

Петренко Вячеслав Иванович

[Petrenko Vyacheslav Ivanovich],

Тебueva Фариза Биляловна

[Tebueva Fariza Bilyalovna],

Антонов Владимир Олегович

[Antonov Vladimir Olegovich]

УДК 641.87 (075.8)

DOI: 10.37493/2307-910X.2023.1.3

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ ГРУППОВОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ТРУДА

CLASSIFICATION OF TASKS FOR GROUP ROBOTICS FOR METHODS LABOR DIVISION

**ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, Россия,
e-mail: ant.vl.02@gmail.com / Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«North-Caucasus Federal University», Stavropol, Russia, e-mail: ant.vl.02@gmail.com**

Аннотация

В настоящее время интенсивно развиваются технологии и методологические аспекты управления группами мультироботизированных систем. Для полноценного применения децентрализованных групп роботов требуется решение нескольких классов задач, один из которых известен как распределение задач в группе роботов или разделение труда. Алгоритмы разделения труда многообразны и используют в своей основе широкий спектр математических методов, данному вопросу посвящено множество научных работ. Для систематизации методов распределения задач в данной работе проведен анализ и классификация решаемых задач для групповой робототехники. В процессе изучения литературы по данному вопросу был получен пул задач, которые решают те, или иные методы. В результате литературного обзора предлагается введение классификации задач по признаку специфики их выполнения.

Ключевые слова: мультироботизированные системы, классификация задач, групповая робототехника, распределение задач, разделение труда.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (№ МК-300.2022.4 Разработка методов и алгоритмов для системы управления роем БПЛА при выполнении гетерогенных задач)

Abstract

At present, technologies and methodological aspects of managing groups of multirobotized systems intensively developed. The full application of decentralized groups of robots requires the solution of several classes of problems, one of which known as the distribution of tasks in a group of robots or the division of labor. Algorithms for the division of labor are diverse and based on a wide range of mathematical methods, many scientific works are devoted to this issue. To systematize the methods of task distribution, this paper analyzes and classifies the tasks to solve for group robotics. In the process of studying the literature on this issue, a pool of tasks obtained that solve certain methods. As a result of the

literature review, it is proposed to introduce a classification of tasks based on the specifics of their implementation.

Key words: multirobotic systems, task classification, swarm robotics, task allocation, labor division.

Funding: The work was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for young scientists – candidates of Sciences (No. MK-300.2022.4 Development of methods and algorithms for the UAV swarm control system when performing heterogeneous tasks)

Введение

Интенсивное развитие технологий разработки робототехнических комплексов и микроэлектроники привело к миниатюризации роботов и возможности использовать группы мультироботизированных систем (МРС). Под группой мультироботизированных систем (МРС) в статье понимается гомогенная или гетерогенная группа мобильных роботизированных агентов с децентрализованной системой управления для совместного выполнения глобальной целевой задачи. Преимуществами их применения является высокая мобильность, низкая стоимость обслуживания, возможность выполнения множества задач [1].

Для эффективного функционирования группа МРС должна соответствовать свойствам масштабирования (адаптации к изменению количества агентов в процессе выполнения задач), коммуникации (организации связи между агентами внутри группы), координации (согласованности действий во времени и пространстве) и кооперации (коллективном принятии решений) агентов [2]. Достижение данных свойств в групповой робототехнике позволит применять группы роботов в самых различных отраслях народного хозяйства. Широко разработанные методы для систем управления группами МРС на текущем этапе развития позволяют создавать экспериментальные структуры для отработки задач групповой робототехники. Группа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является частным случаем группы МРС и имеет свою специфику, которая заключается в использовании агентов группы в воздушном пространстве.

Математические модели группы МРС обычно являются сложно формализуемыми, поэтому проверка и оптимизация моделей управления агентами затруднительна. Отсутствие методов перехода от поведения конкретного агента к поведению всей группы не позволяет построить эффективную систему управления группами роботов [3]. В связи с этим появляется огромная область задач для управления группами МРС. Одна из этих задач широко известна как задача разделение труда (распределение задач, задача о назначениях).

Решение задачи разделения труда актуально и при использовании групп БПЛА. Основными задачами, решаемыми БПЛА, являются: обзор и разведка территорий, обнаружение опасных объектов или мест возникновения чрезвычайных ситуаций, мониторинг состояния различных объектов, картографирование местности, поиск пострадавших и т.п. Использование БПЛА позволяет выполнять множественные гомогенные и гетерогенные задачи, в том числе при значительном превышении количества задач над количеством агентов.

Основная проблема распределения задач с учетом гетерогенных специализаций задач и агентов заключается в необходимости перебора NP решений типа: агент – задачи. Проблема заключается в сложности вычисления сочетаний $C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!k!}$, где n – количество задач и k количество групп, на которые разбиваются задачи. Максимум такой функции достигается при $k = \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$. Если учесть, что компьютер обладает частотой 1 GHz – это 1000000000 герц, что идентично одному миллиарду операций в секунду, то, к примеру, для вычисления сочетаний 36 задач для 18 групп в худшем случае

потребуется $C_{36}^{18} = 9075135300$ действий и ~ 9 секунд вычислений, для сочетаний 40 задач для 20 групп ~ 138 секунд.

Зависимость между временем вычисления и количеством характеристик x выражается следующим соотношением:

$$t * 10^9 = \left(\frac{\frac{N!}{x!}}{\frac{N!}{2x!} \left(\frac{N}{x} \right)!} \right)^x, \quad (1)$$

где t – общее время вычислений, N – общее количество задач.

Распределение задач между агентами группы БПЛА или агентами группы МРС является актуальной задачей среди исследователей.

Анализ научных исследований по теме (материалы и методы)

Анализ работы [4] позволяет говорить о большом многообразии теоретических методов решения задачи разделения труда, особенно при равном количестве агентов и задач. По популярности можно выделить эвристические алгоритмы [5; 6], аналитические алгоритмы [7-10], модели рыночной экономики [11-13], методы потенциальных полей [14; 15], вероятностные и случайные алгоритмы [16; 17], методы на основе машинного обучения и искусственных нейронных сетей [18; 19], методы нечеткой логики [20; 21], муравьиные алгоритмы [22-27], методы динамического и целочисленного программирования [28-30], генетические алгоритмы [31-33], блокчейн и облачные вычисления [34; 35], смешанные алгоритмы [36], оптимизация роя частиц [37; 38] и др.

Особенно следует выделить работы таких авторов, как V. Kumar [3; 16; 39; 40], Каляев И.А., Капустян С.Г. [1], Пшихопов В.Х. [4], K. Sycara [13; 41; 42], A. Lanzon [43; 44], Dylan A. Shell [8; 45; 46], M. Egerstedt [9; 10], M. Otte [32; 47], S. L. Smith [6; 48; 49], M. Overmars [50-51], Steven M. LaValle and J. Yu [30; 52-54], A. Tsourdos [17; 55-57], Jonathan P. How [58-62], S. Hutchinson [10; 52; 63], S. Rathinam [64], Marco Dorigo [19; 25-27; 65-70] и др.

Недостаточность единой классификации задач по признакам их поведения не позволяет в полной мере систематизировать данные в методах распределения задач. В работах [1-4; 71; 72].

