
Траекторное управление электромобилем с использованием RRT алгоритма планирования движения в условиях городской среды

К.А. Олейников, В.А. Адиняев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Статья посвящена проблеме планирования траектории движения беспилотного транспортного средства-электромобиля. Представлены результаты разработки, программной реализации и исследования алгоритма построения оптимальной траектории движения беспилотного транспортного средства в известном окружении – участка городской среды. В качестве основы был использован алгоритм быстрорастущего случайного дерева (Rapidly-exploring Random Tree, RRT) для построения пути между двумя точками. При этом были проведены его оптимизации, касающейся алгоритма удаления лишних вершин, для построения оптимальной траектории а также учет кинематических ограничений автомобиля с использованием кривых Дубинса на радиус поворота транспортного электромобиля для вхождения в повороты. В качестве входных данных использовалась бинаризованная карта местности города, а также задаваемые координаты начального и конечного положения транспортного средства. Проводятся также исследования скорости вычисления RRT метода в зависимости от мощности системы.

Ключевые слова: беспилотный транспорт, электромобиль, методы планирования движения, сэмплинг методы, RRT алгоритм, кривые Дубинса.

В настоящее время во всём мире ведутся проводятся работы, направленные на создание автономных транспортных средств, а также комплексов их поддержки в условиях городского планирования. Однако при этом возникает целый комплекс задач алгоритмического и технического характера. Наиболее трудоемкой считается задача моделирования движения транспортного средства-автомобиля в условиях городского планирования, так как возникает очень много фактов влияющих на перемещение транспортного средства, а исполнительный объект управления – электромобиль или автомобиль является комплексно сложным объектом с точки зрения построения систем управления даже без учета городского планирования и протоколов общения между разными частями города [1]. Поэтому задача не является полностью решенной, постоянно совершенствуются алгоритмы планирования движения - имеются решения-

реализации для отдельных функций движения (перестроение по полосе движения, соблюдение скоростного режима, передвижение из одной точки в другую по GPS). Такие компании как Google, Uber постоянно совершенствуют свои алгоритмы-планировщики движения, используют возможности интеллектуального интеллекта и средств управления, как машинное обучение и нейронные сети, однако даже в них уже замечены случаи дорожно-транспортных происшествий с участием автономного транспортного средства, что говорит о необходимости совершенствования существующих планировщиков движения. Решение отдельных задач с использованием возможностей интеллектуального управления и планирования траекторного управления позволяет протестировать и построить математическую модель движения, а также выполнить реализацию отдельных программных решений, направленных на совершенствование эффективности планирования движения. В качестве примера можно указать проблему планирования траектории движения в условиях городской среды, которую необходимо на основе карте местности быстро решать в условиях ограниченности вычислительных ресурсов измерительной техники и формировать соответствующие сигналы управления движением и координирующих взаимосвязей силовой установки энергосистемы электромобиля для обеспечения оптимальной и плавной траектории движения [2, 3].

На сегодняшний день существует множество решений задачи траекторного планирования движения транспортного средства. Применение методов планирования движения, основанных на точной или приближенной реконструкции пространства допустимых конфигураций, зачастую невозможно из-за высокой вычислительной сложности, которая становится критичной для сцен с большим количеством препятствий и перемещаемых объектов со значительным количеством степеней свободы. Для решения

подобной проблемы используют популярные сэмпинговые [sampling] методы планирования движения [4]. Обычно это предусматривает многократные испытания пространства с различными конфигурациями, результатами которых является вердикт о возможности применимости той или иной конфигурации. В результате сэмпирования полученной выборки из множества доступных конфигураций строится маршрутная сеть. Одними из наиболее эффективных методов семплирования являются алгоритмы быстрорастущих случайных деревьев RRT (Rapidly exploring Random Tree, RRT) [5], основанный на метод формирования вероятностных маршрутных сетей (Probabilistic Roadmap Method, PRM), показанный на рис.1.

