

Izrada planarne paralelne konstrukcije za centroidno vektoriranje robota s plutajućom bazom

Enio Krizman, enio.krizman@fer.hr

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva

Zagreb, Hrvatska

Sažetak – U ovom radu opisan je planarni paralelni mehanizam s dva stupnja slobode. Postupkom inverzne kinematike dobiveni su izrazi za kutove zakreta aktuatora u ovisnosti o zadanom položaju vrha alata. Nadalje, opisana je problematika određivanja radnog prostora uz postavljene zahtjeve centroidnog vektoriranja. Dobiveni su zaključci ispitani na izrađenoj maketi mehanizma. Iako upravljanje sustavima pomoću planarnih paralelnih mehanizama već ima široku primjenu u različitim područjima, korištenje u svrhu centroidnog vektoriranja upravljanjem položaja centra mase sustava novi je koncept koji se istražuje. U narednim je koracima potrebno izraditi upravljanje mehanizmom te ga potom implementirati na stvarne robote kako bi se ispitale prednosti i nedostaci upravljanja stabilizacijom robota s plutajućom bazom u odnosu na trenutno korištene metode.

I. UVOD

Zadnjih smo godina svjedoci neprestanog proširenja upotrebe robota u različitim područjima. Roboti „napuštaju“ tradicionalne fiksne baze u kojima je jedan njihov kraj vezan za određeno postolje te poprimaju oblik plutajućih baza. Plutajuća baza je pojam koji naznačuje da robot ima pomičnu mobilnu bazu tj. nema unaprijed ispitani i predodređen radni prostor. Robot s mobilnom bazom može se kretati kroz prethodno nepoznata okruženja u ovisnosti o njegovom zadatku. Primjenu možemo vidjeti kod velikog broja zračnih i pomorskih robota, ali sve više i humanoidnih robota. Shodno tomu i upravljanje takvim robotima postaje sve složeniji zadatak koji potiče na istraživanje novih koncepata. Iako sami roboti s plutajućom bazom nisu novi koncept, postoji potreba za razvitkom efikasnijih načina upravljanja njihovom stabilizacijom i pojednostavljenjem procesa upravljanja. Jedan od takvih pokušaja je i centroidno vektoriranje [1] koje se temelji na kontroli položaja središta mase preko položaja tereta kojeg robot prenosi. Tradicionalni pristupi teret su smatrali kao smetnju, međutim mnogi noviji znanstveni radovi sugeriraju da se teret krene promatrati upravo kao sredstvo za kontrolu i stabilizaciju plutajuće baze robota. Centroidno vektoriranje otvara novi pogled na stabilizaciju i kontroliranje plutajuće baze robota, a hoće li se uistinu pokazati uspješnim pokazati će vrijeme.

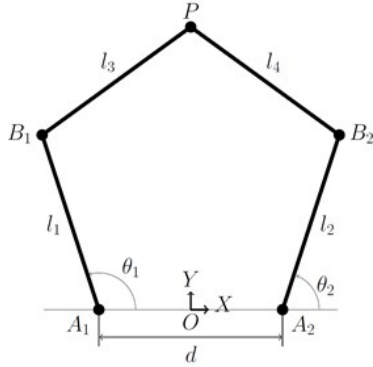
U ovome radu istraženo je vladanje planarnog paralelnog mehanizma s dva stupnja slobode za kontrolu robota s plutajućom bazom. Planarni paralelni mehanizmi sadrže paralelne članke s dva stupnja slobode koji su povezani na zasebne baze. Baze su zapravo aktuatori kojima se upravlja položajem tereta mijenjanjem zakreta članaka te posljedično i položajem centra mase cijelog robota na osnovu zadanog upravljačkog algoritma. Mana paralelnih članaka u odnosu na serijske iste veličine je suženiji radni prostor. Međutim, paralelni članci su poznati po visokoj točnosti, brzini i krutosti, što ih čini optimalnim za upravljanje položajem centra mase koji zahtjeva precizno pozicioniranje i brze pokrete. Takvi zahtjevi proizlaze iz činjenice da trajektorije robota s plutajućom bazom nisu ranije definirane tj. promjenjive su s obzirom na zadatak robota i postavke okoline u kojoj se robot nalazi. Shodno tomu, potrebno je brzo i precizno pomicanje centra mase pomoću planarnog paralelnog mehanizma zbog stabilizacije plutajuće baze kako ne bi došlo do prevrtanja robota, gubitka tereta, sudara te mnogih drugih poteškoća koje mogu nastati kao posljedica nestabilne baze. Međutim, upravljanje planarnim paralelnim mehanizmom ima specifičnosti kao što su pojava singulariteta te nemogućnost pristupa određenim dijelovima radnog prostora. Nadalje, zbog specifičnog izgleda radnog prostora, centroidno vektoriranje postavlja određene zahtjeve za izgled istog.

