

**МЕТОДИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ КОЛАБОРАТИВНИХ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ У ЄДИНІЙ РОБОЧІЙ ЗОНІ З ЛЮДИНОЮ****Шахов П.В.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14

E-mail: pavlo.shakhov@nure.ua

**Анотація:** У статті розглядаються сучасні методи децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів, що функціонують у спільному робочому просторі з людиною. Проаналізовано поведінкові моделі, потенційні поля, розподілену оптимізацію, підкріплювальне навчання та протокольну координацію. Оцінено переваги та обмеження кожного методу з точки зору безпеки, ефективності взаємодії та масштабованості. Запропоновано порівняльну таблицю та математичні моделі, що дозволяють адаптувати управління залежно від динаміки середовища. Результати можуть бути використані для розробки гнучких систем керування в умовах кіберфізичних виробничих середовищ.

**Ключові слова:** децентралізоване керування, колаборативна робототехніка, роботи-маніпулятори, людино-машинна взаємодія, поведінкові моделі, потенційні поля, розподілена оптимізація, безпека, адаптивність.

**METHODS OF DECENTRALIZED CONTROL OF A GROUP OF COLLABORATIVE ROBOTS-MANIPULATORS IN A SINGLE WORKING AREA WITH A HUMAN****Shakhov P.**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, pr. Sciences, 14

E-mail: pavlo.shakhov@nure.ua

**Abstract** The article considers modern methods of decentralized control of a group of collaborative robot manipulators operating in a shared workspace with a person. Behavioral models, potential fields, distributed optimization, reinforcement learning, and protocol coordination are analyzed. The advantages and limitations of each method are assessed in terms of security, interaction efficiency, and scalability. A comparative table and mathematical models are proposed that allow adapting control depending on the dynamics of the environment. The results can be used to develop flexible control systems in cyber-physical production environments.

**Keywords:** decentralized control, collaborative robotics, robot manipulators, human-machine interaction, behavioral models, potential fields, distributed optimization, security, adaptability.

Сучасний розвиток кіберфізичних виробничих систем супроводжується стрімким впровадженням колаборативних роботів, здатних ефективно взаємодіяти як між собою, так і з людиною в єдиному робочому просторі. Зростаючі вимоги до гнучкості, адаптивності та безпечної співпраці у виробничому середовищі зумовлюють потребу в нових підходах до управління багатьма роботизованими системами, що працюють одночасно. Особливої актуальності набувають методи децентралізованого керування, які дозволяють забезпечити масштабованість, стійкість до відмов окремих елементів та швидке реагування на зміни в умовах роботи.

У контексті колаборативних роботів-маніпуляторів, що функціонують поряд з людиною, децентралізоване управління відкриває можливості для підвищення рівня безпеки та адаптивності системи, зменшення навантаження на центральний контролер та створення умов

для автономної координації між агентами. Це особливо важливо у випадках, коли необхідно зменшити затримки в обробці даних, забезпечити локальне прийняття рішень і враховувати непередбачувану поведінку людини.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері координації багатороботних систем, питання розробки ефективних методів децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів в умовах спільної роботи з людиною залишається відкритим і потребує подальшого вивчення. У цьому контексті дана стаття спрямована на аналіз існуючих підходів, розробку та дослідження нових методів децентралізованого керування, що враховують особливості взаємодії роботів та людини в динамічному середовищі.

Проведемо дослідження та аналіз методів децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів у єдиній робочій зоні з людиною, з визначенням, математичним забезпеченням та таблицею порівняння:

– метод багатоагентного планування на основі поведінкових моделей (Behavior-Based Control). Роботи керуються локальними правилами поведінки, які визначають їх дії залежно від поточного стану середовища. Взаємодія з іншими агентами реалізується через обмін сигналами або спостереження. Кожен агент має набір функцій поведінки:

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^N w_k B_k(x_i(t), x_j(t)), \quad (1)$$

де  $u_i$  – керуючий сигнал;

$B_k$  – поведінкові функції;

$w_k$  – вагові коефіцієнти;

$x_i(t)$  – стан агента  $i$ ;

$x_j(t)$  – стани сусідніх агентів.

