

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 007.52; 629.3.05; 004.021
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-7-14>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Автоматизация стыковки автономных мобильных роботов на основе развития метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом

В.В. Голубов[®],
С.В. Манько

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: golubov@mirea.ru

Резюме

Цели. В статье обоснована актуальность задачи автоматической стыковки автономных мобильных роботов. На конкретных примерах показано, что реализация функций автоматической стыковки автономных роботов открывает перспективы создания многоагентных систем с трансформируемой структурой. Целью работы является разработка средств автоматической стыковки автономных мобильных роботов, функционирующих в условиях сложных сцен и неопределенности окружающей обстановки.

Методы. Предлагаемый подход к автоматизации стыковки автономных мобильных роботов сводится к модификации метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом на основе параллельного выполнения децентрализованного алгоритма планирования маршрутов с взаимной координацией процессов распределенных вычислений. Оценка эффективности разработанного комплекса алгоритмических и программных средств осуществлялась с помощью методов компьютерного и натурного моделирования. Заключительная серия натурных экспериментов проводилась на примере автоматической стыковки автономных робототехнических платформ «JetBot AI kit Nvidia», выполняемой с привлечением средств и методов интеллектуального управления, визуальной навигации, технического зрения и беспроводной сетевой связи.

Результаты. Проведен анализ особенностей автоматической стыковки, как одной из задач группового управления автономными роботами в составе многоагентных систем, способных реконфигурировать свою структуру для целенаправленного изменения имеющегося набора функциональных свойств и возможностей прикладного применения. Предложена децентрализованная модификация метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом, позволяющая обеспечить планирование перемещений автономных мобильных роботов по ходу их взаимного сближения и последующей стыковки. Разработан комплекс программно-алгоритмических средств автоматизации стыковки автономных роботов. Проведены серии модельных и натурных экспериментов, подтвердивших эффективность развиваемого подхода.

Выводы. Представленная модификация метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом, традиционно применяемого для планирования перемещений манипуляторов и подвижных платформ, дополняет состав решаемых им задач, позволяя обеспечить автоматизацию стыковки автономных роботов. Полученные результаты открывают перспективы создания универсальных планировщиков с расширенным функционалом для систем управления автономными роботами.

Ключевые слова: автономный робот, интеллектуальное управление, групповое управление, многоагентная робототехническая система, автоматическая стыковка, метод поисковых случайных деревьев со встречным ростом

• Поступила: 18.02.2023 • Доработана: 13.06.2023 • Принята к опубликованию: 04.12.2023

Для цитирования: Голубов В.В., Манько С.В. Автоматизация стыковки автономных мобильных роботов на основе развития метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):7–14. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-7-14>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Automation of autonomous mobile robot docking based on the counter growth rapidly exploring random tree method

Vladimir V. Golubov[@],
Sergey V. Manko

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: golubov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The article substantiates the relevance of automatic docking of autonomous mobile robots. Specific examples show that the implementation of the automatic docking functions of autonomous robots reveals the potential for creating multi-agent systems with a transformable structure. The aim of the work is to develop means for automatic docking of autonomous mobile robots in complex scenarios and an uncertain environment.

Methods. The proposed approach to automating autonomous mobile robot docking is reduced to a modification of the counter-growth rapidly-exploring random tree (RRT) method. It is based on the parallel execution of a decentralized route planning algorithm with mutual coordination of distributed computing processes. The effectiveness of the complex of algorithmic and software tools developed was evaluated using computer and natural simulation methods. The final series of full-scale experiments was carried out on the example of JetBot AI kit Nvidia platforms for automatic docking of autonomous robots. This was performed using the means and methods of intelligent control, visual navigation, technical vision and wireless network communication.

