

Analiza utjecaja stabilizatora na određivanje elemenata vanjske orijentacije kamere na bespilotnoj letjelici

Mateo GAŠPAROVIĆ, Dubravko GAJSKI – Zagreb¹

SAŽETAK. U radu su prikazani i interpretirani rezultati analize utjecaja stabilizatora kamere na određivanje elemenata vanjske orijentacije na bespilotnim letjelicama. Riječ je o 3-osnom stabilizatoru baziranom na elektromotorima bez četkica. Prikazan je i objašnjen koncept rada stabilizatora kamera na bespilotnim letjelicama. Za potrebe rada stabilizator je unaprijeden upotrebom drugog inercijalnog mjernog uređaja (IMU). Provedena su dva testiranja stabilizatora upotrebom jednog i dva inercijalna mjerna uređaja. Testiranjem je utvrđeno višestruko povećanje preciznosti parametara vanjske orijentacije snimki dobivenih unapređenjem stabilizatora kamere. Budući da je testiranje provedeno u realnom dinamičkom okruženju, iz statističkih parametara uočen je jednoličniji rasap s 5 puta manjim minimalnim i maksimalnim vrijednostima odstupanja na unaprijedenom stabilizatoru što u konačnici potvrđuje veću pouzdanost parametara vanjske orijentacije. Standardno odstupanje kutnih elemenata vanjske orijentacije unaprijedenog stabilizatora iznosi $0,14^\circ$ za φ odnosno $0,10^\circ$ za ω , što je u odnosu na osnovni stabilizator povećanje od oko 5 puta.

Ključne riječi: bespilotna letjelica, IMU, stabilizator kamere, parametri vanjske orijentacije, fotogrametrija.

1. Uvod

Unazad nekoliko godina razvoj tehnologije omogućio je popularizaciju nove, jeftinije i jednostavnije platforme za aerofotogrametrijsku izmjeru. Novu platformu predstavljaju bespilotne letjelice. Glavni je pokretač razvoja bespilotnih letjelica unapređenje senzorske tehnologije, odnosno smanjivanje senzora, računala te dakako razvoj baterija. Postoje dva glavna tipa bespilotnih letjelica, a to su: letjelice s fiksnim krilom (engl. fixed wing UAV, slika 1a) i letjelice s rotacijskim krilom (engl. rotary wing UAV, slika 1b), tzv. multirotori.

¹ dr. sc. Mateo Gašparović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mgasparovic@geof.hr,

doc. dr. sc. Dubravko Gajski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: dgajski@geof.hr.

Za upotrebu u fotogrametrijskoj izmjeri letjelice moraju biti, među ostalim, opremljene digitalnom kamerom. Kako bi snimka bila fotogrametrijski ispravna s oštrim preslikavanjem potrebno je dodatno stabilizirati kameru. Budući da letjelice s fiksnim krilom imaju puno manje vibracije i mirniji let te je u većini slučajeva stabilizator kamere na takvim letjelicama nepotreban, u ovom radu posvetit ćemo se stabilizatorima kamere na multitorima (engl. gimbal). Za eliminaciju utjecaja zamućenja snimki pri aerofotogrametrijskoj izmjeri autori Shusheng i dr. (2015) predlažu dva jednostavna uvjeta: os snimanja trebala bi biti što vertikalnija, a vrijednost kutnog zakošenja kamere oko vertikalne osi (κ) što manja.



Slika 1. a) *Bespilotna letjelica s fiksnim krilom (URL 2), b) multitor (URL 1).*

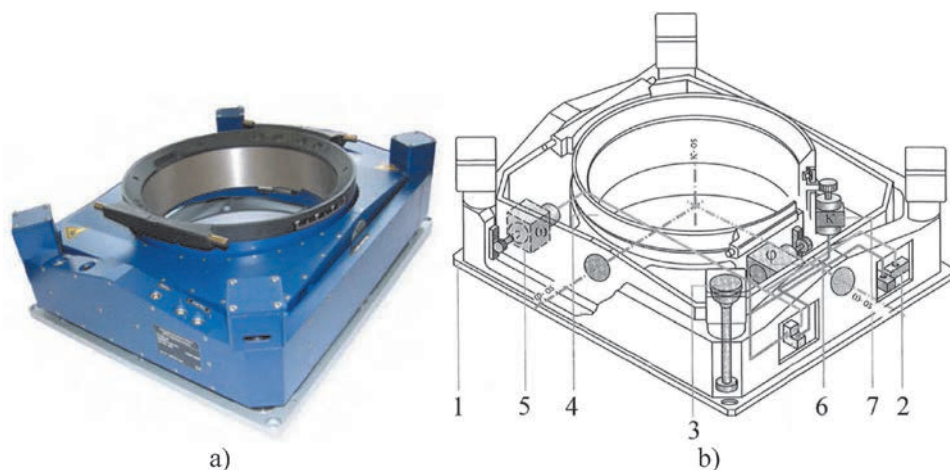
Testiranje točnosti senzora za dobivanje elemenata vanjske orijentacije poput globalnog navigacijskog satelitskog sustava (engl. GNSS – Global Navigation Satellite System), inercijalnog mjernog uređaja (engl. IMU – Inertial Measurement Unit), kompasa te barometara, pritom ne uzimajući u obzir stabilizator kamere, može se pronaći u više radova (Eugster i Nebiker 2007, Grenzdörffer i dr. 2008, Brennan i dr. 2011, Haala i dr. 2011, Colomina i Molina 2014). Točnost ovisi o kvaliteti senzora, ali i o postupku integracije podataka senzora za koji mnogi strani autori upotrebljavaju Kalmanov filtar. Provedenim istraživanjem radova stranih autora podatak o točnosti koordinatnih elemenata vanjske orijentacije dobivenih *a priori* sa same letjelice u odnosu na *a posteriori* elemente vanjske orijentacije dobivene nakon izjednačenja u najboljim slučajevima iznosi 0,5 m, dok točnost kutnih elemenata iznosi 1–2°. Dakle, u ovom su radu testirane preciznost i pouzdanost stabilizatora kamere na bespilotnoj letjelici te je analiziran njegov utjecaj na elemente vanjske orijentacije.