В работах отечественных ученых [1; 2; 4] представлена некоторая таксономия и алгоритмы распределения задач. Большой вклад в развитие отечественных методов распределения задач в группах роботов внесли работы д-ра техн. наук Капустян С.Г. В работе [1] представлены алгоритмы распределения задач, которые способны находить решение:

- для гомогенной группы роботов и гомогенных задач при равном количестве агентов и задач;
- для гетерогенной группы роботов и гетерогенной задач при равном количестве агентов и задач;
- при превышении количества задач над количеством агентов;
- при превышении количества агентов над количеством задач;
- при возможности выполнения задачи одновременно несколькими роботами;
- при изменении количества роботов в процессе выполнения задач;
- в условиях противодействующей окружающей среды;
- с учетом кластеризации агентов по территориальному или функциональному признаку.

В работе [4] распределение задач между роботами представлено термином целераспределение. Приведены некоторые целераспределения в группе роботов. В работе отмечено, что большинство методов распределения задач или целераспределения предназначены для равного количества агентов и задач. При этом

присутствует описание методов целераспределения в недетерминированной и частично детерминированной окружающей среде. Поведенческие подходы, описанные в [73], позволяют обеспечивать управление группой роботов в динамически изменяющихся средах. Создание коопераций роботов внутри группы по типу «ведущий-ведомый» может эффективно решать задачу управления перемещением роботов. Приводится описание алгоритма [5], когда поле задач сильно разряжено. В работе [74] приведено описание метода распределения задач для гетерогенной группы БПЛА в динамических и неопределенных средах в реальном масштабе времени. Итерационный алгоритм распределения целей [4] в условиях неопределенности позволяет обеспечить возможность вносить критерии, которые определяют оценку задачи. В работе [75] задача группового управления реализуется с учетом желаемой структуры строя роботов.

В работах зарубежных авторов встречаются элементы систематизации типов задач для методов разделения труда. Так в работе [71] описана специфика задач, для выполнения которых требуется один или несколько роботов, как в случае гомогенных агентов, так и в случае гетерогенных. В работе [77] подтверждается таксономия работы [71]: однозадачные и многозадачные роботы; задачи с одним роботом и несколькими роботами; а также мгновенное и расширенное по времени назначение. При мгновенном назначении роботы не планируют будущие распределения и занимаются только одной задачей, которую они выполняют в данный момент или за которую они претендуют. При длительном задании роботы имеют больше информации и могут разрабатывать долгосрочные планы, включающие последовательность задач.

Chien, Barrett, Estlin and Rabideau [72] предлагают классификацию задач по приоритетам их выполнения. Предлагаемый сценарий теоретически обоснован на примере симуляции пути перемещения группы марсоходов. В работе [78] представлен метод разделения труда на основе использования технологии блокчейн. В разрезе данной работы интересным представляется вопрос о решении нескольких задач группой MPC одновременно. В работе [79] упоминается таксономия В. Р. Gerkey и М. J. Mataric [71], при этом в работах [80-82] таксономия расширяется и вводятся ограничения на время планирование задач, ограничения приоритетов задач и временные рамки задач.

В работе [83] рассматривается смешанная архитектура задач, когда детерминирована только часть задач, а остальные задачи могут быть обнаружены только в процессе выполнения, на примере случайного обнаружения человека в зоне пожара. В статье [84] решается группа гетерогенных задач, однако их специфика заключается в том, что в одной точке может находиться сразу несколько задач, при этом последовательность их выполнения строго упорядочена. На примере проведения разведки и нанесения точечного ракетного удара. Причем решение о выполнении второй задачи принимается в зависимости от полученных данных. Вводится зависимость задача-подзадача. В работе [85] рассматривается задача разделения труда для наблюдения за подвижными задачами в режиме следования за объектом.

В статье [86] рассматривается метод распределения задач в, в котором приоритет отдается тем задачам, которые являются более срочными, с учетом различных пороговых значений бюджета и стохастических затрат на задачи. В работе [87] распределение задач в группе MPC осуществляется с учетом наличия препятствий в поле задач.

По исследованным источникам предлагается ввести классификацию задач для групповой робототехники.

Классификация задач по теме исследования

Предлагается ввести следующую начальную классификацию задач и агентов, которая будет дополняться научным сообществом. Данная классификация основана на

анализе рассмотренной литературы по применению методов распределения задач в группах MPC и таксономии MPC (рис.1)

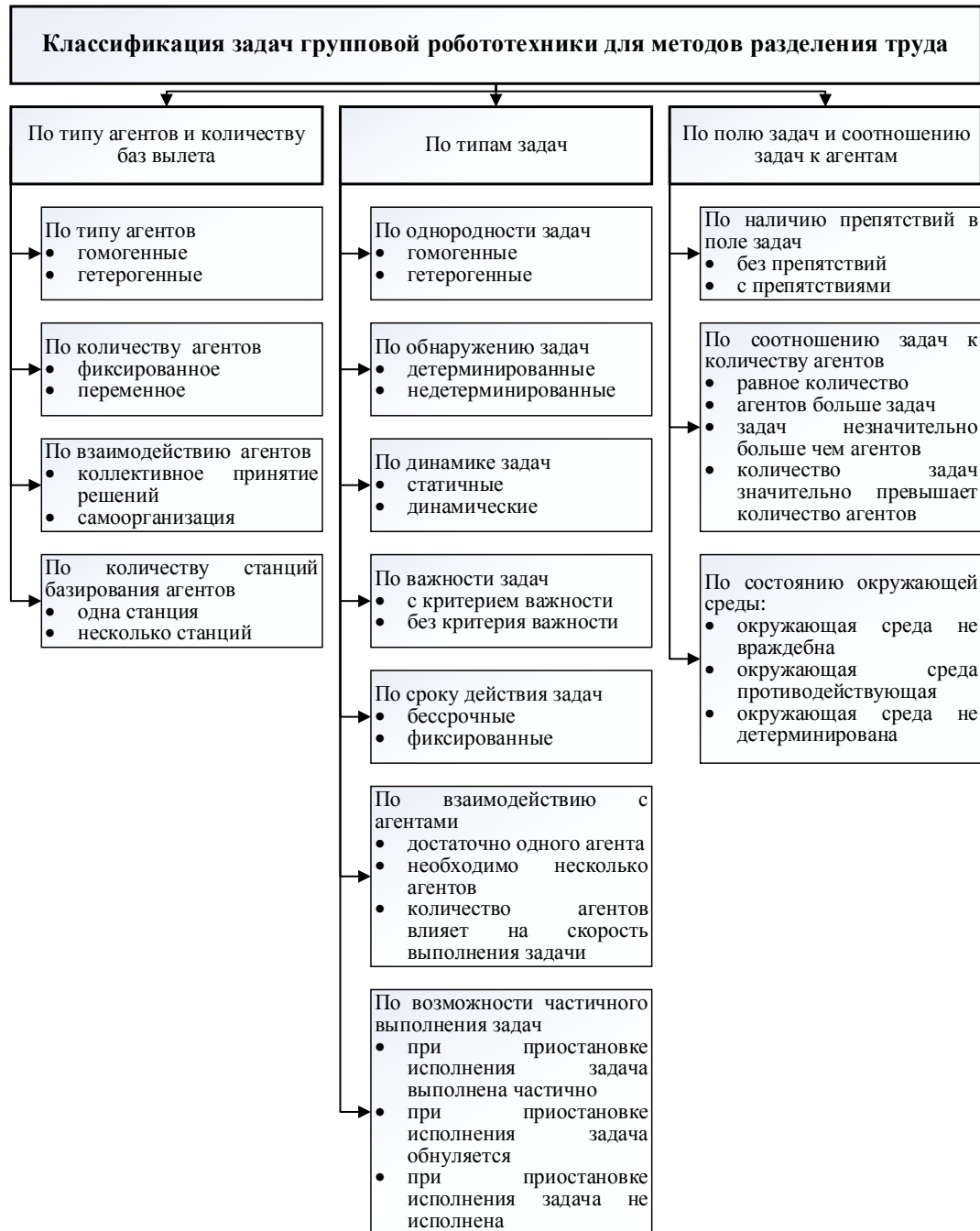


Рисунок 1. Классификация задач групповой робототехники для методов разделения труда

Предлагаемая классификация поможет исследователям в систематизации знаний о существующих методах распределения задач в группах MPC. Далее в работе приводится обобщенная математическая постановка распределения задач и предлагается классификация выполняемых задач для групп MPC.

