

І. БІНЬКО, В. ШЕВЕЛЬ, Д. КРИЦЬКИЙ

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ФОРМУВАННЯМ ГРУПИ РОБОТІВ

Предмет дослідження – розроблення методів управління роями безпілотних літальних апаратів (БпЛА) за моделлю "провідничий – ведений". Вивчення наявних класифікацій та взаємодій між безпілотними апаратами в різних формаціях, таких як групи, зграї, асоціації та рої, з метою створення ефективної системи управління. **Мета роботи** – покращення якості взаємодії між безпілотними літальними апаратами за моделлю "провідничий – ведений" під час виконання польотної місії унаслідок постійного контролю між об'єктами. Забезпечення надійного виконання польотних місій способом упровадження нових методів управління, що беруть до уваги різні режими взаємодії між апаратами. **Завдання:** проаналізувати класифікацію наявних БпЛА; дослідити параметри та модель взаємодії безпілотних літальних апаратів у групах, зграях, асоціаціях, роях; створити сценарій взаємодії двох БпЛА за моделлю "провідничий – ведений"; розробити програму для візуалізації польоту безпілотних літальних апаратів за моделлю "провідничий – ведений"; випробувати політ за запропонованою моделлю на етапах, де є різні геопросторові об'єкти. **Методи:** моделювання для розроблення підсистеми візуалізації польоту БпЛА; графічне моделювання для створення моделі безпілотного літального апарата типу літак; теорія алгоритмів для розроблення сценарію взаємодії двох БпЛА; використання спеціалізованих програмних засобів для візуалізації та симуляції поведінки безпілотних літальних апаратів в умовах реального часу. **Результати:** розроблено класифікацію безпілотних літальних апаратів; створено графічну модель літака *Mini-Flight-M*; запропоновано схему взаємодії двох БпЛА в режимах "учитель" або "наставник"; створено програму для візуалізації польоту БпЛА за моделлю "провідничий – ведений"; випробувано політ за запропонованою моделлю на етапах, де є різні геопросторові об'єкти. Результати підтвердили ефективність розробленої моделі та показали можливість її застосування в різних сферах, зокрема екологічний моніторинг, рятувальні операції та інші автономні місії. **Висновки.** Запропонований підхід до управління роєм БпЛА за моделлю "провідничий – ведений" дає змогу покращити якість взаємодії між апаратами та забезпечити надійне виконання польотних місій. Подальші дослідження мають зосередитися на оптимізації енергоспоживання та забезпеченні надійного зв'язку між агентами рою. Також важливо розробити методи захисту роїв БпЛА від кібератак та інших загроз, щоб підвищити їх стійкість і надійність під час виконання складних місій.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; рій; модель "провідничий – ведений"; взаємодія; моделювання; візуалізація.

Вступ

Зацікавлення в робототехнічних системах зросло завдяки їх успішному застосуванню в різних сферах діяльності. З розвитком технологій управління роями БпЛА виникає потреба у створенні ефективних систем, які б забезпечували надійне та безпечне виконання польотних місій. Управління роями літальних апаратів є складним завданням, що передбачає розв'язання проблем комунікації, адаптації до мінливих умов середовища, оптимізації енергоспоживання та забезпечення безпеки системи від кібератак. Це викликає необхідність у розробленні ефективної системи керування роботами, що дозволяла б також забезпечувати взаємодію в рою, у покращенні якості взаємодії між БпЛА за моделлю "провідничий – ведений" під час виконання польотної місії за допомогою постійного контролю між об'єктами.

Це досягається завдяки впровадженню нових методів управління, що беруть до уваги різні режими взаємодії між апаратами та забезпечують надійне виконання польотних місій. Управління на основі розподіленої системи передбачає, що одна людина може керувати групою роботів та надсилати команди на виконання складних завдань. Кожен робот обладнаний спеціальним технічним засобом для забезпечення зв'язку з наземною станцією та іншими роботами у формації. На відміну від централізованого, розподілений метод передбачає можливість передавати інформацію про кожен безпілотний літальний апарат назад до терміналу призначення завдань, зокрема декомпозицію та розподіл завдань. Унаслідок цього термінал призначення завдань виконує функцію міжмережного з'єднувача, що дає змогу групі БпЛА формувати мережну структуру, сприяючи обміну інформацією,

координації завдань та вирішенню конфліктів між БпЛА.

Різні сучасні безпілотні апарати використовуються як у військовій, так і в громадській сферах життя, і щороку їх функціональні можливості покращуються та доповнюються (рис. 1). Іноді необхідно застосовувати кілька груп БпЛА для покриття більшої території або отримання декількох точок зору. Сукупність БпЛА, які використовуються одночасно для виконання конкретного завдання, називається роєм. Такі безпілотні літальні апарати працюють разом і передають своє положення та іншу

корисну інформацію з огляду на заздалегідь визначені часові інтервали. Просторове розташування БпЛА один щодо одного в просторі є ключовим елементом для їх взаємодії [1]. Використання груп і комплексів малогабаритних безпілотних літальних апаратів може значно розширити сферу їх застосування. З низкою проблем, що ускладнюють застосування малогабаритних БпЛА, можна впоратися за допомогою групового принципу. Зокрема колективне використання безпілотних літальних апаратів актуальне в геодезії, географії, дозиметрії, безпеці, розвідці, у пошуку зниклих людей тощо.



Рис. 1. Класифікація БПЛА

Режим призначення завдань для групи БпЛА має помітні переваги, зокрема високий рівень успішності та стійкість до несподіваних подій під час виконання завдань. Крім того, завдяки попередньо визначеним цільовим завданням для кожного БпЛА споживання енергії та інші витрати можуть залишатися відносно низькими в процесі польоту. Під час виконання завдань кожен БпЛА також має гнучкість відрегулювати свою цільову траєкторію залежно від фактичних умов польоту. Отже, цей метод виявляє високу стійкість і значно підвищує рівень виконання завдань. Проте певні завдання все ще обмежені деякими обставинами. Ці обмеження зазвичай виникають через такі проблеми, як тривалість польоту, обчислювальне навантаження та складність місії. Наприклад, у разі продовженої тривалості польоту батареї БпЛА можуть бути обмежені та не забезпечувати достатньої енергії для завершення завдання. Обчислювальне навантаження також може бути перевищеним, особливо в разі складних обчислювальних завдань, що вимагають значних ресурсів.

У цій роботі використано методи моделювання та симуляції, зокрема розроблено програму для

візуалізації польоту БпЛА, написану мовою сценаріїв *Lua* та із застосуванням інформаційної системи *CoppeliaSimEDU*. Ця програма дає змогу відтворити сцену та модель поведінки двох БпЛА, де один літальний апарат підпорядковується іншому – лідеру рою.

Запропонований підхід до керування роєм БпЛА покращує якість взаємодії між апаратами та забезпечує надійне виконання польотних місій. Результати випробувань підтвердили ефективність розробленої моделі та довели можливість її застосування в різних сферах, таких як екологічний моніторинг, рятувальні операції та інші автономні місії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження в царині безпілотних літальних апаратів та їх застосування в групових системах стрімко розвиваються, зосереджуючись на різних підходах до управління роєм для підвищення їх ефективності, автономності та надійності.

Існують два типи роїв за методами керування. Перший тип містить пристрої одного виду, що призначені для виконання одного спільного завдання

та діють як розподілений об'єкт. Такий рій можна вважати самостійно організованою системою, властивою для природних утворень (подібно до поведінки комах, птахів, риб, об'єднаних у рої чи зграї, які обмінюються інформацією та виконують спільне завдання, використовуючи колективний інтелект). Для такого рою не існує централізованої системи контролю за поведінкою кожного індивіда. Локальні та досить випадкові взаємодії призводять до глобальної ройової поведінки, яка не може контролюватися окремими агентами. У цьому разі маємо справу з багатоагентною системою, якій властива самоорганізована поведінка і яка в сукупності має демонструвати "розумну" поведінку.