2. Stabilizator kamere

Kvaliteta snimke najviše ovisi o kvaliteti kamere te optičkog sustava, odnosno korištene leće. Ako je snimka prikupljena s pokretne platforme poput bespilotne letjelice, na kvalitetu utječe i gibanje u trenutku snimanja. Prije svega riječ je o zamućenju snimke. Uzročnici tog zamućenja mogu biti prevelika brzina leta u odnosu na visinu leta, preduga ekspozicija kamere, vibracije motora te nasumično zakošenje letjelice zbog vanjskih utjecaja. Brzina leta i dužina trajanja ekspozicije

parametri su koji se mogu mijenjati, odnosno zadavati kao fiksni. Zato se oni prilagođavaju uvjetima na terenu za svaki projekt kako bi njihov utjecaj na zamućenje snimke bio zanemariv. Budući da se za aerofotogrametrijska snimanja u većini slučajeva upotrebljava zrakoplov, utjecaj zamućenja zbog brzine kretanja zrakoplova, tzv. kretanja prema naprijed (engl. Forward motion), nije se mogao u potpunosti eliminirati zbog relativno velike minimalne brzine leta zrakoplova u režimu snimanja (172 km/h – Pilatus „Turbo Porter PC-6 B1-H2“, 210 km/h – Dornier „Do 27Q“, 251km/h – Cesna „Turbo Skywagon T207“, Albertz i Kreiling 1989). Osamdesetih godina 20. stoljeća taj problem bio je predmet mnogih znanstvenih istraživanja te je konačno problem zamućenja zbog brzine zrakoplova riješen kompenzatorom (engl. Forward motion compensator – FMC, Meier 1984). Takvi kompenzatori rješavali su problem zamućenja zbog gibanja u smjeru leta zrakoplova, ali i dalje je problem slučajno zakošenje zrakoplova.

Stabilizator kamere ključna je spona između zrakoplova i tijela kamere. Taj uređaj ima zadaću prije svega eliminirati vibracijske utjecaje na fotografiji. Postoje mnogi manualni i automatski stabilizatori kamere. U nastavku je prikazan žiroskopski stabilizator T-AS tvrtke Z/I Imaging, koji se upotrebljava za stabilizaciju aerofotogrametrijskih kamera u zrakoplovima (slika 2a). Više informacija o cjelokupnom sustavu za aerofotogrametrijsku izmjeru, kojega je jedan od dijelova T-AS stabilizator, može se naći u radovima Tang i dr. (2000), Hinz i dr. (2001) i Dörstel (2003).



Slika 2. a) Žiroskopski stabilizator T-AS (URL 3), b) komponente žiroskopskog stabilizatora T-AS (McGlone 2013).

Na slici 2b vide se komponente T-AS 3-osnog stabilizatora. Dakle, taj stabilizator stabilizira kameru po svim trima osima (ω , φ i κ). Dijelovi su stabilizatora: podložna ploča (1 na slici 2b), senzor za niveliranje (2), antivibracijski amortizeri (3), κ prsten za montažu kamere (4) te motor za svaku os (5 za ω , 6 za φ i 7 za κ). U tablici 1 prikazane su tehničke karakteristike T-AS stabilizatora. Više o usporednoj točnosti određivanja elemenata vanjske orijentacije temeljem stabilizatora i ostalih senzora u zrakoplovu može se pronaći u radu Sandau (2009).

Tablica 1. Tehničke karakteristike T-AS stabilizatora (URL 4).