Results. The study analyzed the features of automatic docking as one of the tasks of group control of autonomous robots. This is part of multi-agent systems, capable of reconfiguring structures for purposeful changes to the existing set of functional properties and application possibilities. The study also proposes a decentralized modification of the counter-growth RRT method. This allows the movements of autonomous mobile robots in the course of their mutual approach and subsequent docking to be planned. A set of software-algorithmic tools was developed to automate the docking of autonomous robots. A series of model and full-scale experiments were carried out to confirm the effectiveness of the approach developed herein.

Conclusions. The modification presented herein of the counter-growth RRT method, traditionally used for planning the movements of manipulators and mobile platforms, is complementary to the tasks it resolves. This enables the docking of autonomous robots to be automated. The results obtained open up the potential for universal schedulers with extended functionality for autonomous robot control systems to be designed.

Keywords: autonomous robot, intelligent control, group control, multi-agent robotic system, automatic docking, counter-growth RRT method

• Submitted: 18.02.2023 • Revised: 13.06.2023 • Accepted: 04.12.2023

For citation: Golubov V.V., Manko S.V. Automation of autonomous mobile robot docking based on the counter growth rapidly exploring random tree method. *Russ. Technol. J.* 2024;12(1):7–14. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-1-7-14>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современные образцы полуавтоматических и автономных роботов должны обладать комплексом возможностей для анализа полученной информации, оценки обстановки в текущий момент времени, планирования своих действий с последующей отработкой в соответствии с заданными критериями качества.

Следует отметить, что специфика группового управления роботами в составе объединенной группировки предполагает необходимость их взаимной координации, в т.ч. при решении задач планирования перемещений и маршрутизации. Анализ специфики этих задач с учетом допустимых постановок является крайне важным вопросом, который во многом предопределяет выбор адекватных алгоритмических решений.

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТЫКОВКИ КАК ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ РОБОТАМИ

В множестве задач группового управления роботами автоматическая стыковка также может рассматриваться в качестве типовой для некоторых

прикладных сфер [1]. Ярким и показательным примером этого служит высокоточное перемещение элементов крупноразмерных конструкций с помощью робототехнических транспортных платформ «KUKAomniMove» (KUKAAG, Германия) (рис. 1), используемых в авиационной и машиностроительной промышленности при сборке корпусов самолетов, скоростных поездов и других габаритных изделий. Многоколесная робототехническая платформа «KUKAomniMove» способна функционировать в режиме дистанционного или полуавтоматического управления. При необходимости робототехнические транспортные платформы такого типа, оснащаемые специальными устройствами сопряжения, могут стыковаться между собой под контролем оператора, обеспечивая транспортировку объектов соответствующего веса и размера.

Для роботов с трансформируемой структурой автоматическая стыковка мехатронно-модульных элементов, обладающих собственной подвижностью, представляет собой составной этап синтеза новой конфигурации, как показано на рис. 2 [2–6].

В общем случае операции автоматической стыковки характеризуются сложностью априорно неизвестной обстановки, определяемой значительным исходным удалением роботов друг от друга,



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. Робототехническая транспортная платформа «KUKAomniMove» (KUKAAG, Германия): общий вид платформы и ручного пульта дистанционного управления (а); средства стыковки (б); робототехнические транспортные платформы в состыкованном состоянии (в); транспортировка крупногабаритных изделий (г)



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Реконфигурируемый мехатронно-модульный робот «SMORES» (UPenn, США): автономный мехатронный модуль (а); автоматическая стыковка модулей (б); синтезированная структура (в)

отсутствием условий взаимной видимости, а также возможным наличием препятствий, дальность обнаружения которых ограничивается параметрами используемых информационно-измерительных средств. При этом особый интерес и сложность представляет такая постановка задачи, когда при выполнении своей автоматической стыковки оба робота играют активную роль. Один из перспективных подходов к созданию специальных инструментальных средств, реализующих функции автоматической стыковки автономных роботов в составе программно-алгоритмического обеспечения их систем управления, связан с развитием и децентрализацией метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect (counter-growth rapidly-exploring random tree method).

