УДК 519.68

ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ

Метляева О.Н.
Научный руководитель – доцент Ильина Т.Р.
Сибирский федеральный университет

При комплексной разработке систем управления транспортными средствами возникает необходимость исследования целенаправленных действий транспортного средства в частично известной (или полностью неизвестной) среде. При наличии автономного транспортного средства, снабженного сенсорной системой, эта задача может рассматриваться как задача прокладки маршрута в частично неизвестной обстановке.

Транспортное средство, осуществляющее автономное планирование и реализацию маршрута от заданной точки старта до точки цели, назовем интеллектуальным транспортным средством (ИТС). Когда среда перемещения относительна проста, задача планирования маршрута не вызывает затруднений. В этом случае возможные маршруты составляются заранее и планирование маршрута проводится до начала движения.

Рассмотрим задачу планирования маршрута в процессе движения ИТС в неизвестной среде с препятствиями произвольной формы.

ИТС будем представлять материальной точкой, положение которой характеризуется координатами ($x^{(1)}$, $x^{(2)}$). Задано положение старта ИТС $x_0 = (x_0^{(1)}, x_0^{(2)})$ и положение цели $x_s = (x_s^{(1)}, x_s^{(2)})$. В каждом текущем положении ИТС его сенсорная система выделяет множество $Z(x)$ тех точек с центром в x и радиусом r, которые свободны от препятствий и в которые ИТС может перейти из точки x. В точке x_0 формируется множество $Z(x_0)$. После перехода в точку x_1, $x_1 \in Z(x_0)$ формируется множество $Z(x_1)$ и так далее. Последовательность

$$x_0, x_1, \ldots, x_n, Z(x_0), Z(x_1), \ldots, Z(x_n) \qquad (1)$$

представляет собой некоторое частичное знание среды.

При движении в неизвестной среде могут возникнуть две критические ситуации, преодоление которых для ИТС представляет трудность. Первая критическая ситуация состоит в попадании ИТС в тупик. Размеры тупика могут быть очень большими по сравнению с радиусом обзора сенсорной системы, и возникает опасность зацикливания в тупике. Вторая критическая ситуация возникает в случае, когда точка цели окружена препятствиями и может быть достигнута по относительно узкому проходу. В этом случае также возникает опасность зацикливания. Задача планирования перемещений ИТС в неизвестной среде состоит в умении по частичной информации (1) так выбирать направление перемещения ИТС при каждом шаге, чтобы в конечном итоге всегда достигать точки цели.

Задача построения алгоритма планирования маршрута ИТС в общем случае ставится как задача нахождения набора функций

$$f_i(x_0, x_1, \ldots, x_s, Z(x_0), Z(x_1), \ldots, Z(x_{i-1}) \qquad (2)$$

таких, что

1) каждая точка x_i, характеризующая смену этапа движения ИТС, задается в виде

$$x_i = f_i(x_0, x_1, \ldots, x_{i-1}, x_s, Z(x_0), Z(x_1), \ldots, Z(x_{i-1}), \quad x_i \in Z(x_{i-1});$$

2) существует номер N такой, что $x_s \in Z(x_N)$.

Алгоритмом планирования маршрута ИТС на неизвестной местности будет являться любой набор функций (2). Алгоритм будет сходящимся, если он удовлетворяет второму свойству набора функций (2).

Через $L(x,y)$ обозначим непрерывную линию с началом в точке x и концом в точке y. Для любого x через $Q(x)$ обозначим множество точек в окрестности x, занятых препятствиями. $Q(x)$ точки, в которые ИТС из точки x за один шаг попасть не сможет. Очевидно, что $Q(x) \cap Z(x) = \varnothing$.

Приведем условия, которым должен удовлетворять сходящийся алгоритм. Для сходимости алгоритма планирования маршрута ИТС в неизвестной среде необходимо и достаточно, чтобы последовательность действий алгоритма определялась следующим образом:

1. Если пройдена последовательность этапов, $x_0, x_1, \ldots, x_n$, то $x_{n+1} \in Z(x_n)$ и x_{n+1} лежат на непрерывной линии $L(x_n,x_s)$ конечной длины, не пересекающей множества $Q(x_i)$, $i = 1,2,\ldots,n$.

2. ИТС движется по линии $L(x_n,x_s)$. На каждом этапе движение по линии производится на максимальную длину в пределах допустимой окрестности. Движение по линии совершается до тех пор, пока ИТС не достигнет цели x_s, либо пока на некотором этапе q не появится точка x_q такая, что

$$L(x_q, x_s) \cap Z(x_q) = \varnothing, \qquad (3)$$

где $L(x_q,x_s)$ – часть линии $L(x_n,x_s)$. Как только выполнится (3), алгоритм переходит к n, 1 с заменой n на q.

