

AUTONOMINIŲ ORLAIVIŲ NAVIGACIJOS ALGORITMŲ BEI JŲ TAIKymo ESANT ĮVAIRIOMS VĖJŲ SĄLYGOMS APŽVALGA

Ramūnas Kikutis¹, Jonas Stankūnas²

VGTU AGAI Aviacijos technologijų katedra

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

Santrauka. Autonominiai orlaiviai bei jų navigacijos algoritmai pastaruju metu susilaukia nemažai tyrėjų dėmesio, tad yra aktuali mokslinių tyrimų sritis. Yra atliekama daug darbų didinant šių orlaivių automatizacijos lygį, skrydžio tikslumą bei kokybę. Į orlaivių kompiuterines sistemas stengiamasi įdiegti įvairių savarankiškų sprendimų priėmimo metodų. Pagrindinis šio straipsnio tikslas – akcentuoti ryšį tarp moksliniuose darbuose tyrinėjamų autonominių orlaivių navigacijos, valdymo ir kontrolės algoritmų ar jų metodikų bei šių algoritmų pritaikymo problemų sprendimui. Kaip problematikos sritis navigacijos algoritmų pritaikymui pasirinkta orlaivio skrydžio trajektorija esant įvairioms vėjo ir kitoms meteorologinėms sąlygoms. Straipsnyje aptarti pastarųjų metų aktualūs moksliniai darbai, kuriuose analizuojama autonominių orlaivių navigacija, pateiktos išvagos.

Reikšminiai žodžiai: bepilotis orlaivis, navigacijos algoritmai, skrydžio trajektorija, skrydis esant vėjui, autonominės sistemos.

1. Įvadas

Autonominis – bepilotis orlaivis ar sistema (UAS) – tai žmogaus kontroliuojama ir prižiūrima, bet savarankiškai skrydžio navigaciją atliekanti oro transporto priemonė. Tuo tarpu ICAO terminą UAS apibrėžia taip: „Tai orlaivis ir kiti su juo susiję technologiniai elementai, kurie yra valdomi be piloto, skrendančio šio orlaivio viduje“. Šiame ICAO dokumente taip pat teigiama, kad bepiločiai orlaiviai skrydžius turi vykdyti tikrai esant antžeminio operatoriaus priežiūrai, kuris tai atlieka naudodamasis antžemine valdymo ir kontrolės stotimi. Tokie orlaiviai dar gali būti vadinami nuotoliniu būdu valdomais orlaiviais – RPA. (*angl.* – remotely piloted aircraft). Vis dėlto, literatūroje yra aptinkami du terminai, susiję su bepiločiais orlaiviais:

1. Automatinės sistemos.
2. Autonominės sistemos.

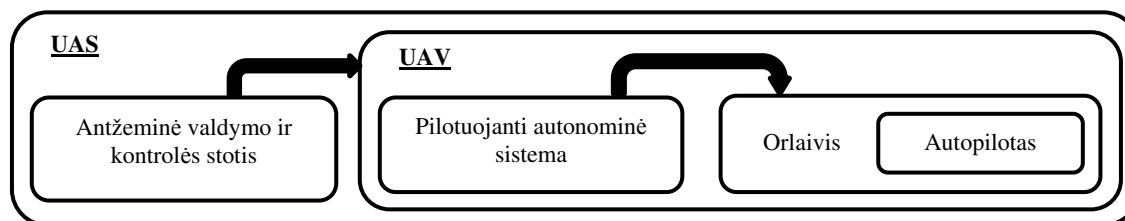
Automatinė sistema – tai sistema, kuri savarankiškai vykdo iš anksto pasirinktas orlaivio valdymo bei navigacijos komandas ir parametrus, pasirinktus operatoriaus arba antžeminės valdymo stoties. Įprastai šias funkcijas atlieka orlaivio autopiloto įranga AP.

Autonominė sistema – tai sistema, kuri savarankiškai vykdo iš anksto nurodytą misiją bei pati priima sprendimus orlaivio navigacijos ir valdymo klausimais.

Tokia sistema dar vadinama pilotuojančiąja autonominė sistema PAS. Autonominio orlaivio su PAS sistema veikimo principo blokinė schema matyti 1 paveiksle.

UAV sistema turi įmontuotą šiuolaikinę įrangą: autopilotą, GPS imtuvą, orlaivio pagreičių bei kampinių greičių jutiklius, statinio bei dinaminio slėgio jutiklius, telemetrijos įrangą ir/ar kt. bei atitinkamu lygmeniu gali savarankiškai priimti sprendimus ar vertinti aplinką bei jos pokyčius, todėl taip pat gali būti vadinama robotine sistema. Būtent dėl šios priežasties išsirutuliojo, kad UAV navigacijos, trajektorijos planavimo bei orlaivio valdymo klausimus tyrinėja dvi šakos: robotika ir automatinis valdymas.

