

УДК 004.021

КОММУНИКАЦИОННЫЙ АСПЕКТ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАСТИ ГРУППОЙ РОБОТОВ С ЛОКАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

В.В. Воробьев (*gatus86@mail.ru*)
НИЦ “Курчатовский институт”, Москва

Аннотация. В работе рассматривается коммуникационный аспект задачи группового исследования заданной области. Этот аспект заключается в том, как организовано взаимодействие и обмен данными между роботами в группе. Предлагается механизм взаимодействия, основанный на обмене сигналами, которые интерпретируются роботами, которые их зафиксировали, особым образом так, как будто область, откуда был принят сигнал, уже исследована. Показаны результаты моделирования, подтверждающие принципиальную возможность использования такого механизма для решения данной задачи.¹

Ключевые слова: групповая робототехника, групповое картографирование, локальное взаимодействие.

Введение

В работе рассматривается коммуникационный аспект задачи совместного исследования заданной области коллективом роботов. Вообще говоря, данный аспект является во многом концептуальным при разработке групповых робототехнических систем. Например, от него зависит степень информированности членов группы об общих целях, задачах и т.д. [Каляев и др., 2009]. Таким образом, характер взаимодействия влияет как на специфику решаемых группой задач, так и на методику их решения. Очевидно, что чем более информирована группа, тем более сложные задачи она может решать.

Если говорить о задаче исследования области, то можно сказать, что она относится к фундаментальным задачам мобильной робототехники, и обычно ее решение сводится к определению дальнейших действий робота, с целью минимизации времени исследования [Burgard et al., 2000]. В случае

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ проект (№ 16-11-00018) и РФФИ (проект № 15-07-07483).

использования группы роботов, коммуникационный аспект также начинает играть важную роль.

Например, если свести исследование области к задаче распределения роботов на территории, где каждый робот исследует только свою часть [Rekleitis et al., 1998], то взаимодействия между роботами, непосредственно во время исследования, может и не быть вовсе. В таком случае важно иметь алгоритм, который оптимально распределит роботов по территории, и сущность, которая запустит его. Однако такую группу практически невозможно адаптировать к изменениям в процессе исследования, например, выбыванию части роботов из строя. Для этого необходима постоянная связь членов группы с сущностью-лидером, которая отслеживала бы изменения обстановки и могла внести коррективы в распределение роботов по территории. Например, в [Churavy et al., 2008] построена централизованная система управления группой роботов, где связь между базовой станцией и роботами осуществляется по радиоканалу. Однако эффективность такого подхода может резко упасть при выбывании лидера или в случае, когда каналы связи между ним и остальными роботами сильно зашумлены, например, в случае сознательного подавления этих каналов противником.

В таком случае возможно более эффективным подходом является подход, где члены группы могут обмениваться информацией друг с другом, а группа не имеет лидера, или, по крайней мере, его функции при решении задачи исследования ничем не отличаются от функций остальных роботов. При этом он может первоначально распределить роботов по территории, но отдельному роботу здесь не назначается какой-то конкретный участок области для исследования, а адаптация группы происходит посредством взаимодействия друг с другом.

Архитектурно можно выделить системы, где каждый робот имеет возможность установить связь со всеми роботами группы, и системы, где есть ограничения на число таких связей. Если рассматривать каждого робота как узел некоей компьютерной сети, то примером первого варианта систем, могут служить сети с полносвязной топологией, а примером второго варианта – сети с неполносвязной. Частным случаем системы с ограничениями являются системы, использующие локальное взаимодействие, т.е. те системы, где роботы могут взаимодействовать исключительно со своими ближайшими соседями [Карпов, 2013].

Безусловно, если не рассматривать техническую сторону решения, то предпочтительнее, с точки зрения обеспечения более высокой степени информированности коллектива, полносвязная топология. Однако технически это труднореализуемо: при числе роботов в коллективе порядка десятков единиц существенной проблемой становится установка и поддержание каналов связи между всеми роботами. Например, в случае

использования Bluetooth или ZigBee необходима установка большого числа, сравнимого с числом роботов, устройств на каждого робота, что конструктивно труднореализуемо. Не стоит забывать и о том, что множество работающих устройств перегружают эфир. Кроме того, речь идет о группе роботов, соответственно они могут двигаться, выполняя свою задачу. Следовательно, топология может меняться из-за того, что ряд роботов оказалась вне границ “слышимости”, а ряд роботов, наоборот, добавился в общую сеть. В таком случае одним из вариантов организации взаимодействия может быть вариант с использованием самоорганизующихся сетей (ad-hoc) [Вишнеvский и др., 2005].

