УДК 629.03: 004.896 DOI: 10.17587/mau.22.610-615

В. И. Рубцов, канд. техн. наук, доц., rubtsov@mail.ru,
К. Ю. Машков, канд. техн. наук, доц., makon@bmstu.ru,
К. В. Коновалов, ассистент, konovalov_kv@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Многоуровневая система управления интеллектуальным роботом, входящим в состав группы

Рассмотрены вопросы применения группы робототехнических комплексов военного назначения. Современное состояние систем управления одиночных робототехнических комплексов не позволяет решать все задачи, ставящиеся перед роботом. Проведен анализ способов управления группой роботов в боевых условиях. Обоснована необходимость использования многоуровневой системы управления интеллектуальным боевым роботом. Предложена многоуровневая система управления интеллектуальным роботом. Такая система предполагает возможность управления роботом в одном из четырех режимов: дистанционном, супервизорном, автономном и групповом. Более того, каждый робот в зависимости от внешних условий и своего состояния может находиться в любом режиме управления. Применение данной методики управления показано на примере движения группы роботов с интервалом по фронту. Рассмотрена задача движения ведомых роботов за лидером. При формировании алгоритма управления роботом использовался метод конечных автоматов. Алгоритм управляет движением РТК в различных режимах работы: режиме группового управления и в режиме автономного движения. В режиме группового управления реализована задача "движение за лидером". Для состояния "движение строем" был реализован алгоритм формирования траектории движения ведомых роботов с помощью аппроксимации кривой Безье. Он позволяет построить траекторию для ведомого робота. На основе полученной траектории вычислялись угловая и линейная скорости. В режиме автономного управления решаются две задачи: движение в заданную точку и объезд препятствий. В качестве алгоритма для объезда препятствия был использован алгоритм Vector Field Histogram, который определяет направление движения без препятствий. В основе состояния "Движение в заданную точку" базовым алгоритмом выступил Pure Pursuit как простой и надежный при решении подобных задач. Была разработана компьютерная модель движения группы роботов. Модель реализована в программе MATLAB с использованием библиотек Simulink и Mobile Robotics Simulation Toolbox. Промоделированы несколько разных вариантов движения группы РТК, отличающихся друг от друга начальным расположением роботов и положением препятствий. Проведенное компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного метода управления РТК.

Ключевые слова: *группа РТК, распределение целей, система группового управления, моделирование, многоуровневая система управления*

Введение

Современный этап развития военной робототехники характеризуется переходом от разработки экспериментальных образцов наземных робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) к серийному производству и освоению в войсках различных типов боевых и обеспечивающих образцов РТК [1, 2]. В достаточно короткие сроки высокотехнологичное роботизированное вооружение пройдет путь от применения отдельных образцов до массового производства и применения подразделений РТК. В ближайшее десятилетие наземные РТК ВН будут составлять значительную долю численности вооружения и военной техники сухопутных войск.

Одиночное применение РТК в бою будет скорее исключением, чем правилом. Роботизированное вооружение планируется применять группами однородных, разнородных и разносредных РТК.

Несмотря на значительные усилия разработчиков РТК ВН по повышению степени автономности роботов, режим дистанционного управления еще в течение длительного времени будет оставаться основным. Для управления боевым роботом требуются, как минимум, два человека — оператор движения и оператор вооружения. Учитывая, что эффективность наземных РТК ВН для решения задач сухопутных войск проявляется только при групповом применении и во взаимодействии с другими роботами, для выполнения задач потребуется большое число высококвалифицированных специалистов. Для более плавного перехода от дистанционно управляемых роботов к автономным и далее к групповому управлению предполагается использовать многоуровневую систему управления интеллектуальным роботом [3—5].

Система управления РТК и постановка задачи

Система управления РТК должна учитывать возможность функционирования и управления роботами как в дистанционном режиме, так и в автономном в составе группы. В связи

с этим авторами статей [6—8] было предложено использовать многоуровневую систему управления, которая состоит из четырех уровней:

1) дистанционного;

2) интеллектуального дистанционного или супервизорного;

3) автономного;

4) группового.