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПОИСКОВЫХ СЛУЧАЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ СО ВСТРЕЧНЫМ РОСТОМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СТЫКОВКИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Главная особенность методов семейства RRT заключается в оригинальном подходе к планированию перемещений робота на основе построения древовидных моделей изменения его допустимых состояний [7, 8].

Если в классическом варианте метода RRT синтез дерева осуществляется из точки исходного состояния робота вплоть до достижения заданного целевого, то версия RRT-Connect предполагает, что и исходная, и целевая точка искомого маршрута являются корневыми узлами древовидных структур, процедура формирования которых завершается в момент первой взаимной смычки генерируемых ветвей [9]. С точностью до способа своего воплощения метод поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect [10], ориентированный на решение задач прокладки маршрута между двумя точками, может служить эффективным инструментом для планирования движений

автономных мобильных роботов различной структуры [11] по ходу их взаимного сближения и автоматической стыковки [12–14].

Применение метода RRT-Connect для решения задач автоматизации стыковки автономных мобильных роботов предполагает необходимость его модификации в соответствии со следующими требованиями, регламентирующими внесение необходимых изменений и дополнений:

- децентрализация вычислительной процедуры с разделением на параллельные процессы генерации деревьев со встречным ростом по единому алгоритму для обоих участников операции стыковки;
- координация выполняемых процессов на уровне взаимного обмена данными о текущей конфигурации формируемых деревьев и наблюдаемых ограничениях;
- инициализация корневых узлов синтезируемых деревьев в точках исходного расположения роботов перед началом операции их стыковки в привязке к общей системе координат;
- одновременное завершение процессов генерации деревьев при первом взаимном смыкании ветвей.

На рис. 3 представлена обобщенная блок-схема алгоритма, реализующего децентрализованную модификацию метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect для планирования движений роботов при их автоматической стыковке. Следует отметить, что программная реализация алгоритма должна предусматривать возможность повторной инициализации построенного дерева и всей маршрутной сети для их трансформации в случае обнаружения препятствий при движении робота по ранее проложенному пути.

Принципиальная возможность автоматической стыковки автономных роботов в среде с препятствиями на основе децентрализованной модификации метода RRT-Connect подтверждается результатами комплексного компьютерного моделирования, фрагменты которого приведены на рис. 4.