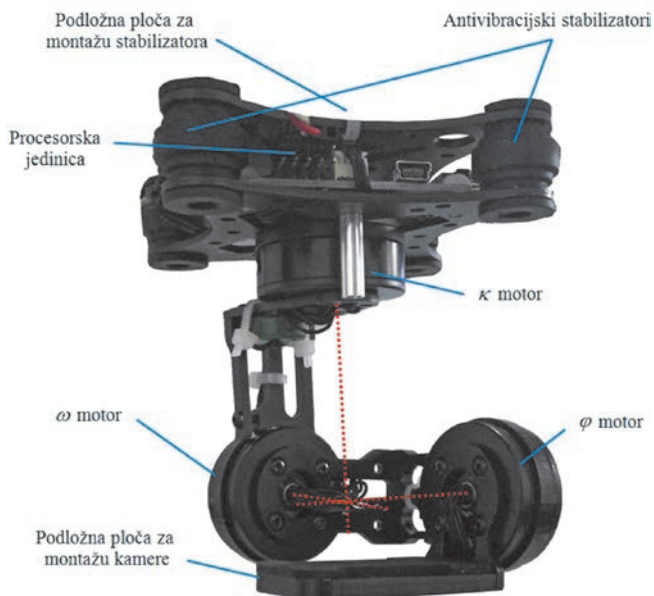
Dimenzije (d, v, š)	647, 510, 220 mm
Masa	48 kg
Maks. nosivost	110 kg
Područje rada (ω, φ, κ)	$\pm 5^\circ$, od -7° do $+5^\circ$, $\pm 30^\circ$
Maks. rotacijska brzina (ω, φ, κ)	20°/s, 20°/s, 15°/s
Maks. rotacijsko ubrzanje (ω, φ, κ)	500°/s ² , 500°/s ² , 500°/s ²
Standardno odstupanje	<0,5°

2.1. Stabilizator kamere na bespilotnim letjelicama

Bespilotne letjelice mogu letjeti puno sporije nego zrakoplovi s posadom te time pridonose oštrini snimki. Ako je riječ o bespilotnim letjelicama fiksnoga krila, njihova je minimalna brzina samo 40 km/h (eBee Sensefly), ali brzina krstarenja može biti od 40 do 110 km/h (Elston i dr. 2015). Takve letjelice lete puno stabilnije od multirotora te se za snimanje iz zraka u pravilu ne upotrebljava stabilizator kamere. Na takvim letjelicama kamera se najčešće direktno pričvršćuje na tijelo letjelice, a u fotogrametrijske svrhe elementi vanjske orijentacije preuzimaju se sa senzora na samoj letjelici (GNSS – Global Navigation Satellite System, IMU – engl. Inertial Measurement Unit, kompas, barometar itd.). Više o usporedbi performansi leta različitim tipovima letjelica (fiksno krilo, rotirajuće krilo) može se pronaći u radu Filippone (2006). U ovom radu riječ je o istraživanjima vezanim uz stabilizator kamere na multirotoru. Riječ je o 3-osnom stabilizatoru baziranom na elektromotorima bez četkica (engl. brushless electric motor, slika 3). Stabilizator se sastoji od podložne ploče za montažu kamere i stabilizatora, procesorske jedinice, amortizera za eliminaciju vibracije motora te tri elektromotora bez četkica (ω, φ i κ). U sklopu procesorske jedinice nalazi se IMU. Temeljem detektiranih otklona inercijalnog mjernog uređaja procesorska jedinica računa vrijednost nagiba i šalje impuls u svaki motor radi korekcije. Stabilizator na taj način obavlja korekciju i kameru drži u ispravnom položaju bez obzira na vibracije i naginjanje letjelice. S obzirom na potrebu za većim radnim područjem zbog nestabilnijeg leta multirotora u odnosu na zrakoplov taj stabilizator ima veće područje rada. Najvažnije karakteristike stabilizatora korištenog u ovom istraživanju priložene su u nastavku (tablica 2).

Tablica 2. Tehničke karakteristike stabilizatora.

Dimenzije (d, v, š)	82, 98, 82 mm
Masa	219 g
Maks. nosivost	100 g
Područje rada (ω, φ, κ)	$\pm 40^\circ$, od -30° do $+90^\circ$, $\pm 100^\circ$
Frekvencija stabilizacije	700 Hz



Slika 3. Stabilizator kamere za bespilotne letjelice.

Glavni je cilj istraživanja ispitivanje preciznosti i pouzdanosti stabilizacije kamere temeljem 3-osnog stabilizatora. Znanstveni je doprinos poboljšanje preciznosti i pouzdanosti stabilizacije kamere temeljem korištenja drugog inercijalnog mjernog uređaja na unaprijeđenom stabilizatoru kamere. Određivanjem preciznosti rada stabilizatora pridonosimo poboljšanju točnosti elemenata vanjske orijentacije kamere na što utječe i točnost korištenih senzora na bespilotnoj letjelici. U nastavku je detaljno objašnjen postupak testiranja te unapređenje stabilizatora temeljem korištenja drugog IMU-a.

