

УДК 004.934.2+004.52

БИОИНСПИРИРОВАННЫЙ МЕТОД ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ АГЕНТОВ МЕЖДУ ГРУППАМИ

И.П. Карпова (*karpova_ip@mail.ru*)
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

В работе рассматривается решение задачи перераспределения агентов между группами на основе имитации такой формы социального паразитизма у муравьев, как рабовладение. Для комплексного решения задачи выполнена интеграция с методом ориентации по визуальным ориентирам и компасу с запоминанием маршрута и возвращением назад. Описаны используемые модели и механизмы. Показано, что даже технические проблемы, например, следование за лидером, могут быть решены с помощью биоинспирированных механизмов.

Ключевые слова: групповая робототехника, модели социального поведения, групповое движение, следование за лидером, муравьи-рабовладельцы, агрессивное поведение, задача фуражировки

Введение

В области групповой робототехники (ГР) преобладают подходы, в которых для решения различных задач разрабатываются отдельные модели (методы, алгоритмы) и либо доказывается их оптимальность при определенных условиях, либо показывается их более высокая эффективность по сравнению с существующими. Подобного рода стремление к уникальности приводит не только к трудоемкости решения даже типовых или сходных задач ГР, но и к тому, что эти «моноклитные» решения не позволяют интегрировать существующие модели и методы.

Альтернативой такому подходу является разработка базовых поведенческих моделей, из которых складывается сложное поведение, как индивидуальное, так и социальное. В этом – суть парадигмы моделей социального поведения (МСП) [Карпов и др., 2019]. При этом подход МСП опирается на изучение поведения социальных насекомых, в первую очередь, муравьев. В природе группа (семья) муравьев эффективно решает стоящие перед ней задачи, используя для этого довольно ограниченный

набор механизмов, навыков и моделей поведения. Они решают эти задачи не оптимально, но рационально, и имеют высокую адаптивность к изменяющимся условиям среды. Т.о., применение биоинспирированного подхода на основе МСП является перспективным направлением.

Если говорить о сути методологии применения МСП для практических задач, то она заключается в следующем. Сначала ставится реальная задача, для которой ищется некий «природный аналог», рассматриваемый как сложное поведение или комплекс поведенческих процедур. А далее формируется набор базовых механизмов поведения как базис для реализации требуемого поведенческого феномена.

В данной работе применение этого подхода описывается на примере решения задачи перераспределения агентов (роботов) между группами. Такая задача может возникнуть, например, если часть роботов в группе выбыла из строя. В литературе чаще описывается подход, который заключается в перераспределении не участников, а задач между группами [Patsias et al., 2023]. Если же речь идет об изменении состава группы, то обычно используются методы на основе игр или аукционов [Bayram et al., 2016]. В ходе аукциона сравниваются возможности роботов (групп роботов) и характеристик задач, и при необходимости происходит динамическое перераспределение участников групп. К примеру, в [Irfan et al., 2016] предлагается алгоритм, в котором лидер группы оценивает на каждом шаге, достаточно ли возможностей членов группы для решения поставленной задачи. Если не достаточно, он обращается к лидерам соседних групп для проведения аукциона по привлечению в свою группу членов других групп. Вообще, формирование групп роботов часто осуществляется путем распределения задач между группами и решается совместно [Rizk et al., 2019]. Таким образом, существующие алгоритмы изменения состава групп основаны на голосовании и подразумевают обмен данными и согласование результатов.

Отдельные работы, затрагивающие организацию групп роботов, базируются на биологически инспирированных моделях. Например, в [Lope de et al., 2015] исследуется проблема распределения задач между членами группы. Решение включает стимул-реактивную модель и набор простых правил выбора, основанных на разделении труда у социальных насекомых. Однако решаемая задача носит модельный характер, т.к. не учитывает никаких факторов, кроме пороговых значений отклика, при котором робот выбирает задачу, и интенсивности стимулов.

