

Kinematska analiza uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota

ZORANA DANČUO, Istraživačko razvojni institut Lola doo, Beograd

BOŠKO RAŠUO, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

VLADIMIR KVRGIĆ, Istraživačko razvojni institut Lola doo, Beograd

JELENA VIDA KOVIĆ, Istraživačko razvojni institut Lola doo, Beograd

NEMANJA DŽINIĆ, MPG-KGH doo., Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 613.693:656.7

Prostorna dezorijentacija predstavlja jednu od najvećih pretnji za pilote modernih borbenih aviona. Tokom vremena razvijeni su različiti simulatori leta sa ciljem da simuliraju što realnije uslove leta. Uređaj za prostornu dezorijentaciju pilota poboljšava situacionu svesnost i pruža efikasnu obuku za izbegavanje fenomena poznatijeg kao prostorna dezorijentacija. U ovom radu je predstavljena kinematska analiza jednog savremenog dezorijentatora. Dezorijentator je modeliran kao robotski manipulator sa četiri stepena slobode kretanja. Glava pilota predstavlja end efektor, i nalazi se u preseku osa valjanja, propinjanja i skretanja. Koordinatni sistemi postavljeni su prema Denavit-Hartenbergovoj konvenciji, prikazane su homogene matrice transformacije i jednačine koje čine kinematiku dezorijentatora. Dat je prikaz Jakobijeve matrice za rešavanje kinematskog problema. Ovo istraživanje predstavlja uvod za dinamičku analizu dezorijentatora.

Ključne reči: *prostorna dezorijentacija, kinematika, Denavit-Hartenbergova konvencija, homogena transformacija*

1. UVOD

Manevri savremenih borbenih aviona izazivaju specifične fiziološke probleme kod pilota. Pored G-LOC-a (G-indukovani gubitak svesti), koji je posledica visokog G opterećenja, drugi fenomen, koji je uzrok mnogih avionskih nesreća, poznat je kao prostorna dezorijentacija (SD).

Avioni sa vektorisanim potiskom imaju sposobnost razvijanja ubrzanja po više osa, posebno tokom izvođenja supermanevra. Agilni avioni imaju sposobnost tzv. nekonvencionalnog leta [1]. Let u tzv. post-stall režimu, kao i let van standardne anvelope, utiče na sposobnost pilota da efikasno obavi zadatu misiju. Post-stall režim podrazumeva let sa napadnim uglom većim od kritičnog, pri čemu dolazi do pada uzgona, iako napadni ugao raste. Pri opstrujavanju krila (aeroprofila) dolazi do odvajanja strujnica i stvaranja tzv. Vazdušnih "džepova" niskog pritiska na krajevima krila. Post-stall može biti izuzetno opasan, jer ne samo da izaziva pad performansi, već može izazvati i gubitak upravljivosti.

Kretanje savremenih aviona je veoma kompleksno, čak i u okviru standardne anvelope leta. Pri tome, različite nelinearnosti utiču na ukupno kretanje, a različiti dinamički izvori mogu biti pobuđeni tokom leta. Kretanje koje pilot percipira unutar kokpita je, ne samo trodimenzionalno, nelinearno kretanje aviona kao krutog tela, već i kretanja koje potiče usled fleksibilne strukturne dinamike. Interni ili eksterni ulazi, kao što su pilotske komande ili atmosferske smetnje kojima je avion izložen u letu, mogu da pobude svu dinamiku odjednom. Pojednostavljenje dinamike leta u simulaciji, smanjuje realnu dinamiku kretanja aviona i smanjuje fizičku vernost kretanja u simulatoru leta [2].

Svrha simulatora leta jeste da simulira što je bliže moguće realne uslove leta i na taj način obezbedi efikasnu obuku pilota [3].

