

# АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Афанасов А.Л.

*Афанасов Алексей Леонидович - магистрант,  
направление: программная инженерия,  
кафедра программной инженерии,  
Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, г. Орел*

**Аннотация:** данная статья посвящена анализу методов построения пути автономного мобильного устройства в среде с препятствиями. Рассмотрены методы на основе графов, клеточной декомпозиции и использование потенциальных полей.

**Ключевые слова:** планирование пути, мобильное устройство, RRT.

При анализе методов планирования пути необходимо провести их классификацию по различным признакам. В контексте использования интеллектуальных технологий их делят на традиционные и эвристические. По типу окружающей обстановки их также можно разделить на методы планирования в статической и динамической окружающей среде. Еще существует разделение по полноте информации об окружающей среде: методы с полной информацией (в таком случае говорят о глобальном планировании пути) и неполной информацией об окружающей среде (здесь подразумевается локальное планирование пути). Существует множество методов планирования пути, в которых используются различные эвристические приемы, вытекающие обычно из непосредственного смысла решаемой задачи. В данной статье мы лишь ограничимся обзорным рассмотрением (рис. 1) основных подходов к решению задачи планирования пути мобильного устройства.



Рисунок 1. Классификация методов планирования пути

Следует отметить методы, использующие карту окружающей среды или её описание при помощи графа или дерева; методы на основе клеточной декомпозиции и родственные им методы потенциальных полей (рис. 2).

В последние годы класс методов на основе графов привлекает особенный интерес для исследователей. Данные методы обычно используют тогда, когда информация об окружающей среде является полностью известной и данная среда не является динамической. Общая структура дерева или графа отражает состояния, в которых может находиться мобильное устройство, где каждый узел представляет одно состояние данного устройства. Переходы между состояниями характеризуются функцией затрат, что позволяет выделить путь, имеющий минимальную стоимость достижения конечного состояния и, соответственно, является наиболее оптимальным.

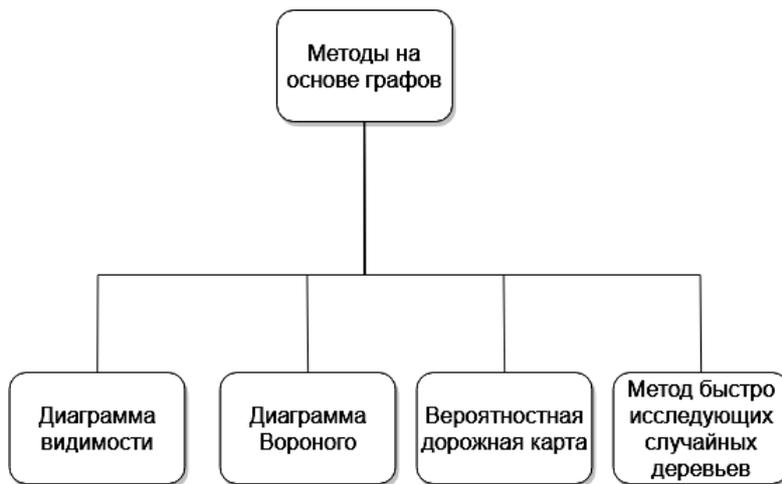


Рисунок 2. Методы на основе графов

Построение графа тесно связано с порядком выбора опорных точек. Наиболее типичным примером здесь являются методы на основе диаграммы видимости. Определим диаграмму видимости как неориентированный граф, в котором существует непустое множество узлов, включающее множество вершин препятствий, начальную точку и конечную точку планируемого пути, а также множество рёбер, определяемых всевозможными парами точек, которые соединяются отрезком прямой не пересекающимся с препятствиями. При использовании диаграммы видимости необходимым условием является то, чтобы препятствия имели форму многоугольника или многогранника. Поскольку путь строится по вершинам препятствий и часть пути совпадает с краями препятствий, то существует определенная опасность столкновения с препятствиями. Помимо прочего, при увеличении их количества значительно возрастает сложность графа. Исходя из этого, следует сделать вывод о том, что наиболее критической задачей для данного решения являются подходы к сокращению сложности графа видимости. Здесь можно выделить метод динамической диаграммы видимости и концепцию вектора проходимости [1]. Данные подходы направлены выявление того, какие препятствия необходимо учитывать в полной мере во время движения мобильного устройства, а какие следует исключить из рассмотрения. Следует отметить, что использование данных подходов могут привести к тому, что мы не всегда сможем получить наиболее оптимальный путь.

Следующие два метода несут в себе геометрический подход к решению поставленной задачи, а именно метод на основе диаграммы Вороного [2] и вероятностной дорожной карты.

