

А.Е. Қызырқанов<sup>1,2\*</sup>, С.К. Атанов<sup>1</sup>, Ш.А. Альджаварнех<sup>3</sup>, Н.А. Тұрсынова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Евразийский Национальный Университет, г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup>Астана ИТ Университет, г. Нур-Султан, Казахстан

<sup>3</sup>Иорданский университет науки и технологии, г. Ирбид, Иордания

\* e-mail: abzzall@gmail.com

## КООРДИНАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### Аннотация

Для многоагентных робототехнических систем движение с определенной геометрической структурой, имеет много преимуществ: сокращаются затраты на систему, улучшается эффективность и согласованность, а также обеспечивается гибкость структуры. В данной работе рассмотрена движение многоагентных робототехнических систем с поддержкой определенной геометрической структуры. Описано алгоритм координации движения роботов в системе основанное на модели поведения. Для поддержания геометрической структуры использовался метод «Лидер-Последователь», а для того, чтобы работоспособность системы не зависело от состояния отдельных роботов было предложено определить виртуального лидера. Также в рамках данной работы было смоделировано движения многоагентной робототехнической системы с четырьмя автономными роботами. Предоставлены результаты экспериментальных исследований движения этой системы с использованием, алгоритма описанной в данной статье.

**Ключевые слова:** многоагентные робототехнические системы, координация, подход, основанный на модели поведения.

### Аңдатпа

А.Е. Қызырқанов<sup>1,2</sup>, С.К. Атанов<sup>1</sup>, Ш.А. Альджаварнех<sup>3</sup>, Н.А. Тұрсынова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан

<sup>2</sup>Астана ИТ Университет, Нұр-Сұлтан қ., Қазақстан

<sup>3</sup>Иорданская гылым және технология университеті, Ирбид, Иордания

## КӨП АГЕНТТІ РОБОТ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ҚОЗҒАЛЫСЫН ҮЙЛЕСТІРУ

Көп агентті роботтық жүйелер үшін белгілі бір геометриялық форманы сақтай отырып қозғалудың көптеген артықшылықтары бар: жүйені ұстауға кететін шығындар азаяды, жүйе жұмысының тиімділігі мен үйлесімі, сонымен қатар жүйедегі роботтардың икемділігі артады. Бұл жұмыста көп агентті роботтық жүйелердің белгілі бір геометриялық пішінді сақтай отырып қозғалуы қарастырылған. Мінез-құлық моделіне негізделген қозғалысты үйлестіру алгоритмы сипатталған. Геометриялық форманы сақтау үшін «ізбасар көшбасшы» әдісі қолданылған, ал жүйенің жұмысы жекелеген роботтардың жағдайынан тәуелді болмауы үшін виртуалды көшбасшыны белгілеу ұсынылған. Сондай-ақ осы жұмыс барысында төрт роботтан тұратын мультиагентті робот жүйесінің қозғалысының симуляциясы жасалды. Жүйенің осы мақалада қарастырылған алгоритм бойынша қозғалысын зерттеу нәтижелері көрсетілген.

**Түйін сөздер:** көп агентті робот жүйелері, координация, мінез-құлыққа негізделген тәсіл.

### Abstract

## MOTION COORDINATION OF MULTI-AGENT ROBOTICS SYSTEMS

Kuzyrkanov A.E.<sup>1,2</sup>, Atanov S.K.<sup>1</sup>, Aljawarneh S.A.<sup>3</sup>, Tursynova N.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup>Astana IT University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>3</sup>Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan

For multi-agent robotic systems, motion with a certain geometric pattern, has many advantages: system costs are reduced, efficiency and consistency are improved, and structure flexibility is increased. This paper considers the movement of multi-agent robotic systems maintaining a certain geometric structure. A motion coordination algorithm based on a behavior is described. To maintain the geometric form, the leader-follower method was used, and in order that the state of the system did not depend on the state of individual robots, it was proposed to define a virtual leader. Also in this work, the motion of a multi-agent robotic system with four autonomous robots was simulated. The results of the experimental study of the motion of the system by using the algorithm described in this paper are provided.

**Keywords:** multi-agent robotics systems, coordination, behavioral model approach.

## Введение

Робототехника – одно из ведущих направлений современной промышленной науки. Это направление занимается разработкой автоматических механизмов и их интеграцией в жизнь человека, значительно облегчая как промышленную сферу деятельности человека, так и его повседневную жизнь.