– метод потенційних полів (Artificial Potential Fields). Управління засноване на уявних силах, які притягують роботів до цілі та відштовхують від перешкод (у тому числі людини). Загальне поле:

$$F_i = -\nabla U(x_i), U(x_i) = U_{attr}(x_i) + U_{rep}(x_i), \quad (2)$$

де  $U_{attr}$  – потенціал притягання до цілі,

$U_{rep}$  – потенціал відштовхування від перешкод/людини/інших роботів.

– метод розподіленої оптимізації (Distributed Optimization). Кожен агент вирішує свою оптимізаційну задачу на основі локальної інформації та обміну з сусідами, з метою досягнення глобальної мети. Загальна задача:

$$\min_x \sum_{i=1}^n f_i(x_i), \quad \text{за умови } x_i \in X_i, x_i = x_j \text{ для } (i, j) \in E, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість агентів (роботів) у системі;

$x_i$  – локальна змінна управління або рішення агента  $i$ ;

$X_i$  – простір допустимих значень для агента  $i$ ;

$f_i(x_i)$  – локальна функція цілі агента  $i$ ;

$E$  – множина пар сусідніх агентів у графі комунікацій;

$x_i = x_j$  для  $(i, j) \in E$  – умова узгодженості між агентами.

– метод розподіленого підкріплювального навчання (Multi-Agent Reinforcement Learning - MARL). Агенти навчаються оптимальній стратегії взаємодії з іншими агентами та середовищем шляхом проб і помилок на основі винагороди. Q-навчання для агента  $i$ :

$$Q_i(s_i, a_i) \leftarrow Q_i(s_i, a_i) + \alpha \left[ r_i + \gamma \max_a Q_i(s_i, a) - Q_i(s_i, a_i) \right], \quad (4)$$

де  $s_i$  – стан агента;

$a_i$  – дія;

$r_i$  – винагорода;

$\gamma$  – дисконт-фактор.

– метод розподіленої координації через протоколи взаємодії (Protocol-Based Coordination). Агенти координуються через заздалегідь визначені протоколи, наприклад, “дай шлях”, “зміна задачі”, “черговість дій”, які динамічно активуються залежно від стану. Кожен агент має автомат зі станами:

$$S_i(t+1) = f(S_i(t), m_j(t), o(t)), \quad (5)$$

де  $m_j(t)$  – повідомлення від інших агентів;

$o(t)$  – спостереження середовища.

В таблиці 1, представлено порівняння вище представлених методів децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів у єдиній робочій зоні з людиною.

Таблиця 1 – Порівняння переваг та недоліків методів децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів у єдиній робочій зоні з людиною

Метод	Переваги	Недоліки	Сумісність з людиною	Масштабован.
Поведінкові моделі	Прості у реалізації, адаптивні до змін	Важко гарантувати глобальну оптимальність	Середня (без пріоритету людини)	Висока
Потенційні поля	Інтуїтивне керування, ефективне уникнення	Проблема локальних мінімумів	Обмежена (можливі неконтрольовані рухи біля людини)	Середня
Розподілена оптимізація	Оптимальна взаємодія, математично обґрунтована	Потребує мережевої синхронізації, обчислювально складна	Висока (можна врахувати людину як обмеження)	Висока
Підкріплювальне навчання (MARL)	Самонавчання та адаптація до складних сценаріїв	Потребує великої кількості епізодів, може бути нестабільним	Висока (можна моделювати людську поведінку)	Середня
Протоколи взаємодії	Прозорість рішень, формалізована координація	Обмежена гнучкість, складність проектування	Висока (можна встановити пріоритети людині)	Висока