Диаграмма Вороного подразумевает разбиение плоскости с определенным числом точек, называемых центрами, на множество выпуклых многогранников или ячеек таким образом, что каждый из многогранников содержит один центр и любая точка внутри ячейки ближе к своему центру, чем к любому другому. Разбиение может быть точным либо приближенным. При приближенном разбиении пространство разбивается, пока каждая ячейка не окажется внутри свободного пространства или же внутри препятствия. Процесс рекурсивного деления останавливается по достижении заданной точности. Точное разбиение на ячейки работает несколько быстрее приближенного, но получаемые траектории будут иметь большую длину.

В рамках метода вероятностной дорожной карты [3] описание связности свободного для перемещения пространства производится с помощью графов. По той причине, что данный метод в своем функционировании опирается на полноту информации об окружающей среде, возникают затруднения при его применении в условиях динамичной среды, поэтому на его основе разработан ряд модификаций с целью достижения компромисса между самой безопасной и кратчайшей траекторией. Несмотря на то, что конечный путь будет короче пути, полученного только на основе диаграммы Вороного, имеется высокая вероятность его неоптимальности. Для устранения этого недостатка используют триангуляцию Делоне [5], а затем по ней происходит построение диаграммы Вороного. Для создания триангуляции Делоне используется случайный инкрементный алгоритм, позволяющий добавлять новые точки без изменения всей триангуляции. После построения общего охватывающего треугольника, точки добавляются в триангуляцию по очереди друг за другом. Следующим шагом после построения триангуляции Делоне является генерация дорожной карты, с добавлением в триангуляцию начальной и конечных точек. В целом, оптимизация предложенного метода позволяет получить траекторию, оптимальную с точки зрения безопасности и длины. Однако, из-за наличия нескольких итерационных алгоритмов, она имеет высокие требования к производительности аппаратуры.

К следующей группе относится метод быстро исследующих случайных деревьев или RRT [4]. В нем процесс построения пути состоит из генерации дерева опорных точек, которое последовательно

расширяется от начальной до конечной точки. Процесс построения дерева начинается со стартового дерева состоящего исключительно из начального пункта. На каждом шаге процесса построения выбирается какая-либо новая случайная путевая точка (данные точки в рассматриваемой области генерируются, пока очередная из них не окажется вне препятствий). В текущем дереве выбирается оптимальная достижимая точка по отношению к случайной. Если она не найдена, либо случайная точка не достижима из текущих узлов дерева, то подобная точка отбрасывается. Если же она успешно найдена, то данная точка добавляется к дереву и соединяется ребром с выбранным оптимальным узлом дерева. Процесс построения дерева прекращается, если из последней добавленной точки достижима конечная точка или если достигнуто предельное количество вершин дерева. Если целевая точка достигнута, путь восстанавливается обратным ходом, исходя из используемой структуры дерева.

При методах клеточной декомпозиции в общем случае окружающую среду делят на клетки, используя грани выявленных препятствий. В качестве одной из наиболее важных выделяют задачу разложения многоугольника на выпуклые области. При решении задачи планирования по методам на основе клеточной декомпозиции можно использовать множество различных стратегий поиска относительного оптимального решения, например: поиск в ширину (BFS), поиск в глубину (DFS), алгоритм Дейкстры, алгоритм  $A^*$  (рис. 3). Первые две мы опустим к рассмотрению по причине их тривиальности.

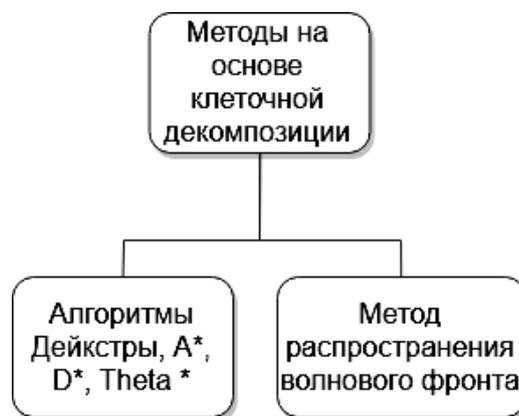


Рисунок 3. Методы на основе клеточной декомпозиции

Алгоритм Дейкстры позволяет находить наикратчайшее расстояние из одной до всех остальных вершин графа. Принцип его работы ограничен графами без рёбер отрицательного веса. Все рабочее поле предварительно разбивается и получаемым ребрам присваиваются значения меток в соответствии с удаленностью от искомой точки. Шаг алгоритма можно следующим образом: если все вершины посещены, то алгоритм завершает работу. Иначе же из не помеченных вершин выбирается некая вершина, имеющая минимальное значение метки. Происходит рассмотрение всех возможных маршрутов, в которых данная вершина бы являлась предпоследним узлом. Вершины, в которые ведут рёбра из неё, обычно называют соседями этой вершины. Для каждого соседа рассматриваемой вершины, если он не отмечен в качестве уже посещенного, необходимо рассмотреть новую длину пути, получаемую из суммы значений текущей метки вершины и длины ребра, соединяющего её с этим соседом. Если мы получаем меньшее значение длины в сравнение в меткой соседа, то производим замену значения текущей метки получаемым значением новой длины. Завершив осмотр всех соседей, помечаем выбранную вершину как посещённую и повторяем шаг алгоритма с начала.