Каждый уровень увеличивает информативность, которую получает оператор, и в то же время расширяет возможности управления и снижает нагрузку на оператора. При выполнении задания у робота могут возникнуть затруднения, тогда он должен из режима автономного управления переключиться в режим супервизорного и связаться с оператором. При этом робот выключается из работы группы, а когда оператор разрешает сложившуюся ситуацию, тогда он переводит робота в автономный режим, и робот снова включается в группу и может работать или в автономном, или в групповом режиме, решая задачи группы или выполняя задание оператора.

Робот может самостоятельно переключаться в разные режимы, учитывая свое состояние и состояние окружающей среды [9]. На рис. 1 показана система управления интеллектуальным роботом. Она позволяет учитывать внешние обстоятельства и быстро на них реагировать. В случае возникновения внештатной ситуации, например, выхода робота из строя или невозможности одного из роботов действовать в составе группы, группа перестраивается и продолжает выполнении миссии. Робот, вышедший из строя, переходит в режим дистанционного управления и связывается с оператором, который решает сложившуюся проблему. Таким образом, каждый робот группы может работать в одном из четырех режимов. Такой подход позволяет увеличить вероятность выполнения поставленной задачи [10].

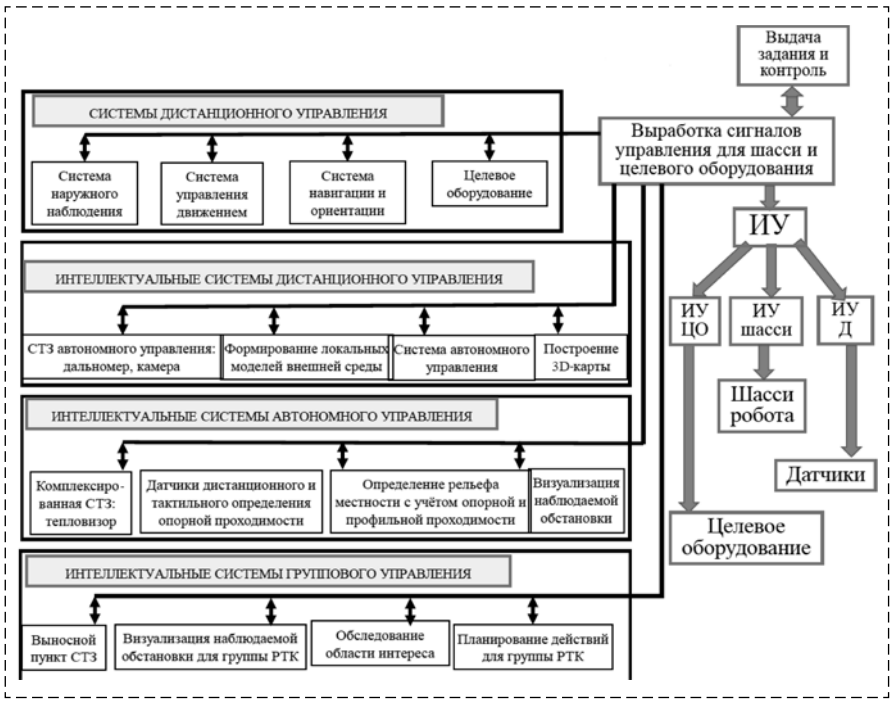

Рис. 1. Система управления интеллектуальным роботом
Fig. 1. Intelligent robot control system

Математическое описание системы управления интеллектуальным роботом

Реализацию данной системы рассмотрим на примере движения группы роботов с интервалом по фронту. Такие задачи наиболее интересны с практической точки зрения [11]. Построение системы выполним на основе теории конечных автоматов. Вначале дадим краткие теоретические основы. Функциональным конечным автоматом $A = [U, X, Z, Exec(), f, h]$ будем называть набор из шести объектов: $U = \{u_1, u_2, ..., u_r\}$ — множество входных сигналов; $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ — конечное множество состояний; $Z = \{z_1, z_2, ..., z_r\}$ — множество выходных сигналов; $Exec() = \{exec_1(), exec_2(), ..., exec_n()\}$ — множество выполняемых действий, соответствующих состоянию автомата; f — функции одношагового перехода в следующее состояние $x(t + 1) = f(x(t), u(t))$; h — функции выхода $z(t + 1) = h(x(t), u(t))$ (автомат Мили, выходные сигналы которого зависят от состояния автомата и входных сигналов) или $z(t + 1) = h(x(t))$ (автомат Мура, выходные сигналы в котором зависят лишь от текущего состояния автомата). Заметим, что в рассматриваемом случае используются асинхронные автоматы, т. е. параметр t характеризует не время, а признак появления на входе автомата сигнала из множества U.

