К.С. Яковлев, Е.С. Баскин

Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости[1]

Аннотация. В статье рассмотрены различные графовые модели, применимые для решения задачи планирования траектории на плоскости, и методы их извлечения из различных исходных данных. Дан анализ применимости описанных моделей и методов к решению класса практических задач, возникающих при разработке современных систем управления малыми, полностью автономными беспилотными транспортными средствами, функционирующими в статической среде. Описана графовая модель, наиболее применимая на практике в контексте решения задачи автоматизации управления транспортным средством на плоскости.

Ключевые слова: планирование траектории, построение траектории, графовые модели, графы.

Введение

Задача планирования траектории на плоскости между фиксированными точками – одна из ключевых задач, изучаемых в искусственном интеллекте, робототехнике и других научных областях. Наиболее широкой областью применения методов, алгоритмов и моделей, разработанных в ходе решения этой задачи, является проектирование и разработка беспилотных транспортных средств и робототехнических систем, способных к автономному функционированию в окружающей среде. Очевидно, что подобного рода объекты управления (в терминологии искусственного интеллекта – агенты) должны обладать возможностью автоматического планирования траектории. Для обеспечения этой возможности в систему управления агента включается планировщик – независимый программный модуль, ответственный за построение траектории и имеющий интерфейс с остальными модулями системы, такими как модуль выработки управляющих воздействий, модуль построения модели мира и т.д.

Традиционно в искусственном интеллекте задача планирования траектории на плоскости рассматривается как задача поиска пути на взвешенном графе, вершинам которого соответствуют координаты некоторых точек на плоскости, а ребрам – так называемые элементарные траектории (в простейшем случае – отрезки прямых), т.е. такие траектории, следование по которым может быть обеспечено системой управления в автоматическом режиме. Обычно с каждой элементарной траекторией связывается набор характеристик, таких как длина, сложность прохождения, опасность и др. Эти характеристики могут быть формализованы в виде компонент функции, определяющей веса ребер в графе. Таким образом, задача планирования траектории между двумя фиксированными точками на плоскости (начальной и целевой), удовлетворяющей определенным критериям оптимальности, может рассматриваться как задача поиска кратчайшего пути на взвешенном графе.

Здесь и далее будем считать, что в качестве критерия оптимальности выступает длина построенной траектории.

Общая схема алгоритма построения кратчайшей траектории между двумя точками на плоскости может быть представлена в виде композиции двух шагов: шаг 1 – построить взвешенный граф; шаг 2 – осуществить поиск кратчайшего пути на построенном графе.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №12-07-31058).

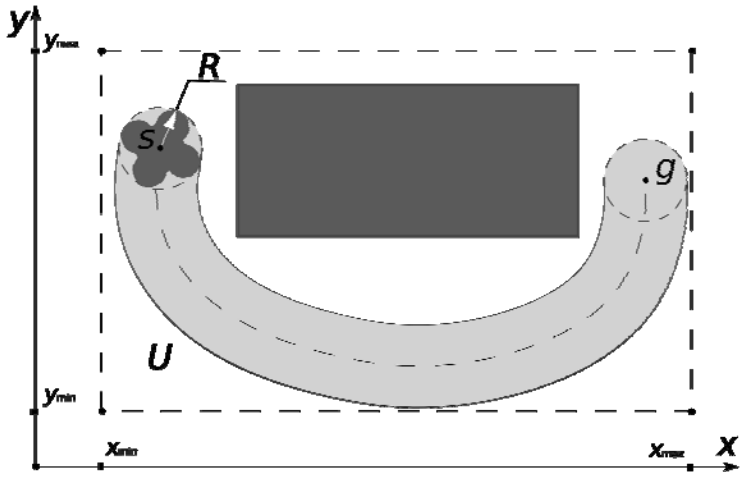

Рис. 1. Допустимая траектория в задаче планирования

Данная работа посвящена исследованию задач, возникающих на шаге 1, при построении графа.