Обобщённая математическая постановка задачи по разделению труда

Пусть имеется n агентов a_i множества A , задач q_j множества Q и u характеристик k_j множества K . Каждый агент множества A обладает не более $\dot{X}$ характеристиками множества K . Каждая задача множества M обладает не более $\dot{Y}$

характеристиками множества K . Распределение задач заключается в выполнении каждым агентом a_i некоторого количества задач q_j , учитывая наличие у агента a_i , соответствующих характеристик задач m_j таким образом, чтобы были выполнены все задачи множества Q за время t при наличии у агентов некоторого энергетического потенциала e_i .

Схематически поле задач выглядит следующим образом (рис. 2).

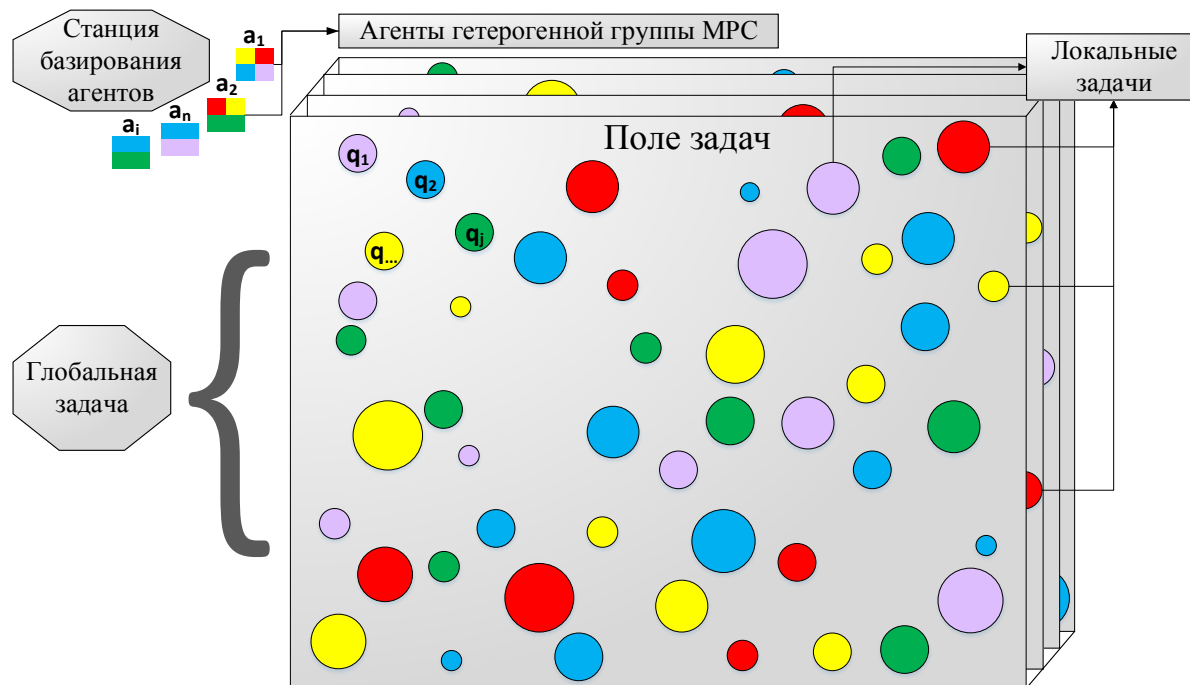


Рисунок 2. Схема входных данных для распределения задач в группе MPC

Математически постановку задачи представим в следующем виде. Множество агентов a_i группы MPC обозначено как $A = [a_1; a_2; \dots; a_i; \dots a_n]$:

$$a_i = [x_i; y_i; z_i; e_i], \quad (2)$$

где $x_i; y_i; z_i$ – текущие координаты агента a_i группы MPC; e_i – энергетический потенциал агента a_i .

Множество задач q_j глобальной задачи $Q = [q_1; q_2; \dots; q_j; \dots q_m]$ представлены как:

$$q_j = [x_j; y_j; z_j; e_j], \quad (3)$$

где $x_j; y_j; z_j$ – координаты задачи; e_j – энергетический запас задачи.

Множество характеристик задач k_j представлено как $K = [k_1; k_2; \dots; k_g]$.

Функция e_{ij} соответствует энергетическим затратам агента a_i на перемещение до задачи q_j .

Множество $B = [b_1; b_2; \dots; b_p; \dots b_u]$ станций базирования агентов группы MPC, где p – номер станции базирования; u – количество станций ($u \geq 1$), характеризующихся координатами:

$$b_p = [x_p; y_p; z_p]. \quad (4)$$

Результатом работы метода распределения задач является отображение R , ставящее в соответствие каждому агенту a_i группы MPC уникальную задачу $q_j \in Q$, возврата на базу $b_p \in B$, или задачу ожидания $\emptyset$:

$$R: A \rightarrow Q \cup B \cup \emptyset. \quad (5)$$

Глобальная задача Q считается выполненной (отражение F), если текущий энергетический запас задач $e_j = 0$, при условии, что все агенты a_i множества A вернулись на станцию базирования

$$F: Q = \sum_{k=1}^K e_k \rightarrow 0; \forall a_i \in A R(a_i) \in B. \quad (6)$$

Данная постановка может изменяться в зависимости от предложенного на рис. 1 типа задач группы МРС.

Заключение

В данной работе проведен анализ типовых задач для методов разделения труда. Описана основная проблема методов распределения задач, приведена обобщенная постановка задачи разделения труда. Рассмотрены работы отечественных и зарубежных авторов по таксономии задач роевой робототехники и условий решаемых задач методами разделения труда. На основе проведенного анализа предложена некоторая классификация задач для роевой робототехники.

Основная классификация задач для методов разделения труда содержит следующие классы: по агентам и базам вылета; по типу задач; по окружающей среде и полю задач. В зависимости от класса рассматриваются следующие подклассы: по типу агентов, по признаку обнаружения задач, по признаку динамики движения задач, по признаку однородности задач, по признаку срочности выполнения задачи, по сроку действия задачи, по возможности взаимодействия задач с агентами, по возможности частичного выполнения задач, по соотношению задач к количеству агентов, по состоянию поля задач, по наличию непроходимых зон в поле задач и др.

В дополнение предлагаемой классификации задач приведена обобщенная постановка задачи разделения труда, которая может меняться от класса агентов, задач и окружающей среды.

