

УДК 681.5+004.8

НАВИГАЦИЯ АНИМАТА НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ И РАСПОЗНАВАНИЯ СЦЕН

И.П. Карпова (*karpova_ip@mail.ru*)
НИУ ВШЭ, Москва

В работе предложен метод использования визуальных ориентиров для запоминания пройденного пути мобильным роботом (аниматом), основанный на механизме навигации муравьев. Описывается модель представления маршрута и правила ее интерпретации, позволяющие другому роботу повторить маршрут, пройденный роботом-разведчиком. Приведены результаты экспериментов по имитационному моделированию, показывающие возможность применения разработанного метода для решения задач фуражировки и рекогносцировки.

Ключевые слова: автономный мобильный робот, навигация муравьев, пространственно-временная ориентация, задачи фуражировки и рекогносцировки

Введение

В работах, посвященных применению навигационных механизмов насекомых в робототехнике, в качестве модельного вида обычно используются пустынные муравьи. Установлено, что для определения направления движения эти муравьи используют солнечный свет (поляризацию освещенного неба) и визуальные ориентиры [Sun et al., 2020]. Но пустынные муравьи относятся к видам с одиночной фуражировкой. Нас же интересует не только поиск "еды" (или ресурсов в общем смысле) и возвращение особи-разведчика домой (в гнездо), но и возможность передачи сведений о маршруте от разведчика пассивному фуражиру. Пассивный фуражир не занимается поиском еды, но может быть мобилизован для переноса еды активным фуражиром – разведчиком.

Такой вариант фуражировки обнаружен у вида *Formica rufa* – рыжего лесного муравья [Reznikova, 2020]. Муравьи-разведчики этого вида периодически отправляются на поиски еды (их гонит голод). Найдя еду и вернувшись в гнездо, они могут передать пассивным фуражирам сведения о маршруте до еды, и тот самостоятельно идет за ней (лабораторные опыты – [Ryabko et al., 2009], натурные наблюдения – [Длусский, 1967]).

Очевидно, что для реализации подобного подхода предлагаемый метод должен позволять описывать маршрут в очень краткой форме. В экспериментальных исследованиях [Ryabko et al., 2009], [Reznikova, 2008] было показано, что, чем сложнее маршрут, тем больше времени требуется на его передачу от одной особи к другой и тем меньше вероятность успешного прохождения маршрута пассивным фуражиром.

Опишем основные аспекты наблюдаемого поведения муравьев:

1. При перемещении на местности муравьи используют компас, включающий поляризацию освещенного неба, шагомер и механизм интеграции пути (path integration) [Müller et al., 1988], [Cruse et al., 2011]. Т.е. во время движения они постоянно обновляют свой вектор, который указывает их фактическое направление обратно на дом (гнездо).

2. Использование компаса и шагомера подвержено кумулятивным ошибкам, поэтому муравьи также используют визуальные ориентиры. Для опытных фуражиров информация, предоставляемая визуальными сценами, доминирует над информацией, предоставляемой системой интеграции пути, в случаях конфликта [Baddeley et al., 2012].

3. Муравьи ведут себя так, как если бы они делали двумерные виды («моментальные снимки») сцен с ориентирами, которые видны с определенных точек обзора, сохраняли эти виды, а затем при повторном приближении к ориентиру сравнивали сохраненные снимки с текущей сценой [Wehner, 2009]. Судя по поведению муравья при запоминании сцены, он осматривает составляющие ее ориентиры, выбирает один (опорный), а затем обходит его справа или слева.

4. Если при движении по маршруту пассивный фуражир обнаружит искомый объект ("пищу"), то он прекращает движение по маршруту и идет к этому объекту, чтобы взять его и перенести в гнездо. Таким образом, маршрут может оказаться пройденным не до конца.

5. Правила, по которым муравей из множества ориентиров выбирает "опорный", в литературе в явном виде не описаны. Но у рыжих лесных муравьев все поисковые участки около гнезда распределены между колоннами (кланами) этого гнезда, и муравей-разведчик в процессе поиска старается оставаться в пределах "своего" сектора, т.е. придерживается определенного направления поиска. Кроме того, резкие повороты чаще приводят к неудачному поиску, что показано как для пустынных муравьев [Collet et al., 2009], так и для лесных [Reznikova, 2020]. Поэтому мы будем считать, что муравей выбирает ориентиры, расположенные прямо перед ним, и только если их нет, выбирает ориентиры правее или левее.

