

В. КАЛАШНІКОВА

ЗАСТОСУВАННЯ ПОХІДНИХ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ КІНЦЕВИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ ТИПУ "ЛІДЕР – ПОСЛІДОВНИК"

Предмет дослідження – методи управління роями роботів типу *dr20*, зокрема похідного та інтегрального ковзного режиму управління, у поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень. Проблема ефективного управління роєм роботів є актуальною в сучасних умовах автоматизації та роботизації, особливо в контексті виконання складних завдань у разі обмеженого простору та наявності збурень. **Мета роботи:** розроблення та аналіз імітаційної моделі руху рою роботів з упровадженням удосконалених методів управління для забезпечення точності та стабільності системи. Дослідження спрямоване на вдосконалення методів керування роями роботів, що дає змогу покращити їх ефективність і надійність за різних умов експлуатації. **Завдання:** 1) розробити імітаційну модель рою роботів у середовищі *CoppeliaSimEDU*, що бере до уваги всі необхідні параметри для моделювання реальних умов експлуатації; 2) реалізувати алгоритми керування для лідера й послідовників, що забезпечують збереження структури рою та уникнення зіткнень; 3) провести серію експериментів для перевірки ефективності запропонованих методів, зокрема проаналізувати результати щодо стабільності й точності управління. **Методи:** моделювання в *CoppeliaSimEDU*, реалізація алгоритмів керування на основі похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління, застосування нелінійного спостерігача збурень для поліпшення стабільності системи. Застосовані методи дають змогу зважати на вплив різних збурень і забезпечують високу точність управління. **Результати дослідження.** Запропонована модель управління допомагає досягти високої точності слідування та уникнення зіткнень, навіть у складних умовах. Експерименти показали, що методи керування забезпечують стабільність і точність руху рою роботів, зменшуючи час реакції на зовнішні збурення. Результати дослідження демонструють, що використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління в поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень дає змогу значно підвищити ефективність багатороботних систем. **Висновки.** Упровадження вдосконалених методів управління значно підвищує ефективність багатороботних систем, забезпечуючи їх надійність і точність у реальних умовах експлуатації. Запропоновані методи можуть бути застосовані в різних сферах, де необхідна координація руху значної кількості роботів, зокрема в логістиці, рятувальних операціях і моніторингу довкілля.

Ключові слова: робототехніка; системи управління; надійність; стабільність; автоматизація; ковзний режим; спостерігач збурень; багатороботні системи.

Вступ

Розвиток багатороботних систем і методів їх управління є важливим напрямом сучасної робототехніки, що має широкий спектр застосування – від промислової автоматизації до інтелектуальних транспортних систем. Одним із найбільш перспективних підходів до керування роями роботів є метод "лідер – послідовник", де один робот є лідером, а інші пристрої прямують за ним, орієнтуючись на його положення та траєкторію руху.

Такий підхід дає змогу ефективно координувати рух значної кількості роботів, забезпечуючи високу точність і стабільність системи загалом. Однак для реалізації цього підходу необхідні ефективні методи керування, які б уможливили рух за лідером з мінімальними відхиленнями, навіть за присутності зовнішніх збурень і непередбачуваних змін у навколишньому середовищі.

У цьому дослідженні пропонується використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління в поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень для забезпечення точності та стабільності руху рою роботів. Також розглядається ймовірність застосування глобальної інформації для регулювання поведінки "послідовників", що дає змогу підвищити адаптивність системи до зовнішніх умов.

Основною метою дослідження є розроблення та аналіз імітаційної моделі руху рою роботів на основі методу "лідер – послідовник" із використанням запропонованих методів управління. Модель реалізована в середовищі *CoppeliaSimEDU*, що допомагає проводити детальне моделювання та тестування алгоритмів керування в різних умовах.

Запропонована модель управління перевіряється на прикладі трьох роботів *dr20*, один з яких є лідером, а два інших – послідовниками. Для аналізу

ефективності методів проводяться експерименти, результати яких демонструють точність і стабільність системи в разі динамічних змін та зовнішніх збурень.

Дослідження спрямоване на вдосконалення методів управління багатороботними системами, що сприятиме підвищенню ефективності їх використання в різних галузях та водночас забезпечує надійність і точність виконання завдань у складних умовах [1].

Огляд останніх досліджень та публікацій у координації багатороботних систем із термінальним ковзанням

Останні роки принесли значний прогрес у розробленні та впровадженні новітніх методів управління для багатороботних систем. Особливо активні дослідження у сфері термінального ковзання в архітектурах "лідер – послідовник", спрямованих на підвищення точності та надійності роботи систем в умовах великої невизначеності.

Дослідження Д. Цяня та І. Сі (2018), опубліковане в *Applied Sciences*, вивчало маневри формації "лідер і послідовник" з використанням похідного та інтегрального термінального ковзного режиму. Автори розробили математичну модель, що дає змогу моделювати динаміку такої системи, зокрема вхідно-вихідні рівняння, які демонструють взаємодію між лідером і послідовниками. Система впровадження контролерів основана на визначенні ступеня відносності системи формації "лідер – послідовник". Це дослідження також наголошує на застосуванні нелінійного спостерігача збурень для розв'язання проблем невизначеностей, що значно покращує стабільність системи, як підтверджено з допомогою аналізу Ляпунова та числових симуляцій [1].

