

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ,
СТАТИСТИКА

УДК 004.8

Обзорная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164

EDN: GLZBAX

**Применение многоагентных робототехнических систем
в сельском хозяйстве**

М. И. Анчёков^{✉1}, Ж. Х. Курашев², А. М. Лешкенов²

¹Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук
360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а

²Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук
360010, Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2

Аннотация. Статья посвящена применению мультиагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве. Рассматриваются различные примеры применения мультиагентных систем, такие как оптимизация маршрутов, механическая прополка, картографирование сорняков и уборка урожая. Также рассматривается вопрос об экономической целесообразности применения коллективов роботов, приводится сравнение с существующими на рынке системами.

Ключевые слова: искусственный интеллект, роботы, мультиагентные системы, точное земледелие

Поступила 10.11.2024, одобрена после рецензирования 05.12.2024, принята к публикации 10.12.2024

Для цитирования. Анчёков М. И., Курашев Ж. Х., Лешкенов А. М. Применение многоагентных робототехнических систем в сельском хозяйстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6. С. 158–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164

MSC: 93A16

Review article

Application of multi-agent robotic systems in agriculture

M.I. Anchekov^{✉1}, Zh.Kh. Kurashev², A.M. Leshckenov²

¹Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
branch of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street

²Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street

Abstract. The article is devoted to the application of multi-agent robotic systems in agriculture. The article considers various examples of the application of multi-agent systems, such as route optimization, mechanical weeding, weed mapping and harvesting. It also considers the issue of the economic feasibility of using robot teams, provides a comparison with existing systems on the market.

Keywords: artificial intelligence, robots, multi-agent systems, precision agriculture

Submitted 10.11.2024, approved after reviewing 05.12.2024, accepted for publication 10.12.2024

For citation. Anchekov M.I., Kurashev Zh.Kh., Leshckenov A.M. Application of multi-agent robotic systems in agriculture. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2024. Vol. 26. No. 6. Pp. 158–164. DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-6-158-164

ВВЕДЕНИЕ

Успешный опыт внедрения робототехнических систем в сельское хозяйство постепенно уточняет требования к роботам. Если на этапе опытного внедрения потребители готовы были приобретать несколько единиц роботов, то в данный момент крупные сельхозпроизводители готовы к покупке нескольких десятков роботов. Такой рост интереса к сельхозробототехнике ставит новые задачи перед производителями и разработчиками. Так, применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для съемки полей и их обработки требует наличия высококвалифицированных специалистов. В зависимости от количества одновременно применяемых единиц роботов количество работников, которые обеспечивают эксплуатацию, может быть в соотношении 1 к 1 в худшем случае и 1 к 5 в лучшем. Опыт применения БАС в КБНЦ РАН показывает, что для съемки полей требуется два специалиста, для обработки полей одним роботом – два специалиста, если используется два дрона, то количество специалистов возрастает до трех. Такое соотношение накладывает дополнительные расходы и замедляет темпы внедрения робототехнических систем. Актуальность темы обуславливается ростом спроса на продукты сельхозпроизводства, который не может быть удовлетворен простым увеличением площадей полей и увеличением мощности сельскохозяйственной техники, которая уже достигла массогабаритных пределов, превышение которых приводит к деградации и переуплотнению почвы. На наш взгляд, одним из решений, которое может привести к изменению сложившейся ситуации, является переход к мультиагентной робототехнике [1, 2].

Целью исследования является изучение возможностей применения мультиагентных робототехнических систем для решения ключевых задач в сельском хозяйстве.

Мультиагентные (многоагентные) робототехнические системы появились как закономерный этап развития мультиагентных систем, в которых части систем взаимодействуют для решения общей задачи [3, 4]. В случаях, когда элементы системы похожи друг на друга, такие системы называют гомогенными мультиагентными системами, если элементы отличаются – гетерогенными.

В [5] рассматривается гетерогенная мультиагентная робототехническая система, состоящая из двух видов роботов: беспилотного летательного аппарата и наземного робота на гусеничном ходу. Основной задачей, которую решают данные роботы, является движение строем, определяемым оператором. Каждый наземный робот оснащен камерой, которая позволяет ориентироваться в пространстве и следить за направлением движения лидирующего робота. Чтобы роботы имели возможность различать друг друга, они оснащаются маркерами-идентификаторами. Система управления наземным роботом основывается на ПИД-регуляторе. БПЛА используется для координации группы наземных роботов и их ориентации и навигации в посевах. В одном из экспериментов авторы показывают, что предложенная ими конфигурация робототехнической системы позволяет наземным роботам достаточно уверенно двигаться каскадом, в котором один робот является ведущим, а два других – ведомые. Предложенный авторами подход является достаточно перспективным, так как роботы делятся на подгруппы не только по конструктивным особенностям, но и иерархически, что позволяет применять предложенный подход и за пределами точного земледелия.

