

УДК 62-503.57

В. Н. Герасимов, Б. Б. Михайлов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ НАЛИЧИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕПЯТСТВИЙ

Рассматривается способ управления движением мобильного робота по заданной траектории при наличии подвижных и неподвижных препятствий. Для этого используется известный алгоритм A^ (А-звезда), который был модифицирован авторами для решения поставленной задачи.*

E-mail: robot@bmstu.ru

Ключевые слова: *мобильный робот, алгоритм управления движением, статическое препятствие, динамическое препятствие.*

В настоящее время все более популярными становятся сервисные мобильные роботы. К данному типу можно отнести роботы-экскурсоводы, роботы-пылесосы, подвижные информационные терминалы. Для выполнения своих функций эти роботы должны уметь перемещаться по определенным траекториям в автоматическом режиме. Обычно в современных роботах для этой цели используется навигационная система, которая определяет собственные координаты робота, планирует траекторию в текущий момент времени и управляет его движением. Поскольку реальная среда, в которой находится робот, обычно содержит подвижные препятствия (люди, другие мобильные роботы), движение в ней по предварительно заданной траектории практически невозможно.

Постановка задачи. В данной статье рассмотрено решение задачи управления движением мобильного робота при наличии подвижных (динамических) препятствий. Задача формулируется следующим образом. Имеется кусочно-линейная траектория от начальной точки до целевой. Она может корректироваться в реальном времени с использованием алгоритма A^* (А-звезда). Система навигации мобильного робота отслеживает его положение и вычисляет координаты текущей опорной точки, к которой должен двигаться робот, избегая столкновений с препятствиями (статическими и динамическими).

Статические препятствия. Рассмотрим решение задачи в условиях статической среды как более простое. В его основе лежит метод эффективного пути [1]. В данном случае эффективный путь – это от-

резок прямой, соединяющий текущее положение робота с текущей опорной точкой.

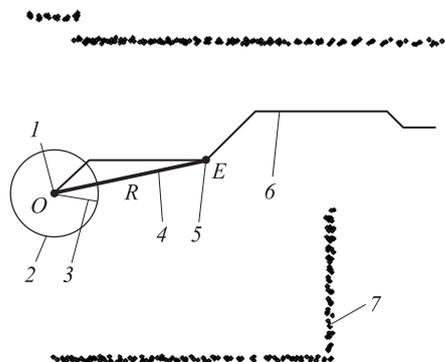


Рис. 1. Определение опорной точки:

1 – положение робота; 2 – мобильный робот; 3 – текущий курс робота; 4 – эффективный путь; 5 – опорная точка; 6 – заданная траектория; 7 – препятствия

В [1] в качестве опорной точки использован второй излом кусочно-линейной траектории (рис. 1), поскольку одного изменения направления траектории с дискретным шагом в 45° относительно положения робота недостаточно для того, чтобы достоверно определить тенденцию дальнейшего изменения траектории. Вторая смена направления показывает устойчивость изменения заданной траектории движения. В противном случае робот продолжает движение в выбранном направлении.

Расстояние R между опорной точкой на траектории и текущим положением робота определяется его динамикой. Сверху значение R ограничено максимальной скоростью перемещения $v_c + \dot{v}_a \Delta t$, которая может быть достигнута роботом через интервал времени Δt :

$$R_{\max}(v_c) = (v_c + \dot{v}_a \Delta t) T_{\max},$$

где \dot{v}_a – максимально допустимое ускорение робота; v_c – текущая скорость перемещения робота; T_{\max} – время, за которое робот достигнет ближайшее препятствие, находящееся на расстоянии s_l ,

с максимальной скоростью v_{\max} : $T_{\max} = \frac{s_l}{v_{\max}}$, т. е. длина эффективного пути зависит от скорости робота.

Если изменение направления траектории обнаружено в непосредственной близости от робота (например, клетка карты, следующая за текущим положением робота), это изменение является незначительным для робота. Поэтому расстояние между опорной точкой на траектории и текущим положением робота ограничено снизу постоянной R_{\min} , которая отфильтровывает незначительные изменения направления траектории. Такие изменения замедляют движение робота, но почти не меняют его положение. Наиболее эффективно установить значение R_{\min} в соответствии с максимальным временем

торможения $T_{b_{\max}} = \frac{v_{\max}}{\dot{v}_b}$ для того, чтобы робот мог остановиться на расстоянии, равном длине минимального эффективного пути, если изначально он достиг максимальной скорости:

$$R_{\min} = v_{\max} T_{b_{\max}} - \frac{1}{2} \dot{v}_b T_{b_{\max}}^2.$$

Отсюда следует, что минимальная скорость движения $v_{\min} = \frac{R_{\min}}{T_{\max}}$.

