

„ARDUPILOT MEGA“ AUTOPILOTO INERCINIO NAVIGACIJOS ĮRENGINIO PAKLAIĐŲ ANALIZĖ

Ramūnas Kikutis¹, Darius Rudinskas²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹ramunas.kikutis@vgtu.lt; ²darius.rudinskas@vgtu.lt

Santrauka. Inerciniai navigacijos įrenginiai (INS) plačiai naudojami pilotuojamuose ir nepilotuojamuose orlaiviuose. Nepilotuojamo orlaivio skrydžio tikslumui didelę įtaką turi orlaivio automatinio valdymo sistemos įrenginių paklaidos. Tyrime nagrinėjamas nepilotuojamas orlaivis, kurio automatinio valdymo sistemos dalis yra inercinis navigacijos įrenginys. Analizuojami INS įrenginių paklaidų šaltiniai, paklaidų tipai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant mažo nepilotuojamo orlaivio automatinio valdymo sistemą.

Reikšminiai žodžiai: inercinės navigacijos įrenginiai, bepilotis orlaivis, „ArduPilot Mega“, davikliai, paklaidos.

Įvadas

Automatinis orlaivių valdymas – tai vienas iš šiuolaikinės aviacijos orlaivių valdymo būdų, kuris palengvina žmogaus (piloto) darbą kontroliuojant orlaivio skrydį. Automatinis valdymas atliekamas naudojant automatinio valdymo sistemas – autopilotus. Tokios sistemos pagrindiniai privalumai navigacijai, lyginant su klasikiniu orlaivių valdymu, yra:

- Navigacijos tikslumas,
- Sumažėjęs pilotų darbo krūvis.

Visgi automatinio valdymo sistema, kad atliktų orlaivio navigaciją iš taško A į tašką B, turi naudoti navigacijos prietaisų (VOR, ILS, GPS, INS ir / ar kt.) signalais, kuriuos apdorodama valdys orlaivio aerodinamines plokštumas ir nukreips orlaivį reikiama trajektorija. Galime suvokti, kad navigacijos prietaisų signalų paklaidų automatinio valdymo sistema nepašalina ir atlieka navigaciją priimdama signalą kartu su visomis jo paklaidomis.

Šiam tyrimui buvo pasirinkta automatinio valdymo sistema „ArduPilot Mega“ (APM), kuri automatiniam valdymui atlikti naudoja signalus iš inercinio matavimo įrenginio (IMI), taip pat priima ir palydovinės navigacijos sistemos (GPS) siunčiamus signalus. Taigi, APM navigacijos sistema naudoja IMI ir GPS navigacinius duomenis (ArduPilot-Mega 2011). Tyrime nagrinėjamos APM INS paklaidos ir jų šaltiniai.

Inercinė navigacijos sistema (INS)

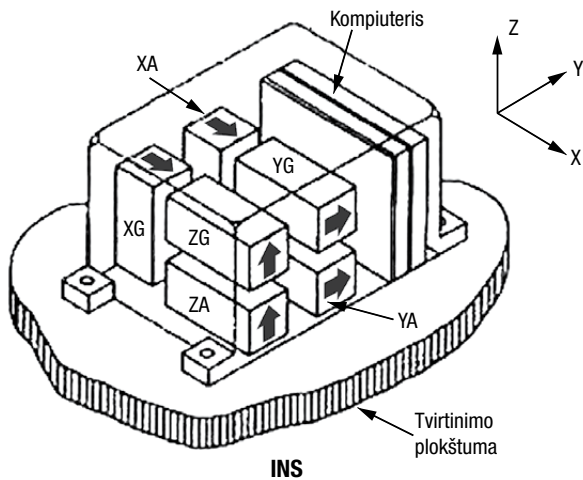
INS – tai nepriklausoma nuo radijo signalų navigacijos sistema. Ji pati nesiunčia radijo signalų antžeminėms stotims, nei iš stočių juos priima. INS veikimo metodai pagrįsti klasikinės mechanikos dėsniais, o konkrečiau – antruoju Niutono dėsniu. Šis dėsnis teigia, kad kūną veikianti jėgų atstojamoji yra tiesiogiai proporcinga to kūno judėjimo pagreičiui.

Remiantis antruoju Niutono dėsniu yra sukurti INS davikliai – pagreitmačiai, kurie įvertina kūno pagreitį matuodami veikiančios inercijos jėgos dydį. Kūno judėjimo erdvėje pagreičiui matuoti yra reikalingi 3 vienos ašies arba vienas trijų ašių pagreičio davikliai (Grewal *et al.* 2007; Titterton and Weston 2004).

