



IŠORINIŲ FAKTORIŲ ĮTAKOS NEDIDELIO AUTONOMINIO ORLAIVIO SKRYDŽIO TRAJEKTORIJOS TIKSLUMUI VERTINIMAS

Ramūnas KIKUTIS¹, Jonas STANKŪNAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹ramunas.kikutis@vgtu.lt; ²jonas.stankunas@vgtu.lt

Santrauka. Nedideli autonominiai orlaiviai yra vis plačiau pritaikomi praktinėms užduotims, kurioms reikalingas aukštas skrydžio patikimumas bei trajektorijos tikslumas, vykdyti. Kuriant bei naudojant tokius orlaivius, reikia vertinti egzistuojančių standartų bei taisyklių reikalavimus ir išorinių faktorių įtaką skrydžių trajektorijos tikslumui. Darbe aptariamos naujausios skrydžių autonominiai orlaiviai Lietuvoje taisyklės bei pagrindiniai faktoriai, darantys įtaką skrydžio trajektorijos paklaidoms. Darbe didžiausias dėmesys skirtas vėjo faktoriaus įtakos skrydžio trajektorijai vertinti, kai automatinio valdymo sistema nesiima koreguojamųjų veikslių. Tyrimas atliktas remiantis teoriniais skaičiavimais bei traktuojant, kad orlaivis – taškinis kūnas. Šie rezultatai palyginti su gautaisiais panaudojus orlaivio dinaminį modelį.

Reikšminiai žodžiai: nedidelis autonominis orlaivis, skrydžio trajektorija, autonominių orlaivių skrydžių taisyklės, skrydžio trajektorijos paklaidos, dinaminis modelis.

Įvadas

Nedideli autonominiai orlaiviai MUAV (*angl.* – mini unmanned aerial vehicle) vis plačiau pritaikomi praktinėms užduotims vykdyti. Jie dažnai atlieka įvairias monitoringo užduotis: stebi įvairių statinių būklę (Guerrero, Bestaoui 2013), užtikrina geresnę pasienio apsaugą (Birk *et al.* 2011), sugeba patekti į žmogui sunkiai prieinamas erdves ir iš jų perduoti vaizdinę informaciją. Šių dienų naujovė – tai autonominių orlaivių panaudojimas nedidelėms siuntoms perskraidinti (Maza *et al.* 2010). Visos šios užduotys reikalauja, kad orlaivis užtikrintų tikslų skrydį nurodyta trajektorija – maršrutu. Šie orlaiviai taip pat puikiai pasitarnauja atliekant vietovės apžvalgą bei kartografavimo užduotis (Caballero *et al.* 2009; Nex, Remondino 2014). Visgi, jei vietovėje esančios kliūtys iš anksto nėra žinomos ir orlaivis prieš vykdydamas misiją tikslaus maršruto dar nežino, užduotis užtikrinti skrydžio saugą patampa dar aktualesnė. Savo koordinacinių nustatymo bei kartografavimo užduotis (jei jos vykdomos vienu metu) dar vadinama SLAM (*angl.* – Surveillance, localization and mapping) (Caballero *et al.* 2009; Goerzen *et al.* 2010).

Nedidelis autonominis orlaivis – MUAV šaltinyje (Gupta *et al.* 2013) yra apibrėžiamas kaip autonomiškai skrydį galintis vykdyti orlaivis, kurio masė yra ne didesnė kaip 20 kg, orlaivis skrydžiui gali būti paleistas iš rankos ir

jo skrydžio nuotolis nėra daugiau kaip 30 km. Šis orlaivis taip pat privalo būti didesnis nei mikro autonominis orlaivis. Mikro autonominis orlaivis – tai toks orlaivis, kurio sparnų mojis nėra didesnis nei 15 cm (Gupta *et al.* 2013).

Siekiant nedidelį autonominį orlaivį panaudoti praktinėms užduotims vykdyti, dažniausiai autonominio skrydžio tikslumas dar turi tenkinti standartuose bei taisyklėse pateiktus reikalavimus. Dėl šių priežasčių atsiranda poreikis autonominių orlaivių skrydžius reglamentuoti. Skrydžio nuokrypas nuo nustatytos trajektorijos lemia orlaivio procedūrinės komandos, jutiklių paklaidos bei išoriniai faktoriai: vėjas, pašaliniai elektriniai bei magnetiniai laukai, kintančios oro fizikinės savybės. Iš pastarųjų didžiausią įtaką turi vėjas ir ypač jei autonominio orlaivio masė yra nedidelė (Brezoescu *et al.* 2013).

