

Didelio masto orlaivių sistemos koordinavimas pasitelkiant būrio metaforą

Andrius Paulauskas

Vilniaus Universitetas, Matematikos ir informatikos fakultetas,
Didlaukio g. 47, LT-08303 Vilnius
andrius.paulauskas@mif.stud.vu.lt

Santrauka. Skraidantys bepiločiai orlaiviai yra naudojami įvairiose mokslo, prekybos, aplinkosaugos ar karo pramonės srityse. Numatoma, kad jų populiarumas ir pritaikymo atvejų kiekis nuolat augs. Todėl yra svarbu sukurti didelių sistemų koordinavimo metodus, kurie leistų užtikrinti aukštą skrydžių efektyvumą ir saugumo lygį, kartu įgalinant minimalias orlaivių gamybos išlaidas ir konstrukcinį paprastumą. Šio darbo tikslas yra sukurti didelio masto bepiločių orlaivių sistemos koordinavimo problemos sprendinį, sąlygojamą jų sistemai keliamų reikalavimų. Pasiūlymas yra dviejų metodų: klasikinio jėgų laukų ir euristinio pa-jusk-išvenk – junginys kartu su būriavimosi funkcija, kuris užtikrina saugų bepiločių orlaivių skrydžių koordinavimą naudojant minimalų konstrukcinių ir kompiuterinių išteklių kiekį. Tai autoriaus poziciją argumentais grindžiantis straipsnis (angl. *position paper*), kurio rezultatus numatoma patikrinti kompiuteriniu eksperimentu.

Raktiniai žodžiai: skraidantys bepiločiai orlaiviai, decentralizuotas koordinavimas, dronų būrys, autonominės sistemos, didelio masto sistemos.

1. Įvadas

Bepiločiai orlaiviai (angl. *unmanned aerial vehicle*, UAV) yra naudojami įvairių tipų užduotims atlikti: duomenų rinkimui, objektų transportavimui, nuotoliniam valdymui. Jų sistemos, kaip kolektyvo, sukūrimo vienas iš pagrindinių uždavinių yra koordinavimas. Mokslinėje literatūroje yra pasiūlyta daug to uždavinio sprendinių [1, 2, 3], tačiau bepiločių orlaivių įvairovė sąlygoja ir didelę sprendinių aibę galimoms jų kombinacijoms. Šiame darbe daromos prielaidos ir keliama šie ribojimai:

1. kolektyvas yra decentralizuota sistema, sudaryta iš UAV;
2. UAV yra visiškai savarankiškai veikiančios esybės;

3. UAV kompiuteriniai ištekčiai yra minimalūs, t. y. minimizuojama atmintis ir skaičiavimai – kiekvienas kolektyvo narys turi ribotas galimybes įsiminti informaciją ir vykdyti skaičiavimus dėl ribotų procesoriaus galimybių;
4. jutiklių sistema leidžia aptikti kitus UAV maksimaliu atstumu; maksimalus atstumas priklauso nuo jutiklių sistemos;
5. UAV tipų yra baigtinis skaičius, o atskirus tipus apibrėžia šie parametrai: akumuliatoriaus talpa ir svoris, kurį gali gabenti orlaivis skrydžio metu,

Skrendantį orlaivį paprastai nuotoliniu būdu valdo vienas operatorius. Tam tikroms užduotims atlikti gali tekti naudoti didelį kiekį vienu metu veikiančių orlaivių. Jeigu juos norima valdyti, dažnai renkama naudoti centralizuoto valdymo komponentą, kuris valdo visus orlaivius ir siunčia jiems iš anksto numatytus ir koordinuojančius nurodymus. Tokia sistema geba sėkmingai valdyti didelį kiekį orlaivių ir išvengti susidūrimų, tačiau turi vieną kritinį tašką: jeigu orlaiviai praranda ryšį su centriniu valdymo komponentu, visa sistema gali prarasti savo funkcionalumą.

