

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

И.А. Васильев (Центральный НИИ робототехники и технической кибернетики)

Рассматриваются методы управления колесным мобильным роботом с танковой компоновкой шасси, снабженного лазерным сканирующим дальномером. Приводятся ограничения использования метода в условиях, аналогичных внутрицеховым.

Ключевые слова: мобильный робот, дальномер, карта, траектория, управление.

Введение

В последние годы в промышленности все больше внедряются так называемые «безлюдные технологии», то есть происходит замещение человека автоматами для исключения рутинного ручного и слабоавтоматизированного труда. Для перемещения различного рода грузов по территории предприятий уже давно не обходятся без средств транспорта. Тем более, что территории современных предприятий могут быть сравнимы с площадью города (к примеру, площадь «Кировского завода» в Петербурге составляет не менее двадцати квадратных километров). Следовательно, перемещение транспортного средства из одной точки завода в другую может осуществляться по множеству маршрутов. Правильному, безопасному и оптимальному управлению таким автоматическим транспортным средством (роботом) и посвящена данная статья.

Главная цель работы – движение робота в целевое положение. Положение задается координатами x и y . Для достижения этой цели требуется решить следующие задачи:

- 1) локализация робота в некоторой системе координат;
 - 2) построение бинарных карт рабочей зоны;
 - 3) построение траекторий для движения робота.
- Рассмотрим кратко решения всех трех задач. Фото робота приведено на рис. 1.

Робот снабжен двумя датчиками: одометрами (датчиками вращения колес) и лазерным сканирующим дальномером (ЛСД).

Локализация робота.

Без потери общности будем считать, что начало координат совпадает с начальным положением робота. Начальное положение – это то положение робота, которое он имеет при запуске бортового ПО. Ось абсцисс направлена вправо от продольной оси корпуса, а ось ординат – вперед, вдоль продольной оси робота.

Пусть робот движется по плоскому полу цеха, поэтому ось аппликат для наших целей не требуется.

В разных публикациях приведено множество алгоритмов локализации подобного робота, но на практике устойчиво работают лишь самые простые.