Šiame darbe tiriama autonominio orlaivio skrydžio Dubinso trajektorijomis tikslumas, kai orlaivis atlieka subalansuotą skrydį (orlaivio skrydžio parametrai suderinti taip, kad nekistų) viražu esant ramiam orui ir nėra kompensuojamas vėjo poveikis. Pateikiamos skaičiavimams atlikti taikytos matematinės lygtys. Skaičiavimų rezultatai lyginami su tyrimo rezultatais, kurie gauti taikant matematinį dinaminį orlaivio modelį.

Autonominių orlaivių skrydžių taisyklės Lietuvoje

Autonominių orlaivių skrydžio trajektorijos bei misijos tikslumas yra aktualus uždavinys. Tai pagrindžia naujausios autonominių orlaivių skrydžių taisyklės bei reikalavimai. Nuo 2014 m. Lietuvoje įsigaliojo „Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės“, kuriomis yra siekiama padidinti skrydžių saugą kai skrydžiai vykdomi autonomniais orlaiviais (Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės 2014). Taigi, šių orlaivių naudojimas praktinėms užduotims vykdyti turi tenkinti naujuosius standartus, o tai reikalauja ir didesnio autonominių orlaivių skrydžių patikimumo bei trajektorijos tikslumo. Taisyklėse pateikiami reikalavimai bei minimalūs atstumai, kuriuos orlaivis turi išlaikyti:

Bendrieji reikalavimai (Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės 2014):

1. Orlaivio operatorius turi vizualiai matyti orlaivį;
2. Orlaivis negali nuskristi toliau nei 1000 m nuo operatoriaus;
3. Orlaivis turi išlaikyti bent 50 m. atstumą nuo pastatų, kitų transporto priemonių ar žmonių;
4. Orlaivis gali skristi tik už miesto teritorijų ar kitų masinio žmonių susibūrimo vietų.

Svarbu, kad orlaivis šių bendrųjų taisyklių gali nepaisyti, jei yra užtikrinamas pakankamas skrydžio sauga, patikimumas, tikslumas.

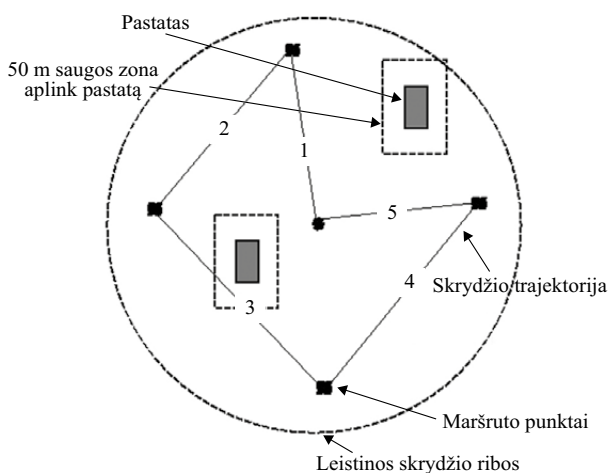
Toliau taisyklės skiriasi priklausomai nuo to, ar orlaivis skrydį vykdo kontroliuojamoje ar nekontroliuojamoje oro erdvėje. Jei skrydis vykdomas nekontroliuojamoje erdvėje (*Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės*):

1. Orlaivis negali kilti aukščiau kaip 400 ft. (≈ 121 m) aukščiau.
2. Orlaivis negali vykdyti skrydžio aerodromo oro erdvėje, jei nėra gautas raštiškas leidimas.

Kontroliuojamoje oro erdvėje reikalavimai autonominiams orlaiviams priklauso nuo atstumo nuo tarpautinio oro uosto atskaitos taško koordinatinių ARP (*angl.* – Aerodrome reference point) (Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės 2014):

1. Spinduliu <1 NM (*angl.* – nautical mile) nuo ARP autonomniais orlaiviais skrydžių vykdyti negalima;
2. Spinduliu $1-3$ NM nuo ARP autonomniais orlaiviais negalima skristi virš elektros linijų, pastatų ir kt.;
3. Spinduliu >3 NM nuo ARP autonomnis orlaivis negali kilti aukščiau 200 ft.