Многие исследователи в области автономных мобильных роботов (АМР) используют принципы навигации муравьев в качестве основы при разработке методов навигации и ориентации АМР. Одной из первых работ в этой области можно считать [Lambrinos et al., 2000]. Авторы описывают

робота, оснащенного компасом и системой интеграции пути с использованием данных энкодеров. Компас позволял этому роботу ориентироваться по поляризации солнечного света, аналогично муравью. Благодаря компасу и системе интеграции пути 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 ([Vardy, 2006], [Yu et al., 2011] и др.).

Уделяется большое внимание и решению задачи организации памяти (или представлению маршрута в памяти). В [Stelzer et al., 2014] описан механизм хранения маршрута в виде дерева, позволяющий не учитывать метрические размеры отрезков, а только топологию расположения ориентиров. Но в рассмотренных работах не предполагается передача сведений о маршруте другим роботам для его повторного прохождения. Аналогичная задача описана в [Карпова, 2017], но предлагаемое там решение имеет существенные ограничения (в частности, все объекты должны иметь уникальные идентификаторы).

Цель данного исследования – создать такой метод запоминания и интерпретации описания маршрута, который позволит роботу ориентироваться на реальном полигоне в рамках решения навигационных задач. Механизм должен быть вычислительно простым; описание маршрута должно занимать как можно меньше памяти, чтобы роботы могли обмениваться им между собою по низкоскоростным каналам связи. Метод не должен требовать однозначной идентификации визуальных ориентиров и должен работать в условиях, когда на полигоне есть точки, из которых ориентиры не видны.

В дальнейшем речь пойдет не о роботах, а об аниматах, т.к. объектом исследования является искусственный автономный агент, действующий в виртуальной или реальной среде и имитирующий поведение живого организма [Wilson, 1987].

1. Постановка задачи ориентации

Данная задача разбивается на несколько этапов. Сначала муравей-разведчик рода Формика ищет некий ресурс («пищу»), и по ходу движения запоминает свое положение относительно солнца и двумерные виды («моментальные снимки») сцен с ориентирами. Система интеграции пути позволяет ему вернуться обратно в муравейник и передать пассивным фуражирам сведения о маршруте так, чтобы они могли дойти до этой пищи сами, без сопровождения [Захаров и др., 2013].

На полигоне, по которому перемещаются аниматы, расположен «дом», неподвижные объекты – ориентиры – и некоторые целевые объекты («пища»). Изначально аниматы находятся около «дома», который они

умеют отличать от всех других объектов, например, по цвету и размеру или форме. Путь – это последовательность перемещений, приводящая анимата от одного целевого объекта к другому, при этом в качестве целевых объектов могут выступать «дом» или «пицца».

Анимат может двигаться вперед и назад, поворачивать направо и налево, останавливаться. У него есть компас, который определяет его направление относительно полигона, и 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. 1). В связи с этим естественным является подход, основанный на нечетком управлении. Для работы с нечеткими понятиями «расстояние» и «направление» были введены соответствующие лингвистические переменные (ЛП) «близко», «далеко», «слева-впереди» и т.д.

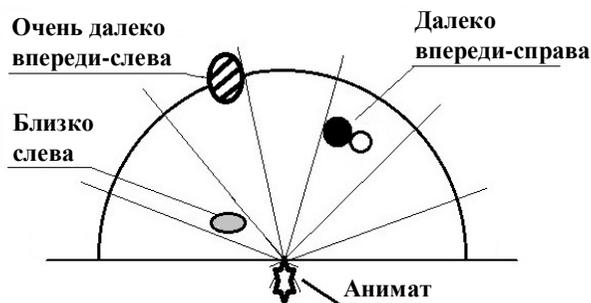


Рис. 1. Область видимости анимата, направление и расстояние

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

$$Q = \{O_n\}: \exists i: |p_{O_i} - p_{O_{i+1}}| \leq \Delta, i \in [1, n - 1] \quad (1.1)$$

где p_{O_i} и p_{O_j} – ближайшие друг к другу точки соседних объектов O_i и O_{i+1} , а Δ – верхняя граница значения ЛП «очень близко».

2. 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 [Baddeley et al., 2012]. Поэтому при формировании описания маршрута запоминаются сцены с ориентирами, которые анимат выбирает в качестве опорных, и количество тактов, которые ему требуются для того, чтобы обойти этот ориентир и приступить к выбору следующего. 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 [Roseboom et al., 2019], что подсчет заметных визуальных изменений является основным механизмом восприятия времени.

