



І. Г. Цмоць, Ю. М. Римар, Ю. В. Опотяк, С. В. Теслюк, О. О. Олійник

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ЗАВДАНЬ У ГРУПІ МІЖ МОБІЛЬНИМИ РОБОТОТЕХНІЧНИМИ ПЛАТФОРМАМИ

Для сучасного етапу розвитку наземних мобільних робототехнічних платформ (МРП) характерні збільшення інтелектуальності, зменшення габаритів, маси, енергоспоживання, вартості та тривалості їх розроблення. Досліджено, що окрема МРП, зазвичай, орієнтована на виконання відносно нескладних операцій, що зумовлено невеликим радіусом дії, обмеженою ємністю акумулятора, невеликою кількістю операцій, які вона може виконувати, обмеженим набором виконавчих пристроїв і, як наслідок, невисокою ймовірністю виконання поставленого завдання в екстремальних умовах. Запропоновано для вирішення складніших завдань використовувати групи МРП, що збільшує радіус дії, розширює набір виконуваних функцій та зменшує час їх виконання. Вибрано централізований підхід для розподілу завдань у групі, який враховує інформацію про стан кожної МРП та навколишнього середовища. Запропоновано для оцінювання ефективності розподілу завдань у групі між МРП використовувати такі критерії: тривалість виконання завдань, витрати ресурсів, надійність та масштабованість. Вибрано для розподілу завдань у групі між МРП концепцію балансування розподілу завдань, за якої замість однієї компоненти балансування використовують декількох компонент. Запропоновано завдання розподілу транспортування вантажів у пункти призначення з допомогою групи МРП подати таблицею у вигляді початкових умов транспортної задачі. Показано, що таку задачу можна розв'язати класичним способом, склавши початковий опорний план методом північно-західного кута, а потім покроково поліпшувати його аж до отримання оптимального плану перевезень з погляду мінімізації загального енергоспоживання. Удосконалено модель розподілу завдань у групі між МРП, яка внаслідок урахування динамічних змін (несправності МРП, зміни у переліку завдань), обмежень на ресурси (запас заряду акумулятора, вантажопідйомності) та просторових координат кожної МРП забезпечує зменшення часу та економію заряду акумулятора.

Ключові слова: мобільна робототехнічна платформа; група платформ; розподіл завдань; навігаційні дані; навколишнє середовище; заряд акумулятора.

Вступ / Introduction

Для сучасного етапу розвитку наземних мобільних робототехнічних платформ (МРП) характерні збільшення інтелектуальності, зменшення габаритів, маси, енергоспоживання, вартості та тривалості їх розроблення. Зазвичай, окрема МРП орієнтована на виконання відносно нескладних операцій, що зумовлено невеликим радіусом дії, обмеженою ємністю акумулятора, невеликою кількістю виконуваних операцій, обмеженим набором виконавчих пристроїв і, як наслідок – невисокою ймовірністю виконання поставленого завдання за ек-

стремальних умов. Тому для вирішення складніших завдань використовують МРП, які об'єднуються в групи, що збільшує радіус дії за рахунок їх розосередження, розширюється набір виконуваних функцій, шляхом установки на окремих МРП виконавчих пристроїв різних типів. Використання групи МРП для вирішення поставленої задачі зменшує час та підвищує ймовірність її виконання шляхом перерозподілу завдань між МРП у разі виходу з ладу деяких із них [24, 22].

Управління групою наземних МРП полягає у координації їх дій у реальному часі для ефективного вико-

Інформація про авторів:

Цмоць Іван Григорович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: ivan.h.tsmots@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>

Римар Юрій Миколайович, канд. екон. наук, ст. викладач, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.m.rymar@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7543-5920>

Опотяк Юрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.v.opotyak@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9889-4177>

Теслюк Софія Василівна, аспірант, кафедра систем штучного інтелекту. Email: sofiia.v.tesliuk@lpnu.ua;

<https://orcid.org/0009-0005-6512-4447>

Олійник Олександр Олександрович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління. Email: oleksandr.o.oliynyk@lpnu.ua;

<https://orcid.org/0009-0000-5093-7334>

Цитування за ДСТУ: Цмоць І. Г., Римар Ю. М., Опотяк Ю. В., Теслюк С. В., Олійник О. О. Вдосконалення моделі розподілу завдань у групі між мобільними робототехнічними платформами. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 8. С. 103–108.