U narednim poglavljima biti će opisan kinematički model danog mehanizma te pripadajuća inverzna kinematika pomoću koje se pozicije iz kartezijskog koordinatnog sustava pretvaraju u željene zakrete aktuatora. Postavljeni su zahtjevi centroidnog vektoriranja za izgled radnog prostora, a to su homogeni i ujednačeni prostor oblika elipse ili kruga s najvećom izvedivom površinom. Na osnovu postavljenih zahtjeva i kinematičkog modela ispitana je optimalna duljina članka i udaljenost između aktuatora. Izrađena je replika mehanizma te je ispitana valjanost dobivene inverzne kinematike i izgled radnog prostora. Na kraju su predloženi naredni koraci koje je potrebno provesti kako bi se mehanizma mogao ispitati na stvarnim robotima u svrhu upravljanja položajem centra mase.

II. KINEMATIČKE JEDNADŽBE

A. Općeniti dizajn planarnog paralelnog robota

Na slici 1 prikazan je općeniti skica planarnog paralelnog mehanizma s dva stupnja slobode [2]. Ovaj mehanizam sastoji se od četiri članka povezanih okretnim zglobovima. Članci 1 i 2 su proksimalni i imaju duljine redom l_1 i l_2 . Članci 3 i 4 su distalni i imaju duljine l_3 i l_4 . Zglobovi A_1 i A_2 su aktivni zglobovi, dok su preostala tri zgloba pasivna.



Slika 1. Planarni paralelni robot s dva stupnja slobode.
Preuzeto s [4]

Ishodište koordinatnog sustava je u točki $O(L_0)$. Na osi x su smješteni aktuirani rotirajući zglobovi A_1 i A_2 udaljeni za $d/2$ od ishodišta. $P(x,y)$ je koordinata krajnje hvataljke/držača tereta.

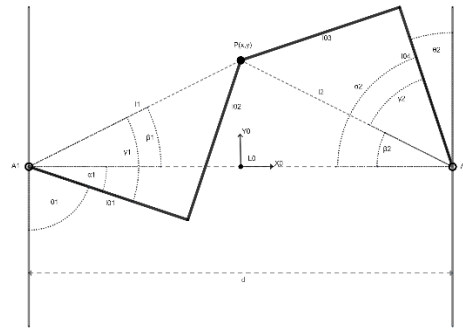
Slika 1 predstavlja općeniti prikaz planarnog paralelnog mehanizma dva stupnja slobode gdje su aktuatori okrenuti prema pozitivnom smjeru y osi te su u istoj ravnini. Ranije opisani dizajn i pripadajući kinematički proračuni te analize radnih prostora obrađuju se u većini radova na ovu tematiku [3] [4]. Iako je pristup problematici određivanja kinematičkih jednadžbi i radnog prostora sličan, potrebne su određene preinake kako bi mehanizam zadovoljio potrebe centroidnog vektoriranja. Naime, dizajn je previđen za potrebe zračnih i pomorskih robota te je shodno tomu značajna raspodjela mase i položaj centra mase radi upravljanja i stabilizacije cjelokupnog sustava. U prikazanom dizajnu sa Slike 1. masa mehanizma nije ravnomjerno raspoređena te je potrebno pomaknuti položaj točaka A_1 i A_2 (aktuatora) tako da se nalaze jedna nasuprot druge kao što je prikazano na Slici 2. Preinakama u dizajnu mehanizma osigurana je bolja raspodjela mase te posljedično i cjelokupnog sustava. U Nastavku je prikazan proračun inverzne kinematike za konfiguraciju mehanizma sa Slike 2.

Napomena: za postavljanje jednadžbe inverzne kinematike pomoću Slike 2. korištene su drugačije oznake kutova, koordinata i članaka u odnosu na Sliku 1.

B. Inverzna kinematika

Primjenom jednostavnih geometrijskih pravila iz Slike 2. koja prikazuje skicu za određivanje inverzne kinematike planarnog paralelnog mehanizma izražavaju se potrebni zakreti motora θ_1 i θ_2 u ovisnosti o položaju vrha alata $P(x,y)$ postupkom prikazanim u nastavku.