Предлагаемая классификация неполна, и будет дополняться в зависимости от возникающих задач, решаемых групповой робототехникой. Основным стимулом для дополнения данной классификации является применение групп роботов в отраслях народного хозяйства. Т.к. на сегодня в мире отсутствует реальное коммерческое приложения роя роботов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
2. Zakiev, Aufar, Tsoy, Tatyana, Magid, Evgeni (2018). Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18-22, 2018, Proceedings. 10.1007/978-3-319-99582-3_30.
3. S. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen and V. Kumar, "A Survey on Aerial Swarm Robotics," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 837-855, Aug. 2018, doi: 10.1109/TRO.2018.2857475.
4. Pshikhopov V.Kh., Soloviev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Group control of moving objects in uncertain environments / Ed. V.Kh. Pshikhopova. – М.: FIZMATLIT, 2015. – 305 p.
5. Kowalczyk W. Target Assignment Strategy for Scattered Robots Building Formation // Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Robot Motion and Control. Poland, Poznan, 2002. – P. 181–185.
6. N. Mathew, S. L. Smith and S. L. Waslander, "Planning Paths for Package Delivery in Heterogeneous Multirobot Teams," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 4, pp. 1298-1308, Oct. 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2461213.
7. Zavlanos M., Spesivtsev L., Pappas G. A distributed auction algorithm for the assignment problem // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. – 2008. – P. 1212–1217.
8. C. Nam and D. A. Shell, "Assignment Algorithms for Modeling Resource Contention in Multirobot Task Allocation," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 3, pp. 889-900, July 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2415514.

9. S. Chopra, G. Notarstefano, M. Rice and M. Egerstedt, "A Distributed Version of the Hungarian Method for Multirobot Assignment," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 4, pp. 932-947, Aug. 2017, doi: 10.1109/TRO.2017.2693377.
10. G. Notomista, S. Mayya, S. Hutchinson and M. Egerstedt, "An Optimal Task Allocation Strategy for Heterogeneous Multi-Robot Systems," 2019 18th European Control Conference (ECC), 2019, pp. 2071-2076, doi: 10.23919/ECC.2019.8795895.
11. Zavlanos M., Spesivtsev L., Pappas G. A distributed auction algorithm for the assignment problem // *Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control*. – 2008. – P. 1212–1217.
12. Bertsekas D., Castanon D. Parallel synchronous and asynchronous implementations of the auction algorithm // *Intern. J. of Parallel Computing*. – 1991. – Vol. 17. – P. 707–732.
13. L. Luo, N. Chakraborty and K. Sycara, "Provably-Good Distributed Algorithm for Constrained Multi-Robot Task Assignment for Grouped Tasks," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 1, pp. 19-30, Feb. 2015, doi: 10.1109/TRO.2014.2370831.
14. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with local coordination // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2008. – Vol. 24, No. 1. – P. 232–242.
15. Zavlanos M., Pappas G. Sensor-based dynamic assignment in distributed motion planning // *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. – 2007. – P. 3333–3338.
16. S. Berman, A. Halasz, M. A. Hsieh and V. Kumar, "Optimized Stochastic Policies for Task Allocation in Swarms of Robots," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 4, pp. 927-937, Aug. 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2024997.
17. R. Liu, M. Seo, B. Yan and A. Tsourdos, "Decentralized task allocation for multiple UAVs with task execution uncertainties," 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2020, pp. 271-278, doi: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213989.
18. Mouton H., Roodt J., Roux H. Applying Reinforcement Learning to the Weapon Assignment Problem in Air Defense // *Scientia Militaria, South African J. of Military Studies*. – 2011. – Vol. 39, No. 2. – P. 1–15.
19. H. Zhao, M. Dorigo and M. Allwright, "General Dynamic Neural Networks for the Adaptive Tuning of an Omni-Directional Drive System for Reactive Swarm Robotics," 2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2021, pp. 79-84, doi: 10.1109/MMAR49549.2021.9528468.
20. Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model // *Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management*. – 2013. – Vol. 2, № 6. – P. 279–289.
21. T. Wei, H. Yongjiang, Z. Yuefei, L. Wenguang and Z. Xiaomeng, "Multi-UAV Task Allocation Based on Type Mamdani Fuzzy Logic," 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII), 2021, pp. 184-187, doi: 10.1109/ISMII52409.2021.00046.
22. Yuan M., Ling M-X., Zeng Q-S. An AntColony Algorithm Based on Pheromone Declining for Solving the WTA Problem // *Intern. J. on Computer Simulation*. – 2008. – Vol. 25, No. 2. – P. 23–25.
23. D. Payton, M. Daily, R. Estowski, M. Howard, and C. Lee, "Pheromone robotics," *Auton. Robot.*, vol. 11, no. 3, pp. 319–324, Nov. 2001.
24. D. Payton, R. Estowski, and M. Howard, "Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones," in *Proc. 1st Int. Workshop Swarm Robotics at SAB 2004, LNCS vol. 3342*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005, pp. 45–57.
25. S. Oliveira, M. S. Hussin, A. Roli, M. Dorigo and T. Stützle, "Analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP," 2017 IEEE

Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2017, pp. 1734-1741, doi: 10.1109/CEC.2017.7969511.

26. T. Liao, K. Socha, M. A. Montes de Oca, T. Stützle and M. Dorigo, "Ant Colony Optimization for Mixed-Variable Optimization Problems," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 18, no. 4, pp. 503-518, Aug. 2014, doi: 10.1109/TEVC.2013.2281531.

27. A. Brutschy, A. Scheidler, E. Ferrante, M. Dorigo and M. Birattari, "Can ants inspire robots?" Self-organized decision making in robotic swarms," 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 4272-4273, doi: 10.1109/IROS.2012.6386273.

28. Murphy R. Target-Based Weapon Target Assignment Problems // *Nonlinear Assignment Problems: Algorithms and Applications*. Kluwer Academic Publishers. – 1999. – Vol. 7. – P. 39–53.

29. Sikanen T. Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming // *Independent research projects in applied mathematics*. – 2008. – 32 p.

30. J. Yu and S. M. LaValle, "Optimal Multirobot Path Planning on Graphs: Complete Algorithms and Effective Heuristics," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 5, pp. 1163-1177, Oct. 2016, doi: 10.1109/TRO.2016.2593448.

31. Shimaa T., Rasmussena S., Sparksa A., Passino K. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms // *Computers & Operations Research* 33. – 2006. – P. 3252–3269.

32. R. Patel, E. Rudnick-Cohen, S. Azarm, M. Otte, H. Xu and J. W. Herrmann, "Decentralized Task Allocation in Multi-Agent Systems Using a Decentralized Genetic Algorithm," 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, pp. 3770-3776, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197314.

33. M. Soleimanpour-Moghadam and H. Nezamabadi-Pour, "Discrete Genetic Algorithm for Solving Task Allocation of Multi-robot Systems," 2020 4th Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), 2020, pp. 006-009, doi: 10.1109/CSIEC49655.2020.9237316.

34. W. Husheng, L. Hao and X. Renbin, "A blockchain bee colony double inhibition labor division algorithm for spatio-temporal coupling task with application to UAV swarm task allocation," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 1180-1199, Oct. 2021, doi: 10.23919/JSEE.2021.000101.

35. Y. Msala, M. Hamlich and A. Mouchtachi, "A new Robust Heterogeneous Multi-Robot Approach Based on Cloud for Task Allocation," 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICOA.2019.8727618.

36. Zhang J., Wang X., Xu C. ACGA Algorithm of Solving Weapon Target Assignment Problem // *Open J. of Applied Science*. – 2012. – Vol. 2, No. 4B. – P. 74-77.

37. X. Kong, Y. Gao, T. Wang, J. Liu and W. Xu, "Multi-robot Task Allocation Strategy based on Particle Swarm Optimization and Greedy Algorithm," 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2019, pp. 1643-1646, doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785472.

38. C. Wei, Z. Ji and B. Cai, "Particle Swarm Optimization for Cooperative Multi-Robot Task Allocation: A Multi-Objective Approach," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2530-2537, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2972894.

39. S. Mayya, D. S. D'antonio, D. Saldaña and V. Kumar, "Resilient Task Allocation in Heterogeneous Multi-Robot Systems," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1327-1334, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3057559.