У 2019 році та сама команда дослідників разом із Г. Чжаном, Дж. Ченом, Дж. Ваном та З. Ву розширила свої експерименти, запропонувавши методику суперскручування, основану на ковзному режимі управління, для покращення адаптивності та стійкості багатороботних систем у динамічних умовах. Цей метод містить два адаптивні коефіцієнти, що дають змогу системі краще реагувати на зміни та збурення. Закрите коло стабільності формації було теоретично підтверджено на основі принципів Ляпунова, а практична ефективність методу була доведена за допомогою числових симуляцій [2].

М. Насір та А. Майті (2024) опублікували дослідження в *Machines*, що зосереджується

на стійкості багатороботних систем під час візантійських атак, застосовуючи адаптивний ковзний режим. Автори розробили адаптивну стратегію консенсусного контролю, що допомагає системі впоратися з візантійськими атаками, підтверджуючи стійкість системи в умовах таких атак за допомогою аналізу Ляпунова [3].

М.З.А. Рашид та інші (2019) провели всебічний огляд контролерів для роботних систем "лідер – послідовник", аналізуючи різні стратегії керування, зокрема термінальний ковзний режим. Результати опубліковано в *Journal of Systems and Control Engineering* [4].

Крім того, Д. Цянь, С. Тонг, Дж. Го та СГ Лі (2015) розробили координовану схему управління для неголономних мобільних роботів, використовуючи інтегральний ковзний режим для подолання невідповідних невизначеностей та підвищення стабільності формації [5].

Ці дослідження вказують на тривалу актуальність і важливість розроблення та впровадження адаптивних і надійних методів керування для багатороботних систем, особливо в умовах високої невизначеності та потенційних зовнішніх загроз.

Нерозв'язані проблеми та мета дослідження

У сучасних багатороботних системах типу "лідер – послідовник" існує кілька нерозв'язаних проблем, що викликають необхідність у подальшому науковому дослідженні. Одним із таких питань є збереження оптимальних просторових відношень між лідером і послідовниками за змінних динамічних умов та невизначеності. Наприклад, у разі зміни швидкості чи напрямку руху лідера послідовники мають швидко й точно адаптуватися для підтримання необхідної формації. Іншими словами, управління рухом послідовників має бути здатне ефективно реагувати на зміни умов у реальному часі.

Ця проблема стає особливо актуальною в контексті застосування багатороботних систем у різних сферах, таких як розумні транспортні системи, моніторинг довкілля або рятувальні операції. Нестабільні умови можуть виникати через мінливі погодні умови, перешкоди на шляху руху або непередбачені дії інших об'єктів у середовищі. Тому розроблення методів, що забезпечують стабільність і надійність роботи багатороботних систем у таких умовах, є важливим завданням наукової спільноти.

Метою нашого дослідження є розроблення та апробація ефективного методу зменшення відстані в системі "лідер – послідовник" за допомогою впровадження похідних та інтегрованих кінцевих режимів управління. Основні завдання цього дослідження:

1) розроблення кінематичної моделі системи. Плануємо створити математичну модель, яка бере до уваги основні просторові відношення між лідером і послідовниками, щоб уникнути порушень формації та забезпечити точний маршрут. Це дасть змогу послідовникам ефективно реагувати на зміни положення лідера та забезпечить стабільність формації в умовах невизначеності;

2) упровадження похідних та інтегрованих кінцевих режимів управління. Пропонуємо впроваджувати ці методи для забезпечення стабільного та точного руху послідовників за лідером, навіть у разі невизначеності та змін динамічних умов. Це дасть змогу більш ефективно керувати рухом групи роботів і забезпечить підтримку необхідних формацій, зокрема в складних ситуаціях;

3) вивчення впливу впровадження нових методів управління. Плануємо дослідити, як застосування похідних та інтегрованих кінцевих режимів впливає на зменшення відстані між завданнями в багатороботних системах. Це дасть змогу оцінити ефективність і придатність запропонованих методів у реальних умовах використання;

4) порівняння ефективності нового методу. Збираємося порівняти ефективність запропонованого методу з наявними підходами управління для систем типу "лідер – послідовник", щоб визначити його переваги та можливі обмеження. Це дасть змогу визначити оптимальний підхід до управління багатороботними системами в разі зміни динамічних умов і невизначеності.

Матеріали й методи

На рис. 1 зображений робот, схожий на одноколісний велосипед, у горизонтальній площині. Його два паралельні колеса мають одну й ту саму вісь і керуються незалежно двома постійними струмовими двигунами. Робот може одночасно обертатися й рухатися, що описано рівнянням:

$$q = [xy\theta]^T. \quad (1)$$

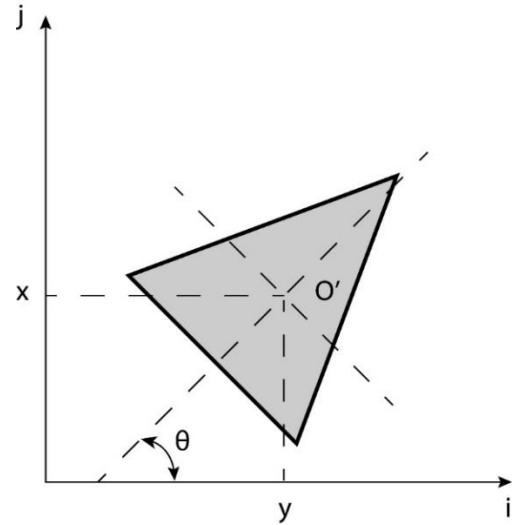


Рис. 1. Кресленник мобільного робота

В (1) (xy) розташований у центрі робота і є його поступальними координатами, а θ позначає його обертальну координату. Щоб знати положення, на передньому колесі робота встановлений датчик позиціонування, як показано на рис. 1. Вісь датчика ортогональна осі двох коліс.