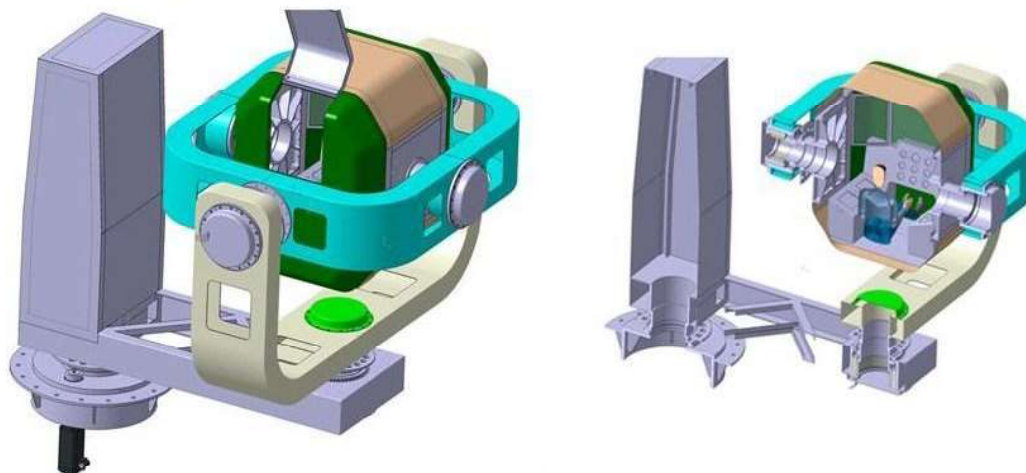
Prostorna dezorijentacija (SD) se definiše kao "nemogućnost prepoznavanja položaja, kretanja ili ponašanja vazduhoplova ili pilota u fiksnom koordinatnom sistemu, koji čini površina Zemlje i gravitaciona vertikala" (Benson 1988) [4]. Svi članovi posade podložni su prostornoj dezorijentaciji u toku leta. SD se može kategorisati u tri grupe: Tip I (neprepoznata dezorijentacija), tip II (prepoznata) i tip III (onesposobljavajuća). Najveći broj avionskih nesreća pove-

Adresa autora: Zorana Dančuo, Istraživačko razvojni centar Lola, Beograd, Kneza Višeslava 70a

Rad primljen: 07.08.2012.

zani su sa tipom I, i neznatno sa tipom III. Prostorna dezorijentacija je manifestacija ograničenja ljudske fiziologije u toku leta [5]. Kod tipa I, pilot je dezorijentisan, i ne prepoznaje da je u stanju dezorijentisanosti. Ovo dovodi do netačnih ili neadekvatnih odluka, a zatim i do fatalnih posledica. Kod tipa II, pilot je sve-

tan da je izgubio orijentaciju i preduzima korektivne mere, dok u tipu III pilot zna da je dezorijentisan, ali je onesposobljen i ne može preduzimati nikakve korektivne mere. Nesposobnost može da bude psihološka, fiziološka ili fizička (Cheung, Money, Wright, & Bateman, 1995) [6].



Slika 1 – Izgled dezorijentatora

Simulacija u centrifugi, u kojoj je pilot izložen promenama orijentacije G_z opterećenja, ili opterećenju $+G_z/G_y$ ili $+G_z/G_x$, pokazala je velike individualne razlike u senzacijama i intenzitetu dezorijentisanosti [7]. SD je rezultat pre svega ograničenosti ljudskog vizuelnog i vestibularnog senzornog sistema u letnom okruženju, ali i drugih faktora, poput zasićenja misijom, gubitkom pažnje i kolebljivošću [8].

Jedna od osnovnih uloga dezorijentatora je da obuču pilota da se ne oslanja na sopstveni osećaj za orijentaciju, već da uvek koristi instrumente, koji treba da mu pokažu pravu orijentaciju aviona. Takođe, važna uloga je i trening i navikavanje pilota na različite neobične položaje u kojima se može naći u toku letu. Sama simulacija leta i privikavanje na inercijalna opterećenja nije najvažnija uloga dezorijentatora jer za to postoje bolji i pogodniji uređaji, kao što su to simulatori leta i centrifuge.