3. Određivanje preciznosti stabilizatora kamere na bespilotnim letjelicama

Za potrebe određivanja preciznosti, stabilizator je postavljen u normalni režim rada, pričvršćen na bespilotnu letjelicu (multirotor) te je na njega postavljena kamera Xiaomi Yi. Kamera Xiaomi Yi ima masu 76,6 grama i dimenzije 60,4 x 42 x 21,2 mm (URL 5). Za vrijeme testnog perioda letjelica se simultano rotirala do maksimalnih 135° oko svake osi (ω , φ i κ). Prije provedbe testiranja postavljene su sljedeće početne (treba) kutne vrijednosti elemenata vanjske orijentacije:

$$\omega_T = \varphi_T = \kappa_T = 0. \quad (1)$$

Zadaća je stabilizatora da za svaki detektirani pomak u jedinici vremena, tj. za svako svoje mjerenje i izračuna korekciju i kompenzira pomak tako da zadovolji sljedeće uvjete:

$$\omega_T \approx \omega_i, \varphi_T \approx \varphi_i, \kappa_T \approx \kappa_i, \quad (2)$$

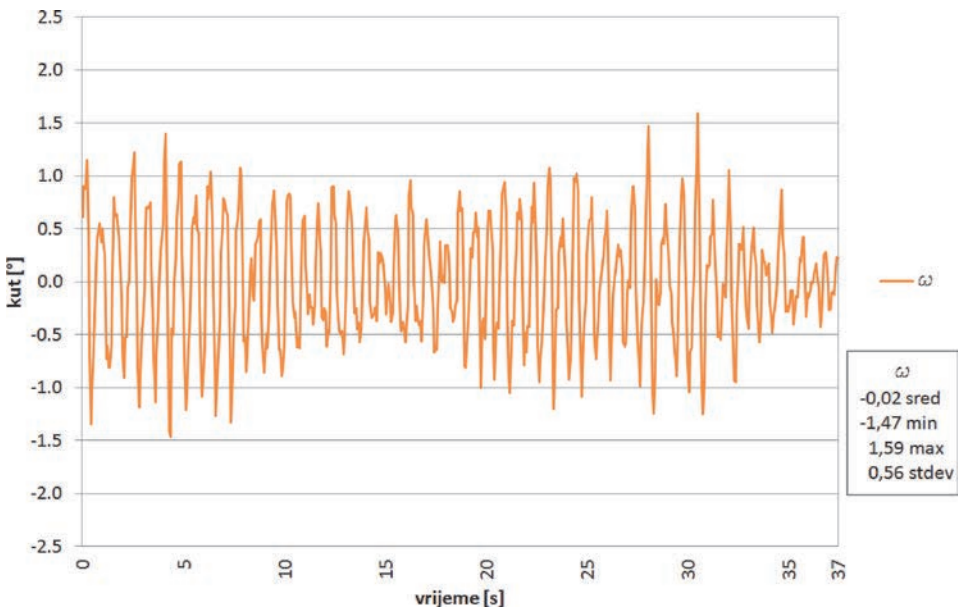
gdje su ω_i , φ_i , κ_i mjereni elementi vanjske orijentacije u jedinici vremena j . Za taj stabilizator kamere minimalna vremenska jedinica uzorkovanja j izračunata je prema sljedećem izrazu:

$$\text{Frekvencija stabilizacije} = 700 \text{ Hz} \Rightarrow j = 1 / 700 \text{ s} . \quad (3)$$

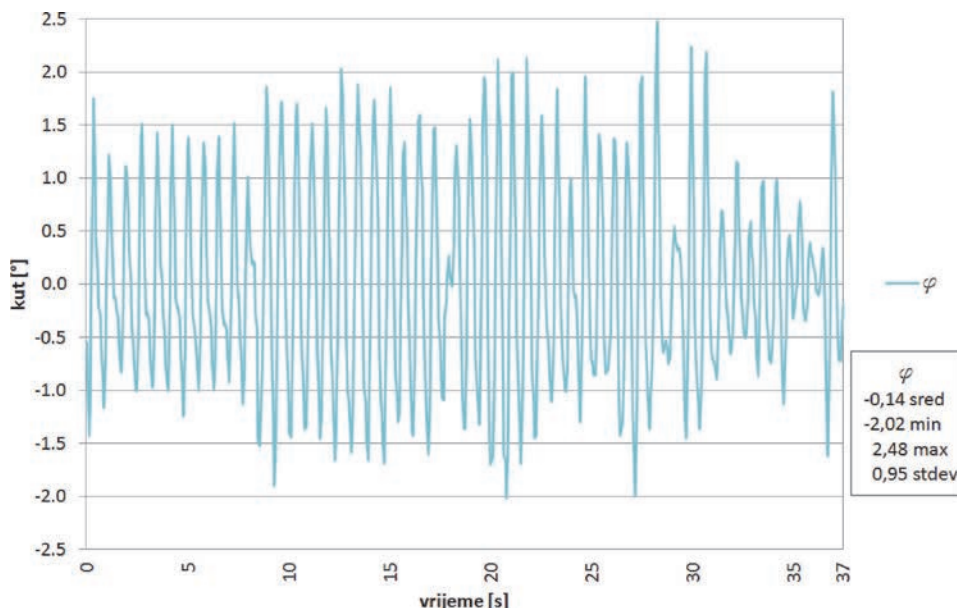
Važno je naglasiti kako za potrebe aerofotogrametrijske izmjere na vertikalnost osi snimanja ne utječe kut κ te zbog toga njegov utjecaj nije predmet ispitivanja ovog znanstvenog istraživanja. Treba također istaknuti kako je stabilizator kamere podešen tako da kut κ prati smjer leta koji je promjenljiv ovisno o nizu snimanja dok je vertikalnost osi snimanja zadana Zemljinim poljem ubrzanja sile teže. Zbog toga κ motor ima veću slobodu te podaci nisu usporedivi s ω , φ elementima vanjske orijentacije koji su predmet daljnjeg istraživanja. Potrebno je također naglasiti kako stabilizator kamere ne utječe na promjenu koordinatnih elemenata vanjske orijentacije te zbog toga u ovom radu koordinatni elementi vanjske orijentacije neće biti predmet daljnjeg istraživanja.