Kadangi orlaivis erdvėje turi keisti kursą, aukštį ar kampinę padėtį erdvėje, atsiradus orlaivio evoliucijai, pagreitmačių matavimo ašys nesutampa su koordinacinių matavimo ašimis. Norint teisingai įvertinti pagreičius pagal navigacinių koordinacinių ašis, juos reikia projektuoti į šias ašis pagal evoliucijų kampus. Kad būtų galima atlikti projekciją, pirmiausia šie nesutapimo tarp navigacinių koordinacinių ašių ir pagreitmačių ašių kampai turi būti išmatuoti. Šiuos kampus galima išmatuoti naudojant giroskopus. APM INS sistema yra tvirtai pritvirtinta orlaivio atžvilgiu (beplatformė INS), todėl keis padėtį kartu su orlaiviu, tad giroskopai gali matuoti tik kampinius greičius. Norint įvertinti orlaivio padėtį erdvėje (kursas, polinkis, posvyris),

pirmiausia kampinius greičius, integruojamus laiko atžvilgiu, reikia konvertuoti į momentines kampines reikšmes. Tam IMI naudoja skaičiavimo sistemą (Titterton, Weston 2004). 1 pav. pateikta beplatformės INS daviklių išdėstymo schema. Paveiksle žymėjimai reiškia:

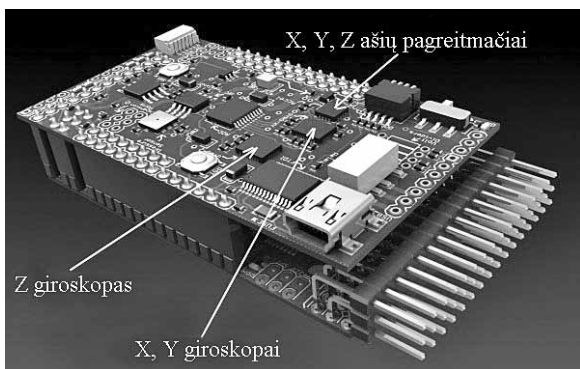
- X – orlaivio skersinė ašis;
- Y – orlaivio išilginė ašis;
- Z – orlaivio vertikali ašis;
- XA, YA, ZA – pagreitmačiai pagal X, Y, Z ašis;
- XG, YG, ZG – giroskopai pagal X, Y, Z ašis.



1 pav. Beplatformės INS bendras vaizdas
Fig. 1. The overall picture of strapdown INS

„ArduPilot Mega“ (APM) automatinio valdymo sistema

Kaip jau buvo minėta, šiam tyrimui pasirinkta APM automatinio valdymo sistema, kuri turi integruotą INS sistemą. Vadinasi, sistema taip pat yra beplatformė. INS daviklių komponavimas APM elektroninėje plokštėje pateiktas 2 pav.



2 pav. APM IMI jutiklių išdėstymas plokštėje
Fig. 2. The arrangement of APM IMI sensors on the board

Taip pat verta atkreipti dėmesį, kad APM sistemoje naudojami pagreitmačiai ir giroskopai yra pagaminti MEMS (angl. *Micro Electro Mechanical Systems*) technologijos metodu.

Tokios sistemos privalumai yra:

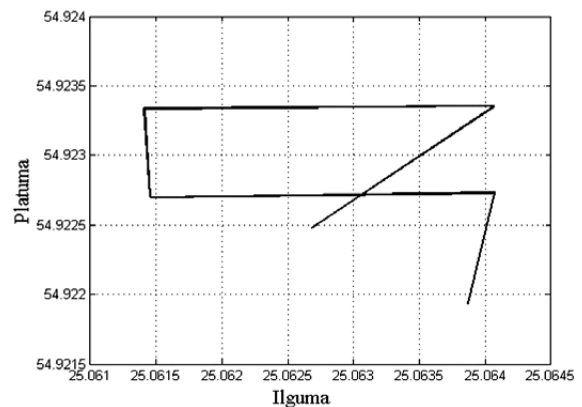
- mažas svoris,
- maži matmenys,
- nedidelė kaina,
- nedidelės energijos sąnaudos.

