

УДК 004.9

Фатеев Алексей Александрович, магистр, МГТУ “Станкин”, г. Москва

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Аннотация

Решение задач планирования перемещения является важным условием для автоматизации производственных, транспортных, медицинских и инфраструктурных систем. Актуальность данных задач существенно возросла в последние годы благодаря прогрессу в области имитационного моделирования, развитию автономных робототехнических комплексов, систем управления беспилотными летательными аппаратами, а также технологий виртуальной и дополненной реальности. В статье представлена классификация существующих математических методов планирования перемещения. Результаты работы могут быть полезны специалистам в области робототехники, систем автоматического управления и компьютерной графики при выборе оптимального алгоритма планирования траекторий.

Annotation

Abstract: Solving motion planning problems is an important condition for the automation of industrial, transportation, medical, and infrastructural systems. The relevance of these problems has increased significantly in recent years due to progress in simulation modeling, the development of autonomous robotic systems, unmanned aerial vehicle control systems, as well as virtual and augmented reality technologies. This paper presents a classification of existing mathematical methods for motion planning. The results of the work may be useful for specialists in robotics, automatic control systems, and computer graphics when choosing an optimal trajectory planning algorithm.

Ключевые слова: *планирование перемещения, классификация алгоритмов, планирование траекторий, мобильная робототехника.*

Keywords: *motion planning, classification of algorithms, trajectory planning, mobile robotics.*

Современные достижения в области робототехники определили роботов как важный элемент технологической инфраструктуры общества. Данные устройства способны выполнять широкий спектр задач в условиях повышенной сложности и опасности, снижая риски для человека. Автономные роботы применяются в самых разных сферах: от бытовых устройств (роботы-пылесосы) до систем автоматической парковки в автомобилях и космических аппаратов. Крупнейшие компании активно разрабатывают беспилотные транспортные средства.

Глобальное планирование пути — это поиск траектории между двумя точками на известной карте. В статических условиях эта задача не представляет трудностей, однако получение оптимизированного глобального пути при снижении временной сложности алгоритма является сложной проблемой. В реальных сценариях существуют узкие коридоры, дверные проёмы, офисы с хаотично расположенными препятствиями. В таких условиях алгоритмы, эффективные в простых средах, могут не сработать или иметь высокую вычислительную сложность, что делает их непригодными для встроенных систем.

Методы планирования перемещения можно классифицировать по разным признакам. В контексте использования интеллектуальных технологий их можно разделить на традиционные методы и эвристические методы. По характеру окружающей обстановки можно разделить методы планирования на методы в статической окружающей среде и в динамической среде. Методы также можно разделить по полноте информации об окружающей среде:

методы с полной информацией (в таком случае говорят о глобальном планировании перемещения) и методы с неполной информацией (обычно речь идет о знании обстановки в непосредственной близости от робота, в этом случае речь идет о локальном планировании перемещения).