Например, в [Couceiro et al., 2014] рассматривается решение задачи исследования местности группой роботов, в основе которого лежат мобильные ad-hoc сети (mobile ad-hoc network MANET). Суть решения заключается в том, что есть роботы-исследователи (scout) и роботы-наблюдатели (ranger). Первые занимаются непосредственно исследованием местности, а вторые обеспечивают связь, контролируя движение первых. Однако даже в этом случае авторы указывают на сложность реализации такого рода систем из-за их динамической нестабильности.

Еще одна система подобного рода представлена в [Burgard et al., 2005], где решается, в том числе и задача картографирования. Роботы образуют кластеры, внутри которого они могут обмениваться информацией с любым членом этого кластера, координировать совместные действия. Кластеры образуются, когда роботы могут “слышать” друг друга. В вырожденном случае, когда никто друг друга не видит, они действуют индивидуально.

Если рассматривать системы с ограничениями на количество связей, то недостатки систем с полносвязной топологией здесь не так явны, однако достигнуть такой же степени информированности каждого члена коллектива если и возможно, то это занимает больше времени и/или требует дополнительных программно-аппаратных решений.

В качестве примера можно выделить работу [Zhu et al., 2013], где рассматривается задача исследования Марса коллективом роботов. Работа, в основном, посвящена разработке навигационной системы для этого коллектива. Однако указывается, что для итеративной процедуры уточнения координат роботы связываются с соседями, используя самоорганизующийся режим передачи цифровой информации с временным разделением канала.

В [Воробьев, 2015] рассматривается задача коллективной рекогносцировки местности, где коллектив роботов использует только локальное взаимодействие роботов. Технически, система взаимодействия – ИК-канал связи с реализацией протокола передачи данных RC-5 [Карпова,

2016]. С помощью нее робот может “общаться” со своими ближайшими соседями.

Несмотря на технические трудности, реализации систем с полностью связанной топологией существуют, в том числе в виде реальных программно-аппаратных комплексов, а сам подход достаточно успешно развивается. Если говорить о задаче группового исследования местности, можно сказать, что это, во многом, обусловлено подходом к решению задачи – роботы рассматриваются как узлы вычислительной сети, топология которой может динамически меняться. Это имеет свои преимущества – обеспечивается достаточно интенсивный обмен данными между роботами, что важно, например, в задаче коллективного SLAM (см. например [León et al., 2009]), и позволяет коллективу одновременно создавать общую карту местности, обмениваясь локальными картами друг с другом непосредственно в процессе исследования. Однако этот подход достаточно ресурсоемок, но самое главное – коллектив роботов не является компьютерной сетью в полном смысле этого слова [Карпов, 2013], а их взаимодействие не сводится только лишь к обмену информацией. При этом остается проблема зашумленных каналов связи, по которым необходимо передавать большие объемы данных, указанная выше.

В работе рассматривается возможность использования неявной коммуникации в коллективе роботов, решающих задачу исследования местности, где взаимодействие между ними носит локальный характер – робот может взаимодействовать только со своими соседями. Выбор системы, использующей локальное взаимодействие, обусловлен не только тем, что роботы будут технически проще в реализации, но и тем фактом, что в реальной жизни при общении невозможно передать информацию всему коллективу при его численности более определенного порога. Если рассматривать муравьев как объект подражания групповой робототехники [Карпов, 2016], становится очевидно, что связь “все-со-всеми” просто невозможна.

Другой особенностью является неявный характер коммуникации – роботы не обмениваются данными в процессе исследования. Каждый робот постоянно генерирует специальный сигнал, и когда его “слышат” другие роботы, они интерпретируют область, откуда сигнал получен как уже исследованную. В отличие от похожего метода потенциалов, пример которого представлен, например в [Karpov et al., 2016], интерпретированная единожды как уже исследованная область остается таковой до конца исследования, т.е. потенциал не зависит от времени. Кроме того, упрощен механизм трактовки полученного сигнала, что позволяет решать задачу группового исследования в условиях высокого уровня помех или сознательного подавления каналов связи противником.

1. Постановка задачи

Рассмотрим следующую задачу. Существует N роботов, взаимодействие которых друг с другом носит локальный характер. Перед ними стоит задача исследования некоторой заданной местности.