В истории человечества было представлено множество различных способов повышения эффективности работы роботов [1, 2]. Один из таких подходов предполагает использование группы из нескольких простых роботов, то есть многоагентных робототехнических систем, для решения одной сложной задачи.

Исследования в области многоагентных робототехнических систем в последние годы привлекают широкое внимание исследователей. Основной проблемой является поиск эффективных алгоритмов координации автономных мобильных роботов для достижения высокого качества совместной работы. Здесь необходимо одновременно найти решение нескольких проблем, таких как избегание столкновений друг с другом или с препятствием, движение к цели и тому подобные. В этой области была проделана огромная работа [3, 4]. Одним из наиболее распространенных методов решения таких проблем является движение с сохранением определенной геометрической структурой, или, коротко, управление формированием.

Управление формированием – это техника управления, направленная на достижения определенных форм группой роботов [5]. Здесь роботы могут двигаться без столкновений, одновременно образуя определенный блок, чтобы улучшить производительность всей системы [6].

## Постановка задачи

В данной статье рассматривается многоагентная робототехническая система с распределенным управлением. В отличие от систем с централизованным управлением, в таких системах роботы не управляются центральным блоком управления. Здесь каждый робот может использовать сигналы, полученные друг от друга или извне, но в основном принимает решения самостоятельно, основываясь на своих наблюдениях (то есть сенсорных данных) и состоянии.

Подход, основанный на модели поведения в сочетании с подходом «Лидер-Последователь» с виртуальным лидером используется для движения с сохранением геометрической фигуры.

## Метод, основанный на модели поведения

Основная идея подхода, основанное на модели поведения заключается в том, что общий производительность робота зависит от нескольких желаемых моделей поведения [7, 8] и рассчитывается как:

$$\vec{V}_{\text{итог.}} = \sum_{b \in B} w_b * \vec{V}_b \quad (1)$$

Здесь  $B$  - набор требуемых моделей поведения,  $\vec{V}_b$  - скорость для поддержания модели поведения  $b$ ,  $w_b$  – вес модели поведения  $b$  (рисунок 1).

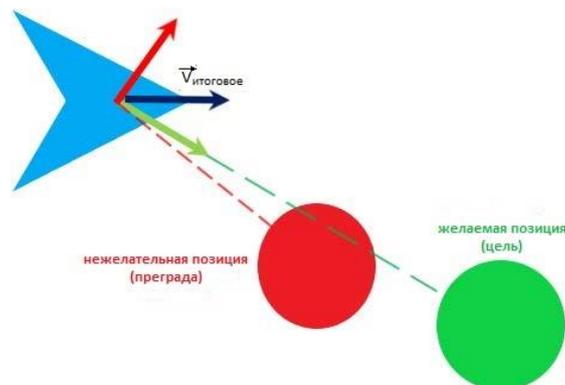


Рисунок 1. Принцип работы метода основанное на модели поведения

Каждый модель поведения соответствует определенной проблеме, которую пытаются решить роботы в системе. И самое главное преимущество этого метода заключается в том, что с его помощью можно решать несколько задач одновременно, добавляя соответствующее поведение для каждой из этих задач. В некоторых работах этот же подход называют подходом, основанным на искусственное потенциальное поле [9, 10, 11] или методом основанное на виртуальной силе [12].

Классические варианты этих методов одинаковы: разница лишь в том, что вместо скорости моделей поведения используются виртуальные силы или потенциальные поля, которые притягивают к желаемым позициям или отталкивают от нежелательных.

### Метод «Лидер-Последователь»

Основная идея метода «Лидер-Последователь» заключается в том, что роботы-последователи все время стараются поддерживать желаемое расстояние [13] от лидера. Представив лидера и последователей как материальные точки на плоскости и имея расположение каждой точки, можно рассчитать расстояние между ними. Предполагая, что расположение последователя -  $(x_1, y_1)$ , а расположение лидера -  $(x_0, y_0)$ , расстояние между ними определяется как:

$$D = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \quad (2)$$

Это расстояние может быть расстоянием, которого соблюдает последователь (рисунок 2).

