

РАЗДЕЛ IV. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.05

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА RRT ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ОБЪЕЗДЕ ПРЕПЯТСТВИЙ

^{1,2}И.З. Ахметзянов, ^{1,2}М.А. Ионов, ^{1,2}В.С. Карабцев

¹ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;

²Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена актуальной проблеме планирования траектории движения беспилотного транспортного средства. Представлены результаты разработки, программной реализации и исследования алгоритма построения квазиоптимальной траектории движения беспилотного транспортного средства в известном окружении. В качестве основы был использован стандартный алгоритм RRT для построения пути между двумя точками. Для повышения эффективности в базовый алгоритм были введены следующие модификации: ориентирование на точку финиша, удаление промежуточных вершин, учёт кинематических ограничений при поворотах. Ориентирование на точку финиша позволяет с некоторой вероятностью проверить возможность прямого соединения последней точки, найденной алгоритмом RRT, с точкой финиша. Это значительно сокращает время поиска траектории, так как в базовом алгоритме RRT поиск точки осуществляется до тех пор, пока случайно сгенерированная точка не окажется в окрестности финиша. Удаление промежуточных вершин осуществляется для участков, на которых можно спрямить траекторию за счет удаления промежуточных вершин без пересечения препятствий. Реализован учёт кинематических ограничений на минимальный радиус поворота транспортного средства на основе кривых Дубинса. В результате всех указанных модификаций алгоритма его быстродействие возросло примерно на 30% по результатам компьютерного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: алгоритмы, беспилотные автомобили, планирование движения, поиск пути, робототехника, кривые Дубинса, RRT.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всём мире ведутся активные работы, направленные на создание автономных транспортных средств и различных робототехнических комплексов на их основе. При этом в процессе их проектирования возникает целый комплекс задач как чисто технического, так и алгоритмического характера. В качестве примера можно указать проблему планирования траектории движения, которую необходимо быстро решать в условиях ограниченности вычислительных ресурсов бортовой информационно-управляющей системы [1, 2].

На сегодняшний день существует множество решений задачи планирования траектории движения. Перспективный подход реализуется в алгоритме быстрорастущего случайного дерева (Rapidly-exploring Random Tree, RRT) [3, 4]. Он имеет множество различных модификаций, способных ускорить процесс поиска и оптимизировать получаемую траекторию [5].

Наиболее часто алгоритм RRT применяется в задачах, где заранее известно расположение препятствий и необходимо найти маршрут передвижения транспортного средства, избегая столкновений с этими препятствиями

[6]. Примером практического применения может выступать движение авторобота по бездорожью, где в качестве непреодолимых стационарных препятствий могут выступать овраги, водоемы, лесные массивы и т.д.

В данной работе на основе анализа алгоритма RRT предлагается его модификация, в которой устранены некоторые недостатки базового варианта [7]. Выполнена также оценка производительности модифицированного алгоритма.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

RRT относится к типу алгоритмов, основанных на «вероятностных дорожных картах» (Probabilistic Roadmap Methods, PRM). При работе с PRM алгоритмами необходимы следующие входные данные:

- координаты старта и финиша;
- карта препятствий.

На выходе формируется пройденный транспортным средством путь (траектория движения) на данной карте.

Алгоритм RRT включает в себя следующие шаги:

1. Добавить в пустое дерево поиска начальную точку.
2. Выбрать точку C_n , лежащую в C_{Free} .
3. Найти в дереве T вершину C_i , ближайшую к C_n .
4. Построить путь $P_{i,n}$ от C_i к C_n .
5. Проверить на наличие пересечений препятствий путь $P_{i,n}$.
6. Если пересечения препятствий не были найдены, добавить C_n и $P_{i,n}$ в дерево T .
7. Если C_n не является целевой точкой, перейти к шагу 2.

Здесь C_n – некоторая точка в области поиска траектории; C_{Free} – свободная от препятствий область; T – дерево найденных вершин; $P_{i,n}$ – отрезок от найденной точки до ближайшей вершины C_i в дереве T .

В приведенном алгоритме на втором этапе выбирается точка из пространства, не занятого препятствиями. Эта точка выбирается случайным образом, что обеспечивает сходимость алгоритма. Функция распределения вероятности, которая используется для выбора новой точки, может варьироваться. Чаще всего используется равномерное распределение для выбора новых точек [8].