3.1. Ispitivanje i analiza prvog testiranja

Rezultati prvog testiranja provedenog na stabilizatoru sa Xiaomi Yi kamerom, tj. odstupanja ω_i i φ_i od početne ω , φ (treba) vrijednosti priložena su u nastavku (slike 4 i 5). Radi bolje vizualizacije kutnih odstupanja izrađen je graf funkcije gustoće normalne razdiobe kutnih odstupanja φ (slika 6a) i ω (slika 6b) dobivenih stabilizatorom kamere s jednim inercijalnim mjernim uređajem. Funkcija gustoće normalne razdiobe dana je sljedećim izrazom (Feil 1990, Luhmann i dr. 2014):



Slika 4. Graf kutnih odstupanja elemenata vanjske orijentacije ω dobivenih stabilizatorom kamere s jednim IMU-om.

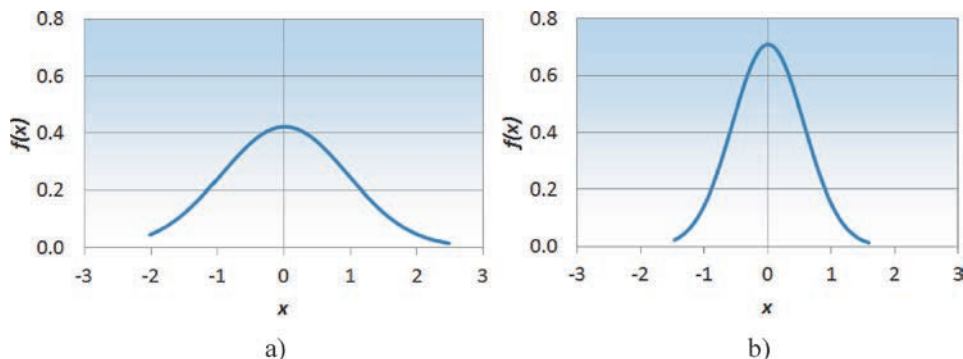


Slika 5. Graf kutnih odstupanja elemenata vanjske orijentacije φ dobivenih stabilizatorom kamere s jednim IMU-om.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{za } -\infty < x < \infty, \quad (4)$$

gdje su: μ aritmetička sredina, σ standardno odstupanje, a x slučajna varijabla, u ovom slučaju odstupanje mjerenja.

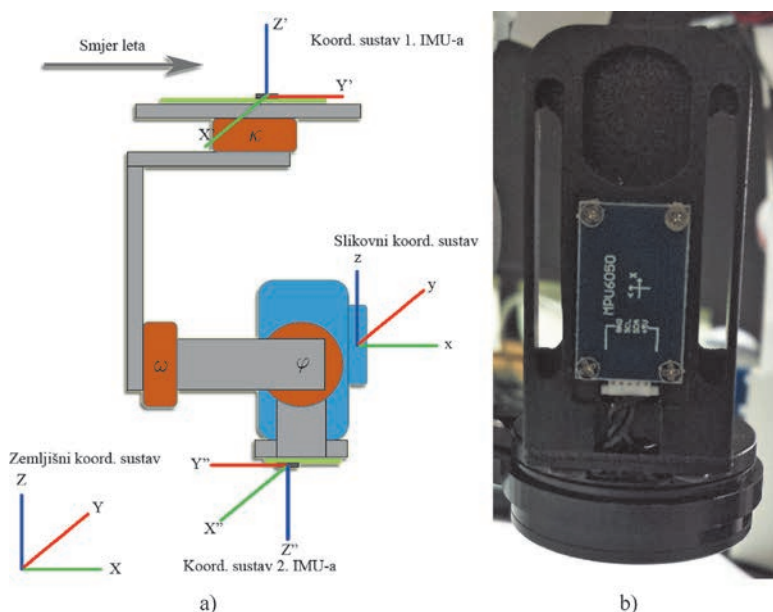
Iz prethodnih grafova i popratnih statističkih pokazatelja uočavaju se minimalna i maksimalna odstupanja kuta φ od $-2,02^\circ$ i $2,48^\circ$ te ω od $-1,47^\circ$ i $1,59^\circ$. Standardno odstupanje kuta φ iznosi $0,95^\circ$, a kuta ω $0,56^\circ$. Iz srednjih vrijednosti za φ uočljiv je sustavni utjecaj.