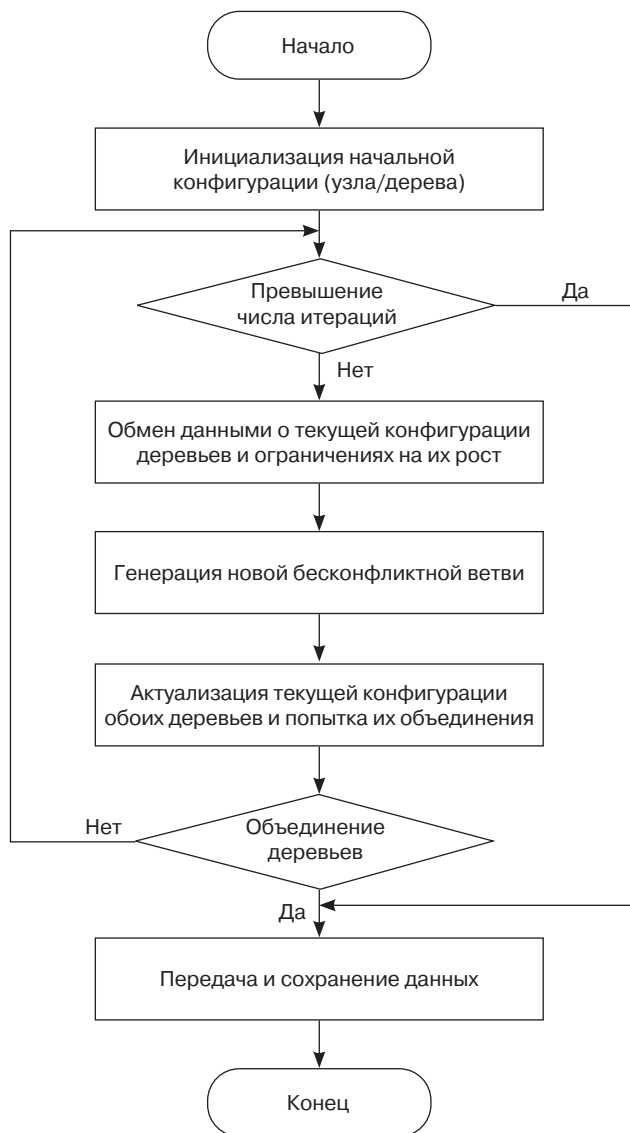


Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритма, реализующего децентрализованную модификацию метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect для планирования движений роботов при их автоматической стыковке

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ СТЫКОВКИ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА RRT-CONNECT

Оценка практической реализуемости подхода, основанного на применении децентрализованной модификации метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect для автоматизации стыковки автономных мобильных роботов, осуществлялась в рамках серии натурных экспериментов на специализированном лабораторном полигоне. Этот исследовательский полигон,

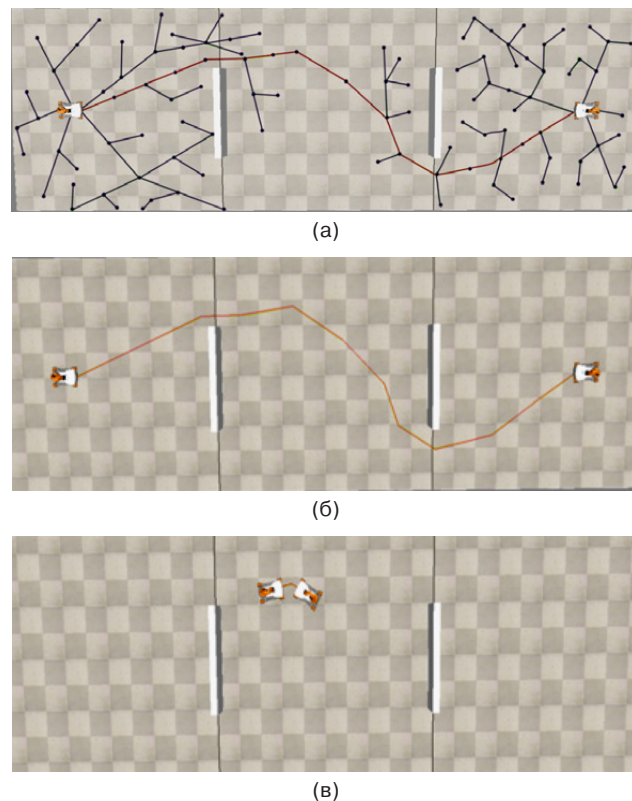


Рис. 4. Компьютерное моделирование автоматической стыковки автономных роботов в среде с препятствиями на основе децентрализованной модификацию метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect

общий вид которого представлен на рис. 5а, предназначен для отладки и верификации средств и методов интеллектуального и группового управления автономными подвижными объектами и включает в свой состав многочисленный парк мобильных робототехнических платформ типа «Jetson Nano JetBot AI kit Nvidia»¹ (производители – NVIDIA, Waveshare, США), сетевое оборудование для поддержания каналов беспроводной связи и камеры внешнего наблюдения для контроля за рабочей обстановкой и решения задач визуальной навигации.

Мобильная робототехническая платформа «JetBot AI kit Nvidia», показанная на рис. 5б), обладает широкими потенциальными возможностями и оснащается высокопроизводительным микрокомпьютером «Jetson Nano» (NVIDIA, Waveshare, США), малоразмерной видеокамерой (а при необходимости и другими информационно-измерительными средствами), устройством беспроводной сетевой связи, а также автономным источником питания на базе аккумуляторных батарей.

¹ <https://www.waveshare.com/jetbot-ai-kit.htm>. Дата обращения 15.01.2022. / Accessed January 15, 2022.