1 pav. pateikta skrydžio maršrutų trajektorija, kuri pavaizduota tiesiomis linijomis nuo 1 iki 5. Šiuo atveju, trečioji orlaivio atkarpa kerta 50 m pastato saugos zoną,



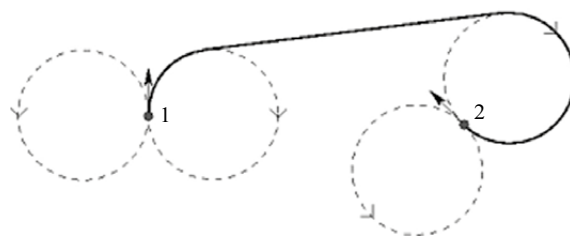
1 pav. Skrydžio maršruto zonoje su kliūtimis trajektorija
Fig. 1. Trajectory of the flight route in area with obstacles

todėl šis maršrutas pagal Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės nėra leistinas.

Visgi, net ir parinkus trajektoriją, kuri tenkins taisyklių autonominiams orlaiviams reikalavimus, reali orlaivio skrydžio trajektorija gali saugius atstumus pažeisti, nes orlaivis skrydį atlieka Dubinsio trajektorijomis.

Faktoriai darantys įtaką skrydžio maršruto tikslumui

Pirmiausia, orlaivis negali įvykdyti suplanuoto maršruto kampuota trajektorija (Kothari *et al.* 2014). Orlaivis skrydį atlieka Dubinsio trajektorijomis, kurios yra įvairios tiesių atkarpų bei apskritiminių lankų kombinacijos (Xing *et al.* 2014). Dubinsio trajektorijos pavyzdys pateiktas 2 pav.



2 pav. Dubinsio trajektorijos pavyzdys
Fig. 2. Example of Dubins path

Šiuo atveju orlaivis skrenda iš taško 1 apskritimine trajektorija keisdamas kursą dešinėn. Toliau trajektorija tęsiasi tiesia atkarpa bei galiausiai orlaivis vėl keičia kursą darydamas dešinį posūkį – skrydis apskritimine trajektorija. Ši Dubinsio trajektorija pasibaigia taške 2. Taigi, norint iš 1 taško tiksliai atskristi į 2 tašką, reikia skristi viena iš galimų Dubinsio trajektorijų.

Visgi, net ir tiksliai skrendant Dubinso trajektorija, orlaivis nepasieks galutinio paskirties taško, jei navigacijos algoritmai ar jutikliai, priimančys bei pateikiantys koordinatas ir (ar) jas perskaičiuojantys iš kitos gaunamos informacijos, bus netikslūs ir darantys netoleruotino dydžio paklaidą (Benini *et al.* 2013). Dažnai jutiklių triukšmas gali užgožti navigacijai svarbią informaciją.

Galiausiai, orlaiviui norint pakeisti kursą pučiant vėjui, egzistuoja itin daug skirtingų galimų rezultatų kaip orlaivio Dubinso trajektorijos gali pasikeisti (Xing *et al.* 2014; Hota, Ghose 2014). Kiekvienas atvejis – unikalus. Jis priklausys tiek nuo orlaivio tikrojo greičio, tiek nuo posvyrio kampo, vėjo greičio bei krypties, būsimo kurso krypties ir t. t. Todėl toliau darbe analizuojami ir pateikiami vėjo įtakos skrydžio trajektorijai tyrimo rezultatai.