Sistemos trūkumai:

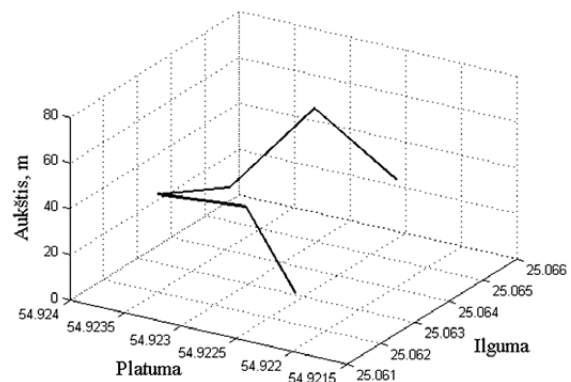
- INS sistema su MEMS davikliais yra netiksli.

Tyrimo eiga

APM INS paklaidoms nustatyti APM automatinio valdymo sistema buvo įmontuota į radijo bangomis valdomą nedidelį orlaivį ir pasinaudojant APM programine įranga sudarytas APM skrydžio 6 taškų maršrutas, kurių koordinatės žinomos. Žinant taškų koordinates, buvo nubrėžtas planuojamas skrydžio maršrutas. Sudarytas skrydžio maršrutas pateiktas 3 ir 4 pav.



3 pav. Maršruto trajektorija WGS84 koordinacių sistemoje
Fig. 3. The trajectory of the route in coordinate system WGS84



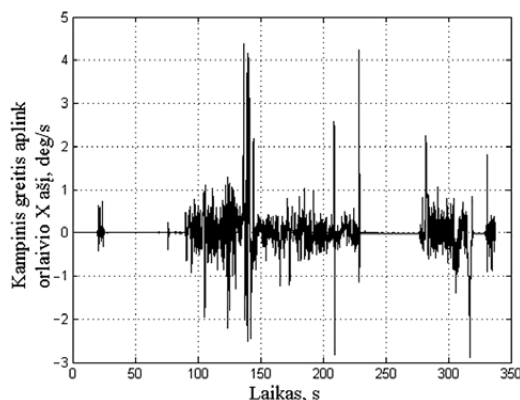
4 pav. Maršruto trajektorija trimatėje erdvėje
Fig. 4. The trajectory of the route in three dimensional space

Skrydis buvo atliekamas pusiau automatiniu režimu. Pirmiausia orlaivis rankiniu būdu buvo pakeltas į orą ir tuomet įjungtas autmatinis režimas. Orlaivio skrydžio tikslumas buvo stebimas naudojant programinę įrangą. Kai orlaivis priartėjo prie paskutinio maršruto taško, valdymas vėl buvo perjungtas į rankinį ir orlaivis nutupdytas.

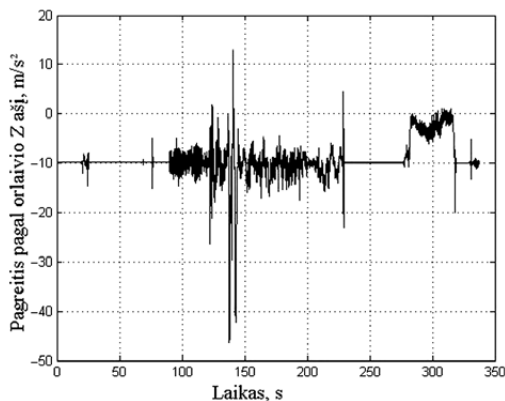
Orlaivis skrydžio metu kaupė pagreitmačių giroskopų ir GPS signalo duomenis ir juos įrašinėjo į atmintį. Oficialioje „ArduPilot Mega“ internetinėje svetainėje skelbiama, kad IMI jutiklių duomenys įrašomi kas 0,02 s, o GPS duomenys – kas 0,1 s (ArduPilot-Mega 2011).

Skrydžio duomenų analizė

Atlikus skrydį planuotu maršrutu, buvo gauti pagreitmačių, giroskopų duomenų masyvai, kai duomenys atnaujinami kas 0,02 s, bei GPS duomenų masyvai atnaujinant informaciją kas 0,1 s. Pagreitmačių duomenys buvo matuojami m/s^2 , giroskopų duomenys – $^{\circ}/s$. GPS informacija – tai platumas, ilguma ir aukštis virš žemės WGS84 elipsoido. Pagreitmačių ir giroskopų matavimų rezultatai pateikti 5 ir 6 pav.



