

# Зависимость эффективности коллективного стохастического патрулирования от связности и надежности беспроводной сети\*

Е. А. ШВЕЦ

**Аннотация.** В работе предлагается алгоритм стохастического патрулирования на основе метода потенциалов, обеспечивающий непредсказуемость движения роботов. Предложенный алгоритм является распределенным и функционирует без единого центра управления. Роботы не обмениваются спланированными маршрутами движения по сети, а только текущими координатами. Эти свойства защищают систему от вмешательства извне. В работе также исследуется падение эффективности патрулирования при отсутствии, слабой и прерывистой связи.

**Ключевые слова:** патрулирование, метод потенциалов, коллективное поведение

## Введение

Патрулирование является важной задачей в робототехнике и имеет множество применений: слежение за объектом и обнаружение проникновения, поиск некоторого объекта на территории, продолжительное картирование местности и организацию спасательных операций [1,2]. Задача патрулирования – обеспечить периодическое покрытие (наблюдение) каждой точки территории. В данной работе предлагается распределенный алгоритм патрулирования объекта группой роботов, устойчивый к взлому сети и обеспечивающий непредсказуемое поведение роботов.

## 1. Существующие алгоритмы патрулирования и критерии их оценки

Для оценки эффективности алгоритмов патрулирования в литературе используется несколько методов. Для их описания введем понятие «туман войны» (ТВ). ТВ в точке территории  $X$  – это время, которое прошло с последнего наблюдения точки  $X$  любым из роботов. Наиболее часто используется критерий «среднее значение ТВ по всем точкам за период патрулирования» [3, 4]. Недостаток подобного критерия – возможная неравномерность покрытия территории у алгоритмов, даже если они имеют высокую эффективность согласно критерию: некоторые точки территории могут быть систематически обследованы реже, чем другие. В нашей работе мы предлагаем использовать параметр  $MTV(t)$  – максимальный

ТВ в момент времени  $t$  – это максимальный ТВ по всем точкам территории в момент времени  $t$ . Нашим критерием является среднее значение  $MTV$  за время патрулирования. Эффективность подобного алгоритма определяется ТВ в самых необследованных точках, следовательно, алгоритмы, которые обеспечивают равномерное покрытие, будут иметь большую эффективность согласно критерию.

Существует несколько распространенных подходов к организации патрулирования группой роботов. Например, распространены детерминированные регулярные алгоритмы: при использовании подобных алгоритмов каждый робот движется по заранее рассчитанной оптимальной траектории [5]. При таком методе патрулирования достигается максимальная теоретическая частота покрытия, однако роботы движутся по одним и тем же траекториям, и злоумышленник, наблюдая за системой, может спланировать незамеченное проникновение на объект.

Существуют алгоритмы, при использовании которых территория делится на пересекающиеся части, которые распределяются между роботами: каждый робот патрулирует только часть территории, отведенную для него [6]. Проблемой подобных алгоритмов также является некоторая предсказуемость (каждый робот не покидает отведенный ему участок территории), а также неустойчивость к выходу роботов из строя: при поломке робота участок территории, отведенный для него, останется не патрулируемым.

Упомянутые выше алгоритмы объединяет то, что движение роботов во время патрулирования ча-

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00150).

стично или полностью рассчитано и спланировано до начала патрулирования. Для успешного обеспечения непредсказуемости движения роботов при патрулировании и для обеспечения устойчивости к выходу роботов из строя необходим алгоритм, который позволит роботам принимать решение о направлении движения в процессе работы, исходя из текущей ситуации. Подобный подход также обеспечит гибкость и возможность реализации других типов коллективного поведения. Существует несколько алгоритмов патрулирования, реализованных подобным образом. В работах [7, 8] описаны соответственно подходы, основанные на машинном обучении, и на методе “аукциона”, когда роботы обмениваются целями и каждый робот выбирает такую цель для своего движения, которая является для него максимально дешевой по некоторой метрике. Первый подход является достаточно сложным, недостатком второго является то, что роботы передают планы о своем будущем передвижении по сети, и взломав сеть, злоумышленник может спланировать проникновение на объект.

