

Osnovi razvoja humane centrifuge visokih performansi

ZORANA DANČUO, Istraživačko razvojni institut Lola, Beograd

BOŠKO RAŠUO, Mašinski fakultet, Beograd

VLADIMIR ZELJKOVIĆ, Istraživačko razvojni institut Lola, Beograd

MIRKO ĐAPIĆ, Istraživačko razvojni institut Lola, Beograd

Pregledni rad

UDC: 621.928.3

Razvoj humane centrifuge visokih performansi ima za cilj da izađe u susret zahtevima za stvaranje sigurnog i bezbednog okruženja za trening pilota borbenih aviona, radi ispitivanja njihove tolerancije na velika opterećenja. Svrha razvoja uređaja za obuku, je da se ustanovi kako nespecifični režimi leta deluju na individualnu fiziologiju pilota na obuci, kao i njegovu sposobnost optimalnog izvođenja borbene misije pod datim opterećenjem. Razvoj je baziran na rešavanju strukturalnih problema, kreiranju kinematskih, dinamičkih i kontrolnih algoritama za simulaciju. Humana centrifuga, izložena u ovom radu, je projektovana kao sistem sa tri stepena slobode kretanja. Zbog izuzetnih performansi, uređaj centrifuge nalazi značajnu primenu u testiranju izdržljivosti materijala i avionske opreme. Na Institutu Lola, biće razvijen model u odgovarajućoj razmeri. Cilj razvoja centrifuge visokih performansi je, pre svega, da se simuliraju specifična opterećenja supermanevara i time obezbedi optimalan trenazni režim pilota, izlažući pilota na obuci velikom priraštaju opterećenja u kratkom vremenskom intervalu.

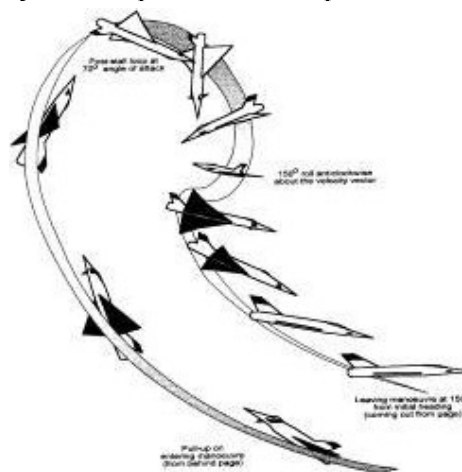
Ključne reči: centrifuga visokih performansi, supermanevrabilnost, dinamički dimulator, ubrzanje

1. UVOD

Pojava sofisticiranih supermanevrabilnih borbenih aviona pete, a uskoro i šeste generacije, dovela je do potrebe za razvojem visoko sofisticiranih uređaja za trening pilota. Pojam takozvanog "high-agility" manevrisanja, uveo je prvi Wolfgang Herbst, tokom '70. godina prošlog veka. Herbst je, sa svojim saradnicima, razmatrao let sa vektorisanim potiskom (TVP), odnosno let van konvencionalne anvelope. TVP poboljšano manevrisanje opisao je sa nekoliko termina "visoka agilnost", "superagilnost", "supermanevrabilnost", ili "poboljšana borbena manevrabilnost" (EFM) [1]. Upravljanje vektorom potiska, omogućilo je izvođenje jednog posebnog manevra, koji nosi naziv Herbstov supermanevar, slika 1.

U realnom letu, pilot je izložen različitim nestacionarnim stanjima. Pri izvođenju supermanevara, dolazi do naglog priraštaja koeficijenta opterećenja, što može da ugrozi operativnu sposobnost pilota. Humana centrifuga, treba da omogući verodostojan trening, tako da pilot na obuci stekne osećaj o opterećenjima, kojima će biti izložen i u realnom letu. Savremene le-

telice projektuju se na principu koncepta agilnosti, proširenjem anvelope leta i na deo u post-stall režimu.