Цель данного исследования – с помощью ранее созданных моделей, методов и механизмов реализовать сложное поведение агентов. Решаемая задача: мобилизация агентами одной группы агентов из других групп для перераспределения трудовых ресурсов. Для именованного субъекта поведения далее будут использоваться почти синонимичные термины:

агент, анимат (агент, имитирующий поведение живого организма) и робот. Это определяется тем, какой аспект нас интересуют в данный момент: абстрактная модельная сущность (агент); поведение, аналогичное поведению животных (анимат); или аппаратная реализация (робот).

1. Решение задачи перераспределения аниматов

В рамках подхода на основе МСП речь идет об образовании устойчивых групп аниматов, которые должны функционировать совместно в течение продолжительного времени. Помимо такого постоянного образования, как семья муравьев, для некоторых видов муравьев зафиксировано постоянство индивидуального состава рабочих групп муравьев, осуществляющих совместную деятельность длительное время, до нескольких дней и даже недель [Reznikova, 2011]. При этом возможно перераспределение особей как между группами внутри одной семьи, так и между семьями. Мы будем рассматривать второй вариант.

У некоторых видов муравьев существует такой механизм перераспределения особей между семьями, как рабовладение. Это форма социального паразитизма, которая включает разграбление выводка других семей и разведение пойманных особей в гнезде порабитителя [D'Ettorre et al., 2001]. Впоследствии захваченные особи (так называемые «рабы») встраиваются в деятельность семей-рабовладельцев.

Сам механизм перераспределения аниматов между группами на основе рабовладения был рассмотрен в работе [Karpova, 2019]. Там описаны как основные особенности феномена рабовладения, так и модели и алгоритмы поведения, с помощью которых этот механизм можно реализовать в группах аниматов. Особи из чужой семьи (другой группы) могут рассматриваться как ресурс, добыча которого происходит в ходе фуражировки. В поисках ресурса муравей-разведчик обследует свой сектор территории вокруг гнезда. Затем он возвращается в гнездо и с помощью специальных сигналов мобилизует в поход других муравьев – т.н. пассивных фуражиров: здесь работают механизмы когезии (стремления держаться вместе) и доминирования/подчинения. Мобилизовав фуражиров, разведчики ведут их за собой к чужому гнезду, где вступают в действие два механизма: агрессия и подражательное поведение. Более агрессивные особи (разведчики и фуражиры) вызывают реакцию подчинения у менее агрессивных особей из другого гнезда. Менее агрессивными являются молодые особи, которые принимают позу подчинения – складываются «чемоданчиком» и становятся похожими на куколок. Фуражиры подражают разведчикам, которые воспринимают чужих особей как ресурс, поэтому также переносят их в свое гнездо.

Механизм запуска такой процедуры в данном случае несущественен. Хотя одним их вариантов может быть естественное увеличение

агрессивности (и, соответственно, активности) при снижении количества поступающих в гнездо ресурсов. Тогда разведчики начинают активнее выходить на поиск, фуражиры чаще откликаются на призыв следовать за разведчиками, а их повышенная агрессивность способствует успешному захвату в ходе рейда чужих особей, которые воспринимаются как ресурс.

В процессе передвижения сначала разведчики, а потом и фуражиры должны запоминать маршрут, чтобы иметь возможность вернуться обратно. Для этого был разработан механизм ориентации по наземным ориентирам и компасу, аналогичный тому, что существует у многих видов муравьев. При перемещении анимат запоминает путь по визуальным ориентирам с учетом показаний компаса и временной составляющей. Путь рассматривается как последовательность сцен, образуемых ориентирами, и маршруты как анимата-разведчика, так и фуражира определяются как переходы от ориентира к ориентиру. Мир анимата содержит «базу», неподвижные объекты (ориентиры) и некоторые целевые объекты – «ресурс», который нужно перенести на «базу» (Рис. 1).