Итак, метод эффективного пути дает координаты опорной точки на траектории, к которой должен стремиться робот, двигаясь по заданному маршруту. При этом траектория становится более гладкой и робот может столкнуться с препятствием. Столкновение возможно и в том случае, если некорректно заданы габариты робота в алгоритме поиска пути. Чтобы избежать подобных ситуаций, метод эффективного пути был модифицирован. Суть модификации заключается в том, чтобы искусственно сместить опорную точку из «запрещенной» зоны, если она туда попадает. Рассмотрим предлагаемый способ расчета скорректированного положения опорной точки.

Пусть имеется карта помещения (рис. 2). На ней показаны траектория движения робота Z и опорная точка E , координаты которой вычислены по методу эффективного пути. В окрестности мобильного робота находятся препятствия, обозначенные на карте занятыми ячейками 5 . Граница робота задается окружностью, радиус W которой определяется габаритами робота, зоной безопасности и размером ячейки карты заполнения.

Сначала задается область, в которой необходимо учитывать препятствия, например $N_c \times N_c$ ячеек. Затем каждая ячейка внутри этой области проверяется на наличие препятствия. Если препятствие обнаружено, координаты опорной точки пересчитываются с учетом следующих условий:

- в новой опорной точке робот не должен сталкиваться с препятствием;
- длина эффективного пути должна сохраняться.

Рассмотрим треугольник OEP (рис. 3, а). Здесь точка O – центр робота; E – опорная точка; P – центр ячейки с препятствием; OP – эффективный путь длиной R . Сначала проверяем возможность столкновения робота с препятствием в опорной точке. Для этого рассчитываем расстояние d между опорной точкой E и точкой P :

$$d = |EP| = |OE - OP|.$$

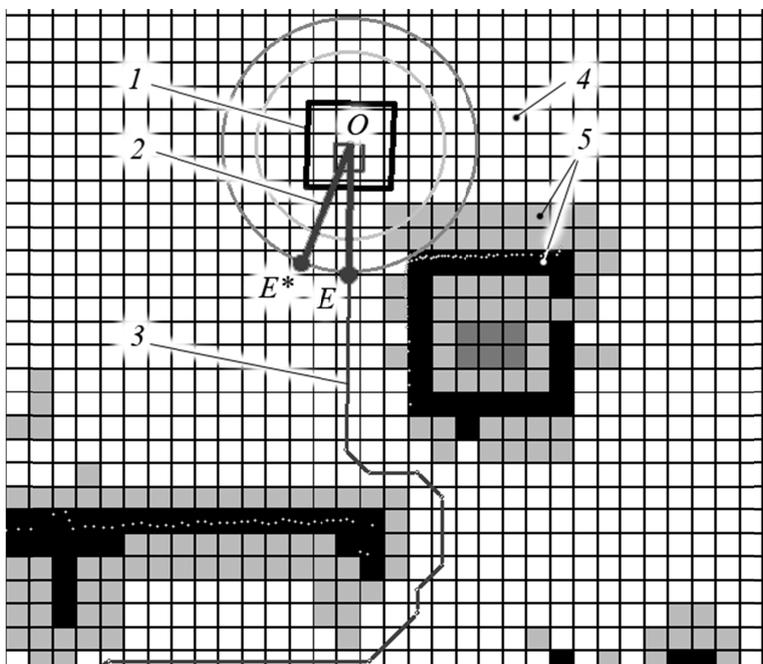


Рис. 2. Результат определения опорной точки:

1 – мобильный робот; 2 – эффективный путь; 3 – заданная траектория; 4 – свободные клетки; 5 – занятые клетки

Если $d \geq W$, препятствие находится далеко от робота и оно игнорируется. В противном случае выбирается новое положение опорной точки. Рассмотрим граничный случай, когда окружность, описывающая робот, касается препятствия, т. е. $d = W$. Из рис. 3, а очевидно,

