

Unconventional Robots

Snake Like Robots

Svemir Popić, Branko Miloradović, Miloš D Jovanović, Aleksandar Rodić

Centar za robotiku, Institut Mihajlo Pupin

Beograd, Srbija

{svemir.popic@; branko.miloradovic; milos.jovanovic; aleksandar.rodic}@pupin.rs

Sažetak—Poslednjih godina jako je poraslo interesovanje u inženjerskoj praksi za istraživanje višestruko redundantnih robota koji su pre svega biološki inspirisani organizmima ili pojedinačnim organima životinja iz čovekove okoline, a koji se značajno razlikuju od do sada najčešće razmatranih organa zglobnog tipa. U radu je predstavljeno konstruktivno rešenje jednog multi-redundantnog robota oblika slonove surle. Izrada ovakvih robota zahteva rešavanje niza problema, kako konstruktivnih tako i problema rešavanja direktne i inverzne kinematike, dinamike kao i upravljanja. Rad predstavlja kontinuitet prethodnih istraživanja robotizovane veštačke šake jer su korišćeni isti principi pogona bazirani na tendonima kao osnovnim elementima za prenos sile, a koji su u nekim prethodnim radovima detaljno analizirani. Ovakav pristup obezbeđuje udaljeno pozicioniranje pogona koji sam manipulator - mehanizam čine i dovoljno lakim i dovoljno pokretljivim.

Ključne riječi - robot; multi redundantan; surla 3; zmijoliki roboti.

I. UVOD

Roboti, bilo da se radi o industrijskim ili humanoidnim, bazirani su na tzv. zglobnim sistemima. Takvi sistemi podrazumevaju relativno mali broj zglobova, najčešće rotacionih, obično sa jednim stepenom slobode kretanja, međusobno povezanih segmentima različitog oblika (različite dužine, poprečnog preseka i sl.). Pri tom oni najčešće pripadaju tzv. neredundantnom tipu gde je broj stepeni slobode pokriven brojem mogućih jednačina za definisanje njihovog kretanja tj. predstavljen je jednačinama prostora. Njihov osnovni zadatak je bio kako dovesti izvršni organ (end effector), koncipiran u obliku hvataljke ili nekog radnog alata, u određene tačke u prostoru ili pratiti određenu trajektoriju. Pri tom su postojala i određena ograničenja. Okolina u kojoj jedan takav robot funkcioniše, mora biti poznata tj. dobro strukturirana, a ponekada i izolovana od okruženja kako bi se sprečile povrede ili oštećenja.

Kako bi se rešili ovakvi problemi jedan od načina je konstruisanje tzv. mekih zglobova (compliance segment) koji su poseduju veliki broj sensorisa i mogu da i reaguju na kontakt pojedinačnih segmenata sa predmetima iz neposrednog okruženja. [1]

Međutim, nisu sve sredine takve. Mnoge su pune prepreka koje treba zaobići kako bi zadatak bio uspešno realizovan. Jedan od takvih zadataka, koji je dosta davno uočen, je

inspekcija nuklearnih reaktora sa mnoštvom prepreka unutar samog reaktora (cevi za hlađenje, komore gorivih elemenata, moderatora i sl. gde je ljudsko prisustvo isključeno, a konvencionalni roboti zglobne strukture neprimenljivi. Posebna pečat ovakvom istraživanju dao je japanski načnik Hirose [2] koji se bavio istraživanjima zmijolikih robota.



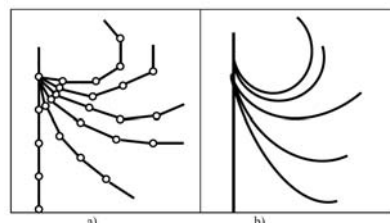
Slika 1. Jedna od mnogobrojnih varijati Robota zmije prof. Hirosea

Međutim, ovi roboti su predstavljali zapravo samo jedan niz međusobno povezanih segmenata od kojih je svaki imao svoj sopstveni pogon, obično sa jednim stepenom slobode kretanja. Kao takvi, predstavljali su samo model mehanizma kojeg oponašaju, ali je kretanje, međusoban položaj segmenata, jednom rečju upravljanje, bilo jako otežano.