40. D. Panagou, M. Turpin and V. Kumar, "Decentralized Goal Assignment and Safe Trajectory Generation in Multirobot Networks via Multiple Lyapunov Functions," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 8, pp. 3365-3380, Aug. 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2946333.

41. L. Luo, N. Chakraborty and K. Sycara, "Distributed Algorithms for Multirobot Task Assignment With Task Deadline Constraints," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 876-888, July 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2438032.
42. P. Velagapudi, K. Sycara and P. Scerri, "Decentralized prioritized planning in large multirobot teams," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 4603-4609, doi: 10.1109/IROS.2010.5649438.
43. J. Hu, P. Bhowmick and A. Lanzon, "Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 8, pp. 8269-8274, Aug. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3093157.
44. J. Hu, P. Bhowmick, I. Jang, F. Arvin and A. Lanzon, "A Decentralized Cluster Formation Containment Framework for Multirobot Systems," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 6, pp. 1936-1955, Dec. 2021, doi: 10.1109/TRO.2021.3071615.
45. D. A. Shell and M. J. Mataric, "On foraging strategies for large-scale multi-robot systems," 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 2717-2723, doi: 10.1109/IROS.2006.281996.
46. C. Nam and D. A. Shell, "Assignment algorithms for modeling resource contention and interference in multi-robot task-allocation," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp. 2158-2163, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907156.
47. M. Otte, M. Kuhlman and D. Sofge, "Multi-robot task allocation with auctions in harsh communication environments," 2017 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS), 2017, pp. 32-39, doi: 10.1109/MRS.2017.8250928.
48. A. Ulusoy, S. L. Smith, X. C. Ding and C. Belta, "Robust multi-robot optimal path planning with temporal logic constraints," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012, pp. 4693-4698, doi: 10.1109/ICRA.2012.6224792.
49. S. L. Smith, J. Tůmová, C. Belta and D. Rus, "Optimal path planning under temporal logic constraints," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 3288-3293, doi: 10.1109/IROS.2010.5650896.
50. J. P. van den Berg and M. H. Overmars, "Prioritized motion planning for multiple robots," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 430-435, doi: 10.1109/IROS.2005.1545306.
51. A. Kamphuis and M. H. Overmars, "Motion planning for coherent groups of entities," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, 2004, pp. 3815-3822 Vol.4, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1308863.
52. S. M. LaValle and S. A. Hutchinson, "Optimal motion planning for multiple robots having independent goals," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 6, pp. 912-925, Dec. 1998, doi: 10.1109/70.736775.
53. J. Yu and S. M. LaValle, "Planning optimal paths for multiple robots on graphs," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 3612-3617, doi: 10.1109/ICRA.2013.6631084.
54. J. Yu, S. M. LaValle and D. Liberzon, "Rendezvous Without Coordinates," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 2, pp. 421-434, Feb. 2012, doi: 10.1109/TAC.2011.2158172.
55. I. Jang, H. Shin and A. Tsourdos, "Anonymous Hedonic Game for Task Allocation in a Large-Scale Multiple Agent System," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 6, pp. 1534-1548, Dec. 2018, doi: 10.1109/TRO.2018.2858292.
56. H. -S. Shin, C. Leboucher and A. Tsourdos, "Resource allocation with cooperative path planning for multiple UAVs," Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control, 2012, pp. 298-303, doi: 10.1109/CONTROL.2012.6334646.

57. P. Segui-Gasco, Hyo-Sang Shin, A. Tsourdos and V. J. Seguí, "Decentralised submodular multi-robot Task Allocation," 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 2829-2834, doi: 10.1109/IROS.2015.7353766.
58. Y. Chen, M. Cutler and J. P. How, "Decoupled multiagent path planning via incremental sequential convex programming," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 5954-5961, doi: 10.1109/ICRA.2015.7140034.
59. A. K. Whitten, H. Choi, L. B. Johnson and J. P. How, "Decentralized task allocation with coupled constraints in complex missions," Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011, pp. 1642-1649, doi: 10.1109/ACC.2011.5990917.
60. V. R. Desaraju and J. P. How, "Decentralized path planning for multi-agent teams in complex environments using rapidly-exploring random trees," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 4956-4961, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980392.
61. S. S. Ponda, L. B. Johnson and J. P. How, "Distributed chance-constrained task allocation for autonomous multi-agent teams," 2012 American Control Conference (ACC), 2012, pp. 4528-4533, doi: 10.1109/ACC.2012.6315626.
62. H. Choi, A. K. Whitten and J. P. How, "Decentralized task allocation for heterogeneous teams with cooperation constraints," Proceedings of the 2010 American Control Conference, 2010, pp. 3057-3062, doi: 10.1109/ACC.2010.5530496.
63. G. Neville, A. Messing, H. Ravichandar, S. Hutchinson and S. Chernova, "An Interleaved Approach to Trait-Based Task Allocation and Scheduling," 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021, pp. 1507-1514, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9636569.
64. S. K. K. Hari, A. Nayak and S. Rathinam, "An Approximation Algorithm for a Task Allocation, Sequencing and Scheduling Problem Involving a Human-Robot Team," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 2146-2153, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2970689.
65. M. Dorigo et al., "Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 20, no. 4, pp. 60-71, Dec. 2013, doi: 10.1109/MRA.2013.2252996.
66. M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Coloni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), vol. 26, no. 1, pp. 29-41, Feb. 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
67. M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, April 1997, doi: 10.1109/4235.585892.
68. F. Mondada, L. M. Gambardella, D. Floreano, S. Nolfi, J. -. Deneuborg and M. Dorigo, "The cooperation of swarm-bots: physical interactions in collective robotics," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 12, no. 2, pp. 21-28, June 2005, doi: 10.1109/MRA.2005.1458313.
69. S. Nouyan, R. Gross, M. Bonani, F. Mondada and M. Dorigo, "Teamwork in Self-Organized Robot Colonies," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 13, no. 4, pp. 695-711, Aug. 2009, doi: 10.1109/TEVC.2008.2011746.
70. M. A. Montes de Oca, J. Pena, T. Stutzle, C. Pinciroli and M. Dorigo, "Heterogeneous particle swarm optimizers," 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2009, pp. 698-705, doi: 10.1109/CEC.2009.4983013.
71. B. P. Gerkey and M. J. Mataric. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. International Journal of Robotics Research, 23(9), 2004.
72. Chien, S., Barrett, A., Estlin, T., & Rabideau, G. A Comparison of Coordinated Planning Methods for Cooperating Rovers. In International Conference on Autonomous Agents (Agents 2000), Barcelona, Spain, June, 2000.

