

УДК 519.878, 519.1, 004.942

## ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО НАЗЕМНОГО РОБОТА С УЧЕТОМ МНОЖЕСТВА КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ

Р.О. Лавренов<sup>а</sup> (*r.lavrenov@innopolis.ru*)  
И.М. Афанасьев<sup>а</sup> (*i.afanasyev@innopolis.ru*)  
Е.А. Магид<sup>б</sup> (*dr.e.magid@ieee.org*)  
<sup>а</sup> Университет Иннополис, г. Иннополис

<sup>б</sup> Казанский федеральный университет, г. Казань

**Аннотация.** Поиск оптимального маршрута движения для беспилотного транспортного средства является сложной задачей робототехники, требующей комплексного подхода. Основными критериями оценки качества алгоритма построения маршрута являются скорость выполнения поиска и оптимальность полученного для робота пути относительно различных, задаваемых пользователем, параметров оптимизации. В данной статье описан подход к планированию маршрута, позволяющий построить предварительный маршрут движения, а затем его динамически корректировать в режиме реального времени путем изменения весовых функций для различных параметров оптимизации. Мы представляем набор ключевых параметров оптимизации маршрута и результаты работы разработанного алгоритма в среде MATLAB.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** критерии оптимизации, диаграмма Вороного, планирование маршрута, беспилотный наземный робот (БНР)

### Введение

В настоящее время одной из наиболее важных задач робототехники является задача планирования пути для автономных роботов. Устройства при этом должны выполнять различные миссии: сбор информации в заранее неизвестных динамических средах, поисково-спасательные операции или решение сложных транспортно-логистических задач. При этом, при планировании маршрута для роботов всегда приходится учитывать множество факторов, зачастую выбирая между кратчайшей или наиболее безопасной траекторией движения робота. В данной статье мы

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-57-06010).

рассматриваем набор ключевых параметров оптимизации пути робота и подход к планированию маршрута, согласно которому сперва, на стадии глобального планирования, строится предварительный маршрут движения, а затем, на стадии локального планирования, он динамически корректируется в режиме реального времени путем изменения весовых функций различных параметров оптимизации. Прототип алгоритма реализован в среде MATLAB, и результаты работы разработанного алгоритма представлены для различных целевых функций оптимизации.

## **1 Планирование маршрута в статической среде: Глобальные методы планирования**

В начале исследований был проведен анализ существующих алгоритмов задачи планирования маршрута между двумя заданными точками (point-to-point navigation) на заранее известной статической карте. В задаче выбора пути для мобильного робота широко используется метод потенциального поля [Magid и др., 2006]: цель имеет некоторый положительный заряд, препятствия - отрицательный, местоположения цели и препятствий фиксированы. Для планирования маршрута робота моделируются действующие на него мнимые силы притяжения и отталкивания зарядов [Andrews и др., 1983], [Khatib O., 1986]. Метод потенциального поля продолжает использоваться и модифицироваться: так, в работе [Lei Tang и др., 2010] предложена модификация алгоритма по принципу гравитационной цепочки от начального к целевому положению.

Популярность приобрели методы, строящие граф вокруг препятствий на известной карте. Такой граф называется дорожной картой (Roadmap). Препятствия представляются в виде замкнутых 2D- или 3D-полигонов, и граф создается, используя вершины препятствий как узлы графа, которые соединяются ребрами графа, если препятствия не блокируют прямую линию между ними. Методы планирования пути, которые используют подобные графы, называются методами дорожной карты. Таковыми являются метод графа видимости (Visibility graph) [Simeon и др., 2000] и метод графа касательных (Tangent graph) [Liu и др., 1992]. Одним из простейших методов нахождения пути на вышеописанных графах является алгоритм A\* (1968 г.), модернизирующий алгоритм Дейкстры.