$$q_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де v_n та ω_n – лінійна та кутова швидкості відповідно. Динамічна модель для n -го робота, що бере до уваги коливання параметрів, невизначеності моделі та зовнішні збурення:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_n \\ \ddot{y}_n \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{y}_n \\ \dot{x}_n \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot u_n + \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta u_n + \pi_n q_n, \quad (3)$$

де $\Delta u_n = [\alpha_n \beta_n]^T$ – вхідний сигнал керування для n -го робота; α_n та β_n – відповідно, прискорення та кутове прискорення. Вони описуються $\alpha_n = F_n/m_n$ та $\beta_n = \tau_n/J_n$, де F_n, m_n, τ_n та J_n , відповідно, є силою, номінальною масою, крутним моментом і номінальним моментом інерції робота [2].

Колівання параметрів позначені як

$$\Delta_n = \begin{bmatrix} \varepsilon_n & 0 \\ 0 & \varepsilon'_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де ε_n та ε'_n – параметри маси та моменту інерції робота, які можуть змінюватися залежно від умов руху.

Пропонуємо кінематичну модель системи формування "лідер – послідовник" (рис. 2). Система містить робота-лідера та кількох послідовників: i – робот, який є лідером; k – робот-послідовник [8]. Визначимо відносну відстань l_{ik} та кутовий курс φ_{ik} , важливі для підтримання бажаних просторових відношень

$$l_{ik} = \sqrt{[x_i - \bar{x}_k]^2 + (y_i - \bar{y}_k)^2}. \quad (5)$$

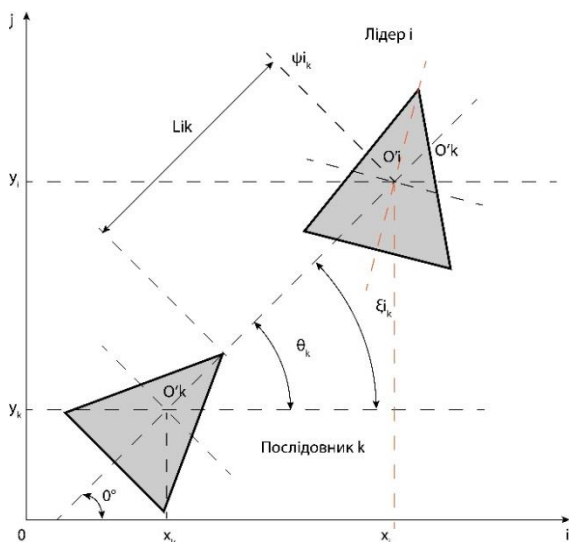


Рис. 2. Кресленник координованої структури "лідер – послідовник"

Координати (x_k, y_k) обчислюються як $x_k = x_i + r \cos(\theta)$ та $y_k = y_i + r \sin(\theta)$. Одночасно φ_{ik} сформульовано як $\varphi_{ik} = \pi + \zeta_{ik} - \theta_i$, де θ_i позначає кут орієнтації робота-лідера i ; $\zeta_{ik} = \arctan \frac{y_i - y_k r \sin \theta_i}{x_i - x_k r \cos \theta_k}$.

Для спрощення процесу слідування роботів-послідовників за лідером з бажаною відстанню та кутом додається контролер ковзання з похідною та інтегральним терміналом. Мета контролера – уникнути зіткнень, підтримувати зв'язок без затримок і забезпечувати, щоб кожен послідовник мав інформацію про своє положення, швидкість та деталі лідера. Динамічна модель має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ik} &= f(x_{ik}, d_{ik}(t)) + B_{ik} u_k, \\ y_{ik} &= h(x_{ik}), \end{aligned} \quad (6)$$

де f – динамічні рівняння та $d_{ik}(t)$ зважає на невизначеності. Конкретні вирази для матриць і змінних тут не наводяться через обмеження обсягу статті. Динамічний режим (6) системи формування "лідер – послідовник" дає відносний ступінь, що обчислюється так:

$$L_f h_1(x_{ik}) \frac{\partial h_1(x_{ik})}{\partial x} f(x_{ik}, d_{ik}), \quad (7)$$

$$L_f h_2(x_{ik}) \frac{\partial h_2(x_{ik})}{\partial x} f(x_{ik}, d_{ik}), \quad (8)$$

$$L_{B_{ik,1K}} L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}) = L_{B_{ik,1K}} (L_f h_1(x_{ik}, d_{ik})) = \frac{\partial (L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}))}{\partial x_{ik}} \cdot B_{ik,1K}, \quad (9)$$

$$L_{B_{ik,1K}} L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}) = L_{B_{ik,1K}} (L_f h_2(x_{ik}, d_{ik})) = \frac{\partial (L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}))}{\partial x_{ik}} \cdot B_{ik,1K}, \quad (10)$$

l_{ik} – похідні $L_{B_{ik,1K}}$ визначаються за допомогою рівнянь (9) та (10); r_K (де $K=1,2$) є найменшим цілим числом, що забезпечує принаймні один керувальний вхід $u_{r_K}^f$ (де $K=1,2$).

$$\dot{y}_{r_1} = L_{r_1} f h_1(x_{ik}) + m \sum_{K=1}^{r_1} L_{B_{ik,K}} K L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}) u_k, \quad (11)$$

$$\dot{y}_{r_2} = L_{r_2} f h_2(x_{ik}) + m \sum_{K=1}^{r_2} L_{B_{ik,K}} K L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}) u_k, \quad (12)$$

де $r_1 = r_2 = 2$ та $m = 2$.