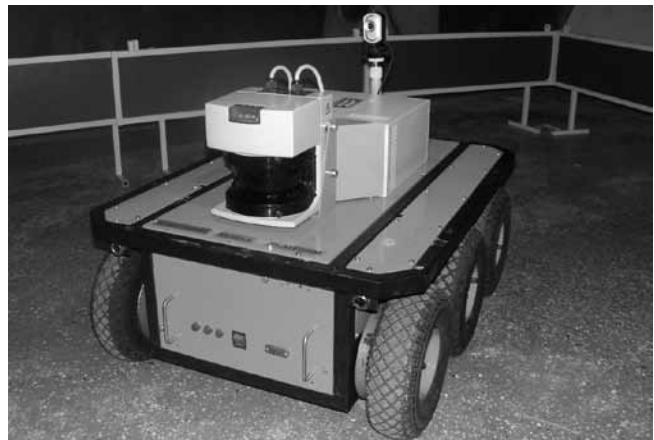


Рис. 1. Мобильный робот

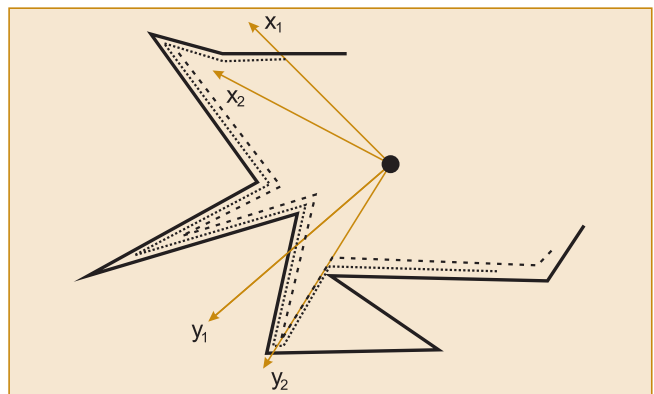


Рис. 2. Пример измерения лазерным дальномером

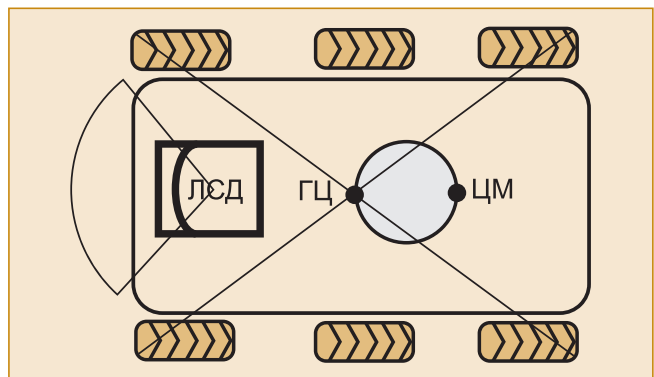


Рис. 3. Вид робота сверху

Будем называть сканом однократное считывание ЛСД всего ему видимого диапазона. Устойчиво работает локализация, основанная на сравнении двух сканов, измеренных в разное время. Рассмотрим пример двух сканов (рис. 2).

На рисунке препятствия показаны сплошной линией, первый скан (с системой координат робота x_1, y_1) – частым пунктиром, второй скан (с системой координат робота x_2, y_2) редким пунктиром. Если попытаться наложить один скан на другой, то довольно просто определить угол, на который повернут ЛСД по отношению к предыдущему измерению. Все это очень просто. На практике же существует следующая проблема. Рассмотрим вид робота сверху на рис. 3.

На этом рисунке видно, что геометрический центр (ГЦ) робота не совпадает с местом установки дальномера. Это само по себе довольно плохо. Более того, ГЦ не совпадает и с центром масс (ЦМ) робота! Но и это еще не все. Дело в том, что центр поворота робота на месте происходит вокруг случайной оси в каждый момент времени. Это объясняется тем, что подстилающая поверхность, по которой перемещается робот, не идеальная (как и колеса робота). При движении происходит сильное влияние малых неровностей поверхности на перемещение оси поворота. Тем более, что пол в производственных помещениях подвержен разного рода механическим, термическим, а кое-где и химическим воздействиям, поэтому добиваться идеальности пола не представляется возможным. На внешней территории предприятий, к тому же, могут быть еще и разные типы подстилающей поверхности.

Экспериментально установлено, что эта ось поворота находится между ЦМ и ГЦ робота – на рис. 3 зона нахождения оси показана серым кругом.

Исходя из этого, применение описанного алгоритма «в лоб» приводит к значительным погрешностям, так как ЛСД не поворачивается на месте, а перемещается по некоторой кривой. Следовательно, картина сканов искажается, и прямое их сопоставление приводит к ошибкам.

Для минимизации этого влияния требуется преобразовать сканы из системы координат ЛСД в СК оси поворота. Но, так как ось поворота неизвестна, то видится правильным преобразование в СК ГЦ. Само

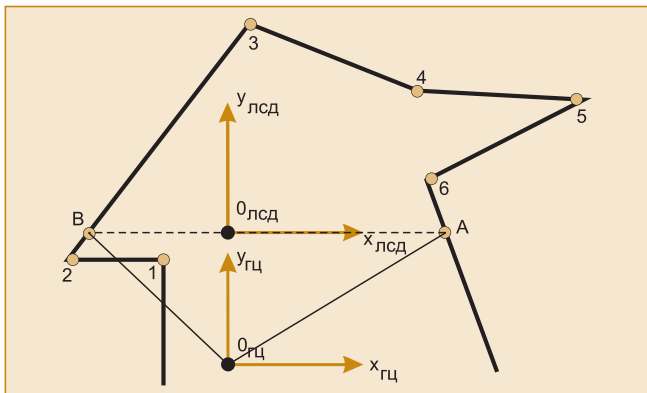


Рис. 4. Схема преобразования координат

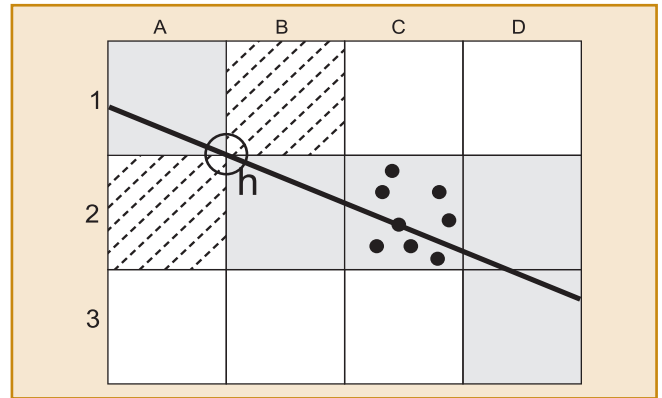


Рис. 5. Бинарная карта

это преобразование не может вызывать затруднений кроме одной тонкости: невыпуклости сканов, так как в производственных помещениях и на территориях промышленных предприятий установлено различного рода оборудование. Рассмотрим рис. 4.

На этом рисунке жирной ломаной линией показано препятствие. Две системы координат – это система координат ЛСД и система координат, связанная с ГЦ робота. Отрезки 4–5 и 5–6 видны дальномеру, но не могут быть видны из начала СК ГЦ. Следовательно, при преобразовании координат требуется отбросить все те объекты, которые не видны из начала СК ГЦ. Делается это очень просто. Если последующая точка имеет угол в скане меньше предыдущей (для точек справа от середины), или больше (для точек слева) – то эта точка отбрасывается. На рис. 4 видно, что отрезок 1–2 мешает увидеть часть отрезка 2–3 из ГЦ. Но, так как этот отрезок вообще не виден из ЛСД, то это не имеет значения.

Здесь надо отметить, что зона преобразованных измерений будет меньше, чем у ЛСД, так как препятствия, находящиеся слева и справа видны под другими углами. На рисунке крайние точки измерений обозначены буквами А и В. Соответственно, диапазон измерений уменьшается до величины угла АО ГЦ В.

Для упрощения сопоставления далее требуется новый набор измерений привести к равномерной сетке. Для определенности сетку требуется делать с дискретностью такой же, как и у дальномера.

Такой метод был разработан, реализован и отработан автором.

Построение бинарных карт рабочей зоны.

Здесь предполагается, что вначале карта окружающего пространства всегда известна. Во время работы робот уточняет карту, если в реальной ситуации в окружающем пространстве произошли изменения. Для начальной карты удобно использовать строительный план производственных помещений с наложенными на него чертежами установки оборудования. Здесь надо обратить внимание на две сложности. Во-первых, требуется координаты объектов на плане и чертеже преобразовать в систему координат робота. А во-вторых, сам робот в начальный момент времени

должен быть довольно точно установлен в известные координаты в цеху.

Возможны два крайних случая. 1) Карта полностью неизвестна. В этом случае считаем изначально пустой, а во время работы робот добавляет к пустой карте реальные объекты; 2) Карта известна полностью.

Бинарная карта состоит из ячеек, которые могут иметь две характеристики: «занято» или «свободно». Удобство такой карты очевидно: она устойчива к небольшим погрешностям измерений. Также у таких карт есть свойство «толщины» линии. Рассмотрим эти утверждения на рис. 5.

На этом рисунке приведена сетка 4x3 – аналог графического отображения сетки бинарной карты. Жирной прямой чертой обозначено препятствие окружающего пространства.

На этом рисунке облако точек, находящееся в ячейке С2, является неточным измерением препятствия. Но такая погрешность не оказывает влияния на бинарную карту, так как карта дискретна. Эффект «толщины» можно продемонстрировать так: для приведенной прямой линии набор занятых ячеек карты будет не прямой. Гарантированно будут считаться занятыми ячейки, выделенные серым цветом. Более того, так как линия препятствия проходит через точку η и с учетом погрешностей измерений будут считаться занятыми и обе ячейки, обозначенные штриховкой. В итоге будут занятыми ячейки А1, А2, В1, В2, С2, D2, D3. А если разброс измерений такой же, как в ячейке С2, то, вероятно, попадет в разряд занятых и ячейка С3 (как, возможно, и С1).

По этой причине прямая линия на бинарной карте будет занимать довольно широкую полосу.

Само построение бинарной карты довольно просто. Рассмотрим его подробно. Пусть ЛСД измеряет точку с полярными координатами l и α . Пусть текущее положение робота X, Y, β . Тогда измеренная точка в СК рабочей зоны робота будет иметь координаты:

$$\begin{aligned}x &= X + l \cos(\alpha + \beta), \\y &= Y + l \sin(\alpha + \beta).\end{aligned}$$

Затем, чтобы получить целочисленные координаты ячейки (i, j) карты, в которой находится текущая точка, требуется выполнить формулы:

$$\begin{aligned}i &= [x/l_x], \\j &= [y/l_y],\end{aligned}$$

где $[]$ – целая часть внутрискобочного выражения; l_x, l_y – размеры ячейки карты по абсциссе и по ординате соответственно.

То есть ячейка карты, в которую в настоящее время обозревает ЛСД имеет номер (i, j) . Так как несколько измерений ЛСД могут обозревать одну и ту же ячейку карты, то имеет смысл под ячейкой карты вместо простого бинарного флага понимать счетчик, в котором

считается количество измерений объекта, попадающего в данную ячейку. Ячейка будет считаться занятой, если счетчик имеет значение не менее некоторого заданного порога (порог может зависеть от расстояния до дальномера и должен определяться экспериментально). Это имеет смысл для того, чтобы отсеять случайные выбросы измерений, случайные погрешности дальномера и случайные ошибочные измерения, включая динамические препятствия.

Для отсечки изменяющихся препятствий, появляющихся и исчезающих, требуется чистка карты. Чистка осуществляется следующим образом: каждый луч дальномера пересекает свободные ячейки карты. Эти ячейки могли ранее быть занятыми, поэтому в пересекаемые ячейки принудительно заносится счетчик 0 (ноль).

И здесь есть тонкость. Дело в том, что луч дальномера пересекает лишь те ячейки карты, которые лежат между ЛСД и препятствием. Если у дальномера было ошибочное измерение дальше, чем препятствие, и случилось так, что это измерение попало в ячейку за препятствием, то эта ячейка не может быть вычищена, пока робот не попадет в зону за препятствием. Для уменьшения влияния таких «ложных» измерений можно считать количество измерений препятствия, попавших в данную ячейку. Если счетчик данной ячейки менее некоторого порога (который должен зависеть как от статистических параметров самого дальномера, так и от расстояния до измеренной точки), то считается, что данная ячейка свободна.

Исходя из вышеперечисленных причин, контуры препятствий на бинарной карте не могут быть тонкими, то есть линия препятствия на бинарной карте будет занимать в толщину более чем одну ячейку.

Метод бинарных карт был почерпнут из публикации, реализован, значительно модифицирован и отработан автором. Метод хорош и устойчив в том случае, когда число ячеек не очень велико. Реальные карты с числом ячеек порядка сотен тысяч уже работают с некоторыми проблемами в скорости счета. В этом случае не требуется рассматривать на каждом шаге управления всю карту, так как лазерный сканирующий дальномер не может обозревать всю рабочую зону.

Построение траекторий

Постановка задачи построения траекторий следующая: есть бинарная карта, известно положение робота на этой карте. Задаются целевые координаты на этой карте такие, чтобы целевая точка была достижима, т.е., цель не должна быть внутри препятствия и существовал маршрут, соединяющий текущее положение робота с целевым, не пересекающий препятствия и не выходящий за границы карты.

Алгоритмы проезда по бинарной карте известны давно (например, [1]), и подробно обсуждать их здесь нет необходимости. Скажу лишь то, что ячеистая структура карты представляется графом так: ячейки карты – вершины, а переход от ячейки к ячейке – дуги графа. Для нахождения траектории требуется приме-

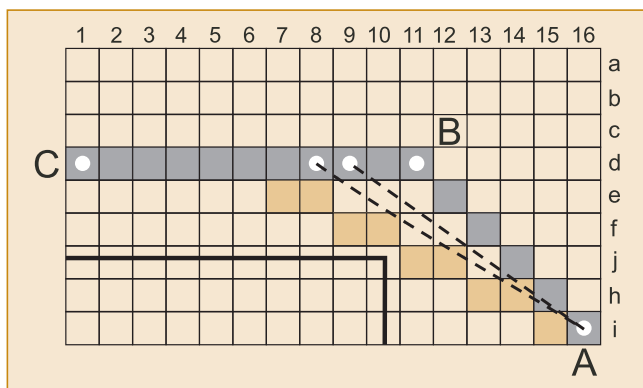


Рис. 6. Построенная траектория

нить любой алгоритм прохода по графу. Для целей построения траекторий чаще всего используют алгоритм Дейкстры или его модификацию, так называемый алгоритм «А-со звездочкой» (A-star algorithm, A*).

В этих методах есть две сложности. Первая заключается в том, что траектория, полученная методами прохода по графу, требует сглаживания. На рис. 6 приведена типичная траектория, полученная по алгоритму A* и имеющая стартовую точку А и конечную – С.

На рисунке черными квадратами обозначена построенная траектория. Пунктирными линиями показано то, как траектория сглаживается. Проводим прямую из начальной ячейки (А) в следующую ячейку траектории и смотрим, нет ли пересечений с препятствиями. Если нет, то берем следующую точку построенной траектории и выполняем эту же процедуру. Этот алгоритм выравнивания довольно быстр и надежен, но приводит ко второй трудности.

Серыми квадратами закрашены те ячейки, которые претендуют на роль новой (выровненной) траектории, а черной угловой тонкой линией обозначено препятствие. На рисунке видно, что угол препятствия, находящийся в точке (j, 10) может мешать проехать роботу, если робот поедет по «серой» траектории. Исходя из этого для движения робота из точки А требуется повернуть робот так, чтобы он двигался не в точку (d,5), куда его приведет «серая» траектория, а мимо этого угла препятствия, который «виден» дальномеру из точки А. Эта, казалось бы, мелкая поправка сильно оптимизирует время проезда по траектории, так как роботу не потребуется вблизи угла препятствия останавливаться и маневрировать.

Для уверенного движения по траектории робот должен в каждой точке поворота останавливаться и переставлять траекторию, так как могут открыться

новые, ранее неизвестные препятствия, а также робот может сбиться с траектории по причине погрешностей обработки движения. Перестройка траектории требуется и еще по причине погрешностей при движении робота.

Заключение

Предложенное в настоящей статье управление показало неплохое качество для работы в условиях, аналогичных внутрицеховым (рис. 7), где робот везет на себе контейнер с изделием. Единственное условие для внутрицеховой работы – отсутствие нерегулярных препятствий, то есть препятствий, которые дальномер не увидит. Это три вида препятствий. Во-первых, глянцевые и зеркальные объекты, от которых луч ЛСД отразится в сторону и дальномер решит, что здесь есть свободное пространство. Во-вторых, поглощающие поверхности (чаще всего ворсистые ткани). В них луч лазера полностью поглотится и результат тот же, что и для зеркала. В-третьих, очень плохое препятствие, состоящее из тонких стержней. По причине того, что ЛСД измеряет расстояния с некоторым шагом по углу, тонкий стержень может попасть между лучей и не быть измеренным. Хуже того, для разных измерений движущимся роботом этот стержень может

то попадать, то не попадать в поле зрения дальномера, что может наложить дополнительную погрешность как на построение карты, так и локализацию. В производственных помещениях есть разного рода кабели, провода, клетки, решетки. Для подготовки к использованию такого транспортного средства, как описываемый робот, надо оградить эти нерегулярные объекты подходящими полосами на уровне измерений дальномера.

Если исключить нерегулярные препятствия, то ошибки позиционирования робота составляют $\leq 0,05$ м (5 см) по смещению и ориентировочно 3° по углу.

Список литературы

1. Васильев И.А. Построение траекторий движения для колесного мобильного робота, снабженного лазерным сканирующим дальномером // Тр. XXI междунар. научно-технич. конф. «Экстремальная робототехника» - 2010.
2. Chang Shu, Hillary Buxton. A Parallel Path Algorithm for Mobile Robots // Travelling Salesman Problem, Book edited by: Federico Greco, ISBN 978-953-7619-10-7, September 2008, I-Tech, Vienna, Austria
3. Зенкевич С.Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенный лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. №8.

*Васильев Иван Анатольевич - канд. техн. наук, Центральный НИИ робототехники и технической кибернетики.
+7(812)552-07-80
E-mail: vas@rtc.ru*



Рис. 7. Мобильный робот в цеховых условиях