

Метод решения задачи анализа связности карты при картировании подстилающей местности робостаями с коммуникацией

В. Е. Павловский
ФИЦ Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН
vlpavl@mail.ru

В. В. Павловский
Российский экономический университет
им. Г. В. Плеханова
vlpavl2000@mail.ru

Аннотация. Описываются математическая модель и алгоритм, решающий задачу анализа связности карты, которая строится распределенной информационной системой роботов. Такая задача может быть реализована стаями летающих роботов-разведчиков, например, для контроля возможности прохода между препятствиями группой наземных роботов, которым сообщается обнаруженная информация. Анализ связности карты выполняется на основе специальной перенумерации областей связности, которая реализуется в обмене данными между роботами-разведчиками. Доклад является сокращенной версией публикации в журнале «Искусственный интеллект и принятие решений» (ИСА РАН), №2. 2018.

Ключевые слова: мобильный робот; картирование; карта; связность карты

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача картирования местности, т.е. построения карты, является одной из центральных при обеспечении движения мобильных роботов (МР) в сложной или неизвестной среде. Подобные задачи составляют широкий класс задач информационного обеспечения МР, к таким задачам относятся задачи разведки и исследования неизвестной местности, ориентирования и навигации на местности, задачи контроля, либо инспекции разведанных районов и другие аналогичные. В связи с важностью таких задач к настоящему времени появилось большое число систем, в целом обеспечивающих и поддерживающих их решение. Это, прежде всего системы, отображающие на карте рельеф местности и препятствия, такие системы созданы для роботов, для групп роботов ([1–3]), или как помощники человеку, работающему в естественной среде [4]. При этом значительное число современных исследований выполнено как создание систем одновременного картирования и навигации (локализации) роботов – систем класса SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [5–10]. Однако важно отметить, что

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 16-08-00880-а, 16-01-00131-а, 15-07-07483-а, 16-29-04412-офи-м, и при поддержке Программы РАН 1.31, раздел "Актуальные проблемы робототехники".

практически все такие системы ограничиваются рассмотрением внешних контуров (габаритов) препятствий, тогда как в ряде прикладных задач также важным является исследование внутренней «топологии» препятствий, особенно при протяженных их размерах.

В работе рассматривается стая роботов, в которой для всех роботов задана одинаковая и при этом достаточно простая модель поведения. При этом интерес представляет возможность синтеза сложного поведения стаи в целом и решения стайей содержательных задач на основании относительно простых правил для отдельных роботов-«особей». Задачей данной работы является исследование стайей окружающей среды; в частности – анализ карты местности. Подобные задачи хорошо подходят для распределенных систем.

В настоящей работе для анализа выбрана одна из фундаментальных топологических характеристик карты – связность. Предполагается, что на местности имеются объекты – препятствия или ориентиры, и роботы снабжены соответствующими датчиками для их определения. Задачей стаи является определение количества областей связности, на которые карта разбивается этими объектами.

С одной стороны, такая задача анализа связности области, разделенной препятствиями, возникает при выяснении возможности прохода – и, в дальнейшем, ее можно развивать к поиску пути через лабиринт. Скажем, стая летающих роботов может изучить рельеф с воздуха и предложить маршрут для наземной группы.

С другой стороны, эту задачу можно рассматривать как шаг к распределенному исследованию и распознаванию изображений. Например, хорошо известные изображения (геоглифы) в пустыне Наска имеют огромные размеры, и с земли целиком не видны – понимание этих изображений появилось только после аэрофотосъемки. Но аэрофотосъемка невозможна при ограниченной видимости – в тумане, в дыму или под водой. В этом случае исследование таких объектов становится подходящей задачей для стаи роботов, каждый из которых наблюдает только отдельные элементы рисунка, и которые,

взаимодействуя, определяют его свойства в целом. Поэтому в качестве последнего примера в работе модель применяется к фотографии одного из изображений в пустыне Наска.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА СВЯЗНОСТИ КАРТЫ

Математическая модель, принятая в работе, такова. Решение поставленной задачи разбивается на два последовательных этапа:

1. Распределение стаи в исследуемой области. Стая выдвигается в намеченную область и рассеивается, образуя большое облако.
2. Анализ геометрических свойств карты. На этом этапе стая считается неподвижной. Предполагается, что после выполнения задачи стая возвращается к месту отправления и "сдает" выполненную работу, т.е. передает ее потребителю.