Citation APA: Tsmots, I. G., Rymar, Yu. M., Opotyak, Yu. V., Teslyuk, S. V., & Oliynyk, O. O. (2024). Improvement of the group task distribution model between mobile robotic platforms. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(8), 103–108. <https://doi.org/10.36930/40340812>

нання завдань з урахуванням обмежень та динамічної зміни ситуації у навколишньому середовищі [7, 27]. Для досягнення такої мети необхідно забезпечити:

- узгоджене управління кожною МРП у реальному часі для уникнення конфліктів, зіткнень і дублювання дій;
- розподіл завдань між МРП для мінімізації витрат часу, економії заряду акумулятора та інших ресурсів;
- швидке реагування на динамічні зміни, зокрема появу перешкод або зміну умов виконання завдання;
- здатність групи функціонувати в разі відмови окремих МРП;
- ефективне використання навігаційної інформації, зібраної кожною МРП, призначеної для побудови загальної картини навколишнього середовища та ухвалення управлінських рішень.

Тому актуальним завданням є забезпечення ефективного управління групою наземних МРП у реальному часі за динамічної зміни ситуації у навколишньому середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси збирання, оброблення навігаційних даних і розподілу завдань у групі між МРП.

Предмет дослідження – методи, моделі та засоби розподілу завдань у групі між МРП, що дасть змогу зменшити тривалість виконання завдань та забезпечити економію заряду акумулятора окремих МРП.

Мета роботи – вдосконалити модель розподілу завдань у групі між МРП з урахуванням їх стану і навколишнього середовища, що дасть змогу забезпечити її функціонування за умов динамічної зміни ситуації.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі *основні завдання дослідження*:

- сформулювати вимоги до розподілу завдань між МРП, що дасть змогу забезпечити мінімізацію тривалості виконання завдань, забезпечити безпеку, надійність і ефективне використання ресурсів окремої платформи;
- визначити критерії розподілу завдань між МРП, призначені для оцінювання ефективності моделі розподілу завдань у групах, що забезпечить раціональне використання ресурсів у процесі виконання спільних завдань;
- сформулювати постановку задачі вдосконалення моделі розподілу завдань у групі між МРП, що уможливить врахування зміни стану МРП і навколишнього середовища;
- вдосконалити моделі розподілу завдань у групі між МРП, що з урахуванням додаткових параметрів забезпечить зменшення тривалості виконання завдань та економію заряду акумулятора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз методів розподілу завдань у групі між МРП, який наведено у публікаціях [3, 19], показав, що ефективний розподіл завдань дає змогу досягти високої продуктивності, економії ресурсів та підвищення надійності системи. У роботах [9, 13] проаналізовано основні підходи до розподілу завдань у групі між МРП: централізований, децентралізований та гібридний. Показано, що перевагами централізованого підходу є глобальне бачення ситуації, оптимізація завдань на підставі всієї доступної інформації та простота реалізації алгоритмів, а його недоліками є вразливість централізованого управління та складність збирання навігаційних даних. У роботі [10] проаналізовано децентралізований підхід до розподілу завдань і показано, що його перевагами є висока надійність, масштабованість і швидке реагування на локальні зміни, а основним його недоліком є складність координації великої кількості МРП. Гібридний підхід, який поєднує централізований та децентралізований

підходи, розглянуто у працях [25, 29] та показано, що централізована система визначає глобальні цілі, а локальні рішення приймаються МРП індивідуально.

У публікаціях [8, 17] проаналізовано такі алгоритми розподілу завдань у групі МРП: аукціонні, роевого інтелекту, генетичні, лінійного програмування та машинного навчання. Проведений аналіз даних алгоритмів показує таке: аукціонні алгоритми добре придатні для невеликих систем із чіткими оцінками завдань [6]; ройовий інтелект є ефективним для масштабованих і гнучких систем [12]; генетичні алгоритми добре придатні для вирішення складних завдань, але потребують використання значних обчислювальних ресурсів [2]; лінійне програмування забезпечує точність розрахунку при розподілі завдань, але має обмеження у складних системах [28]; машинне навчання перспективне, але потребує великого обсягу даних і обчислювальних ресурсів [16].