5 pav. Kampinio greičio aplink orlaivio X ašį matavimų duomenys
Fig. 5. Measurements of angular velocity around the X axis of the aircraft

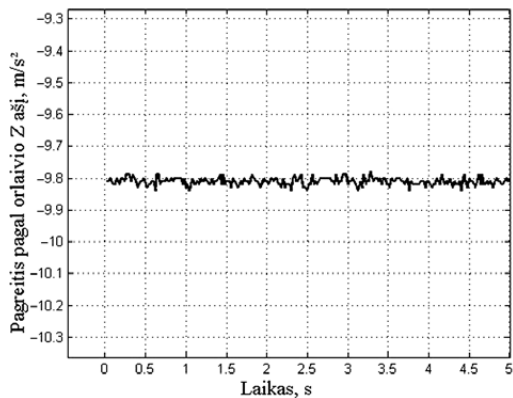


6 pav. Pagreičio pagal orlaivio Z ašį matavimų duomenys
Fig. 6. Measurements of acceleration along the Z axis of the aircraft

Iš grafikų matyti, kaip orlaiviui skrendant maršrutu, kinta giroskopų ar pagreitmačių duomenys laiko atžvilgiu. Verta atkreipti dėmesį į 6 pav., kuriame matyti, kad standartinis signalo dydis orlaiviui skrendant pastoviuoju greičiu (ar nejudant) Z ašies kryptimi (tiesi atkarpa grafike), mums siunčia vidutiniškai $-10 m/s^2$ pagreitį. Galime daryti išvadą, kad taip yra dėl žemės gravitacinio lauko poveikio, kuris apytiksliai yra $g \approx 9,8 m/s^2$. Taip pat žinoma, kad pagreičių ar kampinių greičių seką integruojant laiko atžvilgiu kas 0,02 s, galima gauti padėties kampus, momentinius greičius ir momentines koordinatas.

Giroskopų ar pagreitmačių (5, 6 pav. grafikai) mastelį laiko momentu sumažinus (0–5 s) ties tiesia rodytų atkarpa (kai orlaivis nejuda arba juda pastoviuoju greičiu), galima pastebėti, kad daviklių signalai nėra stabilūs (Park 2004; Woodman 2007). Pagreičio pagal Z ašį duomenys grafiškai pateikti 7 pav.

Šis svyravimai atitinka daviklio atsitiktinį triukšmą.



7 pav. Pagreičio pagal orlaivio Z ašį matavimų duomenų intervalas (0–5) s
Fig. 7. An interval of acceleration measurements (0–5 s) along the Z axis of the aircraft

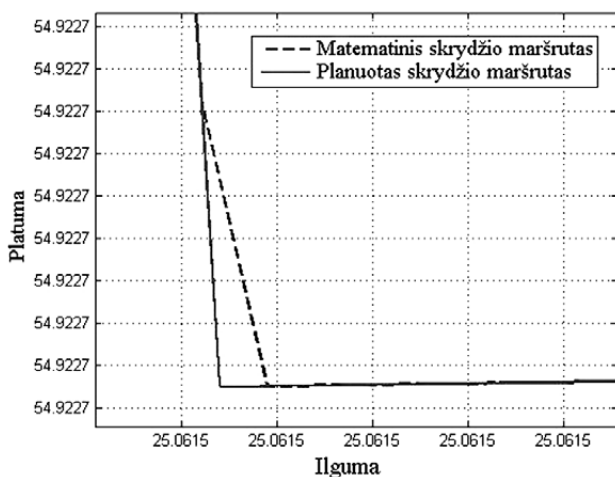
Maršruto koordinatų skaičiavimai

Naudojantis MATLAB kompiuterine programa buvo sukurtas matematinis skrydžio maršruto modelis, kuris teoriškai įvertina skrydžio trajektoriją ir atitinkamais laiko momentais apskaičiuoja orlaivio teorines padėties koordinatas (ilgumą, platumą ir nustatytą aukštį). Šis modelis – tai galimybė palyginti eksperimentinius duomenis su teoriniais.