Slika 6. Graf funkcije gustoće normalne razdiobe kutnih odstupanja: a) φ i b) ω dobivenih stabilizatorom kamere s jednim IMU-om.

4. Unapređenje stabilizatora na bespilotnim letjelicama

Za poboljšanje rada stabilizatora korišten je drugi inercijalni mjerni uređaj smješten na podložnu ploču za montažu kamere (slika 7b). Drugi inercijalni mjerni uređaj obavlja neovisna mjerenja te temeljem integracije s prvim inercijalnim mjernim uređajem smještenim u procesorskoj jedinici izračunavaju se poboljšani rezultati elemenata vanjske orijentacije. Skica svih dijelova unaprijeđenog stabilizatora s prikazom ishodišta koordinatnih sustava, korištenih u transformaciji za određivanje elemenata vanjske orijentacije, prikazana je na slici 7a.



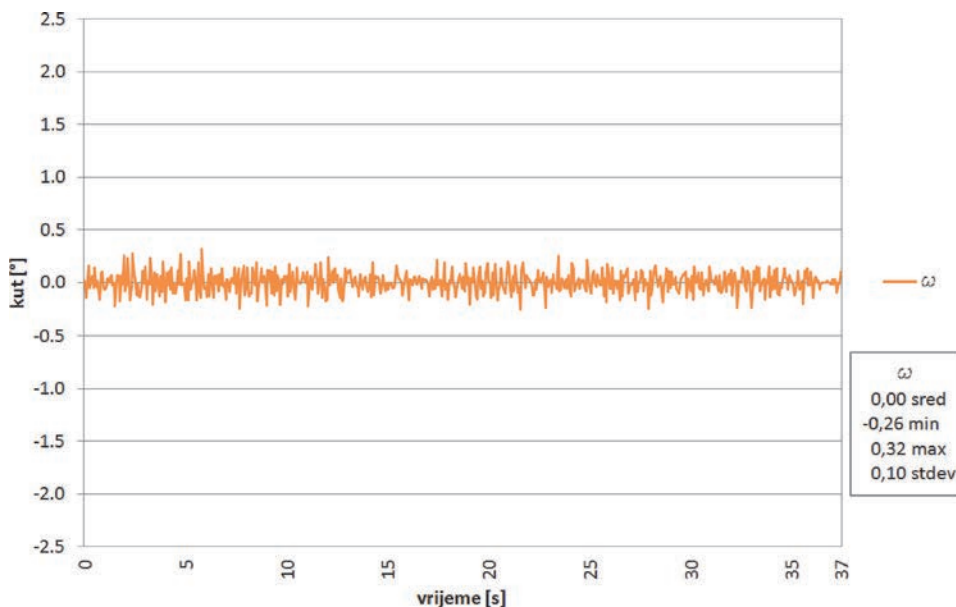
Slika 7. a) Shema unapređenja stabilizatora s prikazom ishodišta koordinatnih sustava, b) prikaz smještaja drugog IMU-a na podložnoj ploči za montažu kamere.

Nakon instaliranja, podešavanja i kalibriranja drugog inercijalnog mjernog uređaja ponovno je provedeno testiranje. U sljedećem poglavlju prikazane su analize drugog testiranja provedenog na unaprijeđenom stabilizatoru kamere za bespilotne letjelice te su dani njihovi rezultati.

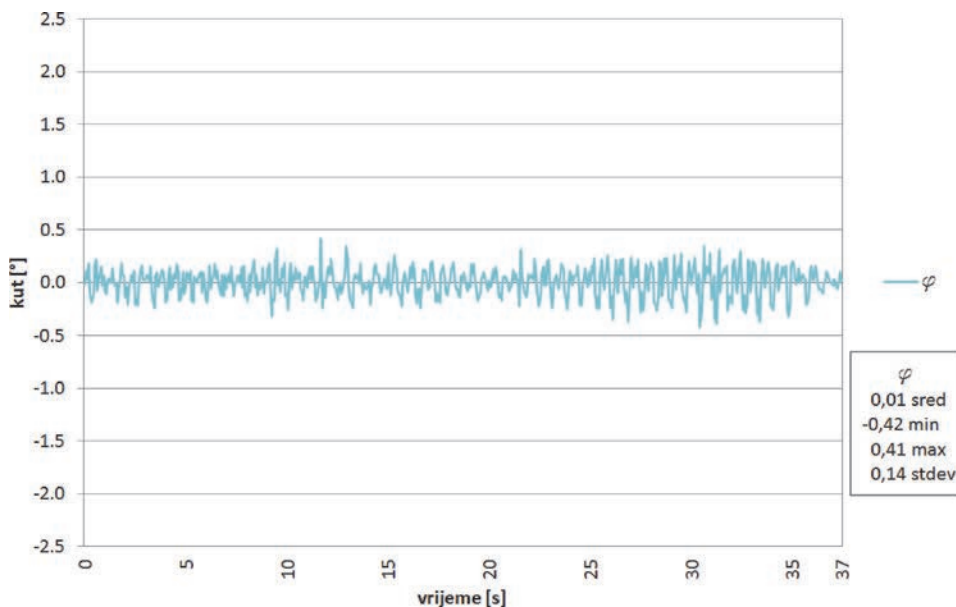
4.1. Ispitivanje i analiza drugog testiranja