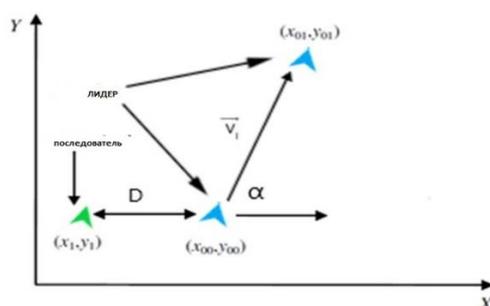


Рисунок 2. Представление лидера и последователя как материальные точки

Если лидером назначается какой-либо робот из системы, то устойчивость системы оказывается под серьезным вопросом: в случае отказа лидера вся система становится неработоспособной. Чтобы решить эту проблему, можно определить виртуального лидера и поддерживать дистанцию по отношению к нему [14, 15]. Расположение виртуального лидера может быть определена в центре поддерживаемой геометрической формы. При движении координаты лидера вычисляются как среднее арифметическое идеальных координат лидера для каждого из роботов в системе:

$$\begin{aligned} X_L &= \frac{\sum_{i=1}^N x_{il}}{N} \\ Y_L &= \frac{\sum_{i=1}^N y_{il}}{N} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $N$  - количество роботов в многоагентной робототехнической системе,  $(x_{il}, y_{il})$  - идеальная позиция лидера для  $i$ -го робота в системе. Под идеальной позицией лидера подразумевается позиция лидера, в которой он находился бы, если бы робот был расположен в необходимой позиции в поддерживаемой геометрической фигуре.

### Описание алгоритма

Роботы многоагентной системы движутся, обновляя свою скорость с некоторой частотой. Для вычисления позиций виртуального лидера используется уравнение (3).

Для вычисления скорости используется подход, основанный на модели поведения. В нашем случае требуемыми моделями поведения роботов являются:

- избегание столкновения друг с другом и с препятствием
- формирование и поддержание требуемого геометрического рисунка
- поиск и достижение цели.

Таким образом, подставив эти скорости в уравнение (1), можно рассчитать общую скорость следующим образом:

$$\vec{V}_{\text{итог}} = w_1 * \vec{V}_{\text{изб.столкн}} + w_2 * \vec{V}_{\text{сохр.формы}} + w_3 * \vec{V}_{\text{дост.цели}} \quad (4)$$

Значение скорости модели поведения «избегание столкновения» обратно пропорционально расстоянию до ближайшего препятствия. Здесь следует отметить, что препятствием для робота считаются любые внешние объекты, которые каким-либо образом могут помешать движению этого робота, в том числе и другие роботы в системе. Если рассуждать логически, то угол этой скорости мог бы быть прямо противоположен ближайшему препятствию, но это приводит к тупику, где препятствие с двух сторон обнуляют друг друга, и робот сталкивается одному из них, хотя фактически он мог бы отойти в сторону. Поэтому угол этой скорости перпендикулярен ближайшему препятствию в сторону с меньшим количеством препятствий.

Скорость модели поведения «поддержание формирования» направлена на желаемое положение робота в формировании. Скорость модели поведения «движение к цели» одинакова для всех роботов в многоагентной робототехнической системе и направлена от позиции виртуального лидера к позиции цели. Блок-схема полного алгоритма представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. Блок-схема полного алгоритма

### Симуляция

Движение многоагентной робототехнической системы с четырьмя одинаковыми роботами было смоделировано с помощью пакета Mobile Robotics Simulation Toolbox в MATLAB.

Каждый робот в этой системе имеет 12 дальномеров. Радиус обнаружения всех дальномеров одинаков. Соседние дальномеры расположены относительно друг друга под углом 30 градусов, охватывая все стороны робота (рисунок 4).

Также предполагается, что каждый робот знает о расположении других роботов: в реальности они способны передавать друг другу информацию о своем местоположении.

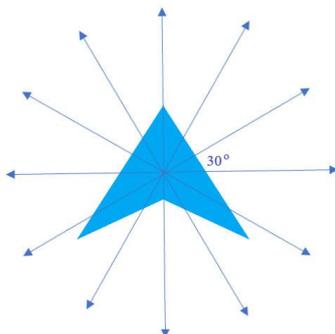


Рисунок 4. Модель агента с его дальномерами

В начале движения роботы образуют квадрат и стараются сохранить эту форму до конца движения (рисунок 5). Многоагентная робототехническая система должна достичь цели, расположенной в координатах (90, 90), обойдя препятствие.