Radi jednostavnijeg proračuna ishodište koordinatnog sustava (L_1) za proračun inverzne kinematike je pomaknuto u točku A_1 . Međutim, u kasnijim koracima se za ishodište koordinatnog sustava mehanizma (L_0) koristi točka na polovini udaljenosti između A_1 i A_2 . Za transformaciju iz L_1 u L_0 koordinatni sustav potrebno je svim vrijednostima x koordinata iz narednog postupka pribrojiti polovinu vrijednosti udaljenosti d ($x' = x + d/2$).



Slika 2. 5R-PPM skica za određivanje inverzne kinematike

Za duljine između točke A_1 i A_2 te točke P redom l_1 i l_2 preko Pitagorinog poučka dobiva se:

$$l_1 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad l_2 = \sqrt{(d-x)^2 + y^2}$$

Kutovi β_1 i β_2 između prvih članaka od strane aktuatora i središnjice izražavaju se pomoću *trigonometrijskog poučka o tangensu kuta*:

$$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{d-x}\right) \quad \beta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x-\frac{d}{2}}\right)$$

Kutovi γ_1 i γ_2 između prvih članka i pravaca koji spajaju točke A s točkom P izražavaju se preko *kosinusovog poučka*:

$$l_{02}^2 = l_{01}^2 + l_1^2 - 2 l_{01} l_1 \cos(\gamma_1)$$

$$\gamma_1 = \cos^{-1}\left(\frac{l_1^2 + l_{01}^2 - l_{02}^2}{2 l_{01} l_1}\right)$$

$$l_{03}^2 = l_{04}^2 + l_2^2 - 2 l_{04} l_2 \cos(\gamma_2)$$

$$\gamma_2 = \cos^{-1}\left(\frac{l_2^2 + l_{04}^2 - l_{03}^2}{2 l_{04} l_2}\right)$$

Iz ranije navedenih kutova β_1 i γ_1 iskazuju se kutovi između prvog članka i središnjice α_1 i α_2 :

$$\alpha_1 = \gamma_1 - \beta_1 \quad \alpha_2 = \gamma_2 + \beta_2$$

Konačno, izraz za potrebne kutove zakreta motora u ovisnosti o kutovima α_1 i α_2 je:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2$$

Iako je proračun napravljen za pozitivne vrijednosti x i y koordinata, jednadžbe vrijede i kada su vrijednosti y koordinata negativne jer formula za kuteve β akumulira vrijednost predznaka koordinata pa kutevi β mogu poprimiti i negativne vrijednosti. Za naredna razmatranja koordinatni sustav L_0 postavljen je tako da je ishodište na polovini udaljenosti između aktuatora.

III. ODREĐIVANJE RADNOG PROSTORA

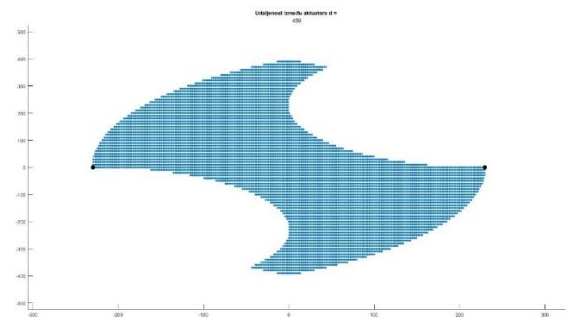
Radni prostor planarnog mehanizma je skup koordinata u kartezijevom koordinatnom sustavu koje vrh mehanizma može dosegnuti. Zahtjevi centroidnog vektoriranja su homogeni i ujednačeni radni prostor oblika elipse ili kruga najveće izvedive površine. Centroidnim vektoriranjem upravlja se položajem centra mase te je radi toga potrebno dovesti teret iz bilo koje željene pozicije u drugu putanjom koja je najbolja aproksimacija pravca kako se ne bi remetila ravnoteža i stabilnost cjelokupnog sustava. U radnim prostorima koji nisu eliptičnog oblika takvo što nije moguće iako mogu odgovarati zahtjevu najveće površine radnog prostora.

