

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-2023-11-6-16-27>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Особенности и перспективы применения метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений автономных роботов

В.В. Голубов [@],
С.В. Манько

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: golubov@mirea.ru

Резюме

Цели. Статья посвящена анализу особенностей одного из наиболее многообещающих подходов к решению задач планирования перемещений автономных роботов различных типов и назначения с помощью метода поисковых случайных деревьев. Показано, что развитие современной робототехники неразрывно сопряжено с совершенствованием конструкций создаваемых образцов, для которых размещение манипулятора на подвижной платформе становится типовым вариантом компоновки. Целью работы является оценка перспектив использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы для создания универсального планировщика перемещений мобильных и манипуляционных роботов, включая автономные робототехнические системы с манипулятором на подвижной платформе.

Методы. Объектом проводимых исследований является метод поисковых случайных деревьев RRT (rapidly exploring random trees) и его известные модификации RRT* и RRT-Connect. Оценка эффективности их прикладного применения для решения задач планирования перемещений роботов различных типов проводилась с помощью методов компьютерного и натурного моделирования.

Результаты. На основе обзора литературы и по итогам проведенных исследований показано, что широкие возможности метода поисковых случайных деревьев позволяют обеспечить решение задач планирования перемещений не только для мобильных и манипуляционных роботов, но и для робототехнических систем с размещением бортового манипулятора (в т.ч. с избыточной или реконфигурируемой структурой) на транспортной платформе. Эффективность прикладного применения метода поисковых случайных деревьев подтверждается примерами моделирования мобильной платформы с бортовым манипулятором и результатами натурных экспериментов с опытным образцом реконфигурируемого мехатронно-модульного робота «АРАКС» (РТУ МИРЭА, Россия). Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что конечная размерность дерева поиска, а, следовательно, и время его построения, вплоть до достижения заданного целевого состояния, во многом определяются величиной фактора роста.

Выводы. Обобщение полученных результатов открывает реальные перспективы использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы не только для создания универсальных средств планирования перемещений мобильных робототехнических систем с бортовым манипулятором, но и для решения задач автоматизации стыковки автономных подвижных платформ.

Ключевые слова: автономный робот, интеллектуальное управление, реконфигурируемый робот, изменяемая кинематическая структура, метод поисковых случайных деревьев

• Поступила: 17.02.2023 • Доработана: 29.03.2023 • Принята к опубликованию: 05.09.2023

Для цитирования: 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>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Features and perspectives of application of the rapidly exploring random tree method for motion planning of autonomous robotic manipulators

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

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The work analyzes features of one of the most promising approaches to solve the problems for motion planning of autonomous robotic manipulators of various types and purposes using the rapidly exploring random tree (RRT) method. The development of modern robotics is shown to be inextricably linked with the improvement of the designs of the created samples, for which the placement of a manipulator on platform becomes a typical layout option. Prospects for using the RRT method as a constructive basis for creating a universal motion planner are evaluated for mobile and robotic manipulators, including autonomous robotic systems with a manipulator on a moving platform.

Methods. The object of the research is the RRT method and its well-known modifications RRT* and RRT-Connect. The effectiveness of applying such methods for solving problems associated with planning the motions of robotic manipulators of various types was evaluated using computer and natural simulation methods.

Results. Based on a review of the literature and the results of the research, the wide possibilities of the RRT method can be used for solving motion planning problems not only for mobile and robotic manipulators, but also for robotic systems on whose transport platform an onboard manipulator has been installed (including those having a redundant or reconfigurable structure). The effectiveness of the applied application of the RRT method is confirmed by examples of modeling a mobile platform with an onboard manipulator and the results of full-scale experiments with a prototype of the ARAKS reconfigurable mechatronic-modular robotic manipulators (RTU MIREA, Russia). It can be experimentally demonstrated and theoretically substantiated that the final dimension of the exploring tree, and hence the time of its construction up to reaching a given target state, is largely determined by the value of the growth factor.

Conclusions. The generalization of the results obtained opens up real prospects for using the RRT method as a constructive basis not only for creating universal means for motion planning mobile robotic systems with an onboard manipulator, but also for solving the problems of automating the docking of autonomous mobile platforms.

Keywords: autonomous robotic manipulator, intelligent control, reconfigurable robotic manipulator, variable kinematic structure, rapidly exploring random tree method

• Submitted: 17.02.2023 • Revised: 29.03.2023 • Accepted: 05.09.2023

For citation: Golubov V.V., Manko S.V. Features and perspectives of application of the rapidly exploring random tree method for motion planning of autonomous robotic manipulators. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):16–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-16-27>

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

Перспективные образцы полуавтоматических и автономных роботов, создаваемых для работы в условиях неопределенности, должны обладать широким набором функциональных возможностей анализа сенсорной информации, оценки окружающей обстановки, планирования целесообразных действий и их последующей отработки.

В числе возникающих проблем одна из наиболее острых связана с разработкой принципов построения и состава программно-алгоритмических средств для решения задач планирования перемещений и управления движением роботов различных типов и компоновок с учетом множества ограничений, определяемых видом формируемых траекторий, характером внешней среды, особенностями рабочей сцены и другими факторами. Исследования, активно проводимые в этой области с начала 60-х годов XX века, позволяют обеспечить последовательное накопление теоретических и прикладных заделов, которые в тех или иных сочетаниях находят свое практическое применение в современных системах управления роботами.

Тем не менее, поиск путей повышения эффективности программно-алгоритмических средств построения маршрутов целенаправленного перемещения и планирования движений автономных роботов продолжает сохранять свою актуальность.

Необходимо отметить, что развитие робототехники, расширение областей ее прикладного применения и спектра решаемых задач неразрывно сопряжено с совершенствованием создаваемых образцов, повышением уровня их функциональных возможностей и, с другой стороны, с усложнением конструктивных компоновок, как неизбежным следствием.

Так, в частности, для роботов специального и промышленного назначения размещение многофункционального манипулятора на мобильной платформе стало одной из типовых схем построения (рис. 1).

Иллюстрацией другого типа могут служить мехатронно-модульные роботы, способные автоматически трансформировать свою структуру с переходом от конфигурации подвижной платформы к конфигурации мобильного манипулятора, как показано на рис. 2.