Vėjo įtakos skrydžio trajektorijai vertinimo aprašymas

Remiantis naujausia literatūra, kurioje analizuojamos autonominių orlaivių skrydžių trajektorijos (Brezoescu *et al.* 2013; Hota, Ghose 2014; Kothari *et al.* 2014; Xing *et al.* 2014) atliktas orlaivio skrydžio apskritimine trajektorija esant vėjui tyrimas. Šis tyrimas atliktas dviem metodais. Pirmiausia orlaivis buvo modeliuojamas naudojant teorines orlaivio skrydžio parametrų (posvyrio kampo, skrydžio greičio, posūkio spindulio ir kt.) priklausomybes. Vėliau atliktas vertinimas taikant matematinį dinaminį orlaivio modelį. Buvo apskaičiuota, kad orlaivio modelis vykdytų subalansuotą skrydį esant ramioms orų sąlygoms (vėjo nėra). Tuomet šis subalansuotas skrydis buvo paveikiamas 2 m/s greičio vėju. Abiem metodais buvo vertinama vėjo įtaka orlaivio apskritiminei trajektorijai – t. y. kiek ir kaip pasikeis Dubinso trajektorijos apskritiminė komponentė, kai skrydis bus paveiktas vėju, o orlaivis nesiims koreguojamųjų veiksmų.

Pirmuoju atveju, kai orlaivis imituojamas kaip taškinis kūnas, jo buvimo koordinatinių pokytis Dekarto koordinatinių dvimatėje sistemoje (plokštumoje) per nedidelį laiko pokytį dt gali būti išreiškiamas tokiomis lygtimis:

$$dx_b = \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \sin \psi \cdot dt ; \quad (1)$$

$$dy_b = \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \cos \psi \cdot dt . \quad (2)$$

Šiose lygtyse: R – orlaivio posūkio spindulys, g – laisvojo kritimo pagreitis, φ – orlaivio posvyrio kampas, ψ – momentinis orlaivio kursas, kuris šiuo atveju matuojamas nuo Dekarto koordinatinių sistemos y ašies pagal laikrodžio rodyklę. Dydžiai R , g , φ traktuojami kaip nekintantys.

Momentinis orlaivio kurso pokytis $d\psi$ gali būti surandamas pagal tokią lygtį:

$$d\psi = \frac{\sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi}}{R} \cdot dt . \quad (3)$$

Žinant pradinį taškinio orlaivio būsenos vektorių dvimatėje erdvėje, integruojant laike, galima rasti orlaivio koordinatas bei kursą kiekvienu laiko momentu. Orlaivio būsenos vektorius kiekvienu laiko momentu gali būti išreiškiamas sekančia vektorine lygtimi:

$$\begin{Bmatrix} x_t \\ y_t \\ \psi_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \psi_{t-1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \sin \psi_{t-1} \cdot dt \\ \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \cos \psi_{t-1} \cdot dt \\ \frac{\sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi}}{R} \cdot dt \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Šioje lygtyje indeksas $(t-1)$ nurodo, kad tai ankstesnės skaičiavimų iteracijos dydis. Be to, 4 lygtis neimituoja esamo vėjo. Tyrimė laikoma, kad vėjas yra pastovaus greičio bei pastovios krypties, tad vėjo būsenos vektorius yra nekintantis:

$$\begin{Bmatrix} v_{vx} \\ v_{vy} \\ \psi_v \end{Bmatrix} = const, \quad (5)$$

čia v_{vx} ir v_{vy} atitinka vėjo greičio vektoriaus komponentes pagal x ir y ašis, o ψ_v – tai kryptis, iš kur vėjas pučia. Norint išanalizuoti, kaip kinta orlaivio koordinatės esant pastovios krypties ir pastovaus greičio vėjui, surandamas naujas orlaivio greitis (greitis žemės atžvilgiu):

$$v_{gx} = \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \sin \psi_{t-1} + v_{vx} ; \quad (6)$$

$$v_{gy} = \sqrt{R \cdot g \cdot \tan \varphi} \cdot \cos \psi_{t-1} + v_{vy} ; \quad (7)$$

$$v_g = \sqrt{v_{gx}^2 + v_{gy}^2} . \quad (8)$$

6, 7 ir 8 lygtyse v_{gx} , v_{gy} , v_g atitinka orlaivio greičio žemės atžvilgiu komponentes pagal x ir y ašis bei bendrą orlaivio greitį žemės atžvilgiu.

