

Оптимизация, системный анализ и исследование операций

© 2024 г. И.П. КАРПОВА, канд. техн. наук (karpova_ip@mail.ru)
(Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва),
В.Э. КАРПОВ, д-р техн. наук (karpov-ve@yandex.ru)
(Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва)

«ПОДВОДНЫЕ КАМНИ» БИОИНСПИРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ МУРАВЬИНЫХ ДОРОГ¹

Работа посвящена применению моделирования социального поведения в групповой робототехнике и вопросам оказания воздействия на среду группой автономных роботов путем создания и использования дорожной инфраструктуры. Модельным объектом выступают муравьиные дороги, рассматриваются основные аспекты поведения муравьев разных видов в процессе коллективной фуражировки (добычи пищи). Выявляются действия, которые в совокупности приводит к появлению того, что наблюдатель воспринимает как муравьиную дорогу. Описывается модель поведения агента при обустройстве маршрута, приводятся результаты имитационного моделирования для решения задачи фуражировки с учетом расчистки маршрута, согласующиеся с теоретической моделью. Результаты моделирования подтверждают предположение о том, что обустройство маршрута может быть выполнено индивидуальными усилиями агентов (роботов) и без необходимости организации совместных действий.

Ключевые слова: модели социального поведения, групповая робототехника, автономные мобильные роботы, биоинспирированные модели, задача фуражировки.

DOI: 10.31857/S0005231024070083, EDN: XRHYZC

1. Введение

Когда речь идет о передвижении автономных агентов (роботов), то обычно рассматривается задача построения оптимального или субоптимального маршрута. В случае, когда у робота есть карта местности и ему известна начальная и конечная точки маршрута, задача решается различными оптимизационными методами [1]. Если карта отсутствует, то робот либо предварительно строит эту карту, перемещаясь по исследуемой области (методы SLAM), либо совмещает процесс построения карты с поиском целевой точки (целевого объекта) [2]. При этом могут учитываться изменения среды, но

¹ Имитационное моделирование выполнено за счет государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

практически нигде не рассматривается вопрос о том, что робот сам может изменять эту среду. Например, если на его пути находится препятствие, которое мешает ему двигаться в нужном направлении, то он может обойти его или убрать с дороги, если препятствие перемещаемое и у робота есть эффекторы для его устранения. И тогда возникает вопрос о нахождении баланса между затратами на обход препятствия и на расчистку дороги. У этой работы есть два аспекта. С одной стороны, будет рассмотрен вопрос поведения агента при прохождении маршрута с точки зрения применения биоинспирированных методов. С другой, на примере этой задачи поднимается вопрос о как минимум технической нецелесообразности моделирования внешней, феноменологической стороны поведения животных вместо вычленения и реализации базовых механизмов их поведения.

Одним из подходов к решению комплексных задач группового управления роботами в сложных, недетерминированных средах является использование моделей социального поведения (МСП). МСП рассматривает социоподобную организацию взаимодействия роботов как один из адаптационных механизмов, позволяющий решать групповые задачи в сложных, недетерминированных динамических средах, где применение централизованных методов управления затруднено или невозможно [3, 4]. При этом термин «социум» рассматривается как сугубо биологическое понятие.

Ярким примером социальных животных являются муравьи. Они образуют так называемые эусоциальные сообщества – наиболее сложную форму общественной организации, для которой характерны такие признаки, как наличие закрепленной за группой территории, постоянный состав группы, когезия (стремление членов группы держаться вместе), специализация особей и др. [5, с.109].

Фактически использование МСП для решения задач групповой робототехники (ГР) заключается в формализации различных моделей поведения социальных животных, разработке механизмов и алгоритмов, создании на их основе комплекса программных и технических решений, позволяющих выполнять прикладные задачи группового управления роботами. И если ранее исследования в области МСП были сосредоточены на вопросах взаимодействия агентов со средой и друг с другом, то теперь актуальным становится вопрос оказания влияния агентов на среду.

МСП относится к биоинспирированным подходам, и вопросы методологии создания биоинспирированных моделей следует выделить особо.

2. Методологические аспекты

В области биоинспирированных моделей, относящихся к моделированию социального поведения животных, часто наблюдаются две крайности. Первая заключается в создании искусственных моделей, «вдохновенных природой». Это муравьиные алгоритмы [6], алгоритмы стаи волков [7], алгоритм бабочки [8] и аналогичные метаэвристические стохастические алгоритмы [9],

оптимизирующие поиск в пространстве решений. Например, «муравьиный алгоритм» (Ant Colony Optimization) основан на понятии феромонного следа [6]. Некоторые виды муравьев при движении оставляют пахучее вещество – феромон, который испаряется со временем. При поиске ресурсов муравьи стараются передвигаться в направлении увеличения интенсивности этого запаха. Аналог феромона используется как основа градиентного поиска в некотором пространстве решений. Другой пример – алгоритм серых волков (Gray Wolf Optimizer), базирующийся на описании действий особей из стаи серых волков при коллективной охоте [7]. Там много биологических терминов, но на самом деле «особи» – это варианты решения в пространстве, которое описывается некоторой немонотонной функцией. На каждом шаге оцениваются три лучших решения, потом «особи» сдвигаются в пространстве по определенным правилам, решения снова оцениваются в предположении, что наилучшее решение находится в геометрическом центре «доминирующих» особей. Таким образом, это совершенно искусственное построение, для которого из живой природы взят только общий принцип деления особей по весу при принятии решений. Подобные методы хорошо решают оптимизационные задачи, но имеют мало общего с реальным поведением живых организмов.

Другой крайностью является попытка имитации природных механизмов в том виде, в каком они наблюдаются в природе (феноменологический подход). Берутся некие наблюдаемые феномены (точнее, описание наблюдений, часто страдающее антропоцентричностью), и начинается моделирование их внешних проявлений. Так появляются многочисленные реализации этих феноменов, например, фуражировки муравьев (сложное поведение, включающее поиск и транспортировку пищи) [10, 11], и даже предлагаются «обобщенные подходы» к такому моделированию [12]. Потом на их основе делаются какие-то далеко идущие выводы, но все это остается частными механизмами, частными решениями отдельных специфических задач.