Prostorni dezorijentator (SDT), slika 1, predstavlja visoko pouzdan sistem, sa jednim sedištem, koji obezbeđuje 360 stepeni kontinualnog kretanja, simultano u četiri ose: planetarna, roll (valjanje), pitch (propinjanje-poniranje) i yaw (skretanje). Američki patent Wachsmuth i Brusch predstavlja uređaj slične konstrukcije kao SDT koji je izložen u ovom radu [9]. Kokpit je kardanski uležišten na tri ose koje su nezavisno upravljane (pitch, roll i yaw) i rotiraju oko planetarne ose (1) slika 2. Planetarni krak rotira tako da postigne centripetalno ubrzanje do 2.5G. Klizni prstenovi obezbeđuju 360 stepeni rotacije oko svake ose [9].

Ose roll, pitch i yaw, seku se u tački glave pilota. SDT simulira različite efekte i iluzije, koji se mogu iskusiti pri realnim performansama aviona, kao što su Koriolisov efekat, i drugo [9,10].

2. MATRICE TRANSFORMACIJE, DENAVIT HARTENBERGOVA KONVENCIJA

Uređaj za prostornu dezorijentaciju je sistem sa četiri stepena slobode kretanja. Svi zglobovi su rotacioni. Za određivanje brzina i ubrzanja članova kao i end efektora, neophodno je postaviti koordinatne sisteme i odrediti parametre robota, u ovom slučaju po Denavit-Hartenbergovoj (D-H) konvenciji. Dat je algoritam za rešavanje direktnog kinematskog problema:

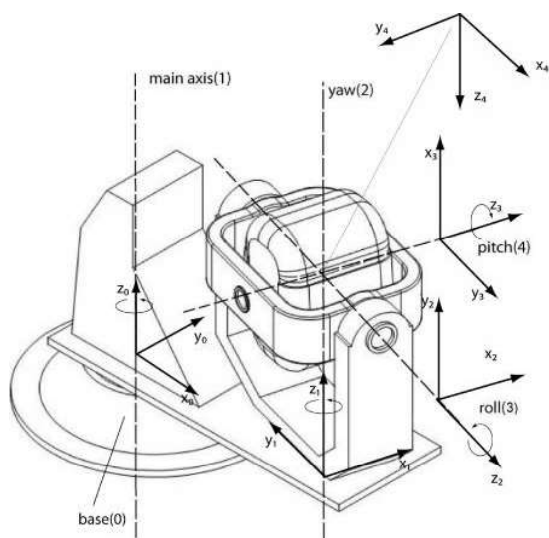
1. pridruživanje koordinatnih sistema svakom članu (linku) po D-H konvenciji, Dekartovih koordinatnih sistema desne orijentacije,

2. definisanje i rešavanje homogenih matrica transformacije,

3. određivanje pozicije i orijentacije end efektora. Četiri rotacione ose i koordinatni sistemi prikazani su na slici 2. Označavanje počinje od fiksne baze robota (0). Prva osa rotacije (1) (sa uglom rotacije θ_1) je upravna na bazu robota i predstavlja osu glavnog kretanja. Drugu osu čini osa yaw (2), paralelna sa prvom osom (sa uglom rotacije θ_2). Treću osu čini osa roll (3) (sa uglom rotacije θ_3), i upravna je na drugu osu rotacije. Roll osa leži u horizontalnoj ravni u nultom položaju robota, dok su prva i druga u vertikalnoj rav-

ni. Četvrta, pitch osa (4) leži u horizontalnoj ravni upravno na drugu i treću osu (sa uglom rotacije θ_4) u nultom položaju robota. Nulti položaj robota dat je u (1) i opisuju ga nulti uglovi rotacije:

$$\theta_1 = 0, \theta_2 = 0, \theta_3 = 0, \theta_4 = 0 \quad (1)$$



Slika 2 – Prikaz rotacionih osa dezorijentatora

Koordinatni sistemi SDT članova određeni su po D-H konvenciji [11]. Ose (2), (3) i (4) seku se u zajedničkoj tački - glavi pilota, koja predstavlja end efektor. Koordinatni sistemi {2}, {3} i {4} su radi preglednosti na slici 2. izmešteni van tačke preseka osa.