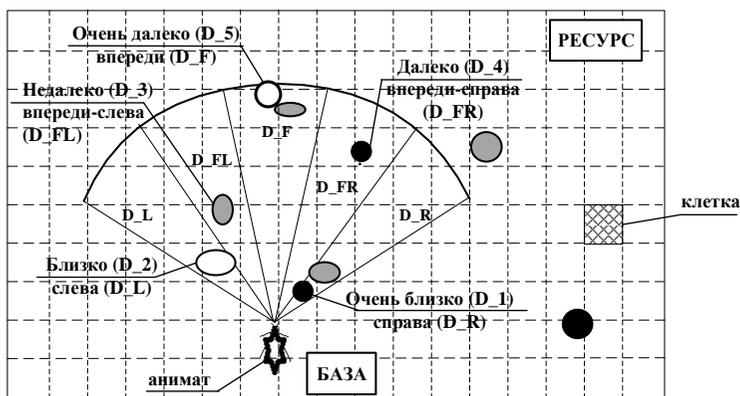


Рис. 1. Представление мира анимата: область видимости, направление, расстояние

Созданная модель поведения анимата оперирует исключительно относительными категориями, без привязки к абсолютным физическим величинам. Для этого полигон виртуально разбивается на клетки, размер которых определяется характерным линейным размером робота (модельным или реальным), а для понятий «расстояние» и «направление» вводятся порядковые шкалы и правила пересчета реальных значений в условные единицы (клетки). Маршрут запоминается «приблизительно», и при повторном прохождении анимат не старается точно повторить его.

Пусть в мире анимата существует множество Ω из N распознаваемых им объектов x_n ; $\Omega = \{x_n\}$, $n=1, \dots, N$. Под *ориентиром* Q понимается один или несколько объектов, образующих компактную группу, т.е. расположенных близко друг к другу:

$$Q = \{x_i\} (\{x_i\} \subset \Omega): \forall x_k \in Q \exists x_m: x_m \in Q, \rho(x_k, x_m) \leq \Delta.$$

Здесь ρ – расстояние между объектами (например, евклидово), а Δ – верхняя граница диапазона «очень близко». Наличие одинаковых ориентиров приводит к необходимости распознавания сцен, а не отдельных ориентиров или объектов. Сцена является совокупностью видимых ориентиров, пространственных отношений между ними, направления по компасу и временной составляющей. При этом сцена определяет поведение анимата и изменение его состояния.

Маршрут описывается как последовательность сцен $\Omega = \{S_j\}$, $j=1, \dots, L_p$, где L_p – количество сцен маршрута. Каждая сцена S_j состоит из множества ориентиров $\{O_i^j\}$, один из которых находится в фокусе внимания и является опорным (относительно него совершаются все действия). Каждый ориентир O_i^j , в свою очередь, состоит из множества наблюдаемых объектов с их характеристиками (контекстом) $W: O_i^j = \{W_k\}$.

$$W_k = \{Id, X, \{(dir_i, dist_i)\}, Compass, Timer\},$$

где Id – идентификатор объекта (например, $AgUco$ -маркер); X – признак опорного ориентира (направление обхода ориентира); $\{(dir_i, dist_i)\}$ – множество пар, хранящих направление и расстояние до левой границы, центра объекта и правой границы соответственно; $Compass$ – значение датчика «компас»; $Timer$ – номера тактов в начале и в конце отрезка пути.

Для сопоставления сцен используются правила псевдофизической (пространственной) логики [Pospelov, 1987] и сравнение ориентиров с учетом контекста (более подробно см. [Карпова, 2022]). Для возвращения на базу описание маршрута Ψ преобразовывалось в обратный маршрут Ψ' . Обратный маршрут состоит из тех же сцен, что и прямой, но в обратном порядке [Карпова, 2023]. Для прямого маршрута конечная точка – искомый ресурс, для обратного – «база». Ориентеры каждой сцены зеркально отображаются слева направо, направление движения меняется на противоположное. При этом короткие сцены пропускаются: это повышает устойчивость анимата (и робота) на маршруте.