Slika 1 - Herbst-ov manevar aviona X-31 [2]

Supermanevrabilnost je pojam, koji opisuje sposobnost aviona da bude operativan izvan konvencionalne anvelope leta, na kontrolisan način. Iako ne postoje striktno određene koje neki avion kategorišu kao supermanevrabilan, postoji kvalitativni konsenzus da avion mora dosegnuti prag manevrabilnosti, izvan granice koju mogu obezbediti konvencionalne aero-

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

Rad primljen: 31.01.2012.

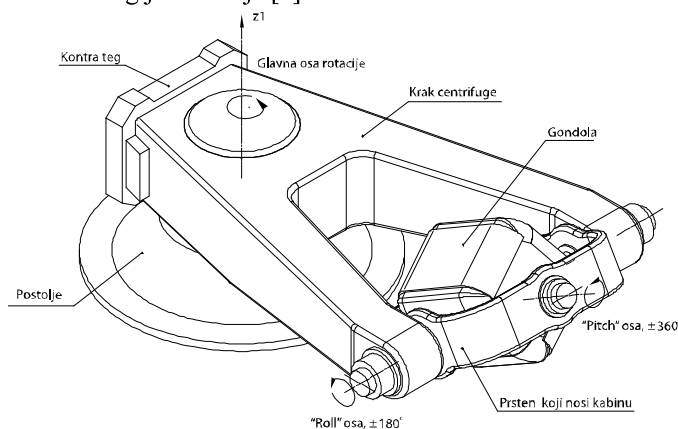
dinamičke komande, kao na primer mogućnosti, koje obezbeđuju standardne komandne površine, poput krmila pravca i dubine, i druge [3]. Dr. Ben Gal-Or, u svojoj knjizi definiše supermanevrabilnost kao "probijanje stall barijere" [4]. Koncept agilnosti savremenih borbenih aviona, zahteva simuliranje i testiranje još u fazi razvoja, optimizacije, provere stabilnosti i upravljivosti novog tipa aviona. Stopa smrtnosti pilota borbenih aviona, znatno je smanjena razvojem trenažera na G-opterećenje. Gubitak svesti indukovani visokim G opterećenjem tzv G-LOC, može biti fatalan. Zaštita na visoka G opterećenja propisana je NATO standardom, savetodavnom grupom AGARD. AGARD navodi: Naš glavni cilj je da se posada zaštiti od pogubnih efekata $+G_z$, razvojem i procenom opreme i tehnike za poboljšanje visoke izdržljivosti na ubrzanje $+G_z$ tolerancije i minimiziraju opasnosti od G-LOC. Rezultat je smanjen zamor pilota i poboljšana borbeno efikasnost. Da bi se postigli ovi ciljevi imperativ je, izučiti što je više moguće, fiziologiju delovanja ubrzanja i uticaj koji ima zaštitna oprema i zaštitne tehnike na fiziologiju ubrzanja [5].

Sa ekonomske tačke gledišta, obuka pilota u humanoj centrifugi je u potpunosti opravdana, imajući u vidu cenu koštanja samo jednog sata naleta borbenog aviona. Različiti koncepti simulacije razvijani su tokom vremena. Koncept centrifuge zasnovan je na multiaksijalnom kretanju, od tri nezavisna kretanja, odnosno tri stepena slobode kretanja (DoF).

2. OSNOVI DINAMIČKE SIMULACIJE LETA

Dinamički simulator leta, može se jednostavno opisati kao simulator, koji ima humanu centrifugu kao bazu za kretanje. DFS (Dynamic Flight Simulator) proizilazi iz potrebe za treningom pilota aviona visokih performansi, da efikasnije izvršavaju borbenu misiju, kao i iz potrebe za proučavanjem ljudske reakcije na ubrzanje sa mogućim načinima povećanja bezbednosti i efikasnosti pilota [6]. Preliminarni izgled centrifuge slika 2.