RRT имеет преимущество в скорости поиска траекторий по сравнению с другими распространенными алгоритмами, например A* [9]. Кроме того, следует отметить, что для него существует большое количество различных

модификаций, комбинируя которые, можно получать последовательности для решения различных задач.

Вместе с тем базовый вариант алгоритма RRT имеет ряд недостатков, которые затрудняют его использование для построения траекторий движения транспортных средств.

Первым недостатком является низкое быстродействие алгоритма. Время построения траектории движения должно быть достаточно малым, чтобы обеспечить автономному транспортному средству возможность динамического перестроения маршрута движения в случае необходимости.

Вторым недостатком будет извилистость траектории и, как следствие, большой пройденный путь. На рис. 1 представлен пример, демонстрирующий результат работы алгоритма RRT.

Третий недостаток заключается в том, что в RRT нет учета кинематических ограничений транспортного средства, из-за чего получаемая траектория часто является непроезжаемой.

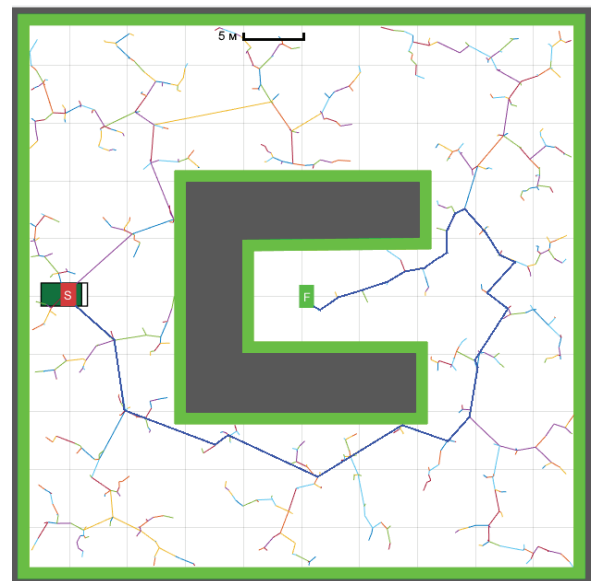


Рисунок 1 – Результат работы алгоритма RRT:
S – старт, F – финиш
Illustration 1 – The RRT algorithm results: S – start, F – finish

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для устранения выявленных недостатков можно предложить следующие решения.

Для решения первой проблемы используется алгоритм ориентации на точку финиша [10]. Этот алгоритм основывается на том, что на каждой итерации построения дерева, вместо случайного состояния с некоторой вероятностью может быть взята либо точка финиша,

либо случайное состояние из окрестности точки финиша, радиус которой равен расстоянию по прямой от точки финиша до ближайшей вершины дерева. Эта стратегия рассчитана на то, чтобы дерево в большей части «росло» в направлении финиша [11]. Данный метод также позволяет определить момент, когда для завершения построения пути остается только соединить вершину дерева с точкой финиша.

Для устранения второго недостатка использован алгоритм удаления промежуточных вершин. Несмотря на то что при использовании ориентирования на точку финиша траектория в некоторой степени выпрямляется [12], тем не менее она в общем случае содержит множество избыточных вершин. Для получения более короткой траектории необходимо добавить алгоритм удаления промежуточных вершин. Он рассчитан на то, что некоторые вершины получившейся траектории RRT можно соединить напрямую и при движении автомобиля не столкнется с препятствием.

Алгоритм удаления промежуточных вершин включает в себя следующие шаги [13]:

1. Задать индекс $i : i = 1$.
2. Задать индекс $j : j = N$.
3. Если $i < N$, перейти к шагу 4, иначе перейти к шагу 10.
4. Если $i < j$, перейти к шагу 5, иначе перейти к шагу 3.
5. Если есть препятствие между вершинами $path(i)$ и $path(j)$, то перейти к шагу 6, иначе перейти к шагу 7.
6. Уменьшить j на 1 и вернуться к шагу 4.
7. Добавить вершину $path(j)$ в конец массива $newpath$: $newpath = [newpath, path(j)]$.