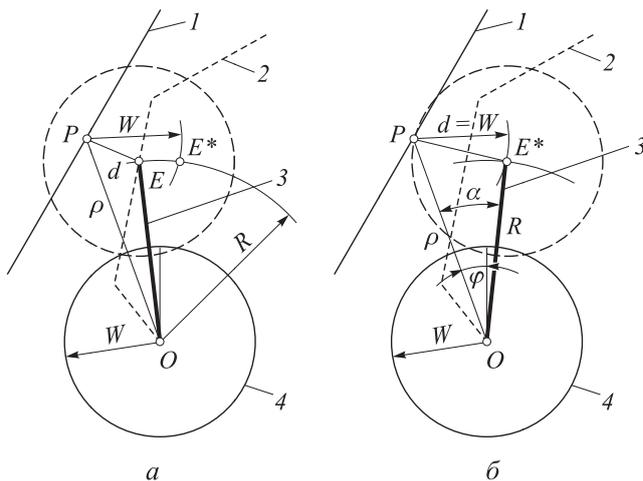


Рис. 3. Расчетная схема алгоритма объезда препятствий:

а – до корректировки; б – после корректировки (1 – препятствие; 2 – заданная траектория; 3 – эффективный путь; 4 – габаритная окружность мобильного робота)

что новая опорная точка E^* должна находиться на пересечении окружностей (P, W) и (O, R) . Координаты новой точки находим, зная угол φ , под которым направлен вектор OP (рис. 3, б), и определив угол $\alpha = \widehat{POE^*}$ из теоремы косинусов:

$$W^2 = R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cdot \cos(\alpha). \quad (1)$$

Отметим, что уравнение (1) имеет два решения, отличающиеся знаком. Эти решения соответствуют положению опорной точки слева и справа от препятствия. Положительное решение уравнения (1) имеет вид

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R^2 + \rho^2 - W^2}{2R\rho}\right). \quad (2)$$

Координаты новой опорной точки E^* относительно препятствия зависят от расположения старой опорной точки E . Зная векторы OE и OP , определим ориентацию эффективного пути и найдем скорректированный вектор OE^* :

$$OE^* = \begin{cases} (R \cos(\varphi - \alpha), R \sin(\varphi - \alpha)), & OE \times OP > 0, \\ (R \cos(\varphi + \alpha), R \sin(\varphi + \alpha)), & OE \times OP \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

По мере движения робота рассчитывается следующая опорная точка и сравнивается с предыдущей. Из всех точек выбирается та, которая наиболее удалена от препятствия. Проверка удаленности проводится отдельно для точек, расположенных слева и справа от препятствия. Отметим, что робот начнет объезжать препятствие непосредственно перед столкновением с ним.

Итак, предлагаемая модификация метода эффективного пути позволяет определить координаты текущей опорной точки E^* (см. рис. 2) и обеспечить движение робота по заданной траектории без столкновения с неподвижными препятствиями.

Динамические препятствия. Перейдем к задаче определения координат опорной точки при наличии движущихся препятствий. Учет параметров динамических препятствий, с одной стороны, позволяет избежать столкновений с ними, а с другой – оптимизировать траекторию движения. Рассмотрим простой пример, показанный на рис. 4. Пусть робот 1 движется по прямой на некотором участке спланированной траектории. При этом робот 2 (динамическое препятствие) движется по пересекающему маршруту, являясь помехой для первого.

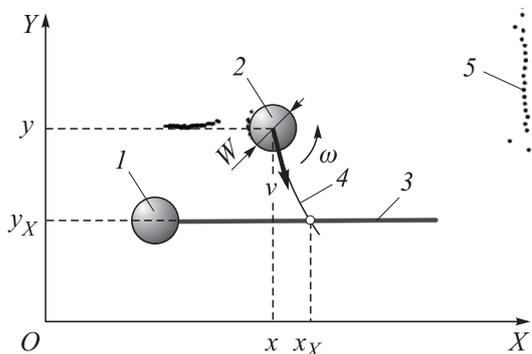


Рис. 4. Постановка задачи обхода динамического препятствия:

1 – мобильный робот; 2 – динамический объект (препятствие); 3 – заданная траектория движения робота; 4 – траектория движения динамического объекта; 5 – статические препятствия

Пусть имеются параметры движущегося объекта: его положение в абсолютной системе координат, габаритные размеры, а также скорость. Для решения поставленной задачи был использован модифицированный метод эффективного пути, описанный выше. Только теперь при наличии подвижных препятствий участок карты заполнения в окрестности робота меняет свое содержимое в зависимости от времени наблюдения и параметров движущихся объектов. В дальнейшем такой участок карты заполнения будет называться динамическим.