Рассмотрим случай движения группы роботов с интервалом по фронту. Группа состоит из трех роботов, один из них лидер, два ведомых. Лидер располагается посередине.

На рис. 2 представлен разработанный конечный автомат для системы управления интеллекту-

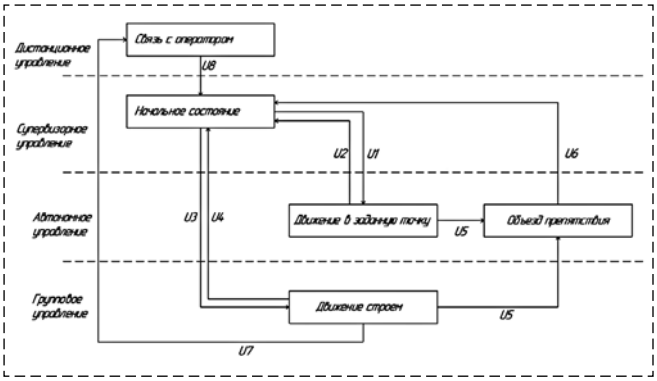

Рис. 2. Автомат управления интеллектуальным роботом
Fig. 2. Automatic control of an intelligent robot

альным роботом. Штриховой линией разделены режимы управления. Видны состояния, которые относятся к каждому из уровней. В режиме группового управления одно состояние — это движение за лидером. В режиме автономного управления два состояния: движение в заданную точку и объезд препятствия.

Множество входных сигналов *U*: *U1* — команда движения в заданную точку; *U2* — робот достиг точки; *U3* — движение строем, это возможно при условии, когда строй сформирован; *U4* — выход из группового движения; *U5* — перед роботом препятствие; *U6* — робот объехал препятствие; *U7* — робот потерял лидера; *U8* — перевод робота в супервизорное управление, эту команду формирует оператор.

Выходными сигналами *Z* задается, какой именно алгоритм будет управлять роботом. Для движения группы роботов было использовано несколько готовых алгоритмов. В качестве алгоритма для объезда препятствия был использован алгоритм Vector Field Histogram, который определяет направление движения без препятствий. Для состояния "Движение в заданную точку" базовым алгоритмом выступил Pure Pursuit как простой и надежный при решении подобных задач [12].

Для состояния "Движение строем" был реализован алгоритм формирования траектории движения ведомых роботов. В литературе описано большое число разнообразных подходов для решения этой задачи. После проведенного обзора литературы был выбран алгоритм аппроксимации кривой Безье. Он позволяет построить траекторию для ведомого робота [13]. На основе полученной траектории вычислялись угловая и линейная скорости.

Моделирование движения группы роботов

Для доказательства работоспособности предложенной системы управления была разработана компьютерная модель группы роботов. Модель реализована в программе MATLAB с использованием библиотек Simulink и Mobile Robotics Simulation Toolbox [14, 15]. Она состоит из трех роботов дифференциального типа. Габаритные размеры роботов: радиус колеса 0,025 м, радиус робота 0,35 м. Построение группы реализовано со смещением по фронту. В общем случае у оператора есть возможность задать произвольное расположение роботов в группе, главное, чтобы роботы находились в зоне видимости системы технического зрения. Без ограничения общности рассмотрим несколько разных вариантов моделирования, отличающихся друг от друга начальным расположением роботов и положением препятствий.