На этапе распределения роботы должны выдвинуться в исследуемую область и образовать рассеянное облако. Для настройки нужного поведения стаи использовалась развитая в [5] идея «псевдосил», которые «подталкивают» роботов в нужном направлении. Но это не физические взаимодействия, а поведенческие правила – «желание» роботов двигаться в том или ином направлении. И поэтому, в отличие от физических сил, псевдосилы определяют не ускорения, а скорости роботов. Таким образом упрощается управление и не возникают нежелательные режимы типа колебательных. В то же время, подбором этой функции можно программировать роботов для синтеза нужного поведения стаи в целом.

Для образования рассеянного облака псевдосила, действующая на робот с номером k , задается соотношением:

$$\vec{F} = - \sum_j f(|\vec{r}_j - \vec{r}_k|) \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_k}{|\vec{r}_j - \vec{r}_k|} + K_3 \frac{\vec{r}_T - \vec{r}_k}{|\vec{r}_T - \vec{r}_k|} + K_4 \frac{\vec{r}_T - \vec{r}_A}{|\vec{r}_T - \vec{r}_A|}$$

Поясним эту формулу. Первое слагаемое представляет собой сумму по всем остальным роботам и определяет «отталкивание» роботов друг от друга, которое и приводит к нужному рассеиванию стаи. Функция $f(r)$ задает величину отталкивания и вычисляется как максимум из двух функций

$$f(d) = \max(K_1 f_1(d), K_2 f_2(d))$$

$$f_1(d) = \begin{cases} 1 & d \leq d_1 - \Delta \\ (d_1 - d) / \Delta & d_1 - \Delta < d \leq d_1 \\ 0 & d > d_1 \end{cases}$$

$$f_2(d) = \begin{cases} \left(1 - \frac{d}{d_2}\right)^2 & d \leq d_2 \\ 0 & d > d_2 \end{cases}$$

причем $d_1 > d_2$, $K_1 < K_2$. Как видно из формул, первая величина $K_1 f_1$ постоянна до определенного радиуса d_1 , затем спадает до нуля. Это основная псевдосила, определяющая рассеивание стаи. Вместе с более слабым притяжением к центру, которое задается двумя последними слагаемыми введенной выше основной формулы, это отталкивание приводит к тому, что соседние роботы распределяются примерно на расстоянии d_1 друг от друга.

Вторая величина $K_2 f_2$ действует в малом радиусе d_2 , но быстро квадратично растет. Эта псевдосила, введенная в работе [5], препятствует столкновениям роботов, если в процессе движения по каким-либо причинам (например, отталкивание от других роботов стаи) два робота слишком сильно сближаются.

Как видно из этих формул, сила отталкивания, определяемая функцией $f(r)$, равна нулю за пределами некоторого радиуса, поэтому сумма в первом слагаемом основной формулы фактически ведется только по роботам в определенной окрестности и может определяться каждым роботом локально.

Второе и третье слагаемое в указанной формуле задают «притяжение» стаи к цели – исследуемой области, центр которой задан координатами r_T (*Target*). Второе слагаемое описывает притяжение к цели непосредственно выбранного робота. Но использование одного этого слагаемого привело к следующей проблеме: при большой константе притяжения K_3 облако роботов получается сильно неравномерным – сгущается к центру, поскольку роботы по краям тянутся к центру и своим отталкиванием дополнительно прижимают к центру роботы в середине. А при малой константе K_3 роботы выдвигаются к цели слишком медленно.

Поэтому в систему было добавлено последнее слагаемое, описывающее притяжение к цели всей стаи. В этой формуле r_A – центр «масс» стаи, вычисляемый как среднее арифметическое координат всех роботов,

$$\vec{r}_A = \frac{1}{n} \sum_j \vec{r}_j.$$

Это слагаемое помогает «подтолкнуть» стаю к месту выполнения задачи, не вызывая деформации облака. При этом коэффициенты выбираются так, что K_3 мало и $K_4 > K_3$. Второе слагаемое в основной формуле с малым K_3 все равно необходимо, иначе отталкивание роботов может привести к фрагментации облака. Слабое притяжение всех роботов к центру обеспечивает цельность облака и примерно круглую форму, не мешая рассеиванию на заданное расстояние.

Завершение первого этапа можно определять либо по тому, что роботы перестали заметно смещаться (на моделировании видно, что стая после выдвигения и рассеивания достаточно быстро стабилизируется), либо просто по таймеру, выделяя на этот этап определенное время, по истечении которого роботы останавливаются и переходят ко второму этапу.

