

УДК 629.072:623.746-519

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.053846

А. Ю. КИР'ЯНОВ, аспірант,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ГРУПОВОГО КЕРУВАННЯ АУТОНОМНИМИ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

Для забезпечення координації та ефективної взаємодії між групами автономних мобільних роботів існує кілька підходів, які можуть бути використані для досягнення спільної мети і розв'язання завдань в автономних системах та робототехніці. Ці підходи охоплюють метод, який базується на основному полі та «лідер-ведений», а також поведінковий підхід і стратегію на основі консенсусу. Кожен із цих методів має свої характеристики та переваги, і вони можуть бути використані залежно від конкретних умов та завдань у контексті автономних систем та мобільних роботів. Підхід на основі основного поля та «лідера-веденого» обґрунтовується на імітації руху частинок у потенційному полі, де один із роботів може виступати як «лідер», а інші прямують за ним. Цей метод забезпечує рух у напрямку до заданої цілі та дає змогу уникнути завад на шляху проходження відстаней та напрямків. Поведінковий підхід передбачає використання набору правил та алгоритмів, які починають поведінку кожного в групі. Кожен робот має власні «повідінкові» правила, застосовні для реагування на конкретні умови. Такий підхід надає гнучкості та адаптивності за різних сценаріїв та ефективності роботи груп, що працюють за різноманітних умов. Підхід на основі консенсусу базується на ідеї досягнення придатності та синхронізації роботів між собою в групі. Роботи обмінюються інформацією та взаємодіють між собою для досягнення загальної узгодженості в їхньому русі та діяльності. Цей метод забезпечує спільну координацію та виконання завдань, які потребують взаємодії між роботами. Вибір конкретного підходу залежить від призначення та вимог завдань, а також з огляду на конкретні умови. Здебільшого комбінація цих методів може бути ефективним вирішенням для розв'язання складних завдань і досягнення максимально ефективної взаємодії між роботами. Усе це сприяє подальшому розвитку автономних систем та забезпечує їхню здатність працювати як об'єднана група в різних сферах, включно з транспортом, логістикою та іншими важливими галузями.

Ключові слова: лідер-ведений; групове керування; безпілотний літальний апарат; нейронні мережі; бази даних; ідентифікація стану; потенційне поле; віртуальні структури.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку безпілотної авіації важливим є одночасне застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для виконання поставлених завдань. При цьому БПЛА виконують політ одночасно, за узгодженими маршрутами, на заданих відстанях один від одного для досягнення спільної мети. Такий політ сукупності БПЛА в теорії та практиці застосування безпілотної авіації дістав назву групового польоту БПЛА.

Безпілотні літальні апарати можуть мати різні конфігурації, що визначають їхню специфіку та можливість. Основними типами конфігурацій БПЛА є такі:

- *Quadcopter*: має чотири ротори, які уможливають вертикальний зліт та приземлення. Цей тип конфігурації відомий стабільністю та маневреністю;
- *Hexacopter*: має шість роторів, що дає змогу збільшити важкі навантаження та забезпечує більшу стабільність разом із *Quadcopter*;
- *Octocopter*: із вісьмома роторами він має ще більшу стабільність зі здатністю до нарощення важких навантажень;
- *Fixed-Wing*: має традиційні крила, як у звичайних літаків, даючи змогу літати на великій відстані та тривалому часі;
- *Hybrid*: комбінує в собі риси різних типів, наприклад, може працювати як мультироторний і фіксованокрилий;
- *Гелікоптер (Helicopter)*: має характеристики гелікоптера з одним або більшою кількістю роторів для вертикального зльоту та приземлення;
- *БПЛА з вертикальним зльотом і приземленням (VTOL)*: має здатність до швидкого переходу від вертикального до горизонтального поля;
- *Autogyro*: комбінує принципи літака та гелікоптера, але має специфічну конструкцію.

Вагоме значення має керування літальними апаратами в груповому польоті, яке переважно залежить від взаємодії між апаратами.

Класифікація груп БПЛА на основі типів взаємодій між апаратами

1. *Безпосередня фізична взаємодія.* У цьому контексті БПЛА безпосередньо взаємодіють один з одним, і їх рух обмежений силами, що залежать від руху інших БПЛА. Наприклад, це може стосуватися підйому та транспортування вантажів кількома БПЛА. З погляду планування маршруту та уникнення зіткнень усі агенти можуть розглядатися як єдине ціле. Оскільки зазвичай кількість апаратів невелика, то можуть використовуватися як централізовані, так і децентралізовані системи керування.