8. Задать индекс $i : i = j$; вернуться к шагу 9.
9. Задать индекс $j : j = N$; вернуться к шагу 3.
10. Завершить алгоритм.

Здесь $path$ – массив вершин исходной траектории длиной N ; $newpath$ – результирующий массив вершин длиной $N_n : N_n \leq N$; i, j – индексы для обхода вершин в массиве $path$.

В приведенном алгоритме выполняется обход вершин траектории с двух концов и формирование нового пути путем последовательного включения в него минимально возможного числа вершин исходного массива, при котором исключается пересечение пути с препятствиями.

Для решения третьей проблемы – учета кинематических ограничений транспортного средства – применяется алгоритм построения кривых Дубинса [14].

Кривые Дубинса [15, 16] позволяют соединить с помощью кусочной кривой два положения транспортного средства – $q_i = (x_i, y_i, \theta_i)$ и $q_f = (x_f, y_f, \theta_f)$ на плоскости (x, y – координаты, θ – ориентация). Кривизна такого пути ограничена снизу параметром R_{min} , представляющим собой минимальный радиус поворота автомобиля [17, 18].

Путь Дубинса строится из множества кривых (рис. 2). Это множество состоит из шести элементов, которые обычно называются кривыми Дубинса [19, 20]:

$$D = \{LSL, RSR, RSL, LSR, RLR, LRL\},$$

где S представляет сегмент прямой линии, L обозначает дугу влево, R – дуга вправо.

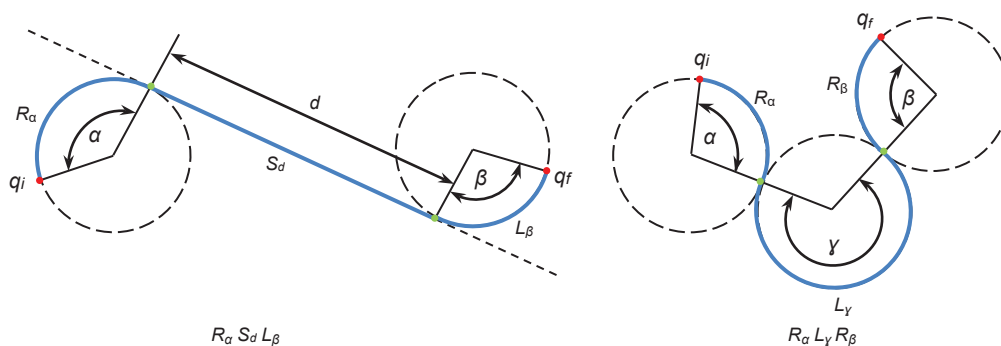


Рисунок 2 – Примеры кривых Дубинса
Illustration 2 – The examples of Dubins' curves

ОБСУЖДЕНИЕ

Программный модуль для определения траекторий движения автономного транспортного средства был разработан в среде MATLAB. В него включены возможность построения пользователем произвольных препятствий и возможность сохранения и загрузки полученных карт. После построения карты препятствий пользователю необходимо указать начало и конец для искомой траектории, после чего можно запускать алгоритм поиска маршрута.

Моделирование проводилось на компьютере следующей конфигурации:

- процессор: AMD FX 4100;
- частота процессора: 3600 МГц;
- объем оперативной памяти: 4 Гб;
- видеокарта: GeForce GTX 650;
- операционная система: Windows 10 Pro.

Для сравнительной оценки быстродействия алгоритма была проведена серия тестовых расчетов траектории объезда препятствий с одинаковыми входными данными. В ходе тестов расчет траектории выполнялся с помощью обычного и модифицированного вариантов алгоритма RRT. Результаты указаны в таблице

По приведенной таблице видно, что скорость поиска траектории по модифицированному алгоритму в среднем на 30% выше, чем для базового варианта алгоритма RRT, несмотря на то, что в модифицированном алгорит-

ме тратится дополнительное время на сокращение траектории и на учет кинематических ограничений.

Предлагаемая модификация алгоритма поиска траектории движения беспилотного транспортного средства включает три этапа:

1. Поиск траектории с помощью алгоритма RRT, модифицированного по принципу ориентирования на точку финиша.