Алгоритм поиска  $A^*$  в своем функционировании опирается на предыдущий подход и позволяет подсчитать стоимость пути от начальной точки до финальной, при этом используя первое наиболее подходящее совпадение в дереве. Главная особенность данного подхода, а именно эвристическая функция стоимости, определяет обход вершин и непосредственно используется для достижения вершины из начального положения, а также оценки расстояния от задаваемой до точки останова.

Алгоритм поиска  $D^*$  также является алгоритмом поиска наикратчайшего пути во взвешенном ориентированном графе, где его основной особенностью является то, что структура графа не известна нам заранее или будет постоянно изменяться.  $D^*$  использует меньше клеток, чем  $A^*$ , по той причине, что в нем не планируется весь путь до цели. Данный алгоритм улучшен за счет более эффективных расширений, он требует меньше времени вычислений и в нем сокращено число расширенных узлов, что позволяет считать его эффективной модификацией  $A^*$ .

Особенностью метода распространения волнового фронта и, в частности, его конкретной реализации в виде Fast Marching Method (FMM) [6] является отсутствие этапа поиска. Данный подход распространения волнового фронта можно понимать на практическом уровне как физическое

расширение фронта волны: если камень брошен в пруд, то возникает волна в форме окружности и она расширяется во все стороны от места падения этого камня. Непосредственно работа алгоритма включает его инициализацию, распространение волны и обратное восстановление финального пути. Сначала происходит построение множества ячеек поля, где каждой из них приписываются атрибуты наличия проходимости, запоминаются стартовая и целевая ячейки. Далее, от стартовой ячейки выполняется шаг в соседнюю, также с проверкой на её проходимость и принадлежность к ранее выявленным путевым ячейкам маршрута. При успешном прохождении данных условий ячейку добавляют к ранее помеченным в пути, а в атрибут записывается число шагов до стартовой ячейки. При последовательном функционировании будет найден искомый путь от начальной до конечной ячейки, либо исполнение будет приостановлено по причине невозможности построения пути. Последним этапом является обратное восстановление кратчайшего пути, исходя из записанных в ячейках значений атрибутов.

Следует отметить, что подход с использованием потенциальных векторных полей на данный момент один из наиболее широко изученных и распространенных. Его общая идея заключается в движении мобильного устройства вдоль построенных линий векторного поля. Данное поле при помощи собственной потенциальной функции определяет конкретную организацию препятствий и их форму, а также конечную цель движения. Среди методов потенциальных полей следует выделить *artificial potential field*, APF. Суть данного алгоритма состоит в том, что каждое препятствие имеет вокруг себя отталкивающее потенциальное поле, сила которого уменьшается согласно расстоянию, что отражает отрицательный вектор; а также существует однородная сила притяжения к цели, что характеризуется положительным вектором. Для функционирования в динамической среде через короткие промежутки времени вычисляется сумма этих положительных и отрицательных векторов, исходя из которой выбирается направление передвижения объекта. Данные относительно векторов рассчитываются по показаниям сенсоров мобильного устройства в текущий момент времени. К основным недостаткам следует отнести локальность данного подхода, что зачастую делает его неприменимым для достижения комплексных целей.

В данной работе описаны основные методы планирования пути в среде с препятствиями и выделены достоинства и недостатки рассмотренных алгоритмов.

#### **Список литературы**

1. *Meng Wang, Liu J.N.K.* Fuzzy logic-based real-time robot navigation in unknown environment with dead ends // *Robotics and Autonomous Systems*, 2008. Vol. 56, № 7. P. 625–643. DOI: 10.1016/j.robot.2007.10.002.
2. Искусственная нейронная сеть. Википедия: Web-сайт. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственная\\_нейронная\\_сеть/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственная_нейронная_сеть/) (дата обращения 12.06.2019).
3. *Kedem K., Sharir M.* An efficient motion planning algorithm for a convex rigid polygonal object in 2-dimensional polygonal space // *Discrete Comput. Geom.*, 1990. Vol. 5, № 1. P. 43-75.
4. *Самойлов Л.К., Чернов А.М.* Аналитическое представление восстанавливающегося оператора при интерполяции по Лагранжу. // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2009, № 2 (91). С. 233-236.
5. *Guibas L.J., Knuth D.E., Sharir M.* Randomized incremental construction of Delaunay and Voronoi diagrams // *Algorithmica*, 1992. Vol. 7. № 1. P. 381-413.
6. *Koenig S., Likhachev M.* D\* lite. // 18th national conf. on artificial intelligence (Edmonton, Alberta, Canada, July 28–August 1, 2002). 2002. AAAI Press. P. 476–483.
7. *Лю В.* Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // *Математика и математическое моделирование*, 2018. № 01. С.15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.