2. *Формації.* Апарати не мають прямого з'єднання між собою, і їх відносні положення строго визначаються з метою збереження їх форми. Під час планування маршруту для групи кількох БПЛА їх можна розглядати як єдиний об'єкт. Запобігання зіткнень між цими апаратами може бути вбудовано в алгоритми керування формою. У такому підході важливо забезпечити масштабованість, і, відповідно, децентралізовані методи керування стають більш перспективними.

3. *Рої апаратів.* Група складається з кількох БПЛА, і алгоритми взаємодії між ними регулюють їх колективну дію. У результаті рух групи може не завжди набирати формальної формації. Однак основним викликом у цьому підході є забезпечення масштабованості, і тому використання децентралізованих алгоритмів стає нагальною умовою.

4. *Кооперація.* БПЛА в групі планують свій рух на основі окремих завдань, які розподіляються з метою виконання більш високорівневої місії в системі керування. Такі траєкторії зазвичай геометрично взаємозв'язані, як під час формацій. У цьому разі такі проблеми, як розподіл завдань, планування високого рівня, розбиття плану на підзавдання, розв'язання конфліктів, мають бути вирішені для виконання місії високого порядку. Отже, мають застосовуватись і централізовані, і децентралізовані архітектури систем керування.

Проаналізувавши основні найбільш поширені в літературі підходи до керування формуванням та підтриманням строю автономних роботів, зокрема БПЛА, було визначено позитивні та негативні сторони, на основі яких можна дійти висновку, що найбільш поширеними методами групового керування є централізовані підходи через простоту їх реалізації. Частими проблемами сучасних підходів є неможливість реалізації строю довільної геометричної форми та строгий математичний аналіз стійкості алгоритмів.

Актуальність запропонованої статті впливає зі зростання використання автономних мобільних роботів у сучасних технологіях. У різних галузях, зокрема автомобільній промисловості, медицині, виробництві, транспорті та багатьох інших, використання безпілотних роботів стає все більш затребуваним. Велика частина цього поширення забезпечується здатністю безпілотних систем працювати як єдині системи в групах.

Важливість групового керування полягає в тому, що це дає змогу роботам ефективно взаємодіяти один з одним, координувати дії та виконувати спільні завдання, поліпшуючи тим самим продуктивність та безпеку робочих процесів.

Мета дослідження — аналіз наявних підходів до групового керування автономними БПЛА та виявлення можливостей для подальшого розвитку цієї галузі.

Актуальність статті зумовлено такими тенденціями. Як відомо, нині в сучасному світі спостерігається бурхливий розвиток автономних систем, зокрема БПЛА. Ця технологія містить все більше програм у різних сферах, включно з транспортом, логістикою, моніторингом навколишнього середовища та безпекою. Отже, однією з головних вимог до роботи таких систем є їхня здатність працювати великими групами або утвореннями, що ставить питання групового керування перед науковцями та інженерами. Важливо розробити методи та стратегії, які дають змогу БПЛА взаємодіяти між собою, координувати дії та виконувати спільні завдання.

Нещодавні дослідження та публікації в цій галузі зазначають зростання інтересу до проблеми групового керування БПЛА. З'являються нові підходи та технології, спрямовані на оптимізацію спільної роботи автономних літальних апаратів у формаціях. Крім того, дослідники вивчають можливість обміну навігаційними даними між БПЛА, а також методи вимірювання їх відносних положень у просторі.

Огляд основних підходів до керування групами, зокрема БПЛА, вказує на переваги та недоліки кожного методу. Цей аналіз свідчить про те, що централізовані підходи до керування БПЛА відомі своєю простотою в реалізації, але мають свої обмеження, зокрема щодо форм геометричної конфігурації. Також вони вимагають складного математичного аналізу для забезпечення стійкості алгоритмів.

Звідси впливає потреба в розвитку більш децентралізованих та адаптивних підходів до керування формуваннями БПЛА. Такі підходи мають потенціал покращити безпеку, зменшити витрати та розширити можливості використання БПЛА в різних галузях, не потребуючи спільної координації та взаємодії.

Огляд останніх досліджень та публікацій. Аналіз останніх публікацій показує, що науковці всього світу активно провадять дослідження у сфері групового керування автономними БПЛА та виявлення можливостей для подальшого розвитку цієї галузі [1; 2].