Очевидно, чем меньше вершин и ребер в графе – тем легче (в вычислительном плане) в дальнейшем найти кратчайший путь, который, при определенном выборе точек, соответствующих вершинам графа, соответствует кратчайшей траектории на плоскости. На практике обеспечение такого «правильного» выбора небольшого числа точек представляется весьма затруднительным. Существует и другой подход, который связан с использованием графовых моделей, извлекаемых из исходных данных по простейшим методикам. Такие графы, зачастую, содержат большое число вершин и ребер, и поиск кратчайшего пути на них приводит к чрезмерному расходованию вычислительных ресурсов – процессорного времени и, в особенности, оперативной памяти. Однако существуют эвристические методики, позволяющие значительно сократить пространство поиска и получать пути, по весу незначительно превосходящие кратчайшие.

В статье будут рассмотрены графовые модели, извлекаемые из исходных данных, с использованием обоих вышеперечисленных подходов. Будет сделан вывод о целесообразности использования в контексте задачи планирования траектории беспилотного транспортного средства графовых моделей, построение которых производится по простым методикам, не требующих дополнительных знаний о предметной области. Будет описана графовая модель – Метрический топологический граф – наиболее применимая при решении вышеуказанной задачи.

1. Задача поиска кратчайшего пути на плоскости в общем виде

Пусть в двумерном евклидовом пространстве L_2 с определенной декартовой системой координат задана область U: $x_{\min} \le x \le x_{\max}$, $y_{\min} \le y \le y_{\max}$, называемая рабочей областью. Пусть далее на рабочей области определена функция проходимости f: $U \to \{0, 1\}$, т. е. точка a из U считается проходимой, если $f(a) = 0$, непроходимой – в противном случае. Пусть начальная и целевая точки s и g лежат в U, тогда задача планирования траектории может быть сформулирована как задача описания двумерной кривой, соединяющей точки s и g, такой, что каждая точка этой кривой является проходимой и лежит в U.

Очевидно, что при решении практических задач планирования траектории для конкретного агента необходимо учитывать размеры последнего. Для этого в постановку задачи планирования обычно вносят следующие изменения. Пусть физические размеры агента таковы, что для любого допустимого местоположения и ориентации агента его проекция на рабочую область может быть ограничена некоторой окружностью радиуса R, причем не существует окружности меньшего радиуса, обладающей теми же свойствами. Тогда задача планирования траектории заключается в описании кривой из s в g такой, что для каждой точки этой кривой справедливо утверждение: круг радиуса R с центром в этой точке содержит только точки из U, при этом ни одна из внутренних точек круга радиусом R не является непроходимой (Рис. 1). Здесь и далее будем предполагать, что не

составляет труда проверить - содержит ли круг (либо любая другая область произвольной формы) непроходимые точки.

2. Графовые модели и методы их построения для последующего решения задачи планирования траектории на плоскости

2.1. Графы видимости

Предположим, что непроходимые точки пространства (плоскости) образуют области, каждая из которых является многоугольником, и при этом координаты вершин всех многоугольников известны. Тогда в качестве графовой модели для решения задачи планирования траектории может быть использован граф видимости (ГВ) Рис. 2. Вершинам графа видимости соответствуют точки на плоскости, являющиеся вершинами непроходимых многоугольников, а также точки *s* и *g*. Ребрам графа видимости соответствуют отрезки, соединяющие вершины, при этом ни один такой отрезок не пересекает внутреннюю область ни одного из непроходимых многоугольников. То есть можно говорить о том, что из любой вершины ГВ «видны» все вершины смежные с ней.

Построение графа видимости по известным координатам многоугольников, ограничивающих непроходимые области на плоскости, – одна из классических задач вычислительной геометрии. Описание базового алгоритма ее решения можно найти, например, в [1]. Сложность алгоритма оценивается как $O(N^3)$, где N – число вершин многоугольников, ограничивающих непроходимые области. Существуют и более эффективные алгоритмы построения графа видимости. Так, в работе [2] приводится алгоритм с квадратичной сложностью $O(N^2)$.

Очевидно, что любой граф видимости содержит избыточное число ребер (по отношению к тому числу, которое требуется для решения задачи планирования траектории). В работе [3] рассматриваются графы видимости специального вида – ограниченные графы видимости (ОГВ) – не содержащие ребра, априори не имеющие отношения к задаче планирования (т.е. такие ребра, которые ни при каких условиях не могут войти в путь из *s* в *g*). Пример ОГВ представлен на Рис. 3.