У роботах [4, 11] розглянуто моделі розподілу завдань у групі між МРП з використанням початкових умов транспортної задачі, особливістю яких є оптимізація розподілу ресурсів.

У роботах [15, 18] розглянуто критерії оцінювання ефективності алгоритмів розподілу завдань у групі МРП. У цих роботах показано, що основними критеріями, за якими оцінюється ефективність розподілу завдань, є: тривалість виконання завдань; енергоспоживання; масштабованість; робастність, яка зводиться до здатності системи адаптуватися до змін; збалансованість навантаження між МРП.

Отже, з аналізу публікацій випливає актуальність завдання процесу вдосконалення моделі розподілу завдань у групі між МРП, яка буде враховувати зміну стану МРП і навколишнього середовища.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Формулювання вимог до розподілу завдань у групі між МРП. У групі розподіл завдань між МРП здійснюється централізовано з урахуванням інформації про стан кожної МРП та навколишнього середовища. Під час розподілу завдань у групі між МРП необхідно забезпечити такі вимоги [23]:

- задачу потрібно поділити на окремі завдання, які можна виконати незалежно або з мінімальною взаємодією;
- кожне завдання має мати чітко визначений пріоритет;
- розподіл завдань у групі між МРП має забезпечувати мінімізацію тривалості виконання та використання ресурсів (енергія, обчислювальні потужності тощо);
- розподіл завдань у групі між МРП повинен функціонувати з урахуванням рівня заряду акумулятора кожної МРП;
- розподіл завдань потрібно виконувати у режимі реального часу з адаптацією до зміни умов роботи (збій однієї з МРП або непередбачувана затримка);
- під час розподілу завдань необхідно забезпечувати мінімізацію використання енергії та оптимізацію вибору маршрутів для кожної МРП;
- алгоритм розподілу завдань повинен бути орієнтований на різну кількість МРП;
- кожна МРП повинна отримувати завдання з урахуванням часових обмежень на їх виконання;
- необхідно забезпечити можливість вносити корективи у розподіл завдань між МРП.

Урахування цих вимог повинно забезпечити ефективний розподіл завдань у групі МРП, мінімізуючи тривалість виконання завдань, забезпечуючи безпеку, надійність й ефективне використання ресурсів.

Визначення критеріїв розподілу завдань між МРП.

Розподіл завдань між МРП ґрунтується на критеріях, які залежать від типу завдань, характеристик платформ, навколишнього середовища та стратегії взаємодії МРП. Основні критерії, які враховуються під час розподілу завдань, такі [20]:

- обчислювальна потужність процесорів, доступна пам'ять, можливості давачів і виконавчих механізмів платформи;
- максимальна швидкість, вантажопідйомність та маневровість;
- рівень заряду акумуляторів й енергоефективність;
- якість і кількість сенсорів та механізмів для виконання специфічних завдань;
- пріоритетність виконання конкретного завдання;
- доступний рівень обчислювальних, сенсорних і виконавчих ресурсів;
- часові параметри для виконання завдань;
- завдання можуть потребувати спеціалізованих засобів;
- швидкість передачі даних і доступність зв'язку між МРП;
- можливість МРП працювати синхронно або кооперативно у разі спільного виконання складних завдань;
- характеристики місцевості та відстань МРП до місця виконання завдання.

Модель розподілу завдань у групах між МРП важлива для раціонального використання ресурсів та виконання спільних завдань. Модель спрямована на координацію дій між МРП, розподіл робочого переліку завдань та мінімізацію тривалості виконання. Для оцінювання ефективності моделі розподілу завдань у групах між МРП використовують такі критерії [21]:

- тривалість виконання завдань, який показує як швидко група МРП може виконати сукупність завдань;
- мінімізація витрат ресурсів, який показує скільки необхідно енергії та часу на комунікацію і реалізацію алгоритму розподілу;
- надійність, який показує як буде виконуватися перерозподіл завдань у разі відмов окремих МРП;
- масштабованість, яка показує як ефективно буде виконуватися розподіл завдань в разі зміни кількості МРП.

Постановка задачі для розроблення моделі розподілу завдань у групі між МРП. Необхідно мінімізувати загальну вартість виконання завдань, розподіливши завдання між МРП так, щоб кожне завдання було виконано тільки однією МРП.