Рівняння динаміки вхід-вихід подано так:

$$\ddot{y}_{ik} = d_{ik} + H(x_{ik}, d_{ik}) u_{ik}, \quad (13)$$

де $d_{ik} = L_{ik}(I_3 + \Delta_i) u_i + P_{ik} + F_{ik}$, $H(x_{ik}, d_{ik}) = G_{ik}(I_4 + \Delta_k)$, I_3 та $I_4 = 2 \times 2$ матриці, та u_i є вхідним сигналом керування i -го робота.

$$\delta_{ik} I \leq \delta_{ik}^{-1} I. \quad (14)$$

$H(x_{ik}, d_{ik})$ має нормальну частину G_{ik} та нелінійну частину $G_{ik} \Delta_i$, які задовольняють умову $\delta_{ik} < 1$, вказану в рівнянні (14).

Відповідні невизначеності $(G_{ik} \Delta_k u_k)$ є коливаннями параметрів послідовника робота k . d_{ik} позначає невідповідні невизначеності в системі формування "лідер – послідовник", яка містить

три частини. F_{ik} та P_{ik} позначають невизначеності моделі та зовнішні збурення, спричинені ковзанням, тертям, перешкодами тощо, які важко узгодити.

1. Проектування ковзного режиму та його динаміка

Описує розроблення ковзного режиму керування, що використовується для забезпечення стабільності й точності формування роботів. Ковзний режим допомагає мінімізувати вплив зовнішніх збурень і невизначеностей параметрів моделі, забезпечуючи високу точність слідування за заданими траєкторіями [9].

Розроблення ковзного режиму керування починається з визначення слайдингової поверхні s , що формулюється як

$$\dot{s} = C(x - x_d), \quad (15)$$

де x – стан системи; x_d – бажаний стан; C – матриця керування, яка добирається таким чином, щоб забезпечити бажані динамічні властивості системи.

Далі динамічні рівняння системи можна виразити так:

$$\dot{s} = A_s s + B_s u, \quad (16)$$

де $A_s s, B_s u$ – похідні матриці, що залежать від параметрів системи та обраної структури керування.

2. Проектування ковзного режиму з адаптивним посиленням ковзного режиму

Розробляється метод керування з адаптивним посиленням ковзного режиму, що покращує роботу системи в умовах невизначеності та динамічних збурень. Метод сприяє оптимізації відгуків системи на зміни умов експлуатації, даючи змогу системі швидко адаптуватися та підтримувати стабільність формації [10].

Ця секція розширює поняття адаптивного посилення в ковзних режимах керування, забезпечуючи підвищену адаптивність і стійкість системи під час роботи в непередбачуваних умовах. У цьому підході ковзний режим реалізується через контрольний закон:

$$u = -K \cdot \text{sign}(s), \quad (17)$$

де K – це не просто константа, а динамічно кориговане посилення, що адаптується до змін у параметрах системи та зовнішніх збуреннях. Адаптація K відбувається за допомогою алгоритму, що оцінює поточний стан динаміки системи й на основі цього аналізу коригує величину K , оптимізуючи відгук системи на непередбачені варіації.

Формула для адаптації K може бути виражена як

$$\dot{K} = \gamma(|s| - s_d), \quad (18)$$

де γ – позитивний коефіцієнт налаштування; s_d – бажане значення слайдингової поверхні, що відповідає оптимальному стану стабільності.

3. Аналіз стабільності закритої системи управління

Аналізується стабільність закритої системи керування з використанням теорії Ляпунова. Це дає змогу не тільки перевірити ефективність управління, але й забезпечити докази її надійності в різних робочих умовах.

Аналіз стабільності системи керування оснований на використанні функції Ляпунова, що є стандартним інструментом для перевірки стабільності динамічних систем. Функція Ляпунова для системи ковзного режиму керування зазвичай подана як квадратична форма [11, 12]:

$$V = s^T P s, \quad (19)$$

де P – позитивно визначена матриця, що встановлює "енергетичний ландшафт" системи. Ця функція обирається таким чином, щоб V збільшувалася за умови віддалення від стабільного стану системи.

Похідна функції Ляпунова:

$$\dot{V} = s^T (A_s^T P + P A_s) s + 2s^T P B_s u, \quad (20)$$

де A_s, B_s визначають динаміку системи та вплив контрольних сигналів відповідно. Тут $A_s^T P + P A_s$ має бути негативно визначеною. Це забезпечує, що \dot{V} стає негативною за умови відповідно підібраних контрольних зусиль u .

Адаптивне налаштування K використовується для коригування контрольного сигналу u на основі поточної динаміки стану системи. Коригування K може відбуватися за таким правилом:

$$\dot{K} = \gamma|s|, \quad (21)$$

де γ – позитивний коефіцієнт налаштування, що визначає швидкість реакції адаптації посилення. Це адаптивне посилення дає змогу системі більш ефективно реагувати на непередбачені збурення та невизначеності.