Dėl to, reikalinga alternatyva – orlaivių kolektyvas, kuris geba atlikti didelio masto išskirstytus skaičiavimus, o kolektyvo agentai geba tarpusavyje koordinuotis - išvengti susidūrimų su statinėmis bei dinamiškomis kliūtimis. Tam, kad orlaiviai gebėtų naviguoti erdvėje esant dideliame kiekiui kitų orlaivių, šiame darbe yra pasitelkiama būrio metafora ir skatinamas grupinis judėjimas. Siūlomas sprendinys siekia taupyti orlaivio energiją, naudojamą skrydžio metu, bei palaikyti žemus orlaivių gamybos kaštus, kas lemia tik būtiniausias jutimo ir skaičiavimų galimybes.

Kituose skyriuose pateikiami komentarai apie susijusius darbus, informacija apie aktualias orlaivių koordinavimo ir kliūčių vengimo technologijas, bei aprašomas siūlomas orlaivių, kaip kolektyvo, koordinavimo metodas, integruojantis jėgų laukų ir pajusk-išvenk metodus kartu su būrio sudarymo taisyklių rinkiniu.

2. Susiję darbai

Sistemų, kaip kolektyvų, koordinavimo uždavinys mokslinėje literatūroje yra plačiai nagrinėjamas. Jis yra įvardijamas kaip susidūrimų išvengimo sistemos, transporto kelio planavimas, daugiaagentinių sistemų koordinavimas,

transporto tinklo koordinavimas, intelektualių kolektyvų koordinavimas. Todėl susijusių darbų analizė atlikta dviem žingsniais. Pirmiausia, buvo išanalizuotos nagrinėjama tema parašytos analitinės apžvalgos [1, 4, 5], kuriose išanalizuoti ir suklasifikuojami pasiūlyti metodai. Tuo remiantis buvo susiaurinta nagrinėtinų metodų aibė, pasirinkta sprendžiamo uždavinio ribojimus tenkinančių metodų aibė ir atlikta jų kritinė analizė.

Nagrinėjant analitines apžvalgas galima padaryti šias išvadas:

1. didesnioji dalis metodų yra skirti vieno nepilotuojamo orlaivio kelio nustatymui statinėje aplinkoje [1];
2. nebrangiems, griežtus minimalius atminties ir skaičiavimų galimybių ribojimus tenkinantiems UAV susidūrimų vengimui galima taikyti klasikinius, euristinius ir populiacija grindžiamus metodus (pagal [1, 5] darbe pateiktą klasifikaciją) arba jėgų laukų (klasikinis) ir pajusk-išvenk (euristinis) metodus (pagal [4] darbe pateiktą klasifikaciją);
3. nebrangiems, turintiems aktyvius jutiklius su minimaliomis kliūčių identifikavimo charakteristikomis UAV galima taikyti pajusk-išvenk metodus (pagal [4] darbe pateiktą klasifikaciją);
4. jei UAV traktuojami kaip kolektyvo nariai, didesnioji dalis metodų yra skirti išvengti susidūrimų, kai jie kooperuojasi siekdami atlikti bendrą užduotį ar užduotis [5].

Apibendrinant, galima teigti, kad mūsų nagrinėjamai problemai spręsti tinka klasikiniai, euristiniai ir populiacija grindžiami metodai.

Sistema, suprantama kaip kolektyvas, apibrėžiama kaip pakankamai didelė subjektų grupė, kur kiekvienas subjektas siekia asmeninės naudos, bet kartu grupiniais veiksmais gali būti pasiekta ir visos sistemos nauda, o taip pat gali būti užtikrinamas aukštesnio lygmens intelektas [6]. Pastebėsime, kad šiame darbe nagrinėjamo kolektyvo kiekvienas narys siekia savo tikslų; o sistemos požiūriu gaunamas sąlyginis sinergetinis efektas – galimybė pasiekti tikslus visiems kolektyvo nariams. Tai dar labiau susiaurina taikytinų metodų aibę.