Автори статті [3; 4] аналізують низку недоліків у груповому керуванні, що потребує додаткових фундаментальних і прикладних досліджень, а також досвідчених розробок. Насамперед — це непередбачуваність та труднощі інтерпретації руху (як окремих роботів, так і зграї загалом) для зовнішнього оператора чи спостерігача. Також можлива нестійкість (хаотичність) колективного руху роботів. Зазначений недолік пояснюється високим рівнем складності, нелінійністю та нестаціонарністю поведінки зграйних систем.

Дослідники в статтях [5; 6] розглядають керовану хаотичність і непередбачуваність траєкторії руху зграй роботів як дуже цінну перевагу у військових та спеціальних застосунках.

У галузі зграйної робототехніки також є низка недостатньо вивчених науково-технологічних проблем. Зокрема, до них належать:

- дефіцит концепцій застосування групової робототехніки у цивільній, спеціальній та військовій сферах;
- недосконалість методів автономної координації руху та ухвалення рішень у зграї для окремих застосунків;
- проблеми ідентифікації стану зовнішнього середовища;
- методи визначення відповідності характеристик зграйних робототехнічних систем установленим вимогам (через відсутність нормативного базису та обмеженість спектра очікуваних умов) експлуатації, які можуть бути відтворені на етапі випробувань;
- засоби спостереження локального простору робота та ідентифікації завод у різних фізичних середовищах;
- способи дублювання спостереження локального простору в різних діапазонах електромагнітного спектра;
- методи розпізнавання динамічних образів та синтезу узагальненої картини обстановки, що спостерігається на основі даних, які надходять від різних давачів;
- способи планування та перепланування завдання, розподілу та перерозподілу функцій у зграї;
- ефективна «мова спілкування» роботів у зграї, способи гарантованого обміну інформацією;
- забезпечення надійності виконавчих механізмів та силового устаткування;
- способи пошуку джерел енергії та автономного підзаряджування роботів у процесі застосування в польових умовах;
- характеристики змінного обладнання корисного навантаження (вага, габаритні розміри, модульність, уніфікація інтерфейсу, енергоспоживання, номенклатура тощо);
- методи організації людино-машинного інтерфейсу високого рівня;
- методи уникнення зіткнень;
- способи протидії робототехнічним зграям, описаних у [7; 8].

У працях [9; 10] визначено обмеження зграйної моделі. Як і будь-яка технічна концепція, модель зграйної робототехніки має свої важливі обмеження. До них, зокрема, належать фізичні обмеження, які накладаються на допустимі параметри руху та керування мобільними апаратами із шістьма ступенями свободи, що характерні для основних фізичних середовищ (повітряний простір, підводний простір, водна поверхня, тверда поверхня тощо).

Інша частина обмежень [11] зумовлена використанням принципів самоорганізації, і вона охоплює спостереження локального простору за умов завод, динамічні характеристики рухомих перешкод та інших об'єктів, розмір вільного простору для руху, обмеження використовуваних способів зв'язку.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Існує кілька критеріїв до завдання формування строю групи автономних мобільних роботів: підхід на основі потенційного поля, «лідер-ведений»; поведінковий підхід; підхід на основі консенсусу.

Метод «лідер-ведений»

Одним із найпоширеніших у дослідженнях поглядів щодо керування строєм є підхід «лідер-ведений». «Ведені» апарати вибудовують свої відносні положення лише стосовно одного з апаратів, вибраного як «лідер» (рис. 1).

У дронах вивчалась автоматизація польоту винищувачів у строю та аналізувався рій літаків виду «кільватер» за схемою «лідер-ведений». Як показали результати моделювання, внаслідок інерційності літальних апаратів виникають коливання відносних положень за такого керування строєм, причому



Рис. 1. Структурна схема методу керування «лідер-ведений»

вони посилюються з віддаленням від «лідера». Як приклад вивчається стійкість формації у вигляді плоского ланцюжка об'єктів, що рухаються, кожна пара яких пов'язана положенням із «лідером». Діяльність децентралізованого керування формацією автономних апаратів складається із «лідерів», «ведених» та «лідера формації». Моделювання показало, що чотири апарати формуються в рівновіддалену колову формацію, тоді як «лідер формації» здійснює рух коловою траєкторією.