Этот метод был интегрирован с механизмом захвата аниматов (агентов) другой группы для перераспределения агентов между группами.

2. Проблема следования за лидером

В процессе интеграции вышеописанных механизмов возникли некоторые, как казалось, сугубо технические сложности при организации группового (стайного) движения. Они были связаны с согласованным перемещением группы (следованием за лидером): группе часто не удавалось двигаться устойчивым строем. В простом случае групповое (стайное) движение с точки зрения МСП организовано следующим образом. Анимат A , который не видит вокруг себя никого, кто был бы

более сильным (агрессивным), реализует свою поведенческую процедуру: в данном случае, идет в нужном ему направлении. Если рядом с аниматором *A* находится анимат *B*, который является менее сильным и агрессивным, то анимат *B* следует за аниматором *A*, признавая его своим лидером.

Очевидно, что такая прямолинейная стратегия не позволяет эффективно решать задачу группового движения. Во-первых, если лидер геометрически находится внутри группы, и все последователи будут стремиться приблизиться к лидеру, то они обступят его со всех сторон, и он не сможет никуда двигаться. Во-вторых, если он будет двигаться во главе группы, то последователи могут потерять его из вида, и тогда группа распадется. Таким образом, тезис о том, что единственное отличие лидера – неподчинению стайному закону, в ряде случаев оказывается несостоятельным [Карпов, 2016]. Лидер не просто выполняет свою задачу (куда-то идет, например), он должен организовать группу, проконтролировать ее движение (иначе группа просто распадется), иными словами – реализовывать специфическую поведенческую процедуру.

Существует множество моделей группового движения агентов, как микро-, так и макро-уровня. Например, в [Dewi et al., 2012] правила стайного движения основаны на модели пружин и амортизаторов. «Пружинная» составляющая модели определяет притяжение особей к лидеру, а «амортизационная» – отталкивание от лидера (на самом деле – это больше похоже на перефразирование модели стайного поведения Рейнольдса). Модели макро-уровня обычно основаны на аналогии движения групп агентов с поведением частиц (гидро- и газо- динамика) [Аптуков и др., 2009].

Для агентного моделирования предлагается набор индивидуальных правил поведения [Pavlovskii et al., 2016], часто используются модели клеточных автоматов ([Степанцов, 2004], [Кузнецов, 2017]), рассматриваются модели с наличием виртуального лидера [Морозова, 2015]. Большой интерес для нас представляет статья [Деревич и др., 2023], в которой предложена стохастическая модель случайного перемещения небольшой группы индивидов. По словам авторов, эта модель учитывает социальное поведение индивидов в группе, снижающее вероятность их близкого физического контакта и столкновений с внутренними препятствиями. Уравнения движения индивидов записаны в виде системы обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений (СОДУ). Направление и скорость желаемого перемещения индивида описывается структурированным во времени случайным процессом. А социальное поведение и взаимодействие индивидов с препятствиями моделируется эффективным потенциалом. Таким образом, об учете социального поведения можно говорить только условно, потому

что никаких моделей социального поведения здесь нет, а есть имитация отдельного феномена чисто математическими методами.

На самом деле, подобные многопараметрические модели в рамках МСП не применимы. Мы не решаем задачу расчета оптимальных траекторий, минимизации конфликтов и т.п. Агенты руководствуются исключительно примитивными правилами движения, по типу тех, которые были определены в классической работе Рейнольдса [Reynolds, 1999]: согласование скорости, предотвращение столкновений с соседями и притяжение к соседям. И нас интересует лишь качественное подтверждение необходимости наличия у модельных особей аналогичных правил. Сначала рассмотрим этот вопрос с формальной стороны. Поскольку при описании характера движения агентов мы опираемся на правила Рейнольдса, формальное качественное обоснование неизбежных девиаций при движении строя может выглядеть следующим образом.