Кроме того, для построения дорожной карты применяются методы клеточного разбиения. Два основных метода разбиения, при которых граф строится на линиях стыка ячеек, – это трапециевидная декомпозиция и декомпозиция Морзе. Для ускорения расчетов маршрута на больших картах, разработаны методы, основанные на сэмплировании, т.е. на снятии выборочных замеров с определенной степенью дискретизации и их сопоставления с маршрутами. Такими являются методы быстрорастущих

случайных деревьев (Rapidly-Exploring random trees, RRT) [LaValle S.M., 1998] и вероятностных дорожных карт [Kavraki и др., 1996]. В качестве примера, метод вероятностных дорожных карт использовался для навигации наземного робота через лабиринт в составе гетерогенной группы [Афанасьев и др., 2015].

В настоящее время для построения дорожной карты широко используется метод диаграммы Вороного. Для нашей задачи – это один из наиболее ценных методов, позволяющий строить максимально безопасный маршрут, так как ребра графа будут располагаться на наибольшем удалении от препятствий [Choset и др., 1997], [Lau и др., 2010]. Кроме того, найденные вершины графа можно использовать в алгоритме построения пути по сплайнам (Spline-based algorithm) [Magid и др., 2006], позволяющим вычислить наиболее гладкую траекторию движения робота, что также является важным критерием при оптимизации маршрута.

Анализ существующих решений для задачи планирования пути в MATLAB позволил выбрать программный инструмент RobotMotionToolbox [Gonzalez и др., 2015], в графическом интерфейсе которого можно создать карту с препятствиями в виде выпуклых полигонов. Среди функций данного программного средства реализованы такие алгоритмы, как Visibility graph, методы декомпозиции и др.

## **2 Планирование маршрута в динамической среде: Локальные методы планирования**

В задачах поиска маршрута мобильным роботом важную роль играют и локальные методы планирования: в незнакомой или измененной среде робот должен уметь обнаруживать препятствия и динамически перестраивать свою траекторию для их обхода. Основными алгоритмами локального планирования пути являются методы семейства Bug, согласно которым робот движется по направлению к цели, огибая встреченные препятствия. Модификации алгоритмов, Bug1 и Bug2, различаются способом обхода препятствий, а метод DistBug [Kamon и др., 1997] использует для дистанционного обхода препятствий датчик расстояния. Алгоритм TangentBug расширяет DistBug создавая график локальных касательных (LTG) во время движения к цели с локальным выбором оптимального направления [Choset и др., 2005]. Его модификация CautionsBug [Magid и др., 2004] является более консервативным методом и строит LTG на каждом шаге, и превосходит TangentBug в общем случае.

Модификации метода потенциального поля для локального планирования пути основаны на гистограмме векторного поля (VFH). Этот алгоритм и основанные на нем методы VFH+ и VFH\* используют

двумерную декартову сетку в качестве модели мира, в каждой ячейке которой определяется плотность препятствий [Ulrich и др., 1998]. При движении в динамических условиях часто применяют алгоритмы, базирующиеся на принципах вышеупомянутого алгоритма A\*: Anytime Repairing A\* (ARA\*), Dynamic A\* (D\*), Lifelong Planning A\* (LPA\*) и наиболее популярные D\* Lite [Likhachev и др., 2002] и Anytime D\* (AD\*).

В задачах динамической маршрутизации все чаще применяются методы глобального планирования и их модификации, так как даже в неизвестной среде, по мере построения карты, современные ЭВМ позволяют рассчитывать дорожную карту в реальном времени. В том числе, используется и алгоритм диаграммы Вороного, разбивающий пространство на сетку, каждая из ячеек которой может быть либо препятствием, либо пустой областью [Lau и др., 2013]. Однако, тестирование выявляет ограничения такого подхода, поскольку алгоритм сильно зависит от размера сетки и строит избыточную диаграмму Вороного с множеством лишних линий.