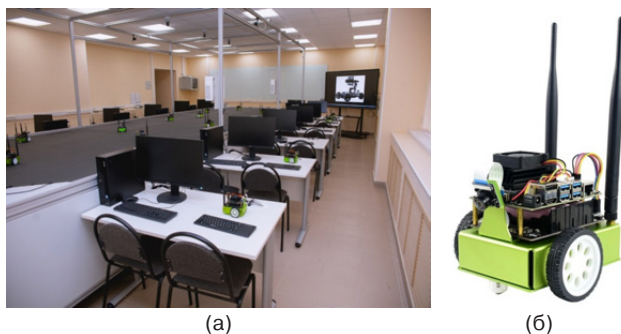


Рис. 5. Специализированный лабораторный полигон для отладки и верификации средств и методов интеллектуального и группового управления подвижными объектами (а) на базе автономных мобильных робототехнических платформ типа «Jetson Nano JetBot AI kit Nvidia» (б)

Обобщенная структура комплекта программно-алгоритмических средств для обеспечения автоматической стыковки автономных роботов приведена на рис. 6 и включает:

- подсистему планирования перемещений на основе децентрализованной версии метода RRT-Connect;
- подсистему навигации, обеспечивающую определение текущих координат и ориентацию робота;

- подсистему детектирования препятствий и картографирования на основе обработки изображений с бортовой камеры;
- подсистему беспроводной сетевой связи для взаимного обмена данными со вторым участником стыковки;
- подсистему управления движением, обеспечивающую перемещение робота вдоль формируемого маршрута.

Принципы построения подсистемы навигации основаны на обработке изображений с камер внешнего наблюдения с распознаванием и локализацией ArUco-меток [15], используемых для маркировки роботов, как показано на рис. 7.

Необходимое информационное взаимодействие автономных роботов на всех стадиях планирования и выполнения их автоматической стыковки реализуется в соответствии со стандартами Wi-Fi-технологии беспроводной сетевой связи с использованием протокола UDP (user datagram protocol).

Подсистема планирования перемещений основана на использовании децентрализованной версии метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect, и обеспечивает формирование