Переваги методу «лідер-ведени». Однією з головних переваг є простота в реалізації. Під час процесу ця задача розбивається на безліч простих підзадач для всіх «ведених», які мають лише отримувати відомості про стан лідера. Отже, група може складатися з більш технологічно простих «ведених», яким немає потреби самостійно розв'язувати проблему планування шляху, та обладнання «лідера». Якщо лідер піддається зовнішнім факторам, формація зберігає свою реалізованість.

Недоліки методу «лідер-ведени». Недоліком методу є відсутність зворотного зв'язку від «ведених» до «лідера» та вразливість строю до втрати «лідера». Отже, наприклад, якщо «ведені» не зможуть підтримувати задані відносні відстані щодо «лідера», він не підлаштуватиме свою поведінку під ситуацію, що призведе до неможливості збереження строю. Якщо «відомі» зазнають зовнішніх збурень, живучість формації перебуває під загрозою.

Метод потенційного поля

За останні кілька років метод потенційного поля набув досить значного поширення в дослідженнях, пов'язаних із мобільними автономними роботами. У різних статтях цього методу можуть бути різні назви, зокрема Potential Field Approach, Artificial Potential Approach тощо.

Заведено вважати, що вперше метод потенційного поля запропонував Khatib на початку 1980-х років, хоча аналогічні дослідження незалежно відбувалися в нашій країні та їх результати було опубліковано ще 1974 року. Суть даного методу полягає у створенні штучного потенційного поля у просторі в такий спосіб, щоб цільова точка опинилася в глобальному мінімумі потенціалу, тоді як усі завади та стіни перебували на піднесенні. У цьому разі робот у робочому просторі випробовуватиме сили тяжіння у напрямку до мети та сили відштовхування з боку завод, при цьому підсумкова сила повністю визначатиме напрямок та швидкість переміщення робота.

Проектування потенційної функції в аналізованому підході історично здійснювалося двома різними шляхами: як локального, так і глобального полів. У разі формування локальної функції потенційне поле тяжіння та потенційне поле відштовхування задаються окремо. Прикладами потенційних функцій є: GPF-функція, запропонована Krogh; FIRAS-функція у роботі Khatib; суперквадрик-функція; «нова» потенційна функція; гармонічна потенційна функція тощо. Подібні підходи привабливі через невелику обчислювальну складність, оскільки не потрібно виконувати жодних обчислень до початку руху.

Одним із недоліків такого підходу є можливість появи локального мінімуму внаслідок непередбачуваного характеру підсумкового потенційного поля. Якщо робот потрапляє в локальний мінімум, він не досягає своєї мети, оскільки виявляється в стані статичної рівноваги. Іншим важливим недоліком є складність передбачення реальних траєкторій робота, що призводить до відсутності їхньої оптимальності. Задля усунення цих недоліків було висунуто безліч різних пропозицій, наприклад суперквадрик-функцію штучного потенціалу (Superquadric Artificial Potential Functions), із використанням якої локальний мінімум не виникає через асимптотично-сферичний характер суперквадрик-потенціалу. Однак цей підхід ефективний лише в разі поодинокі завади, оскільки множинні завади можуть створити локальний мінімум.

Як інший приклад спроби вирішення недоліків методу потенційного поля можна назвати запровадження гармонічної потенційної функції. Такі характеристики гармонічних функцій, як принцип максимуму і властивість середнього зумовлюють відсутність локального мінімуму. Проте внаслідок того, що для керування в режимі реального часу використовується локальний підхід, можливе утворення так званого структурного локального мінімуму, визначення якого звучить так: «структурний локальний мінімум — це стан статичної рівноваги, коли робот не може рухатися за наявності поточного штучного потенціалу». Для розв'язання цієї проблеми пропонується введення на розгляд штучно створюваної завади, що змінює картину поля, або модифікація підходу ще на початковому етапі через створення функції навігації, завдяки якій поле стає глобальним, а не локальним. Головний недолік глобального підходу на основі потенційного поля полягає у більшій обчислювальній складності, оскільки потрібна повна апіорна інформація про топографію робочого простору, що може призвести до непридатності цього методу для алгоритмів реального часу.

Метод потенційного поля для формування строю мобільних роботів

Метод потенційного поля спочатку було розроблено як спосіб планування шляхів для поодинокого робота. Однак якщо припустити, що не тільки завади та цілі, а й самі роботи можуть впливати один на одного за допомогою віртуальних сил, то аналізований підхід може бути використаний для формування рою мобільних роботів та подальшого спільного обходу ними завод із збереженням заданої формації.