Korišćenje tendona za daljinski prenos sile analiziran je u nekim prethodnim radovima [3, 4].

II. OSNOVNE PRETPOSTAVKE

Standardni višečlani mehanizmi se formiraju uzastopnim povezivanjem većeg broja krutih tela pomoću, najčešće, veza sa jednim, najčešće rotacionim, stepenom slobode kretanja. Elementi takvog kinematskog lanca sastoje se od komponenata čije se kretanje obično izvršava na nivou zgloba. Sa druge strane, krivolinijski (serpentine type) mehanizmi se teoretski sastoje od neograničenog broja zglobova koji omogućavaju formiranje kinematskog lanca koji se može opisati kontinualnom krivom hipotetički neograničene pokretljivosti.



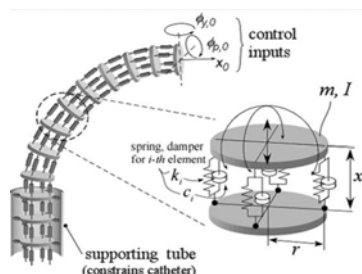
Slika 2. Strukturne razlike: a) hiper-redundantna i b) kontinualna struktura

Robinson [5] je predložio klasifikaciju ovih sistema u tri kategorije:

- diskretni sa konvencionalnom strukturom,
- krivolinijski ili oblik serpentine, zmijoliki,
- kontinualni.

Krivolinijski (zmijoliki sistemi) su zapravo diskretni sistemi sa vrlo kratkim krutim vezama između segmenata koji omogućavaju "ispeglanu" krivolinijsku strukturu zmijolikog tela. Naime, ako se pogleda i jedna druga "gruba" podela na "kičmene" i "nekičmene" strukture, onda svakako strukture tipa zmija ili riba se upravo odlikuju ovom osobinom velikog broja vrlo kratkih, ali krutih veza, koje im omogućavaju postizanje neograničene pokretljivosti. Kod diskretnih sistema svaki segment poseduje sopstveni pogon, svaki segment je kruto vezan za naredni i praktično predstavlja prenosnik narednog kretanja. Kod ostalih sistema, može biti pogonjen samo jedan element (segment) ili više njih, ali svakako sa ograničenjem mogućih pokreta (krivih linija)[6].

Mehanička struktura jednog zmijolikog robota može se predstaviti na sledećoj slici:



Slika 3. Mehanička struktura zmijolikog (snake-like) robota

U cilju detaljnije kinematičke i dinamičke analize jednog redundantnog sistema možemo se poslužiti priloženom skicom Sl. 3. Na osnovu toga, urađena je na 3D printeru probna struktura (Sl. 4) koja predstavlja jedan segment planiranog sistema. Na osnovu priloženih Sl. 3. i Sl 5. urađena je kinematička analiza sistema. Kinematički model predloženog sistema daje brzinu hvataljke \dot{X} u funkciji ugaonih brzina po zglobovima \dot{q} i predstavlja se u dobro poznatom obliku:

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (1)$$

gde je $J(q)$ Jakobijan matrica dimenzije $(m \times n)$.



Slika 4. Eksperimentalni dvosegmentni mehanizam sa po 2 stepena slobode kretanja (rotacija oko x i y ose)

U radu [7] analiziran je mehanizam zmijolikog robota i pretpostavljene su dve mogućnosti:

- Svi zglobovi se nezavisno aktiviraju,
- Zglobovi su podeljeni na podgrupe koje se simultano aktiviraju.