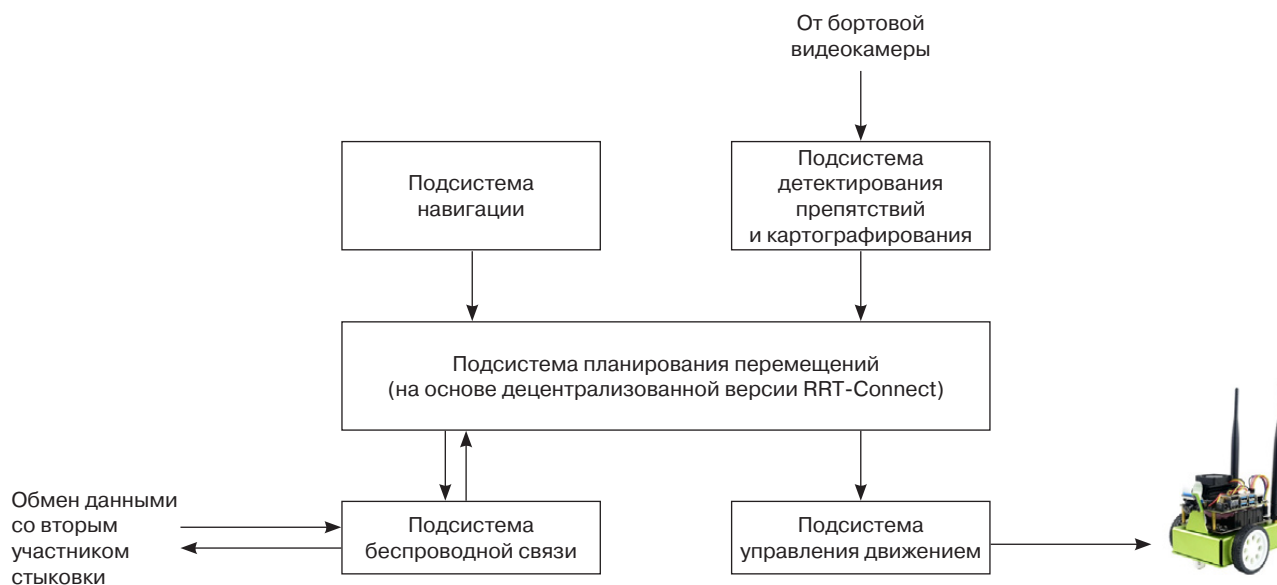


Рис. 6. Обобщенная структура бортового комплекта программно-алгоритмических средств для обеспечения автоматической стыковки автономных мобильных роботов

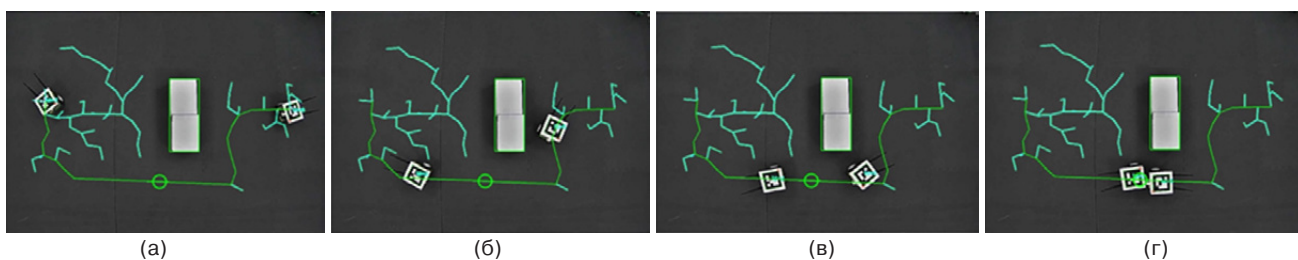


Рис. 7. Фрагменты натурального эксперимента по эмуляции автоматической стыковки автономных мобильных роботов

маршрутной сети для построения траектории сближения робота со вторым участником стыковки. Взаимонаправленный рост деревьев, одновременно генерируемых планировщиками обоих роботов, координируется по каналам беспроводной сетевой связи с обменом наборами необходимых данных.

Состав передаваемой информации отражает текущую конфигурацию деревьев, а также местоположение препятствий, наблюдаемых подсистемой их обнаружения и картографирования. При этом области, находящиеся вне зоны действия средств сенсорного контроля внешней обстановки, считаются свободными от препятствий.

Окончание этапа планирования в момент первого смыкания ветвей синтезируемых деревьев обуславливает переход к следующей стадии автоматической стыковки автономных роботов, связанной с управлением их движением вдоль сформированных маршрутов к предполагаемой точке встречи.

При обнаружении ранее ненаблюдаемых препятствий движение роботов приостанавливается с возобновлением работы планировщиков и перезапуском процедур построения маршрута на основе децентрализованной модификации метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect.

Повторный запуск планировщика предполагает последовательное выполнение следующих действий:

- реинициализация маршрутного дерева с проверкой условий соответствия новым ограничениям на предмет пересечения его ветвей с границами обнаруженных препятствий;
- удаление всех ветвей дерева, не удовлетворяющих условиям проверки;
- удаление ветвей, потерявших связь с корневой вершиной по итогам выполнения предыдущего шага;

- при нарушении целостности пути к точке стыковки со вторым роботом возобновление процесса генерации реконструированного дерева до прокладки маршрута к новому месту встречи;
- переход к этапу продолжения движения.