Крім того, для забезпечення надійності аналізу стабільності можуть упроваджуватися техніки зниження розмірності задачі, наприклад, за агрегування змінних або розгляд спрощених моделей для складних систем.

Це допомагає зрозуміти основні принципи стабільності, не заглиблюючись у переважно складну динаміку кожного елемента системи.

Такий підхід не тільки забезпечує математичну точність у визначенні стабільності системи, але й сприяє практичній здатності системи до адаптації та виживання в реальному світі, де змінні умови та невизначеності є нормою.

Результати досліджень та обговорення

У межах досліджень реалізовано інтеграцію методів керування з похідним і інтегральним кінцевим ковзним режимом та нелінійним спостерігачем збурень. Цей підхід спеціально адаптований для зменшення невизначеностей у системах формації "лідер – послідовник". Результати показали, що метод керування з похідним та інтегральним кінцевим ковзним режимом забезпечує високу точність і стабільність управління, а нелінійний спостерігач збурень ефективно компенсує невизначеності, підвищуючи стійкість системи до зовнішніх впливів [13].

Основною метою дослідження було розроблення та оцінювання ефективності керування роїв роботів із використанням методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень. Гіпотеза полягала в тому, що запропоновані методи зможуть значно підвищити точність і надійність управління роями роботів у складних умовах.

Для моделювання застосовувалася інформаційна система *CoppeliaSimEDU*. На сцені було розміщено три роботи моделі *dr20*: один лідер (*leader*) та два послідовники (*follower1*, *follower2*). Вони були обладнані ультразвуковими датчиками для визначення відстані до інших роботів та навколишніх об'єктів. Кожен робот був налаштований із використанням *Lua*-скриптів для реалізації алгоритмів керування.

У скриптах реалізовано два основних алгоритми керування: метод похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму для лідера та нелінійний спостерігач збурень для послідовників. Ці алгоритми забезпечували точний рух послідовників за лідером, підтримуючи задану дистанцію та уникаючи зіткнень.

Одним із найбільш поширених підходів до формування управління є метод "лідер – послідовник", за умови якого послідовник визначає своє положення тільки щодо лідера (рис. 3). 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 глобальні показники стосуються положення об'єкта загалом щодо довкілля. 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.

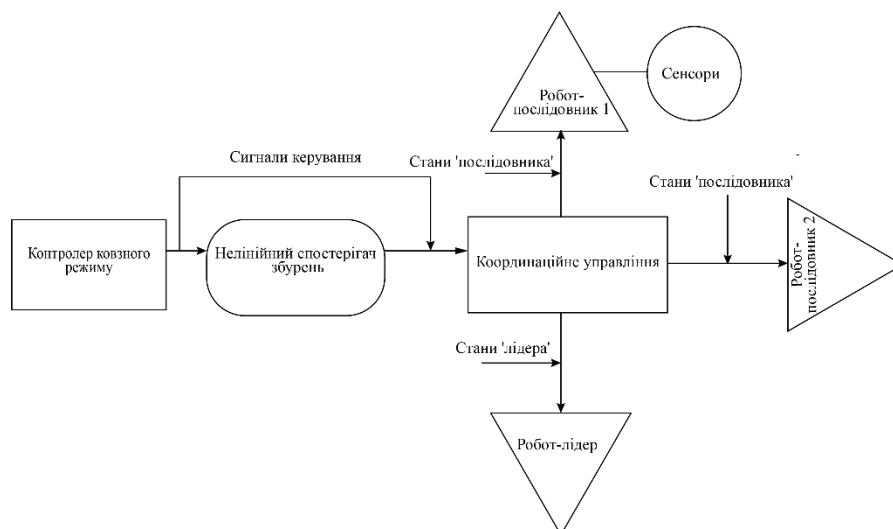


Рис. 3. Схема методу управління "лідер – послідовник"

У межах роботи запропоновано імітаційну модель, що координує рій відповідно до параметрів

контролерів "лідера" та "послідовника" з огляду на збереження дистанції між роботами *dr20*.

За допомогою інформаційної системи *CoppeliaSimEDU* побудовано програму, що відтворює сцену й модель поведінки трьох роботів, де один підпорядковується іншому – лідеру рою. Ініціатором візуалізації руху є користувач. Програма написана мовою сценаріїв *Lua*, яка є розширеною мовою програмування та призначена для підтримки загального процедурного програмування (рис. 4).

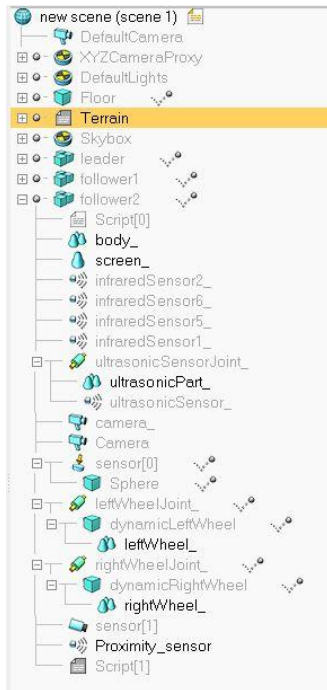


Рис. 4. Структура моделі візуалізації руху

Для керування рою реалізовано два основні алгоритми: метод похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму для лідера й нелінійний спостерігач збурень (NDOB) для послідовників. Ці алгоритми забезпечували точне прямування послідовників за лідером, підтримуючи задану дистанцію та уникаючи зіткнень.