Rešavanje inverznog kinematskog problema iz jednačine (1) je mnogo složenije i u većini slučajeva ne postoji jedinstveno rešenje. Rešenje inverznog kinematskog problema se može napisati u obliku:

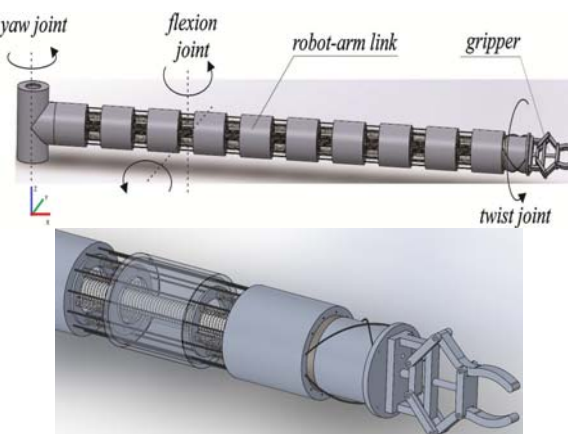
$$\dot{q} = J^+ \dot{X} + \beta(I - J^+ J) \nabla \phi \quad (2)$$

gde je J^+ pseudoinverzna matrica matrice J , a $\nabla \phi$ je gradijent funkcije $\phi(q)$ u odnosu na q . Simulacioni rezultati jednačine (2) su predstavljeni u [7].

III. OSNOVI KONSTRUKCIJE

U skladu sa urađenim proračunima i simulacionim rezultatima izabrane su sledeće komponente za pogonski sistem. Motor Faulhaber 3863HD 24CR, reduktor Faulhaber 38A i encoder HEDS 5540-A/2. Motor pri naponu od 24V ima u praznom hodu 5800 obrtaja u minuti, moment bez opterećenja 1,455 mNm, a pri ukočenom rotoru 129 mNm. Četvorostepeni reduktor koji je fabrički kuplovan sa motorom ima prenosni odnos od 800:1 i daje kontinualni moment od 20Nm dok sa kratkotrajnim dozvoljenim prekoračenjem postiže 32 Nm. Integrisani trokanalni enkoder ima 500 linija po obrtaju.

Karakteristika ovakvih robota je da su segmenti međusobno povezani zglobovima sa jednim ili dva stepena slobode. Mi smo se odlučili za cilindrične zglobove sa 2 DOF. Moguće je da svaki pojedinačni segment ima sopstveni pogon jer se na taj način postižu i najbolje manevarske sposobnosti. Međutim, u cilju redukovanja troškova odlučeno je da se pogoni svaki treći zglob tako da se ostala dva zgloba, koja se nalaze ispod pogonjenog, ponašaju u saglasno sa pogonskim. Pošto robot ima 12 segmenata, 4 sistema motor-reduktor pogone zglobove, dok su ostala tri motora određena za pogon dvostepene šake (2) i hvataljke (1).



Slika 5. CAD model hiper-redundantnog fleksibilnog robota sa hvataljkom na poslednjem segmentu



Slika 6. CAD model zmijolikog robota IMP Snake

Na Sl.6. predstavljen je CAD model pojedinačnog zgloba. Slično surli kod slona, segmenti su redosledno uvećavani sa prečnikom spoljašnjeg cilindra počev od 65 pa do 95 mm. Dvoosni zglob sa dva stepena slobode je zapravo kardanski zglob koji dozvoljava relativno zakretanje približno 20° . Kroz kvadratne otvore se provlače užad (tendoni) za aktivaciju zglobova, dok se kroz centralni otvor provlače tendoni za pogon šake i hvataljke. Treba napomenuti da se mogu koristiti slobodni tendoni ali i oni koji su smešteni u sprovodnim crevima (bužirima). Ovakav način onemogućava uticaj relativnog zakretanja pojednih segmenata robota u odnosu na šaku i ivrsne organe – hvataljke.

Na Sl. 7. i Sl. 8. predstavljen je CAD model i realizovani 3D štampani prototip IMP Snake robota sa 12 segmenata sa provučenim sajlama od neistegljivog materijala. U radovima [3, 4] detaljno je razmatran problem tendona sa načinima provlačenja kao i materijali za izradu tendona.