Другий тип рою містить апарати, що мають неоднакове навантаження та виконують різні функції в межах загального завдання. Багатоагентний метод керування роєм передбачає наявність керування, і команди можуть надходити як від системи управління, розташованої поза роєм, так і від "призначеного" ("локального") лідера всередині рою. Лідер передає та виконує команди, що надходять від керівного центру. Інші агенти діють, дотримуючись простих правил [2].

Три можливі стратегії управління.

1. *Централізована*: дистанційне керування з виділеною базовою станцією, лідер рою призначається із центрального вузла.

2. *Децентралізована*: лідер рою визначається на основі будь-якого алгоритму і не залежить від центральної станції управління.

3. *Змішана*: поєднує переваги централізованої та децентралізованої стратегій, призначаючи лідера рою в разі необхідності на основі одного з алгоритмів із передачею прав керування оператору [3].

Сучасні дослідження з використання ройового інтелекту БпЛА здебільшого спрямовані на виконання військових завдань. Напрями досліджень майбутніх інтелектуальних ройових систем присвячені адаптивним можливостям автономії БпЛА й роботі у великих неоднорідних командах інтелектуальних агентів.

Розглянемо кілька проєктів, пов'язаних із роєм БпЛА.

- *CODE* – програма, спрямована на подолання обмежень на масштаб і рентабельність операцій БпЛА способом побудови співпраці та спільної автономії. Розробники намагаються створити

відкриту, модульну архітектуру, стійку до обмежень пропускну здатності та проблем підключення [4].

- *Perdix* – система рою БпЛА, розроблена Управлінням стратегічних можливостей Міністерства оборони США. БпЛА *Perdix* не запрограмований заздалегідь – це колективний організм, що має розподілений мозок для прийняття рішень і адаптації один до одного. Весь рій не має лідера – кожен БпЛА *Perdix* "спілкується" та "співпрацює" з усіма пристроями, тому може адаптуватися до будь-яких змін у польоті [5].

- *LOCUST* – технологія виробництва дешевих автономних ройових БпЛА, яка дає змогу швидко запуснути до 30 безпілотних літальних апаратів у повітря, що об'єднуються в інтелектуальні мережі. Керування БпЛА, з'єднаними між собою за допомогою адаптивної бездротової мережі, здійснюється наземним оператором [6].

- *Gremlins* – технологія, призначена для проведення електронної розвідки та придушення засобів протиповітряної оборони (ППО). Після виконання своєї місії літальні апарати мають повернутися до носія, де вони встановлюються на борт літака за допомогою спеціального обладнання. Серед технологій можна виокремити високошвидкісне цифрове управління польотом [7].

- *OFFSET* – технологія, що забезпечує можливості створення рою для малих міських наземних підрозділів. Серед особливостей – автономія рою, покращений інтерфейс, який дає змогу користувачам відстежувати та керувати багатьма безпілотними платформами [8].

Вітчизняні дослідження спрямовані на планування траєкторії БпЛА в групі без можливості адаптації формації та забезпечення автономності окремого апарата [9, 10].

Більшість моделей, використаних у розроблених проєктах, містять пристрої одного типу, що виконують одне спільне завдання та не мають централізованої системи контролю поведінки. Тому вирішено звернути увагу на БпЛА за другим типом управління, коли команди надходять від "призначеного" лідера. За допомогою використання інформаційної системи *CoppeliaSimEDU* створено програму, що відтворює сцену й модель поведінки двох БпЛА, де один літальний апарат підпорядковується іншому – лідеру рою.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.

Мета роботи й завдання

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні та розробленні систем управління роями безпілотних літальних апаратів, існує низка нерозв'язаних питань, що потребують подальшого вивчення. Забезпечення надійного зв'язку між агентами рою в умовах реального часу є складним завданням, адже відсутність централізованого контролю та можливість втрати зв'язку здатні призвести до субоптимальних рішень та збоїв у роботі системи. Сучасні системи часто не можуть швидко адаптуватися до мінливих умов середовища, що обмежує їх ефективність у складних і невизначених ситуаціях. Більшість досліджень не приділяє достатньої уваги оптимізації енергоспоживання в роях БпЛА, що є критично важливим для тривалих місій. Наявні моделі часто не зважають на всі можливі варіанти взаємодії та поведінки агентів у рою, що, імовірно, спричинить неточні прогнози та помилкові рішення. Питання безпеки та захисту роїв БпЛА від кібератак та інших загроз залишаються недостатньо вивченими.

Метою роботи є покращення якості взаємодії між безпілотними літальними апаратами за моделлю "провідничий – ведений" під час виконання польотної місії з допомогою постійного контролю між об'єктами. Це досягається дослідженням і розробленням нових методів керування роями БпЛА з огляду на розподілені системи управління, що забезпечують високу оперативність і надійність виконання завдань у динамічних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: проаналізувати класифікацію БпЛА; детально дослідити сучасні підходи до класифікації безпілотних літальних апаратів, зважаючи на їх призначення та технічні характеристики; вивчити параметри та моделі взаємодії безпілотних літальних апаратів у наявних групах, зграях, асоціаціях, роях; розробити сценарій взаємодії двох БпЛА за моделлю "провідничий – ведений" з можливістю вибору режимів керування "вчитель" або "наставник"; створити програму для візуалізації польоту безпілотних літальних апаратів за моделлю "провідничий – ведений"; виконати випробування польоту за запропонованою моделлю на етапах, де є різні геопросторові об'єкти.

Для реалізації цих завдань упроваджуються такі методи: моделювання для розроблення підсистеми візуалізації польоту БпЛА, графічне моделювання для створення моделі безпілотного літального апарата типу літак, а також методи теорії алгоритмів для розроблення сценарію взаємодії двох БпЛА.

Об'єктом дослідження є модель БпЛА за схемою "провідничий – ведений", а предметом – процес імітації польоту безпілотних літальних апаратів за схемою "провідничий – ведений" із можливістю вибору режимів керування БпЛА "вчитель" або "наставник". Досягнуті результати передбачають класифікацію безпілотних літальних апаратів, графічну модель літака *Mini-Flight-M*, схему взаємодії двох БпЛА в режимах "вчитель" або "наставник", програму для візуалізації польоту БпЛА за моделлю "провідничий – ведений", а також результати випробувань польоту за запропонованою моделлю на етапах, де є різні геопросторові об'єкти.

Розв'язання перелічених завдань дасть змогу підвищити ефективність та надійність роїв БпЛА, що відкриє нові можливості для їх використання в різних сферах, зокрема екологічний моніторинг, рятувальні операції та інші автономні місії.

Матеріали й методи

У цьому розділі досліджено різні архітектури систем управління, що застосовуються для координації дій роботів у формаціях. Розглянуто три основні типи архітектур: централізовані, децентралізовані та розподілені. Кожен із цих підходів аналізується з погляду їх переваг, обмежень та придатності для особливого застосування (табл. 1).

Централізована архітектура

У цій моделі управління всі керувальні функції концентруються в одному центральному контролері. Це дозволяє детально аналізувати та оперативно керувати поведінкою кожного агента в системі. Дослідження науковців з МІТ показало ефективність цієї архітектури в управлінні дронами для екологічного моніторингу, що забезпечило високу точність координації та адаптацію до мінливих умов.

Розподілена архітектура

У цьому разі кожен агент оснащений власним контролером, що дозволяє виконувати обчислення на місці на основі інформації від сусідніх агентів. Цей метод забезпечує високий рівень автономності

та надійності, оскільки система не залежить від одного центру контролю. Застосування технологій машинного навчання та сучасних засобів комунікації, наприклад *URLLC* в мережах 5G, покращує цю архітектуру, забезпечуючи ефективність в динамічних середовищах.

Децентралізована архітектура

Контрольні функції поділяються між декількома незалежними підсистемами. Це підвищує гнучкість системи та спрощує масштабування, але також створює виклики з координацією між підсистемами. Активне дослідження та розроблення нових методів

і технологій необхідні для покращення координації та згуртованості агентів у таких системах.

