

И. П. Карпова, канд. техн. наук, доц., [karпова\\_ip@mail.ru](mailto:karпова_ip@mail.ru),  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

## Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен

*Среди природоподобных технологий есть направление, в рамках которого исследуется применение навигационных механизмов насекомых для навигации автономных роботов. Данная работа относится к указанному направлению и посвящена использованию этого подхода для решения задач фуражирования и рекогносцировки. В качестве модельного вида взят муравей рода *Formica rufa* — рыжий лесной муравей, который активно использует коллективную фуражировку. Муравей-разведчик этого вида не только запоминает маршрут до пищи, но умеет передавать муравьям-фуражирам сведения о местонахождении пищи, и те самостоятельно, без сопровождающего, могут до нее дойти и вернуться домой. Рассматриваются основные аспекты навигационного механизма муравьев, которые используют для возвращения домой и повторного прохождения пути запомненные ранее визуальные ориентиры и врожденную систему интеграции пути. В основу предлагаемого метода положено запоминание пути по визуальным ориентирам и принципы нечеткого управления. Введена модель описания пути для анимата, состоящая из последовательности сцен. Создан алгоритм, имитирующий поисковое поведение муравья для анимата-разведчика. Разработан набор правил, которые позволяют анимату-последователю перейти от описания маршрута к действиям по его воспроизведению. В основе поведения последователя (фуражира) лежат те же принципы, что и у разведчика, только вместо запоминания сцен он использует процедуру распознавания и сопоставления сцен. Действия аниматов представлены в виде элементарных поведенческих процедур, каждая поведенческая процедура реализована с помощью конечного автомата. Приведены результаты имитационного моделирования для решения задачи фуражировки. Эксперименты проводились с помощью системы моделирования, основанной на фреймворке ROS. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и достаточно высокую эффективность предложенного метода. Метод не требует от робота больших вычислительных мощностей и развитых сенсорных возможностей и может также применяться в задачах рекогносцировки и патрулирования.*

**Ключевые слова:** автономный мобильный робот, нечеткое управление, навигация муравьев, распознавание сцен, пространственно-временная ориентация, задачи фуражировки и рекогносцировки

### Введение

В большинстве работ, посвященных применению навигационных механизмов насекомых в робототехнике, в качестве модельного вида используются пустынные муравьи. Возможно, это обусловлено тем, что их навигация изучена более подробно, чем для других видов. Можно считать установленным, что муравьи не строят карту местности [1], а для определения направления движения в основном используют солнечный свет (поляризацию освещенного неба) и визуальные ориентиры [2]. Отдельные виды муравьев используют также феромоновый след [3], но в данной работе эта возможность не рассматривается, так как требует специально оборудованного полигона.

Пустынные муравьи относятся к видам с одиночной фуражировкой. Нас же интересует не только поиск "еды" (или ресурсов в общем смысле) и возвращение особи домой (в гнездо),

но и возможность передачи сведений о маршруте от одной особи к другой — пассивному фуражиру. Пассивный фуражир не занимается поиском еды, но может быть мобилизован для переноса еды активным фуражиром — разведчиком. Единственным видом, у которого к настоящему времени обнаружен такой вариант фуражировки, является *Formica rufa* — рыжий лесной муравей [4]. Муравьи-разведчики этого вида периодически отправляются на поиски еды (их гонит голод). Найдя еду и вернувшись в гнездо, они могут повести пассивных фуражиров за собой к еде. Но возможен также и другой вариант, когда разведчик передает фуражиру сведения о маршруте до еды, и тот самостоятельно идет за ней. Это было исследовано и во время натуральных наблюдений [5], и в лабораторных опытах [6].

Очевидно, что для реализации подобного подхода предлагаемый метод должен позволять описывать маршрут в очень краткой форме.

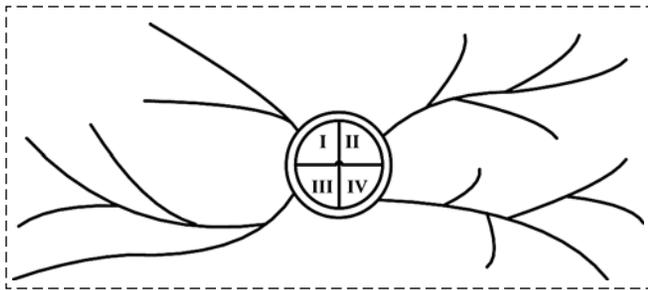


Рис. 1. Гнездо с четырьмя колоннами и дорогами  
Fig. 1. The nest with 4 columns and ways

В экспериментальных исследованиях [6, 7] было показано, что чем сложнее маршрут, тем больше времени требуется на его передачу от разведчика фуражиру и тем меньше вероятность успешного прохождения маршрута фуражиром. Маршрут в этих опытах задавался последовательностью поворотов в лабиринте. Последнее допущение не является абсолютно искусственным, так как в природе рыжие лесные муравьи перемещаются по так называемым *дорогам* (рис. 1) — протоптанным муравьями тропам с ветвистой структурой, и их маршрут может быть представлен как последовательность поворотов.

Конечно, имитируя природоподобные механизмы на робототехнических устройствах, мы могли бы отказаться от жестких ограничений по объему памяти и скорости передачи данных. Но чем дальше мы будем отходить от первоисточника, тем меньше у нас будет прав ссылаться на работы биологов и относить наш подход к природоподобным технологиям. Более того, в этом исследовании во время имитационного моделирования выяснилось, что исключение некоторых элементов механизма ориентации муравьев или применение более простых технических решений приводят к неустойчивой работе метода. И только в случае реализации, максимально близкой к тому, что наблюдается у муравьев, метод работает устойчиво даже в сложных условиях — при малом или, наоборот, очень большом числе ориентиров.

Опишем основные аспекты наблюдаемого поведения муравьев:

1. При перемещении на местности муравьи используют компас, включающий Солнце (точнее, поляризацию освещенного неба), шагомер и систему интеграции пути (СИП, path integration) [1, 8]. Это означает, что во время движения они постоянно обновляют свой вектор, который указывает фактическое направление обратно на муравейник (гнездо).

