

МОДЕЛЬ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОГО КЕРУВАННЯ СПІЛЬНИМ РУХОМ ВЕЛИКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ АНСАМБЛІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

УДК 004.9

DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2019.25.4-17>**Шерстюк Володимир**д.т.н., професор, Херсонський національний технічний університет,
Україна, E-mail: vgsherstyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-9096-2582**Сокол Ігор**

к.т.н., доцент, докторант Херсонського національного технічного університету ORCID 0000-0002-7324-1441

Гусев Віктор

к.т.н., доцент, начальник коледжу Херсонської державної морської академії ORCID 0000-0001-7775-2276

Левківський Руслан

заст. начальника коледжу Херсонської державної морської академії ORCID 0000-0003-3114-179X

Анотація. В статті розглянуто особливості керування одночасним рухом великої групи безпілотних апаратів, що рухаються у спільному 3-D просторі в межах різних середовищ. Розроблено модель керування спільним рухом гетерогенних ансамблів безпілотних апаратів у реальному часі за допомогою гібридної динамічної сценарно-прецедентної системи та представлено архітектуру прототипу цієї системи. Запропонована система керування спільним рухом є частиною складної бортової системи управління безпілотним апаратом, що може пілотувати його за певною траєкторією, яка визначається сценарієм, відповідним до ролі даного безпілотного апарату у ансамблі, його місії та поточної просторової конфігурації, що має відповідає умовам безпеки. Для вирішення задачі використано методи сценарно-прецедентного підходу, отримання висновків на основі моделей, та перевірки дотримання обмежень. Новизна запропонованого підходу полягає у розробці гібридної моделі сценарно-прецедентного пошуку рішень, що заснована на принципах пасивного керування, та комбінує сценарно-прецедентний пошук рішень з їх адаптацією на основі кінематичних моделей та верифікацією з перевіркою дотримання заданих обмежень. Модель має обчислювальну складність, яка слабо залежить від числа динамічних об'єктів, які одночасно рухаються, та є працездатною у 3-D просторі. Практична значимість запропонованого підходу полягає в тому, що він дає можливість вирішувати задачу керування спільним рухом безпілотних апаратів у гетерогенних ансамблях в умовах реального часу, змінюючи призначені сценарії активності «на льоту», замінюючи, додаючи або видаляючи певні послідовності дій та синхронізуючи їх у часі та просторі, що дозволяє безпілотним апаратам спільно маневрувати, уни-

каючи зіткнень, перешкод тощо. Це дозволяє отримувати адекватні і своєчасні реакції ансамбля безпілотних апаратів на динамічні та ситуаційні збурення, що їх зазнають окремі безпілотники внаслідок непередбачуваності середовища. Запропонований підхід суттєво зменшує обчислювальну складність вирішення задачі. Спираючись на опис поточної просторової конфігурації та використовуючи кінематичну модель безпілотних апаратів, він дозволяє отримувати елементи безпечних траєкторій безпілотників, що входять до гетерогенного ансамблю, та які максимально підтримують задану структурну та геометричну конфігурацію й компенсують виникаючі збурення.

Ключові слова: траєкторія, спільний рух, план, сценарій, прецедент, обмеження, збурення, маневр.

Постановка проблеми

Безпілотні системи використовуються в багатьох сучасних технічних системах для вирішення різних задач реального часу. Завдяки значному прогресу технологій безпілотники можуть використовуватись не тільки поодиночки, але і групами, в тому числі великими і навіть надвеликими. Більше того, настав час і гетерогенних ансамблів безпілотників, які мають різний розмір, можливості, ролі та навіть сфери використання, але використовуються разом для вирішення певної задачі. Одним із таких застосувань є інтелектуальне, або смарт-рибальство, до якого можуть бути залучені безпілотні системи найширшого спектру. Так, пошук рибних зграй може здійснюватися за допомогою групи безпілотних літальних апаратів (unmanned aerial vehicle, UAV). Носіями рибальських знарядь можуть бути безпілотні катери (unmanned surface vehicle, USV), що також можуть використовуватись групами. Виявляти породи риб в зграї та потім заганяти зграї до риболовних знарядь можуть групи безпілотних підводних апаратів (unmanned underwater vehicle, UUV). А носієм усіх вищеназваних безпілотників та одночасно накопичувачем виловленої риби незабаром може стати великий корабель, який теж може бути автоматизований до рівня непілотованого (Autonomous Ship, AS).

Звичайно, безпілотні апарати (далі – БА) різних сфер використання мають певні переваги та недоліки, але взаємодоповнюваність їхніх функціональних можливостей дозволяє виконувати їм свої сценарії спільно та одночасно як велика команда, спрямована на досягнення складних цілей місії (промисловий лов риби) без людини. Таку команду називають гетерогенним ансамблем БА, зважаючи на відмінності у їх фізичних та експлуатаційних характеристиках, можливостях, ролях у команді та оточенні [1]. Використовувані в такий спосіб БА є динамічними об'єктами, які рухаються в різних

середовищах і мають певні відмінності в законах і особливостях їх руху, тож керувати їхнім спільним рухом під час виконання гетерогенним ансамблем своєї місії доволі складно. Їх спільний рух зазвичай обмежено в просторі (через обмеження на видимість та дистанцію впевненого зв'язку) через вплив різних динамічних та ситуаційних збурень. За сценарієм місії, кожен БА має виконувати певні функції крім безпосередньо руху, тому його переміщення з однієї точки простору в іншу має на меті виконання певної наступної дії. Рухаючись, БА має підтримувати стрій, тобто відносну позицію або місце в побудові просторової структури ансамбля під час виконання місії, а також зберігати безпечну відстань від інших БА ансамблю та оминати різного роду перепони. До того ж, БА повинні бути повністю автономними, бо одночасне безпечне керування великою групою динамічних об'єктів за допомогою великого колективу операторів неможливо уявити.

Отже, враховуючи значну складність проблем, що виникають під час спільного руху великого ансамблю автономних БА, актуальною задачею для подальших досліджень є розробка інтелектуальних методів та засобів управління спільним рухом БА у різномірному ансамблі у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми управління спільним рухом найчастіше досліджувалися з точки зору виявлення та уникнення зіткнень, і розглядалися у царинах окремо повітряних [2], наземних [3] та підводних систем [4]. В кожній з цих сфер застосування існують значні відмінності між середовищем руху, його обмеженнями та параметрами (швидкості, маневреності, датчиків, часу реакції тощо). Хоча, деякі основні принципи руху та геометрії по суті є однаковими, тому певні прийоми можна запозичити та перенести з однієї області в іншу. Проблема виявлення та уникнення зіткнень за умов спільного руху тісно

пов'язана як з безпекою БА, так і з успішністю виконання місії.