Група МРП повинна виконати певний набір завдань:

$$Z = \{z_j, j = \overline{1, n}\}, \quad (1)$$

де: n – кількість завдань, які необхідно виконати групою МРП; z_j – j -те завдання, яке має виконати одна з МРП.

Для розподілу завдань у групі МРП використаємо концепцію балансування розподілу завдань. Мета балансування розподілу завдань – оптимізація використання ресурсів МРП, максимізація пропускної спроможності, зменшення часу відгуку і запобігання перевантаженню якого-небудь одного ресурсу МРП. Використання декількох компонент балансування розподілу завдань замість одного може підвищити надійність і доступність за рахунок резервування.

Групу МРП описують так:

$$R = \{r_i, i = \overline{1, m}\}, \quad (2)$$

де: m – кількість МРП у групі; r_i – i -та МРП, яка може виконувати одне або більше завдань.

Розподіл завдань для будь-якої кількості МРП має враховувати платформи, які вимикаються (відмовляють). Коли усі МРП працюють і мають приблизно одна-

ковий заряд акумуляторів, то доцільно розподілити завдання порівну. Кількість завдань на деяких МРП буде зростати коли одна або більше МРП вимикаються, але і за цих умов розподіл завдань на МРП, що залишилися, необхідно здійснювати порівну.

Коли одна або більше МРП перестають працювати, завдання непрацюючих МРП мають бути перерозподілені на інші МРП з групи. Розподіл завдань потрібно виконувати за критерієм рівномірності заряду акумулятора МРП, навіть коли створюються найнесприятливіші комбінації МРП, що перестали працювати.

Для складання математичної моделі розподілу завдань у групі між МРП розглянемо такі припущення:

1. Існує n пунктів доставки (призначення) b деякого виду вантажу. Вантажем можуть бути, наприклад, запчастини, їжа, боеприпаси, зброя, обмундирування, паливно-мастильні матеріали тощо.

2. У кожен b_i пункт доставки ($i = 1 \dots n$) потрібно завести певну кількість вантажів одного виду.

3. Для розвезення вантажів використовується m МРП.

4. На початковому етапі кожна j -та МРП ($j = 1, \dots, m$) завантажена певною кількістю (a_j) вантажів, які потрібно доставити у пункти доставки. Кількість вантажу для кожної МРП обмежується його вантажопідйомністю. Кількісні показники a_j рівномірно розподілені між всіма МРП і є приблизно однаковими.

5. Загальна потреба у продукції в усіх n пунктах доставки $\sum_{i \in n} b_i$ відповідає загальному запасу вантажів $\sum_{j \in m} a_j$.

6. Для виконання задачі розподілу (розвезення) продукції між усіма пунктами доставки b_i , МРП володіють основним ресурсом – зарядом акумулятора, який витрачається залежно від пройденого шляху.

7. Для кожного пункту доставки b_i відомі його просторові координати – b_{x_i}, b_{y_i} .

8. Точка старту кожної МРП визначається її просторовими координатами – r_{x_j}, r_{y_j} .

9. Відстань між j -тою МРП (r_j) та i -тим пунктом призначення b_i та величину витрат заряду акумулятора визначають так:

$$D_{ij} = \sqrt{(b_{x_i} - r_{x_j})^2 + (b_{y_i} - r_{y_j})^2}, j = \overline{1, n}; i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

$$E_{ij} = F_{OB} \cdot D_{ij}, j = \overline{1, n}; i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

де: D_{ij} – відстань між j -тою МРП (r_j) та i -тим пунктом призначення b_i ; F_{OB} – величина енерговитрат заряду акумулятора на одиницю відстані (1 м, 200 м, 1 км, 100 км тощо); E_{ij} – величина енергозатрат на доставку товару j -тою МРП до i -го пункту призначення.