### 3 Поставленные задачи и настройки системы

Основной задачей нашего проекта является расчет в реальном времени маршрута движения беспилотного наземного робота (БНР) с учетом изменения критериев оптимизации маршрута (например, длина пути, кривизна и пр.). Исходным алгоритмом планирования пути выбран метод диаграммы Вороного, так как граф Вороного по определению представляет собой набор траекторий, наиболее безопасных для обхода препятствий, а при динамических изменениях первоначальный граф возможно частично пересчитать локально за ограниченное время. В рамках проекта используется российский БНР «Инженер» - гусеничный робот с дополнительными флипперами, способный преодолевать различные препятствия (Рис.1).



Рис. 1. Российский робот «Инженер», компания «Сервосила».

## 4 Выбор и реализация алгоритмов в MATLAB

### 4.1 Глобальный алгоритм маршрутизации

Реализация алгоритма планирования маршрута по диаграмме Вороного осуществлялась в среде MATLAB с использованием пакета RobotMotionToolbox. Алгоритм работает следующим образом: (1) От каждой грани препятствия с определенным шагом строятся лучи; (2) В местах пересечения лучей от разных граней ставятся точки; (3) Точки от соседних лучей соединяются в отрезки; (4) Соседние отрезки собираются в граф; (5) Конечный путь в графе находится по алгоритму Дейкстры.

Алгоритм был нами модифицирован под текущую задачу. Была добавлена возможность создавать круглые и невыпуклые препятствия, и метод построения диаграммы Вороного был соответственно изменен для работы со всеми типами препятствий. Были добавлены лучи от краев карты, тем самым обеспечивая построение диаграммы на карте с любым расположением препятствий и точек старта/цели. Пример такого расчета показан на Рис.2а. Для ускорения работы алгоритма, были убраны: точки пересечения лучей от невыпуклых препятствий и дублирование отрезков, что позволило находить точки ветвления графа, как места пересечения трех отрезков, а также его крайние точки, которые находились в углах карты (Рис.2б).

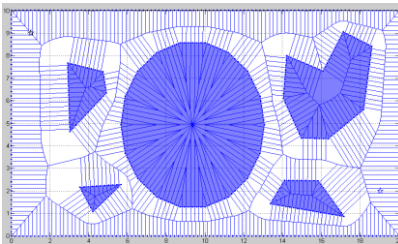


Рис. 2а. Предварительный расчет диаграммы Вороного для карты с препятствиями

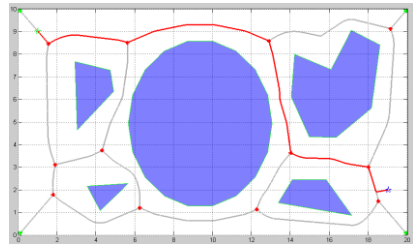


Рис. 2б. Финальная диаграмма Вороного с указанными точками ветвления графа и построенный по ней путь

Таким образом, была изменена реализация алгоритма по диаграмме Вороного, чтобы он работал не только с точками, как в работе [Lau и др., 2013], но и строил граф при любых положениях препятствий, начальной и конечной точек маршрута. Непосредственно ребра графа (упорядоченные группы отрезков от вершины к вершине) стали теми кривыми, учитывая которые при расчете, можно рассчитать различные гомотопии маршрутов

на карте. По определению гомотопии, два маршрута принадлежат к одному гомотопическому классу, если возможно преобразование одного маршрута в другой при помощи неразрывной деформации.

## 4.2 Параметры оптимизации маршрута

Построенный маршрут должен удовлетворять определенным требованиям целевой функции. При этом маршрут должен каждый раз динамически пересчитываться при изменении параметров этой функции, т.е. критериев оптимизации маршрута. Изучая методы оптимизации рассчитанного маршрута, были выделены следующие ключевые параметры целевой функции:

- **Время прохождения** – определяет насколько важно пройти маршрут самым быстрым образом. Значение коррелирует с длиной и сглаженностью маршрута, и другими критериями.
- **Длина пути** – характеризует, насколько важно пройти кратчайшим путем в рассчитанной гомотопии.
- **Максимальное (или среднее) расстояние до препятствий по мере прохождения маршрута** – определяет насколько важно роботу во время движения сохранять дистанцию до препятствий.
- **Кривизна пути** (производная) – выявляет насколько важно, чтобы при движении по маршруту не было резких изменений траектории [Magid и др., 2006].
- **Время прямой видимости начальной позиции и время выхода на прямую до целевой позиции** – нетривиальный критерий, оценивающий важность быть на прямой видимости со стартовой или финишной точкой. Данный параметр нужен в случае, когда, например, в начальной точке у робота есть связь с устройством контроля, помогающим в планировании пути, и требуется выбрать маршрут, как можно дольше поддерживающий эту связь.