В этой связи особый интерес представляет метод поисковых случайных деревьев (rapidly exploring

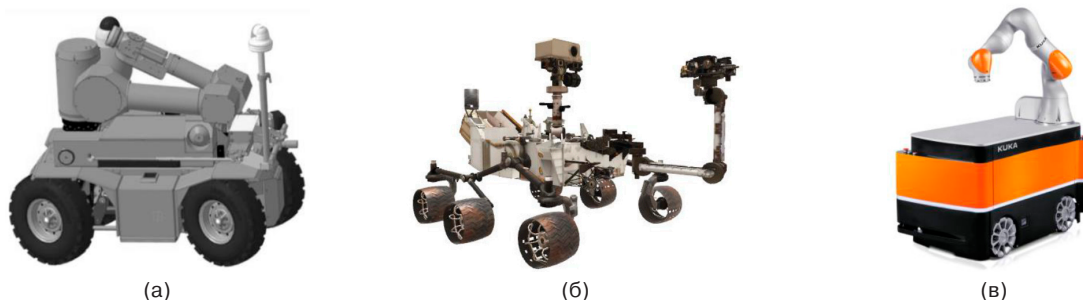


Рис. 1. Автономные роботы специального (а), (б) и промышленного (в) назначения с бортовым манипулятором: (а) автономный робот специального назначения (МГУ им. Н.Э. Баумана, Россия); (б) марсоход «Curiosity» (NASA, США); (в) «KMriiwa» (KUKA Roboter GmbH, Германия)

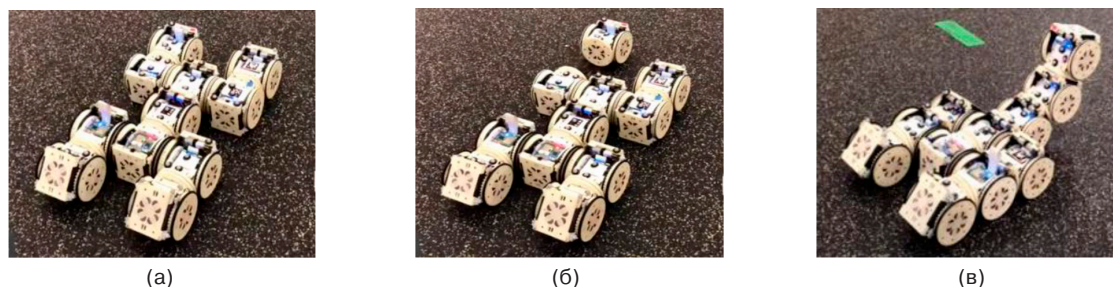


Рис. 2. Автоматическая трансформация мехатронно-модульного робота «SMORES-EP» (University of Pennsylvania, США) из конфигурации подвижной платформы к конфигурации мобильного манипулятора

random tree, RRT) [1, 2], специфические особенности которого открывают перспективы создания универсального планировщика движений для мобильных и манипуляционных роботов, включая робототехнические системы с компоновкой манипулятора на транспортной платформе.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОИСКОВЫХ СЛУЧАЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МОБИЛЬНЫХ И МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

Использование метода поисковых случайных деревьев RRT [3, 4] предполагает построение маршрута целенаправленного перемещения робота на множестве оперативно формируемых примеров из числа допустимых состояний в пространстве конфигураций. Создаваемое дерево, которое выступает в качестве дискретной реконструкции конфигурационного пространства робота, строится случайным образом из корневой вершины, соответствующей заданному исходному состоянию.

Каждая синтезируемая ветвь дерева определяет возможный переход к одному из новых состояний, генерация которых производится в конфигурационном пространстве с учетом проверки на свою допустимость и продолжается вплоть до достижения целевого положения. В обобщенном виде соответствующий алгоритм описывается последовательностью ряда ключевых шагов.

1. В качестве корневой вершины формируемого дерева T устанавливается точка c_{init} , соответствующая начальному состоянию робота в его конфигурационном пространстве C .
2. В течение априорно заданного числа итераций N или пока не достигнуто целевое состояние c_{goal} выполняется (циклически) следующая последовательность действий:
 - генерация случайной точки $c_{rand} \in C$;
 - отыскание вершины дерева $c_{near} \in T$, которая является ближайшей к выбранной точке c_{rand} (как показано на рис. 3);
 - отыскание точки c' , лежащей на луче $p(c_{near}, c_{rand})$ и отстоящей от вершины c_{near} на удалении Δc (задаваемом параметре роста дерева) (рис. 3):

$$c' : [c_{near}, c'] \in p, \|c_{near}, c'\| = \Delta c;$$

- проверка конфликтности перехода между состояниями c_{near} и c' на предмет попадания в область конфигурационного пространства $C_{obs} \in C$, соответствующую пересечениям с препятствиями с точностью до априорно установленной

величины ϵ , характеризующей погрешность определения конфликта (рис. 4);

- отыскание точки c_{stop} , ближайшей к c_{near} на границе области допустимых состояний $C_{free} = C \setminus C_{obs}$ вдоль луча $p(c_{near}, c_{rand})$ (рис. 4):

$$c_{stop} : [c_{near}, c_{stop}] \in p \cap C_{free}; \|c_{stop}, C_{obs} \cap p\| \leq \epsilon;$$

- отыскание точки c_{new} как нового конфигурационного состояния:

$$c_{new} = \begin{cases} c', [c_{near}, c'] \in C_{free}, \\ c_{stop}, [c_{near}, c'] \notin C_{free}; \end{cases}$$

- обновление дерева с внесением в списки описания его вершин и ветвей новых элементов c_{near} , c_{new} и $[c_{near}, c_{new}]$ соответственно при условии, что $c_{new} \in c_{near}$;
- проверка найденной точки c_{new} на удаленность по отношению к целевой; при выполнении условия $\|c_{new}, c_{goal}\| \leq \delta$ (δ – априорно установленная точность) задача поиска пути считается решенной.