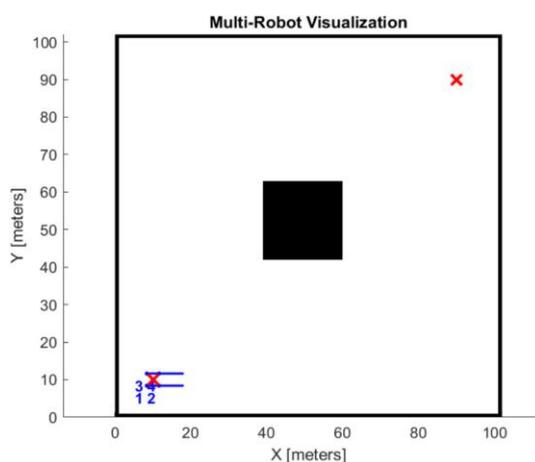


Рисунок 5. Начальное состояние симуляции в MATLAB.

Положение виртуального лидера и цели указано как waypoint (красный цвет)

### Результаты экспериментального исследования

Экспериментальные анализы проводились с весами модели поведения «сохранение формы» ( $w_2$ ) в диапазоне от 0.1 до 2. Изменение количества агентов, достигших целевой позиции без столкновений, показано на графике ниже (рисунок 6). Вес модели поведения «избегание столкновения» ( $w_1$ ) установлен как  $w_1=2$ , а вес модели поведения «движение к цели» ( $w_3$ ) установлен как  $w_3=1$ .



Рисунок 6. Изменение количества агентов, которые достигли целевой позиции без столкновения

Из графика видно, что наилучший результат (3 агента из 4) получен при значении  $w_2=0.4$  (рисунок 7). При значениях  $w_2<0.4$  количество агентов, достигших цели колебался. При  $w_2=0.1$  сталкиваются все агенты в системе (рисунок 8), это вызвано беспорядочным движением роботов в системе и очень хорошо демонстрирует важность движения с сохранением формы.

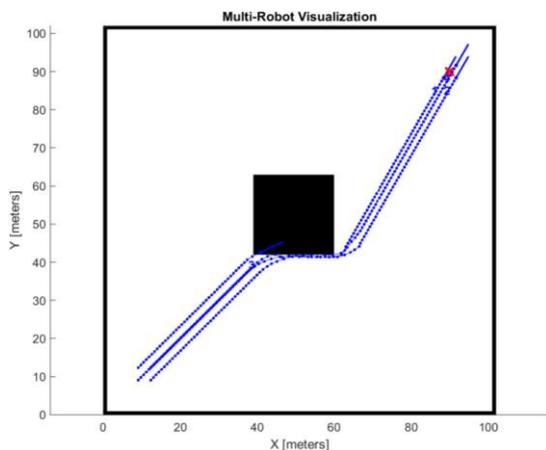


Рисунок 7. Траектория движения агентов при значениях весов:  $w_1=2$ ,  $w_2=0.4$ ,  $w_3=1$

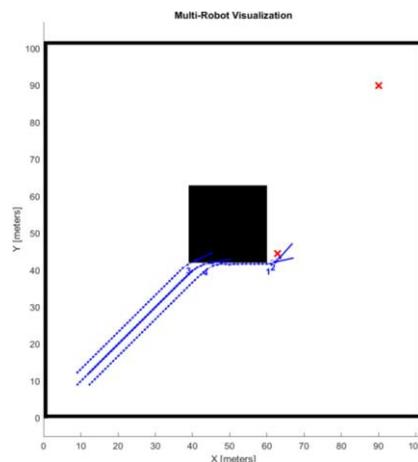


Рисунок 8. Траектория движения агентов при значениях весов:  $w_1=2$ ,  $w_2=0.1$ ,  $w_3=1$

Когда значение веса модели поведения «сохранение формы» ( $w_2$ ) находится в диапазоне от 0.4 до 1.2, наблюдается стабильное снижение числа роботов, достигающих цели (рис.9).

