

УДК 004.896

АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ КАРТЫ СТАЕЙ РОБОТОВ С КОММУНИКАЦИЕЙ

В.Е. Павловский (vlpavl@mail.ru)

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Москва

В.В. Павловский (vlpavl2000@mail.ru)

Российский Экономический Университет им. Г.В.
Плеханова, Москва

М.В. Андреева (point15@ro.ru)

Московский автомобильно-дорожный институт (технический
университет) МАДИ

Аннотация Описывается алгоритм, решающий задачу анализа связности карты, которая строится распределенной информационной системой роботов. Такая задача может быть реализована стаей летающих роботов-разведчиков, например, для контроля возможности прохода между препятствиями группой наземных роботов, которым сообщается разведанная информация. Анализ связности карты выполняется на основе специальной перенумерации областей связности, которая реализуется в обмене данными между роботами-разведчиками. 1 Работа является переработанной версией статьи, представленной в журнале Мехатроника. Автоматизация. Управление.

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

Введение. Постановка задачи

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 исследования и составления карты неизвестной местности,

¹ Работа выполнена при 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"

ориентирования и навигации на местности, задачи контроля либо инспекции обследованных 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 [Зенкевич и др., 2007], [Шварц и др., 2016], или как помощники человеку, работающему в естественной среде. К последним относится, например, экспериментальная носимая интеллектуальная система на базе сенсора типа Kinect и лазерного дальномера, созданная в MIT, США. При этом значительное число современных исследований выполнено как создание систем одновременного картирования и навигации (локализации) роботов – систем класса SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Однако важно отметить, что 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.

Настоящая работа продолжает направление, начатое авторами в [Павловский и др., 2015]. Как и ранее, 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. В предыдущей работе моделировалось и исследовалось движение стаи к целям и обход препятствий, а 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.

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. Поэтому в качестве последнего примера в работе модель применяется к фотографии одного из изображений в пустыне Наска.

Анализ связности карты

Решение этой задачи разбивается на два 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.

Этап 1. Распределение стаи

На этом этапе роботы должны выдвинуться в исследуемую область и образовать рассеянное облако. Для настройки нужного поведения стаи использовалась развитая в предыдущей работе [Павловский и др., 2015] 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 номер k , задается соотношением

$$F = -\sum_j f(|r_j - r_k|) \frac{r_j - r_k}{|r_j - r_k|} + K_3 \frac{r_T - r_k}{|r_T - r_k|} + K_4 \frac{r_T - r_A}{|r_T - r_A|} \quad (1)$$

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 формулы (1), 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 растёт. Эта псевдосила, введенная в предыдущей работе [Павловский и др., 2015], 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 формулы (1) фактически ведется только по роботам в определенной окрестности и может определяться каждым роботом локально.

Второе и третье слагаемое в формуле (1) задают "притяжение" стаи к цели – к 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,

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

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 формуле (1) 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. Тем самым второе слагаемое в (1) удерживает все облако от "рассыпания", преодолевая взаимные отталкивания и сохраняя общую конфигурацию облака.

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.

Этап 2. Анализ карты

На этом этапе 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 робота 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 (алгоритме маршрутизации - 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. Их схема приведена на рис.2. Эта же схема моделировалась в полете коптеров.

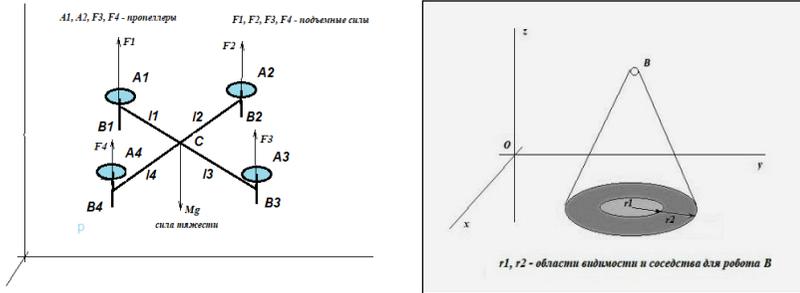


Рис.1. Динамическая модель коптера (слева).

Рис.2. Область видимости и область соседства объектов в стае (справа).

При моделировании оптимальные результаты получились при соотношении радиусов $r_2 = 2r_1$

Для проверки описанного алгоритма было проведено моделирование на ряде примеров - как искусственных модельных препятствий, так и реальных изображений из пустыни Наска. В заключение приведем изображения с результатами работы программы моделирования.

