

Poređenje metoda za estimaciju i upravljanje ugla propinjanja kvadrokoptera

Na modelu kvadrokoptera koji ima samo jednu osu rotacije koja se nalazi u horizontalnoj ravni, ispitivan je uticaj različitih algoritama na kvalitet stabilizacije kvadrokoptera. Za estimaciju ugla propinjanja korišćena je inercijalna merna jedinica, a merenja sa njenih senzora objedinjavali su Kalmanov, odnosno komplementarni filter. Na osnovu estimacije, vršena je stabilizacija pomoću PD, PI i PID regulatora čiji su preskoci, vremena smirenja, vremena kašnjenja i stalne greške potom upoređeni. Kalmanov filter je sa standardnom devijacijom merenja od 0.2° bio bolji u odnosu na komplementarni, dok je od testiranih regulatora najbolji bio PID. Aparatura je stabilizovana sa preskokom od 4.2%, vremenom kašnjenja od 3.8 s i vremenom smirenja od 3.8 s.

Uvod

Najčešći pristup problemu stabilizacije kvadrokoptera sastoji se iz estimacije ugla propinjanja pod kojim se kvadrokopter nalazi i primene različitih regulatora koji ga stabilizuju na osnovu te estimacije. Za estimaciju ugla propinjanja koristi se inercijalna merna jedinica uz pomoć koje se meri gravitaciono ubrzanje Zemlje, kao i ugaona brzina sistema. Radi tačnije i preciznije estimacije, koriste se algoritmi objedinjavanja merenja ubrzanja i ugaone brzine, među kojima se najčešće koriste komplementarni i Kalmanov filter (Sousa 2011). Za stabilizaciju kvadrokoptera koriste se regulatori za stabilizaciju automatskih sistema, kao što su PI, PD i PID. U radovima koji su korišćeni kao referentni, postignute su standardne devijacije estimacije ugla od 1.83° za komplementarni filter i 1.59° za Kalmanov filter (Sousa 2011). U drugom radu (Euston 2008) postignuto vreme kašnjenja iznosi 8 sekundi.

U ovom radu su, na modelu jednoosnog kvadrokoptera, ispitivane tačnost i preciznost Kalmanovog i komplementarnog filtra za estimaciju ugla propinjanja. Takođe, poređena su vremena kašnjenja, vremena smirenja, stalne greške i preskoci PD, PI i PID regulatora koji su korišćeni za stabilizaciju kvadrokoptera.

Nemanja Filipović (1996), Sremčica, Gnjionska 3, učenik 2. razreda XIII beogradske gimnazije

Đorđe Skakun (1994), Novi Sad, Mila Milunovića 28, učenik 4. razreda Gimnazije „Jovan Jovanović Zmaj” u Novom Sadu

MENTOR: Stefan Krsmanović, student ETF Univerziteta u Beogradu

Aparatura

Kvadkopter

Kvadkopteri su letelice sa četiri rotora. Na slici 1 je prikazan jedan ovakav uređaj.



Slika 1.
Kvadkopter sa elisama
(1-4) i kontrolerom (5)
(Web 3)

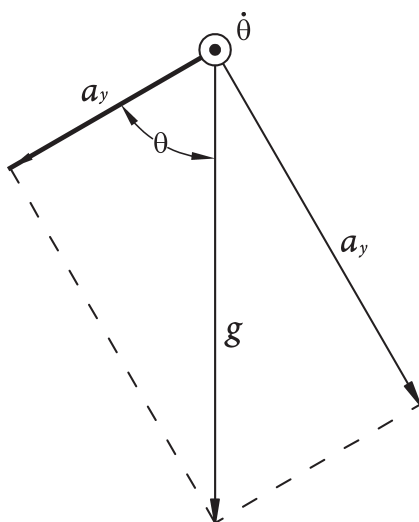
Figure 1.
Quadcopter with
propellers (1-4) and
controller (5)
(Web 3)

Kvadkopter ostvaruje uzgon uz pomoć četiri elise. Kako bi se poništili obrtni momenti elisa, po dve naspramne elise se kreću u smeru kazaljke na satu, a druge dve u smeru suprotnom od smeru kazaljke na satu. Kretanje po vertikalnoj osi se ostvaruje ravnomernom promenom snage na sve četiri elise, dok se manevri u horizontalnoj ravni izvode ravnomernom promenom snage na parovima susednih elisa. Na taj način kvadkopter može da vrši kretanje po 6 stepena slobode (tri stepena slobode za kretanje u prostoru i rotacija oko te tri ose). Veoma su pokretljivi, tako da i najmanja promena potiska izaziva velika pomeranja. Radi sprečavanja tih velikih pomeranja, potrebno je projektovati sistem koji je zadužen za stabilizaciju kvadkoptera.

Inercijalna merna jedinica

Inercijalna merna jedinica (IMJ) je uređaj koji u sebi sadrži akcelerometar i žiroskop (Morrison 1987) koji omogućavaju estimaciju ugla propinjanja. Potpune IMJ sadrže i kompas koji omogućuje i estimaciju položaja u odnosu na magnetni pol Zemlje. Na osnovu merenja dobijenih uz pomoć akcelerometra i žiroskopa moguće je odrediti orijentaciju IMJ u prostoru. Na slici 2 je prikazan način na koji se koriste merenja dobijena sa akcelerometra i žiroskopa u svrhu estimacije orijentacije IMJ.