2. И компас, и шагомер подвержены кумулятивным ошибкам, поэтому для навигации муравьи также используют визуальные ориентиры (камни, отдельные растения и другие ориентиры, которые выделяются на местности). Более того, для опытных фуражиров информация, предоставляемая визуальными ориентирами, доминирует над информацией от системы интеграции пути в случае их конфликта [9, 10].

3. Муравьи ведут себя так, как если бы они делали двумерные виды ("снимки") сцен с ориентирами, видимыми с определенных точек обзора, сохраняли эти виды, а затем при повторном приближении к ориентиру сравнивали сохраненные снимки с текущими [11]. Судя по поведению муравья при запоминании сцены, он осматривает составляющие ее ориентиры, выбирает один (опорный), а затем обходит его справа или слева. Это предположение подтверждается тем, что при повторном прохождении этого маршрута муравей стремится обойти знакомый ориентир с той же стороны, даже если ориентир переместили левее или правее начального положения [12].

5. Вероятно, муравьи различают два типа ориентиров, которые можно назвать *локальными* и *путевыми*. Первые расположены вблизи гнезда и около постоянных кормовых участков, вторые — на пути к кормовому участку или обратно. Обнаружение путевого ориентира заставляет муравья поворачивать под нужным углом и продолжать движение. Также распознавание ориентира подавляет влияние локального вектора движения, заданного предыдущим ориентиром [1]. Обнаружение локального ориентира запускает процедуру систематического поиска: муравей знает, что гнездо (или еда) находятся рядом, и начинает методично кружить вокруг этого места, пока не найдет искомое.

6. При обнаружении во время прохождения маршрута искомого объекта ("еды") пассивный фуражир прекращает движение по маршруту и идет в сторону еды, чтобы взять ее и перенести в гнездо. Таким образом, маршрут может оказаться пройденным не до конца.

7. Правила, по которым муравей из множества ориентиров выбирает "опорный", в литературе не описаны. Но у рыжих лесных муравьев все поисковые участки около гнезда распределены между колоннами (кланами) этого гнезда (рис. 1, [13]), и муравей-разведчик в процессе поиска старается оставаться в пределах "своего" сектора, т. е. придерживается не-

коего общего направления поиска. Кроме того, резкие повороты в пути чаще приводят к неудачному поиску, что показано как для пустынных муравьев [14], так и для лесных [4]. Поэтому мы будем считать, что муравей выбирает ориентиры, расположенные прямо перед ним, а если их нет, выбирает ориентиры правее или левее. В отсутствие ориентиров он идет прямо. Очевидно, что правило выбора ориентира для конкретной технической системы можно поменять и выбирать, например, поочередно левый и правый объекты. Главное, чтобы последователь следовал бы тем же правилам и совершал аналогичные разведчику действия при поиске потерянного ориентира.

Многие исследователи в области автономных мобильных роботов (АМР) используют принципы навигации муравьев в качестве основы при разработке методов навигации и ориентации АМР. Например, в работе [1] предлагается модель памяти на основе искусственной нейронной сети, использующая СИП и визуальные ориентиры. Имитационное моделирование подтверждает, что подобная система позволяет искусственному агенту хорошо ориентироваться, и это поведение можно объяснить без предположения о существовании когнитивной карты как общего представления о кормовом пространстве.

Нас же интересуют в первую очередь те работы, в которых навигационный механизм муравьев используется для организации перемещения автономных роботов. Одной из первых в этой области можно считать работу [15]. Там авторы описывают робота, оснащенного компасом и СИП с использованием данных энкодеров. Специальный компас позволял роботу ориентироваться по поляризации солнечного света аналогично муравью, и робот мог вернуться в точку отправления после прохождения маршрута, состоящего из нескольких отрезков. Вообще задача произвольного перемещения по полигону с возможностью возвращения домой (homing) разработана достаточно подробно [16, 17]. Уделяется большое внимание и решению задачи организации памяти (представлению маршрута в памяти). Например, в работе [18] предложен механизм хранения маршрута в виде дерева, позволяющий не учитывать метрические размеры отрезков, а только топологию расположения ориентиров.

Способ представления маршрута в памяти робота и правила его интерпретации для

повторного прохождения по маршруту также описаны в работе [19]. К достоинствам предложенного там механизма можно отнести вычислительную простоту, к недостаткам — использование цвета ориентира как его идентификатора и необходимость из любой точки полигона видеть хотя бы один ориентир. Вследствие этого полигон должен быть оснащен ориентирами разных цветов, а робот должен уметь их все различать. Это само по себе является технически достаточно сложной задачей и требует использования высокоточных сенсоров, что ограничивает применение этого метода.

Цель данной работы — создать такой механизм запоминания и интерпретации описания маршрута, который позволит роботу ориентироваться на реальном полигоне в рамках решения задач фуражировки, рекогносцировки и т. д. Механизм должен быть вычислительно простым, описание маршрута должно занимать как можно меньше памяти, чтобы роботы могли обмениваться им между собой по низкоскоростным каналам связи. Он не должен требовать однозначной идентификации объектов (ориентиров) и должен работать в условиях, когда на полигоне есть точки, из которых ориентиры не видны.

Далее речь пойдет не о роботах, а об аниматах, так как объектом исследования является искусственный автономный агент, действующий в виртуальной или реальной среде и имитирующий поведение живого организма [20].

### Постановка задачи ориентации

Данная задача разбивается на три этапа: найти искомый объект, вернуться "домой" (в точку отправления) и при необходимости повторить этот путь. В процессе поиска пищи у муравьев рода *Формика* [5] разведчик запоминает свое положение относительно солнца, визуальные ориентиры, мимо которых он проходит, и примерное расстояние до них. Это позволяет ему вернуться обратно в гнездо и передавать фуражирам сведения о маршруте так, чтобы они могли дойти до этой пищи [21]. При этом нет необходимости повторять маршрут с высокой точностью, и описание маршрута определяет визуальный коридор, а не узкую дорогу [22].