Архітектури управління формацією є фундаментальними для координації та ефективної взаємодії між роботами або агентами в багатьох сферах – від автоматизованого виробництва до автономних транспортних систем. Основні типи архітектур управління формацією передбачають централізовані, децентралізовані та розподілені підходи, кожен з яких має переваги та обмеження залежно від особливостей застосування та середовища використання.

Таблиця 1. Порівняння характеристик централізованих, розподілених і децентралізованих архітектур управління

| Критерій | Централізована архітектура | Розподілена архітектура | Децентралізована архітектура |
|--------------------------------|--|---|--|
| Затримка в передачі інформації | Низька, якщо вузли розташовані біля контролера | Залежить від місцевих з'єднань та швидкості оброблення | Залежить від з'єднань між підсистемами |
| Масштабованість | Обмежена через залежність від одного контрольного центру | Висока, агенти можуть додаватися без утручання центру | Висока, але може виникати складність у координації |
| Надійність | Залежить від єдиної точки збою (центральний контролер) | Висока, збій одного агента мало впливає на інших | Висока, але потребує ефективного взаємозв'язку між підсистемами |
| Стійкість до помилок | Низька, помилка в центрі впливає на всю систему | Висока, система може продовжувати роботу в разі збоїв окремих агентів | Висока, але вимагає додаткових механізмів синхронізації та відновлення |

1. Централізована архітектура управління формацією

Централізована архітектура становить один з основних підходів у системах управління формаціями роботів і передбачає зосередження всіх контрольних функцій у єдиному центральному контролері. Такий підхід дає змогу комплексно аналізувати стан кожного агента та оперативно реагувати на динаміку змін у формації, використовуючи загальнодоступну інформацію для визначення оптимальних стратегій дій.

У 2021 р. науковці з МІТ розробили централізовану систему управління для координації групи автономних дронів, задіяних у складних місіях зі збору екологічних показників. Ця система дала змогу досягти високої точності в плануванні маршрутів і синхронізації дій дронів, що є критично важливим для адаптації до динамічних атмосферних умов, з якими вони стикаються під час виконання місій [11, 12].

Централізована архітектура має кілька переваг, зокрема здатність ефективно керувати складними операціями та оптимізувати загальну активність завдяки глобальному огляду станів усіх агентів. Однак вона також має недоліки, особливо у сфері

масштабування через високі вимоги до обчислювальних і комунікаційних ресурсів. Крім того, залежність від центрального комп'ютера призводить до єдиної точки збою, що може спричинити перебої в роботі всієї системи в разі виникнення проблем.

Централізована архітектура залишається важливою там, де потрібна висока точність координації та здатність швидко реагувати на зміни в складних технічних і природних умовах. Однак важливо зважати на потенційні ризики й виклики, що вимагають додаткових заходів безпеки та резервування систем.

2. Розподілена архітектура управління формацією

Розподілена архітектура управління передбачає, що кожен агент оснащений вбудованим контролером, який обчислює сигнал управління на основі його поточного стану та станів сусідніх агентів. Такий підхід дозволяє здійснювати обмін інформацією за допомогою камер, *LIDAR*-ів або прямої комунікації між агентами, що забезпечує автономність кожного з них.

Наведемо переваги розподіленої архітектури.

– Легкість масштабування: взаємодія між агентами обмежується їх найближчими сусідами, що спрощує залучення нових агентів до системи.

– Надійність: система є стійкою до збоїв, оскільки не залежить від централізованого контролю. Помилка одного агента не спричиняє колапсу всієї системи.

У дослідженнях, присвячених управлінню БпЛА, розподілена архітектура дає змогу багатороторним дронам ефективно формувати польотні формації. Наприклад, експерименти з управління на основі консенсусу показують, як літальні апарати можуть самостійно адаптуватися до динамічних умов та координувати свої дії без зовнішнього втручання [13].

Дослідження 2023 року продемонстрували використання машинного навчання для прогнозування та адаптації поведінки агентів у формації. Ці технології забезпечують вищу ефективність і оперативність системи, зокрема в автономних автомобілях, де також розв'язуються проблеми толерантності до збоїв, затримки реакцій та управління ресурсами [14].

Розвиток технологій зв'язку, зокрема впровадження *URLLC* у мережах 5G, покращив можливість розподілених систем, сприяючи швидшому обміну інформацією та більш синхронізованим діям між агентами.

Сучасні дослідження та розроблення в галузі розподіленої архітектури управління продовжують розширювати можливості систем, покращуючи їх ефективність у динамічних середовищах. Застосування новітніх технологій та інноваційних підходів дає змогу цим системам більш ефективно виконувати складні завдання, збалансувавши локальну автономію із загальносистемною згуртованістю.

Розподілені архітектури управління все ще стикаються з викликами в складних середовищах, де важливо керувати численними локальними взаємодіями та забезпечувати послідовну поведінку агентів. Відсутність централізованої системи моніторингу може призвести до субоптимальних формацій.

3. Децентралізована архітектура управління

Децентралізована архітектура управління поділяє контрольну систему на незалежні підсистеми, кожна з яких має свій контролер. Такий підхід передбачає, що комунікація між підсистемами здійснюється зазвичай за допомогою механічних з'єднань, як, наприклад, фізичні пружини. Контролер

кожної підсистеми має доступ лише до інформації про стани агентів у своїй власній підсистемі.

Ця конфігурація не ефективна для керування формаціями, оскільки контролер кожної підсистеми не має інформації про агентів інших підсистем. Це може ускладнити синхронізацію та координацію між різними підсистемами, необхідними для створення єдиної та згуртованої формації агентів.

Наприклад, у дослідженнях застосування децентралізованого керування багатоагентними системами, такими як БпЛА, увага зосереджується насамперед на методах управління на основі консенсусу [15]. Такі методи дають змогу кожній підсистемі взаємодіяти з іншими для досягнення спільних цілей без необхідності центрального управління, покращуючи ефективність та адаптивність під час виконання місій у динамічних умовах.

Крім того, децентралізовані механізми керування також вивчаються у контексті автономних автомобілів. У цих дослідженнях розглядаються технологічні та регулятивні аспекти, що впливають на галузь. Обговорюються виклики, пов'язані з децентралізованими системами в динамічних умовах, та їх наслідки для політики й управління.

Однак децентралізована архітектура стикається з викликами, зокрема з обмеженою можливістю координації між підсистемами, що, імовірно, спричинить проблеми із згуртованістю та синхронізацією. Відсутність центрального контролю може ускладнити моніторинг і реагування на непередбачені зміни в середовищі, що особливо важливо в оперативних сценаріях із високим рівнем ризику та невизначеності.

Необхідність подальшого вдосконалення децентралізованих систем і розроблення нових методів для підвищення їх ефективності, згуртованості та адаптивності є критичною. Це передбачає інтеграцію передових алгоритмів машинного навчання та розвиток комунікаційних технологій, що підтримують більш надійний та ефективний обмін інформацією між підсистемами.

Сучасні дослідження присвячені розробленню ефективніших протоколів передачі даних, які мінімізують час затримки. Ці методи передбачають використання алгоритмів для динамічного вибору маршрутів у мережі, основаних на поточних умовах зв'язку та обсягах трафіку.

Застосування алгоритмів машинного навчання для аналізу та прогнозування навантаження на мережу допомагає адаптувати систему управління

для оптимізації розподілу ресурсів і зменшення загальних затримок у системі.

Розроблення та впровадження більш потужних і ефективних комунікаційних модулів, таких як передові WiFi-модулі, технології 5G та системи на основі Li-Fi, забезпечує високу швидкість передачі інформації та зниження втрат сигналу.

Оптимізація апаратного забезпечення: інтеграція оптимізованого апаратного забезпечення, яке підтримує швидкісні комунікації та має високу обчислювальну потужність, зменшує час оброблення інформації та покращує загальну ефективність системи.