Сходящиеся алгоритмы отличаются друг от друга видом линии $L(x,y)$, которую назовем предварительным маршрутом. На свойство сходимости не влияет способ выбора линии $L(x,y)$ но, тем не менее, согласно приведенному утверждению, сходящийся алгоритм обязательно реализует некоторые линии. Таким образом, для построения сходящихся алгоритмов необходимо строить линии, не пересекающие окрестности точек, в которых обнаружены препятствия, т. е. строить линии, огибающие границы известных препятствий и заканчивающиеся в точке цели.

Существует подход, в котором предлагается для построения $L(x,y)$ использовать параметрические семейства $K_\alpha(x_n, x_s, c)$, $\alpha = 1,2,...$ линий, проходящих через точки x_n и x_s, где c - α-мерный вектор действительных параметров.
Семейства линий могут состоять из линий вида:

$$x^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{\alpha_j} c_j^{(i)} \varphi_j(t), \ \ i = 1,2, \ \ \sum_{i=1}^{2} \alpha_i = \alpha ,$$

где $\varphi_j(t)$ заданные базисные функции, j = 1,2,… . Если в процессе движения ИТС было обнаружено k точек, в окрестности которых были обнаружены препятствия, то среди семейства линий отыскивается линия $L_\alpha(x_n, x_s, c, t)$, удовлетворяющая неравенствам

$$\rho(x_q, L_\alpha(x_n, x_s, c, t)) \ge r, \quad q = 1,2,...,k , \qquad (4)$$

где ρ евклидово расстояние. Этим выбирается линия, не пересекающая множества $Q(x_q)$, $q=1,2,\ldots,k$. Для построения линии $L(x_n,x_s)$ необходимо проверять совместность системы неравенств (4). Если система совместна, то определяется c - α-мерный вектор параметров семейства линий. Если система несовместна, то семейства линий расширяются и ищется линия уже в новом семействе.

При таком подходе возникает необходимость многократного решения задач проверки совместности системы (4) и выбора вектора параметров c. Предлагается другой подход для выбора линий $L(x_n,x_s)$. Пусть ИТС движется из точки старта $x_0 = (x_0^1, x_0^2)$ в заданную точку цели $x_s = (x_s^1, x_s^2)$. И в процессе движения формируется последовательность x_0, x_1, … ,x_n, $Z(x_0)$, $Z(x_1)$, … , $Z(x_n)$. Выбор точек траектории будем производиться из условия

$$\min_{x \in Z(x)_i} \rho(x, x_s), \quad i = n+1, n+2, ...$$

до тех пор, пока

$$\rho(x_n, x_s) \geq \rho(x_{n+1}, x_s) \geq ... \geq \rho(x_{k-1}, x_s).$$

Как только появилась точка x_k, движение из которой до точки цели по минимуму расстояния невозможно, (появился тупик) вводится новая промежуточная цель x_s^k, и движение из точки x_k осуществляется по минимуму расстояния до цели x_s^k. Предлагается на k-ом шаге построить линию *L(x_k, x_s)*, состоящую из линий $L(x_k, x_s^k)$, $L(x_s^k, x_s)$, где первая линия состоит из точек траектории движения ИТС по минимальному расстоянию от точки x_k, до новой промежуточной цели x_s^k, а вторая линия планируется как движение по минимуму расстояния от новой промежуточной цели x_s^k, до исходной точки цели x_s. Определим линии $L(x_k, x_s^k)$, $L(x_s^k, x_s)$ таким образом, чтобы они не пересекали обнаруженных препятствий, тогда согласно приведенным условиям о сходимости алгоритма планирования траектории движения ИТС, предложенный подход определит алгоритм из сходящегося класса.

Движение из точки старта $x_0 = (x_0^1, x_0^2)$ в точку цели $x_s = (x_s^1, x_s^2)$ осуществляется по минимуму расстояния, пока это возможно. Если появилась точка x_k, для которой движение по минимуму расстояния невозможно, т. е. выполнится условие $\rho(x_s, x_k) > \rho(x_s, x_{k-1})$, вводится новая промежуточная цель x_s^k, расположенная на прямой $P(x_k, x_{k-1})$ так, чтобы точки x_s^k и x_{k-1} располагались по обе стороны от точки x_k. Расположение новой цели x_s^k выбирается произвольно на прямой $P(x_k, x_{k-1})$ в выбранном направлении. Движение из точки x_k в точку новой цели x_s^k осуществляется по минимуму расстояния до тех пор, пока цель x_s^k не будет достигнута, либо появится точка x_k^m, в окрестности которой нет препятствий ($Q_{x_k^m} = \varnothing$), либо появится точка x_{k_1} движение по минимуму расстояния от которой до цели x_s^k невозможно. В первом случае $Q_{x_k^m} \neq \varnothing$ (движение осуществляется вдоль препятствия, обнаруженное препятствие не преодолено) и для того, чтобы преодолеть найденное препятствие, цель x_s^k переносится произвольно по прямой $P(x_k, x_{k-1})$ в выбранном направлении. Во втором случае, обнаруженное препятствие преодолено, и движение от точки x_k^m к точке первоначальной цели x_s осуществляется по минимуму расстояния, но с учетом появившейся информации об обнаруженных препятствиях. В третьем случае, обнаружено другое препятствие, и вводится новая промежуточная цель $x_s^{k_1}$, аналогично тому, как выбиралась промежуточная цель x_s^k. Предыдущая промежуточная цель убирается.