У статті пропонується новий клас потенційних функцій, названих «соціальним потенціалом», покликаних вибудовувати групи роботів геометричної формації на шляху до мети через серію завод. Сила відштовхування від завод задається так:

$$V_{\text{magnitude}} \begin{cases} 0, r > S; \\ \frac{s-r}{s-M}, M < r \leq S; \\ \infty, r \leq M, \end{cases}$$

де S — параметр, що визначає радіус сфери впливу, за межами якої не формується відштовхування; M — параметр радіуса зони безпеки, в межах якої сила відштовхування прагне до нескінченності. Напрямок сили — вздовж лінії, що з'єднує центр завади та робота, у напрямку від завади.

Сила тяжіння, що спрямовує робота в задане положення в рою:

$$V_{\text{magnitude}} \begin{cases} 1, r > C; \\ \frac{r-D}{C-D}, D < r \leq C; \\ 0, r \leq D, \end{cases}$$

де C — радіус сфери, що визначає «зону контролю», в якій задано максимальне тяжіння; D — радіус сфери «мертвої зони», всередині якої тяжіння відсутнє.

Метод потенційного поля застосовувався на розв'язанні завдання польоту рою БПЛА. Також цей підхід було застосовано для керування строями як мобільних наземних роботів, так і БПЛА вертолітних схем. Така стратегія керування в первісному вигляді передбачає отримання рівновіддалених формацій, у такий спосіб значно обмежуючи набір кінцевих геометричних форм строю. Через велику кількість взаємних зв'язків між агентами масштабованість утруднена. Існують також роботи, в яких застосовується архітектура взаємодії «лідер-ведений» у межах підходу на основі потенційного поля.

Переваги. Головними перевагами є невисока обчислювальна складність та простота реалізації, а також можливість строгого математичного аналізу системи загалом.

Недоліки. Крім можливостей виникнення локальних мінімумів, у такому підході часто не приділяють уваги архітектурі взаємодії, покладаючись на те, що кожен із агентів у групі отримує стан всіх інших, що важко реалізується для великих формацій апаратів. Водночас метод зазвичай передбачає набуття довільної геометричної форми строю, обмежуючись рівновіддаленими побудовами.

Метод віртуальних структур

У цьому підході керування строем виконуються в три етапи:

- 1) розраховується бажана динаміка віртуальної структури;
- 2) стани віртуальної структури трансформуються у відповідні стани кожного агента;
- 3) закони керування для кожного з агентів реалізуються для відстеження траєкторій відповідно до попередніх кроків.

Водночас кожен агент має точно розрахувати свій рух для переміщення в задані вершини віртуальної структури, що рухається у вибраний спосіб. Отже, у цьому підході потрібне точне обчислення координат роботів у певній глобальній системі координат, що не є досяжною або необхідною умовою виконання місії (рис. 2).

Оскільки цей підхід передбачає лише отримання форми строю як багатокутників, то було запропоновано модифікацію, звану методом віртуальних лідерів, де група віртуальних агентів задає як рух реальних апаратів, так і саму форму строю. Ця модифікація є гнучкішою стратегією керування, проте складність системи зростає зі зростанням кількості реальних апаратів (отже, і віртуальних лідерів) групи.

Переваги. На відміну від методу «лідер-ведені» немає єдиної вразливої ланки в системі. Стрій має достатню стійкість до зовнішніх збурень через наявність зворотного зв'язку від віртуальної структури до всіх апаратів групи. Поведінку строю за таких умов досить легко передбачити, що дає змогу без труднощів зберігати форму строю під час руху або відстеження траєкторії.

Недоліки. У разі реального польоту БПЛА через високу динаміку подій, наявність різних атмосферних збурень, а також нелономної динаміки самих апаратів, стає проблематичним отримання структури з одночасним відстеженням функції бажаних станів віртуальної структури кожним з апаратів. Як у методі «лідер-ведені» відсутній зворотний зв'язок від «ведених» до «лідера», у цьому підході немає зворотного зв'язку від «ведених» до самої віртуальної структури. Отже, такий метод є кращим для супутників або наземних мікророботів, що працюють, наприклад, за умов контрольованих приміщень. Крім того, велике обчислювальне та комунікативне навантаження лягає на централізований вузол керування.