73. Yamada S., Saito J. Adaptive Action Selection Without Explicit Communication for Multirobot Box-Pushing // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews. – 2001. – Vol. 31, No. 3. – P. 398-404.
74. Bertuccelli L., Choi H-L., Cho P., How J. Real-time Multi-UAV Task Assignment in Dynamic and Uncertain Environments // American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois, USA, 10 – 13 August, 2009. AIAA-2009-5776. – P. 1–16.
75. Иванов Д.Я. Решение строевой задачи в группе беспилотных квадрокоптеров // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №8. – С. 138– 147.
76. Капустян С.Г. Методы и алгоритмы коллективного управления роботами при их групповом управлении: дис. ... д-ра. техн. наук 05.02.05 / Капустян С.Г. – Таганрог, 2008. – 376 с.
77. Dias, M. & Zlot, Robert & Kalra, Nidhi & Stentz, Anthony. (2006). Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis. Proceedings of the IEEE. 94. 1257 - 1270. 10.1109/JPROC.2006.876939.
78. W. Husheng, L. Hao and X. Renbin, "A blockchain bee colony double inhibition labor division algorithm for spatio-temporal coupling task with application to UAV swarm task allocation," in Journal of Systems Engineering and Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 1180-1199, Oct. 2021, doi: 10.23919/JSEE.2021.000101.
79. F. Zitouni, S. Harous and R. Maamri, "A Distributed Approach to the Multi-Robot Task Allocation Problem Using the Consensus-Based Bundle Algorithm and Ant Colony System," in IEEE Access, vol. 8, pp. 27479-27494, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971585.
80. GA Korsah, A. Stentz и MB Dias, «Всеобъемлющая таксономия для распределения задач с несколькими роботами», Int. Дж. Робот. Рез., том. 32, нет. 12, стр. 1495–1512, октябрь 2013 г.
81. G. A. Korsah, A. Stentz and M. B. Dias, "A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation", Int. J. Robot. Res., vol. 32, no. 12, pp. 1495-1512, Oct. 2013.
82. J. Guerrero, G. Oliver, and O. Valero, "Multi-robot coalitions formation with deadlines: Complexity analysis and solutions," PLoS ONE, vol. 12, no. 1, pp. 1–26, Jan. 2017.
83. E. Nunes, M. Manner, H. Mitiche and M. Gini, "A taxonomy for task allocation problems with temporal and ordering constraints", Robot. Auto. Syst., vol. 90, pp. 55-70, Apr. 2017.
84. M. Zhao and D. Li, "Collaborative Task Allocation of Heterogeneous Multi-Unmanned Platform Based on a Hybrid Improved Contract Net Algorithm," in IEEE Access, vol. 9, pp. 78936-78946, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084238.
85. H. Jiang and Y. Liang, "Online Path Planning of Autonomous UAVs for Bearing-Only Standoff Multi-Target Following in Threat Environment," in IEEE Access, vol. 6, pp. 22531-22544, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824849.
86. Kan, X., Thayer, T., Carpin, S., & Karydis, K. (2021). Task Planning on Stochastic Aisle Graphs for Precision Agriculture. UC Merced. Report #: 2. <http://dx.doi.org/10.1109/LRA.2021.3062337>.
87. H. Liu, Q. Chen, N. Pan, Y. Sun and Y. Yang, "Three-Dimensional Mountain Complex Terrain and Heterogeneous Multi-UAV Cooperative Combat Mission Planning," in IEEE Access, vol. 8, pp. 197407-197419, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033408.

REFERENCES

1. Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov. – М.: FIZMATLIT, 2009. – 280 s.

2. Zakiev, Aufar, Tsoy, Tatyana, Magid, Evgeni. (2018). Swarm Robotics: Remarks on Terminology and Classification: Third International Conference, ICR 2018, Leipzig, Germany, September 18-22, 2018, Proceedings. 10.1007/978-3-319-99582-3_30.
3. S. Chung, A. A. Paranjape, P. Dames, S. Shen and V. Kumar, "A Survey on Aerial Swarm Robotics," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 837-855, Aug. 2018, doi: 10.1109/TRO.2018.2857475.
4. Pshikhopov V.Kh., Soloviev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Group control of moving objects in uncertain environments / Ed. V.Kh. Pshikhopova. – M.: FIZMATLIT, 2015. – 305 p.
5. Kowalczyk W. Target Assignment Strategy for Scattered Robots Building Formation // Proc. of the 3rd Intern. Workshop on Robot Motion and Control. Poland, Poznan, 2002. – P. 181–185.
6. N. Mathew, S. L. Smith and S. L. Waslander, "Planning Paths for Package Delivery in Heterogeneous Multirobot Teams," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 4, pp. 1298-1308, Oct. 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2461213.
7. Zavlanos M., Spesivtsev L., Pappas G. A distributed auction algorithm for the assignment problem // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. – 2008. – P. 1212–1217.
8. C. Nam and D. A. Shell, "Assignment Algorithms for Modeling Resource Contention in Multirobot Task Allocation," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, no. 3, pp. 889-900, July 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2415514.
9. S. Chopra, G. Notarstefano, M. Rice and M. Egerstedt, "A Distributed Version of the Hungarian Method for Multirobot Assignment," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 33, no. 4, pp. 932-947, Aug. 2017, doi: 10.1109/TRO.2017.2693377.
10. G. Notomista, S. Mayya, S. Hutchinson and M. Egerstedt, "An Optimal Task Allocation Strategy for Heterogeneous Multi-Robot Systems," 2019 18th European Control Conference (ECC), 2019, pp. 2071-2076, doi: 10.23919/ECC.2019.8795895.
11. Zavlanos M., Spesivtsev L., Pappas G. A distributed auction algorithm for the assignment problem // Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control. – 2008. – P. 1212–1217.
12. Bertsekas D., Castanon D. Parallel synchronous and asynchronous implementations of the auction algorithm // Intern. J. of Parallel Computing. – 1991. – Vol. 17. – P. 707–732.
13. L. Luo, N. Chakraborty and K. Sycara, "Provably-Good Distributed Algorithm for Constrained Multi-Robot Task Assignment for Grouped Tasks," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 1, pp. 19-30, Feb. 2015, doi: 10.1109/TRO.2014.2370831.
14. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with local coordination // IEEE Transactions on Robotics. – 2008. – Vol. 24, No. 1. – P. 232–242.
15. Zavlanos M., Pappas G. Sensor-based dynamic assignment in distributed motion planning // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. – 2007. – P. 3333–3338.
16. S. Berman, A. Halasz, M. A. Hsieh and V. Kumar, "Optimized Stochastic Policies for Task Allocation in Swarms of Robots," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 4, pp. 927-937, Aug. 2009, doi: 10.1109/TRO.2009.2024997.
17. R. Liu, M. Seo, B. Yan and A. Tsourdos, "Decentralized task allocation for multiple UAVs with task execution uncertainties," 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2020, pp. 271-278, doi: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213989.
18. Mouton H., Roodt J., Roux H. Applying Reinforcement Learning to the Weapon Assignment Problem in Air Defense // Scientia Militaria, South African J. of Military Studies. – 2011. – Vol. 39, No. 2. – P. 1–15.