2. Сокращение длины траектории с помощью удаления вершин.

3. Корректировка траектории для учета кинематических ограничений с помощью кривых Дубинса.

На рис. 3 – 5 отображены этапы работы программного модуля для поиска траекторий.

Первый этап был выполнен за 3,49 с, длина полученной траектории составляет 69,7 м.

На второй этап было затрачено 0,98 с, а длина сокращенной траектории 58,7 м., что позволяет сделать вывод об эффективности алгоритма удаления вершин.

На третий этап было затрачено 0,61 с. В результате построения траектории с учетом кинематических ограничений длина пути немного увеличилась и составила 61,5 м., но в итоге она все же меньше чем у траектории, получившейся на первом этапе. Траектория, показанная на рис. 5, построена при значении минимального радиуса поворота 5 м, что примерно соответствует кинематическим параметрам малолитражного легкового автомобиля.

Таблица

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБЫЧНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМОВ RRT

Table

TEST RESULTS OF THE SIMPLE AND MODIFIED RRT ALGORITHMS

№ теста	Параметр	RRT	Модифицированный RRT
1	Время расчета (с)	23,807 1	4,296 6
	Длина траектории (м)	80,1	70,1
	Количество непроходимых поворотов	7	0
2	Время расчета (с)	9,065 2	12,949 0
	Длина траектории (м)	76,6	69,8
	Количество непроходимых поворотов	4	0
3	Время расчета (с)	17,741 5	6,336 0
	Длина траектории (м)	73,2	67,9
	Количество непроходимых поворотов	2	0
4	Время расчета (с)	7,044 2	13,659 6
	Длина траектории (м)	75,4	68,5
	Количество непроходимых поворотов	6	0
5	Время расчета (с)	86,923 3	12,647 3
	Длина траектории (м)	71,3	69,3
	Количество непроходимых поворотов	5	0

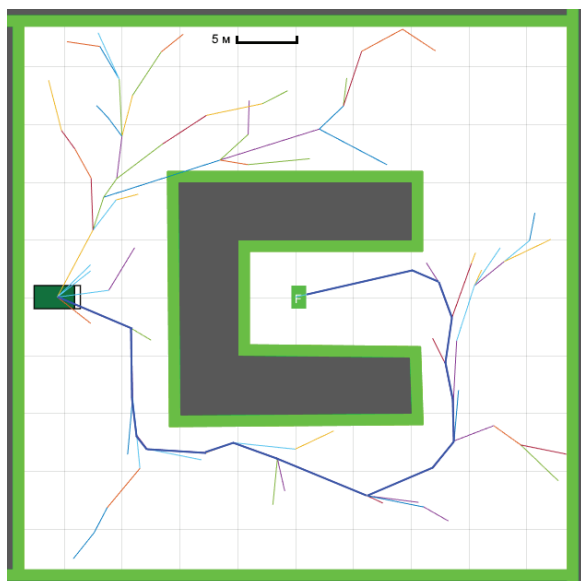


Рисунок 3 – Результат работы алгоритма RRT при ориентировании на точку финиша
Illustration 3 – The RRT algorithm results oriented to the finish

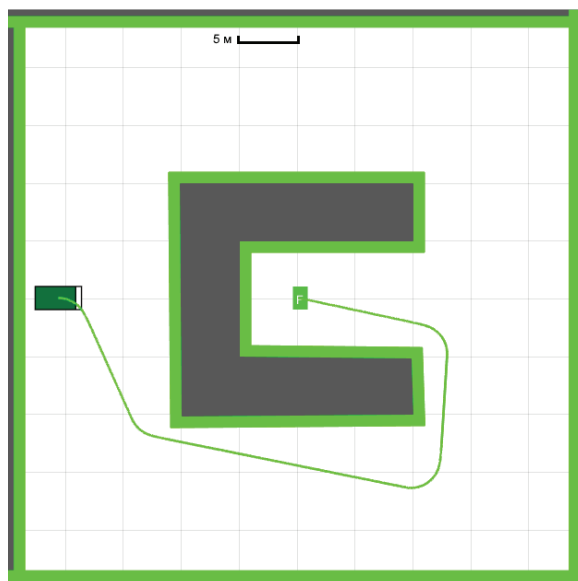


Рисунок 5 – Результат работы алгоритма для построения кривых Дубинса
Illustration 5 – The algorithm results for Dubin's curves construction