Neskaitant šio fakto, (Sheridan 1992) suklasifikavo bepiločių orlaivių autonomiją nuo žemiausio (lygmuo 0) iki aukščiausio lygmens (lygmuo 10). Lygmuo 0 atitinka UAV, kurie yra valdomi radijo bangomis ir neturi autopiloto įrangos – jokios autonomijos. Lygmuo 10 atitinka autonominius orlaivius, kuriems nereikalinga jokia žmogaus pagalba. Šie orlaiviai pagal klasifikatorių sprendimus dėl navigacijos, kontrolės ir kt. priima patys ir užtikrina tokią autonominio skrydžio saugumo lygmenį, kuris tapatus ar net pranašesnis už žmogaus pilotuojamų orlaivių saugumą.



1 pav. Autonominio orlaivio blokinė schema

Fig. 1. The structural scheme of unmanned aerial system

Pagal naujausius tyrimus, šiuo metu autonominiai orlaiviai sugeba vykdyti kooperuotas misijas grupėmis, vertinti kelyje pasitaikančias kliūtis, jas apskristi be operatoriaus įsiterpimo ir kt., o tai atitinka autonomijos lygį 7. Autonominių orlaivių, kurie atitiktų 10 lygmenį, nėra.

Tuo tarpu didėjantis susidomėjimas autonominiais orlaiviais sukelia ir didesnę organizacijų, kurios užsiima reglamentavimu aviacijos srityje, susidomėjimą. Griežtėja ICAO, JAA, EASA bei nacionalinių civilinės aviacijos administracijų standartai ir taisyklės autonominių orlaivių skrydžiams. Visa tai pagrindžia faktą, kad visuomenės pasitikėjimas šiais orlaiviais bei jų tobulėjančiomis technologijomis nėra pakankamas ir neužtikrina atitinkamos saugos. (Gimenes *et al.* 2014) Teigiama, kad norint šiuos orlaivius visapusiškai integruoti į bendrą oro erdvę kaip nepriklausomas transporto priemones, reikalinga, jog autonomijos lygis pasiektų aukščiausią kategoriją ir užtikrintų saugumą, nenusileidžiantį žmogaus pilotuojamiems orlaiviams. Tuo tikslu turi būti tobulinama pilotuojanti autonominė sistema PAS. Pastaroji turėtų sugebėti savarankiškai vertinti antžeminės kliūtis, kitus oro erdvėje skrendančius orlaivius, savarankiškai valdyti orlaivio plokštumą, atlikti navigaciją bei vykdyti parinktas misijas, vertinti meteorologines sąlygas, jų keliamą grėsmę, sugebėti perplanuoti trajektoriją bei kuo tiksliau kompensuoti įvairias nuonašas. Visoms šioms užduotims atlikti reikalingi specialūs sprendimų priėmimo, valdymo, kontrolės bei navigacijos algoritmai.

2. UAV valdymo, navigacijos ir kontrolės ciklas

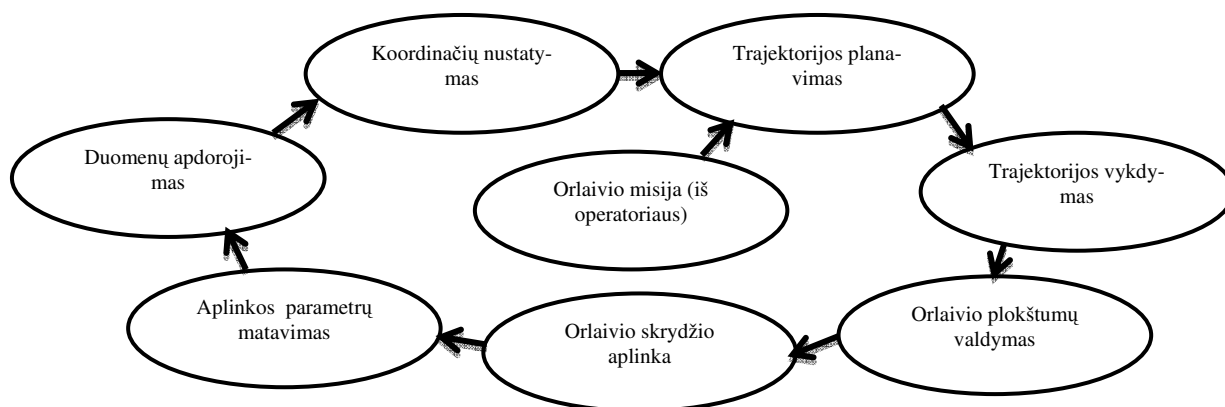
Nedidelis bepilotis orlaivis, turintis autopilotą bei pakankamą kiekį reikiamų jutiklių bei galintis skrydį vykdyti automatiškai ar autonomiškai, prieš skrydį atsidurs aplinkoje, kurios iš anksto nežino. Ši aplinka gali būti traktuojama ne tik kaip skrydžio kelyje galinčios pasitaikyti antžeminės ar ore esančios kliūtys, bet ir pati atmosfera, joje esantys meteorologiniai reiškiniai. Orlaivis matuoja šiuos parametrus pasinaudodamas turimais jutikliais, šiuos apdoroja ir pagal gautą informaciją nustato navigacines koordinates bei kitą aktualią informaciją. Nustatytos koordinatės lyginamos su planuotomis koordinatėmis,