Один из наиболее показательных примеров – агрессия (агонистическое поведение). Достаточно давно биологи предлагали рассматривать агрессию как внешнее проявление некоторых видов социального поведения – родительского, пищевого и т.д. [13]. Но до сих пор агрессия явно или неявно объявляется базовым механизмом (отдельным типом поведения) (например, [14, 15]), хотя данный феномен можно реализовать с помощью других базовых элементов [16].

В отличие от вышеприведенных подходов парадигма МСП предполагает, что любое сложное социальное поведение или феномен складывается из небольшого числа базовых механизмов, что созвучно подходу школы М.Л. Цетлина в области коллективного поведения [17]. Для моделирования поведения необходимо разобраться в том, из каких базовых элементов оно состоит и как возникают наблюдаемые эффекты, не вводить лишние сущности, а использовать для реализации любого поведения комбинацию базовых механизмов, что обосновано и технически, и прагматически.

В качестве примера приведем феномен лидерства. Лидерство – это лишь некоторое наблюдаемое явление. У особи отсутствует специальный блок «лидер», а у насекомых нет и специфических задач, связанных с доминированием. Просто особи ведут себя определенным образом: если рядом есть кто-то более сильный (более крупный, сытый и т.д.), то особь начинает вести себя как подчиненная – она следует за лидером. Следование за лидером понимается в широком смысле – и движение, и подражание его действиям в конечном итоге. Это одна из базовых моделей социального поведения [5, 18]. Если же рядом нет никого успешнее/сильнее, то особь сама становится тем, кого окружающие воспринимают как лидера. А сама особь продолжает заниматься своими делами – строительством, фуражировкой, не выполняя никаких «лидерских функций». Наблюдатели же видят эффект самоорганизации: находящиеся рядом особи начинают выполнять аналогичную работу.

Другим наглядным примером является феномен муравьиных дорог. Это часто используемый в литературе, устоявшийся термин [19–21]. В данной работе постараемся показать, что термин «муравьиные дороги» появился как результат человеческой интерпретации наблюдаемых действий отдельных муравьев и их групп, выполняемых обычно во время фуражировки.

Строительство дорог считается одним из наиболее интересных примеров совместной деятельности муравьев, оказывающей влияние на среду обитания. Существует множество описаний того, как возникают дороги, как они длительное время поддерживаются в рабочем состоянии, и т.д. Отсюда естественным является желание промоделировать этот механизм оказания воздействия на среду, в частности с целью эффективного использования ресурсов или минимизации энергозатрат при передвижении. Однако попытка формализации приводит к переосмыслению дорожного феномена с точки зрения определения того, какие механизмы лежат в его основе.

Первый вопрос: что наблюдается на самом деле. От ответа на этот вопрос зависит, какие модели и механизмы надо реализовать. Строго говоря, дорога – это не только элемент инфраструктуры. Дорога – это понятие, присутствующее в базе знаний агента о среде его обитания (так называемой модели мира агента). С точки зрения семиотики как науки о знаковых системах, определяющей в прикладном аспекте форму представления знаний, оно должно включать в себя образ (перцепт знака), способы его использования (значение знака) и влиять на целеполагание (личностный смысл знака) [22]. Формально знак S , описывающий сущности или концепты мира агента, – это упорядоченная четверка вида $S = \langle n, p, a, t \rangle$, где n – имя знака, p – перцепт (описание, множество признаков), t – значение знака (связанные с концептом процедуры), a – личностный смысл (компонент, ответственный за целеполагание). С другой стороны, есть понятие пути следования. Это сущность принципиально иной природы. Это – наблюдаемое внешнее, оно не обязано явно присутствовать в модели мира агента. Как будет видно дальше, «дорожную» деятельность общественных насекомых можно свести к обустройству путей. Под обустройством пути будем понимать совокупность действий, про-

изводимых над областью, по которой пролегает маршрут, и направленных на изменение ее физических характеристик с целью уменьшения энергетических затрат на прохождение маршрута.

3. Дороги и пути

Дорожный аспект крайне интересен с точки зрения ГР. Она решает практические задачи типа мониторинга, разведки, патрулирования и т.д., поэтому перемещение по определенным маршрутам играет существенную роль. Важны не только кооперация и согласование действий, но также создание дорожной инфраструктуры силами самих роботов в ходе самоорганизации. Последнему вопросу уделяется мало внимания, хотя выгода от расчистки пути для повышения скорости передвижения, например, очевидна.

Биологи считают дороги одним из основных элементов структуры охраняемой территории муравьев многих видов [20], а сооружение дорог – ярким примером коллективного поведения [23]. Но попытка найти определение муравьиной дороги не дала результата. Зачастую биологи используют термины, вообще не приводя никаких определений. Так, один из видных отечественных исследователей А.А. Захаров дает классификацию муравьиных дорог, но не дает определений дороги [19]. Зарубежные биологи используют аналогичные термины: «тропы», «строительство троп» (trails, trail construction [24]), «строительство инфраструктуры» (infrastructure construction, [23]), но также не дают определений, а в лучшем случае приводят краткое описание, например: «физические тропы, т.е. дорожки, очищенные от препятствий» [24]. И создается впечатление об «устоявшейся терминологии» из разряда «всемирно известно, что такое муравьиные дороги (тропы)».

Попробуем подойти к этому вопросу с конструктивной точки зрения. Будем понимать под дорогой **обустроенную или приспособленную и используемую для передвижения полосу земли либо поверхность искусственного сооружения, т.е. нечто, являющееся результатом целенаправленной деятельности** (что несколько созвучно Федеральному закону от 10.12.1995 №196-ФЗ).

Подобного рода определения с точки зрения МСП мало что дают. Это – сугубо внешнее феноменологическое описание. Для реализации моделей поведения необходимо, чтобы дорога стала сущностью модели мира агента, т.е. неким знаком, обладающим, как минимум, двумя своими компонентами: рядом распознаваемых агентом признаков (перцепт) и множеством связанных с ним поведенческих процедур (значение). С другой стороны, есть понятие пути или, более определенно, маршрута. Считается, что маршрут – это **путь следования от одной интересующей точки до другой**. Маршрут фиксируется или оценивается внешним наблюдателем, т.е. он не обязан быть представленным в модели мира агента.