Исходя из этого на полигоне, по которому перемещаются аниматы, расположен "дом", неподвижные объекты (ориентиры) и некото-

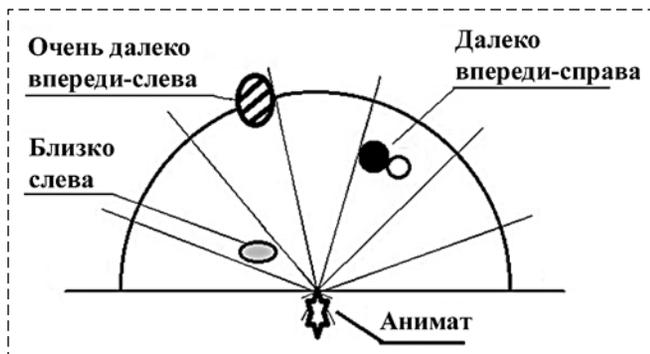


Рис. 2. Область видимости анимата, направление и расстояние  
Fig. 2. Animat's field of view, direction and distance

Таблица 1  
Table 1

Шкала расстояний  
The distance scale

Расстояние (усл. ед.)	Лингвистическая переменная	Обозначение
0...2	Очень близко	NEAR
3...5	Близко	CLOSE
6...10	Недалеко	NOTCLOSE
11...15	Далеко	FAR
16...20	Очень далеко	VERYFAR

рые целевые объекты ("пища", которую нужно перенести в "дом"). Путь — это последовательность перемещений, приводящая анимата от одного целевого объекта к другому, при этом в качестве целевых объектов могут выступать "дом" или "пища". Изначально аниматы находятся около "дома".

Анимат может двигаться вперед и назад, поворачивать направо и налево, останавливаться. У него есть локатор, с помощью которого он "видит" окружающие объекты (внутри области видимости, например, в 120° или 180°), распознает их цвет, размер и умеет определять расстояние до них (приблизительно) и направление (относительно себя) (рис. 2). В связи с этим естественным является подход, основанный на нечетком управлении.

Для работы с нечеткими понятиями "расстояние" и "направление" были введены соответствующие лингвистические переменные. Табл. 1 содержит шкалу пересчета расстояний для радиуса видимости 20 условных единиц ("клеток"), табл. 2 — шкалу пересчета направлений для области видимости в 120° (рис. 3). Естественно, конкретные диапазоны значений этих шкал могут быть заменены другими при необходимости, единственная неизменная величина — это число переменных (5).

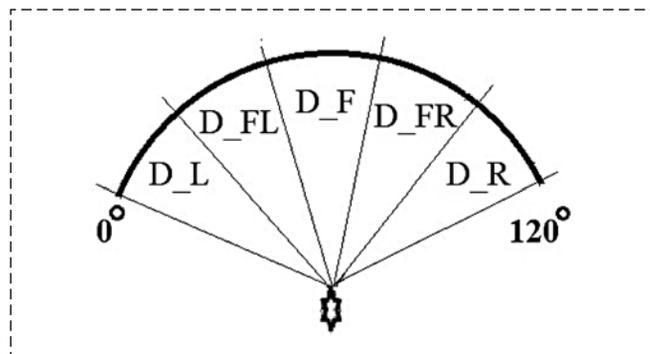


Рис. 3. Диапазоны направлений для области видимости 120°  
Fig. 3. Direction ranges for the field of view in 120°

Таблица 2  
Table 2

Шкала направлений  
The direction scale

Значение, °	Лингвистическая переменная	Обозначение
0...23	Слева	D_L
24...47	Впереди слева	D_FL
48...71	Впереди	D_F
72...95	Впереди справа	D_FR
96...119	Справа	D_R

Под *ориентиром* будем понимать один или несколько объектов, образующих компактную группу, т. е. расположенных близко друг к другу. Ориентир  $Q$  образуется объектами  $\{x_n\}$ , для которых:

$$Q = \{x_n\}: \exists i: |p_{x_i} - p_{x_{i+1}}| \leq \Delta, i \in [1, n-1], \quad (1)$$

где  $p_{x_i}$  и  $p_{x_j}$  — ближайшие друг к другу точки соседних объектов  $x_i$  и  $x_{i+1}$ , а  $\Delta$  — верхняя граница значения лингвистической переменной "очень близко".

Описание метода

Основной принцип формирования описания пути основывается на том, что муравей-разведчик запоминает путь приблизительно, и муравей-фуражир повторяет этот путь в общих чертах. Поэтому при формировании описания маршрута запоминаются сцены и ориентиры, которые анимат выбирает в качестве опорных, а также число тактов, которые ему требуются для того, чтобы обойти этот ориентир и выбрать следующий. Таким образом, в модель вводится понятие времени, которое привязано не столько к тактам (шагам анимата), сколько к изменению его состояния относительно

окружающей среды (завершение одного отрезка пути и переход к следующему). Это согласуется, в частности, с идеями, изложенными в работе [23], что подсчет заметных визуальных изменений является основным механизмом восприятия времени.

Анимату необходимо уметь отличать ориентиры друг от друга. Наличие ориентиров с одинаковым набором цветов делает невозможным использование цвета для их идентификации. Поэтому, естественно, необходимо решать более общую задачу по распознаванию сцены [24, 25]. Сцена образуется набором видимых ориентиров и отношений между ними. Идентификацию будем рассматривать не как задачу присвоения имен объектам (ориентирам), а как соотнесение наблюдаемых ориентиров с ориентирами, определенными во время предыдущего прохождения этим путем или на предыдущем ракурсе наблюдения [25]. При этом возникают проблемы с распознаванием ориентиров и сцен. Например, могут быть видны не все объекты, входящие в ориентир, при изменении ракурса одни объекты могут перекрывать другие и т. д.

