

# Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное

*Карпов В.Э., к.т.н., доцент*

*Московский государственный институт электроники и математики*

*e-mail: karpov-ve@yandex.ru*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Идея создания сложной системы, состоящей из множества сравнительно простых устройств, всегда была привлекательна. Ей отдавали дань философы и писатели-фантасты, математики и технические специалисты. Действительно, решение сложной задачи "простыми" с технической точки зрения средствами, появление "сверхорганизма" ознаменовало бы явную ступень эволюции технических объектов.

Как водится, в следующий абзац следовало бы включить слова: *"Особенно актуально... Сознанный к настоящему времени математический аппарат, методы,... Развитие микроэлектроники... Все это позволяет..."* и т.п. Однако не будем спешить с выводами и посмотрим на проблематику коллективного поведения роботов более критически. Главным образом, попробуем разобраться с тем, что реально лежит в основе таких систем.

Итак, образование сложной системы, состоящей из простых составляющих (своего рода диалектический переход количества в качество, реализация синергетического подхода, появление эмерджентности – системного эффекта, – и проч., проч.), все это безусловно приводит (должно привести) к созданию систем, обладающих следующими важнейшими особенностями:

- повышение надежности (утрата части членов коллектива не влияет на работоспособность всей системы в целом).
- гибкость (способность системы к реконфигурации).
- потенциальная возможность развития и усложнения решаемых задач путем наращивания мощности коллектива.

Современные приложения использования коллективного поведения роботов (физических, не программных) весьма многогранны:

- командная работа роботов по диагностике труднодоступных объектов,

- мониторинг окружающей среды,
- коллективное решение задач роботами–спасателями,
- разведка и рекогносцировка,
- охранные функции, патрулирование,
- и т.д.

Особенно важно коллективное взаимодействие роботов тогда, когда мы имеем дело с мини- и микро-роботами. Будучи крайне ограниченными в своих возможностях, эти роботы способны решить поставленную задачу лишь при их массовом применении.

Очевидно, что существует целый ряд специфических проблем, характерных для коллективной работы роботов. Среди них можно отметить такие, как:

- Непредсказуемая динамика внешней среды вплоть до сознательного противодействия.
- Неполнота и противоречивость знаний роботов (агентов) о состоянии внешней среды и о других участниках.
- Многообразии вариантов путей достижения цели, структур коллектива, распределения ролей и т.д.
- Распределенный и динамический характер планирования действий коллектива.
- Проблемы, связанные с тем, что коллектив представляет собой совокупность физических объектов, действующих в реальной сложной среде (проблемы надежной коммуникации, распределенность коллектива в пространстве и проч.).
- Прочие технические проблемы (архитектура сети, протоколы, операционные средства и т.д.).

Далее мы рассмотрим некоторые наиболее показательные примеры систем, которые либо реально работают, либо (что чаще) представляют собой впечатляющие демонстрации.

## **2. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ СИСТЕМ**

Примеров систем, реализующих коллективное поведение действительно немало. К сожалению, далеко не всегда ясны механизмы, лежащие в основе демонстрируемых коллективов роботов – об этом чаще всего приходится лишь догадываться на основе косвенных признаков. Если же речь в найденном материале идет об описании именно механизма (метода, алгоритма, принципа), то в большинстве своем это, напротив, - хороший теоретический материал, имеющий слабый экспериментальный базис.

Начнем с исследовательских проектов.

**Проект I-SWARM.** В Университете Карлсруэ, Германия, разрабатываются мультиагентные сообщества микророботов с размером порядка 1см<sup>3</sup>. Разработка финансируется Европейским союзом.

**Multi Robot Systems.** Университет Алберты в Эдмонтоне, США. Исследования коллективного поведения роботов. Разработка систем из нескольких роботов. Проект посвящен задачам коллективного принятия решений.

**Проект SwarmBot.** Американская компания iRobot занята разработкой небольших роботов, способных сообща выполнять определенные действия, объединяясь в группы численностью до десяти тысяч и выполнять такие задачи, как, например, поиск мин, исследование неизвестных территорий и пр.