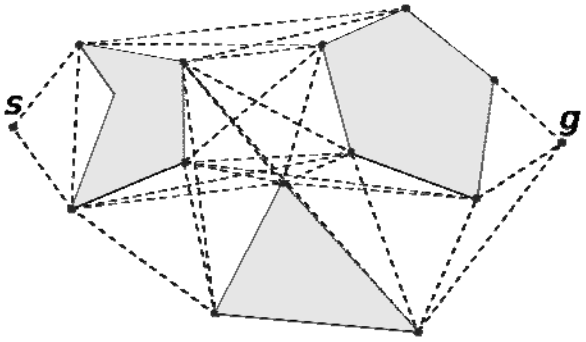

Рис. 2. Граф видимости на плоскости

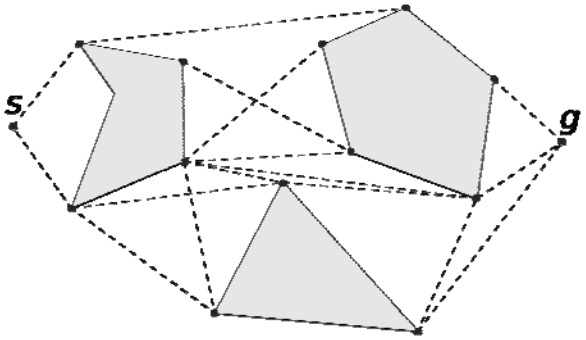

Рис. 3. Ограниченный граф видимости

С точки зрения задачи планирования траектории ОГВ являются более предпочтительными моделями представления окружающей среды, так как содержат меньшее число ребер и, следовательно, поиск пути с помощью известных методов потенциально менее ресурсоемок. С другой стороны, важно понимать, что сложность построения ОГВ аналогична сложности построения ГВ (т.е. в лучшем случае $O(N^2)$, где N – число вершин многоугольников, ограничивающих непроходимые области).

Создание планировщиков траектории на основе графов видимости и их последующее использование в системах управления беспилотными транспортными средствами сопряжено с рядом трудностей. Укажем основные из них. Первая трудность заключается в том, что на практике при построении траектории объекта управления необходимо учитывать его размеры, так как считать объект материальной точкой очевидно некорректно. Это задача легко решается известными методами, например, с помощью применения оператора Минковского для исходных данных [4] Рис. 4.

Вторая проблема, к сожалению, принципиально не разрешима в рамках описываемого

подхода. Она связана с тем фактом, что обычно агенты, автономно функционирующие в среде, не располагают информацией об окружающем пространстве в виде, необходимом для построения графа видимости, т.е. информация о координатах многоугольников, ограничивающих непроходимые области на плоскости, отсутствует. Это связано с тем, что обычно в распоряжении агента имеется дискретная цифровая карта местности, уточняемая в реальном времени с помощью данных, поступающих от различных датчиков и сенсоров агента. Соответственно для извлечения необходимой информации (координат вершин непроходимых многоугольников) требуется разработка отдельного класса алгоритмов, что требует дополнительных затрат. Таким образом, можно утверждать, что использование графов видимости для решения задачи планирования траектории агента на практике нецелесообразно.

2.2. Вероятностные схемы местности

Вероятностные схемы местности (устоявшийся англоязычный термин – probabilistic roadmaps) — это графы, аналогичные по структуре графам видимости, но для построения которых не требуется дополнительная информация [5, 6] Построение этих графовых моделей базируется на случайном выборе точек на плоскости (Рис. 5).

Обобщенный алгоритм построения ВСМ можно представить в виде последовательности следующих шагов:

Шаг 1. Добавить точки *s* и *g* в граф[2].

Шаг 2. Выбрать точку из рабочей области.

Шаг 3. Если выбранная точка непроходима, то перейти к шагу 2.