Akcelerometar je uređaj koji meri rezultujuće ubrzanje sistema za koji je pričvršćen. Zbog toga što je dominirajuće gravitaciono ubrzanje, moguće je odrediti pod kojim se uglom u odnosu na horizontalnu ravan IMJ nalazi.



Slika 2. Skica osa na kojima se meri ubrzanje i ugaona brzina (θ – estimirani ugao, $\dot{\theta}$ – ugaona brzina, g – rezultujući vektor ubrzanja, a_x – projekcija rezultujućeg vektora ubrzanja na x osu, a_y – projekcija rezultujućeg vektora ubrzanja na y osu)

Figure 2. Schematic of axes upon which acceleration and angular velocity are measured (θ – estimated angle, $\dot{\theta}$ – angular velocity, g – net acceleration vector, a_x – net acceleration vector projection on x axis, a_y – net acceleration vector projection on y axis)

Ipak, zbog vibracija koje potiču od rotora, preciznost je značajno umanjena, jer se estimira rezultanta svih ubrzanja:

$$\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i$$

gde je \vec{a} – estimirani vektor, a \vec{a}_i – pojedinačni vektor ubrzanja.

Akcelerometar se sastoji iz tri komponente. Svaka komponenta meri projekciju rezultujućeg ubrzanja na jednoj od tri ose (x , y i z) referentnog sistema. Na osnovu tih merenja može se utvrditi ugao pod kojim se vektor nalazi po sledećoj formuli:

$$\theta = \arctan \frac{a_x}{a_y}$$

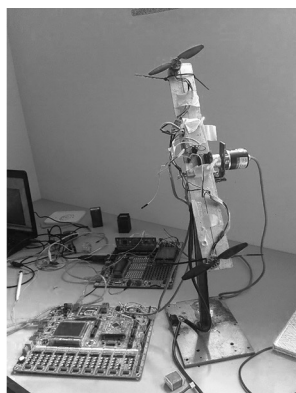
gde je a_x – projekcija rezultujućeg vektora ubrzanja na x osu, a_y – projekcija rezultujućeg vektora ubrzanja na y osu, a θ – estimirani ugao.

Žiroskop se takođe sastoji od tri komponente koje mere ugaone brzine oko tri ose. Ugao se na osnovu merenja sa jedne od tih komponenti može estimirati numeričkom integracijom ugaone brzine i sabiranjem početne pozicije:

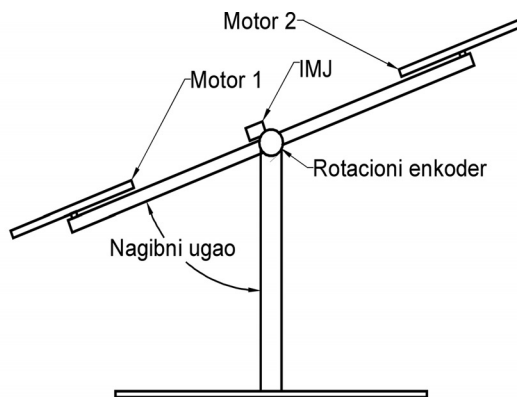
$$\theta = \theta_0 + \sum_{i=1}^n \dot{\theta}_i \cdot \Delta t$$

gde je: θ – trenutni ugao, θ_0 – početni ugao, $\dot{\theta}$ – ugaona brzina, a Δt – vreme proteklo između dva merenja ugaone brzine.

Problem sa ovom metodom je to što se numeričkom integracijom integrali i greška svakog merenja. Velika mana žiroskopa je i to što nije u mogućnosti da meri nultu brzinu, već nultu ugaonu brzinu prikazuje kao veoma malu brzinu (tzv. drift žiroskopa). To znači da se numeričkom integracijom drifta dobija greška koja nakon svakog merenja linearno raste. Zbog toga se merenja sa žiroskopa mogu smatrati validnim samo za male



a



b

Slika 3. Korišćena aparatura a) fotografija b) skica

Figure 3. Apparatus that was used a) photography b) schematic

vremenske intervale. Prednost žiroskopa je u tome što nije podložan registrovanju šuma koji potiče od vibracija.