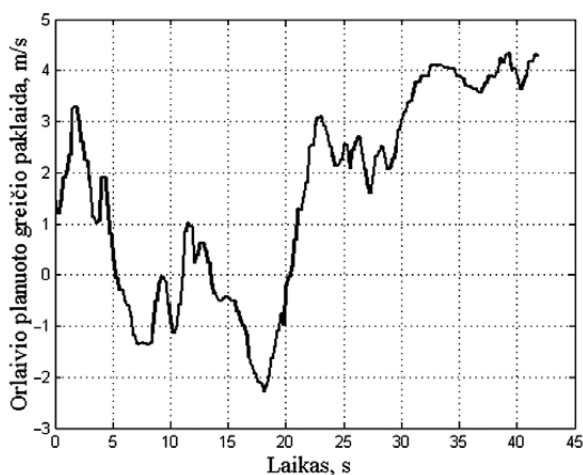
Teorinis modelis buvo išbandytas braizant tą patį 6-ių taškų maršrutą, kuris pavaizduotas 3 ir 4 pav., į programos modelį suvedus mums reikalingo maršruto 6-ių taškų erdvines koordinatas. Sudarytas modelis, be bendro maršruto vaizdo, vertina, kokie koordinatų duomenys turėtų būti sukaupti atmintyje kas Δt s. Gauti neatitinkamai ties posū-

kių taškais, kurie vertinant didesnės įtakos neturi. Nesant skaičiavimų neatitikimų, posūkis turėtų būti atliktas per vieną tašką, bet ne per du. Posūkio paklaida grafiškai parodyta 8 pav.

Teorinis maršruto modelis buvo vertinamas naudojant GPS duomenis. Maršruto koordinatinių vertinimo dažnis Δt s. sutapatintas su GPS jutiklio koordinatinių gavimo dažniu 10 Hz. Palygintos ir įvertintos modelio galimybės. Nustatyta, kad, norint tiksliau įvertinti, reikalingos stabilesnės skrydžio sąlygos, nes orlaivis pagal GPS rodmenis neišlaikė nustatyto greičio. Reikalingos ilgesnės maršruto atkarpos, nes keisdamas kursą orlaivis nespėdavo įskristi į numatytos trajektorijos kelią, kai jau reikėdavo daryti naują posūkį. Dėl to orlaivis kai kuriuos maršruto punktus apskrido aplinkui. GPS laiko ir nuokrypų nuo maršruto paklaidos pateiktos 9 ir 10 pav.



8 pav. Paklaida ties antruoju maršruto posūkiu
Fig. 8. An error of the second turn



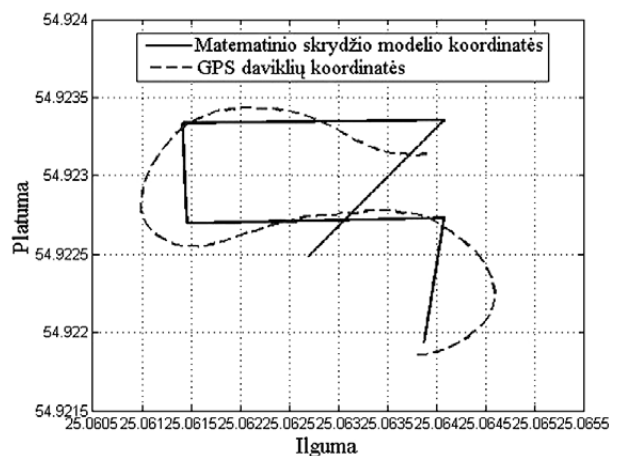
9 pav. Planuojamo greičio paklaida
Fig. 9. An error of the planned speed

Visgi pakoregavus maršrutą ir sąlygas arba patobulinus matematinį skrydžio maršruto modelį (galimybė vertinti kintantį greitį) ir sukūrus teorinį INS modelį, teorinį maršruto modelį būtų galima taikyti apskaičiuotoms INS koordinatėms ir jų nuokrypai nuo nustatytos vertės palyginti. Taip pat atsirastų galimybė apskaičiuotą INS greitį lyginti su GPS matuojamomis momentinio greičio reikšmėmis. Be to, žinant, kad GPS signalas yra naudojamas INS besikaupiančioms paklaidoms kompensuoti, atsirastų galimybė įvertinti INS paklaidas nepriklausomai nuo GPS.