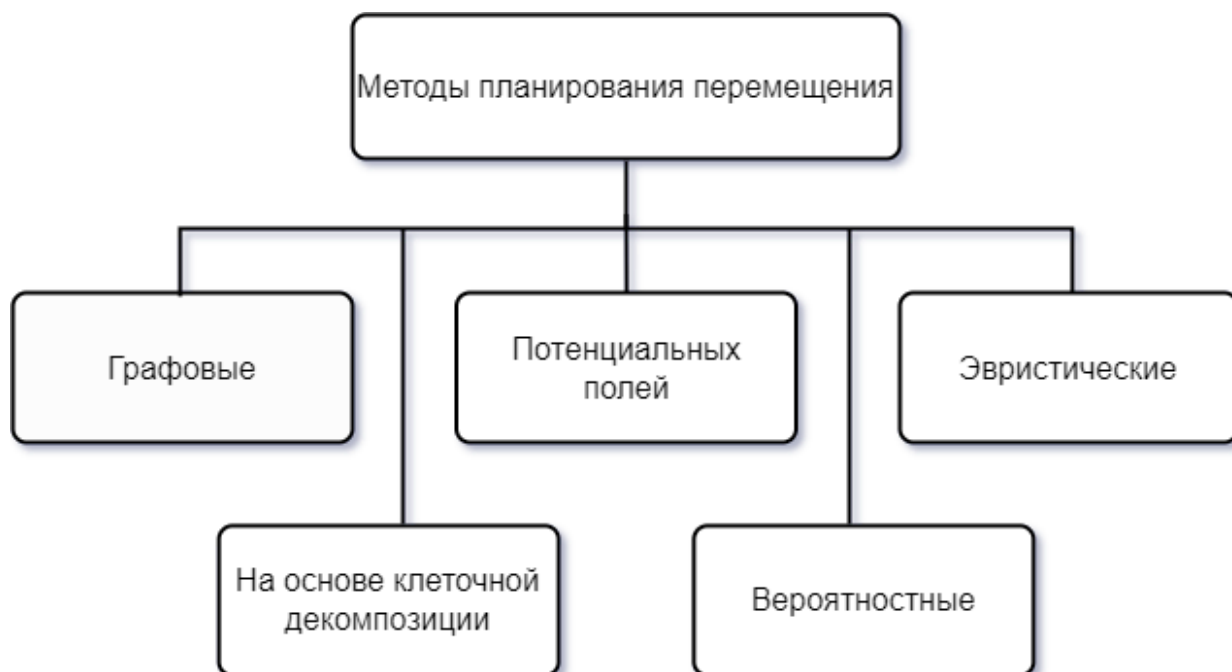


Рисунок 1. Классификация методов планирования перемещения

В последние годы графовый класс методов привлек заметный интерес исследователей. Основные методы этого класса показаны на рис. 2 граф (или дерево) отражает состояния, в которых может находиться робот: каждый узел представляет одно состояние робота. Состоянием может быть положение, угол ориентации, скорость или ускорение робота. Переходы между состояниями характеризуются функцией затрат. Это позволяет выделить путь, который имеет минимальную общую стоимость достижения целевого состояния.

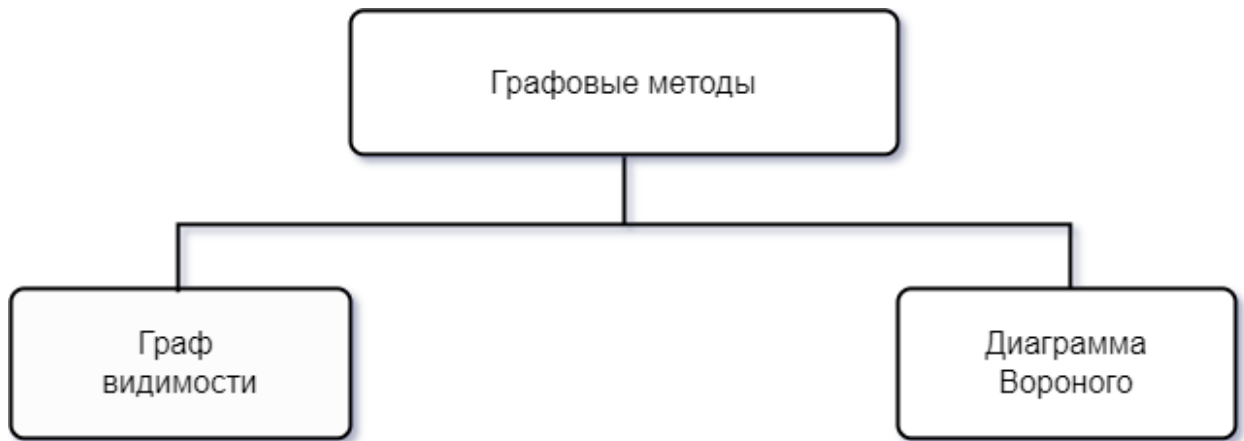


Рисунок 2. Графовые методы

Данные методы удобно использовать в статической окружающей среде, поскольку построение графа подразумевает использование полной информации об окружающей среде, которая должна быть известна заранее.