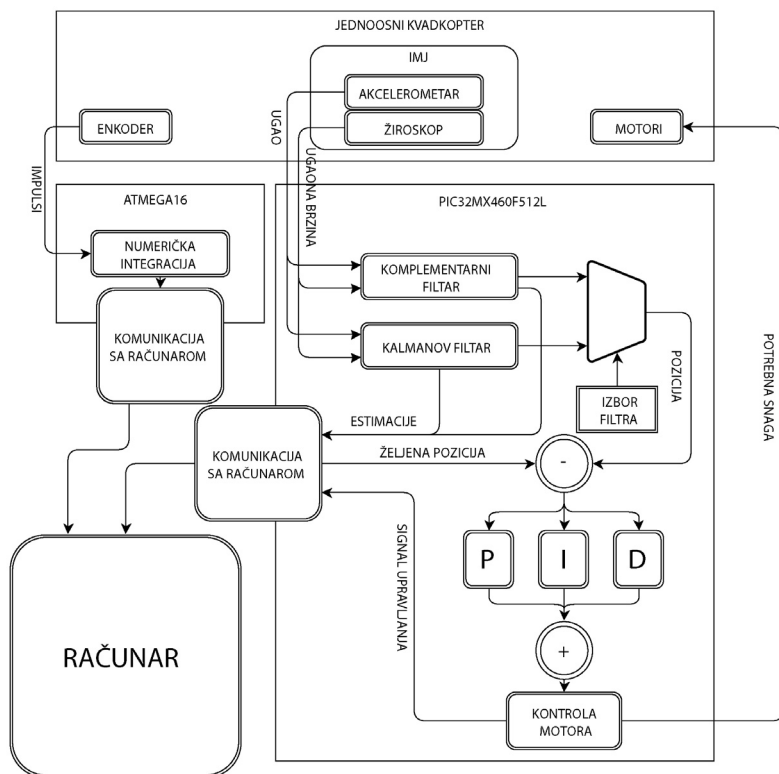
Opisani problem nesavršenosti akcelerometra i žiroskopa rešava se kombinovanjem nezavisnih merenja svakog od senzora (eng. Sensor Fusion). U ovom radu su ispitane karakteristike dva takva metoda – komplementarni filter i Kalmanov filter. U ovom radu su ispitivane karakteristike dva takva filtra – komplementarnog i Kalmanovog filtra.

Specijalizovana aparatura

U ovom istraživanju je napravljena posebna aparatura koja omogućava simulaciju ponašanja samo jedne ose kvadrokoptera (slika 3).

Aparatura se sastoji iz dva segmenta: postolja i pokretnog dela. Oni su međusobno pričvršćeni uz pomoć kugličnog ležaja, što omogućava rotaciju gornjeg dela. Silu koja pokreće ovu aparaturu proizvode dva motora bez četkica (engl. Brushless motor). Ugao se estimira uz pomoć MPU6050 IMJ-e pričvršćene iznad ose rotacije. Ova IMJ nije potpuna, jer ne sadrži kompas, ali on u ovom slučaju nije potreban. Podaci o ubrzanjima i ugaonoj brzini se šalju PIC32MX460F512L mikrokontroleru gde se obrađuju i odakle se kontrolišu motori. Takođe je kao kontrolni instrument ugrađen inkrementalni rotacioni enkoder rezolucije 1500 cpr (klikova po rotaciji) koji omogućava pouzdanije merenje ugla pod kojim se nalazi aparatura. Podaci o estimaciji ugla i izmerenoj vrednosti ugla se šalju na računar, gde se čuvaju radi dalje obrade podataka. Blok šema ove aparature se može videti na slici 4.

U svrhu testiranja, na mikrokontroleru su implementirana oba filtra. Za stabilizaciju su se mogle koristiti estimirane vrednosti ili sa Kalmanovog filtra ili sa komplementarnog filtra. Obe estimirane vrednosti se istovremeno šalju na računar. Estimaciju ugla sa enkodera vrši ATMEGA16



Slika 4.
Blok šema aparature

Figure 4.
Block schematic of the apparatus

mikrokontroler. Oba mikrokontrolera su sinhronizovana tako da istovremeno vrše estimaciju, kako bi se smanjile greške u kašnjenju jednog merenja u odnosu na drugo. Ta sinhronizacija je izvedena tako što se na početku svake estimacije ugla sa IMJ šalje sinhronizacioni signal mikrokontroleru koji vrši estimaciju ugla sa rotacionog enkodera da započne svoju estimaciju. Računar šalje sistemu za stabilizaciju željenu poziciju koju korisnik može odabrati.

Metod

Algoritmi i regulatori su testirani na jednoj osi kvadkoptera, zbog jednostavnosti, ali princip važi i za letelice sa 6 stepeni slobode.

Komplementarni filter

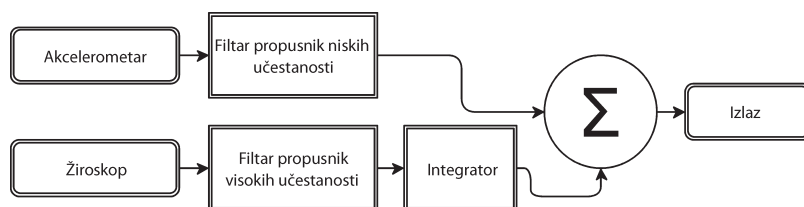
Komplementarni filter se zasniva na dodeljivanju koeficijenta poverenja senzoru i omogućava smanjivanje akumulirane greške, kao i šuma. Nakon svake iteracije numeričkog integraljenja izmerene ugaone brzine, u obzir se uzima i estimacija ugla sa akcelerometra. To omogućava stalno ispravljanje greške izazvane pogrešnim merenjem žiroskopa, ali pošto u jednoj iteraciji merenje sa akcelerometra nema veliki uticaj, odstranjen je

šum koji potiče od rotora. Jednačina komplementarnog filtra izgleda ovako (Euston *et al.* 2008):

$$\text{out}_k = \text{akc} \cdot \text{akc}_{\text{pov}} + (\text{out}_{k-1} + \dot{\theta} \cdot dt) \cdot (1 - \text{akc}_{\text{pov}}), 0 \leq \text{akc}_{\text{pov}} \leq 1$$

gde je out – estimirani ugao, akc – estimacija ugla sa akcelerometra, $\dot{\theta}$ – ugaona brzina izmerena žiroskopom, a akc_{pov} – koeficijent poverenja akcelerometru.