Koordinate prikazane crnom točkom u Slikama 3, 4 i 5 predstavljaju koordinate aktuatora. Postoje dvije vrste konfiguracije mehanizma koje su zrcalne s obzirom na x os. Razlog tomu je singularitet tj. nemogućnosti prelaska iz jedne postavljene konfiguracije u drugu bez fizičkog promijene rasporeda komponenata. Radni prostori različitih konfiguracija prikazani su na Slici 3 i Slici 4. Na Slici 2 prikazana je konfiguracija koja posjeduje radni prostor prikazan na Slici 3.

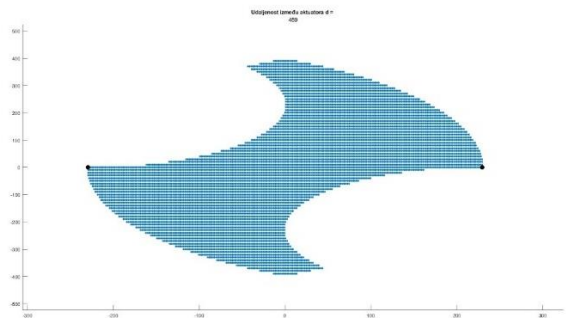
Prvo što je bilo potrebno ispitati je duljine članaka za koje će površina radnog prostora biti najveća. Iterativnom metodom isprobane su konfiguracije u kojima su prvi članci l_{01} i l_{04} dulji za određeni omjer u odnosu na druga dva članka l_{02} i l_{03} . Potom je proveden postupak u kojima su druga dva članka dulja za određeni omjer. Završno je isprobana jednaka duljina svih članaka što se pokazalo kao optimalno rješenje je dobivena najveća površina radnog prostora mehanizma. Za potrebe rada uzeta je duljina svih članaka od 230 mm.

Drugi korak je bio utvrđivanje udaljenost d između aktuatora (A_1 i A_2) koji će zadovoljiti zahtjeve centroidnog vektoriranja (oblik elipse i najveća površina) za što je također korištena iterativna metoda. Iako je za udaljenost

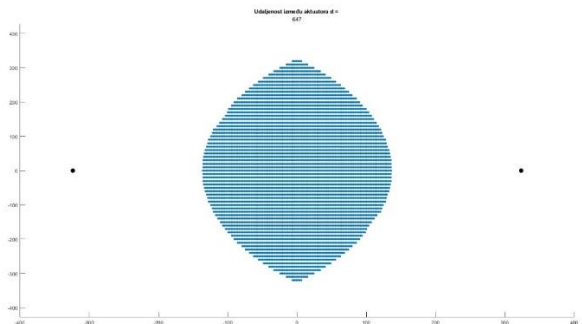
d = 459 mm radni prostor zadovoljio zahtjeve najveće površine, ne posjeduje oblik elipse ili kruga stoga nije razmatran kao rješenje. Udaljenost koja je zadovoljila oba zahtjeva centroidnog vektoriranja je d = 647 mm, odnosno 2.813 puta više od duljine članka za proračune koji ne zahtijevaju unaprijed definiranu vrijednost duljine članaka. Kod navedene udaljenosti obje konfiguracije mehanizma posjeduju jednak oblik radnog prostora što je prikazano na slici 5. Vrijednosti x koordinata kreću se u rasponu od -136.5 mm do 136.5 mm, dok su y vrijednosti koordinata u rasponu od -320 mm do 320 mm. Površina elipse je 365 mm².



Slika 3. Radni prostor prve konfiguracije za udaljenost d = 459 mm



Slika 4. Radni prostor druge konfiguracije za udaljenost d = 459 mm



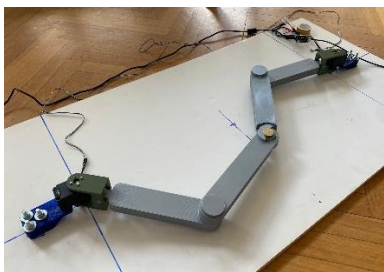
Slika 5. Radni prostor za udaljenost d = 647 mm

IV. IZRADA I ISPITIVANJE MEHANIZMA

Za ispitivanje ponašanje planarnog paralelnog mehanizma izrađen je 3D model u programskom okruženju Autodesk Fusion 360 što je prikazano na Slici 6. Potom je izrađena maketa mehanizma pomoću tehnike 3D printanja uz dodane aktuatora što je prikazano na slici 7. Prema predloženom dizajnu iz znanstvenog rada autora Figielskog, Boneva i Bigrasa [3] odabrana je jednaka duljina svih članka od 230 mm. Članci su pokretani pomoću Dynamixel motora preko Matlab Simulink programskog okruženja.