Маршрут описывается как последовательность сцен  $S = \{s_j\}$ ,  $j = 1, \dots, L$ , где  $L$  — длина маршрута. Каждая сцена состоит из множества ориентиров  $V = \{v_{ij}\}$ , один из которых находится в фокусе внимания и является *опорным* (относительно него совершаются все действия). Каждый ориентир, в свою очередь, состоит из множества объектов  $p$ :

$$p = \{C, X, (ldir, ldist), (cdir, cdist), (rdir, rdist), Compas, Timer\},$$

где  $C$  — идентификатор объекта (например, цвет);  $X$  — признак опорного объекта;  $(ldir, ldist)$ ,  $(cdir, cdist)$ ,  $(rdir, rdist)$  — направление и расстояние до левой границы, центра объекта

и правой границы соответственно;  $Compas$  — значение датчика "компас";  $Timer$  — номера тактов в начале и в конце отрезка пути.

Основным элементом маршрута является ориентир, состоящий из одного или нескольких объектов. В общем случае распознавание объектов обычно подразумевает учет многих параметров, например, формы, цвета и узора, а также пространственных атрибутов (отношение линейных размеров, положение в пространстве [24]). В данном методе учитываются линейные размеры объектов, их цвет, близость объектов в соответствии с (1), положение объектов относительно друг друга (слева / справа) и направление на них по компасу.

Отношения "слева" и "справа" зависят от выбранного ракурса и могут меняться во время движения. В связи с этим используется подход на основе одной из разновидностей псевдофизической логики (ПФЛ) — пространственной логики. Примером применения ПФЛ для построения динамической модели окружающего мира служит работа [26], в которой начало системы координат связано с роботом, и введен набор правил определения отношений между объектами окружающей среды и роботом.

Аналогичным образом введем правила, прогнозирующие на основе логического вывода изменение положения объектов при выполнении аниматором элементарных действий. Табл. 3 содержит матрицу переходов с возможными изменениями направления на ориентир в зависимости от действий аниматора. Например, если ориентир был впереди, а аниматор поворачивает налево, то ориентир переместится в положение справа-впереди или останется впереди. D\_NOT означает уход ориентира из поля зрения (его отсутствие).

Общий алгоритм работы следующий:

1. Анимат-разведчик начинает путь от "дома". Если он не видит ни одного ориентира,

Таблица 3  
Table 3

Матрица переходов для правил ПФЛ  
The transition matrix for pseudo-physical logic rules

Положение ориентира	Назад	Налево	Вперед	Направо	Стоп
Отсутствует	D_NOT	D_NOT	D_NOT	D_NOT	D_NOT
Слева	D_FL	D_FL	D_NOT	D_NOT	D_L
Слева-впереди	D_F	D_F	D_L	D_L	D_FL
Впереди	D_F	D_FR	D_F	D_FL	D_F
Справа-впереди	D_F	D_R	D_R	D_F	D_FR
Справа	D_FR	D_NOT	D_NOT	D_FR	D_R

он идет вперед, пока не увидит хотя бы один ориентир.

2. Если в процессе перемещения анимат видит "пищу", он запоминает текущую сцену как элемент описания маршрута и идет к "пище".

3. Из видимых ориентиров он выбирает опорный ориентир, направление его обхода (слева или справа) и запоминает его как элемент описания маршрута.

4. Анимат совершает обход опорного ориентира.

5. Если после завершения обхода опорного ориентира он видит хотя бы один новый ориентир, он переходит к п. 3. Если не видит ни одного, совершает поворот до тех пор, пока не увидит подходящий ориентир. (Он поворачивает налево, если обходил ориентир слева, и направо в противном случае).

6. После нахождения пищи анимат возвращается домой, используя данные компаса, и передает описание маршрута второму анимату (фуражиру).

Фуражир действует по тому же алгоритму, но не ищет новый ориентир, а сопоставляет сцены из маршрута с тем, что видит вокруг себя. При успешном сопоставлении он обходит опорный ориентир и переходит к следующей сцене. При неудаче запускает процедуру поиска опорного ориентира в текущей или следующей сцене, аналогично муравью, потерявшему ориентир. К следующей сцене анимат переходит, если поиск в текущей сцене неудачен и истекла половина времени (числа тактов), которое анимат должен был провести на данном отрезке пути.

В качестве обоснования выбора именно половины длины отрезка как реперной точки использовались данные о поведении *Melophorus bagoti* (M. bagoti). В отсутствие знакомых ориентиров они прибегают к интеграции пути и начинают двигаться в сторону, где предположительно находится гнездо, осматривая окружающую местность. Но поиск M. bagoti начинается не там, где должно находиться гнездо, а примерно на полпути между местом расположения гнезда и источником пищи [27]. Предполагается, что муравьи при этом ищут знакомые визуальные сигналы вдоль маршрута, а не само гнездо.

При поиске фуражир соблюдает общее направление движения на текущем отрезке пути в соответствии с данными компаса. Механизм реализации компаса в данном случае несущественен. В реальных условиях это может быть как информация, полученная извне, так и не-

кий "внутренний" датчик, который имитирует компас насекомых [28]. Заметим, что в данной работе для имитации компаса использовалась информация от полигона.

При прохождении маршрута фуражир сопоставляет видимую сцену ( $S^v$ ) и сцену  $S_i$  из описания маршрута ( $i$  — номер сцены в описании). Сцены сравниваются как наборы ориентиров с учетом размеров, направлений и отношений между ними. Если сцены  $S^v$  и  $S_i$  признаются похожими, то анимат разворачивается к опорному ориентиру так, чтобы видеть его с того же ракурса, что и разведчик при первом проходе. Добившись таким образом максимального соответствия сцен, он запускает процедуру обхода опорного ориентира.

В связи с тем, что в процессе сопоставления сцен приходится учитывать множество параметров, в том числе, разные варианты несоответствия сцен  $S^v$  и  $S_i$ , была разработана система подсчета ранга, учитывающая *тройки ориентиров*: опорный ориентир и ориентиры слева и справа от опорного. Значение ранга, при котором сцены  $S^v$  и  $S_i$  признаются похожими, было определено экспертным путем и уточнено в процессе моделирования.

Управление поведением анимата осуществляется на основе конечных автоматов. Архитектура системы управления является трехуровневой. Такая архитектура позволяет относительно просто изменять поведение анимата без изменения его структуры, базовых возможностей и самой моделирующей программы. Мета-мета-автомат управляет переходами от одного поведения к другому в зависимости от состояния анимата (рис. 4).

Автоматы второго уровня (мета-автоматы) отвечают за реализацию поведения ("поиск

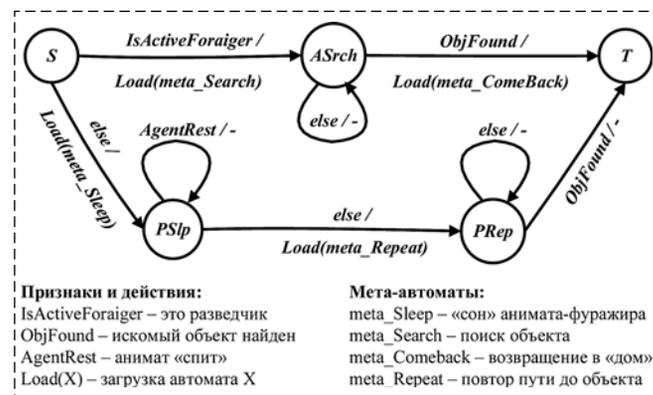


Рис. 4. Мета-мета-автомат "Фуражирование"

Fig. 4. Meta-meta-automat "Foraging"

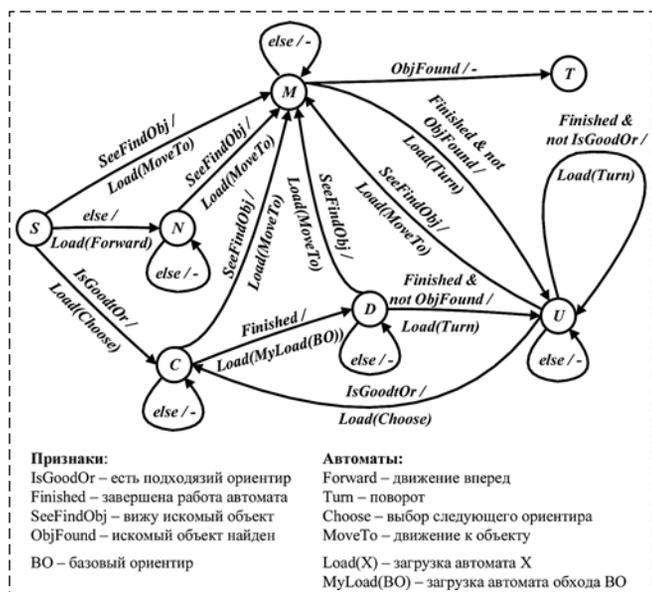


Рис. 5. Мета-автомат поиска "пищи" meta\_fsm\_Search  
 Fig. 5. Meta-meta-automat of food search meta\_fsm\_Search

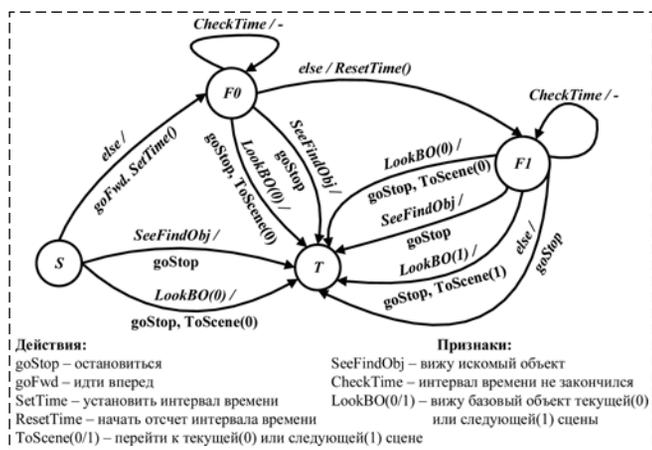


Рис. 6. Автомат поиска потерянного ориентира fsm\_FindBO  
 Fig. 6. Lost landmark search automat fsm\_FindBO

еды" (рис. 5), "повтор пути" и др.). Автоматы нижнего уровня отвечают за выполнение основных поведенческих процедур, например, "обойти ориентир X слева", "найти потерянный ориентир X" (рис. 6) и т. д.

### Результаты экспериментов

Моделирование проводилось на упрощенной задаче фуражировки: не рассматривался этап возвращения разведчика в "дом" (при наличии компаса этот процесс является довольно простым). В ходе эксперимента сначала аниматоразведчик перемещался по полигону в поисках объекта заданного цвета ("пищи"), не имея данных о его местоположении. После нахождения

объекта сформированный маршрут передавался фуражиру, который его повторял. Эксперименты проводились в системе многоагентного моделирования Kvoqum, созданной в НИЦ "Курчатовский институт" [29]. Полигон — область 100×100 клеток, время моделирования — 10000 тактов для каждого эксперимента.

Любой маршрут начинался от "дома" (круг на рис. 7), начальная ориентация аниматоров — произвольная. Ориентиры генерировались случайным образом и включали 1, 2 или 3 объекта, число цветов — 6, число ориентиров — 48, 60, 72 или 84. Целевой объект ("пища") — шестиугольник на рис. 7, число целевых объектов — 5. Линии от "дома" к "пище" — это визуализация путей разведчика и фуражира. Иногда они идут параллельными путями (рис. 7, а), но часто эти пути почти сливаются в одну линию (рис. 7, б, в).

Табл. 4 содержит статистику по экспериментам. В зависимости от числа тактов моделирования  $T$ , которые потребовались для прохождения маршрута, данные разделены на три примерно равные части: короткие (до 1000 тактов), средние (от 1000 до 2000) и длинные (более 2000 тактов). На всех маршрутах наблюдается незначительное увеличение времени (примерно на 100...200 тактов), которое требуется последователю для прохождения маршрута. Это обусловлено необходимостью разворотов для более точного сопоставления сцен. В среднем примерно в 50 % случаев неудач последователь находил другой искомый объект раньше, чем проходил весь маршрут, и поэтому уходил с него: эти эксперименты являются *относительно* неудачными (данные выделены полужирным шрифтом).

Значение  $E_{cp}$  показывает, какой процент пути последователь прошел по маршруту, прежде чем сбиться с него. Для коротких маршрутов  $E_{cp}$  равен 100 %, и это соответствует одной из двух ситуаций: (1) в начальной позиции аниматоры располагались так, что каждый из них видел свой искомый объект, и они сразу шли каждый к своему объекту; (2) идя параллельными путями, разведчик и фуражир на последнем отрезке видели разные целевые объекты, расположенные близко друг к другу, и шли каждый к своему объекту.

На рис. 8 приведены некоторые зависимости:  $M$  — это объем памяти (число объектов), которые запоминает аниматор в процессе поиска;  $N_e$  — число объектов в одном ориентире (1, 2 или 3). Естественно, объем памяти почти линейно зависит от числа объектов, входящих в ориен-

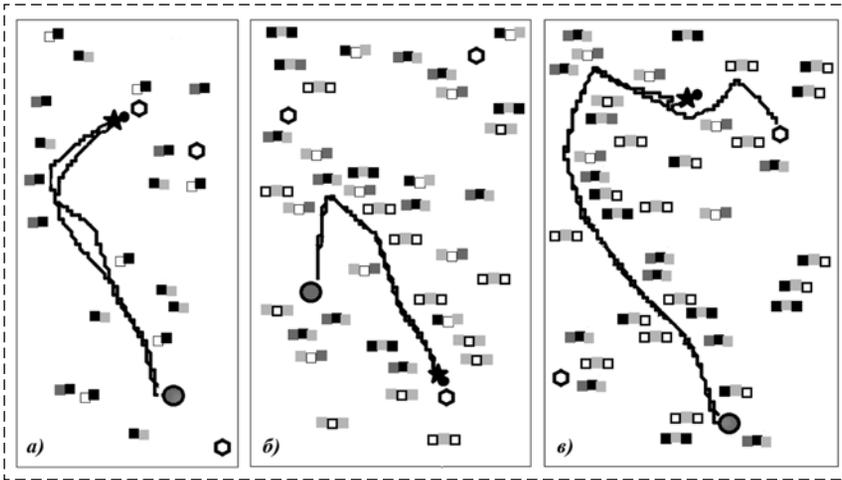


Рис. 7. Примеры маршрутов:

*a* — маршрут средней длины без резких поворотов; *b* — маршрут средней длины с резким поворотом; *c* — длинный маршрут (последовательно не хватило времени для прохождения маршрута целиком)

Fig. 7. Route examples:

*a* — the middle route without sharp turns; *b* — the middle route with sharp turn; *c* — the long route (the forager did not have enough time to complete the route)

Таблица 4  
Table 4

Результаты моделирования  
Simulation experiments results

Маршруты	$T$ — среднее число тактов для разведчика/фуражира	Число неудач, % абс./отн.	Причины неудач			$E_{cp}$ , %
			Нашел другой объект ближе/дальше	Не нашел ничего	Не хватило времени	
Короткие	581/783	2,6/1,4	5/4	—	—	100
Средние	1420/1599	16,3/9,4	14/19	7	—	70
Длинные	2649/2801	27,8/12,7	24/20	9	13	43

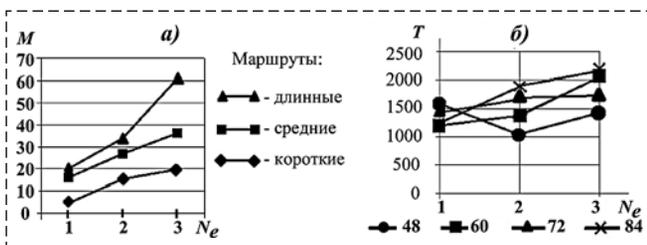


Рис. 8. Зависимости:

*a* — объема памяти  $M$  от длины маршрута  $T$  и числа объектов  $N_e$  в ориентире (1, 2, 3); *b* — средней длины маршрута  $T$  от числа ориентиров на полигоне (48, 60, 72, 84) и числа объектов  $N_e$  в ориентире (1, 2, 3)

Fig. 8. Dependencies:

*a* — memory size  $M$  on the route length  $T$  and the number of objects  $N_e$  in the landmark (1, 2, or 3); *b* — average route length  $T$  on the number of landmarks on the polygon (48, 60, 72, or 84) and the number of objects  $N_e$  in the landmark (1, 2, or 3)

тир (рис. 8, *a*), и растет при увеличении длины маршрута. Среднее время  $T$  (точнее, среднее число тактов) растет при увеличении числа ориентиров на полигоне (рис. 8, *b*): это объясняет

ся тем, что анимат тратит время на обход ориентиров. Также время поиска растет при увеличении числа объектов в ориентире: это объясняется тем, что ориентиры перекрывают искомые объекты. Исключением является ситуация с малым числом ориентиров (48): здесь отсутствие видимых ориентиров заставляет анимата часто поворачивать в поисках ориентира, что также увеличивает время поиска.

Было бы интересно провести сравнение эффективности навигации у полученного анимата и у модельного вида *Formica rufa*, но здесь возникают некоторые проблемы. В натуральных наблюдениях подобная статистика не подсчитывается, так как это чрезвычайно трудоемкий процесс. Муравьи-разведчики чаще ведут фуражиров за собой, чем передают им сведения о местоположении пищи. В естественных условиях сложной задачей является выделение таких актов и наблюдение за фуражиром, который отправился на поиски пищи после контакта с разведчиком: это единичные наблюдения, а сравнивать показатели можно только при наличии статистически достоверных данных. Если же говорить о лабораторных опытах, то

условия их проведения отличаются от тех, которые есть в природе и которые моделировались в данной работе. Здесь — свободный поиск, в лабораторных опытах с муравьями — набор дорожек, образующих структуру типа "дерево", с возможностью перемещаться только по дорожкам. Поэтому сравнивать результаты по эффективности навигации было бы некорректно.

Но можно сопоставить продолжительность пути анимата и муравья-разведчика по числу ориентиров (развилка пути). В работе [7] число развилки варьировалось от двух до шести. При этом утверждается, что эффективность подобного вида фуражировки у самих муравьев очень невелика. В случае двух развилки все активные разведчики и их группы (до 15 на колонию) были успешными, тогда как в случае шести развилки только один или два справились с задачей. В то же время результаты моделирования показали, что при числе

ориентиров от 1 до 3 успешность поиска у анимата составляет в среднем 91 %, при 4...6 ориентирах — 75 %, при 7...9 ориентирах — 60 %, т. е. предложенный метод с этой точки зрения является более эффективным, чем ориентация муравьев в лабораторных условиях.

### Заключение

В данном исследовании разработан и реализован механизм, имитирующий поведение муравья, которое он демонстрирует в ходе фуражировки или разведки, и показано, что это можно сделать достаточно ограниченными средствами. Он не требует однозначной идентификации визуальных ориентиров и работает как в условиях перегруженности полигона ориентирами, так и при малом их числе, когда на полигоне есть области, из которых ориентиры не видны.

Для решения задачи рекогносцировки необходимо изменить условие достижения цели: вместо условия "нашел пищу" ввести, например, ограничение на пройденное расстояние или условие "достижение точки, из которой не видны ориентиры". В дальнейшем планируется перенести этот механизм на группу реальных роботов в рамках решения задач фуражировки, патрулирования территории и рекогносцировки.

### Список литературы

1. **Cruse H., Wehner R.** No need for a cognitive map: Decentralized memory for insect navigation // *PLoS Comput. Biol.* 2011. Vol. 7, N. 3.
2. **Sun X., Yue S., Mangan M.** A decentralised neural model explaining optimal integration of navigational strategies in insects // *Elife.* 2020. Vol. 9, N. 7. P.1–30.
3. **Wilson E. O.** Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima*. 1. The organization of mass foraging // *Anim. Behav.* 1962. Vol. 10. P. 134–147.
4. **Reznikova Z.** Spatial cognition in the context of foraging styles and information transfer in ants // *Anim. Cogn.* 2020. Vol. 23, N. 6. P. 1143–1159.
5. **Длусский Г. М.** Муравьи рода *Формика*. М.: Наука, 1967. 236 с.
6. **Ryabko B., Reznikova Z.** The Use of Ideas of Information Theory for Studying "Language" and Intelligence in Ants // *Entropy.* 2009. N. 11. P. 839–853.
7. **Reznikova Z.** Experimental paradigms for studying cognition and communication in ants (Hymenoptera: Formicidae) // *Myrmecological News.* 2008. Vol. 11. P. 201–214.
8. **Müller M., Wehner R.** Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis* // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 1988. Vol. 85, N. July. P. 5287–5290.
9. **Narendra A.** Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* II. Interaction of the path integrator with visual cue information // *J. Exp. Biol.* 2007. Vol. 210, N. 10. P. 1804–1812.

10. **Wystrach A., Graham P.** What can we learn from studies of insect navigation? // *Anim. Behav.* 2012. Vol. 84, N.1. P. 13–20.

11. **Wehner R.** The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae) // *Myrmecol News.* 2009. N. 12. P. 85–96.

12. **Wystrach A., Schwarz S., Schultheiss P., Beugnon G., Cheng K.** Views, landmarks, and routes: How do desert ants negotiate an obstacle course? // *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.* 2011. Vol. 197, N. 2. P. 167–179.

13. **Захаров А. А.** Муравей. Семья. Колония. М.: Фитон XXI, 2018. 192 с.

14. **Collet M., Collett T. S.** The learning and maintenance of local vectors in desert ant navigation // *J. Exp. Biol.* 2009. Vol. 212. P. 895–900.

15. **Lambrinos D., Möller R., Labhart T., Pfeifer R., Wehner R.** A mobile robot employing insect strategies for navigation // *Rob. Auton. Syst.* 2000. Vol. 30, N. 1. P. 39–64.

16. **Vardy A.** Long-range visual homing // 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2006. P. 220–226.

17. **Yu S. E., Kim D.** Image-based homing navigation with landmark arrangement matching // *Inf. Sci. (Ny).* 2011. Vol. 181, N. 16. P. 3427–3442.

18. **Stelzer A., Mair E., Suppa M.** Trail-Map: A scalable landmark data structure for biologically inspired range-free navigation // 2014 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics. IEEE ROBIO 2014. P. 2138–2145.

19. **Карпова И. П.** К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2017. Т. 18, № 2. С. 81–89.

20. **Wilson S. W.** Classifier Systems and the Animat Problem // *Mach. Learn.* 1987. Vol. 2, N. 3. P. 199–228.

21. **Захаров А. А.** и др. Мониторинг муравьев *Формика*. М.: КМК, 2013. 99 с.

22. **Baddeley B., Graham P., Husband P., Philippides A.** A model of ant route navigation driven by scene familiarity // *PLoS Comput. Biol.* 2012. Vol. 8, N. 1.

23. **Roseboom W., Fountas Z., Nikiforou K., Bhowmik D., Shanahan M., Seth A. K.** Activity in perceptual classification networks as a basis for human subjective time perception // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10, N. 1. P. 1–10.

24. **Московский А. Д.** Система навигации автономного мобильного робота на основе метода реконструкции сцен. / II Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта" (БТС-ИИ-2015). 2015. С. 66–73.

25. **Карпов В. Э.** Об одном механизме реконструкции схем // VI Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Сб. науч. трудов в 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2011. С. 407–415.

26. **Карпов В. Э.** Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16–20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции. 2012. Т. 3. С. 275–283.

27. **Narendra A.** Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* I. Proportional path-integration takes the ant half-way home // *J. Exp. Biol.* 2007. Vol. 210, N. 10. P. 1798–1803.

28. **Dupeyroux J., Viollet S., Serres J. R.** An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation // *Rob. Auton. Syst.* 2019. Vol. 117. P. 40–56.

29. **Карпов В. Э., Ровбо М. А., Овсянникова Е. Е.** Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 3. С. 581–590.

# Animate Orientation Based on Visual Landmarks and Scene Recognition

I. P. Karpova, karpova\_ip@mail.ru,

National Research University, Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation

Corresponding author: I. P. Karpova, Cand. Tech., Associate Professor, National Research University, Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation, karpova\_ip@mail.ru,

Accepted on July 12, 2021

## Abstract

A biologically-inspired approach to robot route following is presented. The ant of the genus *Formica rufa* (a red forest ant) is used as a model species. These ants actively use collective foraging, unlike many other ant species. The scout ant remembers the route to food and can transmit information about the food location to foraging ants. Foragers can independently reach this place using this data and return home. The basis of the proposed method is the memorization the way by visual landmarks and fuzzy control. The animate path description model consists of a sequence of scenes and includes compass to account for the direction. The behavior of the animate-scout is implemented using an algorithm that simulates the foraging behavior of ants. The animate-forager performs actions to reproduce the route, applying the developed set of rules. The forager behavior is based on the same principles as that of a scout. But the scout remembers the scenes, and the forager recognizes and compares the visible scene and the scene from the route description. The actions of animates are presented in the form of elementary behavioral procedures. Each behavioral procedure is implemented using a finite state machine. The experiments for solving the foraging problem were carried out using a modeling system based on the ROS framework. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed method. The method does not require large computing power and advanced sensory capabilities from the robot. It can also be used in reconnaissance and patrol tasks.

**Keywords:** autonomous mobile robot, fuzzy control, ant navigation, scene recognition, space-time orientation, foraging and reconnaissance tasks

For citation:

Karpova I. P. Animate Orientation Based on Visual Landmarks and Scene Recognition, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 537–546.

DOI: 10.17587/mau.22.537-546

## References

1. Cruse H., Wehner R. No need for a cognitive map: Decentralized memory for insect navigation, *PLoS Comput. Biol.*, 2011, vol. 7, no. 3.
2. Sun X., Yue S., Mangan M. A decentralised neural model explaining optimal integration of navigational strategies in insects, *Elife*, 2020, vol.9, no.7, pp. 1–30.
3. Wilson E. O. Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima*. 1. The organization of mass foraging, *Anim. Behav.* 1962, vol. 10, pp. 134–147.
4. Reznikova Z. Spatial cognition in the context of foraging styles and information transfer in ants, *Anim. Cogn.*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 1143–1159.
5. Dlusskiy G. M. Family Formicidae ants, Moscow, Nauka, 1967, 236 p. (in Russian).
6. Ryabko B., Reznikova Z. The Use of Ideas of Information Theory for Studying "Language" and Intelligence in Ants, *Entropy*, 2009, no. 11, pp. 839–853.
7. Reznikova Z. Experimental paradigms for studying cognition and communication in ants (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecological News*, 2008, vol. 11, pp. 201–214.
8. Müller M., Wehner R. Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1988, pp. 5287–5290.
9. Narendra A. Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* II. Interaction of the path integrator with visual cue information, *J. Exp. Biol.*, 2007, vol. 210, no. 10, pp. 1804–1812.
10. Wystrach A., Graham P. What can we learn from studies of insect navigation? // *Anim. Behav.* 2012, vol. 84, no. 1, pp. 13–20.
11. Wehner R. The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecol News*, 2009, no. 12, pp. 85–96.
12. Wystrach A. et al. Views, landmarks, and routes: How do desert ants negotiate an obstacle course? *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.*, 2011, vol. 197, no. 2, pp. 167–179.
13. Zaxarov A. A. Ant, family, colony, Moscow, Fiton XXI, 2018, 192 p. (in Russian).
14. Collet M., Collett T. S. The learning and maintenance of local vectors in desert ant navigation, *J. Exp. Biol.*, 2009, vol. 212, pp. 895–900.
15. Lambrinos D. et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation, *Rob. Auton. Syst.*, 2000, vol. 30, no. 1, pp. 39–64.
16. Vardy A. Long-range visual homing, *2006 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBOT 2006*, pp. 220–226.
17. Yu S. E., Kim D. Image-based homing navigation with landmark arrangement matching, *Inf. Sci. (Ny)*, 2011, vol. 181, no. 16, pp. 3427–3442.
18. Stelzer A., Mair E., Suppa M. Trail-Map: A scalable landmark data structure for biologically inspired range-free navigation, *2014 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE ROBOT 2014*, pp. 2138–2145.
19. Karpova I. P. On the question of representing the route of a mobile robot based on visual landmarks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 81–89 (in Russian).
20. Wilson S. W. Classifier Systems and the Animat Problem, *Mach. Learn.* 1987, vol. 2, no. 3, pp. 199–228.
21. Zaxarov A. A. et al. Monitoring of Formika ants, Moscow, KMK, 2013, 99 p. (in Russian).
22. Baddeley B. et al. A model of ant route navigation driven by scene familiarity, *PLoS Comput. Biol.*, 2012, vol. 8, no. 1.
23. Roseboom W. et al. Activity in perceptual classification networks as a basis for human subjective time perception, *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1–10.
24. Moskovskij A. D. Navigation system of an autonomous mobile robot based on the method of scene reconstruction, *II All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence" (BTS-AI-2015)*, Saint Petersburg, Politehnika-servis, 2015, pp. 66–73 (in Russian).
25. Karpov V. E. About one mechanism of scheme reconstruction, *Proceedings of the VI International Scientific and practical Conference "Integrated models and soft computing in artificial intelligence"*, Moscow, Fizmatlit, 2011, vol. 1, pp. 407–415 (in Russian).
26. Karpov V. E. Private mechanisms of leadership and consciousness in a swarm robotics, *Proceedings of the XIII National Conference on artificial intelligence with the international participation (CAI-2012)*, Publishing house of BGTU, 2012, pp. 275–283 (in Russian).
27. Narendra A. Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* I. Proportional path-integration takes the ant half-way home, *J. Exp. Biol.*, 2007, vol. 210, no. 10, pp. 1798–1803.
28. Dupeyroux J., Viollet S., Serres J. R. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation, *Rob. Auton. Syst.*, 2019, vol. 117, pp. 40–56.
29. Karpov V. E., Rovbo M. A., Ovsyannikova E. E. A system for modeling the behavior of groups of robotic agents with elements of a social organization Quorum, *Programmye produkty i sistemy*, 2018, vol. 31, no. 3, pp. 581–590 (in Russian).