Один из известных методов организации маршрутных сетей основан на применении графов видимости (Visibility Graphs). В простейших случаях граф видимости строится на множестве вершин полигонов или полиэдров, являющихся геометрическими моделями препятствий сцены, и дополняется начальными и конечными точками маршрутов.

Все вершины попарно соединяются линейными отрезками, которые принимаются в качестве ребер графа при условии попарной “видимости” инцидентных им вершин и отсутствия пересечения с препятствиями сцены. Сложность построения графа видимости для сцены, представленной полигонами с общим числом вершин n , составляет $O(n^2) \log n$, что является довольно затратным для применения в промышленных приложениях.

Избыточное количество порождаемых маршрутов, крайне нежелательное при моделировании сложных сцен, также является недостатком данного метода. Тем не менее, в двумерном окружении с относительно небольшим числом препятствий данный метод может успешно применяться, например, для решения задач поиска кратчайшего пути в сцене.

Более того, существуют попытки использования графов видимости для планирования движения в динамическом окружении.

Диаграмма Вороного (Generalized Voronoi Diagrams) – геометрическое разбиение области на многоугольники, обладающие следующим свойством: для любого центра системы можно указать область пространства, все точки которой ближе к данному центру, чем к любому другому центру системы. Такая область называется многогранником Вороного, или областью Вороного.

Наиболее привлекательное свойство диаграммы Вороного заключается в том, что она является деформационным ретрактом свободного пространства. Тем самым, любой бесконфликтный путь может быть непрерывно отображен в диаграмму Вороного. Более того, метод обеспечивает наибольшее удаление от границ препятствий при условии, что движение осуществляется вдоль ребер диаграммы.

Наивная реализация данного метода обладает высокой вычислительной сложностью $O(n)^4$, где n – общее количество вершин и граней препятствий. Известны эффективные алгоритмы с лучшими асимптотическими оценками сложности, однако они неустойчивы к вырожденным случаям и трудны для надежной реализации.

Одна из простейших идей, возникающих в задаче планирования пути в среде с препятствиями — дискретизация окружающей среды. В различных реализациях этой идеи можно выделить две группы: приближенная и точная клеточные декомпозиции (cell decomposition). Приближенная клеточная декомпозиция реализуется с помощью сетки (grid map), покрывающей пространство.

При точной клеточной декомпозиции окружающую среду делят на клетки, используя грани препятствий. Здесь важную роль играет задача разложения многоугольника на выпуклые области. Хорошо известны такие

подходы точной клеточной декомпозиции, как вертикальное или трапециевидное разложение.