Каждый робот имеет область видимости, радиус которой равен R . Область, в которой робот может заметить другого робота совпадает с областью видимости R , при этом можно определить направление, откуда был получен сигнал. Всего есть 8 направлений. Аппаратная реализация системы локальной связи, позволяющей определить направление, откуда был получен сигнал описано в [Карпова, 2016] и представляет собой инфракрасный приемо-передатчик, где каждый приемник экранирован так, чтобы обеспечить получение сигнала только из своего квадранта. Схематично, определение направления выглядит следующим образом (Рис. 2): робот слева получает на правый приемник сигнал от робота справа. Стоит отметить, что в нормальных условиях в таком случае, и робот справа принимает сигнал на левый датчик от робота слева.

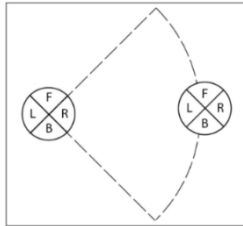


Рис. 2. Определение направления, откуда был получен сигнал.

За препятствиями видимость отсутствует. Исследуемая местность поделена на квадраты. Двигаться роботы могут в любой из 4х смежных с текущем квадраты. Исследование области происходит следующим образом: робот выбирает ближайший неисследованный квадрат, строит к нему путь по алгоритму A^* и начинает движение по маршруту. Как только квадрат попадает в поле его видимости, он считается исследованным, и робот выбирает следующий неисследованный квадрат.

В отличие от [Воробьев, 2015] и [Karpov et al., 2016], где передавались координаты исследованной области (Рис. 3), здесь передается только направление, откуда был получен сигнал (Рис. 4), и это направление считается уже исследованным. Стоит отметить тот факт, что при встрече роботов друг с другом, полученный сигнал можно интерпретировать как “Не ходи сюда”, при этом он не содержит никакого сообщения –

достаточно просто наличие соответствующего сигнала. Это позволит роботам избегать уже исследованных их соседями областей.

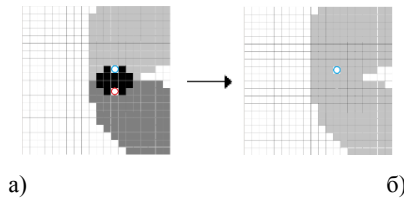


Рис. 3. Непосредственный обмен областями. а) - до обмена, б) – после, для верхнего робота. Черным отмечена область, которую видят оба робота

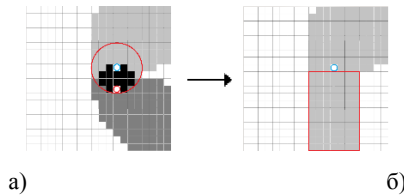


Рис. 4. Обмен сигналами. а) - до обмена, б) – после, для верхнего робота. Черным отмечена область, которую видят оба робота

При получении сигнала робот отмечает область, откуда он пришел так, как будто он был там сам, что позволит уменьшить время исследования всей области коллективом. Отмечаемая область имеет форму прямоугольника (Рис. 4,б), короткая сторона которого имеет длину, равную диаметру обзора робота (Рис. 4,а, отмечен красным кругом), а длинная сторона доходит от робота до края исследуемой области. При этом алгоритм действий робота, который получил сигнал можно описать следующим образом:

Алгоритм 1. Действия при получении сигнала.

1. Определить, с какой стороны получен сигнал.
2. Пометить квадраты с этой стороны как уже исследованные (см. Рис. 4).

2. Вычислительные эксперименты

Среда моделирования, где проводились вычислительные эксперименты, представляет собой написанную на языке C++ программу, состоящую из графического и логического модулей. Выбор в пользу языка и самостоятельной разработки среды моделирования обусловлен

необходимостью быстрого переноса разработанного механизма на реальную группировку роботов.

Вычислительные эксперименты проводились для двух моделях полигона: со случайно расставленными препятствиями (Рис. 5а) и с моделью лабораторного полигона (Рис. 5б). Полигоны поделены на клетки, размером 20x20 см. Размеры полигонов – 20x20 клеток.