Існуючі підходи до керування БА за умов виявлення зіткнення можна поділити на активні і пасивні, відповідно до типу датчиків, що подають на вхід дані про навігаційну ситуацію. У більшості випадків ці дані базуються на активному типі датчиків (радіолокатори, сонари тощо) [5]. Проте, застосовуються і пасивні датчики, такі як електрооптичні або інфрачервоні камери [6].

Існуючі методи керування БА за умов виявлення зіткнення можна в основному поділити на методи, засновані на кінематиці та геометрії [7], методи, що базуються на нечіткій логіці [8], та методи, що засновані на комп'ютерному моделюванні навігаційної ситуації [9]. Методи керування спільним рухом можуть також бути поділені на реактивні та попереджувальні [10]. Перші звичайно змінюють траєкторію руху динамічного об'єкту у відповідь на виникнення перешкоди руху чи виявлення можливого зіткнення, тобто працюють у реальному часі, на відміну від других, які зазвичай намагаються прогнозувати потрібні траєкторії всіх учасників спільного руху під час вирішення задачі планування маршрутів (path planning). Важливою особливістю методів планування маршрутів є принцип подання маршруту як певної послідовності точок шляху (way-points, WP), в яких має знаходитись БА у певні моменти часу (time points, TP). Тобто, маршрут може бути визначено як впорядкований за відліками часу масив пар (TP, WP), що зручно використовувати для управління спільним рухом БА та їх координації.

Зрозуміло, що при використанні великих груп БА, що рухаються одночасно в різних середовищах, використання як реактивних, так і попереджувальних методів суттєво ускладнюється, бо за допомогою перших стає складно забезпечити реагування в реальному часі, а за допомогою других складно точно прогнозувати можливі траєкторії одночасно всіх рухомих об'єктів, а значне число обмежень не завжди дає можливість отримати рішення задачі планування маршрутів.

Активні підходи, як правило, засновані на кінематиці та геометрії, і ґрунтуються на так званій «точці зіткнення» [11], яка за умов пасивного підходу не буде доступною. Проте, використання пасивного підходу дозволяє «візуально» виявляти маневрування динамі-

чних об'єктів, що при застосуванні активного підходу складає певну проблему [6]. Обидва підходи мають свої переваги і недоліки, що ставить питання доцільності їх комбінації [12].

Методи, засновані на кінематиці та геометрії, зазвичай використовують відносні просторові оцінки, такі як «конуси зіткнення», «домени безпеки», «точки найкоротшого зближення» тощо [13-15]. Методи можуть бути використані як у 2-D просторі (для UGV, USV), так і у 3-D просторі (для UAV, UUV). Альтернативну оцінку, засновану на аналізі складного руху об'єктів на підставі їх кінематики, запропоновано в [16], проте, такі оцінки можуть використовуватися за умов пасивного підходу. Треба зауважити, що за умов спільного руху великої групи динамічних об'єктів використання методів, заснованих на кінематиці та геометрії, є неприйнятним для реактивного керування, бо обчислювальна складність експоненційно зростає відносно числа рухомих об'єктів. Методи, що засновані на комп'ютерному (в т.ч. мультиагентному) моделюванні [9], мають такий самий недолік.

Інша група методів заснована на нечіткій логіці [8], їх основна ідея полягає в тому, щоб наслідувати способи дій пілотів (водіїв, судноводіїв), а виявлення можливого зіткнення виявляється на основі нечітких правил. Певною перевагою нечіткого підходу є його стійкість та зрозуміла інтерпретація. Труднощі в розробці пов'язані з визначенням, оптимізацією та адаптацією так званих функцій приналежності та нечітких правил.

Отже, для використання в великих гетерогенних ансамблях автономних БА потенційним напрямком досліджень є пошук гібридних рішень, що комбінують принципи активного і пасивного підходу, мають обчислювальну складність, яка не залежить або слабо залежить від числа динамічних об'єктів, що одночасно рухаються, та які зберігають працездатність у 3-D просторі.

Відомо, що подолання труднощів з обчислювальною складністю можливо при використанні прецедентного підходу [17], де час пошуку рішення практично не залежить від чисельності динамічних об'єктів у описі навігаційної ситуації. Проте, цей підхід має свої недоліки, найбільш суттєвими з них є залежність часу пошуку рішення від обсягу накопиченого масиву прецедентів та необхідність підтримання достатньої компетентності масиву прецедентів відносно вичерпної множини можливих навігаційних ситуацій.

Сценарно-прецедентний підхід, запропонований в [18], дозволяє за рахунок певної гібридизації з підходами, заснованими на правилах та на моделях, подолати обчислювальну складність прецедентного підходу та забезпечити працездатність системи керування рухом динамічних об'єктів у реальному часі. Гібридизація сценарно-прецедентного підходу з елементами пасивного підходу та кінематичного моделювання за умови використання наближених або м'яких наближених множин [21] може забезпечити вирішення задачі інтелектуального керування спільним рухом БА у гетерогенних ансамблях в умовах реального часу.

Мета дослідження

Метою даної статті є дослідження моделі керування спільним рухом великих гетерогенних ансамблів БА у реальному часі за допомогою гібридної динамічної сценарно-прецедентної системи та розробка архітектури прототипу цієї системи. В рамках статті буде розглянуто особливості адаптації динамічної сценарно-прецедентної системи до керування спільним рухом великої групи БА, що рухаються у спільному 3-D просторі, але в межах різних середовищ.

Виклад матеріалу дослідження

Нехай задано тривимірний евклідовий простір X , який дискретизовано сіткою $D = \{d_{xyz}\}$ ізометричних кубічних комірок d_{xyz} однакового розміру, де x, y, z відповідають координатам клітини. Таким чином, кожна клітина $d_{xyz} \in D$ є просторовим об'єктом найменшого розміру. Розташування кожного БА, а також перепон та цілей, є дискретним та окреслено у просторі межами певних комірок.

Припустимо, що існує шкала часу T , побудована як відкрита впорядкована множина відліків часу (t_0, \dots, t_y) . Припустимо, U є множиною БА, F є множиною їх функцій, Cl є множиною класів БА, та G є множиною цілей. Будемо розглядати певну підмножину БА $u_0, \dots, u_n \in U$ та певну підмножину цілей $g_1, \dots, g_m \in G$, що розсіяні в межах простору X . Кожен БА u_i належить до певного класу $cl_k \in Cl$ відповідно до його властивостей та можливостей, та може виконувати функцію руху $j_o \in F$, рухаючись всередині

простору X , змінюючи свій стан з плином часу та уникаючи перешкод та зіткнень з іншими БА. Крім того, він може виконувати й інші функції $j_j \in F$ залежно від свого класу. Припустимо, що БА $u_i, \dots, u_m \in U$ виконують певну спільну операцію OP в просторі X , цілями якої є $g_e, \dots, g_l \in G$. Стан кожного БА $u_i \in U$ на момент часу t_j може бути поданий через множину значень його параметрів в цей момент часу $F_{ui}(t_j) = \{f_{ui1}(t_j), \dots, f_{uim}(t_j)\}$ (до таких параметрів можуть відноситись швидкість, напрям руху, координати БА в просторі X тощо).