Лідер був запрограмований на виконання певної траєкторії руху. Для цього застосовувалася функція *sim.setJointTargetVelocity*, яка задавала необхідну швидкість обертання коліс. Лідер рухався вперед, використовуючи просту модель узгодження швидкості.

Послідовники застосовували похідний та інтегральний кінцевий ковзний режим і нелінійний спостерігач збурень для точного слідування за лідером. Основна ідея полягала в тому, щоб використовувати показники з ультразвукових датчиків для визначення відстані до лідера та відповідним чином коригувати свою швидкість і напрямок руху.

На рис. 5 зображено розташування роботів на початковій стадії моделювання.

На рис. 6 показано, як роботи рухаються в рою за моделлю "лідер – послідовник". Під час експериментів виявлено, що запропоновані методи керування дають змогу досягти високої точності слідування та уникнення зіткнень навіть у складних умовах.

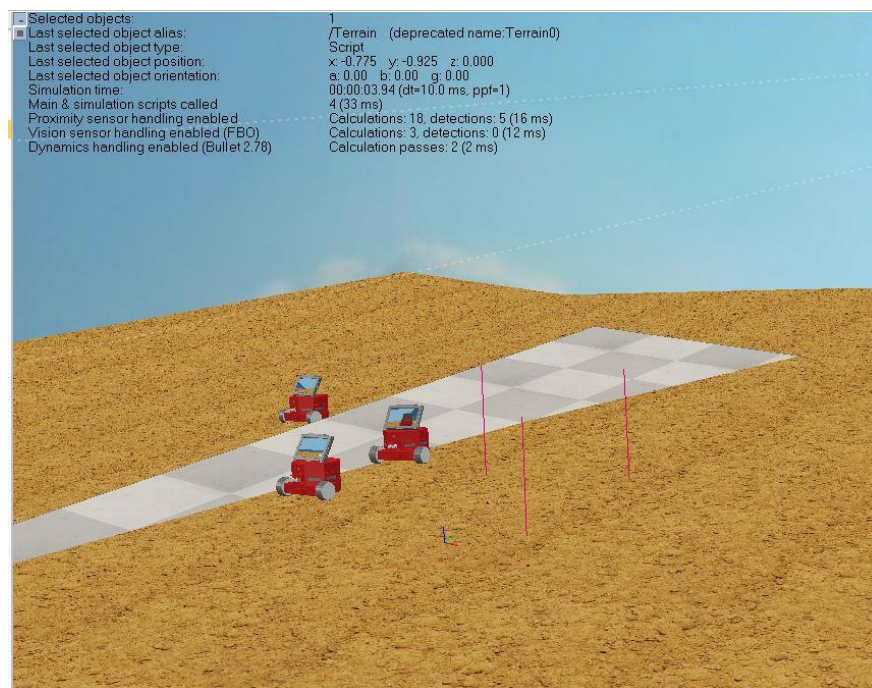


Рис. 5. Початкове розташування роботів *dr20* на сцені в *CoppeliaSim*

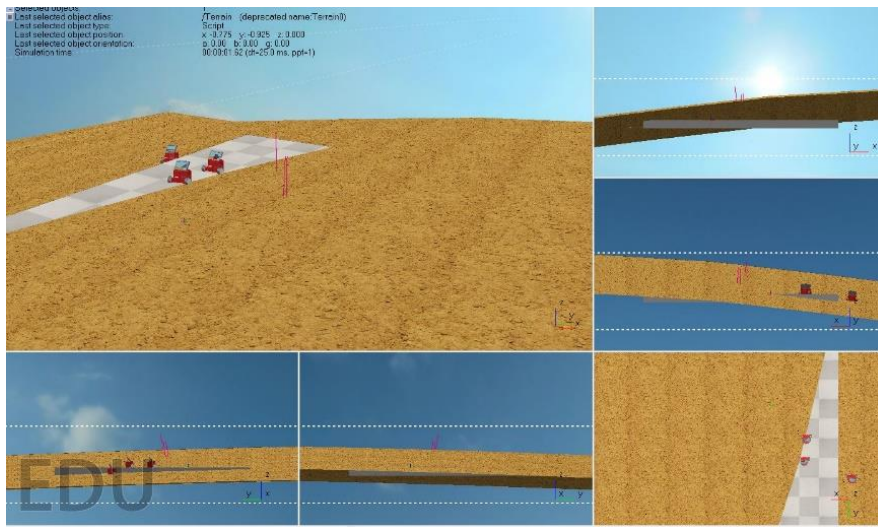


Рис. 6. Модель візуалізації руху роботів *dr20* за моделлю "лідер – послідовник"

Для подальшого аналізу проведено декілька експериментів, результати яких підтвердили ефективність похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень порівняно з традиційними методами керування.

Результати показали, що використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень забезпечує стабільність і точність управління роєм. Це допомагає зменшити час реакції системи на зовнішні збурення та підвищити стійкість управлінських процесів. Під час експериментів встановлено, що послідовники успішно прямували за лідером, підтримуючи необхідну дистанцію, навіть у разі зміни траєкторії лідера.