В этой работе делается предположение, что в мире муравья дороги как специально создаваемого сооружения нет, а есть маршрут, например, от гнезда до кормового участка. Можно найти много подтверждений того, что поня-

тие «муравьиная дорога» – это человеческая интерпретация движения по некоторому маршруту. Например, в [21, с. 38] говорится об определении «направления кормовых дорог или потоков фуражиров в тех случаях, когда постоянных дорог нет». Или в [20] при описании углубленных в почву дорог: «На остальной территории муравьи использовали *обычные дороги, которые представляют собой поток фуражиров, при этом активно задействовали для перемещения стволы и ветви упавших деревьев*».

Рассмотрим далее два основных «дорожных» феномена, описываемых в биологии насекомых, заменяя термин *дорога* термином **маршрут**.

3.1. Формирование маршрута

Опишем процесс формирования маршрута муравьев, опираясь на данные из [21, с. 10]. Сначала муравьи-разведчики обследуют территорию в поисках кормовых участков (например, мест обитания тли). Обнаружив новый кормовой участок, разведчики возвращаются в гнездо, мобилизуют фуражиров и отводят их на этот участок. Если кормовой участок содержит возобновляемые ресурсы, фуражиры начинают посещать его регулярно. Маршрут обычно пролегает не по прямой, а там, где удобнее ходить: частично по упавшим ветвям и стволам деревьев. Но там, где маршрут проходит по поверхности почвы, есть неровности, мелкий мусор, растительность, которые мешают проходу. И муравьи начинают *обустраивать маршрут*, чтобы сделать его более «удобным», уменьшающим энергетические затраты. Один убирает мусор, другой отодвигает в сторону частицы почвы, третий уничтожает мелкую растительность. Поверхность выравнивается, маршрут иногда становится более прямым и коротким. В результате действий отдельных особей со временем образуется та самая «расчищенная дорожка» [24], которую видит наблюдатель. Эту обычно узкую, расчищенную полосу поверхности, по которой двигаются муравьи, воспринимают как дорогу или тропу (рис. 1). Местами она прохо-

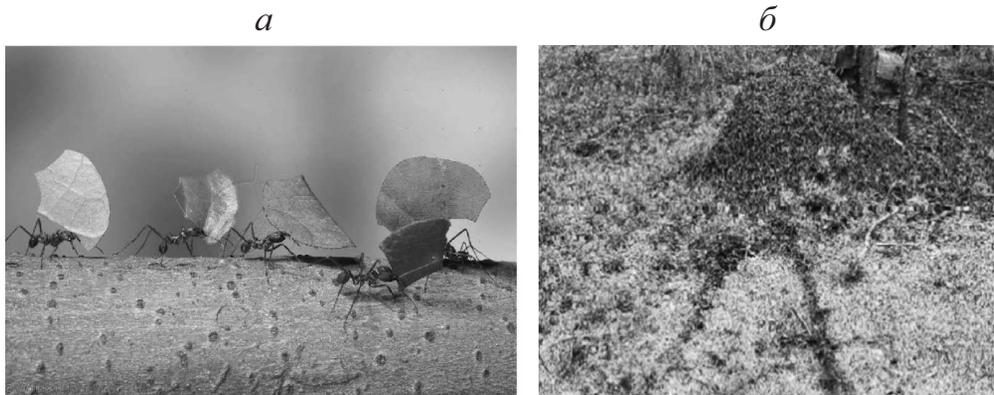


Рис. 1. Примеры «муравьиных дорог»: *а* – поток муравьев-листорезов, проходящий по стволу дерева; *б* – муравейник рыжего лесного муравья с двумя «дорогами».

дит по упавшим ветвям или стволам деревьев (рис. 1,а) [20, 21, 23], тогда ее можно выявить только по потоку муравьев. Но на почве эта «тропа» хорошо видна даже в отсутствие на ней муравьев (рис. 1,б), и у наблюдателя может возникнуть впечатление о том, что он видит некое сооружение, появившееся в результате согласованных действий (строительства).

Это «сооружение» удобно назвать дорогой по аналогии с человеческими дорогами. Но для человека дорога – это сооружение, обладающее набором признаков и интерпретируемое определенным образом, т.е. определяющее соответствующее поведение. У муравьев такого однозначного распознавания нет. Опыт, косвенно подтверждающий это, описан в [21, с. 11]. На одной из дорог изымались все фуражиры вместе с муравьями-наблюдателями с прилегающей к дороге стороны купола. Таким образом, в гнезде не осталось муравьев, которые знакомы с этой дорогой. Через несколько дней семья постепенно вновь овладела потерянной частью территории, но **исходная дорожная сеть и многие колонии тлей в подопытном секторе были потеряны**. Следовательно, другие муравьи, не знакомые с данным участком, не смогли распознать существующие на нем дороги и повторно их использовать.

3.2. Очистка маршрута

С одной стороны, деятельность муравьев по «уходу за дорогами» энергетически выгодна. Например, груженные муравьи-листорезы по очищенным тропам передвигаются в 4–10 раз быстрее, чем по неочищенным [25], и в среднем колония таких муравьев тратит всего несколько дней за сезон на расчистку троп [26]. С другой стороны, есть исследования [23] с теми же муравьями-листорезами, подтверждающие гипотезу о том, что не существует ни механизмов межиндивидуальной обратной связи, ни механизмов вербовки специально для расчистки тропы. Приведенная в [23] математическая модель показывает, что результаты экспериментов по расчистке тропы могут быть объяснены фиксированной вероятностью того, что рабочий устранил мешающее препятствие, и не требуется мобилизация других рабочих для устранения препятствий.

Итак, используя понятие маршрута, можно объяснить все наблюдаемые феномены появления, использования и поддержки «дорожной инфраструктуры муравьев», точнее, рационального использования территории.