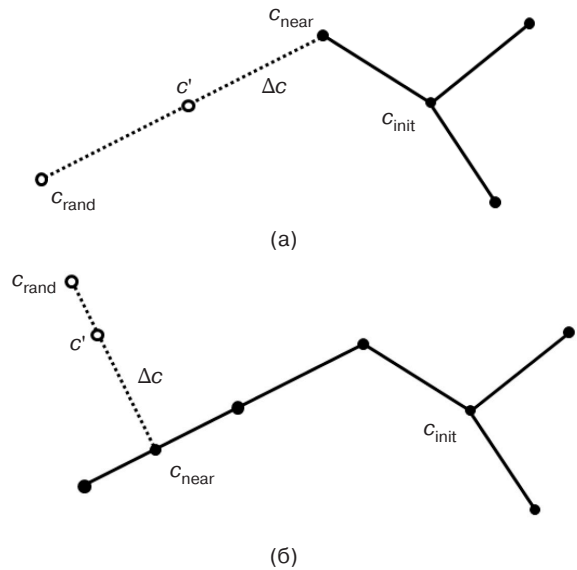


Рис. 3. Варианты отыскания вершины дерева, являющейся ближайшей по отношению к случайно выбранной точке

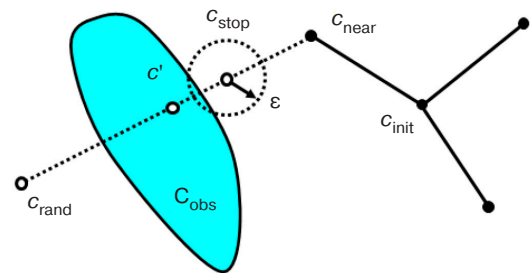


Рис. 4. Проверка конфликтности перехода между смежными конфигурационными состояниями

В процессе построения дерева предпринимаются периодические попытки включения целевой конфигурации в состав его вершин за счет однократного повторения всех действий шага 2 при условии, что $c_{\text{rand}} = c_{\text{goal}}$.

3. Если решение не найдено, то выполняется возврат к шагу 2.

На рис. 5 приведен пример планирования маршрута в двумерном конфигурационном пространстве $C(x, y)$ с помощью метода поисковых случайных деревьев RRT.

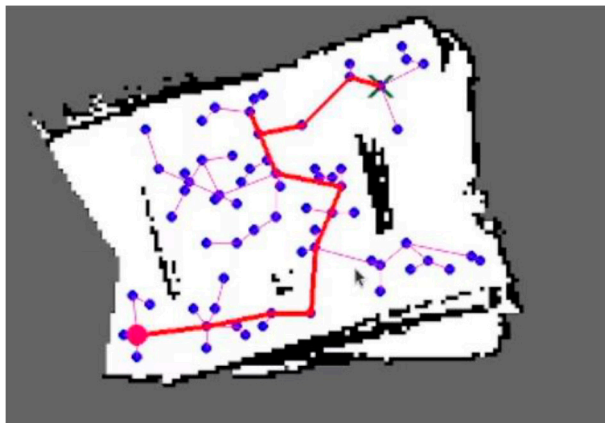


Рис. 5. Использование метода поисковых случайных деревьев RRT для планирования маршрута целенаправленного перемещения автономного мобильного робота на автоматически синтезированной карте

В общем случае практическое применение метода поисковых случайных деревьев предполагает привлечение дополнительных процедур сглаживания найденных траекторий.

Следует отметить, что идейная основа и особенности метода обуславливают возможность его использования в решении задач планирования перемещений не только мобильных, но и манипуляционных роботов, в т.ч. обладающих избыточной кинематической структурой [5, 6].

Очевидно, что конечная размерность дерева поиска, а, следовательно, и время его построения, будут во многом зависеть от заданного фактора роста, который по существу характеризует величины приращений координат дочерних точек относительно родительских в конфигурационном пространстве робота. Так, при малых приращениях случайно создаваемые точки будут располагаться достаточно близко друг от друга, определяя соответствующую размерность дерева поиска. С последовательным увеличением приращений удаленность между синтезируемыми точками также будет возрастать, обуславливая повышение скорости распространения ветвей дерева и устойчивое снижение общего количества его вершин, плотность которых обеспечивает

достижение целевого положения. Однако дальнейшее увеличение приращений приводит к постепенному изменению самого характера алгоритма, когда генерация новой точки, осуществляемая в привязке к параметрам родительской, становится по существу эквивалентной выбору случайных координат со значительным разбросом. Соответствующее увеличение протяженности ветвей дерева сопровождается существенным ускорением его роста при пропорциональном снижении плотности покрытия пространства поиска. В связи с этим параметры продолжительности процесса поиска, равно как и конечной размерности дерева, оба из которых определяются тем уровнем плотности покрытия, при котором искомое целевое состояние окажется достижимым, будут неуклонно повышаться. Объективность подобной зависимости конечной размерности дерева поиска от выбора величины случайных приращений координат родительских точек для получения дочерних убедительно подтверждается данными экспериментов, приведенными на рис. 6.

Однако специфика применения метода поисковых случайных деревьев в приложении к манипуляционным роботам сопряжена с необходимостью организации опосредованной проверки отбираемых точек конфигурационного пространства на принадлежность свободным, запретным или целевым областям. Вынужденность подобного подхода обуславливается сложностью отображения особенностей реальной рабочей обстановки в конфигурационном пространстве манипуляционного робота. Поэтому в общем случае оценка той или иной точки конфигурационного пространства предполагает необходимость решения прямой задачи кинематики $X_M = F(c)$ для расчета текущего состояния манипулятора X_M по известным значениям обобщенных координат $c \in (q_1, \dots, q_n)$.

Полученные данные позволяют обеспечить контроль параметров удаленности манипулятора по отношению к объектам внешней среды и заданного целевого положения. В формальной форме записи условия подобной проверки могут быть представлены следующим образом:

$$c \in C_{\text{obs}}, \text{ если } X_{\text{obs}} \cap X_M \neq \emptyset,$$

$$c \in C_{\text{free}}, \text{ если } X_{\text{obs}} \cap X_M = \emptyset,$$

$$c \in C_{\text{goal}}, \text{ если } |X_M - X_{\text{goal}}| < r,$$

где X_M и X_{obs} – геометрические места точек, занимаемых манипулятором, а также объектами внешней среды, выступающими в качестве препятствий; X_{goal} – целевое положение манипулятора; r – априорно установленная точность отработки целевого положения.