Поведінкові підходи

З огляду на зазначене раніше пересвідчуємося, що дослідників приваблює та викликає чималий інтерес розроблення децентралізованих підходів до кооперативного керування строєм або так званий мультиагентний підхід, коли кожен автономний робот (агент) самостійно ухвалює рішення про свою поведінку на основі доступної йому інформації (рис. 3). До таких методів належать, зокрема, поведінковий підхід, вперше запропонований для моделювання польоту зграї птахів.

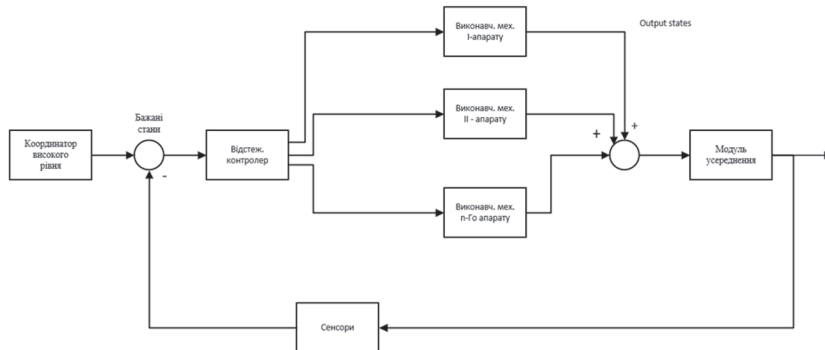


Рис. 3. Схема поведінкового підходу під час керування роєм

Далі цей метод було розвинено та застосовано для формування строю наземних мобільних роботів та автоматичного польоту літаків у строю. Оскільки в цьому підході підсумкові закони керування для кожного агента конструюються як виважене середнє різних ліній поведінки, то підсумкова поведінка може виявитися складно передбачуваною. Крім того, виникають складнощі для аналітичного дослідження таких систем методами математики. Отже, збіжність групи до заданої геометричної форми строю в цьому підході зазвичай може бути гарантована.

Проте поведінковий підхід дає перевагу як можливості дії групи за мінливих непередбачуваних зовнішніх умов. Далі застосовується гібридна схема керування, що поєднує поведінковий підхід та систему ухвалення рішень на вищому рівні керування. Поведінкові команди при цьому отримують рівні пріоритету та проходять через кінцевий автомат для генерації керування кожним автономним роботом.

Поведінку агентів-БПЛА реалізовано за допомогою технологій нечіткої логіки на формування строю квадрокоптерів. Також вивчається поведінкова модель кооперації агентів (автономних роботів), що функціонує на основі моделей соціальної поведінки. Іноді застосовується гібридна схема, що поєднує поведінковий підхід та метод «лідер-ведені».

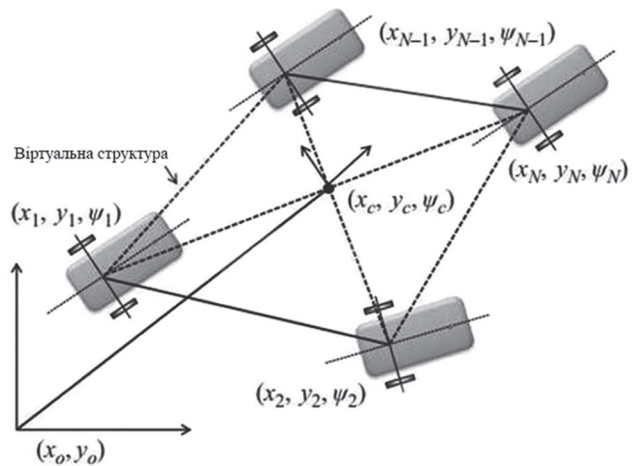


Рис. 2. Приклад віртуальної структури групи наземних роботів

Переваги. Повністю децентралізована архітектура взаємодії передбачає масштабованість та можливість продовження виконання місії строю навіть у разі втрати одного або кількох агентів у групі. Менший акцент на станах групи та більша увага, що приділяється бажаним діям, тобто поведінці агентів, дає змогу простіше сформулювати закони уникнення завад та планування шляху.

Недоліки. Головний недолік поведінкового підходу — це неможливість строгого математичного аналізу стійкості системи.

Підхід на основі консенсусу

Одним із підходів до керування формаціями мобільних роботів, в яких аналізується децентралізована архітектура взаємодії агентів, є «консенсус» (рис. 4). У деяких роботах ця стратегія реалізується на основі поведінкових законів керування формацією мобільних агентів і називається «флокуванням» (англ. *flocking*) або зграйним керуванням, а також методом простору відносних станів. Вивчається флокування групи малих БПЛА під час руху до цільової точки серед завад.