Зазначені техніки та технології можуть бути широко застосовані – від автономних транспортних засобів і дронів до промислових роботизованих систем, де швидка й надійна комунікація є ключовим фактором для забезпечення ефективності та безпеки оперативних процесів.

Останнім часом значно зросла увага до методів управління формуванням роботів, які важливі для розширення можливостей мультиагентних систем. Особливо це стосується використання розподілених стратегій, що дають змогу роботам динамічно адаптуватися до змін у середовищі без централізованого керівництва. Цей напрям передбачає різні стратегії управління та архітектурні рішення для мережних взаємодій між роботами.

Існує три методи до керування формацією: "лідер – послідовник", поведінковий метод і віртуальна структура.

1. Метод "лідер – послідовник"

У цьому підході роль лідера призначається одному агенту. Лідер прямує шляхом, заздалегідь визначеним планувальником місії, а інші роботи намагаються утримувати бажану формацію, рухаючись за ним (рис. 2). Існують два типи стратегії "лідер – послідовник": режим лідера, де послідовники безпосередньо підтримують формацію з лідером, та режим фронту, де кожен агент прямує за наступним агентом до досягнення лідера. Основні переваги цього підходу – простота в освоєнні та реалізації, а також прямолінійність аналізу стабільності. Однак цей метод має недоліки, зокрема залежність від одного робота для підтримки формації та його централізована природа, що ускладнює масштабування.

Цей підхід є одним із найпоширеніших у керуванні формацією роботів. Лідер визначає траєкторію руху, а інші роботи налаштовують свої

дії, щоб утримувати задану відстань та орієнтацію щодо лідера. Сучасні дослідження впроваджують адаптивні методи й глибоке навчання для підвищення результативності цього підходу в складних умовах, наприклад підводне середовище, де звичайні засоби навігації можуть бути неефективними. Також розроблено розподілені оцінювачі, які дають змогу кожному послідовнику визначати стан лідера, використовуючи лише локальну інформацію, що зменшує залежність від централізованої комунікації. Консенсусні алгоритми в системах "лідер – послідовник" для мультиагентних систем із нелінійними властивостями дозволяють агентам синхронізувати свої стани відповідно до моделі лідера, забезпечуючи точнішу координацію та вищу стабільність формації. Це особливо важливо в умовах, де стандартні методи керування можуть не впоратися з комплексністю динамічного середовища [16]. Адаптивна безпечна система управління для формацій "лідер – послідовник" неголономних мобільних роботів в умовах невизначеності та потенційних кібератак забезпечує високий рівень надійності та безпеки. Система адаптує параметри управління для компенсації можливих збоїв інформації від лідера. Алгоритми основані на методах Ляпунова для аналізу стабільності та забезпечення безпеки, що підвищує загальну робастність системи й дає змогу ефективно протистояти зовнішнім загрозам і внутрішнім помилкам у системі керування [17].

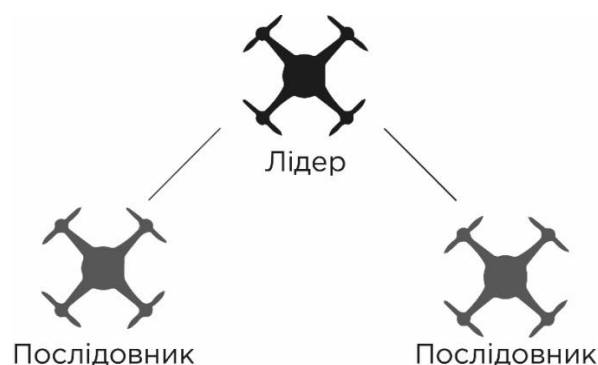


Рис. 2. Стратегія лідера в системах "лідер – послідовник"

2. Віртуальна структура

Підхід із використанням віртуальних структур для управління формацією роботів має вагомe значення в сучасній робототехніці. Цей метод допомагає створювати складні формації без необхідності фізичних з'єднань між роботами, використовуючи заздалегідь визначені правила

поведінки. У підході віртуальної структури всі роботи виконують роль віртуальних вузлів у задалегідь заданій структурі. Це означає, що кожен робот має особливу траєкторію руху, синхронізовану з траєкторіями інших роботів для створення єдиної, цілісної формації. Цей метод забезпечує високу точність позиціонування та є дуже ефективним у стабільних умовах. Сучасні розробки використовують адаптивні та інтерактивні технології для підвищення гнучкості віртуальних структур. Наприклад, застосування слайдинг-мод контролю дозволяє роботам швидко адаптуватися до змін у динаміці оточення, мінімізуючи вплив затримок у відповідях та коливань у даних сенсорів [18]. Це покращує стійкість формації до зовнішніх перешкод і динамічних умов. Однак підхід із віртуальною структурою має деякі обмеження. Високі вимоги до обчислювальних ресурсів та необхідність точної синхронізації можуть створювати труднощі у швидко змінюваних умовах. Проблеми синхронізації особливо критичні, коли збільшується кількість роботів у формації. Дослідження покращення алгоритмів керування та розроблення нових моделей зворотного зв'язку можуть зменшити зазначені недоліки. Вивчення нових методів адаптації та оптимізації в умовах невизначеності також є важливим напрямом для подальшого розвитку технологій. Це забезпечить підвищену адаптивність і масштабованість віртуальних структур, даючи їм змогу бути ефективнішими в складних і динамічних середовищах.

Зосередження уваги на моделях машинного навчання, які можуть прогнозувати й компенсувати потенційні проблеми перед тим, як вони вплинуть на стабільність формації, також відкриває нові можливості для покращення ефективності робочих груп роботів.

3. Метод на основі поведінки

Поведінковий підхід у керуванні формацією роботів ґрунтується на принципах поведінки зграї тварин (рис. 3). Кожен робот налаштований діяти за простими локальними правилами, такими як уникнення зіткнень, узгодження швидкостей та підтримання когезії групи, завдяки чому формація динамічно адаптується до змін у середовищі без потреби в централізованому керуванні. Зазначений підхід може зіткнутися з обмеженнями у формуванні складних конфігурацій, тому сучасні дослідження спрямовані на розроблення алгоритмів, що

реалізують складніші взаємодії та управління, внаслідок чого покращується адаптивність і масштабованість системи.

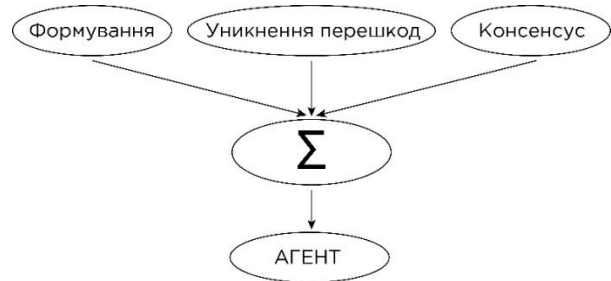


Рис. 3. Поведінковий підхід до формування групи

Найвідомішу роботу, яка вплинула на багатьох дослідників окресленої царини, запропонував Крейг Рейнольдс 1987 року. Автор висунув три евристичні правила, яких кожен агент має дотримуватися для збереження бажаної формації: центрування зграї, узгодження швидкостей та уникнення зіткнень. Зазначені правила допомагають агентам залишатися близько один до одного, вирівнювати свої швидкості та уникати зіткнень, використовуючи привабливі та відштовхувальні сили. Особливо важливі сучасні студії, які розширюють застосування поведінкових правил у більш складних і динамічних середовищах. Дослідження показує, як алгоритми глибокого навчання можуть оптимізувати рух і управління формацією в складних умовах підводного середовища, де стандартні навігаційні методи часто не ефективні [19]. Розподілене керування формацією мобільних роботів на основі біоінспірованої нейродинаміки та адаптивного ковзного інноваційного фільтра описано в роботі [20]. Автори пропонують біоінспіровані алгоритми, що використовують нейродинамічні моделі для забезпечення координації між роботами. Це сприяє покращенню реакції роботів на зміни умов довкілля, підвищує ефективність місії в складних сценаріях. Поведінкові підходи в керуванні формацією роботів продовжують розвиватися, пропонуючи гнучкі та адаптивні рішення для динамічних умов. Централізація управління відступає на другий план на користь розподілених і самоорганізованих систем, що можуть масштабуватися та адаптуватися до труднощів реального світу. Упровадження глибокого навчання та нейродинаміки є важливим кроком у підвищенні автономності роботів.