Вдосконалення моделі розподілу завдань у групі між МРП. Враховуючи наведені вище припущення, загальне завдання розподілу вантажів між n пунктами призначення за допомогою m МРП можна сформулювати так: необхідно перевезти задану кількість вантажів a до n пунктів призначення за допомогою m МРП, за умови, що на кожен i -й пункт призначення b_i потрібно доставити j -ту одиниць вантажу a_j . При цьому потрібно намагатися зробити це з найменшими можливими сукупними енерговитратами, які залежать від просторового розташування МРП та пунктів призначення. Тобто потрібно мінімізувати таку цільову функцію:

$$f_r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} \cdot a_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де: a_{ij} – кількість вантажів, які доставляються j -тою МРП до i -го пункту призначення. Необхідно зазначити, що для i -го пункту призначення b_i загальна кількість вантажів a_{ij} , яка доставляється, не може перевищувати попиту відповідного пункту призначення a_i , тобто $0 < a_{ij} \leq a_i$.

Завдання розподілу вантажів між n пунктами призначення за допомогою m МРП можна подати у вигляді початкових умов транспортної задачі, які наведено у таблиці.

Таблиця. Початкові умови транспортної задачі для розподілу завдань у групі між МРП / Initial conditions of the transport problem for the distribution of tasks in the group between MRP

МРП Пункт доставки	r_1	r_2	$\dots$	r_m	Попит вантажу у пунктах b_i
b_1	E_{11}	E_{12}	$\dots$	E_{1m}	a_1
b_2	E_{21}	E_{22}	$\dots$	E_{2m}	a_2
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
b_n	E_{n1}	E_{n2}	$\dots$	E_{nm}	a_n
Вантаж, який доставляється j -тою МРП у пункт b_i	a_{i1}	a_{i2}	$\dots$	a_{im}	

Вирішувати це завдання можна класичним способом, склавши початковий опорний план, наприклад, методом північно-західного кута, а потім покроково поліпшуючи його аж до отримання оптимального, з погляду мінімізації загального енергоспоживання, плану перевезень, наприклад методом потенціалів.

Проте у такій математичній моделі не беруть до уваги стан заряду акумулятора j -тої МРП на цей момент часу. Перед тим як розпочати доставку вантажів згідно з розробленим планом, потрібно додатково перевіряти достатність заряду акумулятора кожної МРП для забезпечення доставки вантажів відповідно до плану.

З погляду математичної моделі для цього потрібно ввести додаткове обмеження:

$$\forall a_{ij} > 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n E_{ij} < Er_j, \quad (6)$$

де Er_j – величина заряду акумулятора j -тої МРП.

Якщо обмеження (6) не виконується для однієї або декількох МРП, то потрібно здійснити перерозподіл вантажу таких МРП на інші платформи, які мають достатній заряд акумуляторів. МРП з низьким рівнем заряду акумулятора тимчасово вилучаються з робочого процесу і відправляються на зарядку акумулятора. При цьому у моделі зменшиться кількість МРП, тобто зміняться умови транспортної задачі, що приведе до складання нової транспортної таблиці та її покрокової оптимізації. Отже, було отримано перерозподіл завдань, який забезпечує перевезення вантажів у пункти призначення меншою кількістю МРП.

Обговорення результатів дослідження. У роботі [1] розглядають підходи до координації роботи кількох роботів, зокрема алгоритми розподілу завдань, які враховують залежності між задачами, обмеження за часом і пріоритети. Пропонують методи розкладання, які забезпечують ефективне використання ресурсів роботів у складних середовищах, таких як рятувальні операції та логістика. Проте у публікації не враховано показник рівня заряду акумулятора, що обмежує використання такого підходу.

У дослідженні [5] автори розглядають проблему статичного розподілу завдань між кількома роботами у середовищі так, щоб роботи виконували завдання опти-

мально. Вартість виконання завдання пропорційна відстані, яку пройшов робот для виконання цього завдання. Ця проблема особливо важлива в системах з декількома роботами, оскільки задача є NP-складною. Хоча отримані в такий спосіб результати підтверджують той факт, що запропонований алгоритм показує покращену продуктивність з погляду збалансованого розподілу завдань для окремих роботів у групі, проте він не враховує динаміки зміни навколишнього середовища та можливе зменшення кількості роботів у групі.

У дослідженні [14] аналізують ринкові механізми розподілу завдань, де кожен робот "торгується" за виконання задачі, враховуючи власні можливості та затрати. Цей підхід дає змогу забезпечити баланс між гнучкістю й оптимізацією ресурсів у застосуваннях, таких як дослідження місцевості та патрулювання. Однак запропонований підхід не дає змоги динамічно перерозподіляти завдання у процесі їх виконання.