Это утверждение может показаться излишне категоричным. Не будем углубляться в вопросы терминологии, рассуждать о тоннелях [27], углубленных в почву дорогах [20] и т.п. Разумеется, изменение среды влияет на характер поведения агента: он будет двигаться *предпочтительно* по удобному, протоптанному участку. В этом смысле тоннель является предельным случаем проявления такого «предпочтения», так как в тоннеле у муравья нет возможности выбора другого пути. Повторим, что если рассматривать дорогу не как сущность модели мира внешнего наблюдателя, а как сущность (знак) модели мира именно агента, то с такой сущностью-знаком должны быть свя-

заны и поведенческие процедуры (значение знака), и ее образ (перцепт), и смысл (явное значение с точки зрения целевой функции). Но именно всего этого не наблюдается в поведении агентов.

4. Обустройство маршрута

Исходя из вышесказанного, будем считать, что у муравьев нет отдельного вида деятельности по строительству и поддержанию дорожной инфраструктуры. Действия, в результате которых появляется то, что сторонний наблюдатель воспринимает как дорогу, выполняются отдельными муравьями-фуражирами в ходе перемещения по знакомому маршруту. Эти действия носят вспомогательный характер. Таким образом, для решения задачи по обустройству маршрута надо по возможности ограничиться теми способами и механизмами, которые ранее были реализованы и уже использовались для других задач, и не вводить сущностей сверх необходимого.

В ходе решения различных задач агент (робот) должен перемещаться из одной точки в другую. Здесь эта задача решается не на уровне планирования маршрута и выстраивания оптимальной траектории, а на поведенческом уровне (как у муравьев). Рассмотрим для примера фуражировку. Агенты-фуражиры совершают регулярные рейсы за ресурсом и перемещают его на «базу», и маршрут соединяет базу и местоположение ресурса. Агент (как и муравей [28]) не имеет карты местности: он запоминает маршрут по визуальным ориентирам и компасу [29, 30]. Агент движется, запоминая ориентиры и направление по компасу (приблизительно), поэтому маршрут – это совокупность относительно прямых отрезков от одного ориентира до другого (рис. 2).

Характер движения. Движение в каждый момент времени определяется локальной целью – направлением (у муравьев – видимый ориентир, запах, светоконпасная ориентация), а также текущим контекстом: состоянием поверхности, помехами, препятствиями и т.д. Контекст определяет характер движения, обход препятствий, локальные предпочтения и т.п. В этом смысле

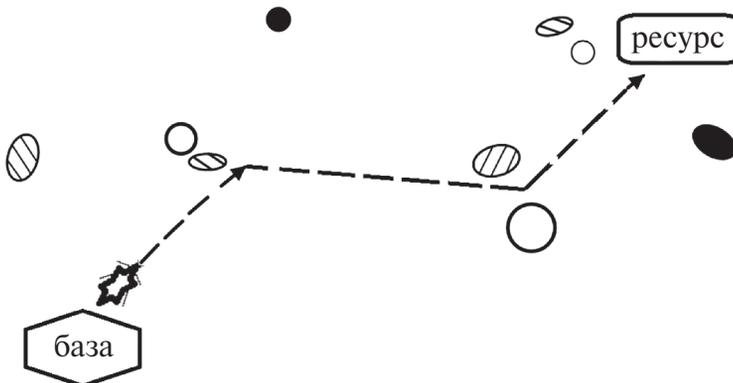


Рис. 2. Пример маршрута от «базы» до ресурса.

движение является «равнодействующей» тенденций идти в нужном направлении, а также идти так, чтобы было «удобнее». Именно в таком аспекте понимается влияние «протоптанной» тропы на движение агента. Чем интенсивнее поток, чем больше «протаптывается» путь, тем предпочтительнее будет движение именно по нему. Но такой «обустроенный» маршрут – это не дорога; просто так «удобнее» идти.

Эффективность перемещения определяется энергозатратами, которые зависят от времени перемещения по маршруту. Время зависит от длины и извилистости маршрута: по прямой агент движется быстрее, чем при поворотах, в частности при обходе препятствия. Таким образом, устранение препятствий и спрямление маршрута повысит энергоэффективность. Кроме того, для устойчивого движения по маршруту необходимо достаточное количество ориентиров, которые агент может распознать. Это позволяет увеличить вероятность успешного прохождения по маршруту и обратно.

Обустройство маршрута у муравьев в общем случае может проявляться по-разному:

1. Вытаптывание (уплотнение почвы без дополнительных усилий со стороны муравьев).
2. Расчистка пути (уборка мусора и растительности).
3. Использование подручного материала для повышения удобства прохождения по пути, например подстиление под ноги растительных остатков на топком участке маршрута.
4. Выравнивание поверхности, в том числе углубление в почву.

Процедура расчистки пути. Проходя известным ему маршрутом, агент знает, куда ему нужно двигаться (видит ориентир и идет к нему). Если перед ним препятствие, мешающее пройти прямо, он может его обойти или сдвинуть в сторону. Для этого он должен распознавать препятствия и отличать перемещаемые от неподвижных. Эти же препятствия он может воспринимать как ориентиры.

Процедура расчистки определяет, куда и как убираются помехи. Основной вопрос не в том, в каком направлении и как далеко сдвигаются мешающие объекты. Сложности возникают тогда, когда помехи сдвигаются в кучи или валы, образуя новые ориентиры. Фактически, создание нового ориентира и означает явное оказание воздействия агента на среду.

Обратим внимание, что использование перемещенных препятствий в качестве новых ориентиров не аналогично реакции на феромонный след, так как обнаружив такой ориентир, другой агент не сможет идентифицировать его как ориентир вдоль пути. Феромон у муравьев – это метка общего плана, она воспринимается другими особями как признак того, что здесь проходил другой муравей. Муравьи, не имеющие *следовых феромонов*, используют визуальные ориентиры, что косвенно свидетельствует об отсутствии у муравья «карты местности» [28] и подчеркивает значимость визуальной ориентации. Оставленный разведчиком пахучий след может быть использован фуражи-

рами для самоорганизации: они начинают двигаться по этому следу в направлении от гнезда (положение которого им известно) [31]. В случае же перемещения препятствия только тот агент, который идет вдоль известного ему маршрута, может запомнить это препятствие как ориентир.