įvertinama paklaida. Pagal paklaidą apskaičiuojami navigaciniai parametrai, o jei orlaivis autonominis, perplanuojama ir pati trajektorija, kuri toliau yra vykdoma naudojant autopiloto įrangą bei duodant atitinkamas valdymo komandas orlaivio plokštumų servo mechanizmams. Ir taip procesas vėl kartojamas, matuojant kito taško aplinkos bei navigacinius parametrus.

Šio ciklo metu taikomi algoritmai gali būti skirtingo sudėtingumo ir kompleksijos lygmens, o tai priklauso nuo orlaivio autonomijos technologinio lygio. Šio ciklo metu vykstančius procesus atlieka 3 kategorijų sistemos ir/ar algoritmai:

1. Skrydžio kontrolieris – autopilotas.
2. Orlaivio navigacijos sistemos.
3. Orlaivio misijos bei trajektorijos valdymo sistemos.

Kiekvienoje iš šių sistemų grupių yra atliekama tiriamoji veikla bei siekiama, kad bepiločių orlaivių autonomijos lygis toliau augtų. Pavyzdžiui, (Abeel *et al.* 2010) Stanfordo universiteto moklininkai pasiūlė savaiminio mokymosi skrydžių kontrolierį sraigataspnio akrobatiniams manevrams įsisavinti. Buvo pasiūlytas algoritmas, nustatantis optimalią orlaivių manevrų trajektoriją pagal duomenis, gautus iš keleto skrydžių, kuriuos pademonstravo profesionalus autonominių orlaivių pilotas. Pagal algoritmo surinktus duomenis, skrydžio kontrolieris valdymo komandas suderino su konkrečiu sraigataspnio dinaminio modeliu. Taip pat yra nemažai darbų, kuriuose nagrinėjamas skrydžio kontrolieris, savaime išmokstantis pagal orlaivio dinaminį modelį parinkti aerodinaminių plokštumų valdymo komandų signalus, pasinaudodamas dirbtiniais neuronų tinklais (Dierks, Jagannathan 2010). Tuo tarpu tiesiniai PID kontrolieriai yra taikomi apytiksliai nuo 1960 metų. Visgi bandoma panaudoti ir kitus valdymo metodus, tokius kaip H_∞ –, kuris yra tinkamas ir gali susitvarkyti su orlaivio dinaminio modelio paklaidomis ir netiksliai įvertintais parametrais. Be to, (Nonami *et al.* 2010) savo darbe panaudojo linijiniu – kvadratinio metodu veikiantį skrydžio kontrolierį (LQR).



2 pav. Autonominio orlaivio valdymo ir navigacijos ciklas

Fig. 2. Navigation and control cycle of UAV

Pačios paprasčiausios navigacinės sistemos yra tos, kur įvairiais jutikliais matuojami aplinkos bei kiti parametrai ir ši informacija minimaliai panaudojama bendriems navigacijos uždaviniams atlikti. Verta atkreipti dėmesį, kad neskaitant įprastų, slėgio, orinio greičio,

koordinatų ir kt. jutiklių (Scherer *et al.* 2008) bepilotyje orlaivyje buvo panaudotas LIDAR, kuris pritaikytas vietovės reljefui stebėti. Šiam tikslui dažnai naudojamos ir klasikinės filmavimo kameros.