Движение группы всегда имеет меньшую скорость, чем движение отдельного агента (лидера). Это обусловлено такими факторами, как необходимость (1) ориентироваться на лидера и (2) предотвращать возможные столкновения, что требует дополнительных затрат времени.

Будем полагать, что известны:

- скорость движения агента V_{max} (для простоты – одинаковая для всех);
- $T_{a/d}$ – время, которое агент тратит на торможение и ускорение (будем считать, что он трогается с места и разгоняется до V_{max} , а также тормозит до полной остановки за одинаковое время);
- затраты времени T_{ins} на осмотр, который проводит лидер;
- R_{max} – расстояние, на котором агенты видят друг друга;
- расстояние R_{min} , на котором агенты должны держаться друг от друга для предотвращения столкновений ($R_{min} \ll R_{max}$).

Требуется определить такой закон движения лидера, чтобы обеспечить максимальную скорость движения всей группы.

Пусть лидер движется по прямому маршруту с максимальной скоростью ($V_L = V_{max}$). Результирующая скорость группы V_{gr} ниже скорости движения лидера V_L по следующим причинам. При сближении агентов на расстояние меньше R_{min} у них запускается процедура предотвращения столкновений: если агент видит другого агента впереди, то он должен остановиться и отъехать назад; если видит сбоку – повернуть в противоположную сторону. После этого он вернется к процедуре следования за лидером, и начнет двигаться вперед (или поворачивать обратно). Следовательно, пройденный им путь будет длиннее. Оценим время, которое агенты тратят на прохождение пути. Пусть T_{min} – минимальное время прохождения маршрута длиной L со скоростью V_{max} при движении по прямой: $T_{min} = L/V_{max}$.

Тогда реальное затраченное агентом время T_{real} можно оценить так:

$$T_{real} \approx \left(T_{min} + T_{turn} + T_{a/d} + \frac{\Delta L}{V_{max}} \right) > T_{min}. \quad (2.1)$$

Здесь T_{turn} – время, в течение которого агент совершает поворот; $T_{a/d}$ – время, которое агент тратит на торможение и ускорение; ΔL – дополнительное расстояние, которое агент должен пройти из-за маневров. В реальности маршрут пролегает не по прямой из-за наличия препятствий, но обход препятствий совершают все члены группы, и скорость прохождения маршрута при этом становится еще ниже.

Поскольку скорость движения у всех агентов одинакова, а группа, как показано выше, имеет результирующую скорость $V_{gr}=(L+\Delta L)/T_{real}$ (2.1), которая ниже скорости движения лидера V_L , то единственный способ согласования этих скоростей – это введение пауз в движении лидера. Паузы определяются двумя параметрами – их частотой F и длительностью T_{stop} . Необходимо определить для лидера частоту остановок F и длительность этих остановок T_{stop} при условии, что лидер не должен удаляться от группы больше, чем на R_{max} , и ближайший к лидеру последователь не должен приближаться к нему меньше, чем на R_{min} .

Затраты времени T_{ins} на осмотр складываются из:

$$T_{ins} = 2T_{a/d} + T_{turn} + T_{stop},$$

где $T_{a/d}$ – время торможения и разгона; T_{turn} – время на поворот, чтобы увидеть последователей ($T_{turn}=0$, если у агента всенаправленная система технического зрения); T_{stop} – продолжительность остановки.

Для решения задачи контроля связности группы можно:

А) Задать частоту остановок F и менять T_{stop} в зависимости от расстояния до ближайшего последователя: близко – сокращать T_{stop} , далеко – увеличивать.

Б) Зафиксировать время остановки T_{stop} и менять частоту в зависимости от расстояния.