Na slici 2. je prikazan međusobni odnos glavne ose obrtanja (1) i yaw ose (2), koje su paralelne. Po D-H konvenciji, osa x_1 usmerena je kao na slici 2. Osa x_1 ima pravac i smer x_0 koordinate u nultom položaju robota. Po konvenciji su utvrđena pravila orijentisanja x ose za tri slučaja u zavisnosti od međusobnog položaja koordinata z_{i-1} i z_i : ose z_{i-1} i z_i mogu biti nekomplanarne, paralelne i ose koje se seku. Osa y određuje se tako da gradi desni Dekartov sistem.

Za određivanje ose x_2 po D-H konvenciji, neophodno je razmotriti narednu rotacionu osu. Pošto se ose yaw i roll seku pod pravim uglom, osa x se određuje tako da bude upravna na ravan u kojoj se nalaze ose z_1 i z_2 , smer je određen vektorskim proizvodom $z_1 \times z_2$. Opšti oblik jednačine izgleda ovako $x_i = \pm(z_{i-1} \times z_i)$. Osa z_2 je u horizontalnoj ravni i orijentisana je tako da ima smer od grudi ka leđima pilota. Usmerenje je izabrano tako da posmatrano sa vrha z_2 ose roll bude ugao pozitivan. Pozitivnim roll uglom se smatra ugao zakretanja ka glavnoj osi, što je prirodno s' obzirom da se kao posledica kružnog kretanja kabina pasivno zakreće ka glavnoj osi, u slučaju kada ne bi postojao roll stepen slobode. Kao i u prethodnom slučaju ose z_2

i z_3 se seku pod pravim uglom. Osa x_3 se dobija vektorskim proizvodom $z_2 \times z_3$. Osa z_3 je orijentisana tako da se gledano sa vrha ose, gondola propinje, odnosno tako da *pitch* ugao ima pozitivnu vrednost.

Koordinatni sistem {4} vezan je za glavu pilota-end efektor. U ovom radu neće se razmatrati slučaj kada se end efektor nalazi van tačke preseka osa yaw, roll i pitch. Ose su orijentisane kao u vazduhoplovstvu, tako da z osa bude usmerena od glave ka petama pilota (u smeru dejstva pozitivnog G opterećenja). Osa x usmerena je od grudi ka leđima pilota, a y tako da gradi desni Dekartov sistem.

U ovom radu predstavljena je matrica homogene transformacije oblika 4×4 , koja reprezentuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema $x_m y_m z_m$ u odnosu na koordinatni sistem $x_n y_n z_n$ označena sa nT_m . Kada ova matrica opisuje odnos između jednog člana i sledećeg, označava se sa $A_i = A(i-1, i)$.

U tabeli 1. prikazani su parametri članova SDT kao robotskog manipulatora:

Tabela 1. Parametri članova robota

Član i	q_i	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [\text{mm}]$	$\theta_i [^\circ]$	$d_i [\text{mm}]$
1	q_1	0	a_1	θ_1	0
2	q_2	90	0	θ_2	d_2
3	q_3	90	0	$\theta_3 + 90$	0
4	q_4	-90	0	$\theta_4 + 90$	0

gde q_i predstavlja unutrašnje koordinate, α_i ugao koji zaklapaju ose z_{i-1} i z_i , a_i dužina članka, d_i offset zgloba i θ_i ugao rotacije. Promenljivu u ovom slučaju predstavlja ugao θ_i , i čini unutrašnju koordinatu. U tabeli 1. parametar a_1 predstavlja dužinu kraka dezorijentatora.

