

А.Е. Қызырқанов¹, С.К. Атанов², С. Касымханов¹,
Ә.С. Орынбек¹, К.М.Сансызбай³

¹Astana IT University, Астана, Қазақстан

²Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан

³Академия логистики и транспорта, Алматы, Қазақстан

E-mail: k.sansizbay@alt.edu.kz

АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ И КООРДИНАЦИИ РОЯ МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ

Аннотация. В данной научной статье исследуется движение роя самоорганизованных автономных роботов с помощью алгоритма управления на основе моделей поведения. Координация роботов в системе реализована с помощью метода «лидер-последователь» с виртуальным лидером для повышения отказоустойчивости. Для анализа этого алгоритма было смоделировано движение роя роботов.

Ключевые слова. Рой, роевая робототехника, лидер-последователь, виртуальный лидер, координация, мультиагентная система.

Введение.

Область робототехники стремительно развивается в современной промышленной науке. Она фокусируется на создании автоматизированных машин и их интеграции в человеческое общество, повышая эффективность и производительность как в промышленных условиях, так и в повседневной жизни. Робототехника особенно актуальна в ситуациях, когда вмешательство человека нецелесообразно или опасно, например, в боевых действиях, при исследовании морских глубин или космоса и т.д.

На протяжении всей истории развития робототехники были предложены различные стратегии для расширения возможностей роботов и решения конкретных задач в отрасли. В качестве примеров можно привести разработку систем навигации внутри помещений [1], систем управления транспортными средствами [2], коммуникационных стратегий [3, 4], блокчейна [5] и ресурсосберегающих алгоритмов шифрования для устройств IoT [6].

Один из таких подходов предполагает использование группы из нескольких простых роботов для решения одной сложной задачи. Этот подход принято называть групповой робототехникой.

Важнейшим аспектом в сфере робототехники является разработка алгоритмов, позволяющих автономным мобильным роботам эффективно и результативно взаимодействовать друг с другом. Роевая робототехника, вдохновленная поведением социальных существ, таких как муравьи и пчелы, направлена на решение этой проблемы. Этот подход охватывает не только роботов стандартного размера, но и нанороботов размером менее одного нанометра. Эта методология имеет огромные перспективы, упрощая процесс разработки и позволяя роботам решать проблемы, которые были бы не под силу им самим. Основная сложность заключается в необходимости координации и управления несколькими агентами без центрального координатора, учитывая их ограниченные сенсорные и вычислительные возможности.

Концепция использования ограниченного числа простых систем, таких как роботы или агенты, для решения сложных проблем была в центре внимания исследователей в течение длительного времени. Первые ощутимые результаты в области роевой робототехники появились примерно три десятилетия назад [7]. Сегодня роевая

робототехника находит применение в самых разных областях, включая мобильные роботы, беспилотники, спутники, сенсорные сети, электросети и другие.

В последнее время значительная часть исследований сосредоточена вокруг роевой робототехники, которая является простейшей формой групповой робототехники. В ней участвуют группы или несколько групп однородных роботов, предназначенных для выполнения одной задачи. Когда речь идет о большом количестве роботов, взаимодействие между ними сводится, по сути, к взаимодействию между однородными роботами, поскольку создание разнообразного набора роботов для решения одной задачи считается непрактичным.

Важнейшей задачей в системах роевых роботов является координация действий самих роботов. Это предполагает решение множества проблем, таких как избежание столкновений между роботами или с препятствиями. Решению этих проблем посвящена огромная количества работ [2, 8, 9, 10, 11].

Материалы и методы.

В данной статье рассматривается система роевых роботов, функционирующая на основе децентрализованного управления. В отличие от централизованных систем, где агентами руководит центр управления, в децентрализованных системах каждый робот принимает решения самостоятельно, принимая во внимание сигналы от других роботов или внешних источников, а также свои собственные наблюдения и состояние. Для регулирования движения используется алгоритм основанный на моделях поведения в сочетании с подходом «лидер-последователь», с виртуальным лидером.

А. Алгоритм основанный на моделях поведения

Фундаментальная концепция поведенческого алгоритма заключается в том, что роботы ориентируются по набору заранее определенных моделей поведения. Каждое поведение соответствует конкретной проблеме, которую пытается решить робот. В данном случае требуемые модели поведения роботов могут быть следующими:

- поиск и достижение цели;
- избежание столкновения с препятствием или друг с другом.