У роботі [30] пропонують цікавий підхід до динамічного розподілу з модифікацією послідовності завдань. Оцінювання ефективності завдань робота, враховуючи робочий простір і продуктивність його руху, будується за допомогою жадібного алгоритму аукціону. Як вказують автори, для подальшого збільшення швидкості роботи алгоритму введено коригування послідовності задач, що призначаються, щоб зменшити простір пошуку рішення алгоритму призначення задач, зменшуючи час розрахунку алгоритму. Однак вказаний метод може призначати завдання у режимі реального часу та скорочувати тривалість оброблення завдань двома роботами, що є істотним обмеженням порівняно з запропонованим підходом.

Порівняння вдосконаленої моделі розподілу вантажів у групі між МРП для їх перевезення у визначені пункти призначення із моделлю, представленою у роботі [26], дає змогу зробити висновок, що вдосконалена модель порівняно з наявною під час розподілу вантажів між МРП враховує обмеження на ресурси (запас заряду акумулятора, вантажопідйомність), динамічні зміни (несправності платформ, зміни у переліку завдань) та просторові координати кожної МРП, які не враховувалися. Вдосконалена модель розподілу вантажів у групі між МРП забезпечує зменшення витрат ресурсів на перевезення (заряду акумулятора, тривалості перевезення), максимальну їх завантаженість та зменшення кількості поїздок без вантажу.

Проведене дослідження демонструє переваги вдосконаленої моделі розподілу завдань у групі між мобільними робототехнічними платформами, яка додатково враховує динамічні зміни стану окремої МРП, або зміни у переліку завдань, бере до уваги обмеження щодо ресурсів, наприклад, заряду акумулятора чи вантажопідйомності та розташування окремої МРП і, як наслідок – забезпечує зменшення часу виконання завдань та економію заряду акумулятора платформ.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вдосконалено модель розподілу вантажів у групі між МРП, яка внаслідок врахування динамічних змін (несправності МРП, зміни у переліку завдань), обмежень на ресурси (запас заряду акумулятора, вантажопідйомності) та просторових координат кожної МРП

забезпечує зменшення часу та економію заряду акумулятора під час перевезення вантажів у пункти призначення.

Практична значущість результатів дослідження – вдосконалену модель розподілу вантажів у групі між МРП можна використати для зменшення тривалості їх перевезення з одночасним зменшенням енергоспоживання окремими платформами.

Висновки / Conclusions

Удосконалено модель розподілу завдань у групі між МРП з урахуванням їх стану і навколишнього середовища, що дало можливість забезпечити її функціонування за умов динамічної зміни ситуації. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Сформульовано вимоги до розподілу завдань, визначено критерії оцінювання моделі розподілу, здійснено постановку задачі та вдосконалено модель розподілу завдань у групі між МРП, яка враховує динамічні зміни навколишнього середовища, стан кожної МРП та їхні групи загалом.
2. Визначено, що під час розподілу завдань у групі між МРП необхідно забезпечити такі основні вимоги: задачу потрібно поділити на окремі завдання, які можна виконати незалежно або з мінімальною взаємодією; розподіл завдань у групі між МРП має забезпечувати мінімізацію тривалості виконання та використання ресурсів; розподіл завдань потрібно виконувати з урахуванням рівня заряду акумулятора кожної МРП та кількості працездатних МРП у групі.
3. Запропоновано для оцінювання ефективності моделі розподілу завдань у групах між МРП використовувати такі критерії: тривалість виконання завдань, витрати ресурсів, надійність та масштабованість, які забезпечать оптимальне використання ресурсів у процесі виконання спільних завдань.
4. Визначено, що для розроблення моделі розподілу завдань у групі між МРП вихідними даними є: кількість пунктів доставки та кількість вантажу, який необхідно перевести; кількість вантажів, які необхідно доставити в кожний пункт; кількість МРП, які використовують для перевезення вантажів; координати кожного пункту доставки та координати старту кожної МРП; величина енерговитрат заряду акумулятора на одиницю відстані.
5. Визначено критерії розподілу завдань у групі МРП, які враховуються у процесі такого розподілу, що забезпечує врахування зміни стану окремої МРП і навколишнього середовища.
6. Запропоновано вдосконалену модель розподілу завдань у групі МРП, яка через врахування динамічних змін (несправності МРП, зміни у переліку завдань), обмежень на ресурси (запасу заряду акумулятора, вантажопідйомності) та просторових координат кожної МРП забезпечує зменшення тривалості виконання завдань та економію заряду акумулятора на прикладі задачі виконання перевезення вантажів у пункти призначення.