а) Простое кольцевое препятствие

На рис.3 и рис.4 - начальная конфигурация (рис. 3, слева), выдвижение роботов (рис. 3, справа), завершение распространения (рис. 4, слева) и окончание анализа – найдены две области связности (рис. 4, справа):

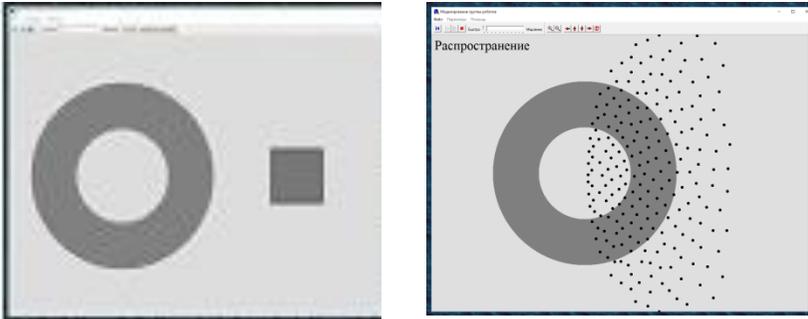


Рис.3. Начальная конфигурация, выдвигание роботов.

Схематично на фазе окончания анализа (рис.4 справа) на роботах изображаются специальные маркеры состояния – они показывают, видит ли данный объект препятствия или определил искомые области связности карты.

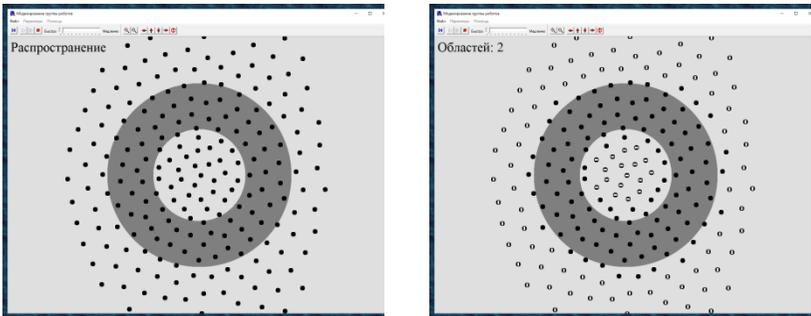


Рис.4. Завершение распространения и окончания анализа.

б) Изображение (геоглиф) из пустыни Наска

На рис. 5 показан результат моделирования обследования изображения из пустыни Наска, выдвигание стаи (слева) и завершение анализа (справа), найдено три области.

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.

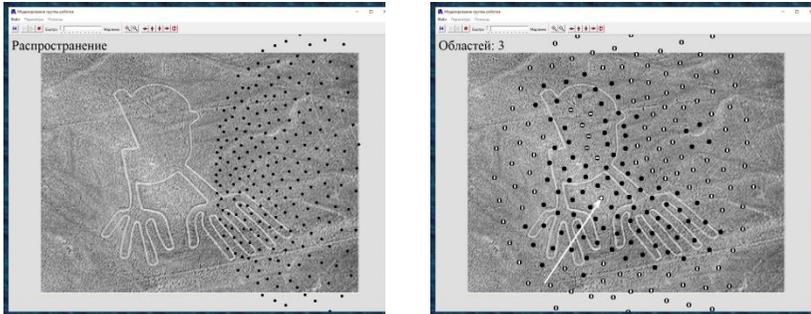


Рис.5. Геоглиф из пустыни Наска.

Заключение

Для экспериментов была соответствующим образом модифицирована программная моделирующая система, описанная в [Павловский и др., 2015]. Все изображения эпизодов моделирования выше в работе, как отмечалось, получены с ее помощью. Проведены серии экспериментов по моделированию созданного алгоритма. Алгоритм показал устойчивое и достаточно эффективное функционирование.

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

Список литературы

- [Зенкевич и др., 2007] Зенкевич С.Л., Минин А.А. Построение карты мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером, методом рекуррентной фильтрации. // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2007, №8, с.5-12.
- [Павловский и др., 2015] Павловский В.Е., Павловский В.В. Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов. // ИИиПР, 2015 г., №4, с. 62-71.
- [Шварц и др., 2016] Шварц Д., Куприянов Д.В. Построение карт местности робототехническими системами. // Изв. ВУЗов. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2016. Т. 59, № 8, с.695-698.