Humana centrifuga sastoji se iz više vitalnih komponenti. To su krak centrifuge, koji rotira oko glavne ose rotacije i vrši planetarno kretanje sa uglom ob-



Slika 2 - Preliminarni izgled centrifuge

rtanja ϕ_z , zatim gondola, koja predstavlja svojevrsnu repliku kokpita. Gondola je sposobna da rotira oko dve ose. To su osa valjanja ili roll osa, sa uglom rotacije ϕ oko x ose gondole, i osa propinjanja-poniranja ili pitch osa, sa uglom rotacije θ , oko y ose gondole. Osa valjanja i osa propinjanja-poniranja, seku se u tački glave pilota.

DFS mora imati sledeće karakteristike[6]:

- Veliki radijus centrifuge
- Simulaciju kokpita u gondoli
- Gondolu sa dve kontrolisane ose
- Specijalni DFS konfigurisani kontrolni algoritam

Sa aspekta klasične mehanike, zadatak centrifuge je da se rotacionim kretanjem kraka oko glavne ose

obrtanja stvore ubrzanja, koja simuliraju opterećenja, kojima je pilot izložen u realnom letu.

Jedan od glavnih parametara pri projektovanju humanih centrifuga, jeste priraštaj ubrzanja koji se želi postići, u ovom slučaju to je gradijent od $9g/s$.

Na osnovu ovako oštrog zahteva gradijenta, sprovode se, najpre, proračuni potrebnog obrtnog momenta i snage za izbor pogonskog motora.

S obzirom na činjenicu da je humana centrifuga u suštini manipulator, po konvenciji Denavit Hartenberg-a, određuju se pozicije i koordinatni sistemi članova manipulatora. Dalje se sprovode proračuni direktne i inverzne kinematike i dinamike, što je detaljno opisano u radovima Daniel Reppergera, koji je radio na projektima humanih centrifuga u bazi Wright Patterson, Armstrong Laboratory. Kratak opis D.W. Reppergera, o kinematici manipulatora po Denavit

Hartenberg-u: Modeliramo centrifugu kao troosni revolutivni robotski manipulator i tretiramo pilotsko sedište kao end efektor. Prva osa (opisan osom θ_1 ili ω_1) rotacije je upravna na zemlju. Druga osa (osa vijluške sa θ_2) je normalna na prvu ose i duž horizontalne linije kada je centrifuga u neutralnom položaju ($\theta_1=0$). Treća osa (kabina sa osom θ_3) je upravna na prvu i drugu osu rotacije [7].

3. TEHNIČKI PODACI I PERFORMANSE

Preliminarni izgled centrifuge je prikazan na slici 2. Glavni pogon može činiti AC ili DC motor sa prenosnikom, kao i odgovarajućim spojnicama i si-

gurnosnom kočnicom. Krak centrifuge je montiran na glavno vratilo, koje je uležišteno pomoću glavnog ležaja u postolju centrifuge. Centrifuga je delimično balansirana u odnosu na glavnu osu rotacije kontrategom, koga takođe nosi glavno vratilo. Krak centrifuge nosi kardanski uležištenu gondolu, slika 2. Roll osa leži u ravni rotacije kraka centrifuge, i upravna je na glavnu osu rotacije, čineći x osu. Pitch osa je upravna na roll osu, čineći y-osu. Rastojanje između glavne ose rotacije i presečne tačke roll i pitch osa, naziva se radijus kraka centrifuge i kreće se u opsegu između 7,5 i 8 m.

Sa većim radijusom, ostvaruje se slabiji prateći fi-

Tabela 1. Preliminarni tehnički podaci

Komponenta	Vrednost
dužina kraka	7,5-8m
približna masa	90000kg
g mod za ispitivanje	15g
g mod za trenazu	9g
maksimalni priraštaj ubrzanja	9g/s
potrebni obrtni moment	oko 1.100.000Nm
potrebna snaga	oko 2MW
sistem za medicinski monitoring	32 kanala
oprema gondole	<ul style="list-style-type: none"> • podesivo pilotsko sedište • audio, video i interfon oprema • anti g oprema • sistem za medicinski monitoring

ziološki efekat na pilota, koji se javlja pri treningu na centrifugi, a poznat je kao Koriolisov efekat. Performanse centrifuge su definisane zahtevima za G opsezima i vrednostima priraštaja ubrzanja. Ukupan upravljački odziv, odnosno interval od trenutka zadavanja komande do trenutka, kada glavni pogon i gondola počinju da menjaju brzinu, treba da bude manji od 100 m/s.