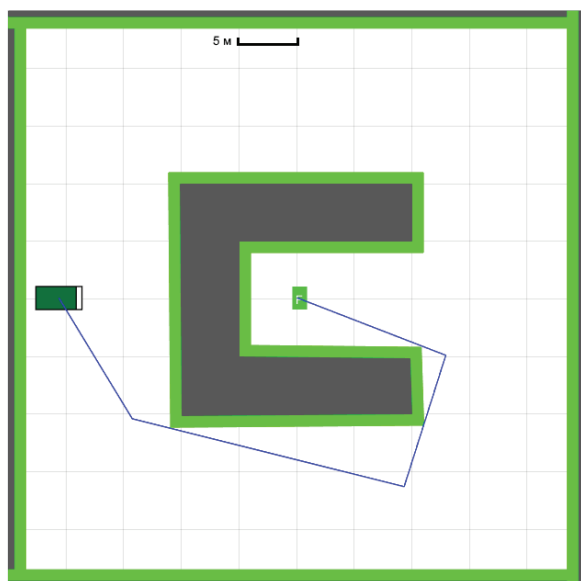


Рисунок 4 – Результат работы алгоритма удаления вершин
Illustration 4 – The algorithm results of the Vertex' moving off

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена модификация алгоритма поиска маршрута движения беспилотного транспортного средства в известном окружении Rapidly-exploring Random Tree. Модифицированный алгоритм позволяет формировать квазиоптимальные траектории объезда препятствий. Выполненная оценка произво-

дительности модифицированного алгоритма в целом показала, что скорость работы алгоритма выросла в среднем на 30% в сравнении с базовым вариантом алгоритма. При этом сокращается длина получаемых траекторий, учитываются кинематические ограничения транспортного средства. В дальнейшем предполагается усовершенствовать алгоритм для учета желаемой ориентации корпуса транспортного средства в конечной точке маршрута. Кроме того, планируется проведение тестирования разработанного алгоритма на вычислительной платформе реального времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Polden J., Pan Z., Larkin N., Van Duin S. Path Planning with a Lazy Significant Edge Algorithm (LSEA). International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, vol. 10, pp. 1–8.
2. Guang Yang and V. Kapila, Optimal path planning for unmanned air vehicles with kinematic and tactical constraints. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002, vol. 2, pp. 1301–1306.
3. T. Kunz and M. Stilman, Kinodynamic RRTs with fixed time step and best-input extension are not probabilistically complete. Algorithmic Foundations of Robotics XI, pp. 233–244, Springer, 2015.
4. D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe, and S. Rock, Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles. The International Journal of Robotics Research, vol. 21, pp. 233–255, 2002.
5. LaValle S.M. Planning algorithms. Cambridge University Press. University of Illinois, p. 786.
6. Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J. Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29, pp. 485–501.
7. Lindemann S. R. and LaValle S. M. Incrementally

reducing dispersion by increasing Voronoi bias in RRTs. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, vol. 4, pp. 3251–3257.

8. Пыхтин П.С., Камаев В.А., Крыжановский А.И., Никляев И.Ю., Пыхтин П.С. Планирование траектории движения мобильного робота с использованием градиента функции исследования областей пространства конфигураций // Кибернетика и программирование. 2014. № 1. С. 48–60.

9. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions, 1968, vol. 4, issue 2, pp. 100–107.

10. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized Kinodynamic Planning. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol. 1, pp. 473–479.

11. Schwarzer F., Saha M., Latombe J.-C. Adaptive Dynamic Collision Checking for Single and Multiple Articulated Robots in Complex Environments. IEEE Transactions on Robotics, 2005, pp. 338–353.

12. Boor V., Overmars M.H., Stappen A.F. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999, vol. 1, pp. 473–479.

13. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика.

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.

14. Minas AC, Urrutia S. Discrete Optimization Methods to Determine Trajectories for Dubins' Vehicles. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2010, vol. 36, pp. 17–24.