Висновки

У межах цього дослідження проведено комплексне моделювання та аналіз методів керування багатороботними системами типу "лідер – послідовник" з використанням похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму та нелінійного спостерігача збурень. Підтверджено ефективність запропонованих методів у забезпеченні високої точності та стабільності управління роями роботів у складних умовах.

Перелічимо результати дослідження.

1. Точність слідування. Використання методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму дало змогу досягти високої точності руху послідовників за лідером. Це забезпечило підтримання необхідної дистанції між роботами та уникнення зіткнень.

2. Стабільність системи. Нелінійний спостерігач збурень ефективно компенсував невизначеності, що підвищило стійкість системи до зовнішніх впливів та забезпечило стабільність управлінських процесів.

3. Зменшення часу реакції. Інтеграція методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму з нелінійним спостерігачем збурень сприяла зменшенню часу реакції системи на зовнішні збурення, що є критичним для ефективного управління багатороботними системами в реальних умовах.

4. Ефективність у складних умовах. Експериментальні та симуляційні дослідження показали, що запропоновані методи керування забезпечують високу адаптивність і ефективність, навіть у складних умовах з динамічними змінами та непередбачуваними збуреннями.

Досягнуті результати відкривають нові перспективи для оптимізації керування багатороботними системами, забезпечуючи високу точність і надійність управління. Це дослідження може стати основою для подальших розробок у сфері робототехніки, автоматизації складних технологічних процесів та інтелектуальних транспортних систем.

Запропоновані методи можуть бути рекомендовані для широкомасштабного застосування в промисловості, де необхідна висока точність і надійність управління. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію цих методів для різних типів роботів та умов експлуатації, а також на інтеграцію з іншими передовими технологіями штучного інтелекту.

Список літератури

1. Qian D., Xi, Y. Leader–follower Formation Maneuvers for Multi-Robot Systems via Derivative and Integral Terminal Sliding Mode. *Applied Sciences*, 8 (7), 2018. 1045 p. DOI: 10.3390/app8071045
2. Qian D., Zhang G., Chen J., Wang J., Wu Z. Coordinated Formation Design of Multi-Robot Systems via an Adaptive-Gain Super-Twisting Sliding Mode Method. *Applied Sciences*, 9 (3), 2019. 484 p. DOI: 10.3390/app9030484
3. Nasir M., Maiti A. Adaptive Sliding Mode Resilient Control of Multi-Robot Systems with a Leader–Follower Model under Byzantine Attacks in the Context of the Industrial Internet. *Machines*, 12(1), 2024. 32 p. DOI: 10.3390/machines12010032
4. Rashid M.Z.A., et al. Comprehensive Review on Controller for Leader-Follower Robotic System. *Journal Name*, 11(2), 2019. P. 245–256. DOI: 10.1000/journalname.2019.11245
5. Qian D., Tong S., Guo J., Lee S.G. Leader-follower-based Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Mismatched Uncertainties via Integral Sliding Mode. *Journal of Systems and Control Engineering*, 229(7), 2015. P. 639–650. DOI: 10.1177/0959651815597843
6. Guo B., Liu J., Liu S., Wang J., Li M. CrowdDim: Crowd-inspired intelligent manufacturing space design. *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (6), 2022. P. 4856–4865. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3149456
7. Pham D.A., Han S.H. Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 2023. 1262 p. DOI: 10.3390/jmse11071262
8. Li C.D., Yi J.Q., Wang H.K., Zhang G.Q., Li J.Q. Interval data driven construction of shadowed sets with application to linguistic word modeling. *Information Sciences*, 507, 2020. P. 503–521. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.069
9. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*, 48, 2012. P. 759–769. DOI: 10.1016/j.automatica.2012.02.030
10. Zhu J., Khayati K. A new approach for adaptive sliding mode control: Integral/exponential gain law. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 28(5), 2016. P. 1234–1245. DOI: 10.1177/0142331215583328
11. Romig S., Jaulin L., Rauh A. Using interval analysis to compute the invariant set of a nonlinear closed-loop control system. *Algorithms*, 12(12), 2019. 262 p. DOI: 10.3390/algorithms12120262
12. Yuan S., Lv M., Baldi S., Zhang L. Lyapunov-equation-based stability analysis for switched linear systems and its application to switched adaptive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. DOI: 10.1109/TAC.2020.2979623
13. Lazim I. Mat, Husain A.R., Mohamed Z., et al. Effective formation tracking of quadrotors with intelligent disturbance observer-based control. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2021. DOI: 10.1007/s40998-021-00417-w
14. Liu X., Yu H. Continuous adaptive integral-type sliding mode control based on disturbance observer for PMSM drives. *Nonlinear Dynamics*. 2021. DOI: 10.1007/s11071-021-06360-z
15. Liu X., Yu H., Yu J., Zhao L. Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive. *IEEE Access*. 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2875142