Шаг 4. Добавить выбранную точку в граф, а именно:

Шаг 4.1. Для каждой точки в графе проверить проходим ли отрезок прямой, соединяющий текущую и выбранную на шаге 2 точку.

Шаг 4.2. Если отрезок проходим, то добавить соответствующее ребро в граф (с весом равным длине отрезка).

Шаг 4.3. Перейти к шагу 2.

Последовательность шагов 2-4 повторяется до выполнения некоторого заданного критерия,

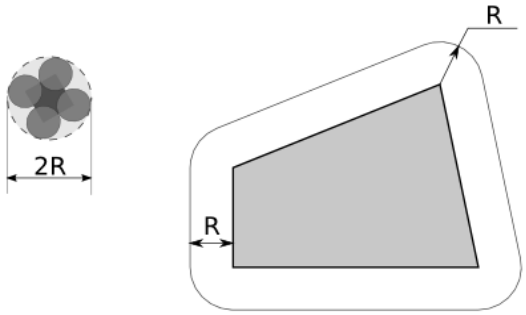

Рис. 4. Препятствия на плоскости с учетом размеров агента

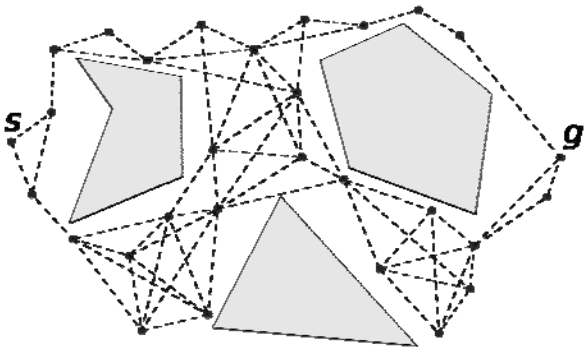

Рис. 5. Вероятностная схема местности

например до тех пор, пока число вершин графа не будет равно некоторому значению. Возможно применение и более сложных критериев. Для избегания зацикливания на шагах 2-3 обычно используют счетчик цикла – как только число попыток выбрать проходимую превысит заранее заданный порог, алгоритм останавливает свою работу.

Основным преимуществом использования ВСМ, по сравнению с ГВ, является тот факт, что для построения ВСМ не требуется никакой дополнительной информации. С другой стороны подход обладает и рядом недостатков. Во-первых, случайный характер выбора точек при построении ВСМ ведет к тому, что траектории, отыскиваемые планировщиком, использующим ВСМ в качестве модели окружающей среды, зачастую могут существенно превосходить длины кратчайших траекторий. Особенно это верно в случае, когда число выбираемых точек рабочей области сравнительно мало. Увеличение числа выбираемых точек потенциально ведет к улучшению работы планировщика (к построению траекторий по длине близких к кратчайшим), однако и этого нельзя утверждать из-за случайности выбора точек. Заметим

[2] Здесь и далее, будем для удобства употреблять словосочетание «точка графа» в смысле «вершина, графа, соответствующая заданной точке на плоскости»

также, что чрезмерное увеличение числа выбираемых точек ведет с одной стороны к увеличению времени работы алгоритма построения ВСМ, с другой – к увеличению числа вершин и ребер в графе, а, следовательно, и к увеличению времени работы алгоритма поиска пути на графе.

2.3. Графовые модели, основанные на регулярной декомпозиции

Если при построении ВСМ (см. выше) используется алгоритм, базирующийся не на случайном выборе точек, а на выборе по некоторому детерминированному критерию, то на получаемые графы принято ссылаться как на графы, полученные за счет регулярной декомпозиции – ГРД [7]. Одним из наиболее распространенных ГРД является граф, множество вершин которого пополняется по следующему алгоритму:

Шаг 1. Положить $i = 0$, $j = 0$, $p_x=x_{min}+R$, $p_y=y_{max} - R$.

Шаг 2. Если круг радиуса r с центром в точке (p_x, p_y) лежит в U и является проходимым, то добавить в граф вершину, соответствующую точке (p_x, p_y), с индексными координатами (i, j).

Шаг 3. Положить $j = j + 1$.

Шаг 4. Положить $p_x = p_x + 2R$.