Основным преимуществом этого алгоритма является его способность решать несколько проблем одновременно путем создания модели поведения для каждой проблемы.

Классический вариант алгоритма может быть представлен математически с помощью следующего уравнения [11, 13]:

$$\vec{v} = \sum w_i \vec{v}_i \quad (1)$$

Здесь \vec{v}_i – скорость поддержки i -го поведения, а w_i – вес этого поведения, отражающий его относительную важность.

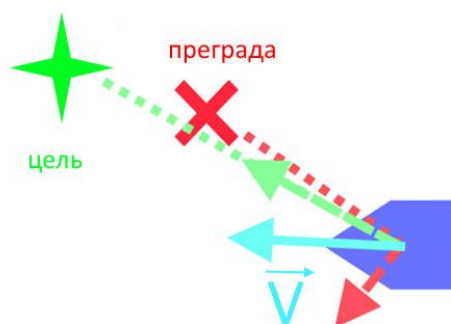


Рисунок 1 – Иллюстрация принципа

В некоторой литературе алгоритм поведения называют методом потенциального поля [13, 14 и 15] или методом виртуальных сил [16]. Фундаментальные принципы этих методов схожи, с единственным отличием – использованием виртуальных сил или потенциальных полей вместо скоростей поведения. Эти силы или поля либо притягиваются к желаемым позициям, либо отталкиваются от нежелательных.

В. Алгоритм Лидер-Последователь

Основная идея подхода «лидер-последователь» заключается в том, что роботы-последователи стараются все время сохранять требуемое расстояние [16]. Представляя лидера и последователей как точки на поверхности и имея позу каждой точки, можно оценить расстояние между ними. Предположим, что позиция последователя – (x_F, y_F) , а позиция лидера – (x_L, y_L) , расстояние рассчитывается как:

$$D = \sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2} \quad (2)$$

Это расстояние можно использовать как диапазон, которого придерживается робот-последователь (рисунок 2).

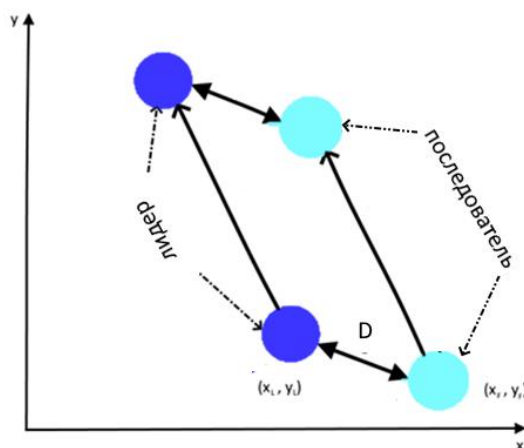


Рисунок 2 – Отображение лидера и последователя как материальные точки.

Если какой-то робот из роя назначается лидером, стабильность роя подвергается серьезному риску: в случае отказа лидера весь рой становится неработоспособным.

Для решения этой проблемы можно ввести концепцию виртуального лидера и регулировать расстояние до него [18, 19]. Положение виртуального лидера может быть определено как центр роя. Во время движения координаты виртуального лидера определяются как среднее значение координат всех роботов в рое.

Описание алгоритма

Роевые роботы начинают движение, обновляя свои векторы скорости через определенные временные интервалы. В течение каждого временного интервала определяется положение виртуального лидера, после чего рассчитывается вектор скорости для каждого желаемого поведения. Затем вычисляется результирующая скорость для каждого робота в рое с использованием скоростей, полученных из уравнения (1).

Положение виртуального лидера оценивается с помощью следующего уравнения:

$$\begin{aligned} x_L &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ y_L &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь N – количество роботов в рое; (x_i, y_i) – текущее местоположение i -го робота; (x_L, y_L) – местоположение виртуального лидера.

Скорость каждого робота рассчитывается с учетом относительной важности этих двух моделей поведения, принимая во внимание текущее состояние робота и его сенсорные данные. Полученная скорость затем используется для обновления положения робота и его перемещения к цели, избегая при этом препятствий.

Скорость поведения для предотвращения столкновения определяется на основе обратной пропорциональности расстояния до ближайшего препятствия.

Скорость достижения цели одина для всех роботов роя и направлена от позиции виртуального лидера к цели.