Кроме того, если на карте расположить критические точки опасности или, наоборот, роутеры связи, которые надо держать на определенном расстоянии, то возникают еще несколько параметров:

- **Максимальное допустимое расстояние до роутеров связи** – чтобы не терять контакт с контролирующим устройством и при этом обследовать карту или следовать выбранному маршруту.
- **Длина пути, укрытая от опасностей**, – например, если в «точке опасности» находится источник радиации или открытый огонь, то следует выбирать маршрут так, чтобы при его прохождении робот был максимально загорожен препятствиями со стороны опасностей.
- **Минимальное допустимое расстояние от точек опасности** –

учитывает безопасную дистанцию во время движения робота.

### 4.3 Результаты симуляции в среде MATLAB

В настоящее время в нашей аппликации реализованы следующие параметры: длина пути, расстояние от препятствий, кривизна, время выхода на целевую позицию, а также связанные с критическими точками параметры. Например, для нахождения кратчайшего пути в пределах, удовлетворяемых критериям точек опасности, использовался алгоритм поиска пути по графу видимости. Если увеличивать значение критерия максимального расстояния от препятствий, то выбирается путь, рассчитанный по диаграмме Вороного (Рис.3а-г). Заменой ребер диаграммы Вороного в первоначальном маршруте создаются маршруты в различных гомотопиях, предоставляя пути для параметра времени прямой видимости точек старта и цели. Для этого также сравниваются расстояния от точек старта/цели до первой кривой диаграммы (Рис.4а,б). Аналогично, замена вершин графа видимости позволяет вычислять различные гомотопии в графе. Далее, находятся соответствия между гомотопиями двух графов. Таким образом, для каждого пути из диаграммы Вороного будет находится кратчайший путь из графа видимости.

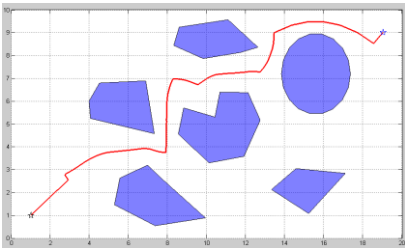


Рис. 3а. Критерий расстояния до препятствий – 100%, длины пути 0%

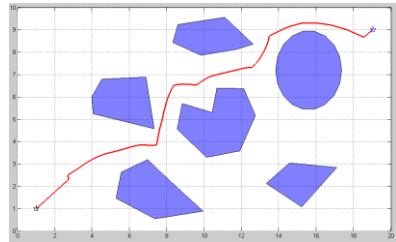


Рис. 3б. Критерий расстояния до препятствий – 65%, длины пути 35%

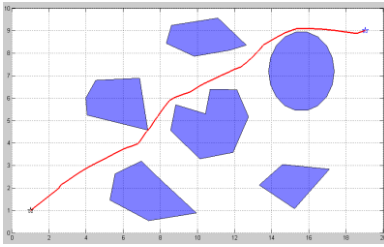


Рис. 3в. Критерий расстояния до препятствий – 35%, длины пути 65%

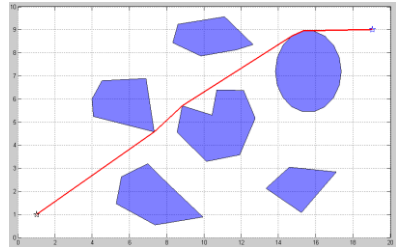


Рис. 3г. Критерий расстояния до препятствий – 0%, длины пути 100%

Соответственно, если воспользоваться методом планирования по сплайнам [Magid и др., 2006] и соединить сплайнами вершины диаграммы Вороного (красные точки на Рис.2), то путь будет удовлетворять критерию минимальной кривизны (производной) траектории пути.