1 lentelė. Autonominių orlaivių valdymo ir navigacijos sistemos
Table 1. Autonomic aircraft control and navigation systems

Orlaivio navigacijos, automatinio valdymo ir trajektorijos bei misijos vykdymo sistemos		
Skrydžio kontrolieris – autopilotas	Navigacijos sistemos	Misijos bei trajektorijos vykdymo sistemos
Savaiminio mokymosi kontrolieriai	Aplinkos parametrų matavimo	Trajektorijos planavimo/vykdymo
Tiesiniai kontrolieriai	Orlaivio būsenos vektoriaus nustatymo	Misijos planavimo/vykdymo
Netiesiniai (pritaikyti konkrečiam orlaiviui) kontrolieriai	Aplinkos suvokimo, interpretavimo	Kooperuotų misijų vykdymo
	Situacijos suvokimo	

Sudėtingesnės navigacijos sistemos iš įvairių jutiklių priimtus signalus apdoroja išplėstuoju Kalmano filtru (EKF) ir taip sudaromas orlaivio būsenos vektorius, kurį galima aprašyti:

$$x = (p_N, p_E, p_D, u, v, w, \varphi, \theta, \psi, p, q, r)^T$$

Savo darbe (Christophersen *et al.*, 2006) pasiūlė 16 elementų EKF būdu sudarytą orlaivio būsenos vektorius, o (Bristeau *et al.* 2010) – 23 elementų su EKF sudarytą orlaivio būsenos vektorius. Tuo tarpu klasikinis būsenos vektorius yra sudarytas iš 12 elementų.

Navigacijos sistemos, sugebančios suvokti aplinką bei ją vertinti, įprastai naudoja papildomus jutiklius, kuriais galima atlikti vizualią navigaciją. Tokie jutikliai yra video kamera, LIDAR ir kt. Pavyzdžiui, (Hermansson *et al.* 2010) panaudojo video kamerą ir GPS imtuvą bei atitinkamus algoritmus, kad tiksliai nutupdytų autonominiu būdu skrendantį sraigtasparnį ant stacionaraus objekto žemės paviršiuje. Dažnai tyrėjai su analogiška įranga bei atitinkamais algoritmais, panaudodami autonominius orlaivius, nagrinėja dviejų ir trijų dimensijų žemėlapių sudarymo metodus.

Situacijos suvokimo navigaciniai algoritmai šiuo metu autonominiuose orlaiviuose dar nėra pritaikyti, nes tai reikalauja didelių skaičiuojamųjų resursų pačioje sistemoje bei visapusiško sugebėjimo pačiai sistemai vertinti bet kurią skrydžio metu iškilusią situaciją. Pastaruoju metu šią užduotį vis dar atlieka antžeminis operatorius bei galutinis sprendimas dėl orlaivio valdymo atitenka jam.

Trajektorijos planavimo metodai skirstomi pagal tai, ar autonominis orlaivis iš anksto žino aplinką, kurioje skris, ar jos nežino. Abiem atvejais panaudojami įvairūs algoritmai bei metodai:

- Kelio žemėlapiai (Wzorek *et al.* 2010; Andert *et al.* 2011);
- Potencialų laukai (Scherer *et al.* 2008). Šis metodas nereikalauja didelių skaičiuojamųjų resursų ir yra lengvai pritaikomas praktikoje;
- Įvairūs optimizavimo metodai (Goerzen *et al.* 2010);
- Euristiniai paieškos algoritmai A* ir D* (Whalley *et al.* 2009);

- Esant neapibrėžtumams skrydžio aplikoje ir/ar jutiklių matavimuose, gali būti taikomi trajektorijos planavimo esant neapibrėžtumams algoritmai (Goerzen *et al.* 2010);

Neskaitant trajektorijos planavimo ir/ar vykdymo algoritmų, atliekami tyrimai ir autonominių orlaivių automatizuotų misijų vykdymo bei planavimo srityje. (Adolf Thielecke 2010). Magrinėjamas ir misijų planavimas kai ši turi būti vykdoma esant daugiau nei vienam orlaiviui (Gillula *et al.* 2011), o (Goerzen; Whalley 2011) darbe nagrinėja šių orlaivių misijų planavimą esant nežinomai skrydžio aplinkai.

Literatūroje taip pat galima aptikti darbų, kuriuose nagrinėjami autonominių orlaivių trajektorijų generavimo bei perplanavimo metodai. Pavyzdžiui (Prats *et al.* 2013) savo darbe pateikė uždaro kodo autopiloto generuojamų trajektorijų perskaičiavimo analitinis metodas, kai planuojamam maršrutui parenkami papildomi navigaciniai taškai.

Daugiau informacijos apie įvairių algoritmų pritaikymo autonominiuose orlaiviuose navigacijos, valdymo ir kontrolės sistemoms, galima rasti (Dadkhah; Mettler 2012) darbe.

3. Aplinkos parametrų matavimas ir imitavimas

Neskaitant autonominių orlaivių navigacijoje taikomų algoritmų bei jiems taikomų metodų ir sudėtingumo, didelį poveikį autonominio orlaivio navigacijai daro vėjas bei įvairūs vėjo vektoriaus kitimo reiškiniai. Bendruoju atveju vėjo greičio vektorius galima išreikšti formule.

$$V = f(p, t) \quad (1)$$

Vėjo greičio vektorius kinta arba yra funkcija nuo orlaivio vietos koordinatų, išreikštų Dekarto stačiakampėje koordinatų sistemoje bei laiko momento, kuomet orlaivis toje koordinatėje atsirado.