В конечном итоге, общая скорость может быть вычислена с использованием этих скоростей, согласно уравнению (1):

$$\vec{V}_{\text{итоговое}} = w_1 * \vec{V}_1 + w_2 * \vec{V}_2 + w_3 * \vec{V}_3 \quad (4)$$

В этом уравнении переменные w_1 и \vec{V}_1 соответствуют весу и скорости, соответственно, поведения избегания препятствий. Переменные w_2 и \vec{V}_2 представляют вес и скорость поведения поддержания формации. И, наконец, w_3 и \vec{V}_3 - это вес и скорость, соответственно, связанные с поведением достижения цели.

Полноценный алгоритм изображен на блок-схеме рисунке 3.

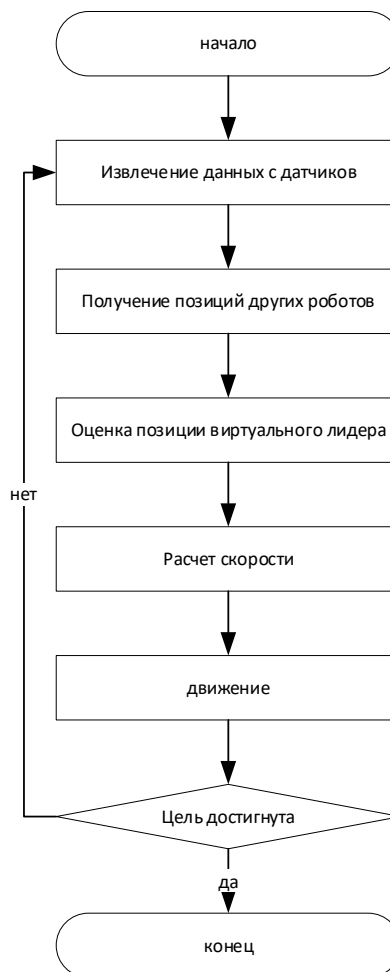


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма для перемещения

Результаты и обсуждения.

Для исследования эффективности алгоритма, представленного в данной статье, были проведены эксперименты с использованием роя из двадцати пяти роботов. Движение роя моделировалось с помощью программного приложения на базе Python, а для визуального представления использовалась библиотека Pygame, как показано на рисунке 4.

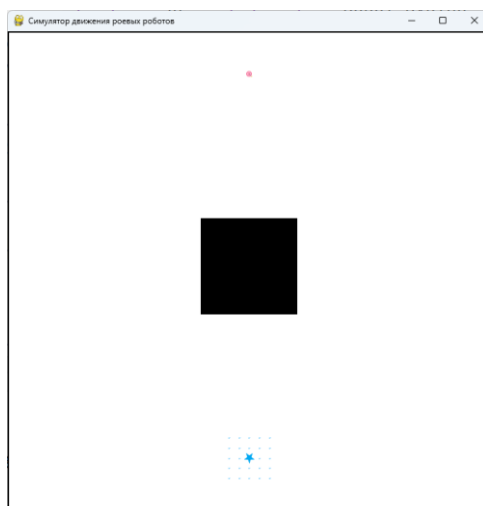


Рисунок 4 – Симулятор движения

Каждый робот в рое оснащен 12 лидарными датчиками с одинаковым радиусом обнаружения. Соседние лидары расположены относительно друг друга под углом 30° градусов, что позволяет охватить все стороны робота, как показано на рисунке 5.

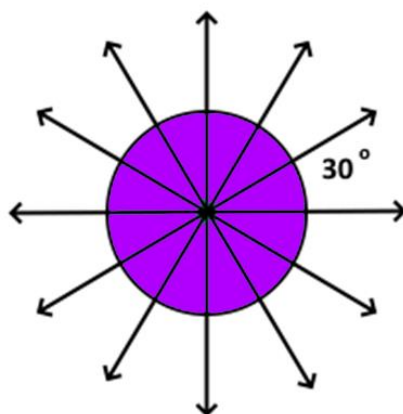


Рисунок 5 – Модель робота в рое

В начале движения роботы в рое образуют квадратную форму, как показано на рисунке 4. Предполагается, что каждый робот знает о положении других роботов и может сообщать друг другу о своем местоположении. Затем роботы движутся к цели, отмеченной красным цветом, избегая препятствий на пути. Задача состоит в том, чтобы все роботы достигли цели, сохраняя строй и избегая препятствий.