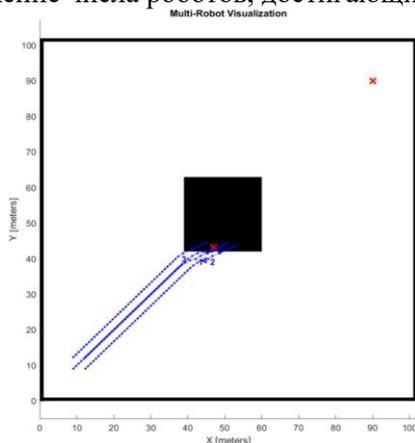


Рисунок 9. Траектория движения агентов при значениях весов:  $w_1=2$ ,  $w_2=1.2$ ,  $w_3=1$

Когда  $w_2>1.2$ , все агенты сталкиваются с препятствием.

### Заключение

В данной работе мы предложили алгоритм управления движением многоагентных роботизированных систем, который позволяет им двигаться, сохраняя определенную геометрическую форму. Для координации движения роботов был использован подход, основанный на модели поведения. Этот метод позволяет организовать движение без центра управления, что повышает устойчивость. Кроме того, для поддержания требуемой геометрической фигуры был предложен метод «Лидер-Последователь», который является одним из самых простых алгоритмов для разработки. Для того чтобы состояние системы не зависело от одного робота-лидера, был предложен подход с использованием виртуального лидера, который делает систему более отказоустойчивой.

Также в среде MATLAB было смоделировано движение многоагентных роботизированных систем, состоящих из четырех транспортных средств. Исследовалась зависимость количества агентов, достигающих цели без столкновений, от веса модели поведения «сохранение геометрической формы» ( $w_2$ ).

Экспериментальный анализ проводился со значением этого веса в промежутке от 0.1 до 2, и наилучший результат был найден при  $w_2=0.4$ . Было установлено, что наилучший результат не может быть получен при низких значениях веса из-за малой дальности сканирования дальномера и большой ширины препятствия для данной скорости движения. Это практически не дает шансов на выживание крайним элементам формирования. А при более высоких значениях веса роботы не могут достичь цели, так как слишком сильно стараются удержать форму.

Список использованных источников:

- 1 Al-Husainy, Mohammed Abbas Fadhil, Bassam Al-Shargabi, and Shadi Aljawarneh. "Lightweight cryptography system for IoT devices using DNA." *Computers & Electrical Engineering* 95 (2021): 107418.
- 2 Yassein, Muneer Bani, Shadi Aljawarneh, and Aisha Al-Sadi. "Challenges and features of IoT communications in 5G networks." In *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.
- 3 Yemelyev, A. K., Kh Moldamurat, and R. B. Seksenbaeva. "Development and Implementation of Automated UAV Flight Algorithms for Inertial Navigation Systems." In *2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, pp. 1-5. IEEE, 2021.
- 4 Кзырканов, А.Е., Атанов С., and Aljawarneh S. "Formation control and coordination of swarm robotic systems" In *The 7th International Conference on Engineering amp MIS 2021*, in press.
- 5 Jia Y. Design and implementation for controlling multiple robotic systems by a single operator under random communication delays. In *Rapid Automation: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications 2019* (pp. 337-351). IGI Global.
- 6 La, Hung Manh. "Multi-robot swarm for cooperative scalar field mapping." In *Robotic Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, pp. 208-223. IGI Global, 2020.
- 7 Balch, Tucker, and Ronald C. Arkin. "Behaviour-based formation control for multirobot teams." *IEEE transactions on robotics and automation* 14, no. 6 (1998): 926-939.
- 8 Xu, Dongdong, Xingnan Zhang, Zhangqing Zhu, Chunlin Chen, and Pei Yang. "Behaviour-based formation control of swarm robots." *mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014).
- 9 Raheem, Firas A., and Mustafa M. Badr. "Development of Modified path planning algorithm using artificial potential field (APF) based on PSO for factors optimization." *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)* 37, no. 1 (2017): 316-328.
- 10 Wang, Shun-Min, Ming-Chung Fang, and Cheng-Neng Hwang. "Vertical obstacle avoidance and navigation of autonomous underwater vehicles with  $H_\infty$  controller and the artificial potential field method." *The Journal of Navigation* 72, no. 1 (2019): 207-228.
- 11 Yan, Xun, Dapeng Jiang, Runlong Miao, and Yulong Li. "Formation Control and Obstacle Avoidance Algorithm of a Multi-USV System Based on Virtual Structure and Artificial Potential Field." *Journal of Marine Science and Engineering* 9, no. 2 (2021): 161.
- 12 Wang, Xun, Daibing Zhang, Lincheng Shen, and Jianwei Zhang. "A virtual force approach for cooperative standoff target tracking using multiple robots." In *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 1348-1353. IEEE, 2016.
- 13 Ильичев К.В., Манцеров С.А. Разработка масштабируемой мобильной робототехнической системы роевого взаимодействия // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. №21.
- 14 Hernandez-Martinez, Eduardo Gamaliel, and E. Aranda Bricaire. "Non-collision conditions in multi-agent virtual leader-based formation control." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9, no. 4 (2012): 100.
- 15 Das, Bikramaditya, Bidyadhar Subudhi, and B. Bhusan Pati. "Adaptive sliding mode formation control of multiple underwater robots." *Archives of control Sciences* 24, no. 4 (2014): 515-543.