Panaudodamas atitinkamai turimus jutiklius ir esant galimybei, orlaivis matuoja arba (esant įdiegtiems atitinkamiems procedūrų algoritmams) galėtų šį vėjo greičio vektorius matuoti:

- taikant greičių trikampio metodą (Kroonenberg *et al.* 2008);

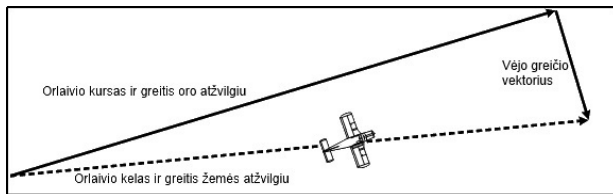
- pagal greičių trikampio metodą panaudojant 5 ar daugiau vamzdelių turintį Pito jutiklį (Reuder, Jonassen. 2012);
- naudojant tik GPS signalą (Mayer *et al.* 2012a);
- naudojant optinę aplinkos stebėjimo įrangą (Habib *et al.* 2011; Nuwanthica *et al.* 2013).

Remiantis (Bencatel *et al.* 2013) pateikta informacija, galima teigti, kad nedideli autonominiai orlaiviai negali viršyti 2 lentelėje pateiktos 4 kategorijos vėjo greičio vektoriaus modulio reikšmės. Priešingu atveju orlaivio skrydis bus nesaugus arba taikant specialius algoritmus, galės skristi tik tam tikrame kursų diapazone. Apie tai savo tyrime užsiminė (Techy, Woolsey 2009).

2 lentelė. Autonominiams orlaiviams leistino vėjo greičio klasifikavimas

Table 2. Wind speed-limit classification for autonomic aircrafts

Kategorija	Vėjo greitis (kt)	Vėjo greitis (m/s)	Apibūdinimas
0	<1	<0.3	Ramu
1	1 – 3	0.3 – 1.6	Silpnas vėjas
2	4 – 6	1.6 – 3.4	Silpnas brizas
3	7 – 10	3.4 – 5.4	Švelnus brizas
4	11 – 16	5.4 – 7.9	Vidutinis brizas



3 pav. Greičių trikampis
Fig. 3. Speed triangle

Akivaizdu, kad šiuo metu visus sprendimus dėl galimybės orlaiviui skristi ar skrydžio nutraukimo priima antžeminis operatorius, kuris iš orlaivio, esant galimybei, priima išmatuoto vėjo vektoriaus signalą. Siekiant didinti šių orlaivių automatizaciją, svarbu, kad ir pats orlaivis turėtų galimybę priimti sprendimą skrydžio metu dėl vėjo greičio ar aptinkamų reiškinių pavojingumo. Savo darbe (Bencatel *et al.* 2013) pasiūlė orlaivio išmatuotą vėjo vektorius vertinti pagal pavojingumo skrydžiui lygį ir gautą rezultatą siųsti į antžeminę valdymo stotį, taip informuojant antžeminį operatorių. Įprastai, klasikiniu būdu, vėjo greičio vektorius autonominės sistemos pagalba yra išmatuojamas panaudojant greičių trikampį.

Orlaivio greitis žemės atžvilgiu yra gaunamas GPS imtuvu, o orlaivio greitis oro atžvilgiu – Pito vamzdelių pagalba. Pasinaudojant papildoma informacija apie orlaivio padėtį erdvėje, išskaičiuojamas vėjo greičio vektorius inercinės Dekarto koordinatų sistemos atžvilgiu.

$$V_W = V_G - M_{GB} M_{BA} V_A \quad (2)$$

Šioje lygtyje M_{GB} ir M_{BA} atitinka transformacijos matricas iš aerodinaminės į orlaivio koordinatų sistemą ir iš orlaivio į inercinę koordinatų sistemą.

Vis dėlto, jei orlaivis naudoja tik tokį vėjo vektoriaus matavimo (skaičiavimo) metodą, išskyla įvairių sunkumų:

- Dėl jutiklių paklaidų gaunamas netikslus vėjo greičio vektorius, kurio paklaida nėra žinoma.
- Nepriimant GPS signalo ar neturint Pito vamzdelių, slėgio sistemos vėjo greičio vektorius apskritai neišmatuojamas.

Kaip alternatyva klasikiniam vėjo vektoriaus matavimui (Habib *et al.* 2011; Nuwanthica *et al.* 2013) buvo pasiūlyta vėjo vektoriaus matavimus atlikti panaudojant video kamera gaunamus vaizdus. Tokiu būdu vertinant vaizdo judėjimą laiko atžvilgiu, įmanoma išskaičiuoti momentinį vėjo vektorius.