19. H. Zhao, M. Dorigo and M. Allwright, "General Dynamic Neural Networks for the Adaptive Tuning of an Omni-Directional Drive System for Reactive Swarm Robotics," 2021 25th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2021, pp. 79-84, doi: 10.1109/MMAR49549.2021.9528468.
20. Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model // Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management. – 2013. – Vol. 2, No. 6. – P. 279–289.
21. T. Wei, H. Yongjiang, Z. Yuefei, L. Wenguang and Z. Xiaomeng, "Multi-UAV Task Allocation Based on Type Mamdani Fuzzy Logic," 2021 7th International Symposium on Mechatronics and Industrial Informatics (ISMII), 2021, pp. 184-187, doi: 10.1109/ISMII52409.2021.00046.
22. Yuan M., Ling M-X., Zeng Q-S. An AntColony Algorithm Based on Pheromone Declining for Solving the WTA Problem // Intern. J. on Computer Simulation. – 2008. – Vol. 25, No. 2. – P. 23–25.
23. D. Payton, M. Daily, R. Estowski, M. Howard, and C. Lee, "Pheromone robotics," Auton. Robot., vol. 11, no. 3, pp. 319–324, Nov. 2001.
24. D. Payton, R. Estkowski, and M. Howard, "Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones," in Proc. 1st Int. Workshop Swarm Robotics at SAB 2004, LNCS vol. 3342. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005, pp. 45–57.
25. S. Oliveira, M. S. Hussin, A. Roli, M. Dorigo and T. Stützle, "Analysis of the population-based ant colony optimization algorithm for the TSP and the QAP," 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2017, pp. 1734-1741, doi: 10.1109/CEC.2017.7969511.
26. T. Liao, K. Socha, M. A. Montes de Oca, T. Stützle and M. Dorigo, "Ant Colony Optimization for Mixed-Variable Optimization Problems," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 18, no. 4, pp. 503-518, Aug. 2014, doi: 10.1109/TEVC.2013.2281531.
27. A. Brutschy, A. Scheidler, E. Ferrante, M. Dorigo and M. Birattari, "'Can ants inspire robots?' Self-organized decision making in robotic swarms," 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012, pp. 4272-4273, doi: 10.1109/IROS.2012.6386273.
28. Murphy R. Target-Based Weapon Target Assignment Problems // Nonlinear Assignment Problems: Algorithms and Applications. Kluwer Academic Publishers. – 1999. – Vol. 7. – P. 39–53.
29. Sikanen T. Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming // Independent research projects in applied mathematics. – 2008. – 32 p.
30. J. Yu and S. M. LaValle, "Optimal Multirobot Path Planning on Graphs: Complete Algorithms and Effective Heuristics," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 32, no. 5, pp. 1163-1177, Oct. 2016, doi: 10.1109/TRO.2016.2593448.
31. Shima T., Rasmussen S., Sparks A., Passino K. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms // Computers & Operations Research 33. – 2006. – P. 3252–3269.
32. R. Patel, E. Rudnick-Cohen, S. Azarm, M. Otte, H. Xu and J. W. Herrmann, "Decentralized Task Allocation in Multi-Agent Systems Using a Decentralized Genetic Algorithm," 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, pp. 3770-3776, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197314.
33. M. Soleimanpour-Moghadam and H. Nezamabadi-Pour, "Discrete Genetic Algorithm for Solving Task Allocation of Multi-robot Systems," 2020 4th Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), 2020, pp. 006-009, doi: 10.1109/CSIEC49655.2020.9237316.
34. W. Husheng, L. Hao and X. Renbin, "A blockchain bee colony double inhibition labor division algorithm for spatio-temporal coupling task with application to UAV

swarm task allocation," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 1180-1199, Oct. 2021, doi: 10.23919/JSEE.2021.000101.

35. Y. Msala, M. Hamlich and A. Mouchtachi, "A new Robust Heterogeneous Multi-Robot Approach Based on Cloud for Task Allocation," 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICOA.2019.8727618.

36. Zhang J., Wang X., Xu C. ACGA Algorithm of Solving Weapon Target Assignment Problem // *Open J. of Applied Science*. – 2012. – Vol. 2, No. 4B. – P. 74-77.

37. X. Kong, Y. Gao, T. Wang, J. Liu and W. Xu, "Multi-robot Task Allocation Strategy based on Particle Swarm Optimization and Greedy Algorithm," 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2019, pp. 1643-1646, doi: 10.1109/ITAIC.2019.8785472.

38. C. Wei, Z. Ji and B. Cai, "Particle Swarm Optimization for Cooperative Multi-Robot Task Allocation: A Multi-Objective Approach," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 2530-2537, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2972894.

39. S. Mayya, D. S. D'antonio, D. Saldaña and V. Kumar, "Resilient Task Allocation in Heterogeneous Multi-Robot Systems," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 1327-1334, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3057559.

40. D. Panagou, M. Turpin and V. Kumar, "Decentralized Goal Assignment and Safe Trajectory Generation in Multirobot Networks via Multiple Lyapunov Functions," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 65, no. 8, pp. 3365-3380, Aug. 2020, doi: 10.1109/TAC.2019.2946333.

41. L. Luo, N. Chakraborty and K. Sycara, "Distributed Algorithms for Multirobot Task Assignment With Task Deadline Constraints," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 876-888, July 2015, doi: 10.1109/TASE.2015.2438032.

42. P. Velagapudi, K. Sycara and P. Scerri, "Decentralized prioritized planning in large multirobot teams," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 4603-4609, doi: 10.1109/IROS.2010.5649438.

43. J. Hu, P. Bhowmick and A. Lanzon, "Group Coordinated Control of Networked Mobile Robots With Applications to Object Transportation," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 8, pp. 8269-8274, Aug. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3093157.

44. J. Hu, P. Bhowmick, I. Jang, F. Arvin and A. Lanzon, "A Decentralized Cluster Formation Containment Framework for Multirobot Systems," in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 37, no. 6, pp. 1936-1955, Dec. 2021, doi: 10.1109/TRO.2021.3071615.

45. D. A. Shell and M. J. Mataric, "On foraging strategies for large-scale multi-robot systems," 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 2717-2723, doi: 10.1109/IROS.2006.281996.

46. C. Nam and D. A. Shell, "Assignment algorithms for modeling resource contention and interference in multi-robot task-allocation," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pp. 2158-2163, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907156.

47. M. Otte, M. Kuhlman and D. Sofge, "Multi-robot task allocation with auctions in harsh communication environments," 2017 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS), 2017, pp. 32-39, doi: 10.1109/MRS.2017.8250928.

48. A. Ulusoy, S. L. Smith, X. C. Ding and C. Belta, "Robust multi-robot optimal path planning with temporal logic constraints," 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012, pp. 4693-4698, doi: 10.1109/ICRA.2012.6224792.

49. S. L. Smith, J. Tůmová, C. Belta and D. Rus, "Optimal path planning under temporal logic constraints," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010, pp. 3288-3293, doi: 10.1109/IROS.2010.5650896.

50. J. P. van den Berg and M. H. Overmars, "Prioritized motion planning for multiple robots," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005, pp. 430-435, doi: 10.1109/IROS.2005.1545306.
51. A. Kamphuis and M. H. Overmars, "Motion planning for coherent groups of entities," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004, 2004, pp. 3815-3822 Vol.4, doi: 10.1109/ROBOT.2004.1308863.
52. S. M. LaValle and S. A. Hutchinson, "Optimal motion planning for multiple robots having independent goals," in IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 6, pp. 912-925, Dec. 1998, doi: 10.1109/70.736775.
53. J. Yu and S. M. LaValle, "Planning optimal paths for multiple robots on graphs," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 3612-3617, doi: 10.1109/ICRA.2013.6631084.
54. J. Yu, S. M. LaValle and D. Liberzon, "Rendezvous Without Coordinates," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 57, no. 2, pp. 421-434, Feb. 2012, doi: 10.1109/TAC.2011.2158172.
55. I. Jang, H. Shin and A. Tsourdos, "Anonymous Hedonic Game for Task Allocation in a Large-Scale Multiple Agent System," in IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 6, pp. 1534-1548, Dec. 2018, doi: 10.1109/TRO.2018.2858292.
56. H. -S. Shin, C. Leboucher and A. Tsourdos, "Resource allocation with cooperative path planning for multiple UAVs," Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control, 2012, pp. 298-303, doi: 10.1109/CONTROL.2012.6334646.
57. P. Seguí-Gasco, Hyo-Sang Shin, A. Tsourdos and V. J. Seguí, "Decentralised submodular multi-robot Task Allocation," 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 2829-2834, doi: 10.1109/IROS.2015.7353766.
58. Y. Chen, M. Cutler and J. P. How, "Decoupled multiagent path planning via incremental sequential convex programming," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, pp. 5954-5961, doi: 10.1109/ICRA.2015.7140034.
59. A. K. Whitten, H. Choi, L. B. Johnson and J. P. How, "Decentralized task allocation with coupled constraints in complex missions," Proceedings of the 2011 American Control Conference, 2011, pp. 1642-1649, doi: 10.1109/ACC.2011.5990917.
60. V. R. Desaraju and J. P. How, "Decentralized path planning for multi-agent teams in complex environments using rapidly-exploring random trees," 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 4956-4961, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980392.
61. S. S. Ponda, L. B. Johnson and J. P. How, "Distributed chance-constrained task allocation for autonomous multi-agent teams," 2012 American Control Conference (ACC), 2012, pp. 4528-4533, doi: 10.1109/ACC.2012.6315626.
62. H. Choi, A. K. Whitten and J. P. How, "Decentralized task allocation for heterogeneous teams with cooperation constraints," Proceedings of the 2010 American Control Conference, 2010, pp. 3057-3062, doi: 10.1109/ACC.2010.5530496.
63. G. Neville, A. Messing, H. Ravichandar, S. Hutchinson and S. Chernova, "An Interleaved Approach to Trait-Based Task Allocation and Scheduling," 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021, pp. 1507-1514, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9636569.
64. S. K. K. Hari, A. Nayak and S. Rathinam, "An Approximation Algorithm for a Task Allocation, Sequencing and Scheduling Problem Involving a Human-Robot Team," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 2146-2153, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2970689.
65. M. Dorigo et al., "Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms," in IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 20, no. 4, pp. 60-71, Dec. 2013, doi: 10.1109/MRA.2013.2252996.