В экспериментах по имитационному моделированию, которые описаны в п.3, применялся вариант А). Частота остановок была определена из следующего соотношения. Лидер удаляется от последователей со скоростью $(V_{max} - V_{gr})$. При этом расстояние между лидером и ближайшим последователем должно оставаться в пределах $[R_{min}, R_{max}]$, чтобы оставаться в поле видимости. Тогда время, через которое лидер должен остановиться и осмотреться, должно находиться в границах:

$$\frac{R_{min}}{V_{max} - V_{gr}} + T_{a/d} < F < \frac{R_{max}}{V_{max} - V_{gr}} - T_{a/d}. \quad (2.2)$$

Аналогичные эффекты уменьшения скорости лидера, ведущего группу, наблюдаются в природе. Например, у стаи рыб особь, плывущая впереди стаи, движется не с максимальной скоростью: она должна преодолевать

большее сопротивление среды. И если у рыб это происходит в силу законов гидродинамики, то у социальных насекомых это является частью социального поведения. У муравьев такой феномен хорошо описан при движении тандемом, когда разведчик (лидер) ведет за собой одного фуражира (последователя). Для того чтобы муравей-последователь узнал и запомнил ориентиры, лидер должен двигаться намного медленнее, делать частые остановки и оборачиваться назад [Davies et al., 2012]. Так лидер контролирует своего последователя, и речь идет как раз о моделях социального поведения. Скорость движения тандема гораздо ниже, чем у отдельного муравья. Например, у муравьев *Temnothorax albipennis* тандем движется примерно в 4 раза медленнее, чем отдельный фуражир [Franks et al., 2006]. В экспериментах для оценки F (2.2) принималось, что $V_{gr}=0.5V_{max}$, и за значение F бралась середина полученного интервала.

Таким образом, в процессе решения задачи следования за лидером оказалось, что это вовсе не технические проблемы, и они могут быть решены также в рамках биоинспирированного подхода. Хотя чисто внешне это выглядит как специальный технический прием: анимат (робот) должен периодически останавливаться и оценивать расстояние до последователей, если он "считает себя лидером" и ведет за собой группу.

3. Эксперименты по имитационному моделированию

Имитационное моделирование проводилось на системе многоагентного моделирования Kvorum [Карпов и др., 2018]. В экспериментах создавалось две группы аниматов – **А** и **Б**, одна из которых – группа **А** – нуждалась в новых членах. Для организации совместных действий аниматы должны распознавать друг друга и различать своих и чужих. Пусть каждому анимату соответствует некоторый номер – идентификатор Id . Этот номер генерируется автоматически в начале работы. Значения идентификаторов разделены на диапазоны – по одному на группу, и принадлежность значения Id к диапазону определяет принадлежность анимата к группе. Аниматы постоянно генерируют сигнал, значение которого равно Id . Восприняв этот сигнал, они могут понять, кто перед ними: свой или чужой. Более того, величина Id интерпретируется как ранг анимата и зависит от его внутреннего состояния (уровня агрессивности).

В эксперименте сначала разведчик группы **А** выходил с «базы» на поиск ресурса – «базы» группы **Б**, затем возвращался обратно и подавал сигнал, равный его Id . Фуражиры группы **А**, воспринявшие этот сигнал, определяли, что сигнал от агента с более высоким рангом, входящего в ту же группу. Реакция на такой сигнал – следование за лидером. Затем разведчик повторял путь по запомненному маршруту, контролируя следующих за ним фуражиров во время периодических остановок. Дойдя

по «базы» группы Б, разведчик и фуражиры пытались осуществить акты захвата членов этой группы. Для этого использовался следующий механизм подчинения [Карпова, 2019]. Активный фуражир воспринимает и пищу, и пассивного муравья другого вида как ресурс. Но он не может изменить другую особь и перевести ее из активного состояния в пассивное: это должна быть инициатива того, кто подчиняется. Поэтому при встрече с агрессором слабый муравей (менее агрессивный, более молодой) принимает позу подчинения. Это означает изменение внутреннего состояния анимата, приводящее к уменьшению его ранга (его Id) и генерируемого сигнала. Этот сигнал превращает слабого анимата в ресурс, привлекательный для фуражира. И фуражир должен доставить этот «ресурс» на свою «базу». (В данном случае фуражир просто вел захваченного анимата на свою «базу», как лидер в тандеме).