Priimant tik GPS signalą (Mayer *et al.* 2012b) buvo pasiūlyta naudoti metodą vėjo vektorius išmatuoti, kai orlaivis atlieka virazus skrisdamas pastoviu greičiu oro atžvilgiu bei nekeičia variklio apskukų.

Įvairūs vėjo vektoriaus matavimo metodai yra pritaikomi ne tik informacijai apie vėją gauti, bet (Reuder, Jonassen. 2012); Martin *et al.* 2011; Buschmann *et al.* 2008; Spiess *et al.* 2007), suprojektavę M^2AV is SUMO nedidelius autonominius orlaivius bei į juos įdiegę reikiamus jutiklius, šiuos pritaikė kaip meteorologinius stebėtojus – skraidančias meteorologines stoteles. Įdomu tai, kad toks orlaivis buvo panaudotas net ir vėjų jėginių skuriamais turbulenciniais srautams matuoti ir vertinti. (Reuder, Jonassen 2012). Tuo tarpu (Fernando; Sonnada 2013) panaudodami autonominių orlaivių, atliko vėjų vektorinio lauko sudarymo tyrimus.

4. Vėjo reiškinių modelių panaudojimas

Be pačių vėjo vektoriaus matavimo metodų (Langelaan *et al.* 2010) savo darbe užsiminė, kad įvairūs vėjo reiškiniai gali būti panaudojami kaip papildomas energijos šaltinis orlaiviui skristi, todėl pasiūlė vėją pritaikyti skrydžio trukmei prailginti. Panaudotas orlaivio dinaminis modelis bei vėjo „Dryden“ gūsių lauko modelis, kuris pritaikytas įvertinti modeliuotų orlaivio jutiklių tikslumą. (Bencatel *et al.* 2013) užsiminė, kad galima modeliuoti ne tik vėją ar vėjo gūsių lauką, bet taip pat vėjo poslinkį, turbulenciją. Savo darbe (Bencatel *et al.* 2013) pateikė įvairius skaitinius vėjo reiškinių modelius ir jų grafines išraiškas. Šiame darbe nagrinėti vėjo reiškinių modeliai pateikti 3 lentelėje. (Bittar *et al.* 2014) pasiūlė vėjo reiškinių nmodeliuoti, o pasinaudoti jau sukurtais ir integruotais modeliais „X-plane“ arba „Flight Gear“ programinės įrangos paketuose. Tokiu atveju reikalinga, kad autopiloto ir kompiuterio platformos būtų apjungtos panaudojant HIL (*angl.* – Hardware in the loop) simuliaciją. Įvairūs vėjo reiškinių modeliai gali būti panaudoti autonominių orlaivių navigacijos algoritmams nagrinėti.

3 lentelė. Vėjo reiškinių matematiniai modeliai
Table 3. Wind phenomenon mathematical models

Vėjo reiškinių modeliai		
Vėjo poslinkis	Kylančios oro srovės	Vėjo gūšiai
Paviršiaus vėjo poslinkio modelis	„Kamino“ kylančių oro srovių modelis	Gauso gūsių modelis
Sach-da-Costa horizontalių oro masių modelis	„Kamino“ modelis, kai jam įtaką daro vėjas	Gauss-Markov gūsių modelis
Gauso skirstiniu paremtas horizontalių oro masių modelis	„Burbulo“ kylančių oro srovių modelis	Dryden-von Karman gūsių modelis
Kvadratinio metodu paremtas horizontalių oro masių modelis	Dėl reljefo įtakos kylančių oro srovių modelis	Apgyvendintos teritorijos gūsių modelio principas
Kalno šlaito įtakoto vėjo poslinkio modelis		