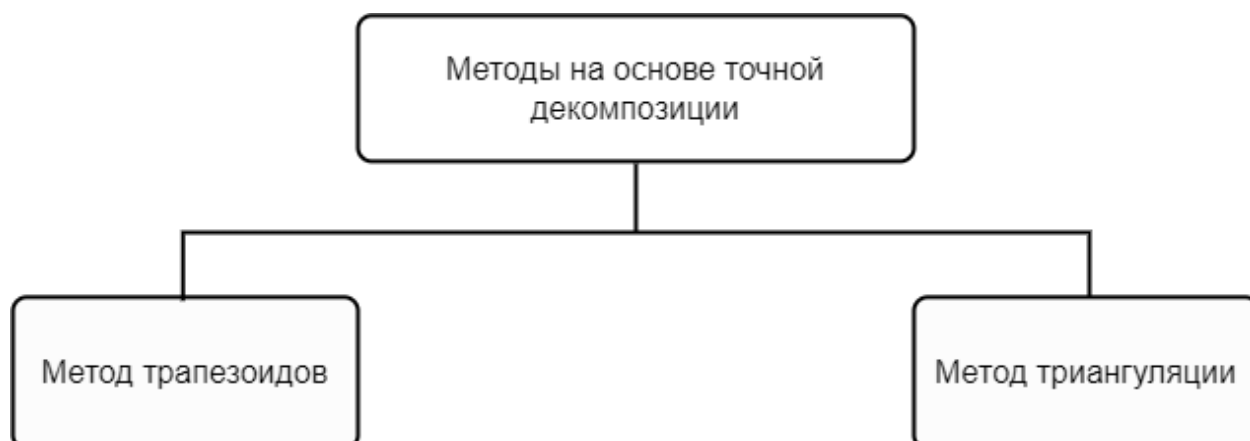


Рисунок 3. Методы на основе точной декомпозиции

Метод трапезоидов. Идея метода заключается в том, чтобы разделить пространство на выпуклые фигуры (трапезоиды), соединяя центр трапезоида и середину общей границы, то путь заведомо не пересекает препятствие (Рис. 4).

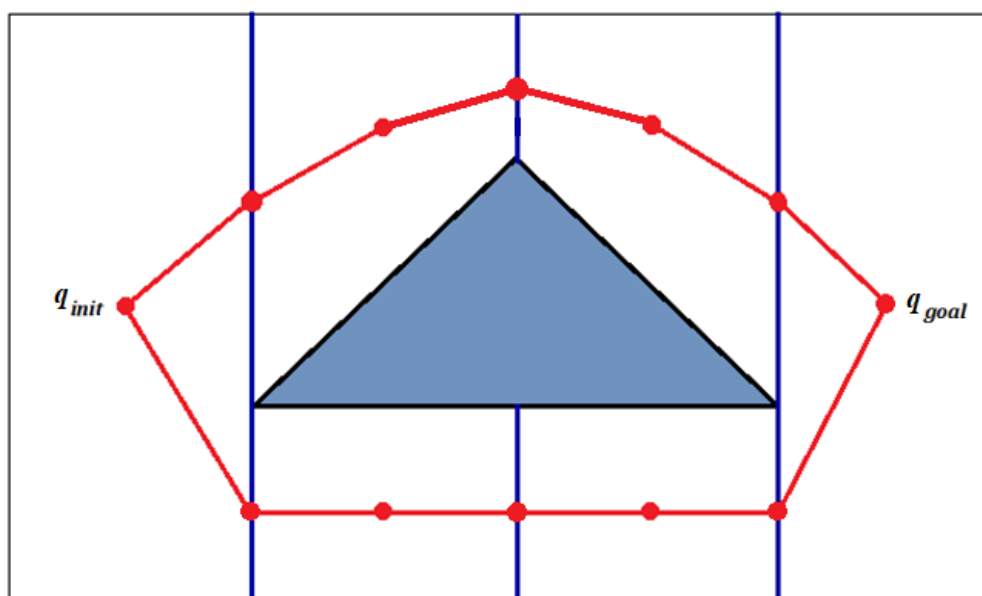


Рисунок 4. Метод трапезоидов

Метод триангуляции. Идея метода заключается в том, чтобы разделить пространство на треугольники, соединяя центр треугольника и середину общей границы, то путь заведомо не пересекает препятствие (см. рис. 5).