Одной из важнейших задач в точном земледелии является задача оптимизации маршрутов передвижения роботов по полю. В [6] авторы рассматривают и сравнивают четыре алгоритма поиска пути: метод k-ближайших соседей [7], алгоритм Кристофидеса [8], муравьиный алгоритм [9] и алгоритм Беллмана–Хелда–Карпа [10]. Для проведения вычислительных экспериментов авторы разработали три наиболее типичные двумерные модели поля. Первая модель представляет собой сад, в котором деревья высажены квадратно-гнездовым способом. Вторая модель – поле, на котором выращивают овощи, и третья – сад, но

с наличием препятствий. Суть эксперимента заключалось в том, что роботы должны достигнуть оптимальным путем все необходимые точки интереса (points of interest, POI) и вернуться в исходную точку. Алгоритмы сравнивались по нескольким критериям, наиболее важные из которых – дистанция пройденного пути и время работы. Авторы отмечают, что выбор конкретного алгоритма необходимо осуществлять в зависимости от топологии поля и количества агентов. Так, на симметричных полях без препятствий алгоритм Кристофидеса превосходит муравьиный алгоритм, однако если участок несимметричный, муравьиный алгоритм показывает лучшие результаты.

В [11] рассматривают задачу механической прополки. В работе авторы обращают внимание, что применение беспилотных летательных аппаратов не повышает эффективность прополки, так как культурные растения препятствуют обнаружению сорной растительности. Кроме того, предлагаемый подход учитывает частичную наблюдаемость среды и ее структурированность за счет рядной посадки и использования модели роста сорняков. Для проведения компьютерного моделирования была разработана среда Weed World. Модель учитывает, что урожай распределен равномерно в рядах. Роботы могут передвигаться по рядам и обмениваться информацией. Сорняки генерируются случайным образом на основе модели клеточных автоматов или распределения Бернулли. Эксперимент проводился на участке площадью 0,4 га, разбитом на квадраты площадью 0,8 м². В зависимости от условий эксперимента радиус обмена информацией между роботами мог быть равен нулю, ограничиваться только соседними ячейками или охватывать всех роботов. Также варьировались начальная плотность всходов сорняков и количество дней до начала прополки. Для координации своих действий роботы собирали информацию об окружающей среде и обменивались ею через общую модель среды. В работе авторы приходят к выводу, что возможность обмена информацией между роботами положительно сказывается на общей производительности.

Для эффективной борьбы с сорняками необходимо своевременно получать информацию об их локализации. В [12] представлена система SAGA, которая в автоматическом режиме будет заниматься картированием сорняков. Предлагаемое решение полностью децентрализовано и основывается на применении роя малых беспилотных летательных аппаратов. Каждый БПЛА оснащен камерой, снимки с которой привязываются к реальным координатам. Для сегментации изображений используются сверточные нейронные сети. Алгоритм передвижения БПЛА основывается на алгоритме пчелиной колонии. Результаты экспериментов показали, что предложенная стратегия эффективна, проявляет робастность и хорошо масштабируется.

Сбор урожая относится к одной из самых трудозатратных операций. В [13] рассматривается подвижная платформа с манипулятором. Постановщиком задач для агентов является так называемый распределитель, который, зная состояние роботов и среды, производит динамическую диспетчеризацию роботов. Для тестирования разработанного алгоритма была создана двумерная модель процесса уборки урожая. Проведенные эксперименты показали, что с ростом количества роботов-сборщиков уменьшается среднее время, проведенное в пути каждым отдельным роботом, но увеличивается время вычисления.

В [14] представлена концепция умного сада на основе гетерогенного коллектива роботов. В исследовании рассматривается задача логистики автономных роботов. Стоит отметить, что авторами затронута тема частичного замещения человеческого труда. Таким образом, в решении сельскохозяйственных задач участвуют гетерогенные агенты в самом широком смысле этого слова: часть сборщиков остается выполнять свои функции, робот-

сборщик и транспортный робот обеспечивают роботизированную уборку, беспилотный летательный аппарат помогает координировать пространственное расположение роботов. Кроме этого, контроль над роботами осуществляет человек, который в сложных ситуациях может не только взять на себя часть управления, но и переформулировать задачи через пульт управления. Предложенная авторами формализованная модель управления группой гетерогенных роботов может служить основой при решении задач планирования операций и увеличения эффективности производства сельхозпродукции.