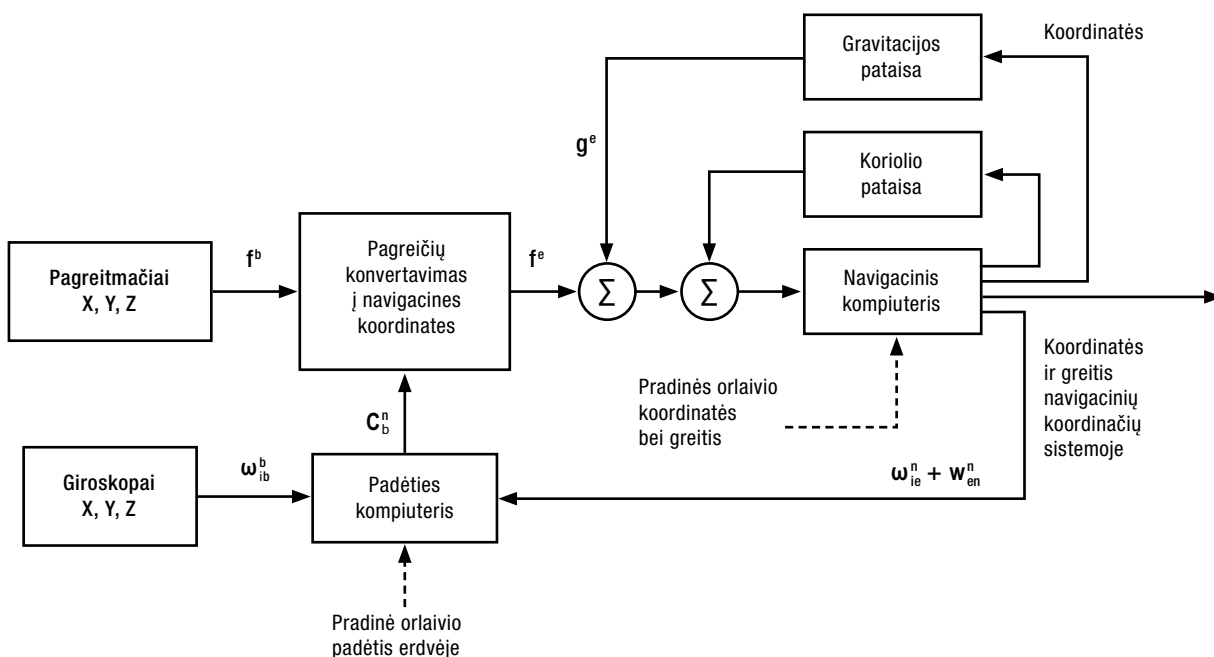
INS modelis

Kaip minėta, turint matematinį modelį, su kuriuo galima palyginti koordinates, toliau reikalinga sistema, skirta konkrečioms INS greičių ir koordinatinių momentinėms vertėms gauti. Šias vertes būtų galima palyginti su maršruto modeliu ar GPS jutiklių duomenimis ir įvertinti. Tam turi būti taikomas INS modelis, kuris pagreitmačių ir giroskopų jutiklių duomenis konvertuoja į navigacinių koordinatinių sistemą ir laiko atžvilgiu integruojant paverčia į greitį ir vietos padėtį. Modelio struktūrinė schema pateikta 11 pav.

Iš pagreitmačių gauti momentiniai duomenys, pagal kuriuos įvertinamas žemės sukimosi kampinis greitis ir kūno padėties erdvėje kitimo kampiniai greičiai (informacija iš giroskopinių jutiklių), yra konvertuojami į navigacinių koordinatinių sistemą. Įvertinama Žemės gravitacinio lauko įtaka ir Žemės sukimosi efekto Koriolio jėgos įtaka pagreitmačių rodymams. Gautas pakoreguotas pagreitis yra integruojamas du kartus, gaunant greičio ir koordinatės pokytį. Gautos vertės pridamos prie prieš tai buvusių reikšmių ir gaunamas momentinis greitis ar padėtis (Zhang *et al.* 2011; Woodman 2007).



10 pav. GPS surinktų duomenų palyginimas su teoriniu maršrutu
Fig. 10. Collected data on the GPS in comparison with a theoretical route



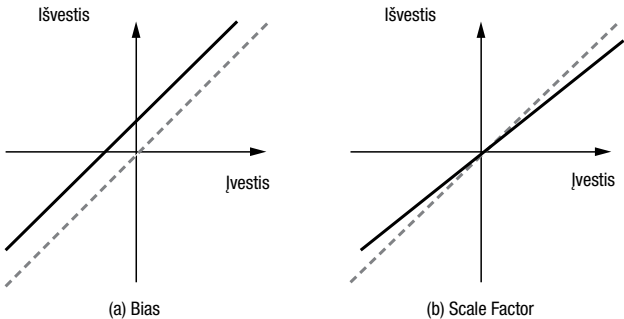
11 pav. INS modelis
Fig. 11. Model of INS

INS paklaidos

Įvertinus INS paklaidą kiekvienu laiko momentu, laiko skalėje galima brėžti bendros paklaidos kitimo grafiką. Daromos išvados apie pagreitmačių ar giroskopų tikslumą. Galima išskirti tokius INS daviklių paklaidų šaltinius (Grewal *et al.* 2007):

- sisteminės paklaidos (*bias*),
- perskaičiavimo faktorius (*scale factor*),
- ašių nelygiavimo paklaidos,
- šiluminės paklaidos,
- atsitiktinės paklaidos.