Na žalost, ovaj filtar ne omogućava merenje naglih promena ugla, već je nakon takve promene potrebno određeno vreme da se greška estimacije smanji. To se događa zbog toga što se merenja sa akcelerometra, zbog malog koeficijenta poverenja postepeno menjaju nakon nagle promene (filtar propusnik niskih učestanosti – engl. low pass filter). Merenja sa žiroskopa su istovremeno filtrirana filtrom propusnikom visokih učestanosti (engl. high pass filter), pa suma ova dva rezultata omogućava precizniju estimaciju. Skica komplementarnog filtra data je na slici 5:



Slika 5.
Skica komplementarnog filtra

Figure 5.
Schematic of the complementary filter

Kalmanov filtar

Ovaj filtar nakon svakog merenja vrši promenu Kalmanovog koeficijenta (analogon koeficijentu poverenja kod komplementarnog filtra) koji određuje koliko je u svakoj iteraciji precizno merenje sa akcelerometra, a koliko sa žiroskopa. Ovaj filtar zbog mnogo većeg broja matematičkih operacija povećava vreme potrebno za estimaciju ugla. Kalmanov filtar ima veoma široku upotrebu u sistemima gde je potrebna fuzija merenja sa senzora, pa se njegova primena zasniva na modelovanju sistema u kom treba da radi.

U daljem opisu će biti razmatrana implementacija Kalmanovog filtra koji vrši fuziju merenja sa akcelerometra i žiroskopa. U prvom koraku se vrši predviđanje sledećih merenja na osnovu prethodnih (Angelosanto 2008):

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \theta_b \end{bmatrix} \cdot x_k = Fx_{k-1} + w \quad (1)$$

gde je x – oblik matrice stanja sistema koji se koristi u ovom radu, x_k – predviđena matrica stanja, x_{k-1} – prethodna estimirana matrica stanja, F – odgovarajuća matrica koja omogućava predviđanje sledeće matrice stanja na

osnovu prethodne, w – šum merenja, θ – ugao, $\dot{\theta}$ – ugaona brzina, a θ_b – stalna greška merenja ugaone brzine.

Na osnovu razlike merenja trenutnog stanja i stanja predviđenog na osnovu prethodnog merenja može se izračunati Kalmanov koeficijent. Izračunavanje tog koeficijenta radi se u nekoliko koraka:

1. Šum u modelu se predstavlja kao šum Gausove raspodele sa srednjom vrednosti 0 i kovarijansom predstavljenom matricom Q . Menjanje vrednosti u matrici Q je način podešavanja filtra.

2. Utvrđivanje matrice kovarijanse estimacije trenutnog stanja P_k po formuli:

$$P_k = FP_{k-1}F^T + Q \quad (2)$$

gde je Q – matrica kovarijansi šuma modela.

3. Pronalaženje razlike između merenja i stanja predviđenog u formuli 1:

$$y_k = z_k - Hx_k + v_k$$

gde je y_k – razlika između merenja i predviđanja stanja, z_k – merenja u trenutnoj iteraciji, H – matrica koja omogućava poređenje merenja i predviđanja stanja, a v_k – šum merenja (analogon u formuli 2). Šum ima aritmetičku sredinu 0 i kovarijansu predstavljenom matricom R , čije vrednosti omogućavaju podešavanje filtra.

4. Određivanje kovarijanse merenja S_k po formuli:

$$S_k = HP_kH^T + R$$

gde je R – matrica kovarijanse šuma merenja.

5. Određivanje Kalmanovog koeficijenta K_k :

$$K_k = P_kH^T S_k^{-1}$$

Konačna estimacija ugla vrši se po sledećoj formuli:

$$x_{k+1} = x_k + K_k \cdot y_k$$

PID

PID (engl. Proportional integral derivative) je regulator za stabilizaciju i kontrolu automatskih sistema. PID regulator se sastoji od tri različite komponente:

$$\text{error} = P(t) - P_z(t)$$

1. P komponenta – $\text{error} \cdot P_k$ dovodi sistem u željeno stanje

2. D komponenta – $\frac{d(\text{error})}{dt} \cdot P_d$ smanjuje preskok (engl. Overshoot)

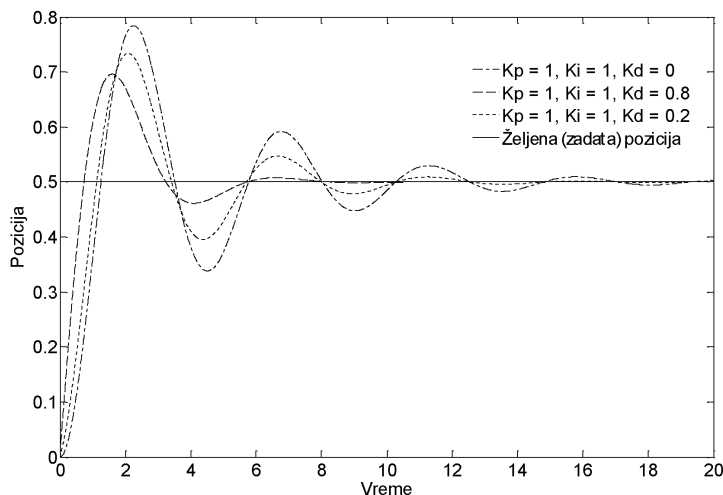
3. I komponenta – $\int_0^t \text{error} dt \cdot P_i$ smanjuje konstantno udaljenje od željenog položaja (engl. Steady state error)