Пример запуска моделирующей программы приведены на Рис. 2 (прямоугольники – ориентиры, шестиугольники – «базы» групп). Из примера видно, что не все аниматы группы А последовали за лидером (Рис.2,б), и не все дошли: один отстал и вернулся на «базу» (Рис.2,в).

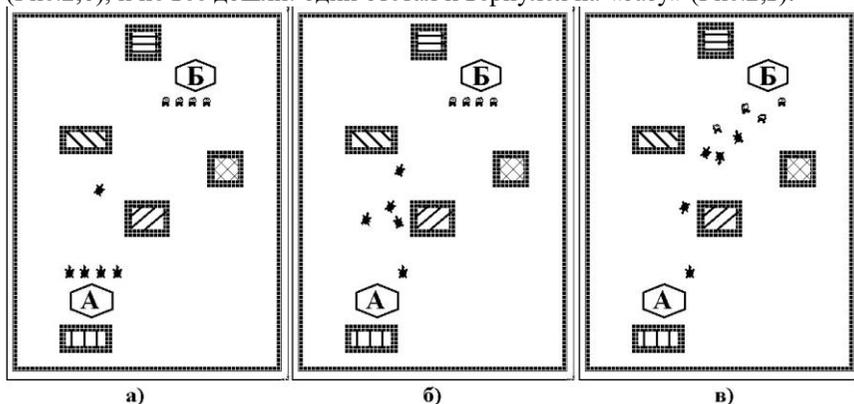


Рис. 2. Пример имитационного моделирования: а) разведчик выполняет поиск; б) разведчик (лидер) ведет группу фуражиров за собой; в) аниматы другой группы следуют за фуражирами

Приводить статистические данные о результатах экспериментов и давать им оценки не имеет особого смысла. При моделировании в зависимости от значений параметров модели можно получить любые данные: от минимальной подверженности аниматов «порабощению» до полного перехода всех аниматов в одну группу. Но перед этими экспериментами стояла другая задача. Они были призваны подтвердить возможность интеграции и работоспособность разработанных моделей и алгоритмов. Данная цель была достигнута.

Заключение

Был разработан и реализован механизм, который позволяет достаточно естественным образом, без привлечения специальных приемов и централизованных методов, перераспределять агентов (роботов) между группами, с помощью простых правил поведения, аналогичных тем, которые используют, в частности, социальные насекомые.