На данный момент остается открытым вопрос об экономической целесообразности применения коллективов роботов. Инновационные разработки, которые на данный момент внедряются в сельское хозяйство, должны конкурировать с таким гигантами, как John Deere, New Holland, JCB, Claas, которые уже достаточно давно находятся на рынке и зарекомендовали себя с хорошей стороны. В [15] проводят сравнение двух подходов к глубокой вспашке: в первом используется классический трактор John Deere 8730R, а во втором группа из десяти роботов, общая мощность которых сопоставима с трактором. Технические характеристики плугов подобраны так, чтобы они были идентичными. Комплексное сравнение двух подходов показало, что стоимость приобретения группы роботов в 3,5 раза ниже, чем большого трактора, а стоимость эксплуатации в 2 раза ниже. При этом производительность остается сопоставимой.

Применение нескольких роботов для реализации одной технологической операции приводит к необходимости декомпозиции задачи. В [16] на примере задачи прополки показано, что эффективность обработки значительно зависит от того, каким образом распределены задачи между исполнителями. Авторы предложили алгоритм CDABC (collaborative following bee strategy), который является разновидностью алгоритма пчелиной колонии. Слабым местом алгоритмов, ищущих экстремум в частично наблюдаемом пространстве состояний, является то, что решение может сходиться в локальном экстремуме. В таких экстремумах описываются квазиоптимальные решения, которые в большинстве случаев не подходят. Для выхода из данной ситуации существует несколько стратегий: повторный запуск процедуры решения или решение задачи несколькими исполнителями; запрет «близких» решений; «шокирование» популяции, когда часть найденных решений случайным образом меняется; сохранение части решений в глобальном пространстве. В работе авторы предлагают стратегию *collaborative following bees*, которая работает следующим образом. На начальном этапе пчела находит несколько решений в своей окрестности. Два лучших помечаются. В случае, если все найденные решения будут хуже, чем помеченные, выбирается лучшее решение из помеченных. Если находится лучшее решение, то они помечаются, и цикл повторяется. Был проведен сравнительный анализ использования предложенного подхода семью биоинспирированными алгоритмами (Simulated Annealing, Quantum Artificial Bee Colony, Ant Colony System, Improved Artificial Bee Colony, Discrete Artificial Bee Colony, Multi-picking-robot Discrete Artificial Bee Colony (MDABC) и Teaching-Learning-Based Optimizer). Полученные результаты убедительно демонстрируют, что предложенный авторами подход позволяет более эффективно в сравнении с существующими подходами распределять задачи между несколькими сельскохозяйственными роботами.

Выводы

Проведенный обзор работ показал, что на данный момент имеются разработки, которые достаточно эффективно решают задачи производства сельхозпродукции на основе мультиагентных роботов. Мультиагентный подход демонстрирует преимущество перед одинокими роботами за счет перераспределения задач, возможности обмена сообщениями и

координации действий. Это позволяет повысить качество, скорость и экономическую эффективность производства. На наш взгляд, дальнейшее развитие мультиагентной сельскохозяйственной робототехники в большей степени будет связано с развитием систем искусственного интеллекта и человеко-машинного взаимодействия. Применение искусственного интеллекта позволит повысить адаптивность и автономность мультиагентных систем, а интеграция человека в контур управления позволит использовать его опыт и знания для более эффективного решения сельскохозяйственных задач.