Potreban signal upravljanja sistema je suma sve tri komponente, pa je zbirna jednačina sistema:

$$\text{error} \cdot P_k + \int_0^t \text{error} dt \cdot P_i + \frac{d(\text{error})}{dt} \cdot P_d$$

gde je error – trenutna greška, t – vreme proteklo od početka stabilizacije sistema do trenutka izračunavanja potrebne reakcije sistema, $P(t)$ – trenutno stanje, $P_z(t)$ – željeno trenutno stanje, P_k – koeficijent povećanja proporcione komponente, P_i – koeficijent povećanja integracione komponente, a P_d – koeficijent povećanja derivacione komponente.

Odziv sistema (engl. step response) približava se željenom podešavanjem P_k , P_i i P_d koeficijenta. Svaki sistem ima svoju krivu odziva za određene koeficijente, ali svi imaju slične karakteristike, kao na slici 6.



Slika 6.
Primer: odziv PID kontrolera

Figure 6.
Example: PID response time (full line – desired (set) position)

Na grafiku se mogu uočiti četiri karakteristične vrednosti koje i opisuju odziv sistema (Zhong 2006). Prva karakteristična vrednost je vreme koje je potrebno da se sistem dovede u željeni položaj – vreme kašnjenja (engl. raise time). Ono predstavlja prvu tačku preseka grafika PID kontrolera i prave željene pozicije. Druga karakteristična vrednost je preskok (engl. overshoot). Preskok pokazuje za koliko se sistem nakon prvog prolaska kroz željeni položaj udaljio od njega. Preskok se javlja uglavnom zbog inercije sistema. Treća karakteristična vrednost predstavlja vreme smirenja. To je vreme koje je potrebno da sistem prestane da osciluje oko željenog položaja odnosno da amplituda tih oscilacija bude u okviru određenog intenziteta koji se može tolerisati ($\pm 5\%$). Četvrta karakteristična vrednost je stalna greška sistema (engl. steady state error). To je svojstvo sistema da se stabilizuje oko položaja koji se ne poklapa sa željenim položajem, i javlja se usled nesavršenosti odnosno asimetrije sistema.

Rezultati

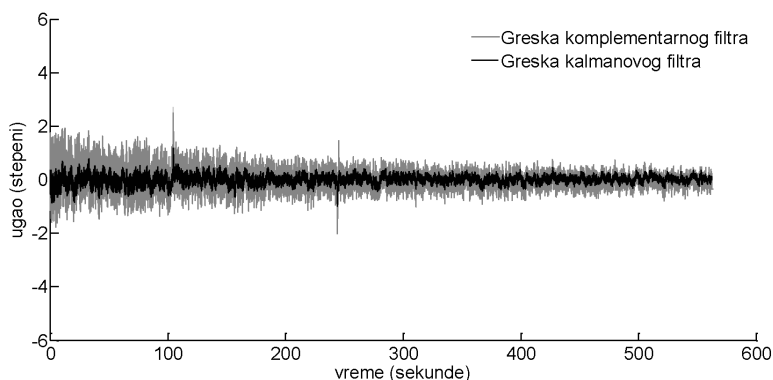
Estimacija ugla

Radi poređenja algoritama za estimaciju ugla, uz njihovu pomoć estimiran je ugao dok je sistem bio pričvršćen na fiksnoj poziciji. Na osnovu tih merenja nacrtana je slika 7.

Za meru preciznosti sistema korišćena je standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_s - \theta_i)^2}{n-1}}$$

gde je n – broj uzoraka, θ_s – aritmetička sredina estimiranih vrednosti, θ_i – estimirana vrednost u trenutnoj iteraciji.



Slika 7.
Grafik greške
estimacije ugla

Figure 7.
Angle estimation error
graph (black – Kalman;
gray – complementary)

Na osnovu merenja prikazanih na slici 7, utvrđeno je da je standardna devijacija estimacije ugla uz pomoć Kalmanovog filtra 0.2° , a estimacije uz pomoć komplementarnog filtra 0.4° . Tačnost estimacije uz pomoć Kalmanovog filtra je 0.6° , a uz pomoć komplementarnog filtra 0.1° . Tačnost je određena kao apsolutna razlika aritmetičke sredine svih estimacija ispitivanog filtra i poznate, izmerene vrednosti ugla. Jasno se može videti da Kalmanov filter preciznije estimira ugao, što je i potrebno za stabilizaciju.