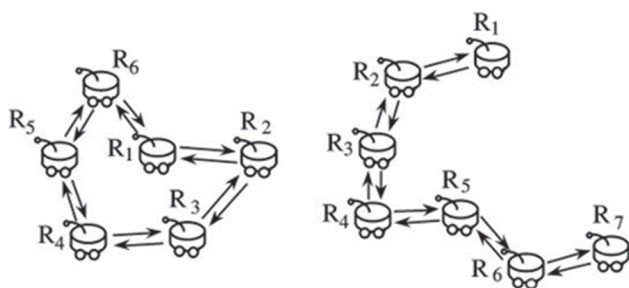


Рис. 4. Децентралізована взаємодія між роботами в методі консенсусу

Цю стратегію спочатку розробляли для спрощених моделей агентів, відповідно для реальних систем «автопілот-літальний апарат» вона може працювати лише поблизу положень рівноваги. Наприклад, лінійний закон керування формою рою мініатюрних БПЛА не бере до уваги обмеження на вхідні сигнали. Оскільки було проаналізовано стійкість для реальних систем «автопілот-БПЛА» лише для двох апаратів, тому для більшої кількості апаратів цей аналіз значно ускладнюється.

Переваги. Цей метод спочатку ґрунтується на аналізі архітектури взаємодії агентів і передбачає

повністю децентралізовану структуру з усіма перевагами, такими як: масштабованість, розподіл обчислювальних і комунікативних ресурсів, а також збереження стійкості в разі втрати агентів.

Недоліки. Оскільки в підході спочатку розглядалися найпростіші лінійні моделі у вигляді точкових мас, то для застосування до реальних систем потрібні подальші дослідження, де буде враховано нелінійності моделей, обмеження на входах систем, різного роду невизначеність у вимірах та зовнішніх збуреннях тощо.

Для коректної роботи треба синтезувати закони керування для БПЛА, які забезпечують основи децентралізованої архітектури взаємодії, виконання таких умов у разі прямолінійного шляху:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} x_i - x_j \\ y_i - y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{d,ij}^x \\ p_{d,ij}^y \end{bmatrix}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_i, j \in \mathcal{N}_j,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_i = v_{cruise}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_i,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = P_{line}, \quad \forall i \in \mathcal{N}_i,$$

де $[p_{d,ij}^x \ p_{d,ij}^y]^T \in \mathbb{R}^2$ — вектор бажаних відносних відстаней між i -м і j -м.

Для колового руху формулюється аналогічна постановка задачі, проте в такому разі потребує отримання та підтримання заданих відносних фазових кутів обертання під час руху по колу.

Обмеження на сигнали керування мають бути взяті до уваги під час синтезу законів керування.

ВИСНОВКИ

Актуальність використання БПЛА в різних місіях та дослідження методів керування ними, включено з обміном навігаційними даними та відносним положенням, розглядаються в такому контексті. Аналіз різних підходів до керування автономними роботами, зокрема БПЛА, розкриває їх переваги та недоліки. За спостереженнями видно, що централізовані методи значно поширені завдяки їх простоті в реалізації, але вони мають обмеження щодо геометричних форм та потребують математичного аналізу стійкості. Тому є потреба в розробленні повністю децентралізованих алгоритмів керування формаціями, які дадуть змогу створювати формації з необмеженою дистанцією між апаратами та отримувати складну структуру реальних систем «автопілот-БПЛА».

Проведено огляд різних властивостей архітектури побудови мульти-БПЛА систем, які можуть вплинути на підходи до керування групами БПЛА, зокрема показано перевагу децентралізації керування. Обґрунтовано актуальність застосування строїв БПЛА з прикладу різних місій, виконуваних групою БПЛА. Було проведено аналіз реалізованості з погляду існування систем, що дають змогу з достатньою

точністю здійснювати як обмін навігаційними даними, так і вимірювати відносні положення БПЛА у просторі.

Отже, обґрунтовано актуальність формування повністю децентралізованих алгоритмів керування строєм, що уможлиблюють створення формацій, довільних за відносними відстанями між апаратами, враховуючи при цьому нелінійний характер структури реальних систем «автопілот-БПЛА».