На втором этапе, этапе анализа карты предполагается, что роботы рассеялись на местности и уже не движутся. После этого каждый робот определяет, видит ли он картографируемые объекты в определенной окрестности. Как сказано выше, предполагается, что для этого роботы оснащены некоторыми датчиками, от которых описываемая модель абстрагируется. Вместо этого для каждого робота задается фиксированная окрестность радиуса r_1 и считается, что роботу известно, пересекается ли эта окрестность с одним из объектов на местности.

На основании этой информации анализ связности выполняется с помощью следующего алгоритма, основанного на волновом алгоритме (аналоге алгоритма маршрутизации – в нем используется волновое распространение данных, номеров роботов):

1. Каждый робот хранит числовую переменную – номер. В начале всем роботам присваиваются различные номера от 1 до N , где N – количество роботов в стае.
2. После рассмотрения препятствий те роботы, которые видят препятствие, заменяют свой номер на -1 и далее в анализе не участвуют.
3. Каждый робот, используя функцию коммуникации, связывается со всеми роботами в определенной окрестности заданного радиуса r_2 . Пусть номер данного робота x , а номер его соседа y . Если $x > 0$ и $y > 0$ и $y < x$, то робот заменяет свой старый номер x на номер соседа y . Иначе говоря, для каждой пары соседних роботов, ни один из которых не видит препятствие, робот с большим номером заменяет свой номер на меньший номер соседа.
4. Операция 3 повторяется, пока номера роботов не перестают меняться.

В процессе применения операций 3 и 4 в каждой области связности постепенно распространяется наименьший из номеров роботов, попавших в эту область – в результате все роботы в области получают этот номер, тогда как в других областях номера всех роботов будут также одинаковыми, но другими. Таким образом, количество областей связности будет равно количеству различных номеров, оставшихся в стае (не считая номера -1). В этом алгоритме r_1 и r_2 являются параметрами – это размер области видимости (наблюдения) и размер области соседства роботов, соответственно. Область соседства – это область «локализации рабочей зоны» указанного выше алгоритма.

В моделировании для упрощения вычислений области видимости и соседства роботов задавались в виде круговых колец с общим центром, область видимости располагалась внутри области соседства. При моделировании оптимальные результаты получились при соотношении радиусов $r_2 = 2r_1$.

На рис. 1 и рис. 2 – начальная конфигурация, выдвигание роботов, завершение распространения и окончание анализа – найдены две области связности:

III. ПРИМЕРЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Теперь приведем несколько изображений – примеров работы программы моделирования. Рассмотрим простое кольцевое препятствие.

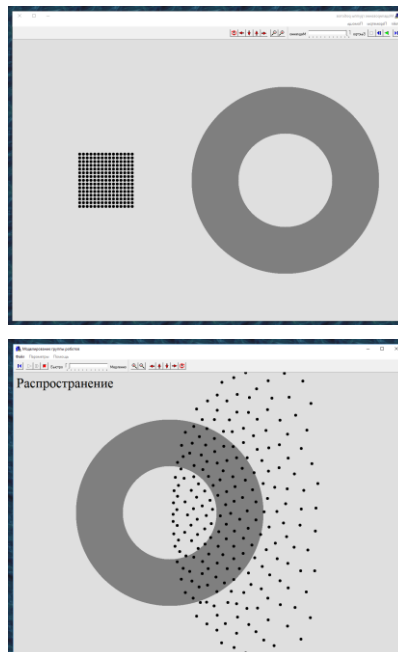


Рис. 1. Начальная конфигурация, выдвигание роботов

Схематично на фазе окончания анализа (рис. 2 внизу) на роботах изображаются специальные цветные маркеры состояния – они показывают, видит ли данный объект препятствия или нет, и как определил искомые области связности карты.

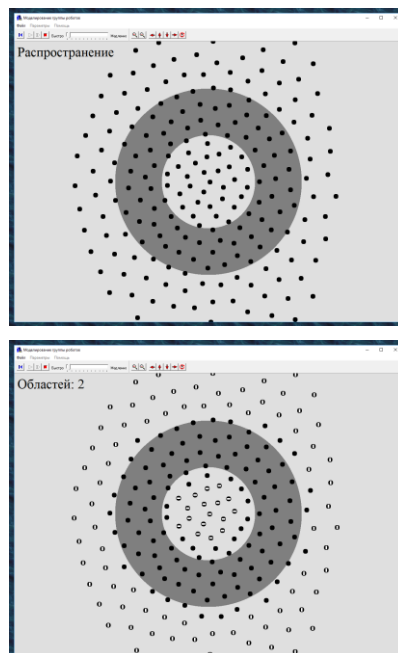


Рис. 2. Завершение распространения и окончание анализа

Далее на рис. 3 показан рабочий момент модели – анализ изображения (геоглифа) из пустыни Наска.