Matrice koje određuju međusobne položaje i orijentacije SDT članova su:

Transformacija 0-1

$$A(0,1) = A_1 = \text{Rot}(z_0, \theta_1) \cdot \text{Trans}(x_0, a_1)$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & c_1 a_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & s_1 a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Transformacija 1-2

$$A(1,2) = A_2 = \text{Rot}(z_1, \theta_2) \cdot \text{Trans}(z_1, d_2) \cdot \text{Rot}(x_1', 90^\circ)$$

$$= \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Transformacija 2-3

$$\mathbf{A}(2,3)=\mathbf{A}_3=\mathbf{Rot}(z_2,\theta_3)\mathbf{Rot}(z_2,90^\circ)\mathbf{Rot}(x'_2,90^\circ)$$

$$= \begin{bmatrix} -s_3 & 0 & c_3 & 0 \\ c_3 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Transformacija 3-4

$$\mathbf{A}(3,4)=\mathbf{A}_4=\mathbf{Rot}(z_3,\theta_4)\mathbf{Rot}(z_3,90^\circ)\mathbf{Rot}(x'_3,-90^\circ)$$

$$= \begin{bmatrix} -s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

U matricama (2), (3), (4), (5) simboli s_i i c_i predstavljaju skraćenice sinusa i kosinusa uglova i . U daljem tekstu, s_{i+j} i c_{i+j} će se koristiti za adicione formule trigonometrijskih funkcija (6).

$$s_{1\pm 2} = \sin(\theta_1 \pm \theta_2), \quad c_{1\pm 2} = \cos(\theta_1 \mp \theta_2) \quad (6)$$

3. DIREKTNA KINEMATIKA

Matrica \mathbf{T}_4 formirana je množenjem pojedinačnih matrica (2), (3), (4), (5) [12]:

$$\mathbf{T}_4 = \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{A}_3 \cdot \mathbf{A}_4$$

$$= \begin{bmatrix} c_{1+2}s_3s_4 + s_{1+2}c_4 & -c_{1+2}c_3 & c_{1+2}s_3c_4 - s_{1+2}s_4 & a_1c_1 \\ s_{1+2}s_3s_4 - c_{1+2}c_4 & -s_{1+2}c_3 & s_{1+2}s_3c_4 + c_{1+2}s_4 & a_1s_1 \\ -c_3s_4 & -s_3 & -c_3c_4 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} n_{x4} & o_{x4} & a_{x4} & X_4 \\ n_{y4} & o_{y4} & a_{y4} & Y_4 \\ n_{z4} & o_{z4} & a_{z4} & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrica za end efektor (e) može se zapisati u obliku:

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} n_{xe} & o_{xe} & a_{xe} & p_{xe} \\ n_{ye} & o_{ye} & a_{ye} & p_{ye} \\ n_{ze} & o_{ze} & a_{ze} & p_{ze} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tada iz (7) i (8) sledi:

$$n_{xe} = c_{1+2}s_3s_4 + s_{1+2}c_4$$

$$n_{ye} = s_{1+2}s_3s_4 - c_{1+2}c_4$$

$$n_{ze} = -c_3s_4$$

$$o_{xe} = -c_{1+2}c_3$$

$$o_{ye} = -s_{1+2}c_3$$

$$o_{ze} = -s_3$$

$$a_{xe} = c_{1+2}s_3c_4 - s_{1+2}s_4$$

$$a_{ye} = s_{1+2}s_3c_4 + c_{1+2}s_4$$

$$a_{ze} = -c_3c_4$$

$$p_{xe} = a_1c_1$$

$$p_{ye} = a_1s_1$$

$$p_{ze} = d_2 \quad (9)$$

Jednačine (9) čine jednačine direktne kinematike dezorijentatora, na osnovu kojih je u potpunosti određena orijentacija i položaj end efektoru u odnosu na bazni koordinatni sistem $\{0\}$ [12]. Informacije o orijentaciji iskazane su vektorima $\{n\}$, $\{o\}$, $\{a\}$, a informacija o poziciji je data sa $\{p\}$. Orijetacija može biti određena i preko RPY (roll, pitch, yaw) uglova. Orijetacija četvrtog segmenta preko RPY uglova dobija se iz matrice [13]:

