 5090-5095, May 9-13, 2011.
- [2] C. D. Santina, M. Bianchi, G. Grioli, F. Angelini, M. Catalano, M. Garabini, and A. Bicchi, "Controlling Soft Robots, Balancing Feedback and Feedforward Elements," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 24, pp. 75-83, September, 2017.
- [3] Pratt, Gill A., and Matthew M. Williamson. "Series elastic actuators." *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*. Vol. 1. IEEE, 1995.
- [4] Vanderborght, Bram, et al. "Variable impedance actuators: A review." *Robotics and autonomous systems* 61.12,1601-1614, 2013.
- [5] Petit, Florian, and Alin Albu-Schäffer. "Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm." *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011.
- [6] Petit, Florian, et al. "Bidirectional antagonistic variable stiffness actuation: Analysis, design & implementation." *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010.
- [7] 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," *2008 IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut.*, Pasadena, CA, USA, pp. 2171-2176, May 19-23, 2008.
- [8] G. Tonietti and R. Schiavi, and A. Bicchi, "Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction," *2005 IEEE Int. Conf. on Rob. & Aut.*, ICRA, Barcelona, Spain, pp.528-533, April 18-22, 2005.
- [9] G. Tonietti and R. Schiavi, and A. Bicchi, "Optimal Mechanical/Control Design for Safe and Fast Robotics", *Proceedings of the 9th International Symposium on Experimental Robotics*, Singapore, 18-21 June, 2004.
- [10] G. Boccadamo, R. Schiavi, S. Sen, G. Tonietti, and A. Bicchi. "Optimization and Fail-Safety Analysis of Antagonistic Actuation for pHRI", *European Robotics Symposium 2006*, volume 22 of Springer Tracts in Advanced Robotics, Henrik I. Christensen, editor, pages 109 - 118. Springer Berlin / Heidelberg, 2006.
- [11] N. Knežević, B. Lukić, and K. Jovanović, "Feedforward Control Approaches to Bidirectional Antagonistic Actuators Based on Learning," *Int. Conf. on Rob. in Alpe-Adria Danube Region*, RAAD 2019, Kaiserslauternm, Germany, pp. 337-345, June 19-21, 2019.

ABSTRACT

In this paper we showed one realization of a variable stiffness actuator (VSA) for robotics applications. Special characteristic of such actuators provides safer interaction of the robot with the environment and people. Also, actuators with adjustable stiffness could achieve higher efficiency than classic rigid actuators while performing repetitive tasks. Construction of the proposed actuator was realized using spiral springs, as the basic elements for achieving the compliance of the actuator itself. Compared to previous actuator implementations with variable stiffness using flexural springs, the proposed type of actuator with spiral springs allows more compact design and more effective stiffness control at the actuator level. Conceptual actuator design was realized using low-cost components made using 3D printing technologies. In this paper, we showed characterization of this design, and formed feedforward control model. The actuator model was derived using least squares regression based on the conducted experiments.

Design of a robotic actuator of adjustable stiffness with spiral springs and feedforward control

Danilo Klasanović and Lazar Jugović, master studies at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade