

УДК 681.5+004.8

К ВОПРОСУ О ПРЕДСТАВЛЕНИИ МАРШРУТА ДЛЯ РОБОТА В ЗАДАЧЕ ФУРАЖИРОВАНИЯ¹

И.П. Карпова (*karpova_ip@mail.ru*)

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

В работе предлагается метод построения мобильным роботом пути по визуальным ориентирам. Описан алгоритм формирования описания маршрута и правила его интерпретации, которые позволяют роботу воспроизвести данный маршрут. В основе описания маршрута лежат пространственные отношения. Эксперименты по имитационному моделированию проводились на примере решения задачи фуражирования.

Ключевые слова: групповая робототехника, когнитивный агент, пространственные отношения, грануляция информации

Введение

Среди множества задач, которые относятся к области групповой робототехники, одной из самых распространенных является задача фуражирования. Реальным примером здесь служит пчелиный рой или муравейник. В муравейнике есть разведчики, которые исследуют окружающее пространство с целью поиска пищи. Найдя пищу, они возвращаются в муравейник и оповещают других муравьев-фуражиров о местоположении найденной пищи. Последние отправляются к этому месту и приносят пищу в муравейник. Данная задача разбивается на 3 этапа: найти «еду», вернуться «домой» и повторить этот путь.

Существует большое количество исследований, посвященных решению этой задачи, в основном, разработанных для гомогенных (или гетерогенных) групп искусственных агентов. Чаще всего в них используется принцип феромонов. Агенты помечают свой путь «феромонами», которые имеют свойство «испаряться» со временем. Другие агенты определяют путь в соответствии с максимальной концентрацией «феромонов» (например, [Kim et al., 2012]). При этом для возврата в точку отправления может использоваться маяк, расположенный

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-11-00018).

около «дома» [Hoff et al., 2013], GPS-навигация [Lee et al., 2013], механизм направленной коммуникации [Meng et al., 2012] или движение по следу [Zedadraa et al., 2016]. В нашем же случае подход, основанный на феромонах, неприемлем (хотя бы по чисто техническим причинам).

В работах, описывающих запоминание пути для возвращения «домой» или повторного его прохождения, внимание, в основном, уделяется построению сцен [Baddeley et al., 2012] или распознаванию образов [Moller, 2006]. В обоих случаях роботы должны иметь развитую систему технического зрения и каналы связи с высокой пропускной способностью для передачи другим роботам визуального ряда, образующего маршрут.

Т.о., существующие работы в этой области ориентированы на технически сложные устройства с большим объемом памяти и большой вычислительной мощностью. Но особенность групповой робототехники заключается в том, что группа состоит из простых устройств, способных решать сложные задачи за счет объединения своих возможностей. Под "простотой" здесь понимается ограниченность сенсорных и когнитивных возможностей, а также вычислительных ресурсов робота. В связи с этим напрашивается подход, основанный на нечетком управлении.

Для успешного функционирования робот должен уметь строить модель внешней среды с использованием пространственных отношений. Решение задачи ориентации робота в пространстве обычно основано на псевдофизической логике (ПФЛ) – пространственной логике с нечеткими бинарными отношениями трех типов: отношения для расстояний, для направлений и отношения взаимного расположения объектов. Пространственные логики можно условно разделить на статические и динамические. Пример применения статической логики для построения модели внешнего мира описан в [Калуцкая и др., 2010]. Там предложен вариант построения ПФЛ с помощью обобщенных ограничений, позволяющий выводить нечеткие пространственные ограничения, не описанные человеком явно. В качестве примера построения динамической модели можно привести работу [Карпов, 2012]: начало системы координат связывается с роботом, и вводятся правила определения отношений между объектами окружающей среды и роботом. Но в явном виде использование подобных механизмов для решения данной задачи затруднительно, т.к. в первая модель статична, а во вторая предназначена для прогнозирования изменения взаимного положения объектов.

Цель данной работы – предложить механизм построения динамической модели перемещения робота в окружающей среде, с помощью которой можно было бы управлять действиями робота. Модель должна включать правила формирования сведений о маршруте, по которому он перемещается, и правила интерпретации этих сведений, применяя которые этот же (или другой) робот может повторить данный маршрут.

2. Метод ориентации робота в пространстве

Для начала кратко рассмотрим, как ориентируются муравьи. У разных видов есть разные способы ориентации, но общими для большинства видов муравьев являются феромоновый след и визуальные ориентиры.

После первого выхода из муравейника новый фуражир выполняет короткие прогулки, запоминая зрительные ориентиры вокруг муравейника. Это позволит ему в будущем точно найти вход в гнездо. Потом он увеличивает протяженность маршрутов, включая врожденную систему интегрирования пути (path integration) [Muller et al., 1988]. Работа этой системы основана на одометрии и ориентации по солнцу или магнитному полю Земли. Например, пустынные муравьи рода *Cataglyphis* считают количество пройденных шагов и запоминают свое положение относительно солнца [Wehner, 2009]. Однако применение этого механизма приводит к накоплению ошибки, поэтому муравьи используют этот механизм при отсутствии визуальных ориентиров.

Что касается возможности применения одометрии для технических устройств (учет показаний энкодеров, считающих углы поворота колес), то здесь ошибка счисления будет недопустимо большой. Качественный энкодер имеет погрешность в 0.1%, но даже при длине пути в 100 шагов (100 оборотов колес) погрешность достигнет 10%. Поэтому мы возьмем за основу построения пространственной модели внешней среды подход, основанный на навигации по зрительным ориентирам.

Для этого робот должен уметь отличать один ориентир от другого, и для простоты предположим, что он умеет различать цвета. Таким образом, цвет будет играть роль *идентификатора* объекта. Что касается других возможностей робота, то он умеет двигаться вперед / назад, поворачивать направо / налево, останавливаться. Он видит окружающие объекты (внутри области видимости в 180°) и умеет определять расстояние до них (приблизительно) и направление (относительно себя) (рис. 1).

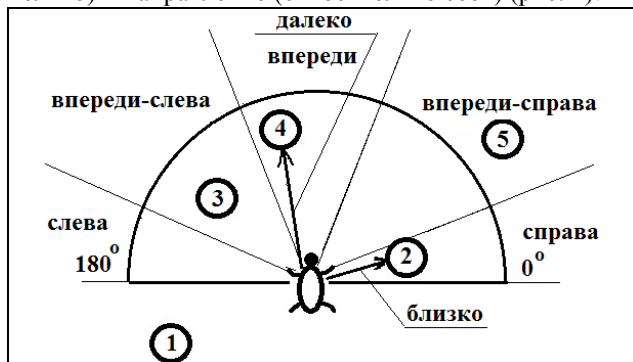


Рис. 1. Область видимости робота, определение направления и расстояния

При формировании пути ограниченность памяти робота не позволяет ему записывать каждый шаг, тем более что точное воспроизведение пути другим роботом также невозможно. Поэтому имеет смысл запоминать только моменты изменения обстановки: появление новых ориентиров, изменение направления на ориентиры и т.д. Это позволяет «упаковать» данные и затрачивать на их хранение меньше памяти.

Исходя из возможностей робота маршрут, представленный на рис. 2, можно описать так: «Сначала я увидел ориентир 2 (зеленый) впереди-справа далеко; потом ориентир 2 (зеленый) был справа не далеко/не близко и появился ориентир 3 (желтый) впереди-слева далеко; потом ориентир 2 (зеленый) был справа не далеко/не близко, ориентир 3 пропал из поля зрения, но появился ориентир 5 (красный) – впереди-слева далеко...» и т.д.

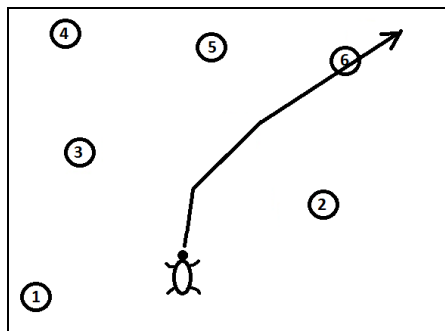


Рис. 2. Фрагмент маршрута робота

Таким образом, единицей описания точки в маршруте может служить тройка

$$p_n(C, Dir, Dist),$$

где n – номер шага, на котором робот видит объект с идентификатором C , расположенный относительно него по направлению Dir на расстоянии $Dist$. Причем на каждом шаге робот может видеть k точек ($k \geq 1$), поэтому шаг описывается множеством $S_n = \{p_n^1(C^1, Dir^1, Dist^1), \dots, p_n^k(C^k, Dir^k, Dist^k)\}$, а весь маршрут – множеством $P = \{S_n\}$.

Для определения относительного местоположения робота на плоскости значения имеют направление и расстояние. Роботы могут совершать только четыре элементарных действия: двигаться вперед и назад и совершать повороты направо и налево. На основе этих действий практически невозможно реализовать, например, сдвиг вправо или влево с приемлемой точностью. Поэтому мы отказались от учета расстояния и использовали для ориентации только направление.

Для работы с нечетким понятием «направление» были введены соответствующие лингвистические переменные, шкала пересчета направлений для области видимости в 180° приведена в Табл. 1.

Табл. 1. Шкала направлений

Значение в градусах	Лингвистическая переменная
0 – 22	Справа
23 – 67	Впереди справа
68 – 122	Впереди
123 – 167	Впереди слева
168 – 180	Слева

Теперь рассмотрим вопрос о том, как робот-последователь может повторить этот маршрут. Фактически, это определяется перечнем команд, которые подаются роботу для управления его перемещением по маршруту. Этот перечень состоит из высокоуровневых операций типа «обойти объект X слева» или «двигаться к объекту Y». Все операции были реализованы с помощью набора автоматов, каждый из которых реализует одну поведенческую процедуру.

Сопоставим реальный путь разведчика с записью этого пути, чтобы понять, как можно интерпретировать те или иные фрагменты маршрута. Возьмем для примера фрагмент описания маршрута в виде (номер шага, направление, цвет ориентира):

[1, впереди-справа, зеленый],
[2, впереди-справа, зеленый], [2, впереди-слева, желтый],
[3, слева, желтый], [3, справа, зеленый],
[4, впереди-справа, зеленый],
[5, впереди-слева, красный], [5, впереди-справа, зеленый],
[6, впереди-слева, красный], [6, справа, зеленый],
[7, слева, красный], [7, справа, зеленый], [7, впереди, синий],
[8, слева, красный], [8, впереди, синий],
[9, впереди, синий],...

Сам фрагмент маршрута приведен на рис. 2. Изучив реальный маршрут, соответствующий этому описанию, можно увидеть, что объект номер 2 («зеленый») робот обошел справа, объект номер 3 («желтый») – слева, объект номер 5 («красный») – справа, и движется по направлению к объекту номер 6 («синий»). Для сопоставления описания маршрута с самим маршрутом изменим форму записи (по ориентирам):

зеленый: [1, впереди-справа], [2, впереди-справа], [3, справа],
[4, впереди-справа], [5, впереди-справа], [6, справа], [7, справа];
желтый: [2, впереди-слева], [3, слева, желтый];
красный: [5, впереди-слева], [6, впереди-слева], [7, слева], [8, слева];
синий: [7, впереди], [8, впереди], [9, впереди]...

Для области видимости в 180° можно выделить 3 устойчивых шаблона:

- 1) Если сначала робот увидел ориентир справа / впереди-справа и на последнем шаге, когда ориентир был виден, он был справа, то робот обошел его слева.

- 2) Если сначала робот увидел ориентир слева / впереди-слева и на последнем шаге он был слева, то робот обошел его справа.
- 3) Если сначала робот увидел ориентир в произвольном направлении, и на последнем шаге он был впереди, то робот двигался к нему.

Еще два варианта, когда ориентир оказывался впереди-справа и впереди-слева, а потом пропадал из поля зрения робота, возникали при поворотах робота. Это позволило определить интерпретацию роботом-последователем маршрута (Табл. 2).

Табл. 2. Выбор действий в зависимости от направления на ориентир

Направление на ориентир <i>X</i>	Действие
Справа	Обойти объект <i>X</i> слева
Слева	Обойти объект <i>X</i> справа
Впереди	Двигаться к объекту <i>X</i>
Впереди слева	Повернуть направо
Впереди справа	Повернуть налево

Для такой интерпретации запись маршрута потребовалось изменить и хранить для каждого ориентира, который робот-разведчик видит на своем пути, только номер шага, цвет ориентира и последнее направление на него. Робот-последователь сортирует элементы описания маршрута в порядке, определяемом номером шага, на котором из поля зрения уходил очередной ориентир (ниже этот номер выделен полужирным шрифтом). После упаковки и сортировки ранее приведенное описание фрагмента маршрута примет следующий вид:

*[2, впереди-слева, желтый, **3**, слева],*
*[1, впереди-справа, зеленый, **7**, справа],*
*[5, впереди-слева, красный, **8**, слева],*
*[7, впереди, синий, **9**, впереди] ...*

Здесь указывается номер шага и направление, на котором ориентир появился, затем цвет (идентификатор ориентира), потом номер шага и направление, на котором ориентир был виден в последний раз.

По данной записи видно, что робот часто одновременно проходит между двумя и более ориентирами. Но нельзя одновременно запускать несколько управляющих автоматов, т.к. входящие от них команды могут противоречить друг другу. Поэтому при интерпретации маршрута робот на каждом шаге пытается найти среди видимых ему ориентиров текущий ориентир и следующий в маршруте. Если он видит следующий, то делает его текущим и выбирает действие относительно него (в соответствии с Табл. 2). Если же робот на текущем шаге не видит ни текущего, ни следующего за ним ориентира, он просматривает ориентиры дальше по маршруту, сравнивая их с тем, что видит. И, если находит в маршруте один из видимых ему ориентиров, делает его текущим, «срезая» таким образом путь.

3. Результаты экспериментов

Для подтверждения работоспособности предложенного метода было проведено имитационное моделирование с использованием системы многоагентного моделирования Kvorum, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» и работающей под управлением фреймворка ROS (Robot Operating System) [ROS]. Эксперименты проводились на упрощенной задаче фуражирования (без этапа возвращения робота-разведчика в точку отправления). Сначала робот-разведчик осуществлял случайное блуждание с целью найти объект заданного цвета на полигоне $n \times m$ клеток, по пути формируя описание маршрута. После достижения цели описание передавалось второму роботу, который повторял маршрут.

В разных сериях экспериментов полигон представлял собой ограниченную область или тороидальную поверхность с препятствиями или без них. Ориентиры располагались как регулярным, так и произвольным образом (рис. 3), но так, чтобы в каждой точке полигона существовал хотя бы один ориентир, «видимый» из этой точки (зона видимости – 20 клеток). Время моделирования – 1000 тактов. Как видно из рис. 3, робот-последователь может довольно точно повторять маршрут робота-разведчика (рис. 3,в), иногда «срезает» путь (рис. 3,а), а иногда сходит с маршрута, но потом возвращается на него (рис. 3,г).

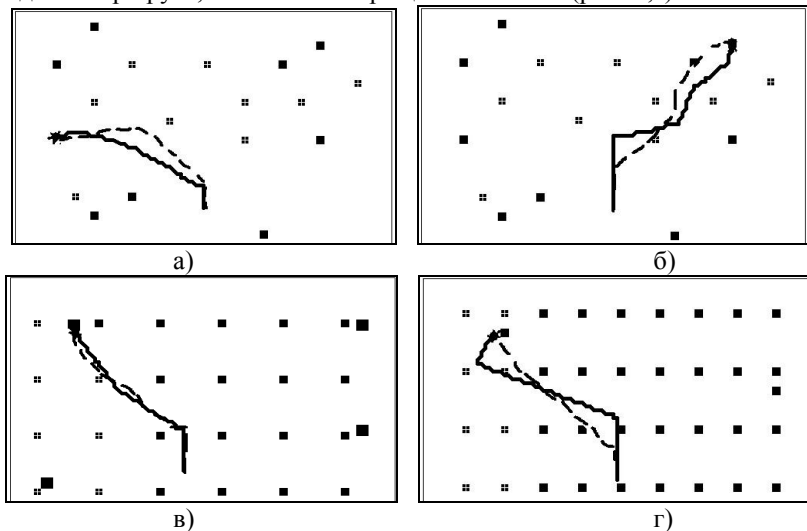


Рис. 3. Маршруты робота-разведчика (пунктир) и робота-последователя (сплошная линия) на полигонах с нерегулярными (а, б) и регулярными (в, г) ориентирами

В Табл. 3 приведена статистика результатов моделирования. В среднем приведенный путь на порядок короче исходного, но робот-последователь обычно добирается до цели за большее число шагов, чем робот-разведчик,

т.к. он иногда «теряется» и вынужден поворачиваться вокруг себя, чтобы снова увидеть нужный ориентир. Для пути средней длины (от 100 до 200 опорных точек) при нерегулярном размещении ориентиров можно видеть обратный эффект: робот-последователь часто «срезает» путь, поэтому делает меньше шагов, чем робот-разведчик.

Табл. 3. Результаты моделирования

Маршрут	Длина маршрута полная	Длина после "упаковки"	Количество шагов робота-разведчика	Количество шагов робота-последователя	Количество неудач, %
Полигон с нерегулярными ориентирами					
Короткий	76	9	102	120	8
Средний	140	15	204	182	11
Длинный	239	25	300	371	12
Полигон с регулярными ориентирами					
Короткий	82	10	176	199	13
Средний	150	17	279	398	14
Длинный	275	28	382	377	16

Неудачи в основном обусловлены тем, что робот-последователь, соблюдая только общее направление, слишком сильно отклоняется в сторону от маршрута робота-разведчика, и выходит из зоны видимости следующего ориентира. В дальнейшем планируется доработать алгоритм возвращения на маршрут, чтобы уменьшить процент неудач.

Заключение

Таким образом, для решения задачи нам потребовалось осуществить комплексирование информации, поступающей на датчики (сенсоры) робота. Полученная таким образом структура может быть соотнесена с информационной гранулой [Тарасов, 2013], которая лежит в основе построения обобщенного представления динамических пространственных отношений. В определенном смысле обладающий такими возможностями робот является когнитивным агентом, чья когнитивная функция обеспечивает процессы познания роботом внешнего мира.

В дальнейшем планируется применять разработанный метод в задачах фуражирования и рекогносцировки для ориентации реальных роботов.

Список литературы

- [Калуцкая и др., 2010] Калуцкая А.П., Тарасов В.Б. Моделирование взаимодействия робота с внешней средой на основе пространственных логик и распространения ограничений. / Программные продукты и системы, 2010, №2.
- [Карпов, 2012] Карпов В.Э. Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конф. в 4-х томах. Т.3. – Изд-во БГТУ, 2012. – 309 с.

- [Тарасов, 2013] Тарасов В.Б. Гранулярные структуры измерений в интеллектуальных средах: васильевские и белнаповские сенсоры и модели их взаимодействия / Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 5.
- [Baddeley et al., 2012] Baddeley, B., Graham, P., Husbards, P., Philippides, A. A model of ant route navigation driven by scene familiarity. / PLoS Computational Biology, Volume 8, Issue 1, January 2012, Article number e1002336.
- [Hoff et al., 2013] Hoff, N., Wood, R., Nagpal, R. Distributed colony-level algorithm switching for robot swarm foraging. In: Springer Distributed Autonomous Robotic Systems, 2013.
- [Kim et al., 2012] Kim, P., Kurabayashi, D. Efficient formation of pheromone potential field by filtering interaction / Journal of Robotics and Mechatronics, V.24, Iss.4 2012.
- [Lee et al., 2013] Lee, J.-H., Ahn, C.W., An, J., 2013. A honey bee swarm-inspired cooperation algorithm for foraging swarm robots: an empirical analysis. In: 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, Novotel, Wollongong, Australia.
- [Meng et al., 2012] Meng, Z., Zou, B., Zeng, Y. Considering direct interaction of artificial ant colony foraging simulation and animation / J. Exp. Theor. Artif. Intell., 24 (1) (2012).
- [Moller, 2006] Moller, R., Vardy, A. Local visual homing by matched-filter descent in image distances / (2006) Biological Cybernetics, 95 (5).
- [Muller et al., 1988] Muller M., Wehner R. Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*. / Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 85.
- [ROS] Robot Operating System. – <http://www.willowgarage.com/pages/software/ros-platform>
- [Wehner, 2009] Wehner R. The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae). Myrmecol News 12.
- [Zedadraa et al., 2016] Zedadraa O., Seridib H., Jouandeauc N., Fortinod G. A Cooperative Switching Algorithm for Multi-Agent Foraging / Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 50, April 2016.

ABOUT REPRESENTATION OF ROUTE FOR A ROBOT IN FORAGING

I.P. Karpova (karpova_ip@mail.ru)

National Research University Higher School of Economics,
MIPT, Moscow

In this paper a method of visually guided route description by the mobile robot is offered. A set of interpretation rules based on spatial relations which allow any robot to repeat this route is described. The route description bases on spatial relations. The simulation experiments carried out for foraging task.

Keywords: collective robotics, cognitive agent, spatial relations, granulation of information