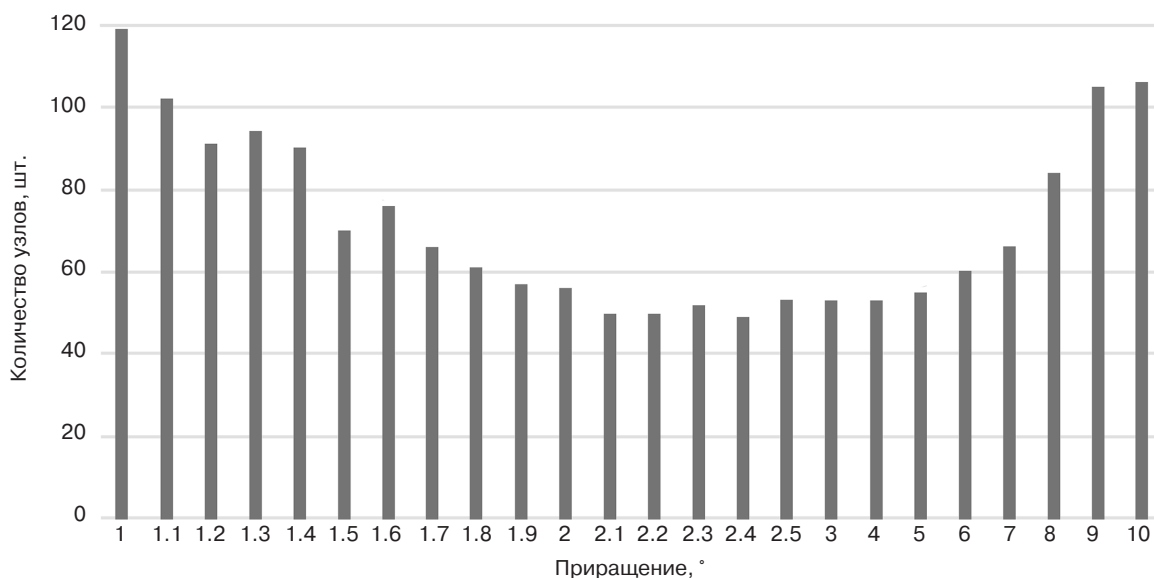


Рис. 6. Изменение размерности дерева поиска в зависимости от величины диапазона случайных приращений координат родительских точек для получения дочерних в конфигурационном пространстве манипулятора

На рис. 7 приведены фрагменты модельных экспериментов по планированию целенаправленных перемещений манипулятора на основе метода поисковых случайных деревьев RRT. Привлечение эвристик, определяющих обоснованный выбор родительских вершин (как, например, ближайших по отношению к целевому состоянию), позволяет существенным образом понизить размерность формируемого дерева (рис. 7б) с одновременным сокращением времени решения задачи.

Инвариантность к размерности конфигурационного пространства, в котором осуществляется поиск необходимых решений, является одним из важнейших достоинств метода поисковых случайных деревьев, открывающих возможности и перспективы его прикладного применения для манипуляторов не только с избыточной, но и изменяемой кинематической структурой.

Так, в частности, результаты моделирования, представленные на рис. 8, со всей очевидностью

подтверждают эффективность применения метода поисковых случайных деревьев на примере планирования целенаправленного перемещения семи-звенного мехатронно-модульного манипуляционного робота в среде с точечным препятствием.

На рис. 9 приведены фрагменты натурных экспериментов по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений реконфигурируемого манипуляционного робота, когда модификация его кинематической структуры осуществляется за счет автоматической стыковки с дополнительным мехатронным модулем. Данные проведенных исследований являются практическим подтверждением реальности разработки унифицированных средств для планирования перемещений и управления движением манипуляционных роботов с учетом требований по инвариантности к составу и оперативным изменениям имеющейся кинематической структуры.



Рис. 7. Фрагменты модельных экспериментов по планированию целенаправленных перемещений манипулятора на основе метода поисковых случайных деревьев: в оригинальном варианте (а); с привлечением эвристики, определяющей обоснованный выбор родительской конфигурации (б)

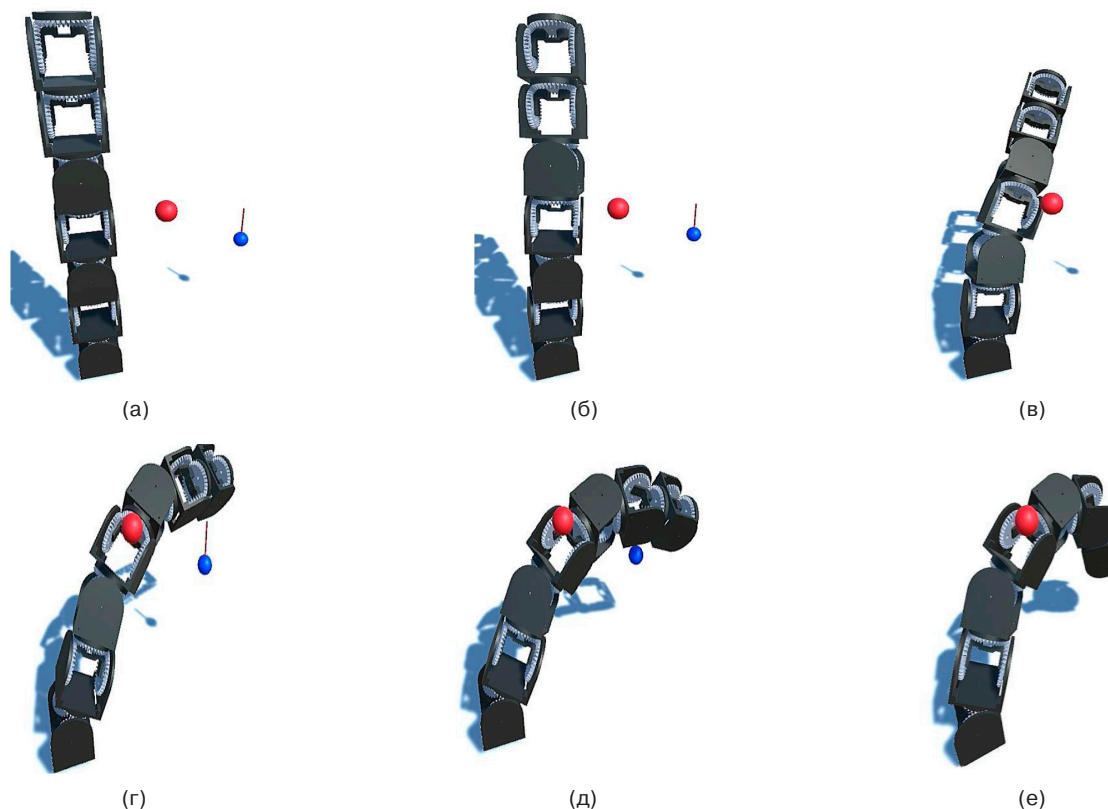


Рис. 8. Фрагменты моделирования целенаправленного перемещения, формируемого на основе метода поисковых случайных деревьев для семизвенного манипулятора в среде с точечным препятствием: уклонение от препятствия при движении к заданному целевому состоянию (а–г); отработка точки требуемого позиционирования с заданным вектором подхода (д–е)