На рис. 3 представлено моделирование движения группы роботов для первого случая. В начальный момент времени роботы находятся в автономном режиме. Приходит команда построения в колонну, положение робота в колонне определяется оператором, так как это позволяет выстроить колонну, адаптируя к особенностям местности. Далее определяется лидер, как правило, это робот, находящийся впереди, или же он задается оператором. После этого роботы переходят в режим группового управления и движутся за лидером. В случае возникновения препятствия перед одним из роботов этот робот

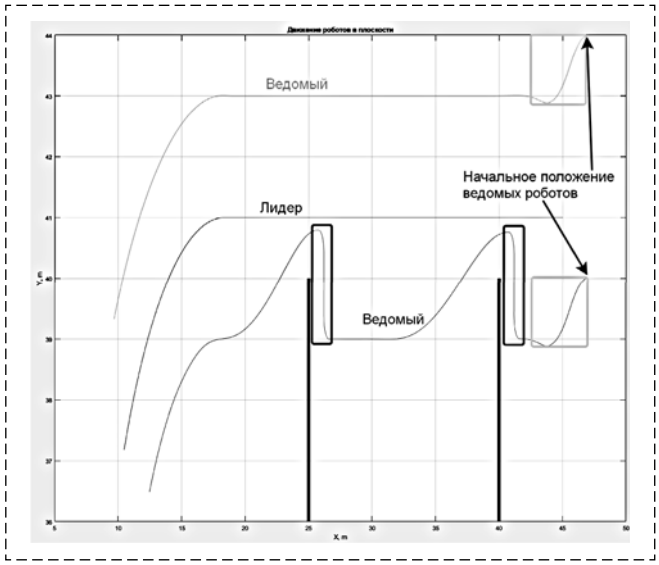

Рис. 3. Траектория движения группы роботов для первого случая
Fig. 3. The trajectory of a group of robots for the first case

переходит в режим автономного управления и объезжает препятствие. Две черные вертикальные линии обозначают препятствие.

Второй случай отличается от первого расположением препятствия. На рис. 4 представлена траектория движения роботов. Видно, что ведомый робот пересекает траекторию движения лидера, но столкновения не происходит, так как лидер уже проехал этот участок, пока ведомый объезжал препятствие.

В третьем случае между ведомым роботом и лидером в процессе движения появляется препятствие. В таком случае пропадает зона прямой видимости. Ведомый теряет лидера, переходит в режим дистанционного управления и связывается с оператором. В рассматриваемом случае есть два варианта действий: первый — продолжить движение прямо в автономном режиме до окончания препятствия; второй — объехать препятствие и следовать за лидером. В первом варианте после окончания препятствия определить координаты лидера, перейти в режим группового управления и продолжить движение в составе группы. Но в таком случае, если лидер изменит траекторию движения, то ведомый 1 может опять его потерять и снова перейдет в режим дистанционного управления для связи с оператором. Траектория движения роботов представлена на рис. 5. В начальный момент времени ведомый 2 выходит в заданную точку для движения колонной. Это обозначено прямоугольником, рядом с которым находится поясняющая надпись "Режим автономного управления". Горизонтальные линии, к которым подведены сноски "Смена режима управления", показывают моменты переключения ведомого 1 в разные режимы управления.

Опишем второй вариант. Когда ведомый робот 1 теряет из зоны видимости лидера, он связывается с оператором. На рис. 6 этот момент обозначен звездочкой. Оператор, зная окружающую обстановку, задает набор точек, по которым робот объезжает препятствие. Потом оператор переводит робота в режим авто-