15. Dubins L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics, 1957, vol. 79, No. 3.

16. Chitsaz H. and LaValle S. M. Time-optimal Paths for a Dubins Airplane. Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2007, pp. 2379–2384.

17. K. Savla, E. Frazzoli and F. Bullo. Traveling Salesperson Problems for the Dubins Vehicle. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, No. 6, Jul. 2008, pp. 1378–1390.

18. Wang D., F. Qi. Trajectory Planning for a Four-Wheel-Steering Vehicle, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001, pp. 3320–3325.

19. Hota S, Ghose D. A. Modified Dubins Method for Optimal Path Planning of a Miniature Air Vehicle Converging to a Straight Line Path. Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference, 2009, pp. 2397–2402.

20. Dubins L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. American Journal of Mathematics, 1957, 79, pp. 497–516.

THE MODIFICATION OF THE RRT ALGORITHM FOR THE OPTIMAL TRAJECTORY DETERMINING OF THE MOTION VEHICLE WITH THE OBSTACLES AVOIDANCE

I.Z. Akhmetzyanov, M.A. Ionov, V.S. Karabceev

ANNOTATION

The problem of planning the motion path of an unmanned vehicle is presented in the article. The results of development and the software implementation, and the research of the algorithm for constructing quasi-optimal trajectory of an unmanned vehicle in a known environment are shown. The RRT standard algorithm as the basis for the path construction between two points is used in the article. To improve the efficiency, the basic algorithm of the following modifications such as the orientation to the finish point, the removal of intermediate vertices are introduced. The orientation to the finish point allows to check the possibility of the direct connection to the last point which could be found by the RRT algorithm. The orientation also reduces the trajectory searching, because the basic RRT algorithm searches the point until a randomly generated point appears in the vicinity of the finish line. The deleting process of the intermediate vertices is carried out for such route sections where the trajectory could be straighten by the intermediate vertices' removing without crossing the obstacles. The consideration of the kinematic constraints on the minimum turning radius of the vehicle, which is based on the Dubins curves is implemented in the article. As a result of all these algorithm modifications, its performance has been increased about 30% according to the computer simulation results.

KEYWORDS: algorithms, autonomous vehicles, motion planning, route search, robotics, Dubins curves, RRT.

REFERENCES

1. Polden J., Pan Z., Larkin N., Van Duin S. Path Planning with a Lazy Significant Edge Algorithm (LSEA). International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, vol. 10, pp. 1–8.

2. Guang Yang and V. Kapila, Optimal path planning for unmanned air vehicles with kinematic and tactical constraints. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002, vol. 2, pp. 1301–1306.

3. T. Kunz and M. Stilman, Kinodynamic RRTs with fixed time step and best-input extension are not probabilistically

complete. Algorithmic Foundations of Robotics XI. Springer, 2015, pp. 233–244, Springer.

4. D. Hsu, R. Kindel, J.-C. Latombe, and S. Rock, Randomized kinodynamic motion planning with moving obstacles. The International Journal of Robotics Research, vol. 21, pp. 233–255, 2002.

5. LaValle S.M. Planning algorithms. Cambridge University Press. University of Illinois, p. 786.

6. Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J. Path Planning for Autonomous Vehicles in Unknown Semi-structured Environments. The International Journal of

Robotics Research, 2010, 29, pp. 485–501.

7. Lindemann S. R. and LaValle S. M. Incrementally reducing dispersion by increasing Voronoi bias in RRTs. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 4, pp. 3251–3257.

8. Pyhtin P.S., Kamaev V.A., Kryzhanovskij A.I., Nikljev I.Ju., Pyhtin P.S. Planirovanie traektorii dvizhenija mobil'nogo robota s ispol'zovaniem gradienta funkcion issledovaniya oblastej prostranstva konfiguracij [space [Planning the trajectory of mobile robot using a gradient function studies areas configuration space]. *Kibernetika i programirovanie*, 2014, no 1, pp 48-60.

9. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *Systems Science and Cybernetics*, IEEE Transactions, 1968, vol. 4, issue 2, pp. 100-107.

10. LaValle S.M., Kuffner J.J. Randomized Kinodynamic Planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, vol. 1, pp. 473-479.

11. Schwarzer F., Saha M., Latombe J.-C. Adaptive Dynamic Collision Checking for Single and Multiple Articulated Robots in Complex Environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, pp. 338–353.