Шаг 5. Если точка (p_x, p_y) лежит в рабочей области, то перейти к шагу 2.

Шаг 6. Если $p_x > x_{max}$ и $p_y < y_{min}$, то завершить работу алгоритма.

Шаг 7. Положить $j = 0$; $i = i + 1$; $p_y = p_y - 2R$; $p_x = x_{min}+R$ и перейти к шагу 2.

Фактически алгоритм, представленный выше, перебирает «слева направо, снизу вверх» точки, лежащие в рабочей области и отстоящие друг от друга на фиксированном расстоянии, равном R (Рис. 6). Для каждой из выбранных точек проверяется, проходим ли круг радиуса R с центром в этой точке. Если круг проходим, то в граф добавляется соответствующая точке вершина, при этом для удобства дальнейшего определения смежности вершин (см. ниже) вершине приписываются так называемые индексные координаты.

Для определения смежности двух вершин ГРД может быть предложено несколько критериев. Наиболее распространенными являются следующие два:

Критерий 1. Две вершины ГРД, $(i_1; j_1)$ и $(i_2; j_2)$ являются смежными, если $|i_1 - i_2| = 1$ или $|j_1 - j_2| =1$.

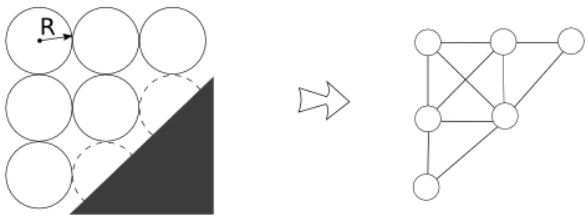

Рис. 6. Построение графа методом регулярной декомпозиции

Критерий 2. Две вершины ГРД, $(i_1; j_1)$ и $(i_2; j_2)$ являются смежными, если $|i_1 - i_2| = 1$ XOR[3] $|j_1 - j_2| = 1$.

На Рис. 6 справа изображен ГРД, при построении которого использовался первый критерий смежности вершин.

ГРД обладают рядом существенных достоинств по сравнению с рассмотренными выше графовыми моделями. Отметим основные из них. Во-первых, для построения ГРД не требуется никакая дополнительная информация о предметной области. Во-вторых, при использовании ГРД для решения практических задач, связанных с построением траектории агента в двумерном пространстве, естественным образом учитываются размеры последнего. В третьих, кратчайший путь, найденный в ГРД, фактически соответствует кратчайшей траектории агента на плоскости с той лишь оговоркой, что речь идет не о непрерывной кривой в евклидовом пространстве, а о ломанной, составленной из отрезков, длина которых не превосходит «радиуса» агента. Для широкого класса задач, касающихся автоматического построения траектории для беспилотных транспортных средств такой точности более чем достаточно. Основным же недостатком ГРД является тот факт, что подобного рода графы содержат большое число вершин, что затрудняет поиск кратчайшего пути, особенно в случае, когда вычислительные ресурсы ограничены. Однако к настоящему моменту разработаны и исследованы многие методы и подходы к эвристическому сокращению пространства поиска, позволяющие на практике эффективно (в вычислительном смысле) отыскивать пути на ГРД больших размеров.

[3] Исключающее ИЛИ

2.4. МТ-графы

МТ-граф (метрический топологический граф) – это графовая модель, использующаяся для решения задачи планирования траектории агента на плоскости, базирующаяся на ГРД, но содержащая дополнительную информацию, отражающую особенности предметной области, использование которой при последующем поиске пути ведет к повышению общей вычислительной эффективности процедуры планирования траектории агента [8].

Основным структурным элементом МТ-графа (МТГ) является множество вершин, которое строится по алгоритму, аналогичному алгоритму построения ГРД. Разница заключается лишь в том, что вершины МТ-графа «покрывают» всю рабочую область евклидова пространства, включая непроходимые области. Формальное определение МТГ можно дать следующим образом.

Пусть существует некоторая ограниченная поверхность U и можно представить в виде объединения конечного числа поверхностей ($U = c_1 \cup c_2 \cup \ldots \cup c_{n-1} \cup c_n$) таких, что $i \le n$: c_i содержит внутренние точки. Одну из внутренних точек области c_i будем называть центром c_i.