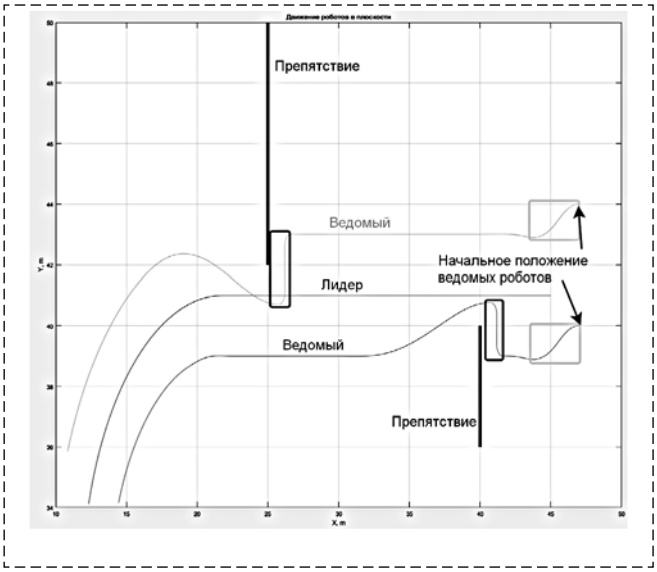

Рис. 4. Траектория движения группы роботов для второго случая

Fig. 4. The trajectory of a group of robots for the second case

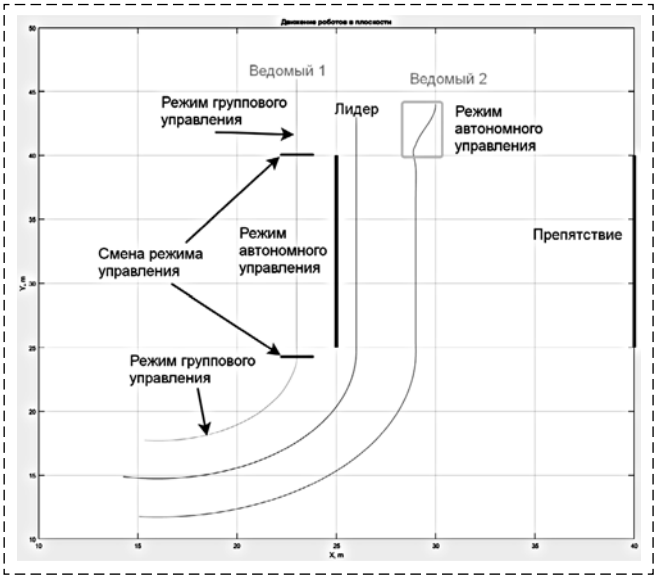

Рис. 5. Траектория движения группы роботов для третьего случая, первый вариант

Fig. 5. The trajectory of the movement of a group of robots for the third case, the first option

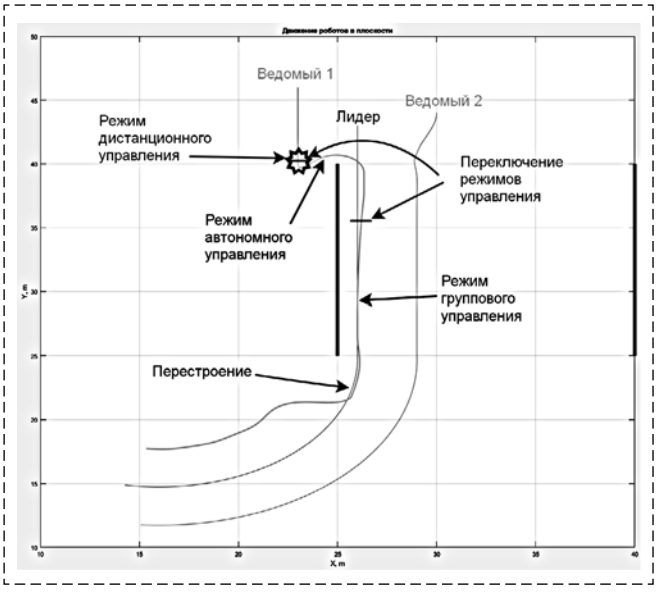

Рис. 6. Траектория движения группы роботов для третьего случая, второй вариант

Fig. 6. The trajectory of the movement of a group of robots for the third case, the second option

номного управления. Далее ведомый 1 находит лидера, переключается в режим группового управления и продолжает движение в составе группы. В таком случае не сохраняется начальная конфигурация строя, но ведомый не теряет из видимости лидера. После преодоления препятствия ведомый 1 перестраивается. На рис. 6 показаны траектории движения роботов и обозначены ключевые моменты.

Заключение

Представлена система управления интеллектуальным роботом. Одним из преимуществ подобной системы является возможность управления существующими в настоящее время наземными РТК в режиме дистанционного управления, а также реализуемое в разрабатываемых РТК движение по опорным точкам, супервизорное или, в перспективе, интеллектуальное управление движением для самостоятельного достижения рубежа применения. Важно, что в каждый момент времени роботы могут находиться в разных режимах работы. Это дает возможность сохранять работоспособность группы независимо от устойчивости связи и выхода из строя одного из РТК, в том числе лидера.