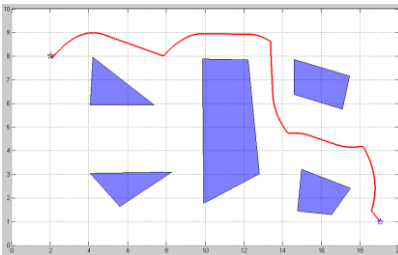


Рис. 4а. Критерий расстояния – 100%, время прямой видимости - 0%

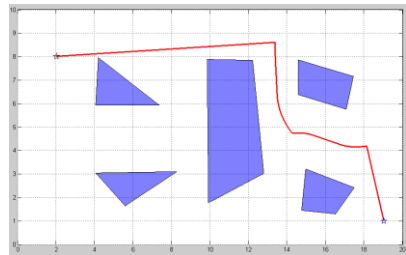


Рис. 4б. Критерий расстояния – 0%, время прямой видимости - 100%

При расчетах сначала рассчитываются траектории в различных гомотопиях, удовлетворяющие 100% значениям критериев. Затем, в зависимости от процентного вклада каждого критерия, вычисляется путь.

Если на карте отметить критические точки опасности (или роутеры связи), то процесс планирования пути будет аналогичным. Среди гомотопий будет выбираться та, которая будет удовлетворять критериям удаленности от точек опасности (или доступности роутеров связи) и в дальнейшем к данной гомотопии будут применяться критерии для обычного пути, описанные выше (Рис.5).



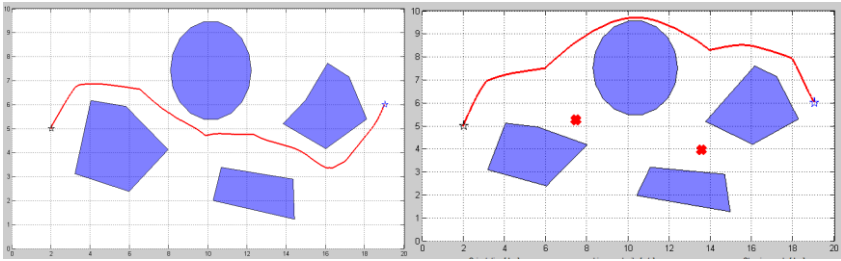


Рис. 5. Примеры расчета траекторий при критерии дистанции от опасностей 100% и критерии длины 50% на карте без опасностей (слева) и с опасностями (справа)

При появлении на карте критических точек опасности, алгоритмы учитывают их как блокирующие маршрут препятствия, через которые не будут проходить пути, как бы много их не было на карте. Расчет диаграммы Вороного на карте с критическими точками показан на Рис.6.

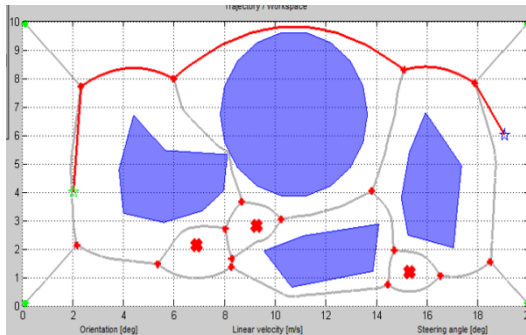


Рис. 6. Расчет пути по диаграмме Вороного с учётом критических точек

## 5 План дальнейшей работы

В качестве следующих шагов предполагается интегрировать в алгоритм дополнительные параметры целевых функций, в том числе, связанные с неровностями поверхности, что потребует применение алгоритмов локального планирования пути. Кроме того, будет проведен анализ корреляции между связанными параметрами оптимизации пути и настройка работы планирования маршрута в среде с динамическими препятствиями. В дальнейшем, алгоритмы предполагаются к реализации на языке C++ под робототехническую операционную систему ROS с применением как в 3D симуляторе, так и на реальном гусеничном роботе «Инженер».