5. Navigacijos algoritmai pučiant vėjui

Įvairiose mokslinėse publikacijose aptinkama įvairių darbų, kurie susiję su autonominių orlaivių navigacijos algoritmais, trajektorijos planavimu, jos optimizavimu ir kt. Pavyzdžiui (Bakolas *et al.* 2008) buvo nagrinėta orlaivio optimali trajektorija laiko atžvilgiu, kai šis skrenda pagal Dubinsio trajektorijas pučiant pastoviam vėjui. Kitame darbe (Nelson *et al.* 2007) panaudojo aplink orlaivio skrydžio trajektoriją suprojektuotą vektorinį lauką. Šis laukas skirtas orlaivį pritraukti prie tikslios skrydžio trajektorijos, o ties trajektorija pasitaikius kliūtims, - nuo kliūčių orlaivį stumti į šalį. Taip pat šis metodas buvo panaudotas ir vėjo poveikiui kompensuoti. Kaip buvo minėta (Langelaan *et al.* 2010), vėjo energija gali būti panaudota skrydžio trukmei prailginti. Dėl šios priežasties (Al-Sabban *et al.* 2012) pasiūlyta nagrinėti tokią skrydžio trajektoriją, kad orlaivis maksimaliai išnaudotų vėjo energiją ir skrydžio energetinis efektyvumas iš taško A į tašką B būtų maksimalus. Šiame tyrime pasinaudota „Markov“ sprendimų priėmimo procesais. Panašiai kaip (Efsthios, Panagiotis 2010), darbe (Techy, Woolsey 2009) taip pat pasiūlė specialių algoritmų pagalba nagrinėti laiko atžvilgiu optimalias autonominių orlaivių trajektorijas esant pastovioms vėjo sąlygoms. Šiame tyrime išsamiau aptartas orlaivio skrydis pagal „Dubins“ trajektorijas, pateiktos šių trajektorijų analitinės, matematinės lygtys. Kadangi pakankamai sudėtinga autopiloto įrangai atlikti pastovaus spindulio posūkį, kai pučia vėjas, (Selecky *et al.* 2013) patobulino A* algoritmą bei pritaikė AA* algoritmą. Kituose darbuose, kuriuos atliko (Brezoescu *et al.* 2013) ir (Brezoescu *et al.* 2014), nagrinėtos autonominio orlaivio dinaminės lygtys bei skrydis horizontalioje plokštumoje. Autoriai priėmė faktą, kad orlaivio aerodinaminės charakteristikos nėra gerai žinomos, todėl pasinaudojo Lyapunov stabilumo teorija ir ja remdamasis nagrinėjo vėjo vektoriaus matavimo metodus bei vėjo šoninės nuonašos kompensavimą, horizontalioje skrydžio plokštumoje.

6. Išvados

1. Bepiločių orlaivių autonomijos lygmuo skirstomas į 11 kategorijų (0-10). Kategorija 0 atitinka orlaivius, kurie automatizacijos ar autonomijos neturi visai. Kategorija 10 atitinka nepriklausomą orlaivio sprendimų priėmimą (šiuo metu neegzistuoja).

2. Autonominiu būdu vykdomų navigacijos procedūrų kompleksiskumas tiesiogiai priklauso nuo autonomijos lygio. Mokslo darbuose analizuojamos orlaivių automatinės procedūros skirstomos į automatinio valdymo, navigacijos bei misijų vykdymo, planavimo kategorijas.
3. Siekiant padidinti autonominio orlaivio skrydžio trajektorijos tikslumą pučiant vėjui, įvairių tyrėjų mokslo darbuose analizuojami įvairūs fizikiniai metodai bei algoritmai: Dubinsio trajektorijų išlaikymas bei kombinacijos, vektorinis laukas, A* bei AA* algoritmai, Markov automatinio valdymo pusiausvyros teorija ir kt.
4. Siekiant tyrimus atlikti modeliavimo metodais, galima pasiremti mokslininkų sukurtais tokiais vėjo reiškinių matematiniais modeliais: Gauss-Markov, Dryden-von Karman ir kt.

Literatūra

- Abbeel, P.; Coates, A.; Ng, A. Y. 2010. Autonomous helicopter aerobatics through apprenticeship learning, *International Journal of Robotics Research* 29(13): 1608–1639.
- Adolf, F.; Thielecke, F. 2007. A sequence control system for onboard mission management of an unmanned helicopter, *In Proceedings of the AIAA* p. 1–12.
- Al-Sabban, W. H.; Gonzalez, L. F.; Smith, R. N. 2012. Wind-energy based path planning for unmanned aerial vehicles using Markov decision processes, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*.
- Andert, F., *et al.* 2011. Mapping and path planning in complex environments: An obstacle avoidance approach for an unmanned helicopter, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 745–750.
- Bencatel, R.; Sousa, J. T.; Girard, A. 2013. Atmospheric flow field models applicable for aircraft endurance extension, *Progress in Aerospace Science* 61: 1–25.
- Bittar, A.; Oliveira, N. M. F.; Figueiredo, H. V. 2014. Hardware-in-the-loop simulation with x-plane of attitude control of a UAV exploring atmospheric conditions, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 73: 271–287.
- 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.
- Brezoescu, A.; Castillo, P.; Lozano, R. 2014. Wind estimation for accurate airplane path following applications, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 73: 823–831.