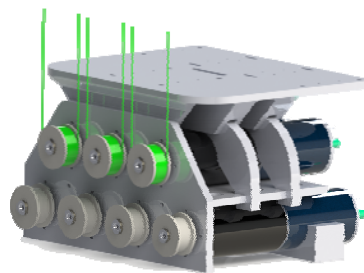
Jasno je da se sa većim brojem segmenata postižu kumulativno veći radni uglovi celog robota, a takođe su i radni uglovi dvostepene šake (wrist joint) ograničeni konstruktivnim mogućnostima. U obzir dolazi i varijanta da se ova tri motora dislociraju u samu šaku, čime se povećavaju radni opsezi na uštrb nepovoljnog povećanja ukupne mase na kraju surle, čime se zapravo smanjuje njeno korisno opterećenje, a u nekim slučajevima i geometrijsko ograničenje s obzirom na povećanje gabarita robotske šake.



Slika 7. CAD model zmijolikog robota IMP Snake



Slika 8. 3D štampani model zmijolikog robota IMP Snake



Slika 9. CAD model pogonske kutije IMP Snake robota



Slika 10. 3D štampani model pogonske kutije IMP Snake robota sa ugrađenim motorima i drajverima

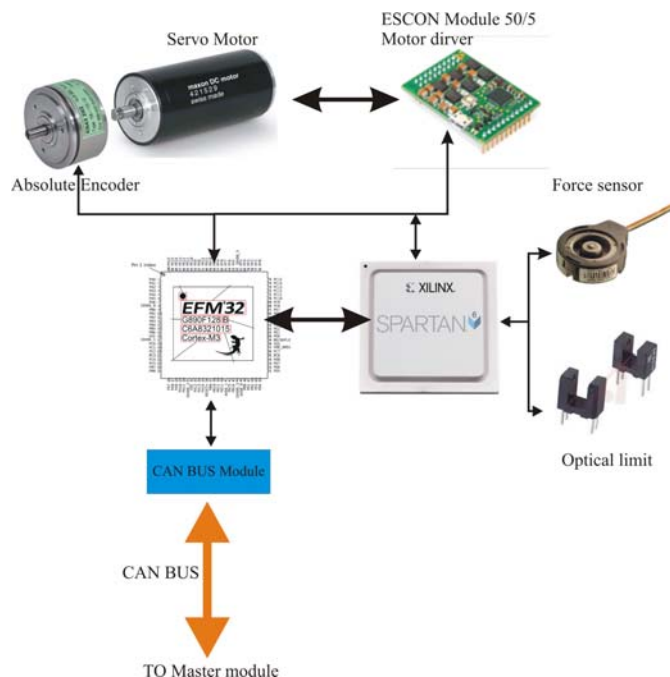
Ne treba isključiti ni mogućnost ugradnje veštačke šake na poslednjem segmentu ovog robota, s obzirom da je ona kao takva deo jednog drugačijeg istraživanja.

Da bi se celokupna konstrukcija učinila što je moguće lakšom, a time i energetski efikasnijom, izabran je dislocirani raspored motora i to u posebno dizajniranom kućištu. Bez obzira kakva bude primena ovakvog robota, ova konstrukcija će biti smeštena na nekom glavnom prenosnom uređaju tipa mobilnog robota-točkaša ili podvodnog robota, gde su dva ovakva multi-redundantna robota planirana za izvršavanje aktivnosti pod vodom [8]. Na Sl. 9. i Sl. 10. prikazan je CAD model i 3D štampani prototip kućišta sa motor-reduktorima i drajverima. Na izlazne osovine reduktora montiraju se doboši na koje se namotava nerastegljivo uže velike zatezne čvrstoće. Moguće je jednim motorom zatezati samo jedno uže ili da doboš istovremeno vrši namotavanje odnosno odmotavanje zavisno od toga kakva je geometrija pokreta koji se izvodi. Takođe, moguće je samo vršiti zatezanje, dok se povratak u ravnotežni položaj obezbeđuje oprugama. U radu [4] predviđena je mogućnost da se elastičnim elementom (u ovom slučaju posebna vrsta elastičnog materijala) zauzme jedan krajnji položaj, a onda se povlačenjem tendona elastični materijal isteže do drugog krajnjeg položaja. Povratak u neki međupoložaj obezbeđuje se kontrolisanim otpuštanjem tj. odmotavanjem tendona. Inače, za krute delove sistema za 3D štampu su korišćeni materijali Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ili Polylactic Acid (PLA) dok se za elastične delove koristi materijal Thermoplastic Elastomers (TPE).