Naujas momentinis posūkio spindulys bus:

$$R_m = \frac{v_g^2}{g \cdot \tan \varphi} . \quad (9)$$

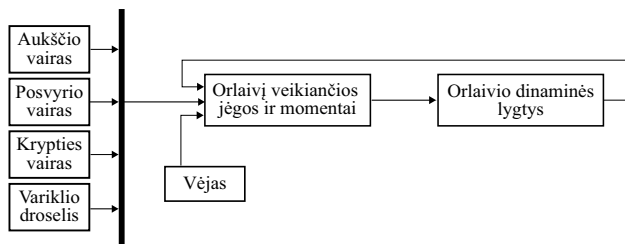
Galiausiai momentinis orlaivio kurso pokytis esant vėjui $d\psi_v$ surandamas pagal tokią lygtį:

$$d\psi_m = \frac{\sqrt{R_m \cdot g \cdot \tan \varphi}}{R_m} \cdot dt . \quad (10)$$

Orlaivio koordinatės skrendant viražu, kai taškinį orlaivį veikia pastovaus greičio bei pastovios krypties vėjas, apskaičiuojamos pagal lygtį:

$$\begin{cases} x_t \\ y_t \\ \psi_t \end{cases} = \begin{cases} x_{t-1} \\ y_{t-1} \\ \psi_{t-1} \end{cases} + \begin{pmatrix} (\sqrt{R_m} \cdot g \cdot \tan \varphi \cdot \sin \psi_{t-1} + v_{vx}) \cdot dt \\ (\sqrt{R_m} \cdot g \cdot \tan \varphi \cdot \cos \psi_{t-1} + v_{vy}) \cdot dt \\ \frac{g \cdot \tan \varphi}{\sqrt{v_{gx}^2 + v_{gy}^2}} \cdot dt \end{pmatrix}. \quad (11)$$

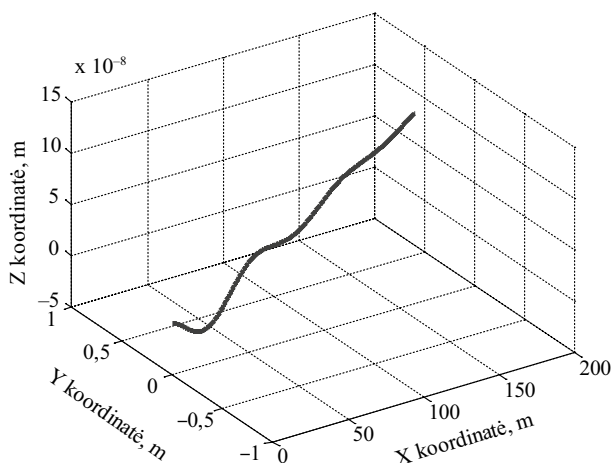
Norint įvertinti orlaivio tendencijas, kai atliekamas viražas esant vėjui, neužtenka vien tik taškinio orlaivio judėjimo viražu modelio. Tam tyrimui toliau pasitelktas matematinis dinaminis autonominio orlaivio modelis, kurio blokinė schema pateikta 3 pav. Tyrime taikytas modelis, kurio masė $m = 1,56$ kg; sparno mojis $b = 1,42$ m. Akivaizdu, kad šie parametrai atitinka nedidelio autonominio orlaivio apibrėžimą. Tyrimas atliktas apskaičiuvus orlaivio subalansavimo skrydžiui viražu esant ramiam orui reikalingas vairų ir variklio droselio padėtis.



3 pav. Matematinis dinaminis orlaivio modelis
Fig. 3. Mathematical-dynamic model of an airplane

Esant subalansuotam skrydžiui, apskaičiuotos aukščio, posvyrio, krypties vairų padėtys yra nekeičiamos viso skrydžio imitavimo metu. Vėjo greičio reikšmė taip pat parinkta kaip nekintantis dydis ir yra 2 m/s. Visgi orlaivis subalansuotas skrydžiui esant ramiam orui – be vėjo, todėl modelio dinaminės lygtys bei apskaičiuotos jėgos priklauso nuo orlaivio padėties vėjo vektoriaus atžvilgiu. Taikant matematinį dinaminį modelį atliktas analogiškas tyrimas skrendant viražu kaip ir taikant taškinį orlaivio modelį.

Pirmiausia matematinis dinaminis modelis buvo patikrintas atliekant subalansuotą skrydį tiesia trajektorija kai išilginė orlaivio ašis sutapatinta su koordinatinių sistemos x ašimi. Gauti Dekarto koordinatinių pokyčiai erdvėje pateikti 4 pav. Paveiksle matyti, kad orlaiviui skrendant pastoviu greičiu $v = 10$ m/s tiesiškai kinta x koordinatė, o z koordinatė iš lėto kaupia aukščio paklaidą.