Объекты и ориентир в целом имеют атрибуты, которые делятся на постоянные и переменные. К постоянным атрибутам можно отнести форму объектов, их линейные размеры, цвет, расстояние между объектами. Переменными являются положение объектов друг относительно друга с точки зрения анимата, расстояние от анимата до объекта и направление на него по компасу.

Для использования визуальных ориентиров в качестве своеобразных «маяков» при прохождении маршрута анимату необходимо уметь их отличать друг от друга. Наличие ориентиров с одинаковым набором постоянных атрибутов делает невозможным использование набора этих атрибутов для их идентификации, поэтому решается более общая задача по сопоставлению сцен. Сцена образуется набором видимых ориентиров и отношений между ними. При этом возникает ряд проблем с распознаванием как сцен, так и ориентиров. 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 $\Omega = \{S_j\}, j=1, \dots, L_p$, где L_p – длина маршрута. Каждая сцена состоит из множества ориентиров, один из которых находится в *фокусе внимания* и является опорным (относительно него совершаются все действия). Каждый ориентир, в свою очередь, состоит из множества объектов $V: V = \{Id, X, \{(dir_i, dist_i)\}, Compas, Timer\}$, где Id – идентификатор объекта (например, цвет); X – признак опорного ориентира; $\{(dir_i, dist_i)\}$ – множество пар, хранящих 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.

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. Она включает, в частности, нечеткие бинарные пространственные отношения для направлений и отношения для взаимного расположения объектов [Калуцкая и др., 2010].

По аналогии с [Карпов, 2012] введем правила, прогнозирующие на основе логического вывода изменение положения объектов при выполнении аниматом элементарных действий. Табл. 1 содержит матрицу переходов, которая определяет возможные изменения направления на

ориентир в зависимости от действий анимата. Например, если ориентир был слева-впереди, а анимат поворачивает налево, то ориентир останется слева-впереди или переместится в положение впереди.

Табл. 1. Матрица переходов для правил ПФЛ

	Назад	Налево	Вперед	Направо
Слева (D_L)	D_FL	D_FL	D_NOT	D_NOT
Слева-впереди (D_FL)	D_F	D_F	D_L	D_L
Впереди (D_F)	D_F	D_FR	D_F	D_FL
Справа-впереди (D_FR)	D_F	D_R	D_R	D_F
Справа (D_R)	D_FR	D_NOT	D_NOT	D_FR

Общий алгоритм работы следующий:

1. Анимат начинает путь от "дома". Если он не видит ни одного ориентира, 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, выбирает направление обхода (слева или справа) и запоминает свой выбор.
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.
6. После нахождения пищи анимат возвращается домой, используя данные компаса, и передает описание маршрута второму анимату.

Второй анимат (пассивный 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 он запускает процедуру поиска опорного ориентира в текущей или следующей сцене, аналогично тому, как это делает муравей, потерявший ориентир. К поиску в следующей сцене анимат переходит, если поиск в текущей сцене не дал результатов, и истекло не менее половины времени (числа тактов), которое анимат должен был провести на данном отрезке пути. При поиске он соблюдает общее направление движения на текущем отрезке пути.

Фуражир сопоставляет видимую сцену (S^v) и текущую сцену S^m , взятую из описания маршрута, как наборы ориентиров с учетом размеров, расстояний, направлений и отношений между объектами. Если сцены S^v и S^m признаются похожими, то анимат разворачивается к опорному ориентиру так, чтобы видеть его с того же ракурса, что и при первом проходе. Добившись таким образом максимального соответствия запомненной сцены и увиденной, он запускает процедуру (автомат) обхода опорного ориентира.

В процессе сопоставления сцен приходится учитывать множество параметров, в том числе, разные варианты несоответствия видимой сцены и запомненной. Неизвестно, как именно муравей воспринимает визуальные ориентиры, открытым остается множество вопросов. Если несколько объектов расположены близко друг к другу, воспринимает ли он их как один ориентир или различает по отдельности? Когда изменение ориентира приводит к тому, что муравей перестает его узнавать? Использует ли он в своей деятельности все одновременно видимые ориентиры или какую-то их часть? Возможно, это зависит, например, от сложности окружающего мира: в пустыне количество ориентиров исчезающе мало, а в лесу их слишком много. Но для практических целей достаточно учитывать опорный ориентир и его контекст – ориентиры слева и справа от опорного. Такой упрощенный подход может быть также обоснован сложностью среды, в которой способен функционировать анимат, исходя из его физических размеров и сенсорных способностей.