Для обработки динамического участка действия должны осуществляться в приводимой ниже последовательности:

1) используя параметры движущегося объекта (препятствия) в текущий момент времени, вычисляем его параметры в последующие моменты времени;

2) на динамическом участке карты очищаем клетки, расположенные в зоне текущего положения объекта;

3) рассчитываем точку и время пересечения траектории препятствия с траекторией робота;

4) добавляем на динамическом участке карты клетки, описывающие препятствие в точке пересечения траекторий.

Выполнив перечисленные действия, можно найти опорную точку модифицированным методом эффективного пути, подставив вместо исходного участка карты заполнения полученный динамический участок.

Сначала рассмотрим получение значений параметров объекта в произвольный момент времени. В статье [2] предложены две модели подвижных объектов. Рассмотрим одну из них – модель робота-препятствия. Согласно рис. 4, вектор состояния подвижного объекта в текущий момент времени t_0 описывается следующим образом:

$$s = (x \ y \ \varphi \ v \ \omega \ W)^T, \quad (4)$$

где x, y – положение объекта в абсолютной системе координат; φ – угол поворота объекта относительно оси X абсолютной системы координат; v, ω – скорости перемещения и вращения объекта соответственно; W – радиус описанной вокруг объекта окружности.

Будем считать, что габаритный размер W объекта не меняется во времени, т. е. объект является твердым телом с неизменяемой формой. Кроме того, примем допущение, что скорости v, ω объекта постоянны в окрестности t_0 . Тогда значение оставшихся переменных вектора (4) в произвольный момент времени t можно вычислить с помощью уравнений кинематики:

$$\varphi(t) = \int_{t_0}^t \omega dt + \varphi(t_0); \quad (5)$$

$$x(t) = \int_{t_0}^t v \cos \varphi(t) dt + x(t_0); \quad (6)$$

$$y(t) = \int_{t_0}^t v \sin \varphi(t) dt + y(t_0). \quad (7)$$

Отметим, что выражения (5–7) справедливы только в области, близкой к t_0 ($t \approx t_0$).

Следующий этап – очистка клеток участка карты – является тривиальной задачей. Однако необходимо уточнить, что с этого момента и далее алгоритм работает не с картой, сохраненной в памяти, а с копией участка в окрестности положения робота (с динамическим участком). На данном этапе всем клеткам, находящимся внутри окружности с центром в точке $(x(t_0); y(t_0))$ и радиусом W присваивается состояние «свободна». Таким образом, если ранее объект был добавлен на карту как статический, то после данной процедуры эта область карты считается свободной.

Для расчета точки пересечения используется итерационный подход. Так как интегрирование уравнений (5–7) проводится численным методом, на каждой итерации имеется отрезок малой длины, описывающий часть траектории движения объекта-препятствия. В качестве текущей траектории робота принимается кусочно-линейный маршрут, данный в условии задачи, с допущением, что отклонение реального движения робота от заданной траектории незначительно. Тогда

для определения точки пересечения $X = (x_X; y_X)$ на каждой итерации решается задача пересечения текущего отрезка интегрируемой траектории препятствия с кусочно-линейной траекторией робота. При этом время пересечения t_X определяется номером текущей итерации $i: t_X = t_0 + i \cdot \Delta t$, где Δt – шаг интегрирования.

Последним этапом является добавление клеток на динамический участок карты. Для этого клеткам внутри окружности с центром в точке X и радиусом W присваивается состояние «занята». Теперь для робота реальным препятствием считается не тот объект, который находится в своем текущем положении, а некий мнимый объект, который будет находиться в точке пересечения траекторий к моменту времени t_X . Иными словами, метод эффективного пути с помощью выражений (2) и (3) рассчитывает опорную точку, учитывая координаты будущего положения подвижного объекта (препятствия).

Чтобы проверить работоспособность предложенного метода решения задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий было проведено моделирование. На рис. 5 показаны два робота. Правый робот движется по заданной траектории (по прямой). Слева находится второй робот – динамический объект, препятствующий движению первого робота. Он движется по криволинейной траектории. В ходе моделирования оба робота начинают двигаться одновременно.