Результаты эксперимента, в котором изучалось влияние весовых коэффициентов на поведение по поддержанию строя в группе агентов, показаны на рисунке 6. Эксперимент включал в себя регулировку веса поведения формирования в диапазоне от 0,1 до 5 с шагом 0,1 и наблюдение за количеством агентов, достигших цели без столкновений. Веса,

присвоенные поведению избегания столкновения и движению к цели, были зафиксированы на 5 и 1, соответственно. Результаты демонстрируют положительную корреляцию между весом поведения формирования и количеством агентов, успешно достигших цели без столкновений. Это подчеркивает важность поддержания строя для достижения успеха в выполнении задачи. Следует отметить, что эти результаты относятся только к условиям эксперимента, и для понимания поведения агентов в строю при различных обстоятельствах могут потребоваться дальнейшие исследования.



Рисунок 6 – Изменение числа агентов, достигших целевой позиции без столкновений

Результаты эксперимента, представленные на рисунке 6, показывают, что при увеличении веса поведения формирования от 0,1 до 2 количество роботов, достигших целевой позиции, растет медленными темпами с некоторыми колебаниями. Это говорит о том, что даже небольшие изменения в весе поведения формирования могут оказать значительное влияние на способность роботов достигать целевой позиции без столкновений.

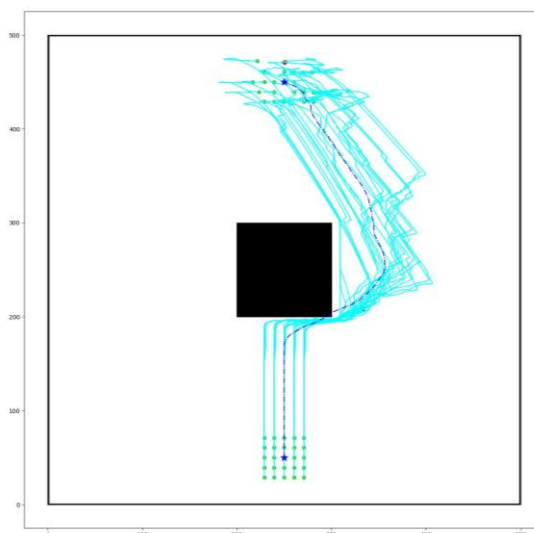


Рисунок 7 – Траектория движения агентов при значениях весов: $w_1=5$, $w_2=0.1$, $w_3=1$

В этом диапазоне наименьшее количество роботов, достигших целевой позиции без столкновений, наблюдается при значениях 0,1 и 0,2. Этот минимум объясняется возникновением хаотического движения среди роботов, что подчеркивает важность

движения в строю. Этот минимум является убедительным доказательством того, что сохранение строя играет решающую роль в обеспечении успешного выполнения задачи. Эти результаты подчеркивают важность нахождения соответствующего баланса между весом поведения, связанного с сохранением строя, и способностью роботов достичь целевой позиции без столкновений.

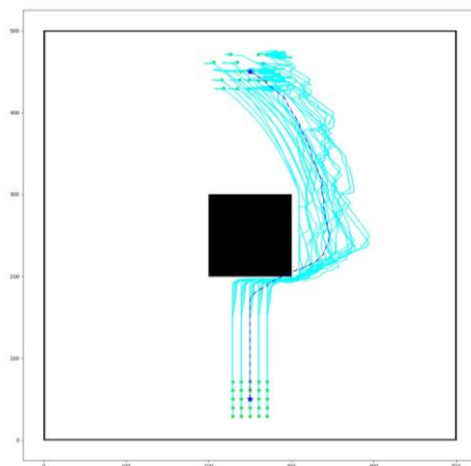


Рисунок 8 – Траектория движения агентов при значениях весов: $w_1=5$, $w_2=0.2$, $w_3=1$

Наилучший результат, при котором все роботы достигли целевой позиции без столкновений, достигается при весе 2 для поведения с сохранением формации.