IV. UPRAVLJAČKI SISTEM

Kao što je već i pomenuto, ovakav jedan predloženi robotski sistem je vrlo složene structure, kako sa strane mehanike tako i u pogledu upravljanja. Pošto je u pitanju hiper-redundantni sistem sa velikim brojem stepeni slobode, koji se karakteriše velikim stepenom složenosti, elastičnosti i redundantnosti, očigledno je da upravljački sistem i u pravljački algoritam mora da bude vrlo sofisticiran da odgovori zadacima upravljana jednog ovakvog sistema.

Da bi upravljački sistem odgovorio potrebama robotskog sistema potrebno je obezbediti adekvatne informacije o sistemu, stanju, položaju, dinamičkom stanju, opterećenju itd. Očigledno je da bi svi ovi parametri bili zadovoljeni potrebno je implementirati veliki broj senzora. Svaki motor je direktno povezan putem osovine rotora sa ugrađenim enkoderom koji obezbeđuje podatak o trenutnom ugaonom položaju osovine na izlazu reduktora. Na izlaznoj osovine je montiran kotur sa tendonima koji se namotavaju ili odmotavaju sa Kalema montiranog na izlazu reduktora. U najjednostavnijoj predstavi možemo uzeti da je tendon apsolutno idealan, što podrazumeva da je njegova elastičnost zanemaljiva. U realnosti ovo sigurno nije slučaj. Ipak merenjem struje motora u svakom vremenskom trenutku tokom pokretanja pojedinih stepeni slobode možemo da odredimo momenat na izlazu reduktora i u izvesnoj aproksimaciji ovaj momenat povežemo sa silom zatezanja strune – tendona. Simulacionom analizom je utvrđeno da postoji korelacija između sile zatezanja tendon i struje u motoru. Ova zavisnost se koristi prilikom realizacije upravljačkog algoritma za određivanje ukupne sile koja deluje na sistem u svakoj tački. Na osnovu izmerenih sila putem struje motora može se odrediti intenzitet sile i momenta u celom sistemu i na osnovu toga implementirati robusni position-force upravljački algoritam. Pozicija svakog segmenta se meri putem enkodera u sprezi sa izmerenom strujom motora. Ove dve velicine se kombinuju da bi se izračunala realna pozicija zgloba u sistemu. Ukupna spoljasnja sila koja deluje na sistem se dobija kombinacijom svih izmerenih sila u zglobovima u sistemu. Realizacija upravljačkog sistema za predstavljeni robotski sistem bazira se na brzom mikrokontroleru. U tu svrhu koristi se National Instrumentov sb RIO 9636 kontrolerska pločica. Svaki segmen na svojim krajevima poseduje posebnu vrstu detektora dodira segmenata. U tu svrhu na rubovima segmenata je naljepljena rezistivna guma tako da sledeći segment svojim dodiranjem menja otpornost u datoj tački i tako se određuje da li su segmenti došli u kontakt. Rezistivna guma je oblika kružnog isečka. Širina kružnog isečka je mala, reda 2-3 mm te samim tim je lako montirati na rubove elemenata. Električni kontakti kružnog isečka se ostvaruju na 4 krajne tačke kružnog isečka, takozvanim mestima nišanske končanice. Ovako ožičen sistem se uvodi u specijalno dizajniran pojačavač signala a zatim u konvertorski modul RIO 9636 kontrolera. Na osnovu razlike otpornosti izmerene između ove 4 tačke sa velikom sigurnošću se može odrediti u kom kvadrantu je došlo do kontakta. Tačnost određivanja kontakta u kvadrantu je reda 0,87 rad.



Slika 11 Blok šema upravljačkog sistema multi-segmentnog sistema.