Была разработана система подсчета степени сходства для триплетов ориентиров: $\Theta = \{O_L, O_C, O_R\}$, где O_C – опорный ориентир, O_L, O_R – ориентиры слева и справа от опорного (если они есть). Выделение триплетов Θ^v в видимой сцене происходит так, как показано, например, на Рис. 2: в первом триплете отсутствует ориентир слева от опорного (O_L), в последнем отсутствует ориентир справа от опорного (O_R). Таким образом, с триплетом Θ^m ($\Theta^m \in S^m$), который содержит опорный ориентир запомненной сцены и может содержать левый и правый ориентиры, будут сопоставляться такие триплеты Θ^v : $(\emptyset, 1, 2)$, $(1, 2, 3)$ и $(2, 3, \emptyset)$.

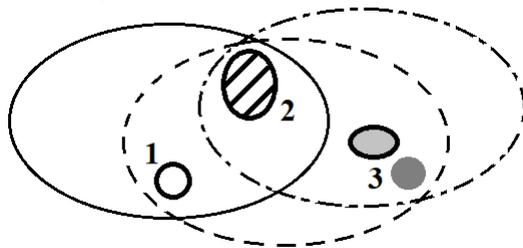


Рис. 2. Выделение фрагментов сцены (триплетов)

Для сравнения триплетов предлагается использовать ранжирование, основанное на линейной свертке критериев [Ногин, 2014], которыми являются оценки степени сходства элементов триплетов по отдельным атрибутам. Каждый ориентир имеет множество атрибутов $\{P_i\}$ ($0 < i \leq N$, N – общее количество атрибутов); значения атрибутов дискретны. Все атрибуты можно разделить на постоянные $\{P^c_j\}$ и переменные $\{P^v_n\}$.

Степень близости (сходства) ориентиров можно рассматривать как величину, обратную расстоянию r между ними в некотором метрическом пространстве:

$$\delta = \frac{1}{1-r} \quad (2.1)$$

Значения ряда атрибутов имеют естественный порядок (например, расстояние до ориентира). Но нас интересует более общий случай, когда все или часть атрибутов такого порядка не имеют (например, цвет). Тогда для оценки расстояния r можно каждый атрибут представить набором шкал и ввести метрическое пространство, включающее для каждого значения каждого атрибута ориентира свою биполярную шкалу, например, $(-1, 0, 1)$:

- 1 – данное значение параметра установлено для данного ориентира;
- 0 – значение этого параметра неизвестно для данного ориентира;
- 1 – данное значение параметра не установлено для данного ориентира.

Степень сходства пары ориентиров O^v и O^m ($O^v \in \Theta^v$, $O^m \in \Theta^m$), занимающих одинаковое положение в триплете, может быть подсчитана следующим образом:

$$\delta_x(O^v, O^m) = \sum_{i=1}^N k_i G(\{p_j^i\}), \quad (2.2)$$

где k_i – коэффициент важности i -го атрибута (цвет, направление т.д.); $G(\{p_j^i\})$ – функция, определяющая в соответствии с (2.1) степень близости значений по шкалам i -го атрибута ($1 \leq j \leq N_i$, N_i – количество значений i -го атрибута). Тогда общая степень сходства триплетов:

$$\delta(\theta^v, \theta^m) = \sum_{x=1}^3 C_x \delta_x(O_x^v, O_x^m), \quad (2.3)$$

где C_x – коэффициент важности ориентира (может быть разным для опорного ориентира, левого и правого); $\delta_x(O_x^v, O_x^m)$ – оценка степени сходства ориентиров (2.2).

Сопоставлять ориентиры имеет смысл тогда, когда значения постоянных параметров позволяют предположить, что это один и тот же ориентир. Для этого вводится некоторая пороговая величина ε – граница, при достижении которой ориентир из S^v может быть сопоставлен ориентиру из S^m . Значение пороговой величины ε , при котором ориентиры из сцен S^v и S^m сопоставляются, было определено экспертным путем и уточнено в процессе моделирования.