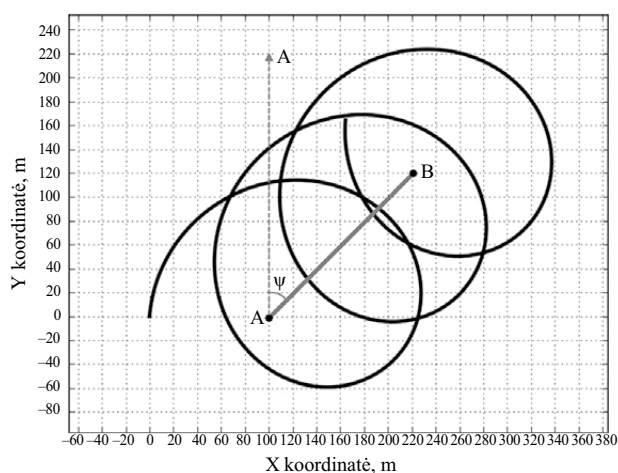


4 pav. Subalansuoto skrydžio koordinatės erdvėje
Fig. 4. Coordinates of the trimmed flight in 3D space

Buvo apskaičiuota, kad per ≈ 15 sekundžių gaunama $\approx 1,3$ mm orlaivio modelio aukščio paklaida, kuri per laiką auga. Įvertinta, kad 1 metro aukščio paklaida būtų pasiekta apytiksliai po 3 valandų imitacinio subalansuoto skrydžio tiesia trajektorija. Galima teigti, jog orlaivis juda tiesiškai.

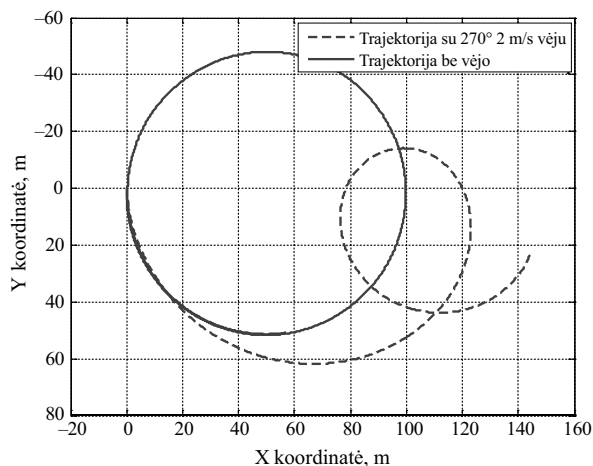
Orlaivio skrydžio apskritimine trajektorija modeliavimo rezultatai

Gauti rezultatai naudojant orlaivio kaip taškinio kūno skaičius pateikti 5 pav. Skaičiavimai atlikti, kai orlaivis atliko viražus esant 2 m/s 225° krypties vėjui. Akivaizdu, kad orlaivio trajektorija žemės atžvilgiu yra nešama 45° kryptimi. Ši žemės trajektorija pateikta 5 pav. ir žymima tiese AB, kuri su šiaurės (N) kryptimi sudaro $\psi = 45^\circ$ kampą.



5 pav. Teorinis orlaivio skrydis viražu pučiant 225° 2 m/s vėjui
Fig. 5. Theoretical flight of an airplane making turns with 225° 2 m/s wind

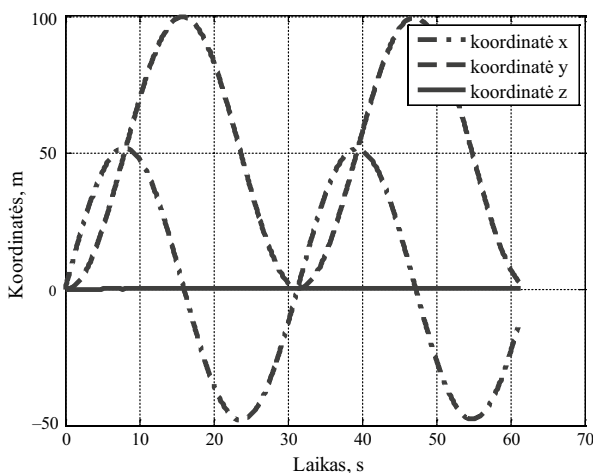
Analogiškas tyrimas atliktas taikant matematinį modelį, kai orlaivis atlieka subalansuotą skrydį viražu esant ramiam orui bei pučiant 2 m/s 270° vėjui. Rezultatai pateikti 6 paveiksle. Orlaivio modelis subalansuotas skrydžiui viražu išlaikant pastovų apsisukimo spindulį $R = 50$ m. bei skrydžiui pastoviu linijiniu greičiu oro atžvilgiu $v = 10$ m/s. Šie parametrai skrydžio metu nekinta.