Для реалізації поставлених завдань було застосовано методи моделювання та симуляції.

Програма, розроблена для візуалізації польоту безпілотних літальних апаратів за моделлю "провідничий – ведений", написана мовою сценаріїв *Lua* та використовує інформаційну систему *CoppeliaSimEDU*. Ця програма відтворює сцену й модель поведінки двох БПЛА, де один літальний апарат підпорядковується іншому – лідеру рою.

Структура моделі візуалізації польоту містить такі елементи:

- 1) камери, що дають змогу бачити сцену;
- 2) світлові об'єкти для освітлення сцени;
- 3) середовище з такими властивостями, як навколишній світ, туман, колір фону тощо;
- 4) ґрунт, що містить об'єкти, згруповані в модель, зокрема декілька об'єктів дерев;
- 5) моделі безпілотних літальних апаратів *UAV-M* і *UAV-S*, розроблені в системі *SolidWorks* та імпортовані до наявної сцени.

Режими роботи програми

У програмі є декілька режимів роботи: *RP* та *RPYT*. У режимі викладача (*RP*) необхідні два пристрої введення: один для крену й висоти, другий – для інших функцій. У режимі наставника

(*RPYT*) також необхідні два пристрої введення: один для крену, тангажу й тяги, другий – для інших функцій. Унаслідок використання функціональності перемикача можна змінювати параметри польоту.

Результати досліджень та їх обговорення

Одним із найбільш поширених підходів до формування управління є метод "лідер – послідовник", за умов якого "послідовник" визначає своє положення тільки щодо "лідера" (рис. 4). Ми припустили, що взаємодія між агентами має відбуватися на "глобальному" рівні замість того, щоб підлеглий реагував лише на інформацію локального рівня. Локальна інформація може бути отримана з параметрів контролера, тоді як глобальна інформація стосується положення об'єкта загалом щодо навколишнього середовища. Ці дві категорії джерел інформації не є взаємовиключними. У моделі використовувалася проста модель узгодження швидкості. Отже, це дослідження додатково вивчає гіпотезу про те, що зчеплення "прямування за лідером" може регулюватися лише глобальною інформацією без залучення локальних відомостей.

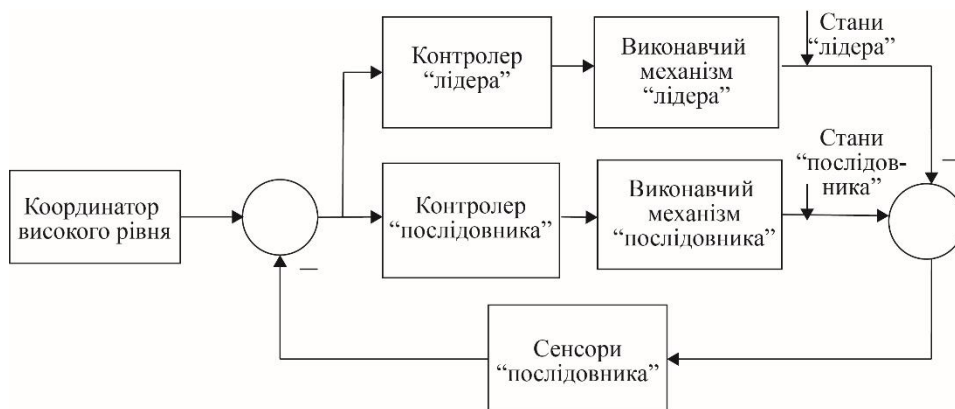


Рис. 4. Схема методу управління "лідер – послідовник"

У межах роботи запропоновано імітаційну модель, що координує рій відповідно до параметрів контролерів "лідера" та "послідовника" з огляду на збереження дистанції між БПЛА. За допомогою інформаційної системи *CoppeliaSimEDU* побудовано програму, що відтворює сцену й модель поведінки двох БПЛА, де один літальний апарат підпорядковується іншому – лідеру рою. Ініціатором візуалізації польоту є користувач. Програма написана мовою сценаріїв *Lua*, яка є розширеною мовою

програмування та призначена для підтримки загального процедурного програмування.

Модель візуалізації польоту містить кілька елементів (рис. 5).

Сцена «1» містить такі елементи:

- кілька об'єктів камери, що дають змогу бачити сцену, якщо вони пов'язані з видом;
- кілька світлових об'єктів для освітлення сцени;
- кілька уявлень, які відтворюють те, що бачить камера;

- кілька сторінок, кожна з яких містить одне або кілька переглядів;
- середовище з такими властивостями, як навколишній світ, туман, колір фону тощо;
- ґрунт, що містить об'єкти, згруповані в модель, зокрема й декількох об'єктів дерев;
- моделі безпілотних літальних апаратів *UAV-M* і *UAV-S*, розроблені в системі *SolidWorks* та імпортовані до наявної сцени.

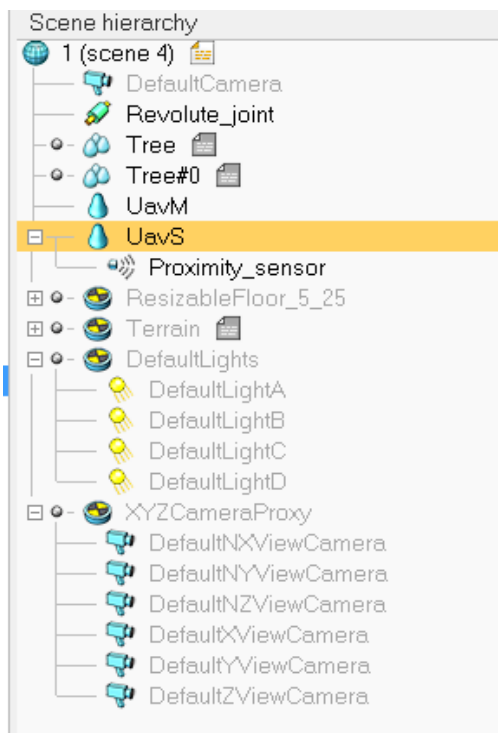


Рис. 5. Структура моделі візуалізації польоту

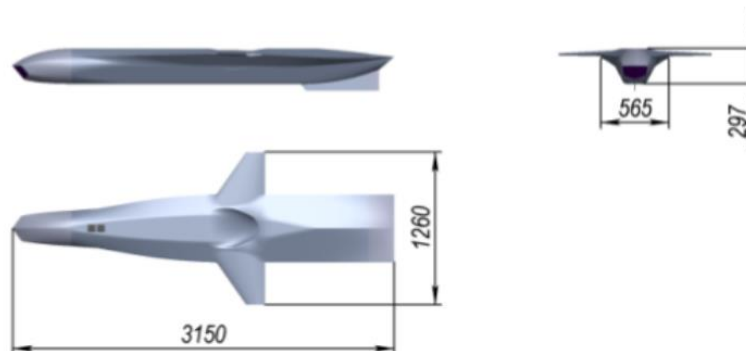


Рис. 6. Загальний вигляд ЛА *Mini-Flight-M*

Процес підготовки сцени передбачає три етапи:

- 1) створення або модифікація моделі полігону в *CoppeliaSimEDU*;
- 2) експорт моделі безпілотного літального апарата у формат *URDF*;

Одною з графічних моделей розроблених БпЛА для програми є *Mini-Flight-M* з такими тактико-технічними характеристиками (рис. 6):

- злітна маса до 90 кг;
- маса цільового та додаткового навантаження до 20 кг;
- тривалість польоту понад 30 хв;
- тяга двигуна 400–410 Н.