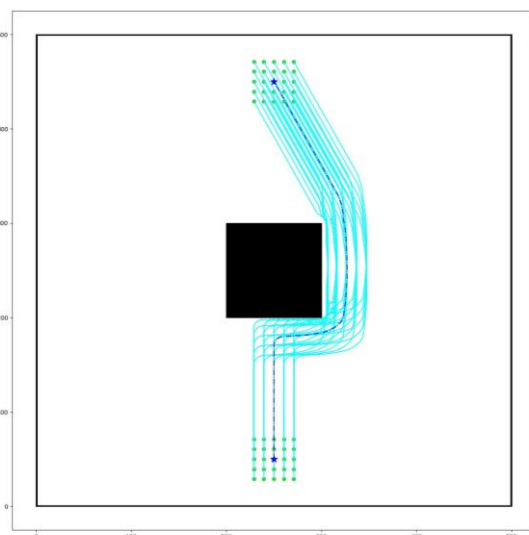


Рисунок 9 – Траектория движения агентов при значениях весов: $w_1=5$, $w_2=2$, $w_3=1$

График на рисунке 6 показывает, что, когда вес поведения по поддержанию формации попадает в диапазон от 2 до 4, наблюдается устойчивое снижение количества роботов, которые достигают своей целевой позиции без столкновений.

Когда вес поведения сохранения формации больше 4, количество роботов, достигающих целевой позиции без столкновений, остается постоянным на уровне 6. Эти результаты показывают, что существует верхний предел веса поведения сохранения формации, который необходимо учитывать при оптимизации роботизированной системы для обеспечения эффективного и успешного выполнения задачи.

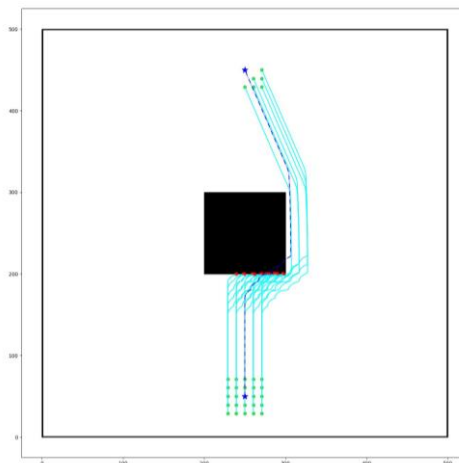


Рисунок 10 – Траектория движения агентов при значениях весов: $w_1=5$, $w_2=4.2$, $w_3=1$

Заклучение.

В данной работе был предложен алгоритм, основанный на модели поведения, для управления движением многоагентных роботизированных систем при сохранении их строя. Для поддержания строя используется подход "лидер-последователь" и концепцию виртуального лидера для повышения устойчивости и снижения зависимости от одного робота-лидера.

Для моделирования движения роя было разработано программное приложение на базе Python, а для визуального представления использовалась библиотека Pygame.

Для исследования взаимосвязи между весом поведения, направленного на сохранение строя, и количеством роботов, достигающих целевой позиции без столкновений, было смоделировано движение мультиагентной робототехнической системы из двадцати пяти машин. Была исследована взаимосвязь между весом поведения по поддержанию формации и количеством роботов, достигающих целевой позиции без столкновений.

Результаты экспериментального анализа показали, что наилучший результат был получен при весе 2,0 для поведения по сохранению строя. Однако как низкие, так и высокие веса привели к снижению производительности из-за ограничения дальности сканирования и ширины препятствий, а также чрезмерной концентрации на поддержании строя, соответственно. Эти результаты дают ценную информацию для будущей оптимизации мультиагентных роботизированных систем для обеспечения эффективного и успешного выполнения задач.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.K. Kereyev, S.K. Atanov, K.P. Aman, Z.K. Kulmagambetova and B.T. Kulzhagarova. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol. 98(8), 1187–1200, 2020
- [2] Baimukhamedov, M.F., Moldamurat, K., Akgul, M.K. Optimal control model of the automobile transport. 1312–1316. 2019, October
- [3] M. B. Yassein, S. Aljawarneh and A. Al-Sadi, "Challenges and features of IoT communications in 5G networks," 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECTA.2017.8251989.
- [4] Mardini, W., Aljawarneh, S. & Al-Abdi, A. Using Multiple RPL Instances to Enhance the Performance of New 6G and Internet of Everything (6G/IoE)-Based Healthcare Monitoring Systems. Mobile Netw Appl 26, 952–968 (2021).