References:

- 1 Al-Husainy, Mohammed Abbas Fadhil, Bassam Al-Shargabi, and Shadi Aljawarneh. "Lightweight cryptography system for IoT devices using DNA." *Computers & Electrical Engineering* 95 (2021): 107418.
- 2 Yassein, Muneer Bani, Shadi Aljawarneh, and Aisha Al-Sadi. "Challenges and features of IoT communications in 5G networks." In *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.
- 3 Yemelyev, A. K., Kh Moldamurat, and R. B. Seksenbaeva. "Development and Implementation of Automated UAV Flight Algorithms for Inertial Navigation Systems." In *2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, pp. 1-5. IEEE, 2021.
- 4 Кзырканов, А. Е., С. Атанов, and S. Aljawarneh. "Formation control and coordination of swarm robotic systems" In *The 7th International Conference on Engineering amp MIS 2021*, in press.
- 5 Jia Y. Design and implementation for controlling multiple robotic systems by a single operator under random communication delays. In *Rapid Automation: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications 2019* (pp. 337-351). IGI Global.

- 6 La, Hung Manh. "Multi-robot swarm for cooperative scalar field mapping." In *Robotic Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, pp. 208-223. IGI Global, 2020.
- 7 Balch, Tucker, and Ronald C. Arkin. "Behaviour-based formation control for multirobot teams." *IEEE transactions on robotics and automation* 14, no. 6 (1998): 926-939.
- 8 Xu, Dongdong, Xingnan Zhang, Zhangqing Zhu, Chunlin Chen, and Pei Yang. "Behaviour-based formation control of swarm robots." *mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014).
- 9 Raheem, Firas A., and Mustafa M. Badr. "Development of Modified path planning algorithm using artificial potential field (APF) based on PSO for factors optimization." *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)* 37, no. 1 (2017): 316-328.
- 10 Wang, Shun-Min, Ming-Chung Fang, and Cheng-Neng Hwang. "Vertical obstacle avoidance and navigation of autonomous underwater vehicles with  $H_{\infty}$  controller and the artificial potential field method." *The Journal of Navigation* 72, no. 1 (2019): 207-228.
- 11 Yan, Xun, Dapeng Jiang, Runlong Miao, and Yulong Li. "Formation Control and Obstacle Avoidance Algorithm of a Multi-USV System Based on Virtual Structure and Artificial Potential Field." *Journal of Marine Science and Engineering* 9, no. 2 (2021): 161.
- 12 Wang, Xun, Daibing Zhang, Lincheng Shen, and Jianwei Zhang. "A virtual force approach for cooperative standoff target tracking using multiple robots." In *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pp. 1348-1353. IEEE, 2016.
- 13 Il'ichev K.V., Mancеров S.A.(2017) *Razrabotka masshtabiruemoj mobil'noj robototehnicheskoj sistemy roevogo vzaimodejstviya* [Development of scalable mobile robotic system of swarm interaction]. *Vestnik PNIPU. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija. №21.* (In Russian)
- 14 Hernandez-Martinez, Eduardo Gamaliel, and E. Aranda Bricaire. "Non-collision conditions in multi-agent virtual leader-based formation control." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9, no. 4 (2012): 100.
- 15 Das, Bikramaditya, Bidyadhar Subudhi, and B. Bhusan Pati. "Adaptive sliding mode formation control of multiple underwater robots." *Archives of control Sciences* 24, no. 4 (2014): 515-543.