6 pav. Orlaivio matematinio modelio subalansuoto skrydžio viražu koordinatės plokštumoje pučiant 270° 2 m/s vėjui ir be vėjo

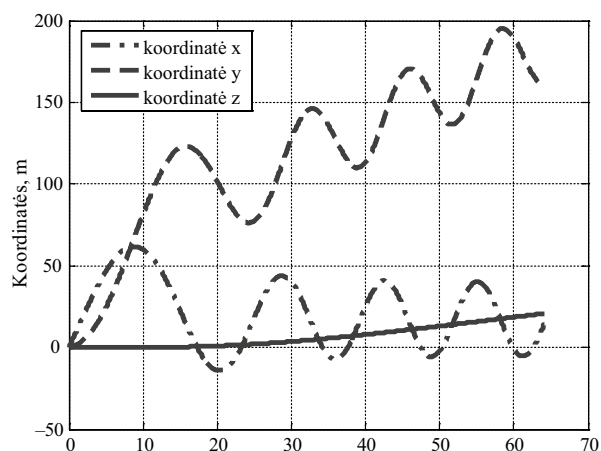
Fig. 6. Circular path coordinates of the trimmed mathematical airplane model flight with 270° 2 m/s wind and without wind

6 pav. matyti, kad dinaminis orlaivio modelis skrydį viražu kai oras yra ramus atlieka tvarkingai ir viražas yra taisyklingas apskritimas. Kai orlaivio skrydis paveikiamas vėju (vėjas nėra kompensuojamas), tendencijos yra panašios į taškinio kūno judėjimo trajektoriją ir orlaivis yra nešamas atitinkama kryptimi. 6 pav. pateiktų trajektorijų koordinatė pokyčiai laiko atžvilgiu pateikti 7 ir 8 pav.



7 pav. Orlaivio matematinio modelio subalansuoto skrydžio viražu koordinatė pokyčiai laiko atžvilgiu

Fig. 7. Change in time of the circular path coordinates of the trimmed mathematical airplane model flight



8 pav. Orlaivio matematinio modelio subalansuoto skrydžio viražu koordinatė pokyčiai laiko atžvilgiu pučiant 270° 2 m/s vėjui

Fig. 8. Change in time of the circular path coordinates of the trimmed mathematical airplane model flight with 270° 2 m/s wind

7 pav. matyti, kad orlaivio koordinatės judant apskritimine trajektorija kinta tvarkingai. 8 pav. matomas y koordinatės kitimas dėl šia kryptimi pučiančio vėjo bei ryškesnis aukščio kitimas, kuris, tikėtina, kad atsirado dėl išaugusios aerodinaminės keliamosios jėgos.

Išvados

Pritaikius darbe pateiktas lygtis ir atlikus taškinio orlaivio subalansuoto skrydžio viražu koordinatė pokyčio skaičiavimus bei šiuos palyginus su orlaivio matematinio dinaminio modeliu gauta trajektorija, nustatyta, kad koordinatės sutampa (nevertinant nedidelių nukrypimų dėl modelio netiesiškumo paklaidų bei dinaminė koeficientų). Gaunama tiksli apskritiminė trajektorija.