Работоспособность и эффективность средств автоматической стыковки автономных роботов на основе децентрализованной модификации метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом RRT-Connect подтверждаются результатами натурных экспериментов, фрагменты одного из которых представлены на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ трудов российских и зарубежных авторов показывает, что акцентированное внимание, уделяемое развитию метода поисковых случайных деревьев, обусловлено широкими возможностями его применения для решения задач планирования перемещений как мобильных, так и манипуляционных роботов, включая робототехнические системы с размещением бортового манипулятора (в т.ч. с избыточной или реконфигурируемой структурой) на транспортной платформе. Представленная модификация метода дополняет состав решаемых им задач, позволяя обеспечить автоматизацию стыковки автономных роботов. Полученные результаты открывают перспективы создания универсальных планировщиков с расширенным функционалом для систем управления автономными роботами.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang Y., Shan M., Yue Y., Wang D. Autonomous Target Docking of Nonholonomic Mobile Robots Using Relative Pose Measurements. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2021;68(8):7233–7243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3001805>
2. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots – design of the SMORES system. In: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012. P. 4464–4469. <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845>
3. Tosun T., Daudelin J., Jing G., Kress-Gazit H., Campbell M., Yim M. Perception-informed autonomous environment augmentation with modular robots. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2018. P. 6818–6824. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8463155>
4. Liu C., Lin Q., Kim H., Yim M. *SMORES-EP, a Modular Robot with Parallel Self-assembly*. arXiv preprint or arXiv:2014.00800v2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00800>
5. Knizhnik G., Yim M. Docking and Undocking a Modular Underactuated Oscillating Swimming Robot. In: *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2021. P. 6754–6760. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9562033>
6. Sohal S.S., Sebastian B., Ben-Tzvi P. Autonomous Docking of Hybrid-Wheeled Modular Robots with an Integrated Active Genderless Docking Mechanism. *J. Mechanisms Robotics*. 2021;14(1):011010. <https://doi.org/10.1115/1.4051519>
7. LaValle S.M., Kuffner J. Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects. In: Donald B., Lynch K., Rus D. (Eds.). *Algorithmic and Computational Robotics*. NY: CRC Press; 2001. P. 293–308. <https://doi.org/10.1201/9781439864135>

8. Голубов В.В., Манько С.В. Особенности и перспективы применения метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений автономных роботов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>
[Golubov V.V., Manko S.V. Features and perspectives of application of the search random trees method for movement planning of autonomous robots. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):16–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>]
9. Kuffner J., LaValle S.M. RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning. In: *2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2000. P. 995–1001. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730>
10. Kang J.G., Lim D.W., Choi Y.S., Jang W.J., Jung J.W. Improved RRT-Connect Algorithm Based on Triangular Inequality for Robot Path Planning. *Sensors*. 2021;21(2):333. <https://doi.org/10.3390/s21020333>
11. Gravot F., Haneda A., Okada K., Inaba N. Cooking for humanoid robot, a task that needs symbolic and geometric reasonings. In: *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2006. P. 462–467. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641754>
12. Zahroof T., Byland A., Shageer H., Pavone M. Perception-Constrained Robot Manipulator Planning for Satellite Servicing. In: *2019 IEEE Aerospace Conference*. 2019. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8741569>
13. Klemm S., Essinger M., Oberländer J., Zofka M.R., Kuhnt F., Weber M., Kohlhaas R., Kohs A., Roennau A., Schamm T., Zöllner J.M. Autonomous multi-story navigation for valet parking. In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2016. P. 1126–1133. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795698>
14. Han P., Li G., Zhang H. Leveraging Past Experience for Path planning of Marine Vessel: A Docking Example. *Modeling, Identification and Control*. 2022;43(3):101–109. <http://doi.org/10.4173/mic.2022.3.2>
15. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marin-Jiménez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014;47(6):2280–2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>

Об авторах

Голубов Владимир Васильевич, аспирант, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golubov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9227-6184>

Манько Сергей Викторович, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования, Член научного Совета по робототехнике и мехатронике Российской академии наук. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, SPIN-код РИНЦ 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

About the authors

Vladimir V. Golubov, Postgraduate Student, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golubov@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-9227-6184>

Sergey V. Manko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Laureate of the Government Prize of the Russian Federation in the field of education, Member of the Scientific Council on Robotics and Mechatronics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, RSCI SPIN-code 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>