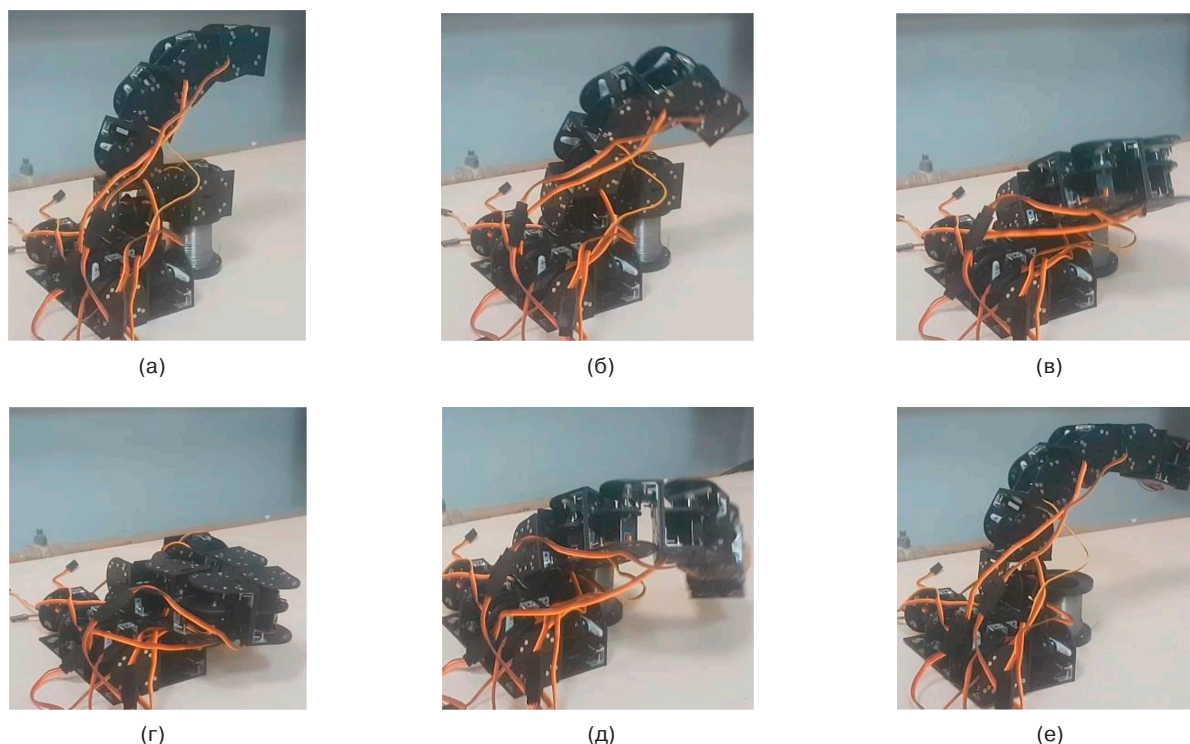


Рис. 9. Фрагменты натурного эксперимента по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений реконфигурируемого мехатронно-модульного манипуляционного робота «АРАКС» (РТУ МИРЭА, Россия): движение манипулятора к месту проведения стыковки с дополнительным мехатронным модулем (а–в); автоматическая стыковка с дополнительным мехатронным модулем (г); возвратное движение манипулятора с измененной кинематической структурой (д–е)

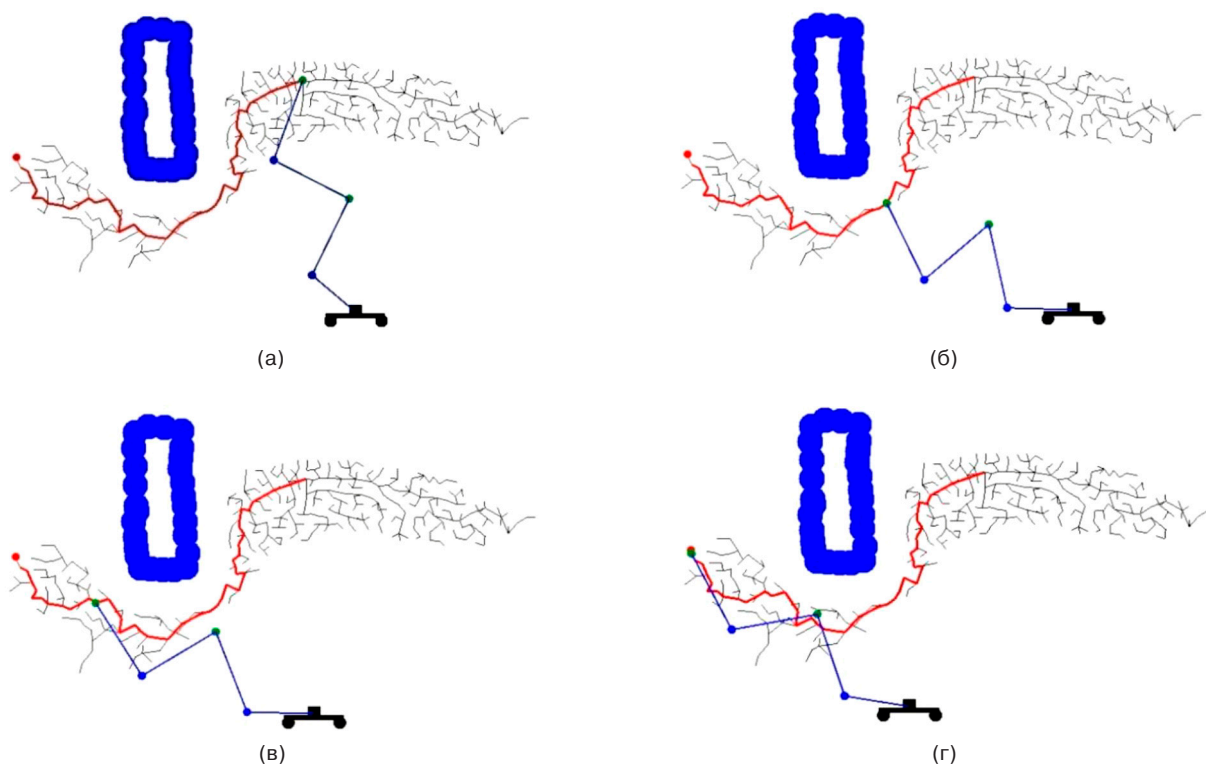


Рис. 10. Использование метода поисковых случайных деревьев для планирования целенаправленных перемещений для манипулятора на мобильном основании

В приложении к специальной робототехнике, многие образцы которой построены по схеме «манипулятор на подвижном основании», применение метода поисковых случайных деревьев представляет особый интерес. Так, например, при автоматическом поиске, захвате и эвакуации объектов целевого интереса задачи планирования перемещений мобильной платформы и манипулятора оказываются тесно взаимосвязанными. Очевидно, что удачный выбор месторасположения платформы будет не только определять характер движения манипулятора, но и обуславливать принципиальную достижимость требуемой точки рабочей сцены с заданными параметрами векторов подхода и ориентации. В частности, как показано на рис. 10, использование метода RRT в своей оригинальной версии обеспечивает возможность планирования перемещений не только для мобильной платформы и манипулятора, рассматриваемых в определенной очередности, но и в случае их представления в общем конфигурационном пространстве в качестве единой системы.