Testiranje je obavljeno pod istim uvjetima kao i prethodno (prvo) istraživanje. Dakle, dužina trajanja testa te jačina i učestalost rotacijskih pomaka letjelice bile su identične. Zbog toga su testovi međusobno usporedivi.

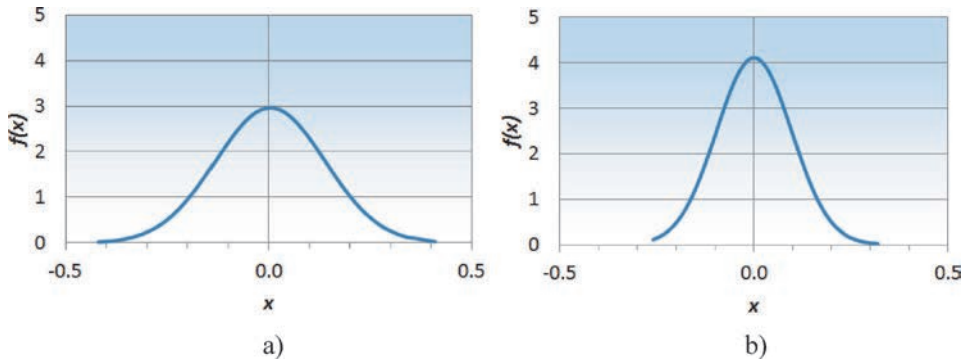
Rezultate dobivene testiranjem provedenim na unaprijeđenom stabilizatoru s dva inercijalna mjerna uređaja na kojem je montirana Xiaomi Yi kamera priložena su u nastavku (slika 8 i 9). Radi bolje vizualizacije kutnih odstupanja izrađen je graf



Slika 8. Graf kutnih odstupanja elemenata vanjske orijentacije ω dobivenih unaprijeditim stabilizatorom s dva IMU-a.



Slika 9. Graf kutnih odstupanja elemenata vanjske orijentacije φ dobivenih unaprijeditim stabilizatorom s dva IMU-a.



Slika 10. Graf funkcije gustoće normalne razdiobe kutnih odstupanja: a) φ i b) ω dobivenih unaprijeđenim stabilizatorom s dva IMU-a.

funkcije gustoće normalne razdiobe kutnih odstupanja φ (slika 10a) i ω (slika 10b) dobivenih stabilizatorom kamere s dva inercijalna mjerna uređaja. Funkcija gustoće normalne razdiobe dana je izrazom (4).

Iz prethodnih grafova i popratnih statističkih pokazatelja uočavaju se minimalna i maksimalna odstupanja kuta φ od $-0,42^\circ$ i $0,41^\circ$ te ω od $-0,26^\circ$ i $0,32^\circ$. Standardno odstupanje kuta φ iznosi $0,14^\circ$, a kuta ω $0,10^\circ$. Dakle jasno je vidljivo smanjenje minimalne i maksimalne vrijednosti ω od 5 puta u odnosu na podatke dobivene stabilizatorom korištenjem jednog inercijalnog mjernog uređaja. Također, standardno odstupanje kuta ω drugog testa je oko 5 puta manje u odnosu na prvo izjednačenje. Ako usporedimo minimalne i maksimalne vrijednosti za kut φ u prvom i drugom izjednačenju, možemo reći kako je drugo testiranje bolje za oko 5 puta. Kada pogledamo vrijednosti standardnog odstupanja dolazimo do poboljšanja od gotovo 7 puta. Treba istaknuti kako u drugom izjednačenju nije uočen sustavni utjecaj već je jasno vidljivo kako su odstupanja slučajnoga karaktera. Treba spomenuti i 50% bolje standardno odstupanje kuta ω u odnosu na φ u oba izjednačenja. Isti trend jasno je vidljiv i u grafovima funkcija gustoća normalne razdiobe.