Каждая нововведенная промежуточная цель обеспечивает прохождение ИТС по некоторому участку тупика. Выбор промежуточных целей происходит таким образом, что ИТС двигается по форме тупика, и при этом никогда не произойдет возврат к уже пройденной траектории вдоль тупика. Таким образом, линия, по которой движется ИТС к новой промежуточной цели, не пересекает областей тех точек, в окрестности которых были обнаружены участки препятствия.

Рассмотрим движение ИТС после того, как препятствие преодолено. При движении от точки старта x_0 к точке цели x_s выделим x_p точку, в окрестности которой появилось препятствие. При дальнейшем движении выделим точку x_m , в окрестности которой препятствие не обнаружилось. Тогда траектория от точки x_p до точки x_m определит границу встреченного препятствия. Это может быть ломанная или любая другая линия с началом в точке x_m и концом в точке x_p. Отрезок $x_m x_p$ прямой, проходящей через точки x_m и x_p, замыкает линию. Все точки внутри полученной области будем считать недоступными для ИТС, так как движение к цели из любой точки этой области на некотором шаге становится невозможным (обнаружено уже известное препятствие), что приводит к зацикливанию алгоритма, либо возможно избежать зацикливания, но при этом происходит существенное удлинение траектории за счет неизбежных повторных движений внутри этой области. В результате движения ИТС по незнакомой местности появляются «известные» препятствия в виде выделенных областей, состоящих из «запрещенных точек». Таким образом, в каждой точке движения ИТС двигается либо по траектории выхода из тупика, либо по траектории движения к цели с учетом обнаруженных препятствий. В каждом из этих случаев выполняются условия теоремы о сходящихся алгоритмах.

На основе приведенных алгоритмов выхода из тупика и алгоритма учета обнаруженных препятствий, был реализован алгоритм планирования траектории ИТС на незнакомой местности ALGS.

В ситуации, представленной на рис.1, показана работа алгоритма ALGS. В результате движения от точки старта O до точки цели S было введено пять промежуточных целей и выделены две запрещенные области. В результате работы алгоритма цель была достигнута. В этой же ситуации описанный в литературе эвристический алгоритм, который работает на более простой местности, не дал результата, цель не была достигнута, алгоритм зациклился. Его траектория приведена на рис.2.

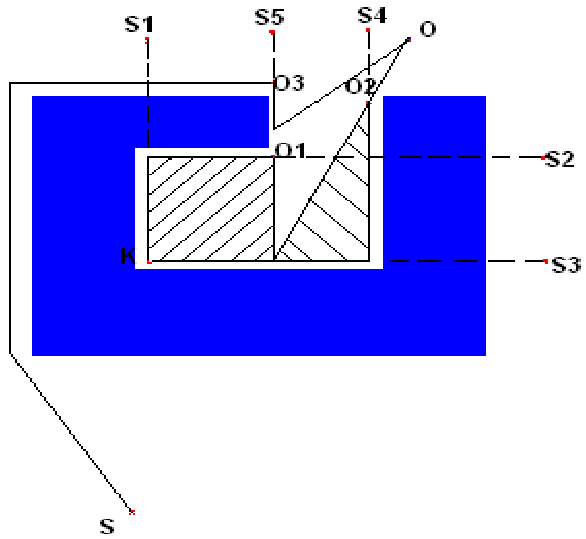

Рис. 1.

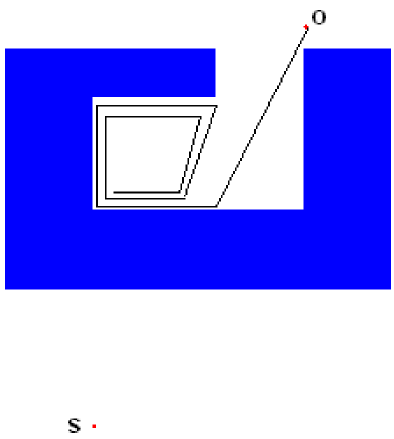

Рис.2.

В предлагаемых тезисах предложен подход к созданию алгоритмов планирования траектории движения ИТС на неизвестной местности, принадлежащих к классу сходящихся алгоритмов. Предложено в качестве процедуры выхода из тупиков произвольной формы вводить промежуточные цели. Также предложен метод учета обнаруженных препятствий при движении ИТС в незнакомой местности, что позволяет планировать движение из любой точки по линии, не пересекающей обнаруженных препятствий. Такой подход существенно сокращает вычислительный ресурс, так как нет необходимости проверять условия наличия препятствий в окрестности точек пройденной траектории.