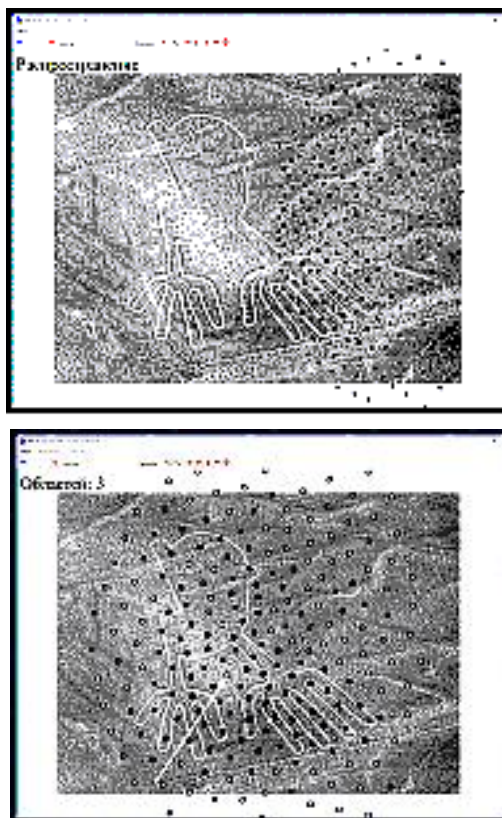


Рис. 3. Геоглиф из пустыни Наска

Заметим, на последнем изображении примечателен одиночный робот внизу (показан белой стрелкой), нашедший «лишнюю» область: хотя из этой области есть выход, но он слишком мал, а роботов не так много, их радиусы видимости велики, и поэтому разрешения стаи не хватило, чтобы распознать этот выход.

Отметим, для экспериментов была соответствующим образом модифицирована программная моделирующая система, описанная в [5]. Все изображения эпизодов моделирования выше в работе получены с ее помощью. Проведены серии экспериментов по моделированию созданного алгоритма. Алгоритм показал устойчивое и достаточно эффективное функционирование.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в целом можно отметить, что метод работоспособен, но для распознавания изображений с мелкими деталями требуются стаи из большого количества роботов с небольшими точными зонами видимости. В развитие описанного исследования предполагается рассмотреть задачу определения такого соответствующего задаче количества информационных роботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Зенкевич С.Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации. // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2007, №8, с.5-12.
- [2] Шварц Д., Куприянов Д.В. Построение карт местности робототехническими системами. // Изв. ВУЗов. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2016. Т. 59, № 8, с.695-698.
- [3] Грудинин В.С., Грудинин С.В., Малышев Е.Н. Групповое картирование местности роботами. // В сб. ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ (НПК-2016) Сборник статей 2-е издание, исправленное и дополненное. Вятский государственный университет. 2016. с.2422-2429.
- [4] Электронный ресурс. <http://news.mit.edu/2012/automatic-building-mapping-0924> MIT NEWS. Automatic building mapping could help emergency responders.
- [5] Павловский В.Е., Павловский В.В. Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов. // Искусственный интеллект и принятие решений (ИИиПР), 2015 г., №4, с. 62-71.
- [6] Leonard, J.J.; Durrant-Whyte, H.F. (1991). Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. // Intelligent Robots and Systems' 91. Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop on: 1442-1447. DOI:10.1109/IROS.1991.174711
- [7] Электронный ресурс: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/stder08tro.pdf>. Bastian Steder, Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard. Visual SLAM for Flying Vehicles. 5 p.
- [8] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, Ben Wegbreit. FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem. // Carnegie-Mellon University, Stanford University, Copyright 2002, American Association for Artificial Intelligence AAAI, (www.aaai.org). AAAI-02 Proceedings, 2002, pp.593-598.
- [9] Dae Hee Won, Sebum Chun, Sangkyung Sung, Young Jae Lee, Jeongho Cho, Jungmin Joo, and Jungkeun Park. INS/vSLAM System Using Distributed Particle Filter. // International Journal of Control, Automation, and Systems (2010) 8(6): p. 1232-1240 DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7
- [10] Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, Olivier Stasse. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. // IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 29, No. 6, June 2007. pp. 1-16.