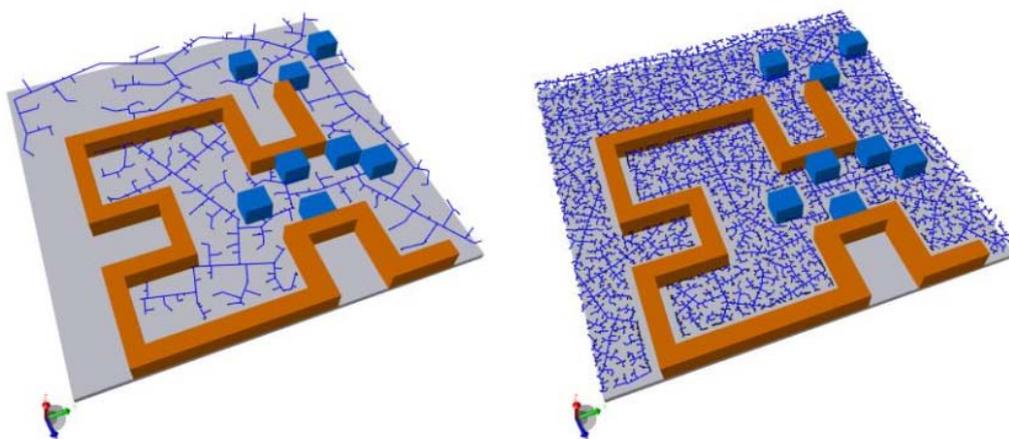


Рис. 1. – Работа алгоритма RRT в зависимости от количества итераций-узлов

В общем случае алгоритм работает следующим образом: на каждом шаге алгоритма генерируется точка в конфигурационном пространстве траектории планирования с использованием заранее определенной стратегии семплирования с распределением координат в n -мерном пространстве. Затем делается проверка на предмет столкновения с препятствиями сцены. Если точка является конфликтной она отбрасывается. В успешном случае точка включается и строится ребро между точками графа маршрутной сети. После чего алгоритм повторяется пока не присоединит ребром конечную точку [6 –

8]. Итоговая траектория маршрута определяется как совокупность ребер графа позволяющих достигнуть из начальной точки конечную. Главным недостатком таких методов является большие вычислительные сложности, связанные с построением большого числа вершин, вследствие ухудшается быстродействие алгоритма, поэтому применяют алгоритмы уменьшения числа вершин (nodes). Вторым недостатком RRT алгоритма является извилистость, грубость при планировании маршрута, как следствие избыточный пройденный путь. RRT имеет множество различных модификаций для оптимизации получаемой траектории и увеличения быстродействия [9]. Наиболее приемлемой модификацией для увеличения быстродействия является RRT*FN (Rapidly exploring Random Tree Finite Nodes) с ориентацией на конечную точку маршрута. Эта стратегия рассчитана на то, чтобы дерево «росло» в направлении конечной точки маршрута. Для удаления промежуточных вершин также используется алгоритм удаления промежуточных вершин и формирования оптимальной траектории движения. Он рассчитан на то, что некоторые вершины будут соединяться напрямую, удаляя тем самым ненужные маршруты. Плавность траектории и учет кинематических ограничений электромобиля достигается с использованием траекторий Дубинса. Пусть Дубинса строится множеством кривых, на каждом этапе которые включают в себя 6 элементов [10].

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

где S представляет собой сегмент прямой линии, L обозначает дугу влево, R – дуга вправо, указанные на рис.2.

Результаты компьютерного моделирования были получены с написанием языка Python 3.7 с использованием графической среды PyCharm с использованием библиотеки PyGame. Для моделирования алгоритмов движения транспортного средства электромобиля использовалась

схематичная упрощенная карта изображения улицы городской среды как рис. 3. Затем карта бинаризуется для составления карты проходимости и препятствий. Направление транспортного средства задается острым концом треугольника.