12 pav., a yra pateikta *bias* paklaida. Grafikas rodo, kad davikliui realiai matuojant signalą 0, jutiklio išėjime gaunamas signalas yra didesnis arba mažesnis už 0.



12 pav. Sisteminės ir perskaičiavimo faktoriaus paklaidos
Fig. 12. Bias and scale factor errors

12 pav., b pateikta *scale factor* paklaida. Grafike matyti, kad įvesties ir išvesties signalai yra neproporcingi. Ašių nelygiavimo paklaidos atsiranda, kai daviklio matavimo ašis nestampa su orlaivio ašimi, pagal kurią reikia atlikti matavimą. Šiluminės paklaidos paprastai kinta kintant temperatūrai, veikiančiai daviklį.

Išvados

Darbe aptartos pirminės įžvalgos apie „ArduPilot Mega“ autopiloto IMI pasirinktus paklaidų tyrimo modelius.

Tyrimų metu panaudojus informaciją iš autopiloto GPS imtuvo ir ją palyginus su teorinėmis sukurtais skrydžio maršruto koordinatėmis pastebėta, kad orlaivis skrydžio metu gerokai nukrypo į šonus nuo planotos trajektorijos, kirta arba dideliu spinduliu apskrido posūkių taškus ir neišlaikė užprogramuoto pastoviojo greičio, kuris momentais siekė daugiau nei 4 m/s. Įvertinta, kad norint nustatyti INS paklaidų tendencijas, neužtenka vien palyginti GPS duomenų, bet reikia atlikti skaičiavimus su IMI duomenimis ir iš jų rodyimų kompensuoti papildomai atsirandančias matavimų reikšmes dėl žemės traukos ir Koriolio jėgos įtakų.

- Po bandymo įvertinta, kad tolesniam tyrimui reikia:
- 1) Skrydžio bandymus kartoti pasirenkant ilgesnes maršruto atkarpas ir tobulinant skrydžio maršruto modelį (galimybė atsižvelgti į kintantį orlaivio greitį);

- 2) Sukurti INS skaičiavimų modelį pagal 11 pav. pateiktą blokinę schemą, kurį pasitelkus būtų galima apskaičiuoti orlaivio momentinius greičius ir koordinates naudojantis giroskopų ir pagreitmačių skrydžio metu sukauptos informacijos vektoriais ar masyvais.

Literatūra

- ArduPilot-Mega* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2012 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/home?tm=6>
- Grewal, M. S.; Weill, L. R.; Andrews, A. P. 2007. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/0470099720>
- Park, M. 2004. Error Analysis and Stochastic Modeling of MEMS Based Inertial Sensors for Land Vehicle Navigation Applications, *UCGE Reports* Nr. 20194. Calgary, 1–24.
- Titterton, D. H.; Weston, J. L. 2004. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. Stevenage, UK. <http://dx.doi.org/10.1049/PBRA017E>
- Woodman, O. J. 2007. *An Introduction to Inertial Navigation*. Technical reports published by the University of Cambridge. Nr. 696. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1–37.
- Zhang, W.; Ghogho, M.; Yuan, B. 2011. Mathematical Model and Matlab Simulation of Strapdown Inertial Navigation system, *Modelling and Simulation in Engineering*, 1–24.

ERROR ANALYSIS OF INS ARRANGED IN ARDUPILOT MEGA

R.Kikutis, D. Rudinskas

Abstract

Inertial navigation systems (INS) are widely used for controlling piloted or unmanned aerial vehicles (UAV). Automatic control equipment with INS has error budget making a huge impact on the accuracy of UAV navigation. The paper analyzes INS errors and types of errors. Experiments have been done using small UAV.

Keywords: inertial navigation system, unmanned aerial vehicle, “ArduPilot Mega”, sensing elements, errors.