Общие правила распознавания сцен следующие. Если существует $\delta(\Theta^v, \Theta^m) > \varepsilon$ и Θ^v – единственный в текущей сцене, то сцена считается распознанной. Если таких триплетов несколько, то в качестве базового выбирается тот, у которого степень сходства выше. Если существуют $\delta(\Theta_1^v, \Theta^m) > \varepsilon$ и $\delta(\Theta_2^v, \Theta^m) > \varepsilon$ и $\delta(\Theta_2^v, \Theta^m) = \delta(\Theta_1^v, \Theta^m)$, то выбирается любой из них: это не имеет принципиального значения с учетом равной близости ориентиров маршруту и приблизительности повторного прохождения пути.

Управление поведением анимата осуществляется с помощью конечных автоматов Мили. Архитектура системы управления является трехуровневой. Мета-мета-автомат управляет переходами от одного

поведения к другому в зависимости от состояния анимата. Автоматы 2-го уровня (мета-автоматы) отвечают за реализацию поведения ("поиск еды", "повторение пути"). Автоматы нижнего уровня отвечают за выполнение основных поведенческих процедур, например, «найти потерянный ориентир X», «обойти ориентир X слева» и др. Такая архитектура позволяет относительно просто менять поведение анимата без изменения его структуры, базовых возможностей и моделирующей программы.

3. Результаты экспериментов

Моделирование проводилось на упрощенной задаче фуражировки (Рис. 3): не рассматривался этап возвращения разведчика в «дом» (при наличии компаса этот процесс является довольно простым). Для проведения экспериментов использовалась система многоагентного моделирования Kvozum [Карпов и др., 2018].

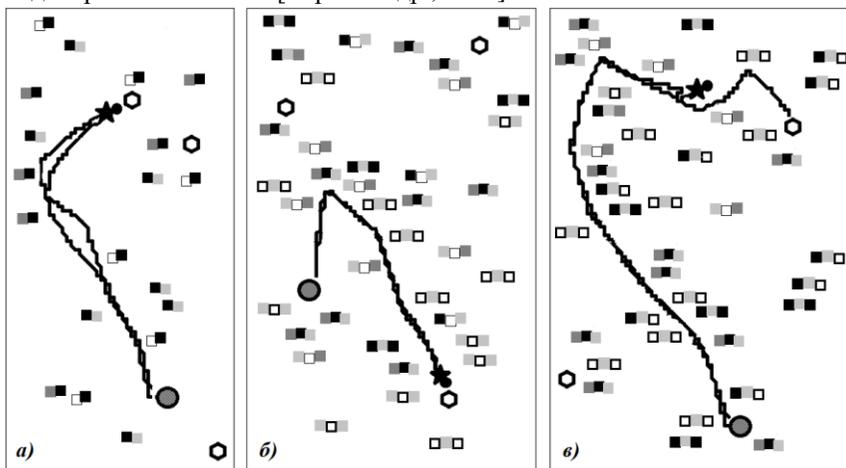


Рис. 3. Примеры маршрутов: а) маршрут средней длины без резких поворотов; б) маршрут средней длины с резким поворотом; в) длинный маршрут (последовательно не хватило времени для прохождения маршрута целиком)

Аниматы перемещались по полигону – области 100×100 клеток, образующей тороидальную поверхность. Время моделирования – 10000 тактов для каждого эксперимента. Любой маршрут начинался от «дома» (закрашенный круг на Рис. 3), начальная ориентация аниматов – произвольная. Ориентиры генерировались случайным образом и состояли из одного, двух или трех объектов, количество разных цветов – 6, количество самих ориентиров – 48, 60, 72 или 84 в зависимости от серии.

При моделировании в данной работе учитывались такие постоянные атрибуты, как линейные размеры объектов (с некоторой погрешностью ρ), их цвет, близость объектов, входящих в ориентир, в соответствии с (1.1).

Из переменных атрибутов учитывалось положение объектов друг относительно друга (слева / справа), расстояние от анимата до объектов и направление на них по компасу. Исследование метрики введенного пространства признаков выходит за рамки данной работы. Отметим лишь, что при моделировании неплохие результаты были получены с пороговым значением $\varepsilon=0.5$, погрешностью $\rho=0.8$, коэффициентами $k(\text{цвет}) = 0.5$, $k(\text{направление}) = 0.3$, $k(\text{расстояние}) = 0.2$, $C(\text{опорный ориентир}) = 0.4$, $C(\text{ориентир слева}) = 0.3$ и $C(\text{ориентир справа}) = 0.3$.