Участники расчистки. Участником расчистки может стать любой фуражир, так как специальных муравьев-уборщиков не наблюдается [32]. Вероятность того, что муравей займется расчисткой, зависит от его состояния. Расчисткой никогда не занимаются фуражиры, несущие груз (для муравьев-листорезов см. [23]). В [23] также приводится оценка вероятности того, что муравей, столкнувшись с препятствием, будет его устранять.

Итак, расчистка пути приводит к освобождению пути, к уменьшению его длины и к созданию дополнительных ориентиров вдоль пути.

5. Модель поведения анимата при обустройстве маршрута

Считается, что обустройство маршрута у муравьев является энергетически эффективным [25, 26], следовательно, оценка действий агента в ходе фуражировки также может базироваться на изменении энергетических затрат. Приведем модель, описывающую этот процесс и позволяющую оценить эффективность агента. Это упрощенная качественная модель, она не преследует цель описать все детали процесса расчистки маршрута.

Имеется агент, решающий задачу транспортировки некоторого ресурса («пищи») от кормового участка до базы. Количество «пищи» определяет положительный вклад в его энергетический баланс. При этом агент затрачивает энергию на прохождение пути от базы до кормового участка, а также на расчистку пути от препятствий. Будем считать, что агент функционирует в таком дискретном времени, где каждый такт может определять некоторый период его существования. Среда, в которой функционирует агент, определяется ограниченным количеством невозпроизводимого ресурса на кормовом участке, а также множеством препятствий на пути следования агента. Агент с некоторой вероятностью может убирать эти препятствия, сокращая длину маршрута, но при этом тратя на уборку некоторое количество своей энергии.

Задача заключается в том, чтобы оценить энергетическую эффективность как функцию энергозатрат агента, зависящую от свойств среды и вероятности того, что агент займется расчисткой пути.

Пусть $f(t)$ – доставленный ресурс (грузоподъемность агента); будем считать для простоты, что $f(t) = f(0) = \text{const}$; $C(t)$ – затраты на доставку ресурса. Все используемые величины безразмерны и определены как полученная или потраченная энергия в условных единицах, а время t дискретно. Тогда эффективность агента $E(t)$ в момент времени t можно определить следующим образом:

$$(1) \quad E(t) = f(t) - C(t).$$

Затраты на доставку ресурса $C(t)$ (1) складываются из затрат на прохождение маршрута $L(t)$, на выполнение работ по расчистке $W(t)$ и на поиск пищи на участке $C_f(t)$:

$$(2) \quad C(t) = L(t) + W(t) + C_f(t).$$

Затраты на прохождение маршрута $L(t)$ (2) зависят от расстояния L_0 между «базой» и «кормовым участком» и от насыщенности препятствиями:

$$(3) \quad L(t) = L_0 + k_L \rho(t).$$

Здесь L_0 – условный прямой маршрут, $L_0 = \text{const}$, $\rho(t)$ – насыщенность препятствиями; k_L – коэффициент, определяющий затраты на обход препятствия.

Затраты на выполнение работ по расчистке $W(t)$ (2) зависят от насыщенности препятствиями $\rho(t)$ и от p_w – вероятности того, что агент будет устранять препятствие, $p_w = \text{const}$:

$$(4) \quad W(t) = p_w \rho(t).$$

Затраты на поиск пищи на участке $C_f(t)$ (2) обратно пропорциональны количеству пищи на участке:

$$(5) \quad C_f(t) = k_F / (F(t) + \epsilon).$$

Здесь k_F – коэффициент стоимости поиска, $k_F \in \mathcal{R}$, а ϵ введена для того, чтобы при $F(t) = 0$ затраты были бы конечны, $\epsilon \in \mathcal{R}$, $\epsilon > 0$. Количество пищи на участке $F(t)$ (5) уменьшается со временем:

$$(6) \quad F(t) = F_0 - ft.$$

Здесь F_0 – начальный объем пищи на участке. Насыщенность препятствиями $\rho(t)$ (4) также уменьшается по мере расчистки:

$$(7) \quad \rho(t+1) = \rho(t) - k_w W(t) = \rho(t) - k_w p_w \rho(t) = \rho(t)(1 - k_w p_w)$$

или в итоге

$$(8) \quad \rho(t) = \rho_0 (1 - k_w p_w)^t.$$

Здесь k_w – коэффициент эффективности действий по удалению препятствия.

В результате получаем выражение для эффективности агента

$$(9) \quad E(t) = \frac{F_0 f - f^2 t + f \epsilon - k_F}{F(t) + \epsilon} - L_0 - \rho_0 (1 - k_w p_w)^t (k_L + p_w).$$

Естественно, функцию, определяющую ресурс участка $F(t)$, необходимо доопределить так, чтобы она была ограничена снизу нулем, при этом если $F(t) = 0$, то значение f обнуляется (агент ничего не приносит):

$$(10) \quad F(t) = \max(F_0 - ft, 0), \quad f(t) = \begin{cases} f_0, & \text{если } F(t) - f_0 > 0, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

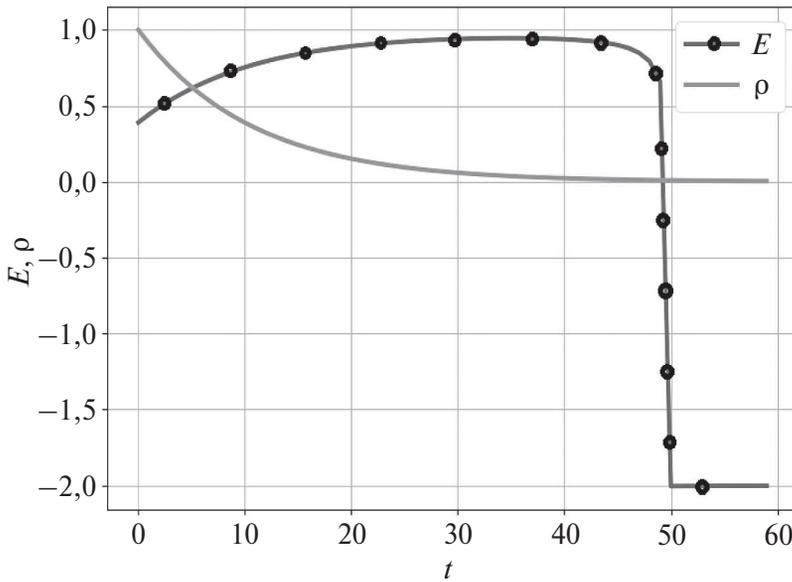


Рис. 3. Графики эффективности действий анимата $E(t)$ и насыщенности препятствиями $\rho(t)$ при численном моделировании.