## Заключение

Важным результатом данной работы является создание алгоритма планирования пути, учитывающего изменяемые в реальном времени параметры оптимизации. Фактически, метод интегрирует известные подходы к глобальному и локальному планированию маршрутов, оптимизируя рассчитываемые траектории мобильного робота в любой, подходящей по критериям оптимизации, гомотопии. Таким образом, сперва на стадии глобального планирования строится предварительный маршрут движения, а затем на стадии локального планирования он динамически корректируется в режиме реального времени путем изменения весовых функций различных параметров оптимизации. Разработанный алгоритм демонстрирует быструю и робастную подстройку к динамически меняющейся среде, обеспечивая эффективную маршрутизацию мобильных роботов.

## Список литературы

- [Афанасьев и др., 2015] И.М. Афанасьев, А.Г. Сагитов, И.Ю. Данилов, Е.А. Магид. Навигация гетерогенной группы роботов (БПЛА и БНР) через лабиринт в 3D симуляторе Gazebo методом вероятностной дорожной карты // Труды семинара БТС-ИИ-2015, Санкт-Петербург: «Политехника-сервис», 2015.
- [Andrews и др., 1983] Andrews J. R. and Hogan N. Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator // Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems, 1983.
- [Choset и др., 1997] Choset H. and Burdick J. Sensor Based Motion Planning: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph // Advanced Robotics, 1997.
- [Choset и др., 2005] Choset H., Lynch K., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L. and Thrun S. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations // The MIT Press, 2005.
- [Gonzalez и др., 2015] Gonzalez R., Mahulea C. and Kloetzer M. A Matlab-based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics // IEEE CASE'2015: Int. Conf. on Autom. Science and Engineering, 2015
- [Kamon и др., 1997] Kamon I. and Rivlin E. A new range-sensor based globally convergent navigation algorithm for mobile robots // The International Journal of Robotics Research, 1997
- [Kavraki и др., 1996] Kavraki L. E., Svestka P., Latombe J.-C. and Overmars M. H., Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces // Transactions on Robotics and Automation, 1996
- [Khatib O., 1986] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots // The International Journal of Robotics Research, 1986
- [Lau и др., 2010] Lau B., Sprunk C. and Burgard W. Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams // Intelligent Robots and Systems, 2010
- [Lau и др., 2013] Lau B., Sprunk C. and Burgard W. Efficient Grid-Based Spatial Representations for Robot Navigation in Dynamic Environment // Robotics and

Autonomous Systems, 2013

- [**LaValle S.M., 1998**] LaValle S.M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning // Computer Science Department, Iowa State University, 1998
- [**Lei Tang и др., 2010**] Lei Tang, Songyi Dian and Gangxu Gu and Kunli Zhou A novel potential field method for obstacle avoidance and path planning of mobile robot // Computer Science and Information Technology, 2010
- [**Likhachev и др., 2002**] Likhachev M. and Koenig S. D\* lite // Eighteenth national conference on Artificial intelligence, 2002
- [**Liu и др., 1992**] Liu Y. and Arimoto S. Path planning using a tangent graph for mobile robots among polygonal and curved obstacles // Int. J. of Robotics Research, 1992
- [**Magid и др., 2004**] Magid E., and Rivlin E. CautiousBug: a competitive algorithm for sensory-based robot navigation // Intelligent Robots and Systems, 2004
- [**Magid и др., 2006**] Magid E., Keren D., Rivlin E. and Yavneh I. Spline-Based Robot Navigation // Intelligent Robots and Systems, 2006
- [**Simeon и др., 2000**] Simeon T., Laumond J.-P. and Nissoux C. Visibility based probabilistic roadmaps for motion planning // Advanced Robotics, 2000
- [**Ulrich и др., 1998**] Ulrich I. and Borenstein J. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots // Robotics and Automation, 1998