Centrifuga treba da je sposobna da dostigne sledeća G opterećenja:

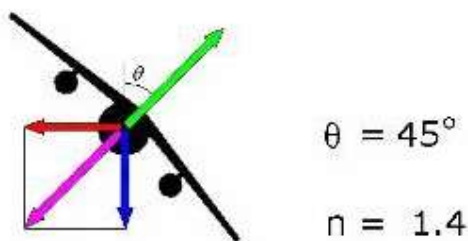
Tabela 2. Vrednosti opterećenja

G	donja vrednost	gornja vrednost
Gz	-3G	+15g
Gx	-6G	+6G
Gy	-3G	+3G

Za preprogramirani profil opterećenja, koji je nelinearan, od donje vrednosti do 15 Gz, postiže se srednja vrednost priraštaja od 9 g/s. Maksimalni trenutni priraštaj treba da bude >12 G/s. Centrifuga generiše sledeće maksimalne nivoe opterećenja za odgovarajuće režime rada: trening pilota ≤ 10 Gz, ispitivanje i testiranje materijala ≤ 15 Gz, donja granica rezultantnog ubrzanja 1,41 G. Roll se izvodi sa uglom

obrtnja $\pm 180^\circ$, a pitch sa uglom obrtnja $\pm 360^\circ$. Roll i pitch ose imaju svoje mehaničke kočnice. Moment inercije od približno 350.000 kgm^2 , zahteva približno, potreban obrtni moment kraka od 1.100.000 Nm, i potrebnu snagu od približno 2 MW. Mehaničke spojnice i sigurnosne hidromehaničke kočnice, imaju važnu ulogu u konstrukciji. Kočnica predstavlja ograničavač obrtnog momenta centrifuge, a služi i za usporenje kretanja kraka u havarijskim situacijama. Obzirom da ugao rotacije kraka centrifuge nije ograničen, odnosno da gondola vrši planetarno kretanje oko centralne ose, prenos energije za pokretanje roll i pitch osa, prenos upravljačkih signala iz gondole, kao i prenos medicinskih signala iz gondole, zatim prenos vazduha pod pritiskom do gondole ne vrši se kablovima, bežično ili kliznim kontaktima i obrtnim razvodnicima smeštenim u osu glavnog vratila

Da bi se izveo koordinirani zaokret, u kome je pilot izložen tzv. čistom Gz profilu, neophodno je anulirati Gx i Gy opterećenje. Ovo je veoma značajno, iz razloga što pilot u realnom letu trpi najveće uzdužno opterećenje, u smeru od glave ka stopalima. Pri zahtevnim manevrima, dolazi do pojave bočnog i poprečnog opterećenja, čija simulacija takođe može da se obezbedi u centrifugama visokih performansi. Na slici 3. prikazan je koordinirani horizontalni zaokret.



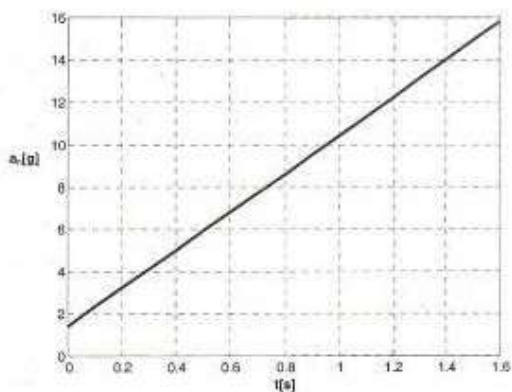
Slika 3 - Koordinirani horizontalni zaokret [2]

*Napomena: ugao θ na slici 3., nije ugao pitch sa istom oznakom, po osi y gondole.