Paprasčiausi euristiniai pajusk-išvenk Bug algoritmai, kurie nagrinėjami [7] darbe, negalėtų užtikrinti patikimo kliūties išvengimo dinamiškoje aplinkoje. Šie algoritmai reikalauja minimalių aplinkos duomenų ir patenka į „godžių“ (angl. *greedy*) algoritmų grupę, nes jie visada pasirenka pirmą aptinkamą užduoties sprendinį, kuris retai būna geriausias iš galimų sprendinių. Bug algoritmai pasižymi žemu efektyvumu jeigu naudojami pavieniui,

bei gali pasimesti ir nerasti sprendimo sudėtingos formos aplinkose, tačiau, juos galima panaudoti kaip didesnio sprendinio dalį. Tačiau, šie algoritmai reikalauja nedaug skaičiavimo pajėgumų ir gali suteikti staigaus kliūties išvengimo ir apėjimo galimybes pritaikius didesnėje sistemoje.

Kad sukurti patikimą ir efektyviai veikiančią sistemą, siūloma naudoti reaktyvų jėgos laukų metodą, apjungtą su Bug 0 algoritmu. [8] darbe nagrinėjamas susidūrimų išvengimas, su statinėmis ir dinaminėmis kliūtimis, pasitelkiant jėgų laukus. Šis metodas naudojamas paprastos navigacijos užduočių atlikimui ir kliūčių išvengimui, tačiau jį pasitelkus gali kilti problemų didelio judesio ir aplinkos erdvės užimtumo atvejais. Jėgos laukų metodas yra tinkamas naudojimui paprastos struktūros, statinėse, ar nestaigiai besikeičiančiose aplinkose, tačiau jam veikiant pavieniui gali kilti problemų aukšto sudėtingumo statinėse aplinkose, bei pernelyg staigiai besikeičiančiose dinamiškose aplinkose [4]. Dėl to siūloma apjungti šį metodą kartu su paprastu pajusk-išvenk tipo Bug tipo metodu.

[2] darbe nagrinėjamas susidūrimų išvengimas, kai būrys keičia savo konfigūraciją arba kyla grėsmė susidurti dviem būriams. Metodas pritaikomas dideliems orlaivių kiekiams būriuose, tačiau jis grindžiamas judesio vektorių skaičiavimu ir ateities pozicijų numatymu, kam reikia didelių skaičiavimo galimybių, kai didelis orlaivių kiekis juda ribotoje aplinkoje. Analogiška problema sprendžiama [3] darbe, papildomai apimant reaktyvų susidūrimų vengimo mechanizmą, kas leidžia koordinavimą valdyti naudojant tik integruotų jutiklių duomenis. Tačiau, tam kad įvertinti kitų UAV padėtį, naudojama įvairiakryptė kamera ir vaizdo apdorojimo metodas, o tai reikalauja didelių išteklių duomenims apdoroti.

3. Kolektyvo koordinavimas jungiant jėgų laukų ir Bug 0 metodus

Naudojant pritaikytą klasikinio jėgų laukų ir euristinio pajusk-išvenk Bug 0 kliūčių išvengimo ir kelio paieškos metodų junginį kartu su būrio sudarymo taisyklių rinkiniu yra sukuriami išskirstyta reaktyvių orlaivių koordinavimo sistema, kuri geba užtikrinti skrydžio tikslo pasiekimą efektyviai išvengiant susidūrimų.

Tokia sistema leidžia orlaiviui:

1. skristi tikslo link, išvengiant statinių kliūčių, bei kitų pavieniui skrendančių orlaivių, ar orlaivių būrių,

2. aptikti kitus orlaivius ir nustatyti, ar jų skrydžio kryptis artima savo skrydžio kryptčiai; jeigu dviejų orlaivių skrydžio kryptys yra artimos, orlaiviai gali kartu sudaryti būrį, ir skristi kartu tikslo link,
3. atsiskirti nuo orlaivių būrio, jeigu orlaivis nustato, kad kryptis savo tikslo link išsiskyrė nuo būrio skrydžio krypties.