Šį skrydį paveikus pastovaus greičio bei pastovios krypties vėju, modelio elgesio tendencijos yra panašios. Atsiranda orlaivio nuonaša žemės atžvilgiu pagal pučiančio vėjo kryptį. Gautiems trajektorijų nesutapimams įtakos turi orlaivio modelio dinaminiai koeficientai. Pastebėta, kad matematinis orlaivio modelis, kai šis subalansuotas skrydžiui viražu, paveikus vėju, įgyja papildomų aerodinaminė jėgų, kurios šiek tiek pakeičia skrydžio trajektoriją, o paties orlaivio aukštis per tą patį laiką pakinta (60 sekundžių – 20 metrų). Tikėtina, jog aukščio pokytis atsiranda, nes orlaivis nekompensuoja papildomai atsiradusio realiatyvaus oro srauto greičio.

Dėl matematinė skaičiavimų netikslumų, dinaminis modelis kaupia nedideles koordinatė paklaidas, kurios atitinka $\approx 5,2$ mm/min. Dėl santykinai nedidelių paklaidų modelis galėtų būti taikomas tolesniuose tyrimuose siekiant skrydį vykdyti tiksliais Dubinsko trajektorijomis apribotoje erdvėje.

Literatūra

- Benini, A.; Mancini, A.; Longhi, S. 2013. An IMU/UWB/Vision-based extended Kalman Filter for Mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 70: 461–476. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-012-9742-1>
- Bepiločių orlaivių naudojimo taisyklės* [interaktyvus] 2014. Vilnius, 3 p. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 19 d.]. Prieiga per internetą: http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_c_1?p_id=464794&p_tr2=2
- Birk, A., et al. 2011. Safety, security, and rescue missions with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 64: 57–76. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-011-9546-8>
- Brezoescu, A., et al. 2013. Adaptive trajectory following for a fixed-wing UAV in presence of crosswind, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 69: 257–271. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-012-9756-8>
- Caballero, F., et al. 2009. Vision-based odometry and SLAM for medium and high altitude flying UAVs, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 54: 137–161. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-008-9257-y>
- Goerzen, C.; Kong, Z.; Mettler, B. 2010. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 57: 65–100. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-009-9383-1>
- Guerrero, A. J.; Bestaoui, Y. 2013. UAV path planning for structure inspection in windy environments, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 69: 297–311. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-012-9778-2>
- Gupta, S. G.; Ghonge, M. M.; Jawandhiya, P. M. 2013. Review of Unmanned Aircraft System (UAS), *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)* 2(4): 1647–1658.
- Hota, S.; Ghose, D. 2014. Time-optimal convergence to a rec-tilinear path in the presence of wind, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 74: 791–815. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-013-9842-6>
- Kothari, M.; Postlethwaite, I.; Gu, D. 2014. UAV path following in windy urban environments, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 74: 1013–1028. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-013-9873-z>
- Maza, I., et al. 2010. Multi-UAV cooperation and control for load transportation and deployment, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 57: 417–449. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-009-9352-8>
- Maza, I., et al. 2011. Experimental results in multi-UAV co-ordination for disaster management and civil security applications, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 61: 563–585. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-010-9497-5>
- Nex, F.; Remondino, F. 2014. UAV for 3D mapping applications: a review, *Applied Geomatics* 6: 1–15. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Xing, Z.; Jie, C.; Bin, X. 2014. Path planning for unmanned aerial vehicles in surveillance tasks under wind fields, *Journal of Central South University* 21: 3079–3091. <http://dx.doi.org/10.1007/s11771-014-2279-7>

EVALUATION OF SMALL UNMANNED AIRCRAFT FLIGHT TRAJECTORY ACCURACY

R. Kikutis, J. Stankūnas

Abstract

Today small unmanned aircraft are being more widely adapted for practical tasks. These tasks require high reliability and flight path accuracy. For such aircraft we have to deal with the challenge how to compensate external factors and how to ensure the accuracy of the flight trajectory according to new regulations and standards. In this paper, new regulations for the flights of small unmanned aircraft in Lithuanian air space are discussed. Main factors, which affect errors of the autonomous flight path tracking, are discussed too. The emphasis is on the wind factor and the flight path of Dubbin's trajectories. Research was performed with mathematical-dynamic model of UAV and it was compared with theoretical calculations. All calculations and experiments were accomplished for the circular part of Dubbin's paths when the airplane was trimmed for circular trajectory flight in calm conditions. Further, for such flight the wind influence was analysed.

Keywords: small unmanned aircraft, flight trajectory, flight rules for UAV, flight path inaccuracies, dynamical model.