Нехай $Pos(u_i) \in D$ є позицією БА $u_i \in U$ в межах дискретизованого тривимірного простору D , так що $\langle t_i, Pos(u_i) \rangle = (d_{xyz})_{i,t_i} \in D$. Припустимо також, що будь-яка WP також може бути представлена з певним наближенням як комірка $d_{xyz} \in D$. Тоді, зрозуміло, $\langle t_i, Pos(u_i) \rangle = \langle TP, WP \rangle_{(i,t)}$. Таким чином, безперервна послідовність $\langle TP, WP \rangle_{(i,t)} \dots \langle TP, WP \rangle_{(i,m)}$ має визначити траєкторію руху БА u_i протягом інтервалу часу $t \in [t_1, \dots, t_m]$.

Далі, припустимо що БА u_i в момент часу $t_i \in T$ має зайняти певну позицію $Pos(u_i)$ для виконання певної функції j_j . Треба також враховувати, що деякі функції можуть виконуватись лише одноразово в певній WP , в той час як інші функції можуть виконуватись неперервно під час руху БА від однієї WP до іншої.

Відповідно, п'ятірка (пентада) $\langle t_i, Pos(u_i), F(u_i, t_i), j_j, t_j \rangle$ визначає, що БА u_i має виконати певну функцію j_j протягом часу t_j , попередньо зайнявши позицію $Pos(u_i)$ (WP) в момент часу t_i (TP), маючи при цьому параметри руху, що описуються множиною $F(u_i, t_i)$ (FP). Тож послідовність

$$Tr(u_i)_l^m = \langle t_l, Pos(u_i), F(u_i, t_l), j_j, t_j \rangle \dots \langle t_m, Pos(u_i), F(u_i, t_m), j_k, t_k \rangle \dot{U}$$

будемо називати траєкторією активності БА u_i на часовому інтервалі $t \hat{=} [t_l, \dots, t_m]$, що повністю визна-

чає активність вказаного БА на заданому інтервалі часу. Він також може бути поданий як вектор

$$Tr(u_i)_l^m = \langle \langle WP, TP, FP \rangle_{(i,l)}, j_j, t_j \rangle \dots \langle \langle WP, TP, FP \rangle_{(i,m)}, j_k, t_k \rangle \dot{U}$$

Довгострокова операція Op звичайно складається з сукупності місій M_1, \dots, M_n , які можуть виконуватися послідовно або паралельно (одночасно). Для цього певній підмножині БА $u_1, \dots, u_n \hat{=} U$ призначаються відповідні ролі з множини ролей R , якими визначається спроможність певного БА виконувати ту чи іншу місію (при цьому, сукупність заданих ролей має покривати всю множину потрібних для виконання операції місій). Таким чином, БА $u_i, \dots, u_n \hat{=} U$, що призначені для виконання операції Op та мають відмінні між собою ролі, складають гетерогенний ансамбль En , який має деревоподібну структуру $Str(En)$ та схему $Shp(En)$, що має визначати його просторову конфігурацію $V(t)$ в кожний момент часу t . Таким чином, $Str(En)$ подає структурний аспект, а $Shp(En)$ - геометричний аспект операції Op . Кожному БА u_k з ансамблю En призначено роль $r_k \hat{=} R$, за якою він має виконувати певну послідовність місій M_k за визначеним сценарієм W_k , та рухатися за послідовністю позицій WP_{k1}, \dots, WP_{kl} , що задається сценарієм та реалізує траєкторію активності $Tr(u_k)$.

Відповідно до вищевикладеного, основою подання сценарію виконання місії БА може бути траєкторія його руху, що визначається через послідовність точок шляху WP , кожна з яких пов'язано з відповідним моментом часу TP та певними встановленими параметрами руху FP (швидкість, напрям тощо) БА в кожній із заданих WP , тобто, вектором трійок $\langle WP, TP, FP \rangle$. За сценарієм, кожен БА $u_k \hat{=} En$ в кожній визначеній точці часу TP має бути позиціонований у відповідній точці шляху WP , маючи при цьому конкретні параметри FP (необов'язково) та виконувати певну функцію j_j протягом часу t_j (можливо). Взаємне розташування точок шляху

WP всіх задіяних у ансамблі БА u_1, \dots, u_l в певний момент часу t_j (тобто, в певній точці часу TP) визначає його просторову конфігурацію $V(t_j)$.

Схема операції $Sch(Op) = \{W_1, \dots, W_n\}$ має містити відповідні сценарії W_k для кожної із заданих ролей r_k , що призначені відповідним БА – членам ансамблю $u_k \hat{=} En$ та описують спільну активність всіх залучених виконавців, яка має синхронізуватися у часі та просторі. Беззаперечно, структура $Str(En)$ залежить від схеми виконання операції $Sch(Op)$, а остання залежить від зміни просторових позицій всіх учасників спільного руху, тобто від $Shp(En)$, а також від їх персональних ролей. Це, в свою чергу, суттєво залежить від поточної ситуації Sit , яка визначається поєднанням просторового розподілу цільових точок, середовища, параметрів БА, їх просторових позицій, відносного розташування та заданих обмежень.

Для кожного БА $u_k \hat{=} En$ попередньо будується план виконання кожної чергової місії $Pl(M_k)$ як певний прототип, який відповідає стереотипу поточної ситуації Sit та містить траєкторію активності $Tr(u_k)$ із зазначенням послідовності необхідних позицій та виконуваних функцій. У свою чергу, для кожного прототипу $Pl(M_k)$ має визначитися відповідний сценарій W_k .

З іншого боку, кожна операція Op - це реалізація певного плану $Pl(Op) = Pl(M_i) \circ \dots \circ Pl(M_l)$, що складається з планів окремих місій M_i, \dots, M_l , які виконуються БА u_i, \dots, u_l відповідно до їх ролей r_i, \dots, r_l в ансамблі En .

Вибір початкового плану всієї операції $Pl(Op)$, як і відповідних планів місій $Pl(M_k)$ окремих БА

$u_k \in E_n$, виконується на основі взаємного просторового положення виконавців та визначених цілей g_k для цих місій. Але ж, ці плани можуть бути порушені зміною параметрів будь-якого рухомого об'єкта, що безумовно призведе до необхідності зміни самих планів. Адже, виконуючи призначений йому сценарій W_k , внаслідок непередбачуваності середовища (погодні умови, непередбачувані перешкоди тощо) БА u_k наражається на низку динамічних та ситуаційних збурень, тому його

заплановану траєкторію $Tr(u_k)$ так чи інакше буде порушено через необхідність уникати зіткнень, оминати перешкоди тощо, тобто маневрувати. Тому в план $PI(M_k)$ треба «на ходу» вносити зміни, замінюючи, додаючи або видаляючи деякі пари $\langle WP, TP \rangle$ в $Tr(u_k)$. На рис. 1,а показано заплановані траєкторії руху БА u_0 та u_1 для виконання місії охоплення цілі g_1 .