Высокая вычислительная эффективность алгоритмов, реализующих метод поисковых случайных деревьев RRT, позволяет обеспечить решение задач формирования маршрута, не гарантируя, однако, его оптимальности в отношении какого-либо критерия качества. Попытки устранения этого недостатка привели к появлению метода RRT*,

ориентированного на отыскание асимптотически оптимальных решений [7–9]. Ключевые особенности, отличающие метод RRT* от его прототипа, связаны с внесением ряда дополнений и изменений базовых принципов генерации деревьев поиска. Так, в частности, главное нововведение устанавливает понятие стоимости пути в ту или иную вершину дерева.

Отыскание новой вершины c_{new} по ходу построения дерева методом RRT* производится по аналогии с методом RRT. Интеграция найденной вершины c_{new} в состав синтезируемой структуры предполагает выбор такого варианта, при котором стоимость ведущего к ней пути $\text{cost}(c_{\text{init}}, c_{\text{new}})$ по направлению из корневого узла c_{init} имела бы минимальное значение. В этой связи в окрестности с центром в точке c_{new} и заданным радиусом r проводится поиск такой вершины c_{min} , которая отвечает следующему условию:

$$c_{\text{min}} = \operatorname{argmin}_{c \in C^*} (\text{cost}(c_{\text{init}}, c) + \text{cost}(c, c_{\text{new}})),$$

где C^* – подмножество вершин дерева, лежащих внутри окрестности радиуса r с центром в точке c_{new} .

Вершина c_{new} включается в списки элементов дерева как дочерняя по отношению к вершине c_{min} .

Важно отметить, что величина окрестности, в которой осуществляется поиск, определяется

в зависимости от текущего количества вершин дерева и уменьшается по мере его роста [8]:

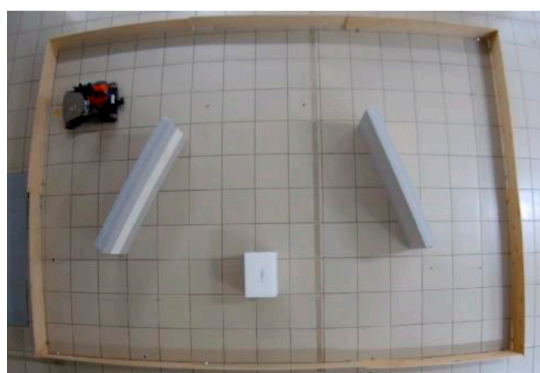
$$r = \gamma(\log(n)/n)^{1/d+1},$$

где d – размерность конфигурационного пространства; n – текущее количество вершин дерева; γ – постоянный коэффициент, определяемый объемом допустимого конфигурационного пространства [7].

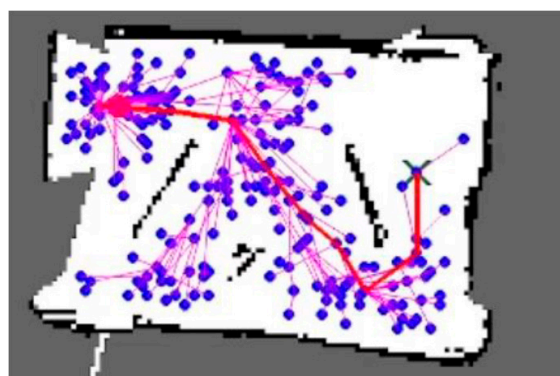
Дальнейшие шаги ставят своей целью локальную оптимизацию структуры дерева в окрестности, выделенной ранее вокруг вершины c_{new} . В рамках их выполнения для каждой вершины $c \in S^*$ анализируется возможность переформирования ведущего к ней пути через вершину c_{new} с учетом фактического изменения стоимости соответствующего маршрута. При снижении величины показателя $\text{cost}(c_{\text{init}}, c)$ производится локальная реструктуризация дерева, при которой рассматриваемая вершина $c \in S^*$ становится дочерней по отношению к c_{new} . Как показано на рис. 11, применение метода RRT* для решения задач планирования перемещений роботов обеспечивает построение значительно более гладких траекторий по сравнению с формируемыми на основе оригинальной версии метода поисковых случайных деревьев.

Незначительные изменения в алгоритмической реализации метода обеспечивают его применимость для решения задач планирования перемещений робота в условиях априорно неизвестных и динамических сцен за счет дополнительных механизмов оперативного перестроения синтезируемого дерева [10–12]. Так, на рис. 12 приведены фрагменты модельных экспериментов по планированию перемещений мобильного робота в условиях априорно неизвестной сцены, когда перестроение дерева поиска осуществляется по мере обнаружения препятствий непосредственно в процессе движения.

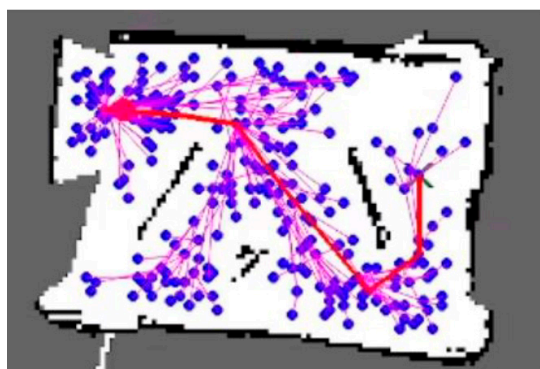
Наряду с классической версией метода поисковых случайных деревьев RRT широкое распространение получила его модификация RRT-Connect, связанная с кардинальной трансформацией порядка формирования маршрутной сети для отыскания траектории целенаправленного движения робота в пространстве возможных конфигураций. По новой схеме своей пошаговой реконструкции модель дискретного пространства поиска представляется совокупностью двух деревьев, поочередный рост которых навстречу друг другу отражает допустимые изменения состояний робота, начиная как от исходного c_{init} , так и от целевого c_{goal} соответственно (рис. 13).