$i,j \le n$: c_i и c_j не имеют общих внутренних точек. Различные c_i и c_j , имеющие, по крайней мере, одну общую граничную точку, будем называть смежными.

Пусть на множестве $\{c_i\}$ задано некоторое унарное отношение $P(c)$, которое каждой подобласти ставит в соответствие либо 1, либо 0. Если $P(c_i) = 1$, подобласть c_i будем называть непроходимой, если $P(c_i) = 0$, то подобласть c_i будем называть проходимой.

Тогда поверхности U, упорядоченному множеству $\{c_i\}$ и функции $P(c)$ можно поставить в соответствие граф (Рис. 7), который строится по следующим правилам: каждой области c_i ставится в соответствие вершина v_i; каждой паре смежных областей c_i и c_j ставится в соответствие ребро e_{ij}, соединяющее вершины i и j.

Также определим следующие функции:

- $p(v)$ каждой вершине ставит в соответствие значение функции P (для соответствующей вершине области поверхности). Вершину v будем называть проходимой, если $p(v)=0$, и непроходимой, если $p(v)=1$;

- $w(e)$ каждому ребру ставит в соответствие элемент из расширенного множества действительных чисел, причем $w(e_{ij}) = \infty$, если одна из вершин, образующих это ребро, является непроходимой;

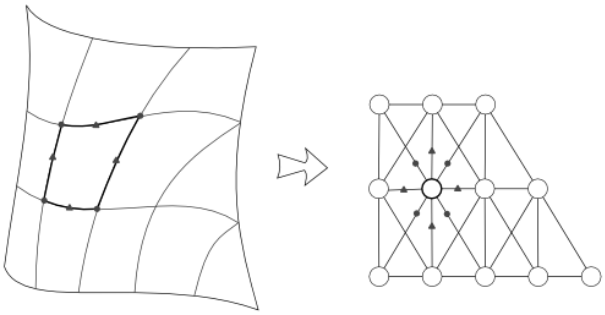

Рис. 7. Поверхность и соответствующий ей МТ-граф

- $\rho(v_i,v_j)$ каждой паре вершин ставит в соответствие число, равное расстоянию (по некоторой метрике в U) между центрами областей, которым соответствуют вершины v_i и v_j .

Совокупность $<V, E, \text{p}, w, \rho>$ будем называть метрическим топологическим графом.

Для решения практических задач обычно на МТГ налагаются дополнительные условия. Пусть поверхность U и подобласти $\{c_i\}$ являются образом гомеоморфного отображения прямоугольника размером m на n ($m \ge 2$, $n \ge 2$), причем прообразами подобластей c_i являются квадраты со стороной равной R («радиусу» агента). В этом случае тройке $<V, E, p>$ можно поставить в соответствие матрицу размером m на n, каждый элемент которой будет либо равен «1», если он соответствует непроходимой области пространства, и «0» - если элемент соответствует проходимой области пространства. В дальнейшем можно изображать эту матрицу в виде таблицы (Рис. 8).

Множество вершин МТ-графа будем обозначать как $A = \{a_{ij}\}$, где a_{ij} – вершина МТ-графа, которой соответствует элемент матрицы с индексными координатами i и j. Вершины графа, которому ставится в соответствие матрица, будем называть клетками.

Легко показать, что смежным вершинам исходного МТ-графа соответствуют элементы матрицы, которые по каждому из их индексов отличаются не более чем на единицу. Вес перехода из одной смежной клетки в другую может зависеть от различных условий и поставленной задачи. Также возможны различные варианты определения функции расстояния. Задача же планирования траектории формулируется как