Если говорить о примерах *реальных систем*, точнее, об их прототипах, то это прежде всего – системы военного назначения.

Наиболее интенсивно подобного рода работы проводятся по линии DARPA, причем уже давно.

**Проект DARPA-2003.** В рамках проекта был создан отряд из 120 роботов. Основная задача проекта – реализация коллективного (или распределенного) решения тактических и разведывательных задач. Для координации действий отдельных роботов были использованы относительно простые правила поведения, основанные на локальном взаимодействии роботов. Сами роботы построены компанией I-Robot.

**Проект Centibots.** Центр компьютерных наук и инжиниринга университета Вашингтона, 2004 г. Пожалуй, это один из первых реальных проектов, реализующий технологии организации взаимодействия и целенаправленного поведения большого числа автономных роботов. Решалась задача коллективной рекогносцировки помещений. Роботы взаимодействуют между собой и в зависимости от обстоятельств автоматически перераспределяют роли.

**Артиллерийская система NLOS-LS (2010 г).** Корпорации Lockheed Martin и Raytheon создают артиллерийскую систему нового поколения NLOS-LS. Заряды смогут объединяться в воздухе в интеллектуальную сеть и с максимальной эффективностью поражать объекты противника, расположенные вне зоны прямой видимости. На разработку проекта Пентагон выделил \$1,1 млрд.

Рассмотрим прочие, менее серьезные проекты, носящие исследовательский характер, но доведенные до некоторого реального уровня.

**Открытый проект SwarmRobot.** Проект ([swarmrobot.org](http://swarmrobot.org)) посвящен созданию минироботов с линейными размерами до 3 см,

которые могут организовывать масштабируемые коллективы из десятков и сотен роботов (рис.1, а).

**Проект Swarmanoid** (Брюссельский свободный университет -Universite Libre de Bruxelles). Основная задача проекта – исследование поведения неоднородных коллективов роботов.

**Эволюционирующие роботы.** В 2009 г. в шведской лаборатории Laboratory of Intelligent Systems (политехническая школа, Лозанна) были проведены исследования в области "эволюции" роботов. Эволюционировал геном робота, определяющий поведение. В экспериментах группа из 10 роботов состязалась за пищу. Роботы – это колесные платформы (т.н. s-боты) (рис.1, в).

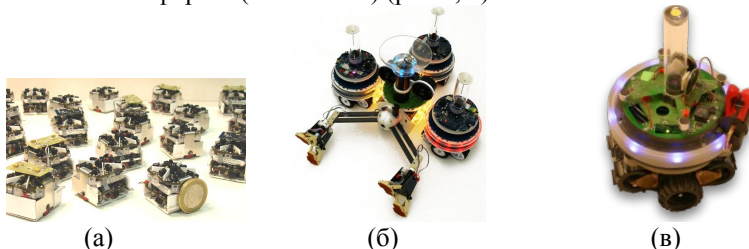


Рис.1. (а) Мини-роботы SwarmRobot; (б) роботы Swarmanoid; (в) s-бот

Мы сознательно не говорили о **робофутболе**. С одной стороны, футбол роботов – как нельзя более удачный пример коллективного взаимодействия. Более того, это направление развивается весьма успешно вот уже не одно десятилетие. Одна только ассоциация RoboCup насчитывает 5 основных и 3 дополнительные лиги. Тем не менее, робофутбол не интересен для нашего обзора в силу того, что применяемые в нем методы и решения носят частный, зачастую сугубо технический характер. Робофутбол, как направление – это реципиент, а не донор идей.

### 3. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

В названиях большинства приведенных выше проектов фигурирует слово *swarm* – рой, стая. Действительно, многие исследования черпают свое вдохновение из мира насекомых, многие из них постоянно проводят аналогии с колониями муравьев, пчел и прочих стайных животных. Но, разумеется, реализуются и исследуются и другие модели.