Такая модель дает возможность оценить эффективность действий агента во время фуражировки и построить качественный график для $E(t)$ (10). На рис. 3 приведены графики эффективности $E(t)$ и насыщенности препятствиями $\rho(t)$ (7) для следующих значений параметров: затраты на прохождение прямого маршрута $L_0 = 1$; вероятность того, что анимат будет удалять препятствие, $p_w = 0,1$; коэффициент затрат на обход препятствия $k_L = 0,5$; начальная насыщенность препятствиями $\rho(0) = 1$; начальное количество пищи на участке $F(0) = 100$; «грузоподъемность» анимата $f = 2$; коэффициент эффективности расчистки $k_w = 0,9$; коэффициент затрат на поиск пищи $k_F = 1$, $\epsilon = 1$.

Как видно из графика $E(t)$ (рис. 3), эффективность работы агента растет по мере расчистки маршрута, достигает максимума при снижении количества препятствий ниже определенного порога, но затем начинает падать из-за уменьшения количества пищи.

Отрицательные значения $E(t)$ на графике означают, что при $F(t) = 0$ агент только тратит при движении по маршруту свои ресурсы, не восполняя их (работает в убыток).

6. Имитационное моделирование

Имитационное моделирование выполнялось в системе многоагентного моделирования Kvoqum, созданной в НИЦ «Курчатовский институт» [30]. Агент перемещался между двумя точками – от «гнезда» до «кормового участка». Подсчитывалось время, проведенное в дороге (с учетом обхода препятствий

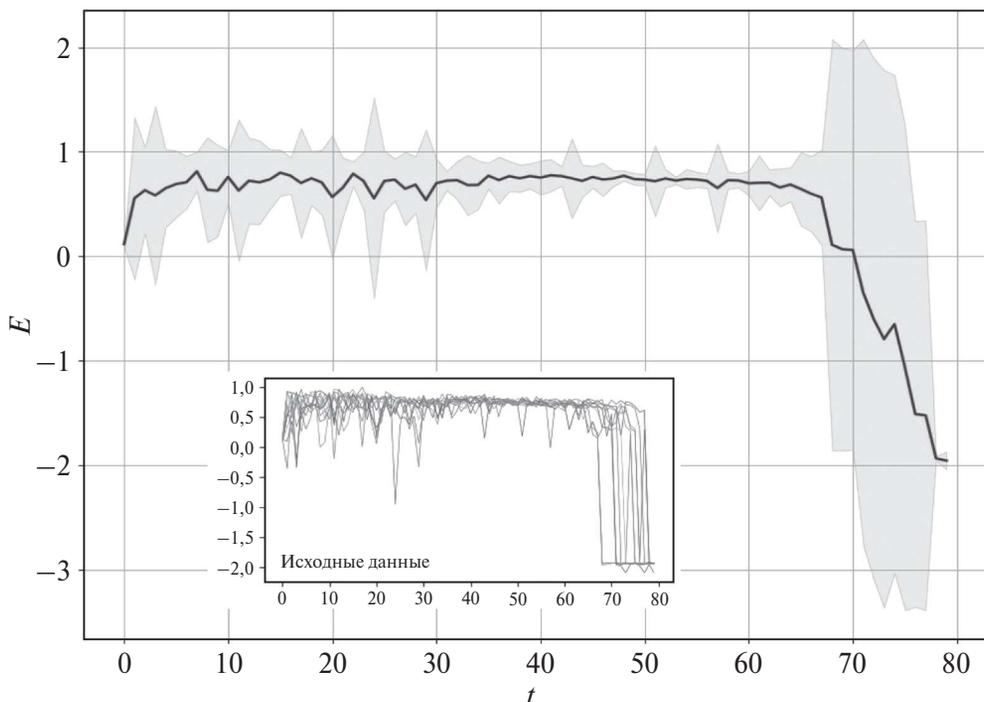


Рис. 4. График эффективности действий анимата $E(t)$ при имитационном моделировании. Среднее по десяти экспериментам и стандартное отклонение.

и/или затрат на их удаление), и время, потраченное на участке на поиск пищи. После нахождения ресурса агент мгновенно возвращался в «гнездо» и снова шел на кормовой участок. Эксперимент заканчивался, когда время на поиск пищи превышало 2000 тактов (тогда считалось, что пища на участке закончилась). На рис. 4 приведен график эффективности $E(t)$ для ряда экспериментов по имитационному моделированию. Из графика на рис. 4 видно, что эффективность действий анимата меняется аналогично тому, что показывает численное моделирование. Сначала эффективность действий анимата увеличивается, так как расчистка маршрута приводит к уменьшению времени на прохождение пути; затем наступает период стабилизации (35–55 проходы, рис. 4); по мере истощения участка увеличивается время на поиск пищи, и эффективность снижается.

7. Механизмы реализации вариантов обустройства маршрута

Вытапывание (естественное уплотнение почвы). На лабораторном полигоне это реализовать сложно, а в естественной среде это происходит естественным образом, когда роботы двигаются одним и тем же маршрутом в достаточно большом количестве. Оценка достаточной численности активных

фуражиров для семьи *Formica* из 500 особей составляет от 15 до 45 особей [34]. При этом к роботу предъявляются минимальные требования: умение ориентироваться по визуальным ориентирам и компасу, запоминать маршрут, возвращаться «на базу» и повторять маршрут.