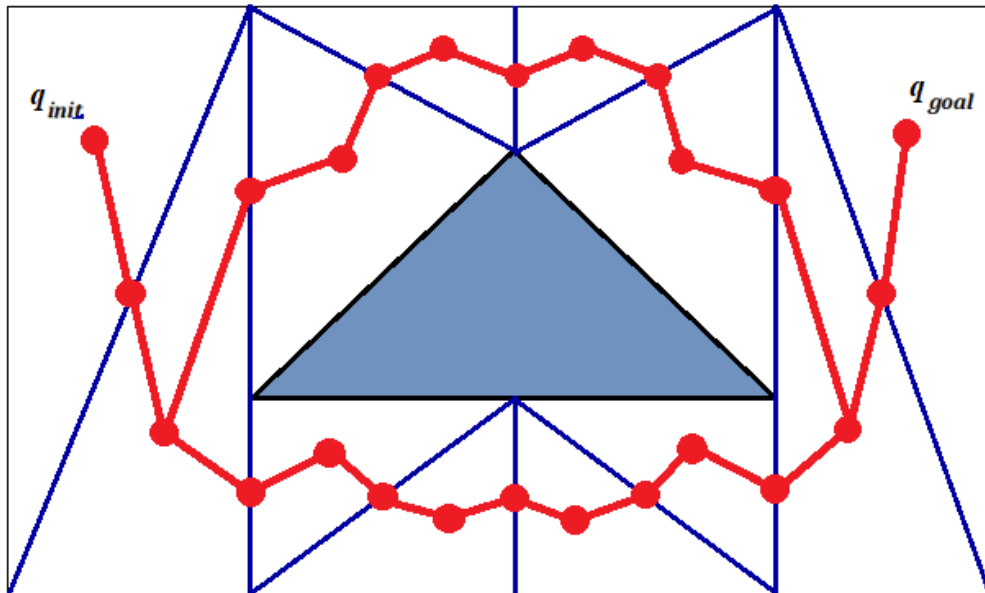


Рисунок 5. Метод триангуляции

Приближенная клеточная декомпозиция реализуется с помощью сетки (grid map), покрывающей пространство. Идея метода заключается в том, чтобы разделить пространство окружающей среды на клетки одинакового размера, каждая клетка характеризуется 0 (свободна от препятствий) или 1 (занята препятствием). Сетка проста в использовании, и её легко создать и поддерживать. Однако метод сеток имеет серьезный недостаток: увеличение трудоемкости при уменьшении шагов сетки. Такое увеличение особенно заметно в окружающей среде большого объема. Предложены разные подходы, основанные на нерегулярных сетках и позволяющие снизить объем вычислений, например дерево квадрантов (quadtree) в двумерном случае или дерево кубов (octree) в трехмерном.

Важное семейство методов планирования движения составляют методы потенциальных полей, первоначально разработанные для навигации мобильных роботов и обхода локальных препятствий в режиме реального времени. Методы основаны на физической аналогии с движением заряженной частицы в электростатическом поле. Препятствия сцены генерируют отталкивающие силы, а целевая точка маршрута – значительную притягивающую силу.

Направление и скорость движения тела определяются градиентом потенциального поля.

Среди методов потенциальных полей самым известным является метод искусственных потенциалов (artificial potential field, APF). Его алгоритм прост, имеет низкую вычислительную сложность и высокую эффективность реализации. Метод впервые предложил в 1986 году Khatib. Векторное поле разделяется на две составляющие: цель движения представляется притягивающим векторным полем, в то время как препятствия — отталкивающим векторным полем. Сложение двух векторных полей позволяет решить две задачи: движение к заданной целевой точке и обход препятствий. В свою очередь отталкивающее векторное поле есть сумма составляющих, каждое из которых описывает отдельное препятствие.

Технология планирования пути по методу искусственных потенциалов проста, что упрощает контроль процесса движения в режиме реального времени. Однако метод имеет существенный недостаток: возможное существование локальных минимумов.

Предложен ряд подходов для ликвидации этого недостатка, но полностью удовлетворительного решения пока нет, а указанные подходы применялись лишь в частных ситуациях. Также отметим, что метод имеет неопределенность в построении потенциальных функций, связанную с выбором коэффициентов функции. Два этих фактора ограничивают широкое использование метода искусственных потенциалов в решении практических задач.