В данной работе мы используем метод потенциалов, основанный на том, что различные объекты на территории патрулирования (необследованные точки карты, другие патрулирующие роботы, препятствия и т.д.) оказывают виртуальные силы на робота. Робот движется в зависимости от совокупности виртуальных сил, которые на него действуют. Метод потенциалов широко используется для решения различных задач в робототехнике [9, 10]. Разработка алгоритма для патрулирования с использованием метода потенциалов подробно описана нами в статье [11]. Предложенный в ней метод также реализует два других типа поведения: обнаружение и окружение объекта с его последующей фотосъемкой, исследование места аварии вышедшего из строя робота, и позволяет реализовать другие. Предложенный алгоритм подробно рассмотрен ниже.

## 2. Алгоритм патрулирования

Каждый из роботов, участвующий в патрулировании, принимает решения независимо. В условиях полной связи каждый робот обладает информацией о положении других роботов в каждый момент времени, а значит может рассчитать точные значения ТВ в каждой точке территории. В случае, если связь между какими-либо роботами отсутствует, то каждый из них перестает обновлять ТВ от движения другого робота.

Каждый робот принимает решение о направлении своего движения независимо от других следующим образом:

1. Строится карта нормированного ТВ: для этого в каждой точке карты значение ТВ делится на максимальное значение ТВ по всей карте. Затем к карте нормированного ТВ применяется операция дилатации с крылом 5м (50 пикселей).
2. С помощью алгоритма маршрутизации найдется пути от робота до каждой наблюдаемой проходимой точки территории с использованием алгоритма волны [12]. Для каждой точки запоминается расстояние и направление пути, в котором робот должен двигаться, чтобы попасть в точку.
3. Для каждой точки территории рассчитывается виртуальная сила, с которой она действует на робота. Модуль силы зависит от нормированного ТВ в точке и от длины найденного на шаге 2) пути  $L$  между точкой и роботом и может быть записан в виде:

$$F(TB, L) = e^{\alpha TB} \cdot e^{-\frac{L^2}{\beta}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – нормировочный коэффициент,  $\beta$  – типичный размер территории в смысле площади. В данной работе принято  $\alpha = 40$ ,  $\beta = 5000 \text{ м}^2$ . Направление силы совпадает с направлением найденного пути от робота к целевой точке. В работе [11] рассмотрено несколько функций для нахождения модуля виртуальной силы и выбрана оптимальная.

4. Полученные силы притяжения, действующие на робота со стороны точек карты, интегрируются согласно одному из двух алгоритмов:
  - а) Метод векторной суммы: все силы, действующие на робота, складываются векторно, и робот осуществляет движение (и, если необходимо, разворот) в направлении результирующей силы.
  - б) Метод моды. Пространство вокруг робота делится на сектора (с равными углами и общим центром в позиции робота). В каждом секторе все действующие силы складываются по модулю, и робот осуществляет движение (и, если необходимо, разворот) по биссектрисе сектора, в котором действует максимальная сила. В данной работе используется 16 секторов.

Два предложенных алгоритма интегрирования действующих сил показывают схожий результат, но в работе [11] было показано, что метод моды является предпочтительным на территории с большим количеством препятствий.

### 3. Модель связи между роботами

В работе [11] предполагается, что сеть обладает полной связностью, то есть (i) связь между роботами существует при любом расстоянии между ними и (ii) при наличии препятствий между ними.

В данной работе мы исследуем, как разрывы и ограниченность дальности работы сети влияют на эффективность патрулирования. Мы предполагаем, что роботы могут ретранслировать сообщения, т.е. если даже два робота не имеют непосредственной связи друг с другом, но существует цепочка из роботов, которая их соединяет, то каждый из них обладает полной информацией о координатах другого.