66. M. Dorigo, V. Maniezzo and A. Colorni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, Feb. 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
67. M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, April 1997, doi: 10.1109/4235.585892.
68. F. Mondada, L. M. Gambardella, D. Floreano, S. Nolfi, J. -. Deneuborg and M. Dorigo, "The cooperation of swarm-bots: physical interactions in collective robotics," in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 21-28, June 2005, doi: 10.1109/MRA.2005.1458313.
69. S. Nouyan, R. Gross, M. Bonani, F. Mondada and M. Dorigo, "Teamwork in Self-Organized Robot Colonies," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 4, pp. 695-711, Aug. 2009, doi: 10.1109/TEVC.2008.2011746.
70. M. A. Montes de Oca, J. Pena, T. Stutzle, C. Pinciroli and M. Dorigo, "Heterogeneous particle swarm optimizers," 2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2009, pp. 698-705, doi: 10.1109/CEC.2009.4983013.
71. B. P. Gerkey and M. J. Mataric. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *International Journal of Robotics Research*, 23(9), 2004.
72. Chien, S., Barrett, A., Estlin, T., & Rabideau, G. A Comparison of Coordinated Planning Methods for Cooperating Rovers. In *International Conference on Autonomous Agents (Agents 2000)*, Barcelona, Spain, June, 2000.
73. Yamada S., Saito J. Adaptive Action Selection Without Explicit Communication for Multirobot Box-Pushing // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews*. – 2001. – Vol. 31, No. 3. – P. 398–404.
74. Bertuccelli L., Choi H-L., Cho P., How J. Real-time Multi-UAV Task Assignment in Dynamic and Uncertain Environments // *American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference*, Chicago, Illinois, USA, 10 – 13 August, 2009. AIAA-2009-5776. – P. 1–16.
75. Ivanov D.YA. Reshenie stroevoi zadachi v gruppe bespilotnykh kvadrokoptero v // *Izv. YUFU. Tekhnicheskie nauki*. – 2014. – No. 8. – С. 138– 147.
76. Kapustyan S.G. Metody i algoritmy kollektivnogo upravleniya robotami pri ikh gruppovom upravlenii: dis. ... d-ra. tekhn. nauk 05.02.05 / Kapustyan S.G. – Taganrog, 2008. – 376 s.
77. Dias, M. & Zlot, Robert & Kalra, Nidhi & Stentz, Anthony. (2006). Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis. *Proceedings of the IEEE*. 94. 1257 - 1270. 10.1109/JPROC.2006.876939.
78. W. Husheng, L. Hao and X. Renbin, "A blockchain bee colony double inhibition labor division algorithm for spatio-temporal coupling task with application to UAV swarm task allocation," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 1180-1199, Oct. 2021, doi: 10.23919/JSEE.2021.000101.
79. F. Zitouni, S. Harous and R. Maamri, "A Distributed Approach to the Multi-Robot Task Allocation Problem Using the Consensus-Based Bundle Algorithm and Ant Colony System," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 27479-27494, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971585.
80. GA Korsah, A. Stentz i MB Dias, «Vseob'emlyushchaya taksonomiya dlya raspredeleniya zadach s neskol'kimi robotami», *Int. Dzh. Robot. Rez.*, tom. 32, net. 12, str. 1495–1512, oktyabr' 2013 g.
81. G. A. Korsah, A. Stentz and M. B. Dias, "A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 32, no. 12, pp. 1495-1512, Oct. 2013.
82. J. Guerrero, G. Oliver, and O. Valero, "Multi-robot coalitions formation with deadlines: Complexity analysis and solutions," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 1, pp. 1–26, Jan. 2017.

83. E. Nunes, M. Manner, H. Mitiche and M. Gini, "A taxonomy for task allocation problems with temporal and ordering constraints", Robot. Auto. Syst., vol. 90, pp. 55-70, Apr. 2017.

84. M. Zhao and D. Li, "Collaborative Task Allocation of Heterogeneous Multi-Unmanned Platform Based on a Hybrid Improved Contract Net Algorithm," in IEEE Access, vol. 9, pp. 78936-78946, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3084238.

85. H. Jiang and Y. Liang, "Online Path Planning of Autonomous UAVs for Bearing-Only Standoff Multi-Target Following in Threat Environment," in IEEE Access, vol. 6, pp. 22531-22544, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824849.

86. Kan, X., Thayer, T., Carpin, S., & Karydis, K. (2021). Task Planning on Stochastic Aisle Graphs for Precision Agriculture. UC Merced. Report #: 2. <http://dx.doi.org/10.1109/LRA.2021.3062337>.

87. H. Liu, Q. Chen, N. Pan, Y. Sun and Y. Yang, "Three-Dimensional Mountain Complex Terrain and Heterogeneous Multi-UAV Cooperative Combat Mission Planning," in IEEE Access, vol. 8, pp. 197407-197419, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033408.

ОБ АВТОРАХ / ABOUT THE AUTHORS

Петренко Вячеслав Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации и технологии защиты информации Института цифрового развития ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1., e-mail: vipetrenko@ncfu.ru.

Vyacheslav I. Petrenko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Organization and Technology of Information Security of the Institute of Digital Development of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University", 355017, Stavropol Territory, Stavropol, Pushkina str., 1., e-mail: vipetrenko@ncfu.ru.

Тебужева Фариза Биляловна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерной безопасности Института цифрового развития ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1., e-mail: ftebueva@ncfu.ru.

Fariza B. Tebueva, Dc. Sci. (Phys.-Math), Associate Professor, Head of the Computer Security Department of the Institute of Digital Development, North Caucasus Federal University, 355017, Stavropol Territory, Stavropol, Pushkina str., 1., e-mail: ftebueva@ncfu.ru.

Антонов Владимир Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1., e-mail: ant.vl.02@gmail.com.

Vladimir O. Antonov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Computer Security of the Institute of Digital Development of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North Caucasus Federal University", 355017, Stavropol Territory, Stavropol, Pushkina str., 1, e-mail: ant.vl.02@gmail.com

Дата поступления в редакцию: 12.01.2023

После рецензирования: 13.02.2023

Дата принятия к публикации: 07.03.2023