Stabilizacija

U ovoj etapi istraživanja poređeni su PI, PD i PID regulatori. Za stabilizaciju su korišćene vrednosti estimacije ugla dobijene uz pomoć Kalmanovog filtra koji se pokazao kao precizniji. Koeficijenti ovih regulatora su utvrđeni empirijskom metodom i iznose:

$$P_k = 0.17$$

$$P_i = 0.013$$

$$P_d = 2.8$$

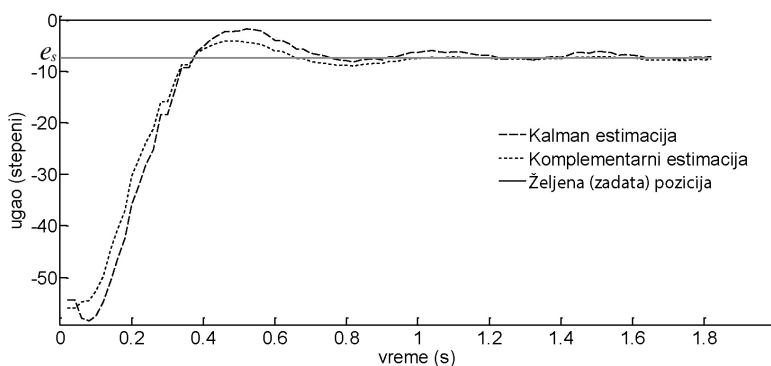
Ova metoda se zasniva na menjanju koeficijenata PID regulatora uz saznanje da:

1. Povećanje P_k – smanjuje vreme kašnjenja, ali povećava vreme smirenja jer dovodi do većeg preskoka i oscilacija
2. Smanjenje P_k – povećava vreme kašnjenja, ali smanjuje vreme smirenja jer se smanjuje preskok

3. Povećanje P_d – povećava vreme kašnjenja, ali smanjuje preskok. Omogućava povećanje P_k bez opasnosti od povećanja vremena smirenja
4. Smanjenje P_d – smanjuje vreme kašnjenja, ali istovremeno je potrebno i smanjenje P_k zbog većeg preskoka
5. Povećanje P_i – smanjuje stalnu grešku sistema, ali izaziva oscilacije sistema niske frekvencije
6. Smanjenje P_i – povećava stalnu grešku sistema, ali ne dovodi do oscilovanja sistema

PI i PD regulatori imaju iste koeficijente kao i PID regulator samo bez D, odnosno I komponente. Na osnovu merenja tokom stabilizacije sistema napravljeni su grafici odziva sistema za svaki od različitih regulatora i pronađena su vremena kašnjenja, preskoci, vremena smirenja i stalne greške sistema. Poređenjem tih vrednosti, utvrđen je najbolji regulator za stabilizaciju kvadkoptera.

Na slici 8 se može videti odziv PD regulatora:



Slika 8.

Grafik odziva PD kontrolera sa označenom stalnom greškom e_s

Figure 8.

PD controller step response graph with marked steady state error e_s (dashed line – Kalman; dotted – complementary; full – desired (set) position)

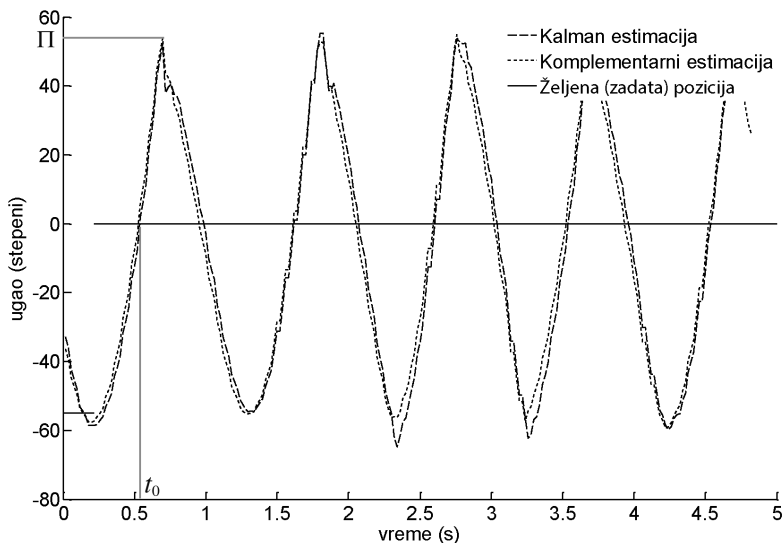
Na slici 8 se može videti da se sistem nikada ne stabilizuje na željenoj poziciji, već na poziciji koja je udaljena 5.2° od nje. To je posledica male razlike dva motora, kao i neizbalansiranosti sistema. Na osnovu ovoga se može zaključiti sledeće:

1. Vreme kašnjenja je $t_0 = \infty$, jer odziv ne dostiže željeni položaj
2. Preskok ne postoji, jer sistem nikada ne prelazi željeni položaj
3. Vreme smirenja je $t_s = \infty$, jer se sistem nikada ne nalazi u okviru od $\pm 5\%$
4. Stalna greška sistema je $e_s = 5.2^\circ$

Može se zaključiti da PD kontroler nije pogodan za ovakav sistem, jer je vreme smirenja beskonačno. Slika 9 je grafik odziva PI kontrolera.

Sistem stabilizovan uz pomoć PI kontrolera osciluje konstantnom amplitudom i nestabilan je. Na osnovu grafika se može zaključiti sledeće:

1. Vreme kašnjenja je $t_0 = 0.6$ s
2. Preskok iznosi $\Pi = 89.4\%$
3. Vreme smirenja je $t_s = \infty$, jer se sistem nikada ne stabilizuje



Slika 9.
Grafik odziva PI kontrolera sa označenim vremenom odziva t_0 i preskocom Π