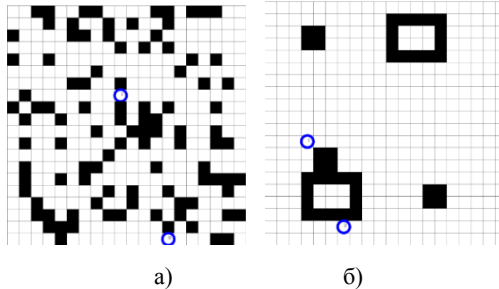


Рис. 5. а – полигон со случайными препятствиями, б – лабораторный полигон.
Черные квадраты – препятствия, круги – роботы

Роботы расставляются произвольным образом. Для первого случая варьировалось число препятствий: от 5% до 30% с шагом в 5%. Также в обоих случаях варьировалась дальность обзора – от 2 до 4-х клеток. Для каждого набора данных проводилось 100 итераций. Измерялось время, необходимое для того, чтобы у всех роботов все клетки были помеченные как исследованные. Кроме того, оценивалось качество процесса исследования – по количеству квадратов с препятствиями, которые не попали ни разу в зону видимости ни одного робота. Чем выше этот показатель, тем хуже качество.

Для начала рассмотрим эти показатели для полигона с моделью лабораторного полигона. На Рис. 6 показана зависимость среднего числа необнаруженных препятствий в процентах от их общего количества от числа роботов для $R=2$ и $R=4$ соответственно.

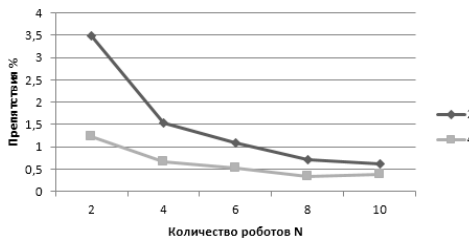


Рис. 6. Средний процент необнаруженных препятствий для лабораторного полигона

Можно заметить, что для меньшего числа роботов ошибка выше. Это объясняется тем, что в таком случае, из-за особенностей механизма трактовки сигнала, чаще встречаются области, которые помечаются как уже исследованные для всех роботов, однако ни один из них их не посетил. На Рис. 6 показана зависимость времени исследования от числа роботов для $R=2$ и $R=4$ соответственно.

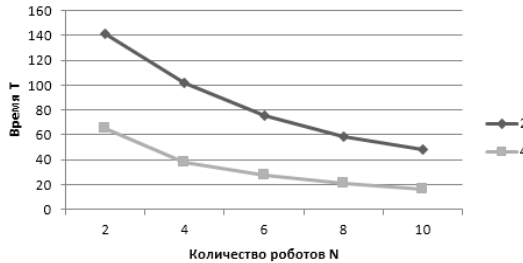


Рис. 7. Время исследования лабораторного полигона

Наблюдается очевидный результат – для большего числа роботов и при большем R время исследования становится меньше.

Рассмотрим вариант со случайно расставленными препятствиями. Сразу стоит отметить достаточно очевидный аспект – чем меньше число препятствий на полигоне, тем меньше ошибка и меньше время исследования. Это подтверждают и данные вычислительных экспериментов. Вместо этого важно сравнить предлагаемый механизм с другими: непосредственным обменом картами, методом потенциалов и подходом, где роботы вообще не взаимодействуют, и каждый исследует всю территорию. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлена зависимость величины ошибки для 10 роботов от процента заполнения территории.

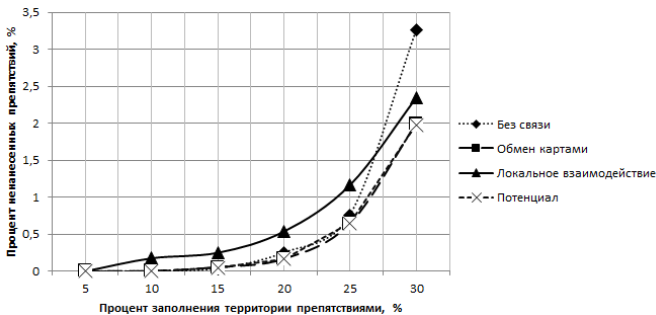


Рис. 8. Средний процент не нанесенных препятствий для разных методов

Можно заметить, что обмен картами и метод потенциалов дают практически идентичные значения ошибки, что обусловлено тем, что, в конечном итоге, хотя бы один из роботов посетит неисследованную область. Предлагаемый механизм показывает результаты хуже, однако, в абсолютных значениях разница с первыми двумя невелика. Однако, если сравнить время исследования (Рис. 9), то видно, что предлагаемый алгоритм самый быстрый из всех.