Список литературы

- [Bayram et al., 2016] Bayram H., Bozma H.I. Coalition formation games for dynamic multirobot tasks // Int. J. Rob. Res. 2016. Vol. 35, No. 5.
- [D’Ettorre et al., 2001] D’Ettorre P., Heinze J. Sociobiology of slave-making ants // Acta Ethol. 2001. Vol. 3, No. 2.
- [Davies et al., 2012] Davies N.B., Krebs J.R., West S.A. An Introduction to Behavioural Ecology: Wiley-Blackwell, 2012. Iss. 4.
- [Dewi et al., 2012] Dewi T., Risma P., Oktarina Y. Wedge Formation Control of Swarm Robots // 14th Ind. Electron. Semin. Electron. Eng. Polytech. Inst. Surabaya (EEPIS), Indones. 2012. No. Ies.
- [Franks et al., 2006] Franks N. R., Richardson T. Teaching in tandem-running ants // Nature, 2006. Vol. 439, No.7073.
- [Irfan et al., 2016] Irfan M., Farooq A. Auction-based task allocation scheme for dynamic coalition formations in limited robotic swarms with heterogeneous capabilities // 2016 Int. Conf. on Intelligent Systems Engineering, ICISE 2016.
- [Karpova, 2019] Karpova I. Redistributing Animats between Groups // Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1093. / be ed. S. Kuznetsov, A. Panov. Springer, Cham, 2019.
- [Lope de et al., 2015] Lope de J., Maravall D., Quiñonez Y. Self-organizing techniques to improve the decentralized multi-task distribution in multi-robot systems // Neurocomputing. 2015. Vol. 163.
- [Patsias et al., 2023] Patsias V., Amanatidis P., Karampatzakis D., Lagkas T., Michalakopoulou K., Nikitas A. Task Allocation Methods and Optimization Techniques in Edge Computing: A Systematic Review of the Literature // Futur. Internet. 2023. Vol. 15. No. 8.
- [Pavlovskii et al., 2016] Pavlovskii V.E., Pavlovskii V.V. A mathematical model of a 2D homogeneous swarm of robots // Sci. Tech. Inf. Process. 2016. Vol. 43.
- [Reynolds, 1999] Reynolds C.W. Steering behaviors for autonomous characters // Game Dev. Conf. 1999.
- [Reznikova, 2011] Reznikova Z.I. Division of labour and communication at the individual level in highly social Formica ants (Hymenoptera: Formicidae) // Russ. Entomol. J. 2011, Vol. 20(3).
- [Rizk et al., 2019] Rizk Y., Awad M., Tunstel E. W. Cooperative Heterogeneous Multi-Robot Systems : A Survey // ACM Comput. Surv. 2019, Vol. 52, No.2.
- [Аптуков и др., 2009] Аптуков А.М., Брацун Д.А. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2009, № 3(29).

- [Деревич и др., 2023] Деревич И.В., Панова А.А. Стохастическая модель движения группы индивидов в ограниченном пространстве с учетом их социального поведения // Математическое моделирование, 2023. Т. 35, № 6.
- [Карпов, 2016] Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами, 2016, № 59.
- [Карпов и др., 2019] Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019.
- [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, № 31(3).
- [Карпова, 2019] Карпова И.П. Перераспределение аниматов между группами // Труды XVII-й Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2019), 21-25 октября 2019 г., Ульяновск.
- [Карпова, 2022] Карпова И.П. Об одном биоинспирированном подходе к ориентации роботов, или настоящий «муравьиный» алгоритм. // Управление большими системами, 2022, № 96.
- [Карпова, 2023] Карпова И.П. К вопросу об ориентации роботов на основе визуальных ориентиров и компаса // Труды XXI-й Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023), 16-19 октября 2023 г., Смоленск.
- [Кузнецов, 2017] Кузнецов А.В. Модель совместного движения агентов с трехуровневой иерархией на основе клеточного автомата // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2017. Т. 57, № 2.
- [Морозова, 2015] Морозова Н.С. Управление движением строя для мультиагентной системы, моделирующей автономных роботов // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика, 2015. Т. 4.
- [Степанцов, 2004] Степанцов М.Е. Математическая модель направленного движения группы людей // Математическое моделирование. 2004. Т. 16, № 3.

A BIO-INSPIRED METHOD OF REDISTRIBUTING AGENTS BETWEEN GROUPS

Irina P. Karpova (*karpova_ip@mail.ru*)

HSE University, 20 Myasnitskaya Ulitsa, Moscow, Russia

The paper considers the solution of the problem of redistribution of agents between groups based on imitation of such a form of social parasitism in ants as slavery. The redistribution method is integrated with the method of orientation by visual landmarks and compass with route memorization and return. It has been shown that even technical problems, such as following a leader, can be solved using bio-inspired mechanisms.

Keywords: group robotics, social behavior models, group movement, following the leader, ant slave-making, aggressive behavior, foraging task