Мы накладываем два ограничения на сеть: невозможность передавать сообщения дальше чем на расстояние  $R_{max}$  и невозможность передавать сообщения, если прямая линия, соединяющая роботов, пересекает препятствие. Также мы рассматриваем сценарий с полным отсутствием связи.

### 4. Численные эксперименты

Моделирование проводится для двух территорий патрулирования, приведенных на рис. 1 и 2. Их размеры составляют, соответственно, 100 на 88 и 118 на 118 метров. В патрулировании участвуют от 2 до 4 роботов. Территория 1 взята как пример территории с малым количеством препятствий, территория 2 – с большим.

В моделировании используется выражение (1) для нахождения значения виртуальных сил, и оба метода интегрирования виртуальных сил – метод векторной суммы и метод моды.

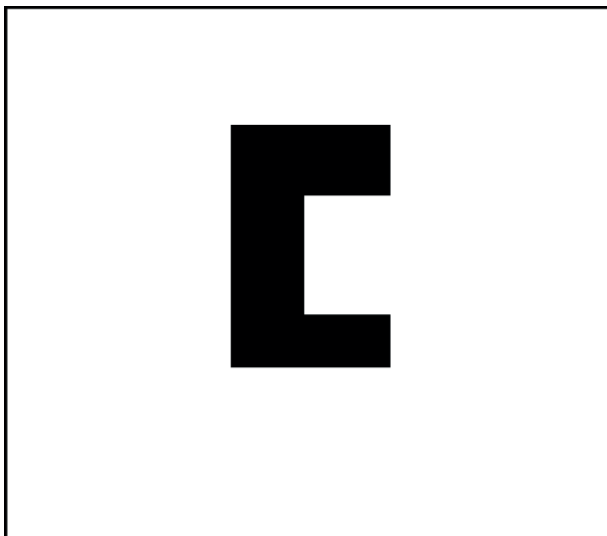


Рис. 1. Территория патрулирования 1

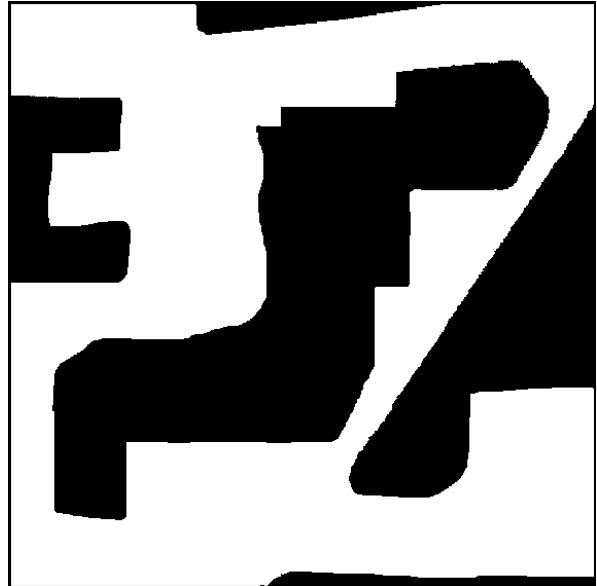


Рис. 2. Территория патрулирования 2

При моделировании ограниченной связи использовался параметр  $R_{max} = 70$  м; при отсутствии связи – параметр  $R_{max} = 0$  м. При моделировании полной связи роботы могут общаться даже если прямая, соединяющая их позиции, пересекает препятствие. Результаты моделирования приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Средние значения МТВ (секунды) при патрулировании Территории 1

Кол-во роботов	2	3	4
Полная связь, мода	163.8	124	110.8
Полная связь, вектор	158.4	123.2	106.5
Огр. Связь, мода	178	131.6	116
Огр. Связь, вектор	176.6	136.7	110
Нет связи, мода	194.1	160	142.9
Нет связи, вектор	195.5	175.3	163.9