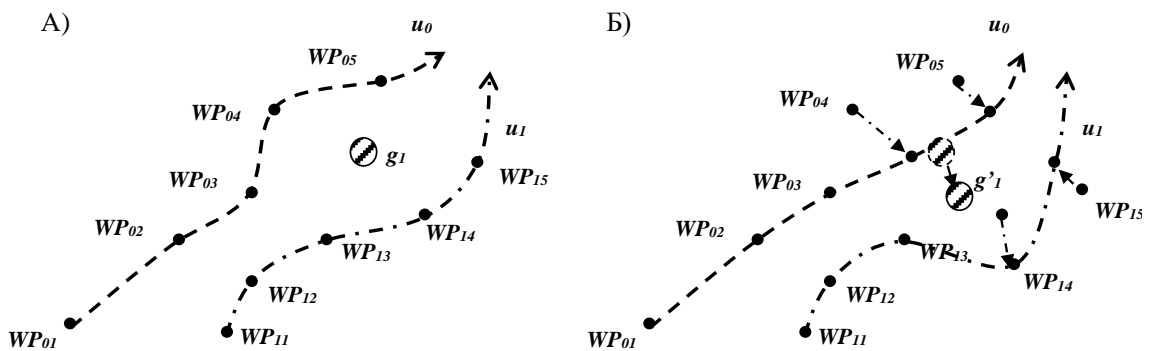


Рис. 1. Зміна траєкторій руху БА у відповідності до ситуаційного збурення

На рис. 1,б показано трансформацію траєкторій руху обох БА у відповідь на ситуаційне збурення, що спричинене переміщенням цілі g_1 у просторі спільного руху: реагування на ситуацію відбулося через зміни позицій точок шляху $WP_{04}, WP_{05}, WP_{14}, WP_{15}$, що відповідають точкам часу TP_4, TP_5 .

Реакцією на будь-яку подію може бути зміна плану місії, зміна точок синхронізації у часі та просторі, додавання, заміна або видалення певних тактик у сценаріях, або навіть зміна схеми $Shp(E_n)$ для здійснення необхідної координації траєкторій $Tr(u_1), \dots, Tr(u_n)$.

Будь-які зміни траєкторії БА, що рухаються спільно і одночасно, є *подіями*, які можуть змінювати хід процесу спільної активності БА, тому на них потрібно вчасно і адекватно реагувати. Таким чином, виконання сценарію W_k буде порушене, і нам потрібно «перебудувати» послідовність дій $W_k = \{m_{k1}, \dots, m_{kj}\}$, де кожна дія m_{kj} має розглядатися як зміна значень певних параметрів руху БА (наприклад, швидкості або напрямку руху).

При одночасному спільному русі великої групи БА u_1, \dots, u_n , що складають ансамбль E_n , завжди існує певна множина обмежень щодо відстані між БА, пеленгами, кутами тощо $L = \{l_1, \dots, l_w\}$ (рис. 2), тому будь-які зміни сценаріїв або траєкторій руху БА не повинні порушувати жодного з заданих обмежень

Таким чином, впродовж виконання операції Op основними компонентами схеми її виконання $Sch(Op)$ будуть спільні маневри певних виконавців u_1, \dots, u_n , які відображаються у відповідних сценаріях W_1, \dots, W_n та повинні бути синхронізованими у часі та просторі. Такі спільні маневри звичайно називають тактичними (tactics).

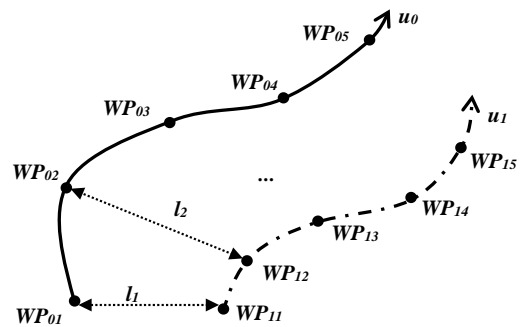


Рис. 2. Траєкторії руху БА u_0, u_1 та їх обмеження

Пошук нового, релевантного поточній ситуації сценарію $W\phi$ за умов дотримання заданої просторової конфігурації $Shp(En)$ та усіх накладених обмежень L є завданням сценарно-прецедентної системи управління.

На вході динамічна сценарно-прецедентна система керування приймає потік подій, що визначає поточну ситуацію (рис. 3).

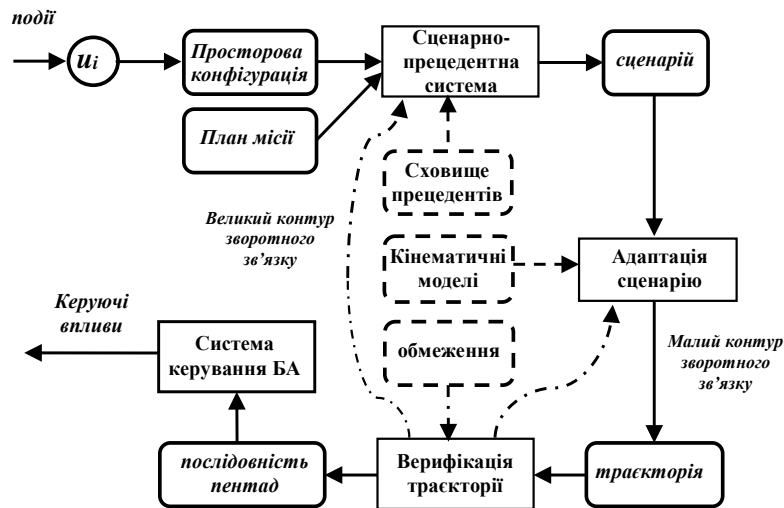


Рис. 3. Послідовність обробки інформації у динамічній сценарно-прецедентній системі

На підставі плану місії та опису поточної ситуації сценарно-прецедентна система виконує пошук прецеденту за стереотипом ситуації (case-based reasoning, CBR). Результатом пошуку є сценарій, який має бути адаптований за допомогою кінематичної моделі. Для реалізації фази адаптації має використовуватися окремий модуль, що реалізує виведення за моделями (model-based reasoning, MBR). Результатом адаптації є побудована траєкторія руху, яку надалі необхідно верифікувати для перевірки дотримання заданих обмежень. Для цього використовується спеціальний модуль, що вирішує задачу дотримання обмежень (constraint satisfaction problem, CSP). Якщо знайдено траєкторія відповідає всім наявним обмеженням, траєкторія перетворюється у послідовність пентад та передається у систему керування БА для подальшого формування керуючих впливів на актуатори БА. Якщо певні обмеження порушено, за допомогою «малого контуру» зворотного зв'язку система робить спробу виконати адаптацію сценарію з новими умовами. Як правило, цей контур зворотного зв'язку дозволяє успішно вирішити задачу адаптації/верифікації рішення. Якщо ж задача

не вирішується за певне (невелике) число кроків, має бути задіяним «великий контур» зворотного зв'язку, за яким проводиться спроба знайти інший сценарій, релевантний поточній ситуації.