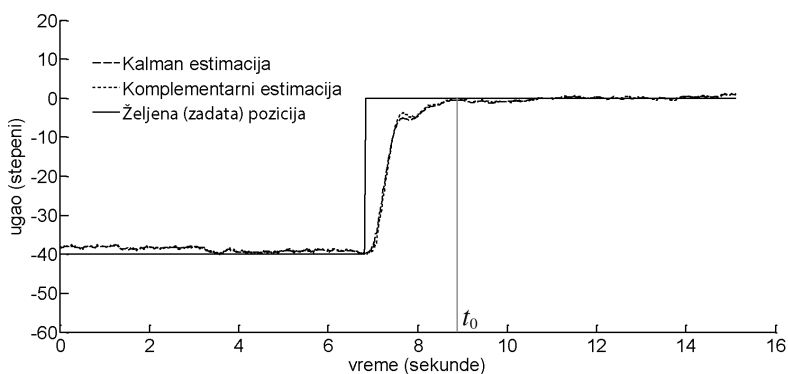
Figure 9.
PI controller step response graph with marked response time t_0 and overshoot Π (dashed line – Kalman; dotted – complementary; full – desired (set) position)

4. Stalna greška sistema je $e_s = 1.8^\circ$

Ovaj sistem nije pogodan zbog toga što je vreme smirenja beskonačno, odnosno sistem osciluje neprigušeno.

Na slici 10 se može videti odziv PID kontrolera.

Ispitivan je i odziv sistema u zavisnosti od toga da li je ugao estimiran uz pomoć Kalmanovog ili komplementarnog filtra, kao i u zavisnosti od ugla od kojeg počinje da se vrši stabilizacija. Merenja su vršena tako što je aparatura stabilizovana na uglu od kojeg se počinje stabilizacija, a zatim na 0° . Merenje je odziv na 0° zbog toga što je potrebna takva stabilizacija na kvadkopteru. Napravljeno je po osam merenja za početne uglove stabilizacije od 30° , 40° i 50° za komplementarni filter i 20° , 30° i 40° za Kalmanov filter. Za oba filtra za estimaciju uglova su napravljena dva seta ovakvih merenja koja su prikazana u tabeli 1.



Slika 10.
Grafik PID kontrolera sa označenim vremenom smirenja t_s

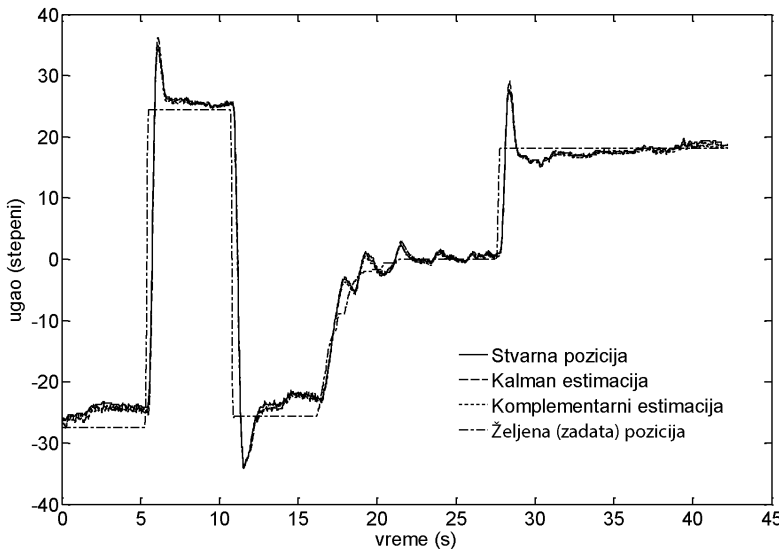
Slika 10.
PID controller step response graph with marked settling time t_s (dashed line – Kalman; dotted – complementary; full – desired (set) position)

Tabela 1. Vremena kašnjenja (u sekundama) u zavisnosti od početnog ugla stabilizacije i filtra za estimaciju

	Komplementarni filtar			Kalmanov filtar		
	$\theta = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 20^\circ$
	3.50	7.72	12.70	4.46	3.24	3.58
	5.14	7.20	2.00	4.70	1.36	3.96
	4.72	8.00	3.18	3.50	4.02	4.98
	3.96	6.30	2.50	3.68	4.34	5.28
	6.42	9.62	6.14	2.24	7.72	3.80
	8.80	2.53	11.06	2.60	3.40	5.60
	10.14	2.12	4.84	1.70	3.40	5.30
Srednja vrednost	10.42	5.84	11.42	2.70	2.90	3.70
	6.8	6.2	6.7	3.2	3.8	4.5

Ova merenja pokazuju da sistem ima preskok od 2.8% i vreme smirenja od 3.84 s. Stalna greška sistema iznosi 2.5%. Vreme kašnjenja je prosečno 3.8 s za estimaciju ugla uz pomoć Kalmanovog filtra i 6.6 s za estimaciju ugla uz pomoć komplementarnog filtra. Može se zaključiti da je PID regulator jedini odgovarajući regulator za stabilizaciju kvadkoptera.

Zbog toga što se na letelici u zavisnosti od potrebe dinamički menja potreban ugao stabilizacije, testirana je sposobnost sistema da odgovori na ovakve zahteve. Ugao stabilizacije je ručno menjan, a zavisnost pozicije sistema i potrebnog ugla stabilizacije je prikazana na slici 11.



Slika 11.

Odziv sistema na dinamičko menjanje željene pozicije. Primećuje se da su vrednosti estimacija i stvarne pozicije bliske

Figure 11.