Kadangi siekiama sukurti minimaliai sudėtingą, patikimai veikiantį sprendimą, sistemos orlaiviams pasirinkta suteikti šias priemones:

1. LIDAR jutiklį [4],
2. trumpo atstumo komunikacijos modulį (kaip 802.11 standarto prietaisą),
3. inercinę matavimo sistemą (magnetometras, giroskopas, akcelerometras),
4. pozicijos nustatymo sistemą (GPS).

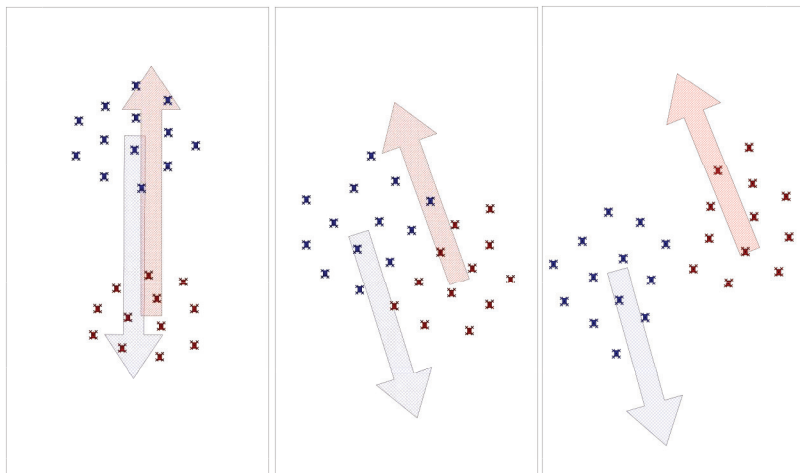
Kiekvienas sistemos orlaivis turės prieigą tik prie savo jutiklių duomenų. Tarp užduoties pradžios ir pabaigos orlaiviai operuos visiškai savarankiškai.

Skrydžio metu orlaiviai apdoroja savo LIDAR jutiklių gaunamą informaciją ir pagal tai sukuria dirbtinius jėgos laukus, kuriuose statinės kliūtys ir kiti skrendantys orlaiviai skleidžia stūmos jėgą. Siekiant apsaugoti orlaivius nuo situacijų, kuriose orlaivis patenka į jėgos laukų lokalaus minimumo tašką ir nesugeba iš ten pajudėti, prijungiamas euristinis pajusk-išvenk metodas, kuris tokiais atvejais įjungia reaktyvų Bug 0 algoritmą [7]. Šis Bug 0 algoritmas reiškia, kad orlaivis pradės sekti kliūties sieną iki tol, kol galės toliau judėti tikslo link. Kliūties vengimo metu orlaivis taip pat mėgins didinti savo aukštį, siekdamas apskristi kliūtį iš viršaus.

Tuo pačiu metu, kiekvienas orlaivis į aplinką siunčia signalus apie savo GPS koordinatų poziciją ir kryptį tikslo link. Kiti netoliese esantys sistemos agentai gaudo tuos signalus ir lygina gautus duomenis su savo skrydžio informacija. Atlikę atstumo, bei krypties artimumo skaičiavimus, orlaiviai atsižvelgia į savo būriavimosi taisyklėse aprašytus parametrus ir nusprendžia, ar jiems verta skristi kartu. Šis veiksmas leidžia sudaryti orlaivių būrius, kur visi būrio nariai siekia savo tikslų ir skrenda ta pačia kryptimi. Toks būriavimosi mechanizmas leidžia dideliems orlaivių kiekiams lengviau prasilenkti.

1 pav. matoma situacija, kurioje 12 orlaivių siekia skristi link kitų 12 orlaivių, kurie skrenda priešinga kryptimi. Šie orlaiviai panaudoję savo komunikacijos modulius, kad atpažintų kitus artimus orlaivius, ir sudarytų būrį

su tais, kurie skrenda ta pačia kryptimi. Dėl to susidaro 2 orlaivių būriai po 12 narių. Galiausiai, du priešingomis kryptimis skrendantys orlaivių būriai sugebėtų efektyviai prasilenkti neprarandant savo būrio vientisumo.