На сегодняшний день исследования в области коллективного поведения роботов можно разбить на следующие направления:

1. "Строгое" математическое решение. Речь идет об исследованиях в области теории систем, создании формальных моделей и механизмов коллективного поведения.
2. Технологии многоагентных систем (МАС).
3. Имитационное моделирование, т.е. реализация моделей взаимодействующих субъектов (роботов), при этом за основу берутся биологические объекты. Сюда же можно отнести и исследования в области т.н. искусственной жизни.
4. Роевые, пчелиные и муравьиные алгоритмы. Это методы, исследующие внешние, сугубо феноменологические стороны поведения живых организмов. Подобного рода методы и алгоритмы лежат в основе т.н. роевого интеллекта.
5. Эволюционные методы. Основная задача – реализация эволюционным путем механизмов внутривидового (внутрироевого) взаимодействия.

### ***3.1. Формальные модели коллективного поведения***

**Автоматные модели.** В 60-е гг. 20 века сформировалась школа, изучающая различные модели поведения на основе конечных автоматов. Основным тезисом являлось: *любое достаточно сложное поведение складывается из совокупности простых поведенческих актов* [Цетлин, 1969]. Яркими представителями этого направления являются ее основоположник М.Л. Цетлин, В.И. Варшавский, В.Л. Стефанюк, Д.А. Поспелов и др.

Исследуя разнообразные формы поведения, начиная от условно-рефлекторного, и заканчивая моделями коллективного поведения, был создан теоретический фундамент для описания коллективного взаимодействия объектов самой разной природы.

В рамках коллективного поведения автоматов рассматривались задачи распределения ресурсов между участниками, особенности организации однородных коллективов, поведение неоднородных структур (вводился ранг рефлексии участников) и т.п. Решались также задачи синхронизации взаимодействия членов коллектива (автоматов). Именно на базе подобных моделей был создан фундамент сотовой связи (задача о коллективе радиостанций, которым надо "договариваться" между собой о мощности своих сигналов) [Стефанюк, 2004]. Именно эти модели и методы (см., например, [Варшавский и др., 1984], [Гаазе-Раппопорт и др, 1987]) стали основой для построения многих децентрализованных коллективных систем, моделей индивидуального и коллективного поведения.

Пожалуй, теория коллективного поведения автоматов до сих пор является одной из очень немногих строгих, формальных моделей подобного рода систем.

### **3.2. Многоагентные системы**

Теория многоагентных систем (МАС) естественным образом претендует на то, чтобы стать основой для реализации коллективного поведения роботов. Действительно, понимая под агентом некую "разумную" сущность, способную к рациональному поведению, и в качестве которой может выступать робот, можно поставить знак равенства между МАС и задачей согласованного коллективного поведения технических устройств.

Наиболее близкими к теории МАС можно считать задачи организации командной работы (такое поведение, которое целиком подчинено достижению общей командной цели).

Речь идет о том, что в команде ее участники (роботы, агенты) берут на себя обязательство стремиться к достижению командной цели, а сама цель системы декомпозируется (в пространстве и времени) на множество взаимосвязанных подцелей, достижение которых возлагается на различных агентов команды. Разумеется, распределение подцелей между членами команды, а также координация их поведения должны выполняться средствами самой команды, без какого-либо внешнего вмешательства.

Агент, как сущность, помимо прочего характеризуется такими свойствами, как наличие общих и индивидуальных обязательств и намерений, способностью к планированию, коммуникации, согласованию и т.д. Поэтому в МАС активно применяются такие теории, как теория общих намерений, теория общих планов, теория игр и т.п.

**Теория общих намерений.** Основными понятиями теории общих намерений являются: события; убеждения; цели; взаимные убеждения. Для описания поведения команды агентов используются как индивидуальные, так и общие *обязательства и соглашения*. В свою очередь *общие (коллективные) обязательства и соглашения* определяются так, чтобы они описывали действия группы агентов, как одного агента. Разумеется, для коллективной работы между общими и индивидуальными намерениями агента должна существовать тесная связь.

Слабость теории общих намерений заключается в том, что она не конкретизирует алгоритмические средства планирования командной

работы и не определяет средства для динамического пересмотра плана и обновления его оставшейся части.