Step response with dynamic desired position change. One can notice that the estimation and real values are close. (full line – real position; dashed – Kalman; dotted – complementary; dash-dot – desired (set) position)

Diskusija

Na osnovu dobijenih rezultata, može se videti da je precizniji algoritam za estimaciju ugla Kalmanov filtar. Jedini kontroler koji je omogućio stabilizaciju je PID. PI i PD kontroleri zahtevaju manje vremena za izvršenje, ali ne omogućavaju stabilizaciju oko 0° . Standardne devijacije estimacije Kalmanovog i komplementarnog filtra govore da su obe metode pouzdane. U radu (Euston *et al.* 2008) koji se bavi estimacijom ugla bespilotne letelice, standardna devijacija estimacije komplementarnim filtrom iznosi 1.64° , što znači da naš sistem pokazuje dobre performanse. Takođe, u radu (Sousa 2011) koji se bavi estimacijom ugla propinjanja kvadkoptera, postignute su standardne devijacije od 1.83° za komplementarni filtar i 1.59° za Kalmanov filtar. Aparatura se stabilizuje sa malim preskokom i nikada ne izlazi iz okvira od $\pm 5\%$ (Web 2). Zbog toga je razlika između vremena kašnjenja i smirenja veoma mala, vreme kašnjenja iznosi 3.80 ms, a vreme smirenja 3.84 ms. U odnosu na merenja iz jednog od referentnih radova (Web 1) koji se bavi stabilizacijom kvadkoptera u prostoru, vreme smirenja je manje, što znači da bi se finalna implementacija na kvadkopteru pokazala kao dobra. Nizak preskok utiče na smanjeno vreme smirenja.

Zaključak

U odnosu na druge radove koji se bave stabilizacijom kvadkoptera u prostoru (Sousa 2011) i (Web 1), postignuto je manje vreme smirenja, kao i manja standardna devijacija estimacije ugla. Međutim, treba imati u vidu da je naš sistem, za razliku od pomenutih, testiran sa samo jednom osom slobode, dok se u sistemima sa 6 osa slobode javljaju dodatne smetnje merenja. U radu (Web 1), navedeno je vreme smirenja od 8 s, dok je u našem sistemu vreme smirenja 3.8 s. Veoma je bitno to što se sistem nalazi u stabilnom stanju na 0° , jer je i cilj elektronskih stabilizatora da kvadkopter održavaju u horizontalnom položaju u odnosu na zemlju. Takođe, ukoliko je potrebna neka reakcija, neophodno je da sistem u realnom vremenu može da promeni željenu poziciju stabilizacije, što je uspešno i urađeno. Utvrđeno da je najbolji od ispitivanih regulatora PID, a od algoritama za estimaciju ugla, Kalmanov filtar. Na potpuno autonomnoj letelici bi bio upotrebljen i kompas, kako bi se izvršila i stabilizacija oko vertikalne ose rotacije. Nakon unapređenja bilo bi potrebno ponovo podesiti PID koeficijente zbog drugačijih karakteristika sistema. Takođe je potrebno i razviti algoritme za lokalizaciju, kao i za utvrđivanje orijentacije u odnosu na magnetni pol zemlje.

Literatura

- Angelosanto G. 2008. Kalman filtering of imu sensor for robot balance control. Dostupno na: <http://dSPACE.mit.edu/handle/1721.1/45791> [Pristupljeno 22. septembra 2013]

- Euston M., Coote P., Mahony R., Jonghyuk Kim, Hamel T. 2008. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, str. 340–345. Dostupno na: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4650766>. [Pristupljeno 22. septembra 2013]
- Morrison M. 1987. US. Patent 4,711,125.
- Sousa B. M. H. 2011. Estimation and Control of a Quadrotor Attitude. Dostupno na: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142711217/The_sis.pdf. [Pristupljeno 22. septembra 2013]
- Web 1. <http://andrewswanton.com/?p=421>. [Pristupljeno 22. septembra 2013]
- Web 2. http://automatika.etf.bg.ac.rs/images/FAJLOVI_srpski/predmeti/izborni_kursevi_ostali/OE_OT/OE3_OT3_SAU/materijali/sau_predavanje_3.pdf. [Pristupljeno 22. septembra 2013]
- Web 3. <http://creativetechno.wordpress.com/2012/06/13/quadcopter-basics/>. [Pristupljeno 22. septembra 2013]
- Zhong J. 2006. PID Controller Tuning: A Short Tutorial. (class lesson), Purdue University. Dostupno na: http://wwwwsa.uqac.ca/~rbeguena/Systemes_Asservis/PID.pdf. [Pristupljeno 22. septembra 2013]

Nemanja Filipović and Đorđe Skakun

Comparison of the Sensor Fusion Angle Estimation Algorithms and Controllers for Pitch Stabilization for the Quadcopter

In this work, different methods of angle estimation using IMU and stabilization on one axis of rotation were compared. PD, PI and PID controllers for stabilization, and also the Kalman and complementary filter for angle estimation were compared. Step responses of compared regulators are shown in figures 8, 9 and 10, respectively. Errors of angle estimation of both filters are shown in Figure 7. The apparatus was successfully stabilized with an overshoot of 4.2%, response time of 3.84 s and settling time of 3.84 s. It was determined that the best of the investigated regulators was PID, and the most precise estimation algorithm the Kalman filter with standard deviation of measurements of 0.2° .