Другим недостатком метода искусственных потенциалов является проблема дрожания. В 1989г Borenstein и Koren предложили метод виртуального силового поля (virtual force field, VFF), сочетающий в себе метод сеток и метод потенциального поля, который может применяться для локального планирования пути.

В многомерном конфигурационном пространстве резкое снижение эффективности традиционных методов детерминированного планирования траектории привело к разработке алгоритмов, основанных на случайной выборке, которые можно разделить на две категории: множественный запрос и одиночный запрос.

Метод вероятностных маршрутных сетей (Probabilistic Roadmap Method, PRM) и быстрое исследование случайных деревьев (Rapidly-exploring Random Trees, RRT) широко применяются для решения задач поиска путей как в локальной, так и глобальной постановке. Как и в случае ранее рассмотренных детерминированных методов маршрутных сетей, процесс планирования движения включает фазу анализа сцены и фазу построения пути.

Отличительной особенностью в данном случае является способ формирования сети из локальных маршрутов, полученных в результате сэмплирования конфигурационного пространства.

Известный недостаток рассмотренного метода связан с недостаточно плотным покрытием, что может приводить к нарушению связности маршрутной сети в узких областях допустимых конфигураций. Решение проблемы путем простого увеличения количества испытаний крайне нежелательно, поскольку определение столкновений является вычислительно затратной операцией. Кроме того, успешные испытания приводят к разрастанию маршрутной сети и увеличению размерности решаемых задач поиска соседних вершин и верификации переходов. Использование индексных структур, в частности kd-деревьев, отчасти решает проблему деградации производительности. Другими недостатками метода является сложность выбора производительности и параметров, таких как радиус поиска соседних вершин и предельное количество инцидентных ребер. Данные параметры существенно влияют на качество маршрутной сети и часто требуют тонкой настройки с учетом специфики прикладной задачи.

PRM и его варианты подходят для сценариев с несколькими запросами, где случайно выбранные дорожные карты предоставляют глобальные ориентиры для поиска возможного пути. Когда они применяются к планировщику с одним запуском, производительность по-прежнему остается неудовлетворительной, поскольку на дорогостоящую предварительную обработку уходит больше времени на вычисления. Были предложены различные подходы для эффективного решения задач с одним запросом, включая быстрое исследование случайных деревьев (RRT). Алгоритм создает древовидную структуру данных для постепенного изучения неизвестного конфигурационного пространства.

Поскольку в рамках метода RRT отсутствует предварительная обработка, эффективность обычно высока в сценариях с одним запросом. Кроме того, общий алгоритм RRT прост в реализации. Поэтому он привлек внимание сообщества робототехников и нашел широкое применение в течение последнего десятилетия.

Задача планирования пути является одной из подзадач автоматического управления роботом. Робот должен иметь способность решать задачу планирования пути в реальных условиях окружающей среды без вмешательства человека. Естественно, в этой ситуации использовать алгоритмы поведения, встречающиеся в живой природе — так называемые биоинспирированные алгоритмы. Эти алгоритмы имитируют поведение или мышление человека, а также некоторых биологических сообществ. Среди биоинспирированных алгоритмов выделяют: роевой интеллект, «муравьиный» алгоритм, метод роя частиц, «пчелиный» алгоритм, а также генетические и эволюционные алгоритмы. Как правило, эти алгоритмы формулируют как алгоритмы минимизации (или поиска), они относятся к эвристическим алгоритмам, так как не имеют строгого математического обоснования. Рассмотрим некоторые из этих алгоритмов.