References

1. Bischoff, E., Meyer, F., Inga, J., & Hohmann, S. (2020). Multi-Robot Task Allocation and Scheduling Considering Cooperative Tasks and Precedence Constraints. In: *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Toronto, ON, Canada, 3949–3956. <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283215>
2. Chao, Y., Augenstein, P., Roennau, A., Dillmann, R., & Xiong, Z. (2023). Brain inspired path planning algorithms for drones. *Front. Neurorobot*, 17. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1111861>
3. Do, H. T., et al. (2021). Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 8(27). <https://doi.org/10.4108/eai.10-6-2021.170230>
4. Fedorovich, O., Lukhanin, M., Prokhorov, O., Slomchynskiy, O., Hubka, O., & Leshchenko, Yu. (2023). Simulation of arms distribution strategies by combat zones to create military parity of forces. *Radioelectronic and computer systems*, 4, 209–220. <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.15>
5. Gautam, A., Thakur, A., Dhanania, G., & Mohan, S. (2016). A distributed algorithm for balanced multi-robot task allocation. In: *2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, Roorkee, India, 622–627. <https://doi.org/10.1109/ICIINFSS.2016.8263014>
6. Guo, J., Wang, L., & Wang, X. (2022). A Group Maintenance Method of Drone Swarm Considering System Mission Reliability. *Drones*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/drones6100269>
7. Jia, G. W., & Wang, J. F. (2021). Research review of UAV swarm mission planning method. *Systems Engineering and Electronics*, 43(1), 99–111. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.13>
8. Kritskiy, D., Yashin, S., & Koba, S. (2021). Unmanned aerial vehicle mass model peculiarities. *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*, 1265, 299–308. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29
9. Kritsky, D. N., Ovsianik, V. M., Pogudina, O. K., Shevel, V. V., & Druzhinin, E. A. (2019). Model for intercepting targets by the unmanned aerial vehicle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 197–206. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_20
10. Lizzio, F. F., Capello, E., & Guglieri, G. (2022). A Review of Consensus-based Multi-agent UAV Implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 106(43). <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01743-9>
11. Merkert, R., & Bushell, J. (2020). Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. *Journal of Air Transport Management*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101929>
12. Pohudina, O., Bykov, A., Kritskiy, D., & Kovalevskiy, M. (2022). The Method of Flight Mission Formation for a Group Autonomous Flight of Unmanned Aerial Vehicles. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer*, Cham, 367, 894–901. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_69
13. Pohudina, O., Kritskiy, D., Koba, S., & Pohudin, A. (2020). Assessing unmanned traffic bandwidth. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: Synergetic Engineering*, 447–458. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_38
14. Quinton, F., Grand, C., & Lesire, C. (2023). Market Approaches to the Multi-Robot Task Allocation Problem: a Survey. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 107. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01803-0>
15. Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S. J., & Treiblmaier, H. (2023). Drones for supply chain management and logistics: a review and research agenda. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 26(6), 708–731. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1981273>
16. Siemiatkowska, B., & Stecz, W. (2021). A Framework for Planning and Execution of Drone Swarm Missions in a Hostile Environment. *Sensors*, 21(12). <https://doi.org/10.3390/s21124150>
17. Soto, M., Nava, P., & Alvarado, L. (2007). Drone Formation Control System Real-Time Path Planning. *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, 7–10 May 2007, Rohnert Park, California. <https://doi.org/10.2514/6.2007-2770>
18. Sun, H., Qi, J., Wu, C., & Wang, M. (2020). Path Planning for Dense Drone Formation Based on Modified Artificial Potential Fields. In: *39th Chinese Control Conference (CCC)*, Shenyang, China, 4658–4664. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189345>
19. Sytsma, J., Thompson, D., & Sicoli, J. (2023). Drone Ultrasonic Detection. *Australian International Aerospace Congress*. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.063769306863002>