Структуру сценарно-прецедентної системи керування спільним рухом БА представлено на рис. 4. Вона складається з модуля пошуку сценаріїв за прецедентами, модуля адаптації за моделями, модуля перевірки дотримання обмежень, сховища прецедентів та множини кінематичних моделей.

На рис. 5 представлено архітектуру гібридної сценарно-прецедентної системи керування спільним рухом БА. Модулі, що виконують пошук рішень за прецедентами, адаптацію рішень та верифікацію рішень, віднесено до бортової системи керування БА.

В той же час сумісно використовувані сховище прецедентів, бібліотека кінематичних моделей, набір обмежень та поточні плани операції і місії окремих БА, обсяг яких значно перевищує можливості бортових комп'ютерів, віднесено до берегової (або наземної) станції керування ансамблем БА, в якій може використовуватися комп'ютерне обладнання значно більшої

потужності. Це дозволяє перенести за межі бортового обладнання також і доволі «важкі» процеси, які відпо-

відають за аналіз, навчання та накопичення прецендентів.

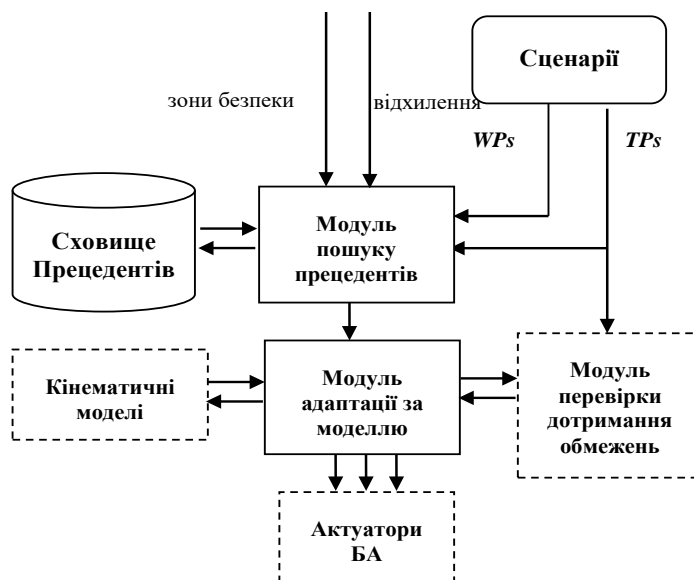


Рис. 4. Структура сценарно-прецендентної системи керування спільним рухом БА

Обмін інформацією здійснюється через комунікаційний інтерфейс прийомом-передачею повідомлень у форматі XML. Сценарії та тригери для кожного класу

подій записуються мовою опису сценаріїв SCDL, надбудованою над XML.

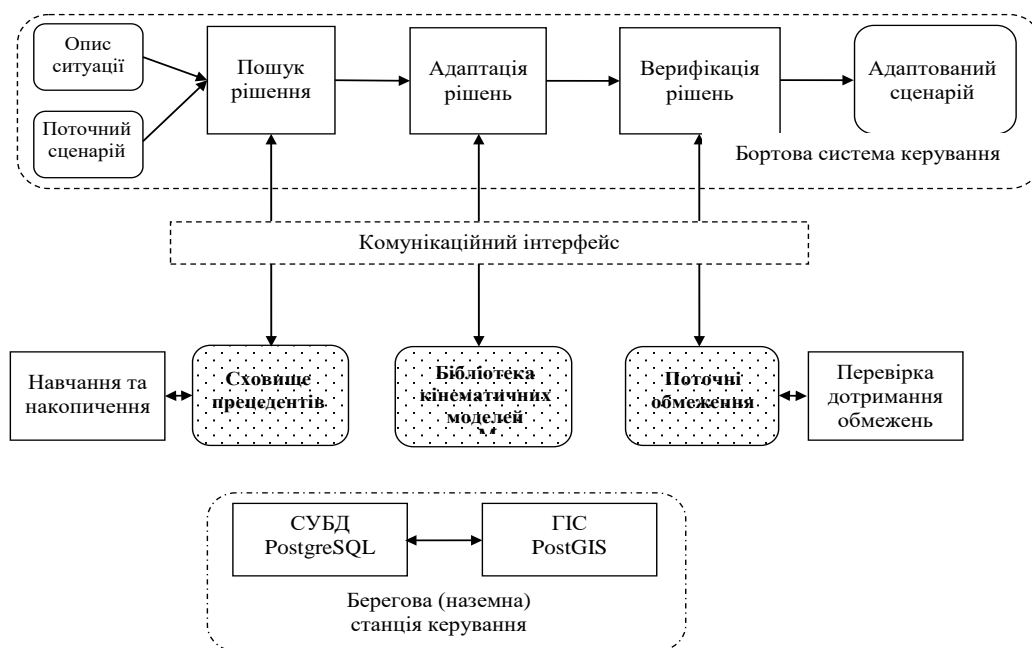


Рис. 5. Архітектура сценарно-прецендентної системи керування спільним рухом БА

Таким чином, керування спільним рухом гетерогенного ансамблю БА є складним багаторівневим процесом, що включає:

- *стратегічний* (операційний) рівень, який призначений для вибору адекватного плану операції і відповідних планів місії на основі просторової конфігурації $V(t)$. Схема виконання операції $Sch(Op)$ налаштовується до $Str(En)$ та $Shp(En)$ в процесі адаптації планів. Потім схема $Sch(Op)$ розкладається на множину сценаріїв, відповідно W_k для всіх ролей $r_k \in R$, призначених БА $u_k \in Str(En)$, і кожен з БА починає виконувати свій сценарій.

- *тактичний* рівень, на якому безпосередньо виконуються сценарії. Кожен сценарій перетворюється у послідовність пентад $\langle t_l, Pos(u_k), F(u_k, t_l), j_j, t_j \rangle$ з урахуванням усіх наявних навігаційних, ситуаційних та часових обмежень. Зокрема, на цьому рівні здійснюється контроль припустимості щодо кожної позиції в пентадах, оскільки БА не повинні потрапляти в небезпечні зони. На цьому рівні сценарно-прецедентна система отримує всі потоки подій та перевіряє просторову конфігурацію $V(t)$. У випадку наявних змін просторо-

вої конфігурації розпочинається пошук нового плану місії для всіх БА, яких ці зміни стосуються. В іншому випадку, на цьому рівні узгоджуються позиції та терміни виконання спільних маневрів відповідно до обраних сценаріїв БА.