$$\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} n_{x4} & o_{x4} & a_{x4} & X_4 \\ n_{y4} & o_{y4} & a_{y4} & Y_4 \\ n_{z4} & o_{z4} & a_{z4} & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_B c_C & -c_A s_C + s_A c_C s_B & s_A s_C + c_C c_A s_B & X_4 \\ c_B s_C & s_A s_B s_C + c_A c_C & -s_A c_C + s_C s_B c_A & Y_4 \\ -s_B & s_A c_B & c_A c_B & Z_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Iz jednačina (7) i (10) dobijaju se C , B , A uglovi za orijentaciju preko RPY uglova:

$$C = \text{atan2}(-n_{y4}, -n_{x4})$$

$$= \text{atan2}(-s_{1+2}s_3s_4 + c_{1+2}c_4, -c_{1+2}s_3s_4 - s_{1+2}c_4) \quad (11)$$

$$B = \text{atan2}(n_{z4}c_3n_{x4} + s_3n_{y4})$$

$$= \text{atan2}(c_3s_4c_3(c_{1+2}s_3s_4 + s_{1+2}c_4) + s_3(s_{1+2}s_3s_4 - c_{1+2}c_4)) \quad (12)$$

$$A = \text{atan2}(s_3(c_{1+2}s_3s_4 - s_{1+2}c_4) - c_3(s_{1+2}s_3c_4 + c_{1+2}s_4),$$

$$s_3(-c_{1+2}c_3) - c_3(-s_{1+2}c_3)) \quad (13)$$

Oznake C , B , A su proizvoljne.

4. INVERZNA KINEMATIKA, JAKOBIJEVA MATRICA

Rešenje inverzne kinematike robota zasnovano je na određivanju vektora unutrašnjih koordinata $\{q\}=[q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$, ako je poznat vektor spoljnjih koordinata $\{r\}=[p_x \ p_y \ p_z \ C \ B \ A]$. Inverzna kinematika se može izraziti kao:

$$q = f^{-1}(r) \quad (14)$$

Funkcija f iz izraza (14) je nelinearna trigonometrijska funkcija. Inverzan problem nije lako rešiv kao direktan, iz razloga što se njegovo rešenje svodi na rešavanje sistema nelinearnih jednačina. Inverzna kinematika robota može se rešiti iz tog razloga analitički i numerički. Numerički postupci su opšti i ne zavise od same kinematske strukture mehanizma robota. Korišćenjem numeričkih metoda dobija se samo jedno rešenje koje zahteva veći broj algebarskih operacija. Prilikom svakog narednog numeričkog koraka dolazi do povećanja greške [14]. Kada su određene inverzne matrice matrica A_1, A_2, A_3, A_4 , unutrašnje koordinate su tada:

$$\theta_1 = \text{atan}2(Y_4, X_4) \quad (15)$$

$$\theta_2 = \text{atan}2(o_{y4}, o_{x4}) - \theta_1 \quad (16)$$

$$\theta_3 = \text{atan}2(o_{z4}, c_{l+2}o_{x4} + s_{l+2}o_{y4}) \quad (17)$$

$$\theta_4 = \text{atan}2(-s_{l+2}a_{x4} + c_{l+2}a_{y4}, s_{l+2}n_{x4} - c_{l+2}n_{y4}) \quad (18)$$