1 pav. Vaizdų rinkinys, kuriame matomas dviejų, priešprieša skrendančių, orlaivių būrių prasilenkimo veiksmas

4. Išvados

Siekiant pasitelkti didelius skraidančių orlaivių kiekius užduočių įgyvendinimui svarbu užtikrinti visų sistemos dalyvių saugumą. Šiam tikslui pasiekti galima pritaikytų daugelį skirtingų mokslinėje literatūroje aprašytų koordinavimo būdų, kurie skiriasi reikalingos ir apdorojamos informacijos kiekiu, orlaivių elgsena ir techninėmis charakteristikomis. Siekiant sumažinti atliekamų skaičiavimų ir naudojamos atminties kiekius, naudojamas dviejų reaktyvių kliūčių išvengimo metodų junginį kartu su būriavimosi funkcija. Šiame darbe nurodytus reikalavimus tenkinantiems bepiločiams orlaiviams koordinuoti reikia taikyti klasikinį jėgos laukų kliūčių išvengimo metodą kartu su euristiniu pajusk-išvenk kliūčių išvengimo metodu ir būriavimosi funkcija.

Tęsiant aprašytą tyrimą, numatoma atlikti gautų teorinių rezultatų vertinimą simuliacinėje aplinkoje.

Padėka. Autorius dėkoja Duomenų mokslo ir skaitmeninių technologijų instituto doc. Audronei Lupeikienei už patarimus ir konsultacijas šio projekto metu, bei rengiant šį straipsnį.

Literatūra

- [1] Amylia Ait Saadi. Coordination of scout drones (UAVs) in smart-city to serve autonomous vehicles. Université Paris Saclay, Doctoral Thesis, 2024. Randamas adresu: <https://theses.hal.science/tel-04530665>.
- [2] Marek, D.; Biernacki, P.; Szyguła, J.; Domanski, A.; Paszkuta, M.; Szczygieł, M.; Krol, M.; Wojciechowski, K. Collision Avoidance Mechanism for Swarms of Drones. *Sensors* 2025, 25, 1141. <https://doi.org/10.3390/s25041141>.
- [3] Afzal Ahmad, Daniel Bonilla Licea, Giuseppe Silano, Tomáš Báča, Martin Saska. PACNav: a collective navigation approach for UAV swarms deprived of communication and external localization. *Bioinspiration & Biomimetics* 17(6), November 2022, 1-19.
- [4] Jawad N. Yasin; Sherif A. S. Mohamed; Mohammad-Hashem Haghbayan; Jukka Heikkonen; Hannu Tenhunen; Juha Plosila. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Collision Avoidance Systems and Approaches. *IEEE Access* (Volume: 8), 2020, 105139 – 105155.
- [5] Soheila Ghambari, Mahmoud Golabi, Laetitia Jourdan, Julien Lepagnot, Lhassane Idoumg-har. UAV Path Planning Techniques: A Survey. *RAIRO Operations Research* 58(4), 2024, 951–2989.
- [6] Ioanna Lykourantzou, Dimitrios J. Vergados, Vassili Loumos. Collective Intelligence System Engineering. *MEDES '09: Proceedings of the International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems*, 2009, Article No.: 20, 134–140.
- [7] Gupta, S., Asha, C. S., & D'Souza, J. M. (2023). Implementation and Comparison of BUG Algorithms on ROS. 2023 2nd International Conference for Innovation in Technology, INOCON 2023. <https://doi.org/10.1109/INOCON57975.2023.10101325>.
- [8] Almira Budiyanto, Adha Cahyadi, Teguh Bharata Adji, Oyas Wahyunggoro. UAV Obstacle Avoidance Using Potential Field under Dynamic Environment. *Proceedings of the International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCE-REC)*, 2015, 187–192.