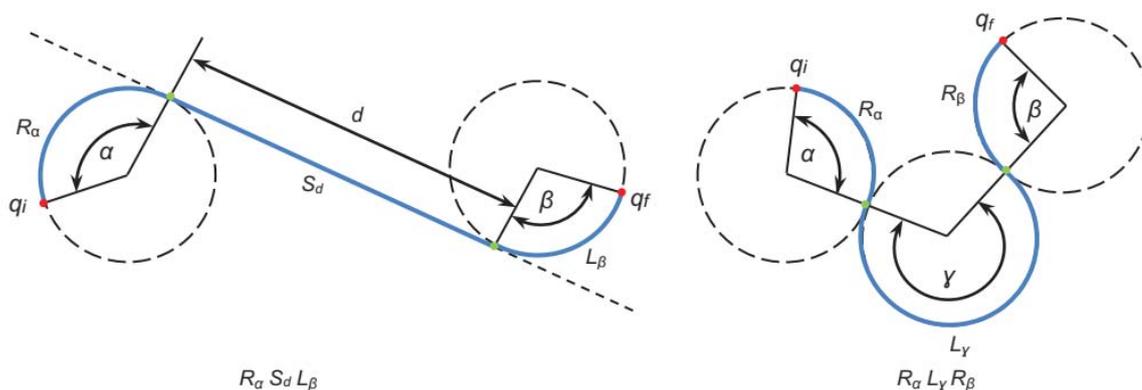


Рис. 2. – Интегральные кривые Дубинса

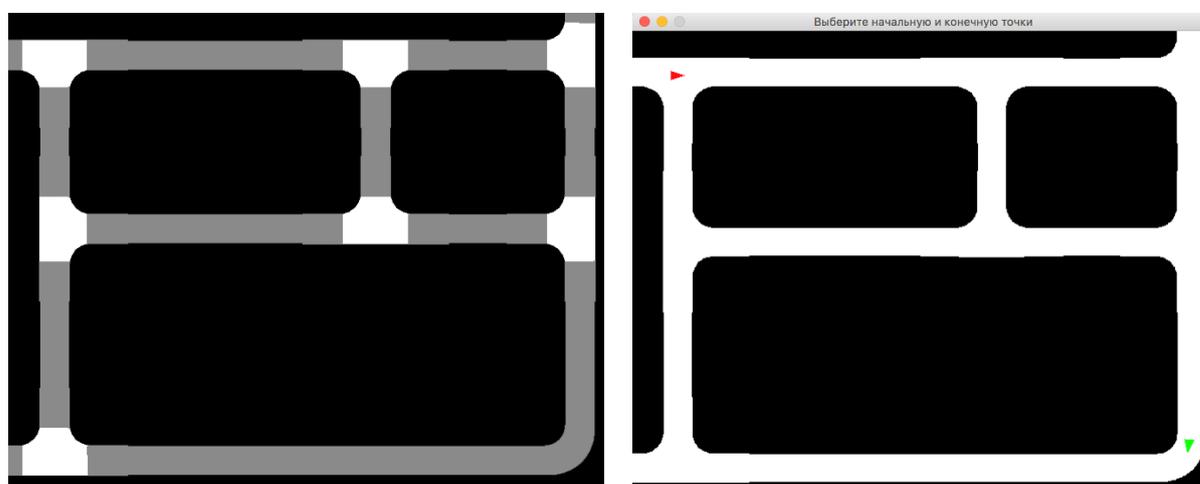


Рис. 3. – Исходная и бинаризованная карта маршрута

Результаты моделирования RRT*FN алгоритма показаны на рис. 3-6. Зеленой линией показан базовый алгоритм RRT*FN, красной – результат соединения ребер и вершин графа, формирующими траекторию от начальной до конечной точки (рис. 4)