5. Zaključak

Iz prethodno provedenih znanstvenih istraživanja temeljenih na dva testa stabilizatora kamere za bespilotne letjelice jasno je vidljivo poboljšanje preciznosti i pouzdanosti elemenata vanjske orijentacije. Naime, preciznost unaprijeđenog stabilizatora s dva inercijalna mjerna uređaja u realnim uvjetima određena temeljem provedenih dinamičkih mjerenja veća je od preciznosti osnovnog stabilizatora s jednim inercijalnim mjernim uređajem. Iz statističkih pokazatelja poput standardnog odstupanja, srednje vrijednosti, minimalnih i maksimalnih vrijednosti odstupanja unaprijeđeni stabilizator ima oko 5 puta bolju preciznost u odnosu na osnovni. Prikazi odstupanja dinamičkih mjerenja na grafovima također upućuju na jednoličnija odstupanja kod unaprijeđenog stabilizatora. Grafovi funkcije gustoće normalne razdiobe odstupanja upućuju na ujednačeniji rasap odstupanja kod unaprijeđenog stabilizatora u odnosu na osnovni. Na kraju treba istaknuti vrijednosti

standardnog odstupanja od $0,14^\circ$ za kut φ te $0,10^\circ$ za ω kao ocjenu preciznosti unaprijedenog stabilizatora. Dakle, maksimalno odstupanje od $0,42^\circ$ i maksimalno standardno odstupanje od $0,14^\circ$ garancija je visoke preciznosti elemenata vanjske orijentacije koje dobivamo unapređenjem stabilizatora kamere.

Literatura

- Albertz, J., Kreiling, W. (1989): *Photogrammetrisches Tachenbuch*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Brennan, A., Zhang, J., Deluzio, K., Li, Q. (2011): Quantification of inertial sensor-based 3D joint angle measurement accuracy using an instrumented gimbal, *Gait & posture*, 34, 3, 320–323.
- Colomina, I., Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Dörstel, C. (2003): DMC-Practical Experiences and Photogrammetric System Performance, *Photogrammetric Week 2003*, 59–65.
- Elston, J., Argrow, B., Stachura, M., Weibel, D., Lawrence, D., Pope, D. (2015): Overview of Small Fixed-Wing Unmanned Aircraft for Meteorological Sampling, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32, 1, 97–115.
- Eugster, H., Nebiker, S. (2007): Geo-registration of video sequences captured from Mini UAVs: Approaches and accuracy assessment, In: *The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*, Padua, Italy, 1–8.
- Feil, L. (1990): *Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – drugi dio*, Birotehnika, OOUR Štamparija, Zagreb.
- Filippone, A. (2006): *Flight performance of fixed and rotary wing aircraft*, Elsevier, Oxford.
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., Teichert, B. (2008): The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207–1214.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., Trittler, M. (2011): Performance test on UAV-based photogrammetric data collection, *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22), 7–12.
- Hinz, A., Dörstel, C., Heier, H. (2001): DMC-The digital sensor technology of Z/I-Imaging, *Photogrammetric Week 2001*, 93–103.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2014): *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, De Gruyter, Berlin.
- McGlone, J. C. (2013): *Manual of Photogrammetry*, 6th edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda.
- Meier, H. K. (1984): Progress by forward motion compensation for ZEISS aerial cameras, *Bildmessung und Luftbildwesen*, 52(3a), 143–152.
- Sandau, R. (2009): *Digital airborne camera: introduction and technology*, Springer Science & Business Media, Berlin.

Shusheng, L., Zhong, M., Zhao, Y. (2015): Estimation and compensation of unknown disturbance in three-axis gyro-stabilized camera mount, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 37, 6, 732–745.

Tang, L., Dörstel, C., Jacobsen, K., Heipke, C., Hinz, A. (2000): Geometric accuracy potential of the digital modular camera, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(B4/3; PART 4), 1051–1057.

Mrežne adrese

URL 1: Personal Drones, <http://www.personal-drones.net/>, (15. 3. 2016.).

URL 2: Futurist Speaker, <http://www.futuristspeaker.com/>, (15. 3. 2016.).

URL 3: The Aerial Blog, <https://aerialsurveybase.wordpress.com/>, (17. 3. 2016.).

URL 4: Midwest Aerial Photography, <http://midwestaerialphoto.com/>, (18. 3. 2016.).

URL 5: Xiaomi Yi, <http://www.xiaoyi.com/>, (15. 2. 2016.).

Analysis of the Gimbal Impact on the Determination of Camera External Orientation Elements on the UAV

ABSTRACT. In this paper are presented and interpreted the results of the analysis of the gimbal impact to the determination of the external orientation elements on the UAV. Gimbal presented in this paper is a 3-axis gimbal based on brushless motors. The paper describes and explains the concept of the camera stabilizer on UAVs. For the purposes of this paper, the gimbal is improved by using the second inertial measurement unit (IMU). Two tests using one and two inertial measurement units were conducted on the stabilizer. Testing has determined multiple increase of precision of external orientation parameters of images obtained by improving the gimbal. Given that the testing is carried out in real dynamic environment, it was observed from statistical parameters more uniform dispersion with 5 times lower minimum and maximum values of the deviations on the improved stabilizer. This ultimately confirms greater reliability of external orientation parameters. The standard deviation of angular external orientation elements improved by the gimbal is 0.14° for φ or 0.10° for ω , which is in relation to the basic gimbal increase of about 5 times.

Keywords: UAV, IMU, gimbal, external orientation parameters, photogrammetry.

Primljeno / Received: 2016-04-15

Prihvaćeno / Accepted: 2016-05-30