- Buschmann, M.; Bange, J.; Vorsmann, P. 2008. Measuring the wind vector using the autonomous mini aerial vehicle M²AV, *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology* 25(11):1969.
- Christophersen, H., *et al.* 2006. A compact guidance, navigation, and control system for unmanned aerial vehicles, *AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 3: 187–213.
- Dadkhah, N.; Mettler, B. 2012. Survey of motion planning literature in the presence of uncertainty: considerations for UAV guidance, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 65: 233–246.
- Dierks, T.; Jagannathan, S. 2010. Output feedback control of a quadrotor UAV using neural networks, *IEEE Transactions on Neural Networks* 21(1): 50–66.
- Efstathios, B.; Panagiotis, T. 2010. Time-optimal synthesis for the Zermelo-Markov-Dubins problem: the constant wind case, in *Proceedings of American Control Conference (ACC)*, 6136–6168.
- Fernando, N.; Sonnada, U. 2013. Wind field analysis using optical flow and fuzzy logic, *Proceedings of Technical Sessions* 29: 71–76.
- Gillula, J. H., *et al.* 2011. Applications of hybrid reachability analysis to robotic aerial vehicles, *International Journal of Robotics Research* 30(3): 335–354.
- Gimenes, R. A. V., *et al.* 2014. Guidelines for the integration of autonomous UAS into the global ATM, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 74: 465–478.
- 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.
- Goerzen, C.; Whalley, M. 2011. Minimal risk motion planning: A new planner for autonomous UAVs in uncertain environments, in *Proceedings of the AHS International Specialists Meeting on Unmanned Rotorcraft*, 1–21.
- Habib, M., *et al.* 2011. Wind gust alerting for supervisory control of a micro aerial vehicle, in *Aerospace Conference IEEE*, 1–7.
- Hermansson, J., *et al.* 2010. Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle, in *Reglermte Swedish Control Conference*, 1–5.
- Langelaan, J. W.; Alley, N.; Neidhoefer, J. 2010. Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 34(4): 1016–1030.
- Mayer, S., *et al.* 2012a. A, no-flow-sensor‘ wind estimation algorithm for unmanned aerial systems, *International Journal of Micro Air Vehicles* 4(1): 15–29.
- Mayer, S., *et al.* 2012b. Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models, *Meteorology and Atmospheric Physics* 116: 15–26.
- Martin, S.; Bange, J.; Beyrich, F. 2011. Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV „M²AV Carolo“, *Atmospheric Measurement Techniques* 4: 705–716.
- Nelson, D. R., *et al.* 2007. Vector Field Path Following for Small Unmanned Air Vehicles, In *Proceedings of American Control Conference*.
- Nonami, K., *et al.* 2010. *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Air Vehicles*. Tokyo: Springer-Verlag.
- Prats, H., *et al.* 2013. Enabling leg-based guidance on top of waypoint-based autopilots for UAS, *Aerospace Science and Technology* 24: 95–100.
- Reuder, J.; Jonassen, M. O. 2012. First results of turbulence measurements in a wind park with the small unmanned meteorological observer SUMO, *Energy Procedia* 24: 176–185.
- Scherer, S., *et al.* 2008. Flying fast and low among obstacles: Methodology and experiments, *International Journal of Robotics Research* 27(5): 549–574.
- Scheridan, T. B. 1992. *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Selecky, M., *et al.* 2013. Wind correction in flight path planning, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10: 1–10.
- Spiess, T., *et al.* 2007. First application of the meteorological Mini-UAV „M²AV“, *Meteorologische Zeitschrift* 16(2): 159–169.
- Techy, L.; Woolsey, A. 2009. Minimum-time path planning for unmanned aerial vehicles in steady uniform winds, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 32(6): 1736–1746.
- Whalley, M., *et al.* 2009. Field-testing of a helicopter UAV obstacle field navigation and landing system, in *Proceedings of the 65th Annual Forum of the American Helicopter Society (AHS)*.
- Wzorek, M.; Kvarnstrom, J.; Doherty, P. 2010. Choosing path replanning strategies for unmanned aircraft systems, in *Proceedings of the Twentieth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, 1–8.

SURVEY OF NAVIGATION ALGORITHMS AND THEIR USE FOR THE FLIGHTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN WINDY CONDITIONS

R. Kikutis, J. Stankūnas

Abstract

At this moment, unmanned aerial vehicles, navigation, guidance and control are fairly popular research topics. There are lots of works which are being done to increase automation level and flight accuracy of these aircrafts. In many articles there are much of information about the efforts done to increase the independence of various decision making processes. The main topic of this article is to highlight the connections between navigation, guidance and control algorithms and their use for various problems solving. As problematic area to apply these navigation, guidance and control algorithms, we have chosen accuracy of aircrafts trajectory in various wind and other meteorological conditions. This article gives a short survey about the recent years works in UAV navigation, guidance and control, the measurements of various meteorological parameters using UAV and the accuracy of the UAV flight in different meteorological environments.

Keywords: unmanned aerial vehicle, navigation algorithms, flight path, flight in windy conditions, automatic systems.