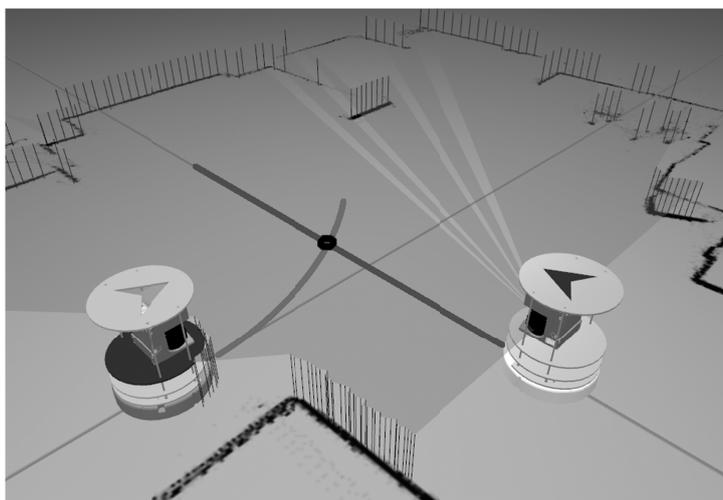


Рис. 5. Окно программы моделирования процесса управления

Было проведено два варианта моделирования: первый – с использованием алгоритма объезда статических препятствий, второй – с использованием алгоритма объезда динамических препятствий. Как видно из рис. 6, а, в первом случае робот разогнался до максималь-

ной скорости. Затем на пути возникло препятствие, и робот начал поворачивать, пытаясь его объехать. Однако маневр начался слишком поздно и произошло столкновение в точке t_X .

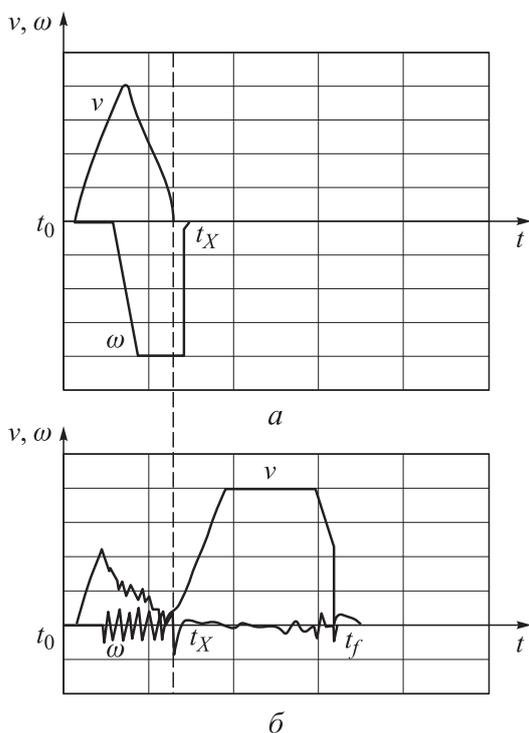


Рис. 6. Результаты моделирования:

а – при работе в статической среде; *б* – при наличии динамических препятствий

Во втором случае (рис. 6, б) робот начал разгоняться, но как только появилось мнимое препятствие в точке пересечения траекторий линейная скорость уменьшилась. При этом появились колебания угловой скорости. Это означает, что опорная точка определялась в каждый момент времени с разных сторон препятствия, замедляя тем самым линейную скорость перемещения. После того как помеха исчезла, робот продолжил движение в направлении к цели с максимальной скоростью и достиг ее в момент t_f .

Итак, поставленная задача управления движением мобильного робота вдоль заданной траектории при наличии динамических препятствий решена. В качестве решения предложена модификация метода эффективного пути. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода. Координаты опорных точек, получаемые в реальном времени, можно использовать в системе управления мобильным роботом для формирования траектории объезда препятствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seder M., Macek K., Petrovic I. An integrated approach to real-time mobile robot control in partially known indoor environments // Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE. – 6 p.
2. Ferguson D., Darms M., Urmson C., Kolski S. Detection, Prediction and Avoidance of Dynamic Obstacles in Urban Environments // Proceedings of the 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. – 2008. – June. – P. 1149–1154.

Статья поступила в редакцию 28.06.2012