12. Boor V., Overmars M.H., Stappen A.F. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, vol. 1, pp. 473–479.

13. Rjendal U. B., Timoti U.M. Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teorija i praktika [Small Unmanned Aerial Vehicles: Theory and Practice]. Moskva: TEHNOSFERA, 2015, 312 p.

14. Minas AC, Urrutia S. Discrete Optimization Methods to Determine Trajectories for Dubins' Vehicles. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2010, vol. 36, pp. 17–24.

15. Dubins L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957, vol. 79, No. 3.

16. Chitsaz H. and LaValle S. M. Time-optimal Paths for a Dubins Airplane. *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2007, pp. 2379–2384.

17. K. Savla, E. Frazzoli and F. Bullo. Traveling Salesperson Problems for the Dubins Vehicle. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, No. 6, Jul. 2008, pp. 1378-1390.

18. Wang D., F. Qi. Trajectory Planning for a Four-Wheel-Steering Vehicle, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2001, pp. 3320–3325.

19. Hota S, Ghose D. A. Modified Dubins Method for Optimal Path Planning of a Miniature Air Vehicle Converging to a Straight Line Path. *Proceedings of the 2009 conference on American Control Conference*, 2009, pp. 2397–2402.

20. Dubins L.E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957, 79, pp. 497–516.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахметзянов Инсур Завдятович (г. Набережные Челны, Россия) – кандидат технических наук, доцент, Scopus Author ID: 22936807300, ResearcherID: O-5233-2015, доцент кафедры «Системный анализ и информатика» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (423822, г. Наб. Челны, пр. Мира, 16а). Главный специалист службы главного конструктора инновационных автомобилей, Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ» (423800, г. Набережные Челны, Транспортный проезд, 70, e-mail: insurzg@gmail.com).

Akhmetzyanov Insur Zavdyatovich (Russian Federation, Naberezhnye Chelny) – Candidate of Engineering Sciences, docent, Scopus Author ID: 22936807300, ResearcherID: O-5233-2015; assistant professor of the System Analysis and Informatics chair, Kazan (Volga) Federal University (423822, Mira pr. 16a, Naberezhnye Chelny, Russian Federation); senior specialist of the Chief Designer for Innovative Products unit, the Scientific and Technical Center of KAMAZ PTC (423800, Transportnyj proezd, 70, Naberezhnye Chelny, Russian Federation, e-mail: insurzg@gmail.com).

Ионов Максим Александрович (г. Набережные Челны, Россия) – магистрант кафедры «Системный анализ и информатика» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (423822, г. Наб. Челны, пр. Мира, 16а). Инженер-конструктор службы главного конструктора инновационных автомобилей, Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ» (423800, г. Набережные Челны, Транспортный проезд, 70, e-mail: maks-ion@inbox.ru).

Ionov Maxim Aleksandrovich (Russian Federation, Naberezhnye Chelny) – master student, System Analysis and Informatics chair of Kazan (Volga) Federal University (423822, Mira pr. 16a, Naberezhnye Chelny, Russian Federation), e-mail: maks-ion@inbox.ru).

Карабцев Владимир Сергеевич (г. Набережные Челны, Россия) – кандидат технических наук, Scopus Author ID: 6506844842, ResearcherID: J-6195-2016. Руководитель службы конструкторских и научно-исследовательских работ, Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ» (423800, г. Набережные Челны, Транспортный проезд, 70). Доцент кафедры «Системный анализ и информатика» ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (423822, г. Наб. Челны, пр. Мира, 16а, e-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru).

Karabcev Vladimir Sergeevich (Russian Federation, Naberezhnye Chelny) – Candidate of Engineering Sciences, Scopus Author ID: 6506844842, ResearcherID: J-6195-2016; Head of design and research works unit, the Scientific and Technical Center of KAMAZ PTC (423800, Transportnyj proezd, 70, Naberezhnye Chelny, Russian Federation); assistant professor of the System Analysis and Informatics chair, Kazan (Volga) Federal University (423822, Mira pr. 16a, Naberezhnye Chelny, Russian Federation, e-mail: Vladimir.Karabtsev@kamaz.ru).