Таблица 2. Средние значения МТВ (секунды) при патрулировании Территории 2

Кол-во роботов	2	3	4
Полная связь, мода	268.7	225.6	168.2
Полная связь, вектор	264.3	212.2	174.1
Огр. Связь, мода	313.9	240	217.5
Огр. Связь, вектор	289	242.2	217.7
Нет связи, мода	389.1	342.7	339.8
Нет связи, вектор	358	339.7	333.6

На основе полученных численных результатов можно сделать следующие выводы:

1. На территории с малым количеством препятствий слабая связь или ее отсутствие меньше влияют на эффективность патрулирования.
2. Отсутствие связи сильнее снижает эффективность патрулирования при использовании большего числа роботов. Это объясняется тем, что при отсутствии связи роботы не реа-

лизуют коллективное поведение, а действуют индивидуально.

3. Полное отсутствие связи значительно сильнее ухудшает эффективность патрулирования по сравнению с ее ограничением, поэтому даже слабая сеть значительно лучше полного отсутствия связи.

### Заключение

В работе рассмотрен стохастический, полностью распределенный метод патрулирования территории группой роботов, который обеспечивает непредсказуемое их движение. Исследовано влияние отсутствия и прерывистой связи на эффективность патрулирования на территории с большим и малым числом препятствий. Показано, что ограничение связи практически не влияет на эффективность патрулирования при низком количестве препятствий, и оказывает значительное влияние на эффективность при патрулировании территории с большим количеством препятствий. Полное отсутствие связи значительно снижает эффективность патрулирования на любой территории.

### Литература

1. *Kitano Hiroaki*. Robocup rescue: A grand challenge for multi-agent systems. MultiAgent Systems, 2000.
2. *Machado Aydano, et al*. Multi-agent movement coordination in patrolling. First Workshop on Agents in Computer Games, at the 3rd International Conference on Computers and Games (CG'02)
3. *Portugal D., Rocha R. P*. Multi-robot patrolling algorithms: examining performance and scalability, *Advanced Robotics* 27.5. 2013, pp. 325–336.
4. *Chu H., Glad A., Simonin O*. Swarm approaches for the patrolling problem, information propagation vs. pheromone evaporation, *Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence - Volume 01*. 2007, pp. 442 – 449.
5. *Elmaliach Yehuda, Noa Agmon, Gal A. Kaminka*. Multi-robot area patrol under frequency constraints. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 57.3-4. 2009, pp. 293-320.
6. *Portugal David, Rui Rocha*. Msp algorithm: multi-robot patrolling based on territory allocation using balanced graph partitioning. *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing*. ACM, 2010.
7. *Santana H., Corruble V., Ratitch B*. Multi-agent patrolling with reinforcement learning, *Proceedings of the Third International Joint Conference on 97Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*. IEEE Computer Society, 2004, pp. 1122 – 1129.
8. *Menezes T., Tedesco P., Ramalho G*. Negotiator agents for the patrolling task, *Advances in Artificial Intelligence IBERAMIA-SBIA 2006*, Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 48 – 57.
9. *Reif J., Wang H.* (1999), Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 27, Issue 3, p. 171194.
10. *Ge S., Cui Y*. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method, *Autonomous Robots* Volume 13, Issue 3, 2002, pp. 207 – 222.
11. *Shvets E*. Stochastic multi-agent patrolling using social potential fields. *29th EUROPEAN Conference on Modelling and Simulation*. 2015.
12. *Rubin F*. The Lee path connection algorithm, *Computers*, *IEEE Transactions on* 100.9, 1974, pp. 907 – 914.

**Швец Евгений Александрович**. И.о. м.н.с. ИППИ РАН. Окончил в 2013 г. МФТИ. Количество печатных работ: 7. Область научных интересов: машинное зрение, алгоритмы коллективного поведения, SLAM. E-mail: shvets@visillect.com