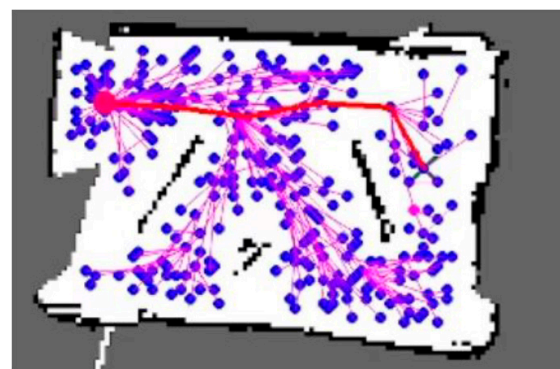
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 11. Фрагменты комплексного эксперимента по планированию перемещений автономного мобильного робота с использованием метода поисковых случайных деревьев RRT*: конфигурация реальной сцены (а); построение и корректировка искомого маршрута в процессе работы алгоритма (б, в, г)

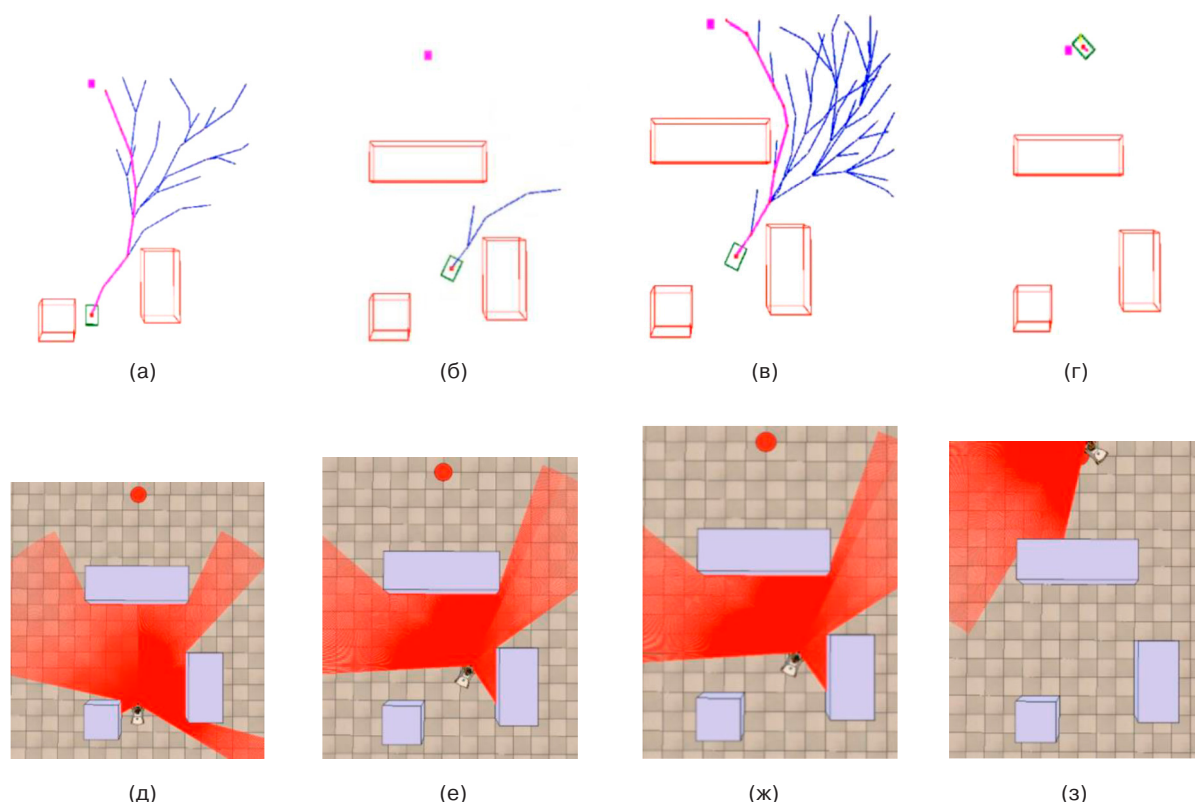


Рис. 12. Фрагменты модельных экспериментов по использованию метода поисковых случайных деревьев для планирования перемещений мобильного робота в условиях априорно неизвестной сцены: перестроение дерева поиска (а, в, д, ж) по мере обнаружения препятствий в процессе движения робота (б, г, е, з)

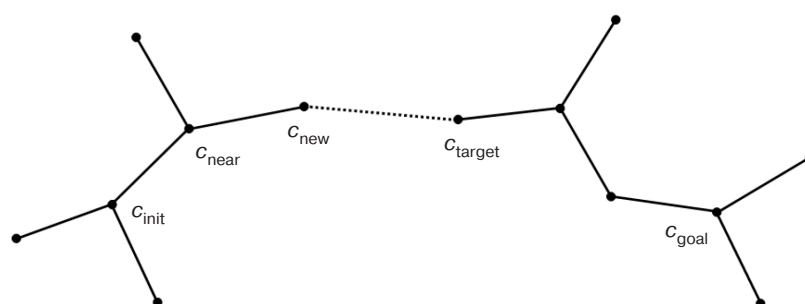


Рис. 13. Двухнаправленное исследование конфигурационного пространства в соответствии с методом поисковых случайных деревьев со встречным ростом (RRT-Connect). c_{target} – это ближайшая вершина для c_{new} , для которых происходит проверка на возможность объединения двух деревьев

Взаимное объединение синтезируемых структур обеспечивается периодическими попытками включения каждой появляющейся вершины одного дерева в состав другого. Как принято считать, метод поисковых случайных деревьев со встречным ростом и его модификации [13] обладают повышенной эффективностью по сравнению с оригинальным прототипом, что полностью подтверждается данными экспериментальных исследований, приведенных

на рис. 14, 15. Возможности, достоинства и отличительные особенности метода RRT-Connect обуславливают перспективность его использования не только для задач планирования целенаправленных перемещений подвижными объектами различных типов в условиях сложных сред, но и для задач группового управления автономными роботами при выполнении операций взаимного сближения и автоматической стыковки.