- [5] Al-Husainy MA, Al-Shargabi B, Aljawarneh S. Lightweight cryptography system for IoT devices using DNA. *Computers & Electrical Engineering*. 2021 Oct 1;95:107418.
- [6] Sakhipov, A., Yermaganbetova, M. An educational portal with elements of blockchain technology in higher education institutions of Kazakhstan: opportunities and benefits. *Global Journal of Engineering Education*, vol.24, № 2, p.149 – 154 2022. ISSN:1328-3154
- [7] V. E. Karpov, *Modeli sotsial'nogo povedeniya v gruppovoy robototekhnike [Models of Social Behavior in Group Robotics]*, UBS, 2016, vol. 59, 165–232
- [8] 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.
- [9] Kyzyrkanov, A. E., S. Atanov, and S. Aljawarneh. "Formation control and coordination of swarm robotic systems" In The 7th International Conference on Engineering and MIS 2021.
- [10] A. Kyzyrkanov, S. Atanov and S. Aljawarneh, "Coordination of movement of multiagent robotic systems," 2021 16th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCO53203.2021.9663796.
- [11] Кызырканов, А., Атанов, С., Турсынова, Н. и Альджаварнех, Ш. 2022. КООРДИНАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. «Физико-математические науки». 77, 1 (мар. 2022), 56–63. DOI:<https://doi.org/10.51889/2022-1.1728-7901.07>.
- [12] 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.
- [13] Xu, Dongdong, Xingnan Zhang, Zhangqing Zhu, Chunlin Chen, and Pei Yang. "Behaviour-based formation control of swarm robots." *mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014).
- [14] 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.
- [15] Wang, Shun-Min, Ming-Chung Fang, and Cheng-Neng Hwang. "Vertical obstacle avoidance and navigation of autonomous underwater vehicles with H_∞ controller and the artificial potential field method." *The Journal of Navigation* 72, no. 1 (2019): 207-228.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] П'ичев КВ, Мانتсеров СА. Разработка масштабируемой мобильной робототехнической системы роевого взаимодействия. [Development of a scalable mobile robotic swarm interaction system.] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya.* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems] 2017(21).
- [19] 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.

[20] 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.

Абзал Қызырқанов, докторант, аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, abzzall@gmail.com

Сабыржан Атанов, профессор, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, atanov5@mail.ru

Самат Касымханов, аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, s.kassymkhanov@astanait.edu.kz

Әлібек Орынбек, аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, alibek.orynbek@astanait.edu.kz

Қанибек Сансызбай, PhD, қауымдастырылған профессор, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, k.sansizbay@alt.edu.kz

МОБИЛЬДІ АВТОНОМДЫ РОБОТТАР ТОБЫН БАСҚАРУ ЖӘНЕ ҮЙЛЕСТІРУ АЛГОРИТМІ

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақала мінез-құлық үлгілеріне негізделген басқару алгоритмі арқылы өздігінен ұйымдастырылған автономды роботтар тобының қозғалысын зерттейді. Жүйедегі роботтарды үйлестіру виртуалды көшбасшымен «көшбасшы-ізбасар» әдісі арқылы жүзеге асырылады. Бұл алгоритмді талдау үшін роботтар тобының қозғалысы модельденді.

Түйінді сөздер. Үйір, үйір робототехника, көшбасшы-ізбасар, виртуалды көшбасшы, үйлестіру, көп агенттік жүйе.

Abzal Kyzyrkanov, doctoral student, senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, abzzall@gmail.com

Sabyrzhhan Atanov, professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, atanov5@mail.ru

Samat Kasymkhanov, senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, s.kassymkhanov@astanait.edu.kz

Alibek Orynbek, senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, alibek.orynbek@astanait.edu.kz

Kanibek Sansyzbay, PhD, associate professor, Academy of logistics and transport, Almaty, Kazakhstan, k.sansizbay@alt.edu.kz

ALGORITHM OF COORDINATION OF SWARM OF AUTONOMOUS ROBOTS

Abstract. This research article investigates the movement of a swarm of self-organized autonomous robots through the use of a behavior-based control algorithm. The coordination of the robots within the system is achieved through a leader-follower technique and the addition of a virtual leader approach for improved fail-safety. The movement of a robotic swarm was simulated to analyze this algorithm.

Keywords. Swarm, swarm robotics, leader-follower, virtual leader, coordination, multi-agent system.