Є декілька режимів роботи в програмі: *RP* та *RPYT*.

У режимі викладача (*RP*) необхідні два пристрої введення: один для керування креном і висотою, а другий для виконання інших функцій. Використовуючи функціональність перемикача, відображеного в конфігурації, другий контролер також може змінювати крен і подачу.

Для роботи в режимі наставника (*RPYT*) також потрібні два пристрої введення: один для керування креном, тангажем і тягою, а другий для виконання інших функцій. Застосовуючи функціональність перемикача, відтворену в конфігурації, другий контролер також може змінювати крен, нахил, нишпорення й тягу.

Якщо під'єднано більше ніж один пристрій введення, можна переключитися на один з режимів. Спочатку необхідно обрати пристрій, що використовуватиметься для викладача, і зіставити його. Потім потрібно обрати пристрій для студента й також зіставити його. Після цього в нижній частині інтерфейсу користувача можна буде побачити відкриті пристрої та їх конфігурації.

- 3) вказівка властивостей і параметрів усіх об'єктів у симуляторі.

Переходимо до налаштувань полігону. Спочатку все відключено для розрахунків – об'єкти не піддаватимуться дії сили тяжіння, не будуть

відскакувати один від одного та пролітати крізь інші об'єкти.

Сам полігон і підставки мають бути незміщеними, немов жорстко приклеєними до підлоги сцени, але в разі потрапляння на них ігрових об'єктів вони мають пружинити й на них потрібно звертати увагу. Тому необхідно вказати параметр *Body is respondable*, який означає, що на об'єкт

потрібно зважати під час зіткнень. У моделюванні мають братися до уваги зіткнення з усіма об'єктами.

Для моделювання руху рою БПЛА на сцені було розміщено декілька моделей безпілотних літальних апаратів і відкориговані їх початкові позиції. Після додавання скрипта взаємодії з *Ros* та підскриптів моделювання керуючих програм було запущено моделювання поведінки команди БПЛА (рис. 7).

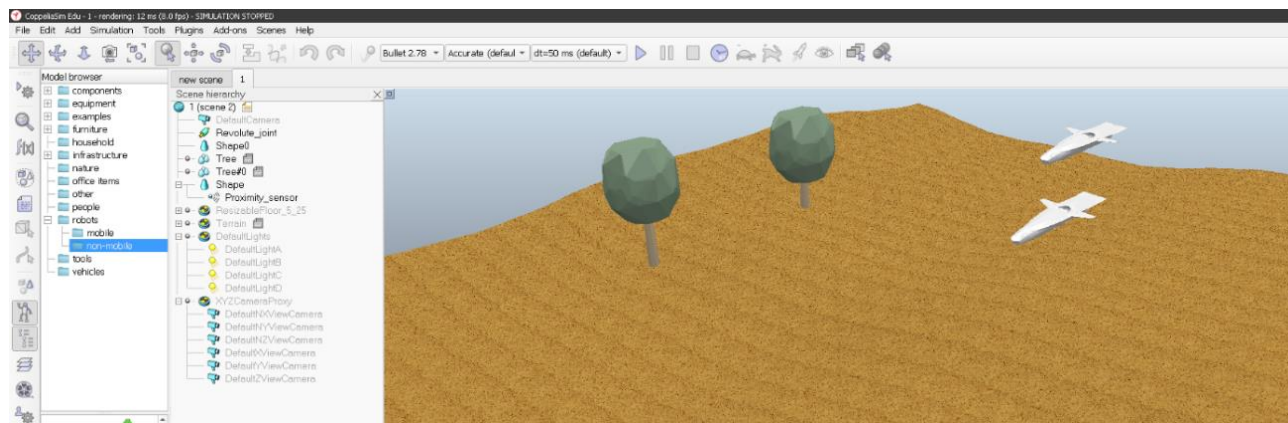


Рис. 7. Модель візуалізації польоту БПЛА за моделлю "провідничий – ведений"

Сукупність БПЛА, що використовуються одночасно для виконання конкретного завдання, називають роєм. Такі дрони працюють разом, повідомляючи про свою позицію та іншу корисну інформацію із заздалегідь визначеними інтервалами часу. Просторове розташування БПЛА один щодо одного є ключовим елементом для їх взаємодії [9]. Управління роєм – одна з найважливіших тем дослідження сукупної поведінки системи. Мета цього процесу полягає в тому, щоб регулярно й багаторазово розвертати та направляти літальні апарати на певній відстані один від одного та підтримувати досягнутий шаблон і надалі [21].

Як приклад руху рою дронів можна розглянути політ зграї птахів. Під час руху члени групи спілкуються на основі отриманої ними інформації, обмеженої зоною огляду. Згідно з дослідженнями поле зору становить 135° з бінокулярним перекриттям 20° (рис. 8) [10]. Такі особливості зумовлюють той факт, що члени зграї можуть рухатися один за одним у полі зору, відповідно створюючи лінії або V-подібну форму групи під час польоту.

На основі схеми польоту окремого об'єкта розглянемо алгоритм польоту рою за умови, що кожний БПЛА має обмежене поле зору, кут огляду становить 250° , а саме $-35^\circ \leq \theta \leq 235^\circ$.

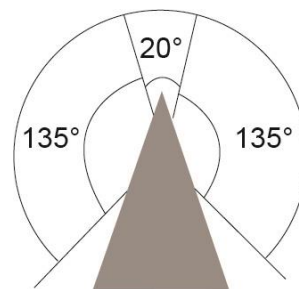


Рис. 8. Поле зору окремого БПЛА

Агент використовує неголономну модель руху, тому може рухатися за умови зміни руху основного об'єкта:

$$\begin{bmatrix} x_i(t + \Delta t) \\ y_i(t + \Delta t) \\ a_i(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \\ a_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos a_i(t) 0 \\ \sin a_i(t) 0 \\ 0 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де (x_i, y_i, a_i) – декартові положення й провідна позиція агента i ; v – лінійна швидкість у координатах кожного агента; ω – кутова швидкість. Вважатимемо, що всі члени рою можуть визначати відстань та кути огляду один одного щодо власних. l_{ij}, φ_{ij} – вимірювана відстань та кут нахилу агента j в діапазоні дії агента i , тоді

$$\begin{cases} x_{ij} = l_{ij} \cos \varphi_{ij} \\ y_{ij} = l_{ij} \sin \varphi_{ij} \end{cases}, \text{ де } -35^\circ \leq \varphi_{ij} \leq 235^\circ, l_{ij} \in [0, R]. \quad (2)$$

Отже, для коректного формування рою БПЛА кожному агенту необхідно знаходити правильне місце для збереження відстані, кут руху щодо агента попереду, уникаючи перешкод та зіткнень один з одним. Комунікаційне оточення агента i – це його "колеги" в рої, розташовані в межах фіксованого радіуса R щодо нього:

$$\mathbb{N}(r_i) = \{r_{j \in \mathbb{N} \neq i} \mid \|p_i - p_j\| \leq R\}, \quad (3)$$

де \mathbb{N} – ділянка "комунікації"; N – кількість членів рою; r_i – агент i ; p_i, p_j – положення в просторі агентів i та j ; R – максимальний радіус взаємодії.