Такая система позволит осуществить более плавный и легкий переход от имеющихся роботов с дистанционным управлением к автономным, а в будущем и к групповому управлению. Проведенное компьютерное моделирование показало работоспособность и эффективность предложенного метода управления РТК.

Список литературы

1. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.

2. **Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С.** Автономные мобильные роботы — навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 48—67.

3. **Белоглазов Д. А., Гайдук А. Р.** Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2015.

4. **Kamada T., Oikawa K.** AMADEUS: A Mobile, Autonomous Decentralized Utility System for Indoor Transportation // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 16—20, 1998. Vol. 4. P. 2229—2236.

5. **Vail D., Veloso M.** Dynamic multi-robot coordination // Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata / Eds.: A. Schultz, L. Parker, and F. Schneider. Kluwer Academic Publishers, 2003. V. II. P. 87—100.

6. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Система управления коллективом роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С.45—50.

7. **Fierro R., Das A., Spletzer J.** A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination // Intern. J. of Robotic Research. 2002. Vol. 21(10-11). P. 977—995.

8. **Parker L.** Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1998. Vol. 14(2). P. 220—240.

9. **Носков В. П., Рубцов В. И., Рубцов И. В.** Математические модели движения и системы технического зрения мобильных робототехнических комплексов: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015.

10. **Hladek D., Vascak J., Sincak P.** Multi-robot control system for pursuit-evasion problem // Journal of electrical engineering. 2009. Vol. 60, N. 3. P. 143—148.

11. **Kadhim Oleiwi, Al-Jarrah R., Roth H., Kazem B.** Integrated Motion Planning and Control for Multi Objectives Optimization and Multi Robots Navigation // IFAC-Papers On Line 48. 2015. Vol. 10. P. 99—104.

12. **Liu Y., Yang J., Zheng Y., Wu Z., Yao M.** Multi-Robot Coordination in Complex Environment with Task and Communication Constraints // In-tern. J. of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. P. 1—14.

13. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems // International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue. Karlsruhe—Ufa: USATU, 1998. P. 119—124.

14. **Rubtsov V. I., Raskatov V. D.** Simulation in MATLAB motion of the mobile robots group when working in the industrial-urban environment (Моделирование в MATLAB движения группы мобильных роботов при работе в индустриально-городской среде) // Cite as: AIP Conference Proceedings 2195, 020015 (2019); https://doi.org/10.1063/1.5140115. Published Online: 17 December 2019.

15. **Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Konovalov K. V.** Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas // In AIP Conference Proceedings, 2195. 2019. P. 020009-1—020009-7.

Multi-Level Control System for an Intelligent Robot that is Part of a Group

V. I. Rubtsov, rubtsov@mail.ru, **K. J. Mashkov,** makon@bmstu.ru, **K. V. Konovalov,** konovalov_kv@bmstu.ru,
Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Rubtsov Vasily I.**, Ph.D., Associate Professor, Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: rubtsov@mail.ru

Accepted on July 27, 2021

Abstract

The article is devoted to the application of a group of robotic complexes for military purposes. The current state of control systems of single robotic complexes does not allow solving all the tasks assigned to the robot. The analysis of methods