- *рівень керування* БА, на якому безпосередньо виконується перетворення пентад у послідовності керуючих дій низького рівня. Цей рівень отримує послідовність пентад на вході і генерує відповідні значення певних параметрів P_{li}, \dots, P_{vj} множини актуаторів ac_l, \dots, ac_v кожного БА u_k на виході.

Всі три рівня можуть бути реалізовані на основі спільного функціонування сценарно-прецедентного модуля, модуля кінематичних моделей та модуля перевірки дотримання обмежень. Модуль, що виконує висновок на основі кінематичної моделі, є головним, тоді як сценарно-прецедентний модуль є підпорядкованим. Процес верифікації рішень прецедентів використовує алгоритм задоволення критичних просторових та часових обмежень.

На рис. 6 представлено загальну структуру бортової системи управління БА з використанням сценарно-прецедентної системи керування спільним рухом.

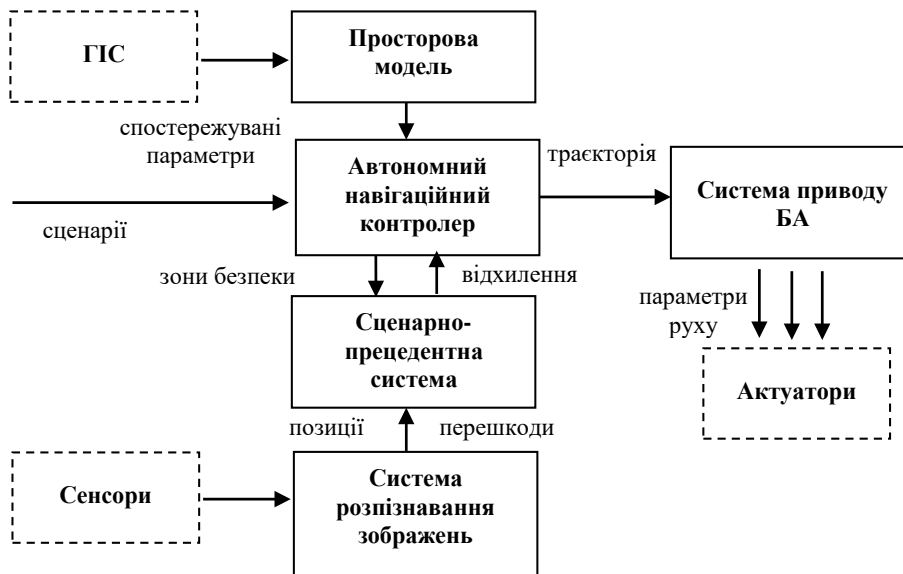


Рис. 6. Загальна структура бортової системи управління БА з використанням сценарно-прецедентної системи керування спільним рухом

Прототип бортової системи управління безпілотником реалізовано на основі вбудованого мікроконтролера STM32F429 (процесор Cortex M4 180 МГц, внутрішня оперативна пам'ять 256 Кб та флеш-пам'ять 2 Мб, зовнішній модуль пам'яті QSPI Flash N25Q512). Для розробки програмних засобів було використано інструментарій GNU для вбудованих процесорів ARM (в т.ч. мову програмування C++ під Linux). В прототипі центру управління ансамблем безпілотників використано сервер HP ProLiant ML350 (Intel Xeon E5-2620, 8 ядер до 3 ГГц) з системою управління базами даних PostgreSQL та ГІС-системою PostGIS який містив сховище прецедентів.

Висновки

В статті розглянуто особливості керування спільним рухом великої групи БА, що рухаються у спільному 3-D просторі в межах різних середовищ. Розроблено модель керування спільним рухом гетерогенних ансамблів БА у реальному часі за допомогою гібридної динамічної сценарно-прецедентної системи та представлено архітектуру прототипу цієї системи.

Запропонована система керування є частиною складної бортової системи управління БА, яка може пілотовати його за певною траєкторією, що визначається сценарієм, відповідним до ролі даного БА у ансамблі, його місії та поточної просторової конфігурації, яка має відповідати умовам безпеки.

Новизна запропонованого підходу полягає у розробці гібридної моделі сценарно-прецедентного по-

шуку рішень, що заснована на принципах пасивного керування, та комбінує сценарно-прецедентний пошук рішень з їх адаптацією на основі кінематичних моделей та верифікацією з перевіркою дотримання заданих обмежень. Ця модель має обчислювальну складність, яка слабко залежить від числа динамічних об'єктів, які одночасно рухаються, та є працездатною у 3-D просторі.

Практична значимість запропонованого підходу полягає в тому, що він дає можливість вирішувати задачу керування спільним рухом БА у гетерогенних ансамблях в умовах реального часу, змінюючи призначені БА сценарії активності «на льоту», замінюючи, додаючи або видаляючи певні послідовності дій та синхронізуючи їх у часі й просторі, що дозволяє БА спільно маневрувати, уникаючи зіткнень, перешкод тощо. Це дозволяє отримувати адекватні і своєчасні реакції ансамбля БА на динамічні та ситуаційні збурення, яких зазнають окремі БА ансамблю внаслідок непередбачуваності середовища.

Запропонований підхід суттєво зменшує обчислювальну складність вирішення проблем. Спираючись на опис поточної просторової конфігурації та використовуючи кінематичну модель БА, він дозволяє отримувати елементи безпечних траєкторій БА, що входять до гетерогенного ансамблю, які максимально підтримують задану структурну та геометричну конфігурацію та компенсують виникаючі збурення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Sherstjuk, V. (2015). Scenario-Case Coordinated Control of Heterogeneous Ensembles of Unmanned Aerial Vehicles. In *Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* (pp. 275–279). <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346620>
2. Cruz, G.C.S., & Encarnação, P.M.M. (2012). Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 65(1-4), 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9587-z>
3. Lapiere, L., Zapata, R., & Lepinay, P. (2007). Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot. *International Journal of Robotics Research*, 26(4), 361–375. <https://doi.org/10.1177/0278364907076790>
4. Carvalhosa, S., Pedro Aguiar, A., & Pascoal, A. (2010). Cooperative Motion Control of Multiple Autonomous Marine Vehicles: Collision Avoidance in Dynamic Environments. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(16), 395–400. <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00069>
5. Ge, S.S., Lai, X.-C., & Al Mamun, A. (2007). Sensor-based path planning for nonholonomic mobile robots subject to dynamic constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(7), 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.02.003>
6. Skowron, M., Chmielowiec, W., Glowacka, K., Krupa, M., & Srebro, A. (2019). Sense and avoid for small unmanned aircraft systems: Research on methods and best practices. *Journal of Aerospace Engineering*, 233(16), 6044–6062. <https://doi.org/10.1177/0954410019867802>
7. Orefice, M., Di Vito, V., & Torrano, G. (2015). Sense and Avoid: Systems and Methods. In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, J. Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae1149>
8. Tsourveloudis, N.C., Doitsidis, L., & Valavanis, K.P. (2005). Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective. In *Cutting Edge Robotics*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/4654>