Ниже приведена статистика по экспериментам (Табл. 2). В зависимости от длины маршрута данные были разделены на три примерно равные части: короткие (менее 1000 тактов), средние (от 1000 до 2000) и длинные маршруты (более 2000 тактов).

Табл. 2. Результаты моделирования

Маршруты	Среднее кол-во тактов для разведчика / фуражира	Кол-во неудач, % абс./отн.	Причины неудач			$E_{\text{ср}}$, %
			нашел другой объект ближе / дальше	не нашел ничего	не хватило времени	
короткие	581 / 783	2,6 / 1,4	5 / 4	-	-	0
средние	1420 / 1599	16,3 / 9,4	14 / 19	7	-	70
длинные	2649 / 2801	27.8 / 12,7	24 / 20	9	13	43

На всех маршрутах наблюдается незначительное увеличение времени прохождения маршрута у последователя ($\approx 150 \div 200$ тактов): оно требуется для разворотов с целью 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). Показатель $E_{\text{ср}}$ (Табл. 2) – это часть пути, которую последователь прошел по маршруту, прежде чем сбиться с него. Для коротких маршрутов $E_{\text{ср}}$ равно 0%, и это означает, что в начальной позиции анимат-последователь был расположен так, что он видел другой, более близкий искомый объект, и поэтому направлялся к этому более близкому объекту. Т.о., результаты экспериментов показали применимость и достаточную эффективность данного метода.

На Рис. 4 приведены некоторые зависимости. M – это объем памяти (количество объектов), которые приходилось запоминать анимату. N_e – количество объектов в одном ориентире (1, 2, 3). Объем памяти почти линейно зависит от количества объектов, входящих в ориентир (Рис.4,а). Средняя длина пути N_s растет при увеличении наполненности полигона ориентирами (Рис.4, б) и при увеличении количества объектов в ориентире: последнее объясняется тем, что ориентиры перекрывают

искомые объекты. Исключением является ситуация с малым количеством ориентиров (48): здесь отсутствие видимых ориентиров заставляет анимата часто поворачивать в поисках ориентира, что также увеличивает время поиска.

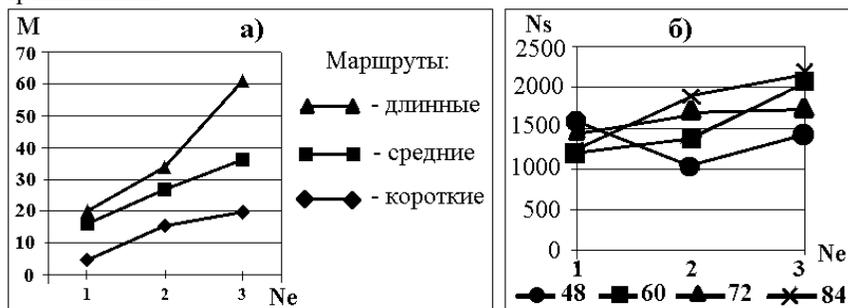


Рис. 4. Зависимости: а) объема памяти от длины маршрута и количества объектов в ориентире (1, 2, 3); б) средней длины маршрута от количества ориентиров на полигоне (48, 60, 72, 84) и количества объектов в ориентире (1, 2, 3)

Было бы интересно сравнить эффективность навигации у полученного анимата и у модельного вида *Formica rufa*, но здесь возникают определенные проблемы. В натуральных наблюдениях подобная статистика не подсчитывается из-за высокой трудоемкости данного процесса. Муравьи-разведчики обычно не передают фуражирам сведения о местоположении пищи, а просто мобилизуют их и ведут за собой. В естественных условиях сложной задачей является само выделение актов передачи данных и наблюдения за фуражиром, который отправился на поиски пищи после контакта с разведчиком. Описание подобного поведения связано с единичными наблюдениями, а сравнивать показатели можно только при наличии статистически достоверных данных. В лабораторных опытах условия проведения экспериментов существенно отличаются от тех, которые есть в природе и которые моделировались в данной работе. Вместо свободного поиска в лабораторных опытах с муравьями использовался набор дорожек, которые образуют структуру типа "дерево". Муравьи имели возможность перемещаться только по дорожкам, поэтому сравнивать результаты по эффективности навигации было бы некорректно.

Тем не менее, продолжительность пути анимата и муравья-разведчика можно сопоставить по количеству ориентиров (развилок пути). В работах Ж.И. Резниковой ([Ryabko et al., 2009], [Reznikova, 2008]) количество развилок менялось от 2-х до 6-ти. Там же утверждается, что эффективность подобного вида фуражировки у самих муравьев очень невелика. В случае двух развилок все активные разведчики и их группы (до 15 на колонию) были успешными, тогда как в случае шести развилок

только один или два справились с задачей. В то же время результаты моделирования в данной работе показали, что при количестве ориентиров на маршруте от 1-го до 3-х успешность поиска у анимата составляет в среднем 91%, при 4-6 ориентирах – 75%, при 7-9 ориентирах – 60%. То есть 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. Для решения задачи рекогносцировки необходимо изменить условие достижения цели: вместо условия "нашел пищу" ввести ограничение на пройденное расстояние, например, или условие "достижение точки, из которой не видны ориентиры". В дальнейшем предложенный метод будет перенесен на реальные робототехнические устройства.

Благодарности. Автор выражает благодарность В.Э. Карпову за участие в обсуждении данной работы.

Список литературы

- [**Baddeley et al., 2012**] Baddeley B., Graham P., Husbands P., Philippides A. A model of ant route navigation driven by scene familiarity // *PLoS Comput. Biol.* 2012. V. 8, no. 1.
- [**Collet et al., 2009**] Collet M., Collett T.S. The learning and maintenance of local vectors in desert ant navigation // *J. Exp. Biol.* 2009. V. 212.
- [**Cruse et al., 2011**] Cruse H., Wehner R. No need for a cognitive map: Decentralized memory for insect navigation // *PLoS Comput. Biol.* 2011. V. 7, no. 3.
- [**Lambrinos et al., 2000**] Lambrinos D., Möller R., Labhart T., Pfeifer R., Wehner R. A mobile robot employing insect strategies for navigation // *Rob. Auton. Syst.* 2000. V. 30, no. 1.
- [**Müller et al., 1988**] 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.
- [**Reznikova, 2008**] Reznikova Z. Experimental paradigms for studying cognition and communication in ants (Hymenoptera: Formicidae) // *Myrmecological News*. 2008. V. 11.
- [**Reznikova, 2020**] Reznikova Z. Spatial cognition in the context of foraging styles and information transfer in ants // *Anim. Cogn.* 2020. V. 23, no. 6.
- [**Roseboom et al., 2019**] 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. V. 10, no. 1.
- [**Ryabko et al., 2009**] Ryabko B., Reznikova Z. The Use of Ideas of Information Theory for Studying «Language» and intelligence in Ants//*Entropy*. 2009, no. 11.

- [**Stelzer et al., 2014**] 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.
- [**Sun et al., 2020**] Sun X., Yue S., Mangan M. A decentralised neural model explaining optimal integration of navigational strategies in insects // *Elife*. 2020. V. 9, no. July.
- [**Vardy, 2006**] Vardy A. Long-range visual homing // 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBOT 2006.
- [**Wehner, 2009**] Wehner R. The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae). // *Myrmecol News* 12, 2009.
- [**Wilson, 1987**] Wilson S.W. Classifier Systems and the Animat Problem // *Mach. Learn.* 1987. V. 2, no. 3.
- [**Yu et al., 2011**] Yu S.E., Kim D. Image-based homing navigation with landmark arrangement matching // *Inf. Sci. (Ny)*. 2011. V. 181, no. 16.
- [**Длусский, 1967**] Длусский Г.М. Муравьи рода *Формика*. – М.: Наука, 1967.
- [**Захаров и др., 2013**] Захаров А.А., Длусский Г.М., Горюнов Д.Н. и др. Мониторинг муравьев *Формика*. – М.: КМК, 2013.
- [**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 КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конф., Белгород. – Изд-во БГТУ, 2012.
- [**Карпов и др., 2018**] 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.
- [**Карпова, 2017**] Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. 2017. Т. 18. № 2.
- [**Ногин, 2014**] Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2014. № 4.

ANIMATE NAVIGATION ON VISUAL LANDMARKS WITH SCENE RECOGNITION

The paper proposes a method of using visual landmarks for memorizing the traversed path by a mobile robot (animate), based on the navigation mechanism of ants. The model of route presentation and the rules of its interpretation are described. They allow another robot to repeat the route taken by the scouting robot. The results of experiments on simulation modeling demonstrate the possibility of using the developed method for solving problems of foraging and reconnaissance.

Keywords: autonomous mobile robot, ant navigation, space-time orientation, foraging and reconnaissance tasks