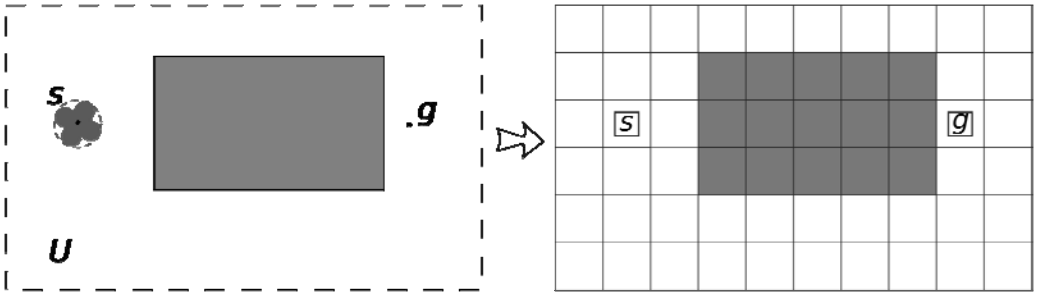

Рис. 8. Исходная задача планирования и соответствующий этой задаче МТ-граф

задача отыскания последовательности клеток А: $\pi=\{a_{i0\,j0}, a_{i1\,j1}, a_{i2\,j2}, \ldots, a_{is\,js}\}$ такой, что:

- клетка $a_{i0\,j0}$ соответствует подобласти $c_k \subset U$, такой, что $s \in c_k$;
- клетка $a_{is\,js}$ соответствует подобласти $c_l \subset U$, такой, что $g \in c_l$;
- $\forall v{:}0 \le v \le s$ $a_{iv\,jv}=0$;
- $\forall v{:}1 \le v < s$ клетки $a_{iv\text{-}1\;jv\text{-}1}$ и $a_{iv\;jv}$ являются смежными.

При отыскании пути на МТ-графе целесообразным представляется использование информации о форме и взаимном расположении препятствий. В работе [9] описывается подобный подход. Там же приводятся результаты вычислительных экспериментов, позволяющие сделать вывод, что именно использование такой информации позволяет существенно повысить вычислительную эффективность алгоритма поиска пути на графе по сравнению с имеющимися аналогами.

3. Графовые модели в задаче планирования траектории беспилотного транспортного средства

Обычно при решении задачи планирования траектории беспилотного транспортного средства в качестве исходных данных выступает дискретная цифровая карта (модель) местности (ЦКМ), хранящаяся в памяти бортового вычислителя и уточняющаяся в режиме реального времени в соответствии с информацией, поступающей от датчиков. Эта карта представляет собой частично-упорядоченную совокупность элементов (в случае двумерного пространства – матрицу), каждый из которых соответствует определенной области пространства и отражает определенные характеристики этой области.

В рассматриваемом в работе случае (см. постановку задачи в п.1) в качестве единственной значимой для задачи построения траектории характеристикой выступает проходимость, либо непроходимость соответствующей области пространства. Информация о проходимости всегда может быть извлечена из известной ЦКМ по некоторому (достаточно примитивному) алгоритму, учитывающему особенности задачи и ограничения транспортного средства.

Приведем пример. Пусть речь идет о построении траектории маловысотного полета беспилотного вертолета, когда для обеспечения скрытности полет должен выполнятся в горизонтальной плоскости, ниже определенной высоты (например, ниже уровня высотных строений). Пусть в памяти указанного беспилотного вертолета хранится ЦКМ размера 500 на 500 элементов, и каждый элемент отражает максимальную высоту (в метрах) над уровнем моря области 4 на 4 метра. Очевидно, что элементы ЦКМ, содержащие значения выше требуемой высоты полета, должны быть помечены как непроходимые, остальные элементы – как проходимые (Рис. 9).

Таким образом, без ограничения общности можно считать, что в качестве исходных данных для планирования траектории выступает не сама дискретная цифровая карта местности, а ее аналог, представляющий собой (для двумерного случая) бинарную матрицу, каждому элементу которой соответствует проходимая (0) либо непроходимая (1) область на плоскости. Будем называть такую матрицу – матрицей проходимости. Очевидно, что в этом случае наиболее удобным способом построения модели рабочей области для задачи планирования траектории является построение метрического топологического графа (МТГ). При этом каждому элементу ЦКМ будет соот-

ветствовать вершина графа. Ребра графа будут соединять вершины, соответствующие элементам матрицы, которые отличаются по каждому индексу не более чем на единицу. Весам ребер будут соответствовать характеристики элементарных траекторий, соединяющих точки. В простейшем случае можно принять вес ребер равным единице, если элементы матрицы отличаются только по одному из индексов, и 1.42, если элементы матрицы отличаются по обоим индексам.