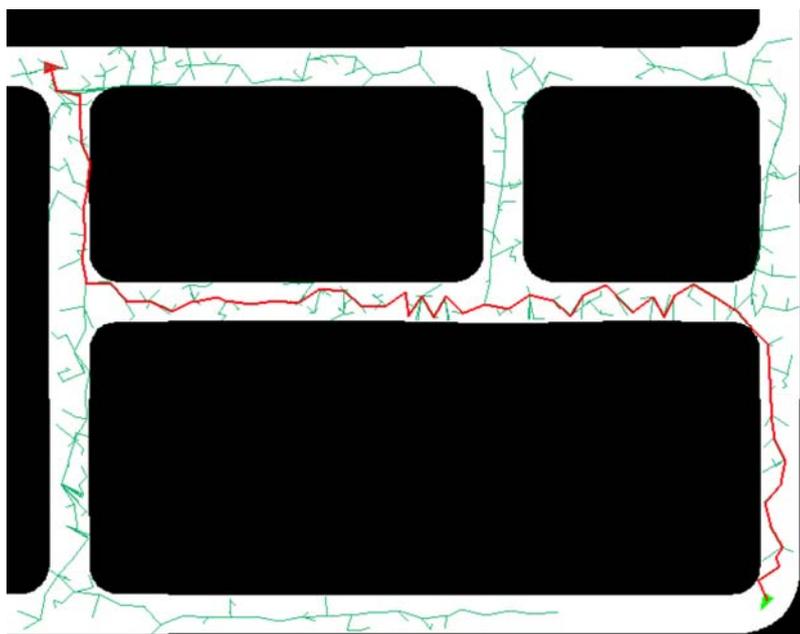


Рис. 4. – Базовый алгоритм RRT*FN

Алгоритм по удалению лишних вершин показан синей линией. Тот же алгоритм, но с применением интегральных кривых Дубинса показан фиолетовой линией (рис. 5).

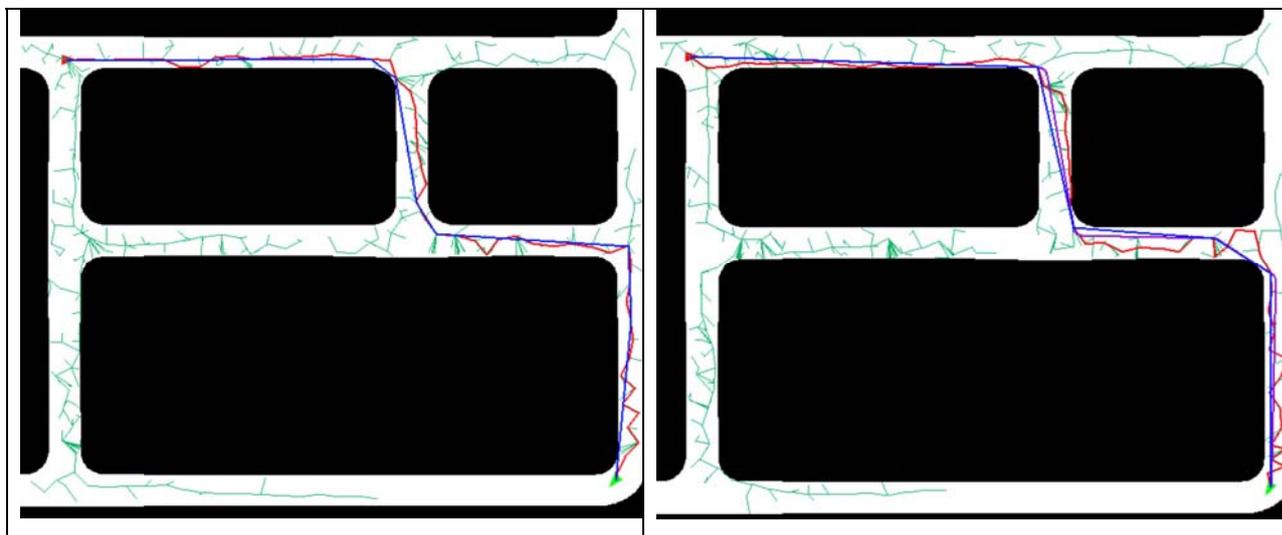


Рис. 5. – Результат формирования траектории по удалению лишних вершин и формированию интегральных кривых Дубинса

результаты показали адекватность примененных алгоритмов и перспективность их совершенствования и дальнейшего изучения.