Під час руху рою довкілля може змінюватися, що зумовлює поділ єдиного рою на декілька суброїв. Рій зі змінними від часу характеристиками щодо агента i можна обчислити за формулою

$$S^t(r_i) = r_i \cup \{r_{j \in \mathbb{N}, j \neq i} \mid \|p_i^t - p_j^t\| \leq R\}. \quad (4)$$

Оскільки діапазон комунікації обмежений візуальним полем кожного об'єкта рою, маємо (рис. 9)

$$S_v^t(r_i) = r_i \cup \{r_{j \in \mathbb{N}, j \neq i} \mid \|p_i^t - p_j^t\| \leq R \wedge \varphi_{ij} \notin V\}. \quad (5)$$

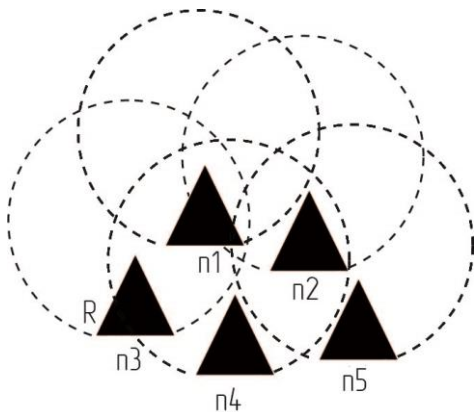


Рис. 9. Рій зі змінними від часу характеристиками та обмеженим візуальним полем

Щоб запобігати зіткненням із перешкодами та з метою огинання перешкод для нескладного рою можна використовувати спрощений алгоритм гістограми векторного поля (англ. *Vector Field Histogram, VFH*). Такий алгоритм визначає напрямку руху завдяки побудові гістограми векторного поля для уявлення полярної щільності перешкод (англ. *polar obstacle density, POD*). Поле сприйняття агента поділяється на n секторів із покриттям $360^\circ/n$. Тоді POD для кожного сектора

$$h^k(q_i) = \int_{\Omega_k} P(p)^n \cdot \left(1 - \frac{d(q_i, p)}{d_{max}}\right)^m dp, \quad (4)$$

де $h^k(q_i)$ – полярна щільність перешкод у секторі k ; $P(p)$ – імовірність того, що в точці p є перешкода; $d(q_i, p)$ – відстань від центра агента до точки p ; d_{max} – максимальна дальність виявлення сенсорів; Ω_k – інтеграція.

$$\Omega_k = \{p \in k \wedge d(q_i, p) < d_s\}. \quad (7)$$

Для утримання строю необхідно брати до уваги низьку обчислювальну складність та обмеження швидкості рою. З огляду на принцип *VFH* можна спроектувати дії БПЛА з кутом огляду 250° , але в діапазоні $[-125^\circ; 125^\circ]$ з напрямком руху 0° . Унаслідок впливу сусідніх секторів згладжена полярна щільність перешкод за напрямком k становить:

$$p_k = \sum_{i=-1}^l w(i) f(k+i), \quad (8)$$

$$f(k+1) = 1 - \frac{\min\{d_s, d(k+i)\}}{d_s}, \quad (9)$$

де l – деяке додатне число для обчислення кожного напрямку $k \in [-a; a]$; $d(k+i)$ – відстань від центра агента до перешкоди за напрямком $k+i$; d_s – заздалегідь визначена безпечна відстань; $w(i)$ – вага сусідніх напрямків:

$$w(i) = \begin{cases} \frac{l-|i|+1}{\sum_{i=-1}^l (l-|i|+1)}, & -a \leq k+i \leq a \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (10)$$

Такий вибір $w(i)$ забезпечує правильність тверджень: що далі сусідній напрямок від k , то менша його вага, і поточний напрямок руху $k(i=0)$ має найбільшу вагу.

Водночас необхідно брати до уваги, що для кожного окремого БПЛА рівняння руху матимуть такий вигляд:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m(t)} \left[P \cos(\alpha + \phi_{дв}) - C_x \frac{\rho S}{2} V^2 \right] - g \sin \theta, \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{m(t)} \left[\frac{1}{V} P \sin(\alpha + \phi_{дв}) - C_y \frac{\rho S}{2} V^2 \right] - \frac{1}{V} g \cos \theta, \quad (12)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{1}{J_z(t)} [M_z + \Delta M_z(\omega_z) + \Delta M_z(\varepsilon)], \quad (13)$$

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = \omega_z, \quad (14)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\mathcal{G}}{dt} - \frac{d\theta}{dt}, \quad (15)$$

$$\frac{dH}{dt} = V \sin \theta, \quad (16)$$

$$\frac{dL}{dt} = V \cos \theta, \quad (17)$$

де

$$m(t) = m_0 - m_T \text{сек} \cdot t \cdot 0 < t < t_{ДВ.К}, \quad (18)$$

$$m(t) = m_0 - m_{\text{сек}} t_{ДВ} = \text{const}, \quad t_{ДВ.К} < t \leq t_{\text{сбр}}, \quad (19)$$

$$m(t) = m_M = \text{const}, \quad t < t_{\text{сбр}}, \quad (20)$$

$$J_z(t) = J_{z0} - J_z \text{сек} \cdot t, \quad (21)$$

$$0 < t \leq t_{ДВ.К}, \quad (22)$$

$$J_z(t) = J_{z0} - J_z \text{сек} \cdot t_{ДВ} = \text{const}, \quad t_{ДВ.К} < t \leq t_{\text{сбр}}, \quad (23)$$

$$J_z(t) = J_{zM} = \text{const}, \quad t > t_{\text{сбр}}, \quad (24)$$

$$x_T = \frac{G_{M^*TM} + G_{0ДВ^*ТДВ-gm_{\text{сек}}x_{ТДВ}t}}{G_M + G_{0ДВ-gm_{\text{сек}}t}}, \quad 0 < t \leq t_{ДВ.К}, \quad (25)$$

$$x_T = \frac{G_{M^*TM} + G_{0ДВ^*ТДВ-gm_{\text{сек}}x_{ТДВ}t_{ДВ.К}}}{G_M + G_{0ДВ-gm_{\text{сек}}t_{ДВ.К}}}, \quad t_{ДВ.К} < t \leq t_{\text{сбр}}, \quad (26)$$

$$x_T = x_{TM} = \text{const}, \quad t > t_{\text{сбр}}. \quad (27)$$

Розглянута класифікація БПЛА дає змогу визначити основні завдання, що виконує рій. Запропонований підхід до управління роєм літальних апаратів з огляду на режим "провідничий – ведений" оснований на моделях польоту птахів, удосконалений завдяки впровадженню рівнянь руху кожного індивідуального агента. Такий підхід дозволяє прогнозувати траєкторію польоту кожного агента окремо та рою загалом.

Список літератури

1. Jia G. W., Wang J. F. Research review of UAV swarm mission planning method. *Systems Engineering and Electronics*. 2021. Vol. 43. №. 1. P. 99–111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.13
2. Do H. T. Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey / Do H. T. et al. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27), Vol. 8(27):170230. 2021. DOI: 10.4108/eai.10-6-2021.170230
3. Na S., Niu H., Lennox B., Arvin F. Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3), P. 2511–2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346
4. Pawelczyk M. Ł., Wojtyra M. Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, P. 174394–174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
5. Zhang J., et al. Perdix: A Swarm of Swarming UAVs. *Journal of Field Robotics*, 2019, Vol. 36(6), P. 1240–1255.
6. Smith J., et al. LOCUST: Low-Cost UAV Swarm Technology for Tactical Operations. *Defense Technology*, 2020, Vol. 16(3), P. 205–215.
7. Sytsma J., Thompson D., Sicoli J. Drone Ultrasonic Detection. Australian International Aerospace Congress, 2023. URL: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (last accessed 17 May 2024).

Висновки

У процесі дослідження проаналізовано та розроблено методи управління роєм безпілотних літальних апаратів за моделлю "провідничий – ведений". Розглянуті класифікації наявних БПЛА та параметри взаємодії в групах, зграях, асоціаціях та роях дали змогу визначити основні завдання, що виконує рій. Запропонований підхід до керування групою літальних апаратів зважає на режими "вчитель" або "наставник" для побудови рою. Розглянутий підхід оснований на моделях польоту птахів, удосконалений завдяки впровадженню рівнянь руху кожного індивідуального агента, що допомагає прогнозувати траєкторію польоту кожного агента окремо та рою загалом.