**ВИСНОВКИ.** У статті здійснено всебічний аналіз існуючих методів децентралізованого керування групою колаборативних роботів-маніпуляторів, які працюють у спільному робочому просторі з людиною. Досліджено поведінкові підходи, методи потенційних полів, розподілену оптимізацію, підкріплювальне навчання та координацію через протоколи. Встановлено, що кожен із методів має свої переваги і обмеження, зокрема щодо адаптивності, швидкодії, можливості масштабування та забезпечення безпеки при взаємодії з людиною. Найбільш перспективними у контексті безпечної та ефективної взаємодії є методи розподіленої оптимізації та підкріплювального навчання, які дозволяють агентам не лише адаптуватися до змін середовища, а й враховувати людський фактор як динамічне обмеження. Отримані результати мають практичне значення для проектування гнучких, адаптивних і безпечних систем керування колаборативними роботами у кіберфізичних виробничих середовищах. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці гібридних моделей керування, що поєднують переваги кількох підходів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Chen, Y., Arkin, J., Zhang, Y., Roy, N., & Fan, C. (2024, May). Scalable multi-robot collaboration with large language models: Centralized or decentralized systems?. In 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 4311-4317). IEEE.
2. Qin, X., Liao, Z., Liu, C., & Xiong, Z. (2024). Online task allocation and scheduling in multi-manipulator system considering collision constraints and unknown tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 90, 102808.
3. Leong, P. Y., & Ahmad, N. S. (2024). Exploring autonomous load-carrying mobile robots in indoor settings: A comprehensive review. *IEEE Access*.
4. Li, X., Zhang, Z., Zhang, M., Ren, X., & Luo, Y. (2024). Synchronized Collaboration of Distributed Multiple Robotic Arms via State-Coupled Neural Network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
5. Xu, J. Z., Liu, Z. W., Ge, M. F., Wang, Y. W., & He, D. X. (2024). Self-Triggered MPC for Teleoperation of Networked Mobile Robotic System via High-Order Estimation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
6. Giacomuzzo, G., Terreran, M., Jain, S., & Romeres, D. (2024, October). Decaf: a discrete-event based collaborative human-robot framework for furniture assembly. In 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 7085-7091). IEEE.
7. Liao, H. (2025). The Adaptive Model Reference PID and Split-Range Control of a MIMO Nonlinear Revolute-Joint Robot Arm. *IEEE Access*.
8. Knezevic, B. Z., Jalic, R., & Erceg, D. (2024). MACROS AS A PROGRAMMING TOOL FOR SYNCHRONIZATION OF TWO NON-SYNCHRONIZABLE INDUSTRIAL ROBOTS. *Proceedings on Engineering*, 6(2), 875-884.
9. Ji, G., Gao, Q., Xiao, Y., & Sun, Z. (2025). Efficient Real2Sim2Real of Continuum Robots Using Deep Reinforcement Learning With Koopman Operator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
10. Barczak, B. (2024). Knowledge and ICT based networks: towards a taxonomy. *International Journal of Contemporary Management*, 60(1), 1-16.
11. Wang, Z., Wang, D., Xu, X., & Lian, J. (2025). A Hybrid Multi-Agent System Approach for Distributed Composite Convex Optimization Under Unbalanced Directed Graphs. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*.

12. Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). MATHEMATICAL MODEL BASED ON MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING (MARL) AND PARTIALLY OBSERVABLE MARKOV DECISION PROCESS (POMDP) FOR MODELING CARGO MOVEMENT FOR A MOBILE ROBOTS GROUP. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(4), 480-489.
13. Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Abu-Jassar, A. (2025). MICROCHIP MARKING RECOGNITION AND IDENTIFICATION USING A COMPUTER VISION SYSTEM MATHEMATICAL MODEL. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(4), 321-330.
14. Demaska, N., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalailah, A. (2025). ANALYSIS OF METHODS, MODELS AND ALGORITHMS FOR A COLLABORATIVE ROBOTS GROUP DECENTRALIZED CONTROL. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(2), 235-249.
15. Yevsieiev V. Using Multi-Agent Systems in the Management of Collaborative Robots / V. Yevsieiev // *Computer-integrated technologies, automation and robotics 2025: Theses of Reports of II st All-Ukrainian Conference, May 16-17, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 13-17.*
16. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
17. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156.
18. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2023). *Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0 (Doctoral dissertation, European Scientific Platform).*
19. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.
20. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). MODEL DEVELOPMENT OF DYNAMIC REPRESENTATION A MODEL DESCRIPTION PARAMETERS FOR THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR WITHIN THE INDUSTRY 5.0 FRAMEWORK. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
21. Maksymova, S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Bahlai, O. (2024, May). Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050 (GY-521). In *2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 39-42). IEEE.
22. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2024). Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. *International Journal of Crowd Science*, 8.
23. Abu-Jassar, A., Al-Sukhni, H., Al-Sharo, Y., Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Lyashenko, V. (2024). Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A\*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations.

*Науковий керівник: Максимова Світлана Святославівна, к.т.н., доцент кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки*