

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

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

Рассматривается проблема построения карт окружающего пространства для мобильного робота, снабженного лазерным сканирующим дальномером. Рассмотрены два устойчивых метода построения карт окружающего пространства.

Ключевые слова: робот, карта, дальномер.

Введение

В задачах управления мобильным роботом, перемещающимся в двумерном пространстве, существуют три проблемы: локализация робота (определение текущих координат), построение траекторий его движения и построение самой карты.

Поставим задачу для данной работы: построение карты окружающего пространства. Под картой понимаем множество точек плоскости, ограничивающих непреодолимые препятствия.

Существует множество способов построения карт на плоскости. Самые простые из них приводятся практически в каждой статье, посвященной рассматриваемой задаче — сохранение всех измеренных точек на карте [1, стр. 884]. Это очень неэкономно, так как число точек, требующих сохранения, не зависит ни от размера карты, ни от числа препятствий, а зависит лишь от времени работы робота с момента запуска процесса построения карт. То есть, если робот час простоит на месте, то все равно необходимо сохранить все измеренные точки. Другой метод заключается в построении аналога бинарной карты [6]. Каждая ячейка такой карты может содержать одно из пяти значений, каждое значение отвечает за межклеточное взаимодействие. Метод очень трудоемок, так как при появлении нового препятствия требуется, вообще говоря, перестраивать всю карту. Есть еще методы сложной обработки дальнометрической информации, например, хороший и мощный метод [7]. Однако статья [7] заканчивается выводом, что метод на практике неприменим по причине нерегулярности рабочих зон робота.

В настоящей работе предлагаются два простых, устойчивых и реально отработанных на практике метода построения карт.

Без потери общности будем считать, что первоначально карта всегда известна, а во время работы она уточняется и дополняется. Есть два крайних случая: первый — карта неизвестна совсем, считаем, что первоначально карта есть, и она пуста; второй — карта известна полностью, тогда дополнять и уточнять нечего.

В качестве основных датчиков используем одометры (датчики скоростей колес) и лазерный сканирующий дальномер, измеряющий дальность до препятствий в плос-

кости, параллельной плоскости движения робота. В качестве непреодолимых препятствий будем понимать лишь выступающие препятствия, которые попадают в поле зрения дальномера, то есть имеют высоту не менее высоты установки дальномера.

Картографирование осуществляется в три приема.

1. Привязка текущих измерений дальномера к карте с учетом текущего положения робота.
2. Упорядочивание точек на текущей карте.
3. Построение карты с учетом новых точек.

Первая задача довольно проста. Пусть текущие координаты робота на плоскости выражаются матрицей преобразования координат:

$$\begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & x \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

где α — угол поворота робота относительно нуля — начального положения; x и y — смещения робота относительно нуля — начального положения.

Тогда текущие координаты точки, измеренной дальномером, будут:

$$\begin{pmatrix} x^{cur}\cos(\alpha) - y^{cur}\sin(\alpha) + x \\ x^{cur}\sin(\alpha) + y^{cur}\cos(\alpha) + y \\ 1 \end{pmatrix}$$

где x^{cur} и y^{cur} — локальные координаты точки, измеренной дальномером.

Вторая задача — упорядочивание текущих точек на известной карте — сложнее. Дело в том, что со времени создания известной карты могли произойти изменения. Требуется не только внести эти изменения в карту, но и не упустить старые, известные препятствия, которые могут быть заново измерены.

Третья задача — учет новых измерений на известной карте — не представляет особых сложностей, так как осуществляется простой перестройкой тех областей карты, в которые попали новые измерения после их упорядочивания.

Целью данной работы является разработка устойчивых методов картографирования окружающего пространства посредством лазерного сканирующего дальномера.

Картографирование отрезками ломаных

Карта представляет собой набор отрезков, в которых известны три точки — две конечных и средняя. Средняя точка берется для устойчивости алгоритма аппрок-

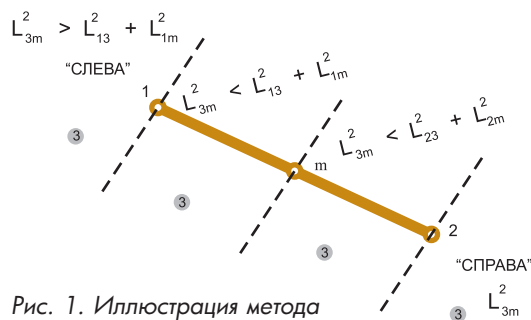


Рис. 1. Иллюстрация метода картографирования отрезками

симации. Для повышения точности следовало бы запоминать все точки, но это быстро приведет к тому, что программа управления будет требовать ресурсы, превышающие возможности любой вычислительной системы, так как число точек, с которыми одновременно будет производиться работа, может превышать любое разумное значение. Например, для популярного дальномера SICK LMS-290 за 1 мин работы число измерений превышает 20 тыс. ед., а за 1 час работы точки будут считаться уже миллионами. Поэтому требуется "сжимать" полученную информацию некоторым способом.

На рис. 1 обозначены: 1 и 2 — конечные точки отрезка, m — средняя точка, 3 — новая, упорядочиваемая точка, L_{ij} — расстояние между точками i и j , жирной линией обозначен сам отрезок. Если точка расположена "слева" или "справа" от отрезка, она может как уточнять сам отрезок, так и принадлежать соседнему, смежному отрезку, если такой есть. Если она принадлежит смежному, то она должна быть упорядочена уже в нем.

Когда точка упорядочена, можно выяснить, принадлежит ли она отрезку или является точкой нового препятствия. Для этого требуется найти расстояние от точки до отрезка. Если это расстояние больше некоего порога (который связан с точностью дальномера), то точка принадлежит новому препятствию.

Итак, точки упорядочены, то есть имеется набор точек, которые требуют внесения в отрезки.

Аппроксимация прямолинейными отрезками производится по методу наименьших квадратов. Сами отрезки задаются обычным уравнением прямой с угловым коэффициентом: $y = a \cdot x + b$. Проблемы с $a \rightarrow \infty$ не возникнут, так как дальномер просто "не увидит" отрезок, который расположен вдоль его луча.

В этом уравнении присутствуют два параметра a и b , для нахождения которых требуются два уравнения. Поэтому для метода наименьших квадратов применяется система из двух уравнений:

$$\begin{cases} \partial_a \left(\sum_{i=0}^{n/2} a \cdot x_{2i} + b - y_{2i} \right)^2 = 0 \\ \partial_b \left(\sum_{i=0}^{n/2} a \cdot x_{2i+1} + b - y_{2i+1} \right)^2 = 0 \end{cases},$$

где ∂_b — оператор производной по переменной k ; n — число измерений; a — искомый угловой коэффициент прямой; b — искомый коэффициент смещения прямой; x_k, y_k — абсцисса и ордината k -ой точки (измеренные).

Решение этой системы выглядит так

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i} y_{2i} - 2 \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i} \sum_{i=0}^{n/2} y_{2i+1}}{n \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i}^2 - 2 \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i} \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i+1}} \\ b = 2 \frac{\sum_{i=0}^{n/2} x_{2i}^2 \sum_{i=0}^{n/2} y_{2i+1} - \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i+1} \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i} y_{2i}}{n \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i}^2 - 2 \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i} \sum_{i=0}^{n/2} x_{2i+1}} \end{cases}$$

Теперь для каждого уточненного отрезка требуется найти крайние точки. Для каждой из них это делается как нахождение точки прямой, расположенной максимально близко к бывшей крайней точке:

$$\begin{aligned} x &= \\ (x^{FORMER} + a(y^{FORMER} - b)) / (1 + a^2) \\ y &= ax + b \end{aligned}$$

где (x^{FORMER}, y^{FORMER}) — координаты бывшей крайней точки.

Картографирование ячейками

Карта представляет собой двумерную матрицу. Каждый элемент матрицы (ячейка) отвечает за некоторый прямоугольник в пространстве с конечными размерами. Этот прямоугольник, соответственно, может лежать вне непреодолимого препятствия, в препятствии или

частично пересекаться с препятствием. Если возможных состояний каждой ячейки всего два (занята или свободна) — такая карта называется бинарной (рис. 2).

На рис. 2 жирной ломаной линией показано препятствие, а серым цветом закрашены те ячейки карты, которые будут считаться занятыми.

Имеет смысл создавать тринарную карту на тот случай, если для некоторых ячеек невозможно сказать, заняты они или свободны (или, когда ячейка по большей части свободна, как на рис. 2 ячейки $a1$ и $b4$), когда карта точно не может быть известна или по каким-либо иным соображениям.

Для случаев, где нужно учесть затрату какого-либо ресурса работа или, например, третью координату, иногда требуется строить карты с большим числом значений ячеек.

Рассмотрим бинарные карты. В простейшем случае сетка имеет одинаковые ячейки, размер которых равен (или чуть больше — для безопасности) размеру наименьшего препятствия или размеру робота, если размер робота меньше наименьшего препятствия:

$$cell = \min(\min_i (obst_i), robot),$$

где $cell$ — размер ячейки сетки карты; $obst_i$ — размер i -го препятствия; $robot$ — размер робота.

Здесь имеется в виду минимальный размер препятствия и робота.

Одинаковые ячейки имеют смысл тогда, когда характерные расстояния между препятствиями сравни-

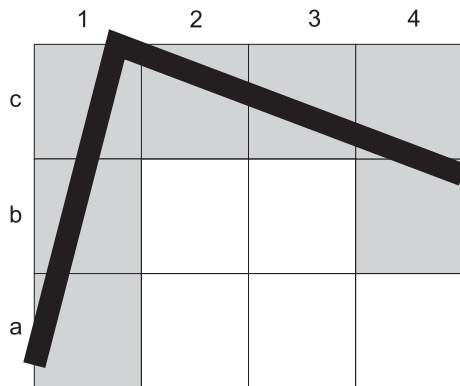


Рис. 2. Иллюстрация метода бинарного картографирования

мы с самими препятствиями. Если ситуация иная, то имеет смысл ячейки делать другого размера. Например, если препятствия малы и расположены редко, то рядом с ними ячейки могут быть сравнимы с препятствиями, а в незанятых зонах значительно больше их. И наоборот, если препятствия большие и расположены густо, то ячейки могут быть значительно мельче препятствий.

Для простоты изложения рассмотрим равномерную карту. Пусть известен размер рабочей зоны робота, исходя из которого выбирается и размер карты в ячейках. Проблема в том, что начальное положение робота в рабочей зоне чаще всего неизвестно. Другими словами, как выбрать исходную ячейку, в которой находится робот при начале своей работы? Сколько просмотреть ячеек карты "слева" и "справа", "спереди" и "сзади" от ячейки, из которой робот начинает движение?

Для решения этой проблемы можно строить карту с оперативно изменяемыми границами. Но это может резко замедлить производительность бортового вычислителя — ведь при попадании в зону видимости датчика робота новой ячейки, выходящей за границы существующей карты, будет требоваться перемещение больших объемов информации в памяти бортовой ЭВМ.

Решение проблемы следующее: зная размер рабочей зоны изначально резервировать место под карту вдвое большую по каждой координате, чем размер рабочей зоны, при этом начальное положение робота считать находящемся ровно по центру карты. Это предотвратит выход робота за пределы карты и перемещение больших объемов информации на каждом такте управления.

На рис. 3-4 приведены примеры применения предложенных методов на реальных роботах.

Выводы

Метод построения карт отрезками ломаных был разработан и реализован автором. Автор также отработал метод на нескольких разных роботах. Этот метод показал, что он хорошо работает лишь в случае регулярного окружения, то есть когда угловые размеры препятствий в разы превышают дискретность дальномера по углу. В случае наличия большого числа мелких препятствий (например, в лесу) скорость

работы метода резко снижается, и увеличиваются погрешности построения карт. Большой плюс метода состоит в том, что число сохраненных точек всегда известно и соответствует числу отрезков ломаных, умноженному на три, что экономит память бортового вычислителя.

Метод бинарных карт был почерпнут из публикации, реализован 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 обозреть всю рабочую зону.

Если сравнить методы построения карт, приведенных в данной статье с методами других авторов, то можно найти некоторое сходство в методе бинарных карт. Метод отрезков ломаных является полностью оригинальным.

Список литературы

1. Springer handbook of robotics // Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.) Springer. 2008.
2. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб. Наука. 2001
3. Lyashin A.M., Vasilyev I.A. Localization and trajectory motion control of a mobile robot with tank-like chassis setup, equipped with laser rangefinder and machine vision system // Mechatronics & Robotics '04. Aachen — Germany. Edited by Paul Drews, APS — European Centre for Mechatronics, Germany
4. Зенкевич С. Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. №8.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров // М. Наука. 1984
6. 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
7. Зенкевич С. Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. №8.

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



Рис. 3. Исследовательская шестиколесная платформа



Рис. 4. Мобильный робот для эвакуации