of controlling a group of robots in combat conditions is carried out. The necessity of using a multi-level control system for an intelligent combat robot is justified. A multi-level control system for an intelligent robot is proposed. Such a system assumes the possibility of controlling the robot in one of four modes: remote, supervisory, autonomous and group. Moreover, each robot, depending on the external conditions and its condition, can be in any control mode. The application of the technique is shown by the example of the movement of a group of robots with an interval along the front. The problem of the movement of slave robots behind the leader is considered. When forming the robot control algorithm, the method of finite automata was used. The algorithm controls the movement of the RTK in various operating modes: group control mode and autonomous movement mode. In the group control mode, the task is implemented: movement for the leader. For the state of "Movement in formation", an algorithm for forming the trajectory of the movement of guided robots was implemented. An algorithm for approximating the Bezier curve was used. It allows you to build a trajectory for the slave robot. On the basis of the obtained trajectory, the angular and linear velocity were calculated. In the autonomous control mode, two tasks are solved: moving to a given point and avoiding obstacles. Vector Field Histogram was used as an algorithm for detouring an obstacle, which determines the direction of movement without obstacles. The state of "Movement to a given point" is based on Pure Pursuit as a simple and reliable algorithm for solving such problems. A computer model of the movement of a group of robots was developed. The model is implemented in the MATLAB program using the Simulink and Mobile Robotics Simulation Toolbox libraries. Several different variants of the movement of the RTK group are modeled, which differ from each other in the initial location of the robots and the position of obstacles. The conducted computer simulation showed the efficiency and effectiveness of the proposed method of RTC control.

***Keywords**: RTK group; distribution of goals; group control system; modeling; multi-level control system*

For citation:

Rubtsov V. I., Mashkov K. J., Konovalov K. V. Multi-Level Control System for an Intelligent Robot that is Part of a Group, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 11, pp. 610—615.

DOI: 10.17587/mau.22.610-615

References

1. **Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G.** Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russian).

2. **Mikhailov B. B., Nazarova A. V., Yushchenko A. S.** Autonomous mobile robots — navigation and control, *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2016, no. 2, pp. 48—67 (in Russian).

3. **Beloglazov D. A., Gaiduk A. R.** Group control of mobile objects in uncertain environments, Ed. V. Kh. Pshikhopov. Moscow, Fizmatlit, 2015 (in Russian).

4. **Kamada T., Oikawa K.** AMADEUS: A Mobile, Autonomous Decentralized Utility System for Indoor Transportation, *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 16—20, 1998, vol. 4, pp. 2229—2236.

5. **Vail D., Veloso M.** Dynamic multi-robot coordination, *Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata*, Eds.: A. Schultz, L. Parker, and F. Schneider, Kluwer Academic Publishers, 2003, vol. II, pp. 87—100.

6. **Nazarova A. V., Ryzhova T. P.** Control system for a group of robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie***,** 2014, no. 4, pp. 45—50 (in Russian).

7. **Fierro R., Das A., Spletzer J.** A Framework and Architecture for Multi-Robot Coordination, *Intern. J. of Robotic Research*, 2002, vol. 21(10-11), pp. 977—995.

8. **Parker L.** Alliance: An Architecture for Fault Tolerant Multi-Robot Cooperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, vol. 14(2), pp. 220—240.

9. **Noskov V. P., Rubtsov V. I., Rubtsov I. V.** Mathematical models of motion and technical vision systems of mobile robotic complexes, Moscow, Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2015 (in Russian).

10. **Hladek D., Vascak J., Sincak P.** Multi-robot control system for pursuit-evasion problem, *Journal of electrical engineering*, 2009, vol. 60, no. 3, pp. 143—148.

11. **Kadhim Oleiwi, Al-Jarrah R., Roth H., Kazem B.** Integrated Motion Planning and Control for Multi Objectives Optimization and Multi Robots Navigation, *IFAC-PapersOnLine*48, 2015, Vol. 10, pp. 99—104.

12. **Liu Y., Yang J., Zheng Y., Wu Z., Yao M.** Multi-Robot Coordination in Complex Environment with Task and Communication Constraints, *Intern. J. of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, pp. 1—14.

13. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Mul-ti-Agent Robot Systems, *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue,* Karlsruhe—Ufa, USATU, 1998, pp. 119—124.

14. **Rubtsov V. I., Raskatov V. D.** Simulation in MATLAB motion of the mobile robots group when working in the industrial-urban environment, *Cite as: AIP Conference Proceedings* 2195, 020015 (2019), available at: https://doi.org/10.1063/1.5140115,Published Online: 17 December 2019

15. **Rubtsov I. V., Rubtsov V. I., Lapshov V. S., Konovalov K. V.** Simulation in MATLAB group control when conducting reconnaissance in areas, *In AIP Conference Proceedings*, 2195, 2019, pp. 020009-1—020009-7.