Таблица № 1

Результаты работы алгоритма на разных конфигурациях

Наименование п/п	Конфигурация 1	Конфигурация 2
Процессор	Intel Pentium N4200 (2 ядра, 2.5 ГГц)	Intel Core i7-6950X (8 ядер, 3.5 ГГц)
Оперативная память	4 Гб	32 Гб
Видеосистема	Встроенная Intel HD	4 x Geforce 980 Ti
Жесткий диск	250 HDD	250 Гб SSD
Среднее число вершин (Nodes)	~400	~406
Среднее время расчета алгоритма	16.23 с.	~9.06 с.
Среднее расстояние пути	~313 м	~306 м

Также было рассмотрено влияние по вычислительной мощности для скорости расчета алгоритмов. Несмотря на то, время расчета уменьшилось в 55,8%, разница цене рассмотренных систем составляет больше 1000%, что свидетельствует о применимости в вычислении алгоритмов RRT*FN на любой конфигурации. В будущем планируется подключить непосредственно энергосистему электромобиля для формирования законов управления асинхронным двигателем в соответствии с поставленными задачами и результатами траекторного управления, а также провести моделирование в динамически изменяемой среде алгоритмов.



*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00924:
«Разработка теоретических основ построения иерархических систем
управления силовыми установками электромобилей»*

Литература

1. Федоренко Р.В. Алгоритмы автопилота посадки роботизированного дирижабля // Инженерный вестник Дона, 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/371
2. Быков Д.В., Лихачёв Д.В. Имитационное моделирование как средство модернизации участка транспортной сети // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.
3. Kavraki L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. IEEE Trans. Robot. Autom. IEEE, vol. 12, № 4, 1996, pp. 566–580.
4. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды ИСП РАН, 2016, том 28, вып. 4. С. 241-294.
5. Пыхтин П.С., Камаев В.А., Крыжановский А.И., Никляев И.Ю. Планирование траектории движения мобильного робота с использованием градиента функции исследования областей пространства конфигураций // Кибернетика и программирование, 2014, № 1. С. 48-60.
6. Kuwata Y., Fiore G.A., Teo J., Frazzoli E., How J.P. Real-time Motion Planning with Applications to Autonomous Urban Driving // IEEE Transactions on control systems technology. IEEE, vol. 17, № 5, 2009, pp. 1105-1118.
7. Boor V., Overmars M.H., Stappen A.F. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners // IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1999, vol. 1, pp. 473–479.

8. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects // Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, 2000. pp. 293–308.

9. Ахметзянов И.З., Ионов М.А., Карабцев В.С. Модификация алгоритма RRT для определения оптимальной траектории движения автомобиля при объезде препятствий // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, 2017, № 6 (58). С. 148-154.

10. 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.

References

1. Fedorenko R.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/371

2. Bikov D.V., Lihachev D.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

3. Kavraki L.E., Svestka P., Latombe J.C., Overmars M.H. IEEE Trans. Robot. Autom. IEEE, vol. 12, № 4, 1996, pp. 566–580.

4. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremennyh metodov planirovaniya dvizheniya [Overview of modern traffic planning methods]. Trudy ISP RAN, 2016, tom 28, vyp. 4. pp. 241-294.

5. Pyhtin P.S., Kamaev V.A., Kryzhanovskij A.I., Niklyayev I.YU. Kibernetika i programirovanie, 2014, № 1. pp. 48-60.

6. Kuwata Y., Fiore G.A., Teo J., Frazzoli E., How J.P. IEEE Transactions on control systems technology. IEEE, vol. 17, № 5, 2009, pp. 1105-1118.

7. Boor V., Overmars M.H., Stappen A.F. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1999, vol. 1, pp. 473–479.



8. LaValle S.M., Kuffner J.J. Rapidly-exploring random trees: Progress and prospect. Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics, 2000. pp. 293–308.
9. Ahmetzyanov I.Z., Ionov M.A., Karabcev V.S. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta, 2017, № 6 (58). pp. 148-154.
10. Dubins L.E. American Journal of Mathematics. 1957, 79. pp. 497–516.