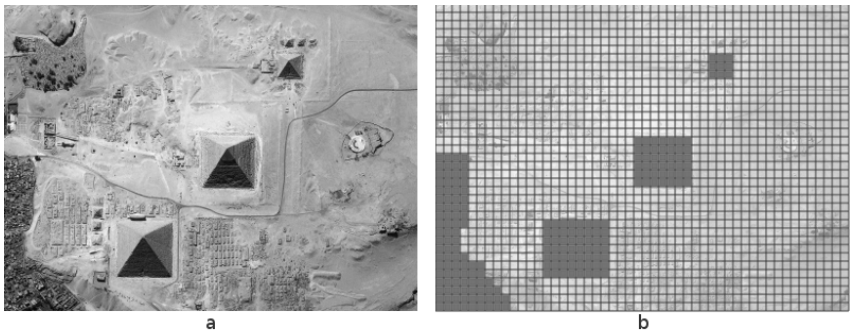

Рис. 9. Спутниковый снимок пирамид в Гизе

a - изображение цифровой карты местности; b - МТ-граф

Заключение

Задача планирования траектории на плоскости (в контексте автоматизации управления беспилотным транспортным средством) подразумевает последовательное решение двух подзадач – построения графовой модели окружающего пространства и поиска пути на графе. Методы построения графа можно разделить на два класса. К первому относятся методы, осуществляющие построение графа так, чтобы минимизировать число вершин и ребер. Такие методы достаточно трудоемки и требуют нетривиальной обработки исходных данных, в качестве которых обычно (в задачах навигации беспилотных транспортных средств) выступают цифровые карты и модели местности. Существует и другой класс методов, которые извлекают графы из цифровых карт по тривиальным алгоритмам. Использование именно таких методов является предпочтительным при планировании траектории беспилотных транспортных средств. Среди моделей, извлекаемых с помощью этих методов, наиболее естественной моделью представления окружающего пространства является метрический топологический граф, содержащий в отличие от аналогичных графовых моделей (например, графов, построенных за счет регулярной декомпозиции) информацию о препятствиях (непроходимых для БТС областей пространства), которая впоследствии может быть использована при построении траектории.

Литература

1. Прапарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: введение. М.: Мир, 1989.
2. Edelsbrunner H. Algorithms in Combinatorial Geometry. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, vol. 10. Springer-Verlag, 1987.
3. Wooden D.T. Graph-based Path Planning for Mobile Robots, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.
4. Latombe J. Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publishers, 1991.
5. Branicky M., Lavalle S., Olson K., Yang L. Quasi randomized path planning // InProc. IEEE Int. Conference On Robotics and Automation, 2001.
6. Morgan S.B., Branicky M.S. Sampling-based planning for discrete spaces // InProc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004.
7. Yap P.. Grid-based path-finding // InProc. Canadian Conference on Artificial Intelligence, 2002.
8. Яковлев К.С. Графы специальной структуры в задачах планирования траектории. Труды III международной конференции «Системный анализ и информационные технологии САИТ-2009». М: ИСА РАН, 2009.
9. Яковлев К.С., Сарафанов В.Ю., Храмоин И.В. Об одной проблеме, возникающей при планировании траектории на плоскости. Труды тринадцатой национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012, г. Белгород, Россия), 2012.

Яковлев Константин Сергеевич. Научный сотрудник Института системного анализа РАН. Кандидат физико-математических наук. Автор девяти публикаций. Область научных интересов: искусственный интеллект, робототехника, когнитивные науки, интеллектуальные динамические системы, интеллектуальные системы управления, планирование, планирование траектории, моделирование целенаправленного поведения, эвристический поиск.
E-mail: yakovlev@isa.ru.

Баскин Егор Сергеевич. Аспирант Института системного анализа РАН. Область научных интересов: искусственный интеллект, робототехника, интеллектуальные динамические системы, планирование траектории.