Муравьиный алгоритм. Первая версия алгоритма, названная «алгоритмом оптимизации муравьиной колонии» (ant colony optimization, т. е. ACO), предложена Marco Dorigo в 1992 году и была направлена на поиск оптимального пути в графе. В реальном мире муравьи (первоначально) движутся в случайном порядке и, найдя пищу, возвращаются в свою колонию, пометая путь феромоном. Если другие муравьи находят такие тропы, они, вероятнее всего, пойдут по ним. Если эти муравьи в конечном итоге находят источник питания, то, возвращаясь, они повторно метят путь. Со временем феромон начинает испаряться, тем самым его привлекательная сила уменьшается. Чем больше времени требуется для прохождения пути до цели и обратно, тем сильнее испаряется феромон. На коротком пути будет более быстрым и, как следствие, сила феромона остаётся высокой. Испарение приводит к тому, что самый короткий путь от колонии до источника пищи, найденный одним из муравьев, будет более предпочтительным для других муравьев, они, скорее всего, пойдут по этому пути, а их метки в конечном итоге приведут всех муравьев к этому пути. Метод роя частиц (МРЧ) был предложен в 1995 г Kennedy, Eberhart как попытка имитации движения стаи птиц в контексте «коллективного интеллекта» биологических популяций. МРЧ отражает способность стаи птиц, рыб и других биологических популяций адаптироваться к окружающей среде, искать пищевые ресурсы и избегать хищников путем обмена информацией. В МРЧ оптимизируют функцию, поддерживая популяцию возможных решений (каждое имитирует одну птицу), называемых частицами, и перемещая эти частицы в пространстве решений согласно простой формуле. Перемещения подчиняются принципу наилучшего найденного в этом пространстве положения, которое постоянно изменяется при нахождении частицами более выгодных положений. Таким образом, возникает метод оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции.

В статье представлена классификация методов планирования перемещения мобильных роботов: графовых методов, клеточной декомпозиции, метода

искусственных потенциальных полей, вероятностных (PRM, RRT) и биоинспирированных алгоритмов. Для каждого подхода выявлены достоинства, недостатки и условия эффективного применения. Выбор метода определяется характером окружающей среды, полнотой информации и доступными вычислительными ресурсами.

Список литературы

1. Choset H., Lynch K., Seth H., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. Cambridge: MIT Press, 2005. 606 p.
2. Geraerts R., Overmars M.H. Creating high-quality paths for motion planning // The International Journal of Robotics Research. 2007. Vol. 26. No. 8. P. 845–863. DOI: 10.1177/0278364907080001.
3. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. 2011. Vol. 30. No. 7. P. 846–894. DOI: 10.1177/0278364911400001.
4. Kavraki L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1996. Vol. 12. No. 4. P. 566–580. DOI: 10.1109/70.508439.
5. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The International Journal of Robotics Research. 1986. Vol. 5. No. 1. P. 90–98. DOI: 10.1177/027836498600500106.
6. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2006. 842 p.
7. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects // Algorithmic and Computational Robotics: New Directions. Natick: A K Peters, 2001. P. 293–308.

8. Kuffner J.J., LaValle S.M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000. Vol. 2. P. 995–1001. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.

References

1. Choset H., Lynch K., Seth H., Kantor G., Burgard W., Kavraki L.E., Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementation. Cambridge: MIT Press, 2005. 606 p.

2. Geraerts R., Overmars M.H. Creating high-quality paths for motion planning // The International Journal of Robotics Research. 2007. Vol. 26. No. 8. P. 845–863. DOI: 10.1177/0278364907080001.

3. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning // The International Journal of Robotics Research. 2011. Vol. 30. No. 7. P. 846–894. DOI: 10.1177/0278364911400001.

4. Kavraki L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1996. Vol. 12. No. 4. P. 566–580. DOI: 10.1109/70.508439.

5. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // The International Journal of Robotics Research. 1986. Vol. 5. No. 1. P. 90–98. DOI: 10.1177/027836498600500106.

6. LaValle S.M. Planning Algorithms. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2006. 842 p.

7. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects // Algorithmic and Computational Robotics: New Directions. Natick: A K Peters, 2001. P. 293–308.

8. Kuffner J.J., LaValle S.M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // Proceedings of the 2000 IEEE International

Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000. Vol. 2. P. 995–1001. DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844730.