Список використаної літератури

1. Голембо В. А., Мельніков Р. Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Комп'ютерні системи та мережі. 2018. 905. С. 56–63.
2. Олійник А. О. Нейтеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія. 2009.
3. Курейчик В. В., Полупанова О. Є. Еволюційна оптимізація з урахуванням алгоритму колонії бджіл // Вісті Південного федерального ун-ту: Технічні науки. 2009. 101.12. С. 41–46.
4. Романюк В. А., Степаненко Є. О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею: зб. наук. праць: Військ. ін-т телекомунікацій та інформатизації. 2019. 3. С. 84–95.
5. Адаптивне керування автономною групою безпілотних літальних апаратів / К. С. Амелін, Є. І. Антал, В. І. Васильєв, Н. О. Гранічина // Стохастична оптимізація в інформатиці. 2009. 5. С. 157–166.
6. Алмейда М., Хільдманн Г., Солмаз Г. Збір геоматичних даних у режимі реального часу на основі розподіленого рою БПЛА відповідно до динамічно мінливих вимог до роздільної здатності // Міжнародні архіви фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформації. 2017. 42. С. 5–12.
7. Курейчик В. В., Запоріжець Д. Ю. Ройовий алгоритм у задачах оптимізації // Вісті Південного федерального ун-ту: Технічні науки. 2010. 108.7. С. 28–32.
8. Карпенко О. П., Селіверстов Є. Ю. Огляд методів рою частинок для задачі глобальної оптимізації // Машинобудування та комп'ютерні технології. 2009. 3:2.
9. Карнів В. Е. Моделі соціальної поведінки у груповій робототехніці // Управління великими системами. 2016. 59. С. 165–232.
10. Літаючі самоорганізуючі мережі: зб. наук. праць ВІТІ / В. А. Романюк, Є. О. Степаненко, І. В. Панченко, О. І. Восколович. 2017.
11. Капустян С. Багаторівнева організація колективної взаємодії в групі інтелектуальних роботів. Новий Південний федеральний ун-т: Технічні науки. 2004. № 9. С. 149–158.
12. Інтегро-диференціальні моделі з К-симетричним оператором для керування безпілотними літальними апаратами з використанням вдосконаленого градієнтного методу / Н. Дахно, О. Барабаш, Г. Шевченко [та ін.] // IEEE 6-та міжнародна конференція «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів. Праці. 19–21 жовтня 2021, Київ, Україна. 2021. С. 61–65.
13. Оптимізація траєкторії польоту безпілотних літальних апаратів на основі алгоритму варіаційної рівності та методу проєкції. Продовження / О. Барабаш, Н. Дахно, Г. Шевченко, В. Собчук // IEEE 5-та міжнародна конференція «Актуальні проблеми розвитку безпілотних літальних апаратів». 22-24 жовтня, 2019. Київ, Україна С. 136–139.

A. Kyriyanov

ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO GROUP CONTROL OF AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE

To ensure coordination and effective interaction between groups of autonomous mobile robots, there are several approaches that can be used to achieve common goals and solve problems in autonomous systems and robotics. These approaches include the Known Field and Leader-Known method, the behavioral approach, and the consensus-based strategy. Each of these methods has its own characteristics and advantages, and they can be used depending on specific conditions and tasks in the context of autonomous systems and mobile robots. The main field and leader-aware approach is based on simulating the motion of particles in a potential field, where one of the works can act as a "leader" and the others follow it. This method provides movement towards a given target and avoids obstacles on the way to passing distances and directions. The behavioral approach involves the use of a set of rules and algorithms that initiate the behavior of everyone in the group. Each robot has its own "behavioral" rules that are used to respond to specific conditions and conditions. This approach provides flexibility and adaptability in different scenarios and efficiency for teams working in a variety of settings. The consensus-based approach is based on the idea of achieving suitability and synchronizing work with each other in a group. Robots exchange information and interact with each other, in order to achieve overall consistency in their movement and activities. This method allows for collaborative coordination and execution of tasks that require interaction between robots. The choice of a specific approach depends on the purpose and requirements of the tasks, and also takes into account specific conditions. In many cases, a combination of these methods can be an effective solution for solving complex problems and achieving the most effective interaction between robots. All this contributes to the further development of autonomous systems and ensures their ability to work as a unified group in various fields, including transport, logistics and other important industries.

Keywords: leader-famous; group control; unmanned aerial vehicle; neural networks; databases; state identification; potential field; virtual structures.