Ovako realizovani upravljački sistem sposoban je za laku implementaciju sa drugim upravljačkim nadređenim sistemom višeg nivoa. Naime robotizovana surla je svakako deo složenijeg sistema. Nadređeni upravljački sistem je svakako odgovoran za globalnu kontrolu celokupnog uređaja. Ovako predstavljen upravljački algoritam je lako putem brze CAN bus veze povezati na nadređeni sistem. High speed CAN bus omogućava prenos podataka, upravljačkih signala pa eventualnog video signala ukoliko se to zahteva od strane korisnika.

V. AKTIVNOSTI U NAREDNOM PERIODU

Do sada urađeno rešenje pripada području multi-redundantnog robota sa ograničenim brojem segmenata koji su međusobno povezani kardanskim zglobovima, koji osim toga što omogućavaju pokretljivost oko dve ose služe i za odzavanje forme - oblika robota, bolje reći ne dozvoljavaju dislokaciju segmenata. U jednoj od narednih faza projekta potrebno je umesto pomenutih zglobova ugraditi elastične prstenove "jastučice" koji će osim sprečavanja dislokacija segmenata uneti u konstrukciju potrebne elemente elastičnosti i prigušenja. Na taj način ćemo istovremeno preći iz oblasti multi-redundantnih robota u područje kontinualnih robota.

ZAHVALNICA

Rad je napisan pod okriljem projekata TR-35003, III-44004, III-44008 finansiranih od Ministarstva za obrazovanje i nauku Republike Srbije.

- [1] S. Popić, B. Miloradović, "Light Weight Robot arms – An overview", Proceedings of Infotech 2015, pp. 818-822, Jahorina mart 2015.
- [2] S. Hirose, *Biologically Inspired Robots*, Oxford University Press, 1993.
- [3] S. Popić, B. Miloradović, "An approach to the development of a low-cost anthropomorphic robotic hand", Proceedings of Infotech 2013, pp. 1066-1069, Jahorina mart 2013.
- [4] B. Miloradović, B. Čuruklji, M. Vujović, S. Popić, A. Rodić, Low-cost anthropomorphic robot hand with elastic joints – early results, Proc. 2ed Int. Conf. IcETAN 2015, ROI3.2, pp 1-6, Srebrno Jezero, Srbija, 2015.
- [5] Robinson, G., J. B. C. Davies, "Continuum Robots-A State of the Art", Proc. 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, pp. 2849-2854.
- [6] V. Dumitru, S. Dumitru, "Computer-Aided Modelling for a Poly Articulated Robotic Arm with Spherical Joints", Proc. Of the World Congress on Engineering 2011 Vol III WCE 2011, July 6-8, 2011, London, U.K.
- [7] M. Tomić, A. Rodić, Đ. Urukalo, "Solving Inverse Kinematics of Hyper-Redundant Multy-Links Fleksible Robot – modeling and simulation", Proc. 2ed Int. Conf. IcETAN 2015, ROI2.3, pp 1-6, Srebrno Jezero, Srbija, 2015.
- [8] A. Rodić, I. Stevanović, M. D. Jovanović, Đ. Urukalo, "On Building Remotely Operated Underwater Robot-Explorer with Bi-manual Poly-articular System", The 24th Inter. Conf. on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Bucharest, Romania, on May 27-29, 2015, ISBN 978-973-720-568-1

During the recent years we are witness of rising interest in engineering practice to explore multiple redundant robots that are primarily inspired by biological organisms, animals from the nature. These realizations significantly differ from so far mostly discussed the articulated body type. This paper presents the design of the single multi-redundant elephant trunk robot shape. Realization of such robots requires solving a number of problems, both constructive and problem solving direct and inverse kinematics, dynamics and control. This work is basically a continuation of previous research of robotic artificial hand realization, because they used the same principles drive based on the tendon as essential elements for the transmission of forces. Proposed drive unit is in some previous works analyzed in detail. This approach provides remote positioning drive of manipulator himself - a mechanism enough light and maneuverable.

Unconventional Robots – Snake Like Robots

Svemir Popić, Branko Miloradović, Miloš Jovanović,
Aleksandar Rodić