В целом мультиагентный подход к применению робототехнических систем в сельском хозяйстве демонстрирует значительный потенциал для повышения эффективности и производительности сельскохозяйственного производства. Дальнейшее развитие этого направления может привести к качественным изменениям в организации сельскохозяйственных работ, повышению конкурентоспособности производимой продукции и своевременному ответу на глобальные вызовы, стоящие перед сельским хозяйством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ota J. Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems. *Advanced Engineering Informatics*. 2006. Vol. 20. No. 1. Pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.aei.2005.06.002
2. Ju C., Kim J., Seol J., Son H. II. A review on multirobot systems in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 202. P. 107336. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107336
3. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход: пер. с англ. М.: И. Д. Вильямс, 2016. 1408 с.
Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod* [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. Moscow: I.D. Vil'yams, 2016. 1408 p. (In Russian)
4. Нагоев З. В. Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2013. 213 с.
Nagoev Z.V. *Intellektika, ili Myshleniye v zhivyykh i iskusstvennykh sistemakh* [Intellectics, or Thinking in Living and Artificial Systems]. Nalchik: Izdatel'stvo KBNTS RAN, 2013. 213 p. (In Russian)
5. Chevalier A., Copot C., Keyser R.D., Hernandez A. A multi agent system for precision agriculture. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2015. Pp. 361–386. DOI: 10.1007/978-3-319-26327-4_15
6. Botteghi N. et al. Multi-agent path planning of robotic swarms in agricultural fields. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2020. Vol. 1. 2020. Pp. 361–368.
7. Laporte G. The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*. 1992. Vol. 59. No. 2. Pp. 231–247. DOI: 10.1016/0377-2217(92)90138-Y
8. Christofides N. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. *Operations Research Forum*. 2022. Vol. 3(1). Pp. 1–4. DOI: 10.1007/s43069-021-00101-z
9. Dorigo M., Maniezzo V., Coloni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 1996. Vol. 26. No. 1. Pp. 29–41. DOI: 10.1109/3477.484436
10. Held M., Karp R.M. A dynamic programming approach to sequencing problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1962. Vol. 10. No. 1. Pp. 196–210. DOI: 10.1137/011001

11. McAllister W., Osipychiev D., Davis A., Chowdhary G. Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 163. P. 104827. DOI: 10.1016/j.compag.2019.05.036
12. Albani D., Haken R., Ijsselmuiden J., Trianni V. Monitoring and mapping with robot swarms for agricultural applications. *XIV IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. 2017. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078478
13. Припотнев М. С., Диане С. А. К., Акуловский Д. В. Модели и алгоритмы управления группой мобильных роботов в задаче уборки урожая // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2023. Т. 10. № 4. С. 32–37. DOI: 10.24892/RIJE/20230407
- Pripotnev M.S., Diane S.A.K., Akulovsky D.V. Models and algorithms for controlling a group of mobile robots in the problem of harvesting. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Mechanical Engineering: a network electronic scientific journal]. 2023. Vol. 10. No. 4. Pp. 32–37. DOI: 10.24892/RIJE/20230407. (In Russian)
14. Мещеряков Р. В., Широков А. С. Постановка задачи гетерогенного группового взаимодействия роботов при решении задач умного сада // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика*. 2024. № 2. С. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204
- Meshcheryakov R.V., Shirokov A.S. Statement of the problem of heterogeneous group interaction of robots in solving smart garden problems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics*. 2024. No. 2. Pp. 41–49. DOI: 10.14529/mmph240204. (In Russian)
15. Albiero D., Garcia A.P., Umezue C.K., Leme de Paulo R. Swarm robots in mechanized agricultural operations: A review about challenges for research. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 193. P. 106608. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106608
16. Guo H., Miao Zh., Ji J.C., Pan Q. An effective collaboration evolutionary algorithm for multi-robot task allocation and scheduling in a smart farm. *Knowledge-Based Systems*. 2024. Vol. 289. P. 111474. DOI: 10.1016/j.knosys.2024.111474

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Анчѳков Мурат Инусович, науч. сотр., отдел «Мультиагентные системы», Институт информатики и проблем регионального управления – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН;

360000, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд 37-а;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>, SPIN-код: 3299-0927

Курашев Жираслан Хаутиевич, зав. лабораторией «Молекулярная селекция и биотехнология», Кабардино-Балкарский научный центр РАН;

360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9442-6122>, SPIN-код: 8549-2620

Лешкенов Аслан Мухамедович, зав. лабораторией «Сельскохозяйственная робототехника»,
Кабардино-Балкарский научный центр РАН;
360010, Россия, г. Нальчик, ул. Балкарова, 2;
aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>, SPIN-код: 7494-4370

Information about the authors

Murat I. Anchekov, Researcher of the Department of Multiagent Systems of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management of KBSC of the Russian Academy of Sciences;

360000, Russia, Nalchik, 37-a I. Armand street;

murat.antchok@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8977-797X>, SPIN-code: 3299-0927

Zhiraslan Kh. Kurashev, Head of the Laboratory of Molecular Breeding and Biotechnology,
Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9442-6122>, SPIN-code: 8549-2620

Aslan M. Leshckenov, Head of the Laboratory of Agricultural robotics of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences;

360010, Russia, Nalchik, 2 Balkarov street;

aslan.leshckenov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9516-3213>, SPIN-code: 7494-4370