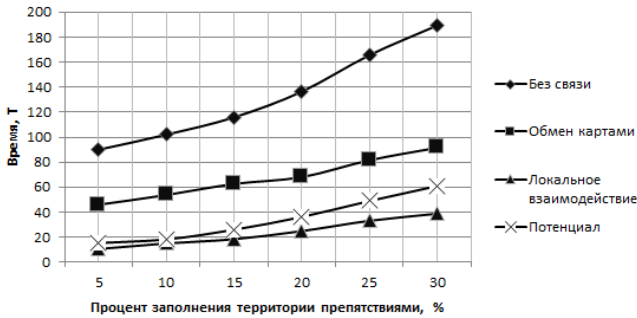


Рис. 9. Время исследования для разных методов.

Это обусловлено тем, что в модели на обмен картами требуется достаточно большое время, что имитирует потерю данных при помехах в канале связи. Метод потенциалов, по сравнению с ним, показывает результаты лучше, однако из-за возникающего перекрытия исследуемых областей роботам требуется больше времени для того, чтобы закончить процедуру.

Заключение

В работе показана принципиальная возможность использования механизма неявной коммуникации для решения задачи исследования заданной области коллективом роботов, использующих локальное взаимодействие. Характерной особенностью предлагаемого решения является отсутствие необходимости обмена какой-либо информацией между роботами, кроме сигнала, о том, что он находится в радиусе обнаружения другим роботам. Исходя из полученных зависимостей времени и ошибки исследования, можно сделать вывод о том, что такой механизм больше подходит для задач, где важно быстро получить данные в ущерб их точности, например, сбор данных в агрессивной среде или работа под воздействием противника, в местах, где трудно гарантировать стабильный канал связи.

Список литературы

- [Burgard et al., 2000] Burgard W., Moors M., Fox D., Simmons R., Thrun S. Collaborative Multi-Robot Exploration. // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (IRCA)*. pp. 476–481.
- [Burgard et al., 2005] Burgard W., Moors M., Stachniss C., Schneider F. E. Coordinated multi-robot exploration. // *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3), pp.376–386.
- [Churavy et al., 2008] Churavy C., Baker M., Mehta S., Pradhan I., Scheidegger N., Shanfelt S., Rarick R., Simon D. Effective implementation of a mapping swarm of robots. , pp.28–33.
- [Couceiro et al., 2014] Couceiro M. S., Figueiredo C. M., Rocha R. P., Ferreira N. M. F. Darwinian swarm exploration under communication constraints : Initial deployment and fault-tolerance assessment. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(4), pp.528–544.
- [Karpov, et al., 2016] Karpov V., Migalev A., Moscowsky A., Rovbo M., Vorobiev V. Multi-robot Exploration and Mapping Based on the Subdefinite Models. // In *Interactive Collaborative Robotics, First International Conference, ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24-26, 2016, Proceedings*. Springer International Publishing Switzerland, C. 143–152
- [León et al., 2009] León A., Barea R., Bergasa L. M., López E., Ocaña M., Schleicher D. SLAM and map merging. *Journal of Physical Agents*, 3(1), pp.13–23.
- [Rekleitis et al., 1998] Rekleitis, I., Dudek, G. & Miliotis, E., 1998. Accurate Mapping of an Unknown World and Online Landmark Positioning. In *Proc.of Vision Interface (VI)*. C. 455–461.
- [Zhu et al., 2013] Zhu C., Zhang S., Dammann A., Sand S., Henkel P., Gunther C. Return-to-Base Navigation of Robotic Swarms in Mars Exploration Using DoA Estimation. // *ELMAR, 2013 55th International Symposium*.
- [Вишневский и др., 2005] Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В., *Широкополосные беспроводные сети передачи информации*, М. Техносфера, 2005, 592с.
- [Воробьев, 2015] Воробьев В.В. Решение задачи групповой рекогносцировки с использованием локального взаимодействия роботов. // *Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта*. С. 34–41.
- [Каляев и др. 2009] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г., *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов* М: Физматлит, 2009, 292с.
- [Карпов, 2016] Карпов В.Э Модели социального поведения в групповой робототехнике. *Управление большими системами*, (59), С.165–232.
- [Карпов, 2013] Карпов В.Э Управление в статических роях. Постановка задачи.// *VII-я Международная научно-практическая конференция “Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте.”* С. 730–739.
- [Карпова, 2016] Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута для робота в задаче фуражирования. // *Конференция по искусственному интеллекту 2016*. С. 169–178.
- [Карпова, 2016] Карпова И.П. Псевдоаналоговая коммуникация в группе роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 17(2), С.94–101.