Расчистка пути (удаление с него препятствий). Для этого в дополнение к ранее перечисленным механизмам робот должен уметь: (1) идентифицировать препятствия, (2) отличать перемещаемые препятствия от неподвижных, (3) сдвигать или переносить препятствия в сторону, (4) возвращаться к движению по маршруту, (5) уточнять запомненный маршрут, так как сдвиг препятствий изменяет конфигурацию ориентиров вдоль маршрута. В работах [35, 36] описывается способ отработки маршрута по визуальным ориентирам, при котором маршрут запоминается приблизительно, а возвращение к маршруту может быть реализовано просто как продолжение движения «в прежнем направлении» с учетом ориентиров. Поэтому необходимо передвигать препятствие на небольшое расстояние, достаточное для освобождения пути и сопоставимое с размером робота.

Для расчистки необходимо определить, как и когда робот должен сделать выбор между обходом и перемещением препятствия. После перемещения препятствия следует определить дальнейшие действия робота: он пойдет по маршруту или продолжит расчистку пути.

Выравнивание поверхности (горизонтальное выравнивание) Для этого робот должен иметь эффекторы, способные срезать верхний слой грунта или «прокладывать траншеи». Это слишком сильное требование, но можно ограничиться перемещаемыми элементами (препятствиями), на которые можно либо заехать, либо обогнуть их. Такие элементы можно сдвигать эффектором в виде отвала: в этом случае расчистка маршрута будет также приводить к выравниванию.

Механизмы для реализации вариантов обустройства маршрута роботом

Варианты обустройства маршрута	Механизмы
1. Вытаптывание	Ориентация по визуальным ориентирам и компасу Запоминание маршрута Возвращение «на базу» Повторение маршрута
2. Расчистка пути	Идентификация препятствия Распознавание перемещаемых и неподвижных препятствий Сдвиг препятствий в сторону
3. Выравнивание поверхности	Идентификация препятствия, которое можно огибать сбоку или переезжать
4. Использование подручного материала	Идентификация неудобного участка, на который можно сдвинуть препятствие

Использование подручного материала. Это более сложный вариант. Во-первых, робот должен уметь определять, что перед ним находится неудобный для передвижения участок, например углубление. Во-вторых, он должен найти поблизости элемент, которым можно выровнять этот участок. Но можно рассматривать этот вариант как продолжение предыдущего, по аналогии с муравьями, которые *перекладывают почву*, чтобы выровнять поверхность тропы [23]. И робот может перемещать мешающие проходу препятствия на эти неудобные участки. Общий список механизмов приведен в таблице. В ней для каждого следующего варианта нужны все предыдущие механизмы.

8. Заключение

У этой работы два аспекта: технический и методологический. Первый касается моделирования поведения и заключается в следующем. Приведенные выше рассуждения и результаты моделирования подтверждают предположение о том, что на самом деле в мире муравьев не существует дорог в том смысле, который вкладывает в это понятие человек. Есть только маршруты и направления движения, а обустройство маршрута с целью снижения энергетических затрат в простом случае может быть выполнено без организации совместной целенаправленной деятельности множества агентов (роботов). Таким образом, показано, что, не создавая новых сущностей, не привлекая какие-то совершенно искусственные построения, можно получить такой же результат и наблюдать такой же феномен, который у биологов принято называть «муравьиными дорогами». Формально это означает отсутствие в модели мира агента сущности «дорога», что влечет за собой отсутствие необходимости создания соответствующих этому знаку поведенческих процедур, представления/распознавания и т.п., что серьезно упрощает решение задачи.

Второй – методологический – аспект касается того, что отношение к биоинспирированности должно быть критическим и конструктивным. Вернемся к названию статьи и подытожим, в чем заключаются «подводные камни» биоинспирированности.

1. Поверхностные аналогии в биоинспирированных моделях поведения – вещь опасная. «Вдохновленные природой» модели зачастую не имеют ничего общего с тем, что имеется в природе. Опасность в том, что при таком поверхностном взгляде игнорируются механизмы, лежащие в основе того или иного поведения. В итоге получаются специфические модели, отражающие лишь внешние, феноменологические аспекты явлений природы.
2. Выявление и реализация базовых поведенческих механизмов имеет глубоко практические аспекты. Это позволяет экономить усилия при разработке систем, дает возможность комбинировать эти базовые механизмы и обеспечивает гибкость. Пример такого подхода – парадигма моделей социального поведения.

3. Сами по себе «настоящие» биологические модели и описания явлений тоже требуют критического отношения. Дело в разном понятийном аппарате у биологов и технических специалистов. Последним должна быть важна суть явления, его составные элементы и причинно-следственные связи. Без этого не понятно, что подлежит моделированию. Пример такого явления – муравьиные дороги – и был рассмотрен в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sahoo S.K., Choudhury B.B.* A Review of Methodologies for Path Planning and Optimization of Mobile Robots // *J. Proc. Manag. Techn.* 2023. V. 11. No. 1–2. P. 34–52.
2. *Abaspur Kazerouni I., Fitzgerald L., Dooly G., Toal D.* A survey of state-of-the-art on visual SLAM // *Expert Syst. Appl.* 2022. V. 205. No. 2. P. 117734.
3. *Карнов В.Э., Карнова И.П., Кулинич А.А.* Социальные сообщества роботов. М.: УРСС. 2019.
4. *Карнов В.Э.* Социальные сообщества роботов: от реактивных к когнитивным агентам // *Мягкие измерения и вычисления.* 2019. Вып. 2. № 15. С. 61–78.
5. *Дьюсбери Д.* Поведение животных: Сравнительные аспекты / Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
6. *Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A.* Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents // *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Part B.* 1996. V. 26. No. 1. P. 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
7. *Mirjalili S., Mirjalili S.M., Lewis A.* Grey Wolf Optimizer // *Adv. Eng. Softw.* 2014. V. 69. P. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
8. *Arora S., Singh S.* Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization // *Soft Comput.* 2019. V. 23. No. 3. P. 715–734. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>
9. *Toaza B., Esztergár-Kiss D.* A review of metaheuristic algorithms for solving TSP-based scheduling optimization problems [Formula presented] // *Appl. Soft Comput.*, 2023. V. 148. No. 11. P. 110908. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.11090>
10. *Imai K., Okuyama A.* Research on a Multi-agent System That Mimics Ant Foraging Behavior // *Lecture Notes in Networks and Systems. Proc. Eighth International Congress on Information and Communication Technology ICICT 2023, London, 2024.* V. 696. P. 193–203. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3236-8_15
11. *Zhang N., Yong E.H.* Dynamics, statistics, and task allocation of foraging ants // *Phys. Rev. E.* Nov. 2023. V. 108. No. 5. P. 054306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.108.054306>
12. *De Nicola R., Di Stefano L., Inverso O., Valiani S.* Intuitive Modelling and Formal Analysis of Collective Behaviour in Foraging Ants // *Proc. 21st International Conference Computational Methods in Systems Biology (CMSB 2023).* P. 44–61.
13. *Lorenz K.* On Aggression. London: Routledge, 2002.
14. *Кудрявцева Н.Н., Маркель А.Л., Орлов Ю.Л.* Агрессивное поведение: генетико-физиологические механизмы // *Вавилов. журн. генетики и селекции.* 2014. Вып. 18. № 4/3. С. 1133–1155.