Створено програму для візуалізації польоту безпілотних літальних апаратів за моделлю "провідничий – ведений" та випробувано політ за запропонованою моделлю на етапах, де є різні геопросторові об'єкти. Результати підтвердили ефективність розробленої моделі та показали можливість її застосування в різних сферах, зокрема екологічний моніторинг, рятувальні операції та інші автономні місії.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації енергоспоживання та забезпеченні надійного зв'язку між агентами рою в умовах реального часу. Також важливо розробити методи захисту роїв БПЛА від кібератак та інших загроз, щоб підвищити їх стійкість і надійність під час виконання складних місій.

8. Kritsky D. N., Ovsianik V. M., Pogudina O. K., Shevel V. V., Druzhinin, E. A. Model for intercepting targets by the unmanned aerial vehicle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. P. 197–206. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_20
9. Pohudina O. et al. Assessing unmanned traffic bandwidth. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: Synergetic Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 447–458. DOI:10.1007/978-3-030-37618-5_38
10. Petersen K. Tackling air pollution with autonomous drones. MIT School of Engineering, 2021. URL: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (дата звернення 17.05.2024)
11. Chu J. New traffic cop algorithm helps a drone swarm stay on task. MIT News Office, 2023. URL: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (дата звернення 17.05.2024).
12. Lizzio F. F., Capello E., Guglieri G. A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, Vol. 106, (43). 1719 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01743-9>
13. Padmaja B., Moorthy Ch V K N S N Moorthy, Venkateswarulu N., Bala M.M. Exploration of issues, challenges and latest developments in autonomous cars. *Journal of Big Data*, 2023. Vol. 10(1). P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00701-y>
14. Enwerem C., Baras J.S. Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems. *Electrical Engineering and Systems Science*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
15. Xu Z., Yan T., Yang S.X., Gadsden S.A. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3272666>
16. Ye Y., Hu S., Zhu X., Sun Z. An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation. *Machines*, 2024, 12(1), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12010032>
17. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2023. P. 1–33. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2304/2304.00225.pdf> (дата звернення 17.05.2024).
18. Kritskiy D., Yashin S., Koba S. Unmanned aerial vehicle mass model peculiarities. *International scientific-practical conference. Cham: Springer International Publishing*, 2020. P. 299–308. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29
19. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. 2023. URL: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf> (дата звернення 17.05.2024).

References

1. Jia, G. W., Wang, J. F. (2021), "Research review of UAV swarm mission planning method". *Systems Engineering and Electronics*. 2021. Vol. 43. №. 1. P. 99–111. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.13
2. Do, H. T. (2021), "Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey" / Do H. T. et all. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27), Vol. 8(27):170230. DOI:10.4108/eai.10-6-2021.170230
3. Na, S., Niu, H., Lennox, B., Arvin, F. (2022), "Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 3, P. 2511–2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346
4. Pawełczyk, M. Ł., Wojtyra, M. (2020), "Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection", *IEEE Access*, Vol. 8, P. 174394–174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
5. Zhang, J., et al. (2019), "Perdix: A Swarm of Swarming UAVs", *Journal of Field Robotics*, Vol. 36, No. 6, P. 1240–1255.
6. Smith, J., et al. (2020), "LOCUST: Low-Cost UAV Swarm Technology for Tactical Operations," *Defense Technology*, Vol. 16, No. 3, P. 205–215.
7. Sytsma, J., Thompson, D., and Sicoli, J. (2023), "Drone Ultrasonic Detection", Australian International Aerospace Congress. available online: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (last accessed 17 May 2024).
8. Kritsky, D. N., Ovsianik, V. M., Pogudina, O. K., Shevel, V. V., and Druzhinin, E. A. (2019), "Model for intercepting targets by the unmanned aerial vehicle", *Advances in Intelligent Systems and Computing*. P. 197–206. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_20

9. Pohudina, O., Kritskiy, D., Koba, S., and Pohudin, A. (2020), "Assessing unmanned traffic bandwidth", *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: Synergetic Engineering*. P. 447–458. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_38
10. Petersen, K. (2021), "Tackling air pollution with autonomous drones", MIT School of Engineering. available online: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (last accessed 17 May 2024).
11. Chu, J. (2023), "New traffic cop algorithm helps a drone swarm stay on task", MIT News Office. available online: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (last accessed 17 May 2024).
12. Lizzio, F. F., Capello, E., and Guglieri, G. (2022), "A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 106, (43). 1719 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01743-9>
13. Padmaja, B., Moorthy, C.H.V.K.N.S.N., Venkateswarulu, N., and Bala, M.M. (2023), "Exploration of issues, challenges and latest developments in autonomous cars", *Journal of Big Data*, Vol. 10(1). P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00701-y>
14. Enwerem, C. and Baras, J.S. (2023), "Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems", *Electrical Engineering and Systems Science*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
15. Xu, Z., Yan, T., Yang, S.X., and Gadsden, S.A. (2023), "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3272666>
16. Ye, Y., Hu, S., Zhu, X., and Sun, Z. (2024), "An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation", *Machines*, 12(1), 32. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines1201003>
17. Sarhadi, P., et al. (2023), "Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. P. 1–33. available online: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2304/2304.00225.pdf> (last accessed 17 May 2024).
18. Kritskiy, D., Yashin, S., and Koba, S. (2021), "Unmanned aerial vehicle mass model peculiarities". P. 299–308. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29
19. "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter" (2023), available online: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf> (last accessed 17 May 2024).

Надійшла (Received) 09.05.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Бінько Ігор Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: i.v.binko@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5638-4292>

Шевель Володимир Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: v.shevel@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0534-0242>

Крицький Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: d.krickiy@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0194>

Binko Ihor – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

Shevel Volodymyr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

Krytskiy Dmytro – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO MANAGING ROBOT GROUP FORMATION

Subject matter: Research and development of methods for controlling swarms of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the "master – slave" model. This includes examining existing classifications and interactions between unmanned aerial vehicles in various formations such as groups, flocks, associations, and swarms, with the goal of creating an effective management system. **Goal** To improve the quality of interaction between unmanned aerial vehicles based on the "master – slave" model during flight missions through constant control between objects. Ensuring reliable execution of flight missions by implementing new management methods that account for different modes of interaction between devices. **Tasks:** Analyze the classification of existing UAVs; analyze the parameters and model of interaction of unmanned aerial vehicles in existing groups, flocks, associations, swarms; create a scenario of interaction between two UAVs based on the "master – slave" model; develop a program for visualizing the flight of unmanned aerial vehicles based on the "master – slave" model; conduct flight testing according to the proposed model on stages with various geospatial objects. **Methods:** Simulation method for developing a UAV flight visualization subsystem; graphical modeling method for creating an aircraft-type unmanned aerial vehicle model; methods of algorithm theory for developing a scenario of interaction between two UAVs. Utilization of specialized software tools for visualization and simulation of UAV behavior in real-time conditions. **Results:** Developed a classification of unmanned aerial vehicles; created a graphical model of the Mini-Flight-M aircraft; developed a scheme for the interaction of two UAVs in "teacher" or "mentor" modes; created a program for visualizing the flight of UAVs based on the "master – slave" model; conducted flight testing according to the proposed model on stages with various geospatial objects. The results confirmed the effectiveness of the developed model and demonstrated its applicability in various fields, including environmental monitoring, rescue operations, and other autonomous missions. **Conclusions:** The proposed approach to controlling a UAV swarm based on the "master – slave" model improves the quality of interaction between the devices and ensures reliable execution of flight missions. Further research should focus on optimizing energy consumption and ensuring reliable communication between swarm agents. It is also important to develop methods for protecting UAV swarms from cyberattacks and other threats to enhance their resilience and reliability during complex missions.

Keywords: unmanned aerial vehicles; swarm; master – slave; interaction; simulation; visualization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бінько І. В., Шевель В. В. Крицький Д. М. Комплексний підхід до управління формуванням групи роботів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 2 (28). С. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.017>

Binko, I., Shevel, V. Krytskyi D. (2024) "A comprehensive approach to managing robot group formation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (28), P. 17–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.017>