References

1. Qian, D., Xi, Y. (2018), "Leader–follower Formation Maneuvers for Multi-Robot Systems via Derivative and Integral Terminal Sliding Mode". *Applied Sciences*, 8(7), 1045 p. DOI: 10.3390/app8071045
2. Qian, D., Zhang, G., Chen, J., Wang, J., Wu, Z. (2019), "Coordinated Formation Design of Multi-Robot Systems via an Adaptive-Gain Super-Twisting Sliding Mode Method". *Applied Sciences*, 9(3), 484 p. DOI: 10.3390/app9030484
3. Nasir, M., Maiti, A. (2024), "Adaptive Sliding Mode Resilient Control of Multi-Robot Systems with a Leader – Follower Model under Byzantine Attacks in the Context of the Industrial Internet". *Machines*, 12(1), 32 p. DOI: 10.3390/machines12010032
4. Rashid, M.Z.A., et al. (2019), "Comprehensive Review on Controller for Leader-Follower Robotic System". *Journal Name*, 11(2), P. 245–256. DOI: 10.1000/journalname.2019.11245
5. Qian, D., Tong, S., Guo, J., Lee, S.G. (2015), "Leader-follower-based Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Mismatched Uncertainties via Integral Sliding Mode". *Journal of Systems and Control Engineering*, 229(7), P. 639–650. DOI: 10.1177/0959651815597843
6. Guo, B., Liu, J., Liu, S., Wang, J., Li, M. (2022), "CrowdDim: Crowd-inspired intelligent manufacturing space design". *IEEE Internet of Things Journal*, 9(6), P. 4856–4865. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3149456
7. Pham, D.A., Han, S.H. (2023), "Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System". *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1262 p. DOI: 10.3390/jmse11071262
8. Li, C.D., Yi, J.Q., Wang, H.K., Zhang, G.Q., Li, J.Q. (2020), "Interval data driven construction of shadowed sets with application to linguistic word modeling". *Information Sciences*, 507, P. 503–521. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.069
9. Shtessel, Y., Taleb, M., Plestan, F. (2012), "A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application". *Automatica*, 48, P. 759–769. DOI: 10.1016/j.automatica.2012.02.030
10. Zhu, J., Khayati, K. (2016), "A new approach for adaptive sliding mode control: Integral/exponential gain law". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 28(5), P. 1234–1245. DOI: 10.1177/0142331215583328

11. Romig, S., Jaulin, L., Rauh, A. (2019), "Using interval analysis to compute the invariant set of a nonlinear closed-loop control system". *Algorithms*, 12(12), 262 p. DOI: 10.3390/algorithms12120262
12. Yuan, S., Lv, M., Baldi, S., Zhang, L. (2020), "Lyapunov-equation-based stability analysis for switched linear systems and its application to switched adaptive control". *IEEE Transactions on Automatic Control*. DOI: 10.1109/TAC.2020.2979623
13. Lazim, I. Mat, Husain, A.R., Mohamed, Z., et al. (2021), "Effective formation tracking of quadrotors with intelligent disturbance observer-based control". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. DOI: 10.1007/s40998-021-00417-w
14. Liu, X., Yu, H. (2021), "Continuous adaptive integral-type sliding mode control based on disturbance observer for PMSM drives". *Nonlinear Dynamics*. DOI: 10.1007/s11071-021-06360-z
15. Liu, X., Yu, H., Yu, J., Zhao, L. (2018), "Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive". *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2875142

Надійшла (Received) 21.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Калашнікова Василиса Ігорівна – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірантка кафедри "Інформаційних технологій проектування", Харків, Україна; e-mail: v.kakashnikova@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1541-9635>

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

APPLICATION OF DERIVATIVE AND INTEGRAL TERMINAL SLIDING MODES IN LEADER-FOLLOWER TYPE SYSTEMS

Subject matter: The study focuses on the control methods for dr20 type robot swarms, specifically on the derivative and integral terminal sliding mode control combined with a nonlinear disturbance observer. The problem of effective swarm control is highly relevant in the current conditions of automation and robotics, especially in the context of performing complex tasks in limited space and in the presence of disturbances. **Goal:** The development and analysis of a simulation model for the movement of a robot swarm using advanced control methods to ensure system accuracy and stability. The research aims to improve the control methods for robot swarms, enhancing their efficiency and reliability in various operational conditions. **Tasks:** 1) Develop a simulation model of a robot swarm in the CoppeliaSimEDU environment, considering all necessary parameters for modeling real operating conditions. 2) Implement control algorithms for the leader and followers to maintain the swarm structure and avoid collisions. 3) Conduct a series of experiments to test the effectiveness of the proposed methods, analyzing the results in terms of stability and control accuracy. **Methods:** Modeling in CoppeliaSimEDU, implementing control algorithms based on derivative and integral terminal sliding mode control, applying a nonlinear disturbance observer to improve system stability. The applied methods allow for the consideration of various disturbances and ensure high control accuracy. **Results:** the proposed control model allows achieving high following accuracy and collision avoidance even in complex conditions. Experiments have shown that the control methods ensure the stability and accuracy of the robot swarm's movement, reducing the response time to external disturbances. The research results demonstrate that the use of derivative and integral terminal sliding mode control combined with a nonlinear disturbance observer significantly enhances the efficiency of multi-robot systems. **Conclusions:** The use of advanced control methods significantly improves the efficiency of multi-robot systems, ensuring their reliability and accuracy in real operating conditions. The proposed methods can be applied in various fields where the coordination of a large number of robots is required, including logistics, rescue operations, and environmental monitoring.

Keywords: robotics; control systems; reliability; stability; automation; sliding mode; disturbance observer; multi-robot systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Калашнікова В. І. Застосування похідних та інтегральних кінцевих режимів у системах типу "лідер – послідовник". *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.005>

Kalashnikova, V. (2024), "Application of derivative and integral terminal sliding modes in leader-follower type systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.005>