Postizanje čistog Gz opterećenja, postiže se podešavanjem ugla roll- ϕ i ugla pitch- θ , zbog pojave velikog tangencijalnog ubrzanja u prvih nekoliko sekundi obrtanja kraka, dok se ne postigne konstantan broj obrtaja motora.

Dijagram kontinualnog priraštaja ubrzanja dat je na slici 4. Na dijagramu je prikazan gradijent sa početnog ubrzanja, takozvanog platoa. U početnom trenutku gondola se otklanja za ugao od 45° .

Početno ubrzanje je $a_n=1.4$ g.



Slika 4 - Priraštaj ubrzanja $a_n(t)$ [9]

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je dat sažet prikaz osnovnih elemenata centrifuge i simulacije kretanja. Razmatrani su, pre svega, koncept "high agility", zatim, osnove DFS simulacije, parametri projektovanja i jedna od najznačajnijih performansi centrifuge: koordinirano kretanje. Modeliranjem centrifuge, kao manipulatora sa tri stepena slobode kretanja, u potpunosti se mogu

simulirati opterećenja najsloženijih borbenih manevara.

Cilj ovog rada, jeste da se ukaže na parametre koji su značajni za projektovanje, a deo su šire studije četvorogodišnjeg istraživačkog projekta.

5. PRIZNANJE

Ovaj rad deo je istraživanja u okviru projekta podržanog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj pod nazivom: "Razvoj uređaja za trening pilota i simulaciju leta modernih borbenih aviona i to 3-osne centrifuge i 4-osnog uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota", pod brojem TR35023.

LITERATURA

- [1] Herbst, W., Breaking the stall barrier. Aerospace Engineering, 1987 (November 1987): pp.27-9.
- [2] Carpenter, C., Flightwise: Aircraft Stability and Control, Vol. 2, Airlife Pub Ltd, England, 2002.
- [3] Cory, R. E., Supermaneuverable Perching, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 11-12, 2010
- [4] Gal-Or, B. "Vectored Propulsion, Supermaneuverability and Robot Aircraft," Springer-Verlag, 1990.
- [5] Burns, J. W.G., AGARD:G-Protection Basis/Acceleration Physiology, Crew Technology Division, Armstrong Laboratory, Brooks AFB TX 78235-5104 USA, p.1
- [6] Levin, B., Kiefer, D., Dynamic Flight Simulator for Enhanced Pilot Training, SAFE Europe (March 2002)
- [7] Y. C. Chen, D. W. Repperger: A Study of the Kinematics, Dynamics and Control Algorithms for a Centrifuge Motion Simulator, Mechanics, Vol. 6, No. 7, pp. 829-852, 1996
- [8] Dancuo, Z., Kvirgic, V., Milicevic, R., Zeljkovic, V.: Structure of Centrifuge Flight Simulation, Proceedings of the Conference on HEAVY MACHINERY 2011. Vol. 118, No. 3, pp. 829-852, 2011.

SUMMARY

BASICS OF HIGH PERFORMANCE HUMAN CENTRIFUGE DEVELOPMENT

In this paper some aspects of Human Centrifuge development are given. The main objective is to emphasize the importance of high G pilots training. Terms such as "high agility and "supermaneuverability" are briefly explained. The development of a High Performance Centrifuge is intended to meet requirements for creating a safe and secure environment for fighter pilots training. The purpose is to determine how non-specific flight regimes affect the individual physiology, as well as the ability to perform combat missions under a given load. The development is based on structural problems, creation of kinematic, dynamic and control algorithms. The Human Centrifuge, presented in this paper is designed as a system of three Degrees of Freedom of Motion. Due to its exceptional performances, the device has an important application in material testing and sustainability of overall airborne equipment. The manipulator will be produced in an appropriate ratio, as a model. The main goal of this paper is to underline the importance of optimal training, by ensuring a high G onset rate. Also, some basic technical data and diagrams are given, in order to make the reader familiar to motion simulation basics.

Key words: *High Performance Human Centrifuge, Supermaneuverability, Dynamic Simulator, Acceleration*