20. Tsmots, I., Opotyak, Yu., Oliynyk, O., Antoniv, V., & Lytvyn, A. (2024). Basic components of the system of neurofuzzy control of a group of mobile robotic platforms. *The Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks"*, 16, 348–368. <https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.348>
21. Tsmots, I., Opotyak, Yu., Shtogrinets, B., Dzyuba, A., & Oliynyk, Yu. (2023). Basic structure of the system of neurofuzzy control of a group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technologies*, 5(1), 77–85. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.01.077>
22. Tsmots, I., Opotyak, Yu., Shtogrinets, B., Dzyuba, A., & Oliynyk, Yu. (2023). Basic structure of the system of neurofuzzy control of a group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technologies*, 5(1), 77–85. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.01.077>
23. Tsmots, I., Teslyuk, V., Opotyak, Yu., & Oliynyk, O. (2023). Development of a scheme and improvement of a method for controlling the movement of a group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technologies*, 5(2), 97–104. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.097>
24. Tymoshin, Yu., & Shevchenko, M. (2021). Intelligent control system for a group of robots. *Adaptive automatic control systems*, 2(39), 106–114. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.39.2021.247420>
25. Xu, Z., Yan, T., Yang, S. X., & Gadsden, S. A. (2023). Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 20, no. 2, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3272666>
26. Xue, F., Tang, H., Su, Q., & Li, T. (2019). Task Allocation of Intelligent Warehouse Picking System based on Multi-robot Coalition. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 13, 7, 3566–3582. <https://doi.org/10.3837/tiis.2019.07.013>
27. Yang, Liang, Qi, Juntong, Song, Dalei, Xiao, Jizhong, Han, Jianda, & Xia, Yong. (2016). Survey of Robot 3D Path Planning Algorithms. *Journal of Control Science and Engineering*, 22 p. <https://doi.org/10.1155/2016/7426913>
28. Yang, Y., Xiong, X., & Yan, Y. (2023). UAV Formation Trajectory Planning Algorithms: A Review. *Drones*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/drones7010062>
29. Ye, Y., Hu, S., Zhu, X., & Sun, Z. (2024). An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation. *Machines*, 12(1), article ID 32. <https://doi.org/10.3390/machines1201003>
30. Zhao, Z., Chen, G., Huang, Z., Shen, Y., & Li, T. (2023). A Dynamic Task Assignment Method Based on Auction Algorithm for Dual-arm Robots. In: *2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Ningbo, China, 1298–1303. <https://doi.org/10.1109/ICIEA58696.2023.10241447>

I. G. Tsmots, Yu. M. Rymar, Yu. V. Opotyak, S. V. Teslyuk, O. O. Oliynyk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE GROUP TASK DISTRIBUTION MODEL BETWEEN MOBILE ROBOTIC PLATFORMS

It is shown that the current stage of development of ground-based mobile robotic platforms (MRP) is characterized by an increase in intelligence, a decrease in dimensions, weight, power consumption, cost and time of their development. It is investigated that a separate MRP, as a rule, is focused on performing relatively simple operations, which is due to a small range, limited battery capacity, a small number of operations that it can perform, a limited set of actuators, and, as a result, low probability of completing the task in extreme conditions. It is proposed that MRP groups be used to solve more complex tasks, which increases the radius of action, expands the set of functions performed, and reduces the execution time. A centralized approach has been chosen for the distribution of tasks in the group, which takes into account information about the state of each MRP and the environment. It is proposed that the following criteria be used to assess the effectiveness of the distribution of tasks in a group between MRPs: task completion time, resource consumption, reliability, and scalability. For the distribution of functions in a group between MRPs, the concept of task distribution balancing is chosen, in which several components are used instead of one balancing component. It is proposed that the problem of distribution of goods to destinations with the help of the MRP group be presented in a table in the form of initial conditions of the transport problem. It is shown that such a problem is solved classically, drawing up an initial reference plan using the north-west angle method, then gradually improving it until obtaining an optimal transportation plan to minimize the total energy consumption. The model for the distribution of tasks in the group between MRPs has been improved, which, due to taking into account dynamic changes (MRP malfunctions, changes in the list of tasks), resource constraints (battery reserve, load capacity) and spatial coordinates of each MRP, provides a reduction in time and battery savings.

Keywords: mobile robotics platform; platform group; task distribution; navigation data; environment; battery charge.