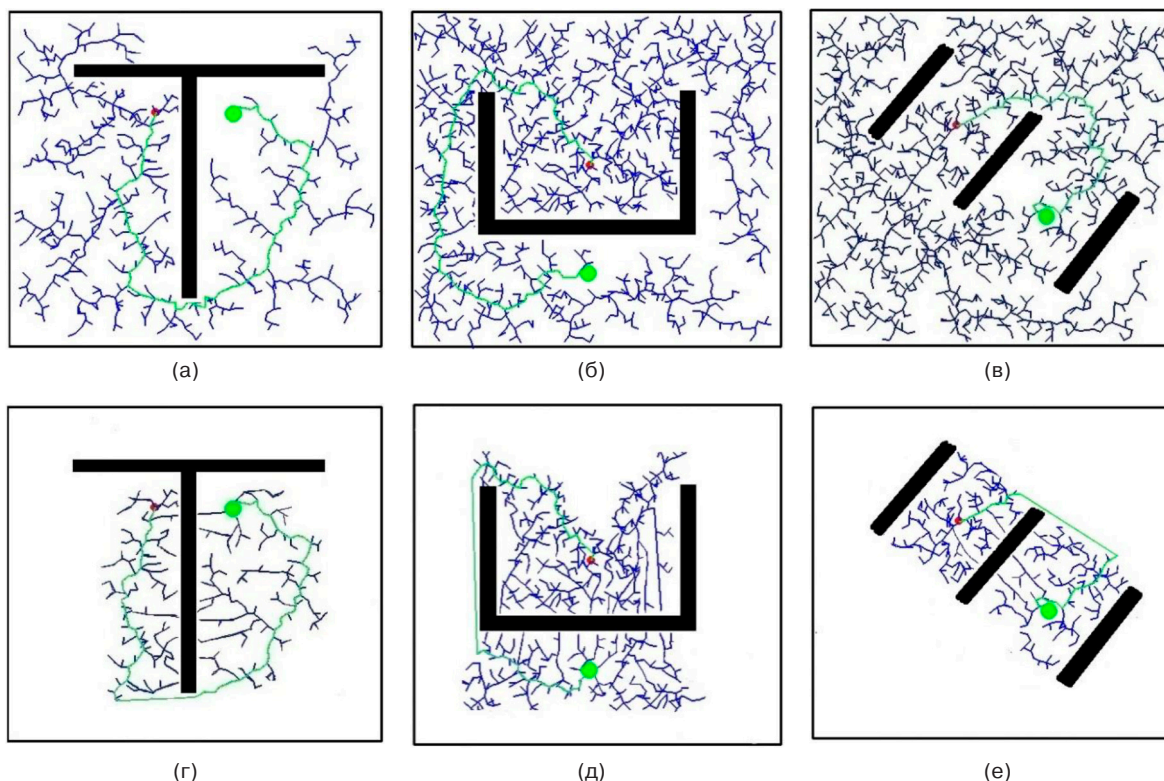


Рис. 14. Результаты экспериментальных исследований по планированию перемещений автономного мобильного робота в среде с препятствиями на основе методов RRT (а–в) и RRT-Connect (г–е)

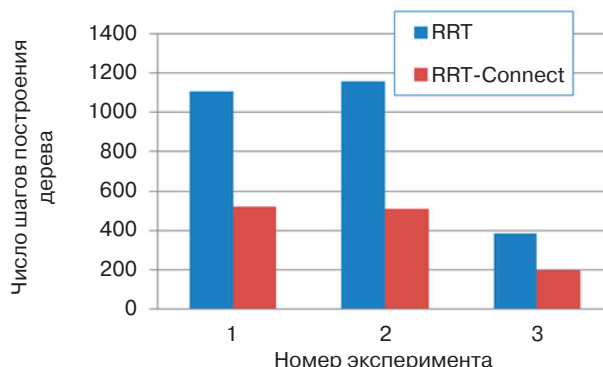


Рис. 15. Результаты экспериментальных исследований по оценке эффективности методов RRT и RRT-Connect для планирования перемещений автономного мобильного робота в среде с препятствиями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор специальной литературы и проведенные экспериментальные исследования убедительно показали, что широкие возможности метода поисковых случайных деревьев позволяют обеспечить решение задач планирования перемещений для мобильных и манипуляционных роботов различных типов и компоновок, включая манипуляторы с избыточной или реконфигурируемой структурой, размещаемые на стационарном или подвижном основании. Обобщение полученных результатов открывает

реальные перспективы использования метода поисковых случайных деревьев в качестве конструктивной основы не только для создания универсальных средств планирования перемещений мобильных робототехнических систем с бортовым манипулятором, но и для решения задач автоматизации стыковки автономных подвижных платформ.

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 X., Luo X., Han B., Chen Y., Liang G., Zheng K. Collision-free path planning method for robots based on an improved rapidly-exploring random tree algorithm. *Appl. Sci.* 2020;10(4):1381. <http://doi.org/10.3390/app10041381>
2. Noreen I., Khan A., Habib Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions. *Int. J. Adv. Computer Sci. Appl.* 2016;7(11). <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114>
3. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*. 2000;293–308. URL: <http://lavalle.pl/papers/LavKuf01.pdf>
4. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized Kinodynamic Planning. *Int. J. Rob. Res.* 2001;20(5):378–400. <https://doi.org/10.1177/02783640122067453>
5. Cao X., Zou X., Jia Ch., Chen M., Zeng Z. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019;156:105–118. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.031>
6. Rybus T. Point-to-Point Motion Planning of a Free-Floating Space Manipulator Using the Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) Method. *Robotica*. 2020;38(6):957–982. <https://doi.org/10.1017/S0263574719001176>
7. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *Int. J. Robotics Res.* 2011;30(7): 846–894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>
8. Solovey K., Janson L., Schmerling E., Frazzoli E., Pavone M. *Revisiting the Asymptotic Optimality of RRT**. 2020. *arXiv*: 1909.09688v2. 13 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09688>
9. Noreen I., Khan A., Habib Z. Optimal path planning using RRT* based approaches: a survey and future directions. *Int. J. Adv. Computer Sci. Appl.* 2016;7(11):97–107. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071114>
10. Adiyatov O., Varol H.A. A novel RRT*-based algorithm for motion planning in Dynamic environments. In: *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2017. P. 1416–1421. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8016024>
11. Yuan Ch., Liu G., Zhang W., Pan X. An efficient RRT cache method in dynamic environments for path planning. *Rob. Auton. Syst.* 2020;131(9):103595. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103595>
12. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The Int. J. Rob. Res.* 1986;5(1): 90–98.
13. Mashayekhi R., Idris M.Y.I., Anisi M.H., Ahmedy I., Ali I. Informed RRT*-Connect: An Asymptotically Optimal Single-Query Path Planning Method. *IEEE Access*. 2020;8:19842–19852. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969316>

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>