Postoji više metoda koje se koriste za rešavanje problema inverzne kinematike: CCD (eng. „Cyclic Coordinate Descent“), pseudo-inverzni Jakobijan (eng. „Pseudoinverse Jacobian“), transponovani Jakobijan (eng. „Jacobian transpose“), itd. U linearnoj algebri najkorišćenija je pseudoinverzija Moore-Penrose, ili Moore-Penrose pseudo inverzija matrice J . Jakobijeva matrica služi za određivanje linearnih i ugaonih brzina i ubrzanja članova robota i end efektor. Jakobijan za sistem sa četiri stepeni slobode kretanja prikazan je u (19):

$$J_4(q) = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4] \quad (19)$$

Brzina se tada može napisati u obliku matrice:

$$V_4 = \begin{bmatrix} \omega_4 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Odnosno

$$V_4 = J_4(q)\dot{q} \quad (21)$$

a ubrzanje

$$\dot{V}_4 = J_4(q)\ddot{q} + \dot{J}_4(q)\dot{q} \quad (22)$$

gde je sa V_4 označena brzina četvrtog segmenta, a sa \dot{V}_4 ubrzanje. Četvrti segment se nalazi u tački preseka osa, to je ujedno V_4 i brzina end efektor, a J_4 predstavlja Jakobijevu matricu za sistem sa četiri ose. Oblika je (23):

$$J_4(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & s_{l+2} & c_3c_{l+2} \\ 0 & 0 & -c_{l+2} & c_3s_{l+2} \\ 1 & 1 & 0 & s_3 \\ -a_1s_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Pseudo-inverzni Jakobijan J_4^+ dobija se iz (24):

$$J_4^+ = (J_4 * J_4)^{-1} J_4^* \quad (24)$$

odnosno

$$J_4^+ = (J_4^T J_4)^{-1} J_4^T \quad (25)$$

gde je J_4^* adjungovana matrica matrice J_4 [15].

Rang matrice J je

$$k=4 \quad (26)$$

Matrica J je oblika $m \times n$ odnosno 6×4 . Pošto je

$$k=n \quad (27)$$

matrica je punog ranga po redu matrice n . Tada važi jednačina (25). U slučaju kada matricu čine realni brojevi, adjungovana matrica je jednaka transponovanoj (28).

$$J^* = J^T \quad (28)$$

Tada je:

$$J_4^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{s_l}{a_l} & \frac{c_l}{a_l} & 0 \\ \frac{c_3c_{l+2}s_3}{(1-s_3^2)} & \frac{c_3s_3s_{l+2}}{(1-s_3^2)} & 1 & \frac{s_l}{a_l} & \frac{c_l}{a_l} & 0 \\ s_{l+2} & -c_{l+2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_3c_{l+2}}{(1-s_3^2)} & \frac{c_3s_{l+2}}{(1-s_3^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\dot{q} = J_4(q)^+ V_4 \quad (30)$$

$$\ddot{q} = J_4(q)^+ (\dot{V}_4 - \dot{J}_4(q)\dot{q}) \quad (31)$$

Na osnovu jednačina (21), (22), (30) i (31) određuju se brzine i ubrzanja end efektora pomoću jakobijana (direktna kinematika), kao i veza SDT-a (inverzna kinematika).

5. ZAKLJUČAK

Uređaj za prostornu dezorijentaciju pilota u suštini predstavlja jedan robotski manipulator. U cilju postizanja željenih karakteristika, pre svega, ubrzanja end efektora kao i željene orijentacije, data je osnovna kinematska analiza dezorijentatora. Ovaj rad ima za cilj da pokaže jedan od načina postavljanja koordinatnih sistema, i svih daljih proračuna koji iz te analize proizilaze. Ovim radom se želi pokazati da ovaj mehanički sistem može u potpunosti simulirati kretanja za koja su vezani fenomeni prostorne dezorijentacije. Ovaj rad predstavlja uvod u dinamičku analizu SDT-a.

6. ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva prosvete i nauke u okviru projekta: "Razvoj uređaja za trening pilota i simulaciju leta modernih borbenih aviona i to troosne centrifuge i četveroosnog uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota" TR35023.

LITERATURA

- [1] Albery W. B., "Acceleration in Other Axes Affects +G_z Tolerance: Dynamic Centrifuge Simulation of Agile Flight" Aviation, Space and Medicine, Vol. 75, No. 1, (2004)
- [2] Bürki-Cohen J., Sparko A. L., Go T. H., "Training Value of a Fixed-Base Flight Simulator with a Dynamic Seat", AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit „AIAA 2007-6564 South Carolina (2007)
- [3] Dančuo Z., Rašuo B., Kvirgić V., Zeljković V., "Methodology of the Main Drive Selection for a Human Centrifuge", FME Transactions, Vol. 40, No. 2. (2012)
- [4] Ercoline, B., Previc, F., "Spatial Disorientation, Geographic Disorientation, Loss of Situation Awareness, and Controlled Flight into Terrain", Human Systems IAC Gateway [online newsletter], Vol. XII.
- [5] Baijal R., Jha V., Sinha A., Sharma S. K., "Simulator based Spatial Disorientation Training in the Indian Air Force", Indian Journal of Aerospace Medicine, Vol 50, No. 2 (2006)
- [6] "Spatial Disorientation: An Introduction", <http://www.avmed.in/2011/04/spatial-disorientation-an-introduction/>
- [7] "Spatial Disorientation in Military Vehicles: Causes, Consequences and Cures", RTO Human factors and Medicine Panel Meeting Proceedings Vol. 86, La Coruna-Spain (2002)
- [8] Gillingham, K. K., "The spatial disorientation problem in the United States Air Force", Journal of vestibular research: equilibrium & orientation, Winter 2(4). pp. 297-306 (1992)
- [9] Wachsmuth, R. H., Brusck D. W., "Spatial Disorientation Trainer-Flight Simulator", United States Patent No. 4,710,128. Date of Patent: Dec. 1, (1987).
- [10] Repperger D. W., Chen Y. C., "A Study of the kinematics, dynamics and control algorithms for a centrifuge motion simulator", Mechatronics Vol.6. No.7, pp. 829-852, (1996).
- [11] Denavit, J., Hartenberg, R. S., "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.", Trans ASME J. Appl. Mech, 23:215–221.(1955)
- [12] Craig, J. J.: "Introduction to Robotics, Mechanics and Control", Addison-Wesley Publishing Company (1986)
- [13] Vidakovic, J., Kvirgić, V., Ferenc, G., Lutovac, M., "Kinematički model humane centrifuge", Etran Conference (2012)
- [14] Določek, V., Karabegović, I., "Robotika", Univerzitetna knjiga, Bihać (2002)
- [15] Ben-Israel, A., Greville, T., "Generalized Inverses", Springer-Verlag, (2003).

SUMMARY

A KINEMATICS STUDY FOR A SPATIAL DISORIENTATION TRAINER FOR PILOT TRAINING

Spatial disorientation is one of the major threats to pilots of modern fighter aircraft. Over time various flight simulators were developed, in order to simulate real flight conditions as closely as possible. The device has the main objective to improve the spatial orientation of pilots, situational awareness and provide effective training to avoid a phenomenon known as spatial disorientation. In this paper, a kinematic analysis of the disorientator is presented. The Spatial Disorientator (SDT) is modeled as four-joint revolute robotic manipulator. The pilot's head is the end effector, and is located at the intersection of the roll, pitch and yaw axes. The coordinate frames are set according to the Denavit-Hartenberg convention, homogeneous transformation matrices and equations for calculating the SDT kinematics are presented, as well as the Jacobi matrix. This study represents an introduction to the dynamic analysis of the disorientator.

Key words: *spatial disorientation, kinematics, Denavit Hartenberg, homogenous transformation*