15. *Nordell S.E., Valone T.J.* Habitat Selection, Territoriality, and Aggression / Animal Behaviour, Chapter 11, Oxford University Press. 2023.
16. *Карпова И.П., Карпов В.Э.* Агрессия в мире аниматов, или О некоторых механизмах управления агрессивным поведением в групповой робототехнике // Управление большими системами. 2018. Вып. 76. С. 173–218.
<https://doi.org/10.25728/ubs.2018.76.6>
17. *Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.: Наука, 1969.
18. *Карпов В.Э.* Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами. 2016. Вып. 59. С. 165–232.
19. *Захаров А.А.* Дороги муравьев (вопросы терминологии) // «Муравьи и защита леса»: Материалы VI Всесоюзного мирмекологического симпозиума. Тарту. 1979. С. 152–155.
20. *Новгородова Т.А.* Использование углубленных в почву дорог муравьями группы *Formica rufa* (Hymenoptera, Formicidae) // Евроазиат. энтомолог. журн. 2011. Вып. 10. № 3. С. 401–405.
21. *Захаров А.А.* Муравей. Семья. Колония. М.: Фитон XXI, 2018.
22. *Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В., Кузнецова Ю.М.* Знаковая картина мира субъекта поведения. М.: Физматлит, 2018.
23. *Bochynek T., Burd M., Kleineidam C., Meyer B.* Infrastructure construction without information exchange: the trail clearing mechanism in *Atta* leafcutter ants // Proc. R. Soc. B Biol. Sci. Jan. 2019. V. 286. No. 1895. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2539>
24. *Bouchebti S., Travaglini R.V., Forti L.C., Fourcassié V.* Dynamics of physical trail construction and of trail usage in the leaf-cutting ant *Atta laevigata* // Ethol. Ecol. Evol. 2019. V. 31. No. 2. P. 105–120. <https://doi.org/10.1080/03949370.2018.1503197>
25. *Rockwood L.L., Hubbell S.P.* Host-plant selection, diet diversity, and optimal foraging in a tropical leafcutting ant // Oecologia. 1987. V. 74. P. 55–61.
26. *Howard J.J.* Costs of trail construction and maintenance in the leaf-cutting ant *Atta columbica* // Behav. Ecol. Sociobiol. 2001. V. 49. No. 5. P. 348–356.
<https://doi.org/10.1007/s002650000314>
27. *Viles H.A., Goudie A.S., Goudie A.M.* Ants as geomorphological agents: A global assessment // Earth-Science Rev. Feb. 2021. V. 213. P. 103469.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103469>
28. *Wehner R., Hoinville T., Cruse H.* On the ‘cognitive map debate’ in insect navigation // Stud. Hist. Philos. Sci. 2023. V. 102. No. 8. P. 87–89.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2023.08.004>
29. *Dall’Osto D., Fischer T., Milford M.* Fast and Robust Bio-inspired Teach and Repeat Navigation // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 500–507. <https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636334>
30. *Dupeyroux J., Viollet S., Serres J.R.* An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation // Rob. Auton. Syst. 2019. V. 117. P. 40–56.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.04.007>
31. *Длусский Г.М.* Поведенческие механизмы регуляции фуражировки у муравьев // «Муравьи и защита леса»: Мат. VI Всесоюзного мирмекологического симпозиума. Тарту. 1979. С. 147–151.

32. *Alma A.M., Farji-Brener A.G., Elizalde L.* When and how obstacle size and the number of foragers affect clearing a foraging trail in leaf-cutting ants // *Insectes Soc.* 2019. V. 66. No. 2. P. 305–316. <https://doi.org/10.1007/s00040-018-00680-x>
33. *Карнов В.Э., Ровбо М.А., Овсянникова Е.Е.* Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум // *Программные продукты и системы.* 2018. Вып. 31. № 3. С. 581–590. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.123.581-590>
34. *Malyshev A., Burgov E.* Revisiting Parameters of Bioinspired Behavior Models in Group Foraging Modeling // *SPIIRAS Proc.* Feb. 2020. V. 19. No. 1. P. 79–103. <https://doi.org/10.15622/sp.2020.19.1.3>
35. *Карнова И.П.* Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2021. Вып. 22. № 10. С. 537–546. <https://doi.org/10.17587/mau.22.537-546>
36. *Карнова И.П.* Об одном биоинспирированном подходе к ориентации роботов, или настоящий «муравьиный» алгоритм // *Управление большими системами.* 2022. Вып. 96. С. 69–117. <https://doi.org/10.25728/ubs.2022.96.5>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галляевым.

Поступила в редакцию 30.11.2023

После доработки 18.04.2024

Принята к публикации 30.04.2024