9. Lyu, Y., Pan, Q., Zhao, C., Yu, C., & Hu, J. (2016). A UAV Sense and Avoid System Design Method Based on Software Simulation. In *Proceedings of 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems* (pp. 572–579). <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502673>
10. Häusler, A.J., Saccon, A., Pedro Aguiar, A., Hauser, J., & Pascoal, A. (2012). Cooperative Motion Planning for Multiple Autonomous Marine Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(27), 244–249. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00042>
11. Polvara, R., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., & Sutton, R. (2018). Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Navigation*, 71(1), 241–256. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>
12. Hoy, M., Matveev, A., & Savkin, A. (2015). Algorithms for Collision-Free Navigation of Mobile Robots in Complex Cluttered Environments: A Survey. *Robotica*, 33(3), 463–497. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000289>
13. Chakravarthy, A., & Ghose, D. (1998). Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 28(5), 562–574. <https://doi.org/10.1109/3468.709600>
14. Pietrzykowski, Z., & Uriasz, J. (2009). The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area. *Journal of Navigation*, 62, 93–108. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005018>
15. Song, L., Chen, Z., Dong, Z., Xiang, Z., Mao, Y., Su, Y., & Hu, K. (2019). Collision avoidance planning for unmanned surface vehicle based on eccentric expansion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(3). <https://doi.org/10.1177/1729881419851945>
16. Zak, B. (2004). The Problems of Collision Avoidance at Sea in the Formulation of Complex Motion Principles. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 14(4), 503–514.
17. Liu, Y., Yang, C., & Du, X. (2008). A CBR-based Approach for Ship Collision Avoidance. In: *New Frontiers in Applied Artificial Intelligence, Lecture Notes In Artificial Intelligence*, 5027, 687–697. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69052-8_72
18. Шерстюк, В. (2013). Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами. Lambert Academic Publishing.
19. Шерстюк, В. (2015). Модель вывода по прецедентам в интеллектуальной системе «Муссон». *Штучний інтелект*, 1-2, 103–111.
20. Шерстюк, В. (2012). Динамический отбор прецедентов в интеллектуальной системе «Муссон». *Штучний інтелект*, 4, 392–403.
21. Zharikova, M., & Sherstjuk, V. (2016). Case-based Approach to Intelligent Safety Domains Assessment for Joint Motion of Vehicles Ensembles. In *Proceedings of the 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control* (pp. 245–250). <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783153>
22. Шерстюк, В. (2012). Основы теории динамических сценарно-прецедентных интеллектуальных систем. Феникс.
23. Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2018). Forest Fire-Fighting Monitoring System Based on UAV team and Remote Sensing. In *Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology* (pp. 99–106). <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477527>

MODEL OF SCENARIO-CASE CONTROL OF COOPERATIVE MOTION OF LARGE HETEROGENEOUS ENSEMBLES OF DRONES IN REAL TIME

Volodymyr Sherstiuk

Doctor of Technical Sciences, Professor, KNTU, Kherson, Ukraine
Email: vgsherstyuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9096-2582

Sokol Ihor

PhD., Associate professor, Doctoral candidate, Kherson National Technical University, Ukraine
ORCID: 0000-0002-7324-1441

Husiev Viktor

PhD, Associate Professor, Head of the College of Kherson State Maritime Academy ORCID: 0000-0001-7775-2276

Ruslan Levkivskyi

Deputy Head of the Kherson State Maritime Academy College ORCID: 0000-0003-3114-179X

Abstract. The paper considers the peculiarities of simultaneous motion control of a large group of unmanned vehicles moving in the common 3-D space within different environments. A model of the joint motion control of heterogeneous unmanned vehicles in real time using a hybrid dynamic scenario-case system is developed and the prototype architecture of such system is presented. The proposed joint motion control system is a part of the complex onboard control system that can pilot an unmanned vehicle on a specific trajectory, which is determined by the scenario with respect to the role of the unmanned vehicle in the ensemble, its mission and a current spatial configuration, which should meet the safety requirements. To solve the problem, we used the methods of scenario-case approach, model-based reasoning, and constraint satisfaction. The novelty

of the proposed approach is to develop a hybrid model of finding case-based solutions based on passive control principles, and combine scenario-case search of solutions with their adaptation based on kinematic models and verification of specified constraints satisfaction. The model has a computational complexity that is weakly dependent on the number of dynamic moving objects and is capable to work in 3-D space. The practical relevance of the proposed approach is that it enables the joint motion control of unmanned vehicles in heterogeneous ensembles in real time by changing “on-the-fly” activity scenarios assigned to unmanned vehicles, replacing, adding or removing specific action sequences and synchronizing them allowing unmanned vehicles to maneuver together avoiding collisions, obstacles, etc. This allows to obtain adequate and timely reactions of the ensemble of unmanned vehicles to the dynamic and situational perturbations experienced by the individual vehicle due to the unpredictability of the environment. The proposed approach significantly reduces the computational complexity of problem solving. Based on the description of the current spatial configuration and using the kinematic model of unmanned vehicles, it allows to obtain safe elements of the trajectories of vehicles, which are the parts of the heterogeneous ensemble, and support the given structural and geometric configuration maximally compensating perturbations simultaneously.

Keywords: *trajectory, joint motion, plan, scenario, case, constraints, perturbations, maneuver.*

МОДЕЛЬ СЦЕНАРНО-ПРЕЦЕДЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЩИМ ДВИЖЕНИЕМ БОЛЬШИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ АНСАМБЛЕЙ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Владимир Шерстюк

д.т.н., профессор, Херсонский национальный технический университет, Украина,
Email:vgsherstyuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9096-2582

Игорь Сокол

к.т.н., доцент, докторант Херсонского национального технического университета
ORCID: 0000-0002-7324-1441

Виктор Гусев

к.т.н., доцент, начальник колледжа Херсонской государственной морской академии
ORCID: 0000-0001-7775-2276

Руслан Левковский

Зам. начальника колледжа Херсонской государственной морской академии
ORCID: 0000-0003-3114-179X

Аннотация. В статье рассмотрены особенности управления одновременным движением большой группы беспилотных аппаратов, движущихся в общем 3-D пространстве в рамках различных сред. Разработана модель управления совместным движением гетерогенных ансамблей беспилотных аппаратов в реальном времени с помощью гибридной динамической сценарно-прецедентной системы, представлена архитектура прототипа этой системы. Предложенная система управления совместным движением является частью сложной бортовой системы управления беспилотных аппаратов, она может пилотировать беспилотник по определенной траектории, определяемой сценарию, соответствующему роли данного беспилотного аппарата в ансамбле, его миссии и текущей пространственной конфигурации, соответствующей условиям безопасности. Для решения задачи использованы методы сценарно-прецедентного подхода, получения выводов на основе моделей, и проверки удовлетворения ограничений. Новизна предложенного подхода заключается в разработке гибридной модели сценарно-прецедентного поиска решений, основанной на пассивных принципах управления, и комбинирующей сценарно-