Slika 6. 3D model planarnog paralelnog mehanizma u Autodesk Fusion 360



Slika 7. Izrađeni model mehanizma

Svrha ovog rada je ispitivanje dobivene inverzne kinematike mehanizma na stvarnoj maketi te ima li uistinu mehanizam proračunati radni prostor za udaljenost između aktuatora od 647 mm.

Testiranjem makete ustvrđeno je da inverzna kinematika polučuje zadovoljavajuće rezultate jer su zakretima aktuatora dobivene jednake vrijednosti zadanih i stvarnih x i y koordinata. Također je ustvrđeno da vrh mehanizma može doseći sve točke radnog prostora sa Slike 3. Međutim, upravljanje mehanizmom zadavanjem samo x i y pozicije te pretvaranjem koordinata pomoću inverzne kinematike u zakrete motora nije optimalno jer trajektorija vrha mehanizma nije linearna. Nadalje, opisani način upravljanja u određenim slučajevima dovodi do trajnog zaglavljenja mehanizma zbog mehaničkih ograničenja te posljedično nemogućnosti postavljanja vrha mehanizma u željenu poziciju. U narednim koracima potrebno je ispraviti navedene nedostatke implementiranjem načina upravljanja koji sadrži planiranje trajektorije vrha mehanizma te u razmatranje uzima mehanička ograničenja. Time bi se trebao postići linearni prijelaz iz jedne koordinate u drugu što je preduvjet centroidnog vektoriranja te izbjeci moguće singularitete i zaglavljenja mehanizma.

V. ZAKLJUČAK

U ovome radu opisan je planarni paralelni mehanizam s dva stupnja slobode. Postupkom inverzne kinematike dobiveni su izrazi za kutove zakreta aktuatora u ovisnosti o zadanom položaju vrha alata u kartezijevom koordinatnom sustavu. Nadalje, opisana je problematika određivanja radnog prostora uz postavljene zahtjeve centroidnog vektoriranja. Dobivena je najveća površina radnog prostora oblika elipse uz jednaku duljinu svih članaka od 230 mm te udaljenost između aktuatora od 647 mm. Izrađena je stvarna maketa sustava te je potvrđena valjanost postupka inverzne kinematike te podudaranje izgleda radnog prostora makete s proračunatim.

Izrađeni mehanizam i dobiveni rezultati podloga su za ispitivanje upravljanja centrom mase na stvarnim robotskim sustavima u daljnjim koracima ispitivanja koncepta centroidnog vektoriranja. U narednom koraku potrebno je izraditi upravljanje vrhom alata kako bi se postigla linearna putanja iz jedne koordinate u drugu bez zaglavljenja sustava. Nadalje, slijedi implementacija mehanizma na zračnog robota (dron) te povezivanje aktuatora s upravljačkom petljom cijelog sustava što će omogućiti upravljanje položajem centra mase na osnovu zahtjeva za stabilizacijom. Iako je zadani mehanizam izrađen za potrebe ispitivanja stabilizacije zračnih robota, koncept je univerzalan i može se primijeniti u različitim područjima poput pomorske i mobilne robotike.

Zaključno, centroidno vektoriranje je relativno novi pogled na upravljanje stabilizacijom robota s plutajućom bazom te posljedično postoje mnoge primjene i načini izvedbe koje je potrebno ispitati. Jedan od takvih je i upravljanje centrom mase sustava pomoću planarnog paralelnog mehanizma. Ukoliko se koncept pokaže uspješnim ima potencijal postati jedan od novih paradigmi za stabilizaciju robota sa plutajućom bazom.

VI. LITERATURA

- [1] T. Haus, M. Orsag, A. P. Nunez, S. Bogdan and D. M. Lofaro, "Centroid Vectoring for Attitude Control of Floating Base Robots: From Maritime to Aerial Applications," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16021-16031, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893586.
- [2] Mangesh D. Ratolikar, Prasanth Kumar "Optimized design of 5R planar parallel mechanism aimed at gait-cycle of quadruped robots", *Journal of Vibroengineering*, Vol. 24,
- [3] Figielski A., Bonev I. A., Bigras P. Towards development of a 2-DOF planar parallel robot with optimal workspace use. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2007.
- [4] P. K. R and M. D. Ratolikar, "Optimal 5R parallel leg design for quadruped robot gait cycle," *Vibroengineering PROCEDIA*, vol. 35, pp. 94–98, Nov. 2020,