прецедентный поиск решений с их адаптацией на основе кинематических моделей и верификацией для проверки удовлетворения заданных ограничений. Модель имеет вычислительную сложность, слабо зависящую от числа динамических объектов, которые одновременно движутся, и является работоспособной в 3-D пространстве. Практическая значимость предложенного подхода заключается в том, что он дает возможность решать задачу управления совместным движением беспилотных аппаратов в гетерогенных ансамблях в условиях реального времени, изменяя назначенные сценарии активности «на лету», заменяя, добавляя или удаляя определенные последовательности действий и синхронизируя их во времени и пространстве, что позволяет беспилотным аппаратам совместно маневрировать, избегая столкновений, препятствий и т.д. Это позволяет получать адекватные и своевременные реакции ансамбля беспилотных аппаратов на динамические и ситуационные возмущения, которые испытывают отдельные беспилотники ансамбля из-за непредсказуемости среды. Предложенный подход существенно уменьшает вычислительную сложность решения задачи. Опираясь на описание текущей пространственной конфигурации и используя кинематические модели беспилотных аппаратов, он позволяет получать элементы безопасных траекторий беспилотников, входящих в гетерогенный ансамбль, и максимально поддерживает заданную структурную и геометрическую конфигурацию, компенсируя возникающие возмущения.

Ключевые слова: траектория, совместное движение, план, сценарий, прецедент, ограничения, возмущения, маневр.

REFERENCES:

1. Sherstjuk V. Scenario-Case Coordinated Control of Heterogeneous Ensembles of Unmanned Aerial Vehicles. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments: Proceedings of the 2015 IEEE 3rd International Conference*. Kyiv, 2015. Pp. 275–279. <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346620>
2. Cruz G.C.S., Encarnação P.M.M. Obstacle Avoidance for Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent Robotic Systems*. 2012. Vol. 65(1-4). Pp. 203–217. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9587-z>
3. Lapiere L., Zapata R., Lepinay P. Combined Path-following and Obstacle Avoidance Control of a Wheeled Robot. *International Journal of Robotics Research*. 2007. Vol. 26(4). Pp. 361–375. <https://doi.org/10.1177/0278364907076790>
4. Carvalhosa S., Pedro Aguiar A., Pascoal A. Cooperative Motion Control of Multiple Autonomous Marine Vehicles: Collision Avoidance in Dynamic Environments. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010. Vol. 43(16). Pp. 395–400. <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00069>
5. Ge S.S., Lai X.-C., Al Mamun A. Sensor-based path planning for nonholonomic mobile robots subject to dynamic constraints. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007. Vol. 55(7). Pp. 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.02.003>
6. Skowron M., Chmielowiec W., Glowacka K., Krupa M., Srebro A. Sense and avoid for small unmanned aircraft systems: Research on methods and best practices. *Journal of Aerospace Engineering*. 2019. Vol. 233(16). Pp. 6044–6062. <https://doi.org/10.1177/0954410019867802>
7. Orefice M., Di Vito V., Torrano G. Sense and Avoid: Systems and Methods. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. J. Wiley & Sons, 2015. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae1149>
8. Tsourveloudis N.C., Doitsidis L., Valavanis K.P. Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective. *Cutting Edge Robotics*. IntechOpen, 2005. <https://doi.org/10.5772/4654>
9. Lyu Y., Pan Q., Zhao C., Yu C., Hu J. A UAV Sense and Avoid System Design Method Based on Software Simulation. *Unmanned Aircraft Systems: Proceedings of 2016 International Conference*. Arlington, 2016. Pp. 572–579. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2016.7502673>
10. Häusler A.J., Saccon A., Pedro Aguiar A., Hauser J., Pascoal A. Cooperative Motion Planning for Multiple Autonomous Marine Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 45(27). Pp. 244–249. <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00042>
11. Polvara R., Sharma S., Wan J., Manning A., Sutton R. Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Navigation*. 2018. Vol. 71(1). Pp. 241–256. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>
12. Hoy M., Matveev A., Savkin A. Algorithms for Collision-Free Navigation of Mobile Robots in Complex Cluttered Environments: A Survey. *Robotica*. 2015. Vol. 33(3). Pp. 463–497. <https://doi.org/10.1017/S0263574714000289>
13. Chakravarthy A., Ghose D. Obstacle avoidance in a dynamic environment: a collision cone approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*. 1998. Vol. 28(5). Pp. 562–574. <https://doi.org/10.1109/3468.709600>
14. Pietrzykowski Z., Uriasz J. The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area. *Journal of Navigation*. 2009. Vol. 62. Pp. 93–108. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005018>
15. Song L., Chen Z., Dong Z., Xiang Z., Mao Y., Su Y., Hu K. Collision avoidance planning for unmanned surface vehicle based on eccentric expansion. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019. Vol. 16(3). <https://doi.org/10.1177/1729881419851945>

16. Zak B. The Problems of Collision Avoidance at Sea in the Formulation of Complex Motion Principles. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2004. Vol. 14(4). Pp. 503–514.
17. Liu Y., Yang C., Du X. A CBR-based Approach for Ship Collision Avoidance. *New Frontiers in Applied Artificial Intelligence: Lecture Notes In Artificial Intelligence*. 2008. Vol. 5027. Pp. 687–697. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69052-8_72
18. Шерстюк В.Г. Сценарно-прецедентное управление эргатическими динамическими объектами. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 407 с.
19. Шерстюк В.Г. Модель вывода по прецедентам в интеллектуальной системе «Муссон». *Штучний інтелект*. 2015. №1-2. С. 103–111.
20. Шерстюк, В.Г. Динамический отбор прецедентов в интеллектуальной системе «Муссон». *Штучний інтелект*. 2012. №4. С. 392–403.
21. Zharikova M., Sherstjuk V. Case-based Approach to Intelligent Safety Domains Assessment for Joint Motion of Vehicles Ensembles. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: Proceedings of the 4th International Conference*. Kyiv, 2016. Pp. 245–250. <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783153>
22. Шерстюк В.Г. Основы теории динамических сценарно-прецедентных интеллектуальных систем. Херсон: Феникс, 2012. 476 с.
23. Sherstjuk V., Zharikova M., Sokol I. Forest Fire-Fighting Monitoring System Based on UAV team and Remote Sensing. *Electronics and Nanotechnology: Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference*. Kyiv, 2018. Pp. 99–106. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2018.8477527>