**Теория общих планов**, напротив, ориентирована прежде всего на построение конкретных планов, а не на формирование команды и общей дисциплины взаимодействия агентов. Теория использует понятие общих и индивидуальных обязательств и соглашений.

Базовые понятия теории: групповой план и индивидуальные ментальные понятия агентов. Согласование же индивидуальных действий и планов групп агентов выходит за рамки теории.

Итак, недостатком теории общих планов является отсутствие конкретизации способа построения общего плана.

**Комбинированные модели.** Разумеется, имеются попытки создания различного рода комбинированных моделей командной работы агентов, которые объединяли бы достоинства теории общих планов и теории соглашений. Однако и такие модели обычно не представляют возможностей динамического изменения плана и коллективной обработки непредвиденных ситуаций.

**Основные проблемы** и ограниченность применения подобного рода теорий хорошо иллюстрируется следующими вполне конкретными и реальными ситуациями [Городецкий и др., 2011]:

- Агент не в состоянии выполнить назначенное действие.
- Требуемое действие может оказаться невыполнимым для агентов, и нужно выбирать новый план достижения цели.
- Возникновение непредвиденной ситуации при исполнении действия.

Коллективная обработка непредвиденных ситуаций и возможность изменения сценариев вообще не рассматривается в известных работах. Более того, известные методы не рассчитаны на специфику командной работы агентов в условиях *противодействия*.

**Языковые проблемы.** Основные трудности создания коллективных систем, согласованно решающих общие задачи, носят прежде всего *языковой характер*.

Существует целый ряд формальных языков для описания взаимосвязанных потоков действий (работ). Это сети Петри, цепи процессов, управляемых событиями (Event-Driven Process Chain), сети потоков работ (Workflow Net) и т.д. Общие недостатки существующих формальных языков связаны с тем, что ни один из них не обладает выразительными возможностями, необходимыми для спецификации планов *командного* поведения агентов.

Поэтому очевидно, что в теории МАС именно разработке новых языков посвящено большое количество работ. Например, в

[Городецкий, 2010] предлагается следующая модель описания и планирования командной работы агентов.

Как и в теории общих намерений, для формирования команд агентов используется протокол общих намерений, определяющий обязательства и соглашения агентов команды. Как и в теории общих планов, используются понятия группового плана и индивидуального планов, а также понятие действия. Все множество возможных планов представляется в т.н. сценарной базе знаний.

Для описания сценарных баз знаний разработан специальный язык описания процессов. При этом каждое сложное действие представляется синтаксической структурой сценарной базы знаний.

**Пример системы.** В [Городецкий, 2010] описана командная работа подводных роботов при охране припортовой зоны подводного пространства. Здесь подводное пространство патрулируется несколькими автономными подводными роботами (АПР). Каждый АПР имеет средства обнаружения подводных объектов и средства их активного зондирования с целью идентификации типа (мина, пловец, безопасный объект и др.). Если АПР обнаруживает неизвестный объект, то он формирует команду (используя протокол общих намерений) для его более глубокого совместного исследования. АПР принимают на себя обязательства и соглашения, а также договариваются о зонах и ракурсах съемки объекта. Затем члены команды автономно решают задачи, принимают локальные решения и пересылают их АПР-инициатору.

Итак, говоря о технологии МАС применительно к задаче коллективного управления роботами, можно сделать следующие выводы:

- Теория МАС – это прежде всего некая парадигма, технология решения задачи. В этом смысле теория МАС претендует на некоторую общность, комплексность.
- Основной упор делается на описание сценариев взаимодействия роботов как агентов.
- Подразумевается, что участниками коллектива являются интеллектуальные, сложные роботы.

### *3.3. Имитационные модели*

В этом направлении за основу берутся модели биологических объектов (своего рода бионическая парадигма). Считается, что получение адекватных моделей тех же насекомых позволит реализовать естественным образом и их стайное (роевое) поведение.



Однако проблема состоит в том, что насекомые – очень непростой объект для исследований. Например, нервные клетки муравьев и пчел – любимых объектов для подражания – малы по размеру и трудны для изучения. А главное, этих нервных клеток очень много. Если центральная нервная система такого простого объекта, как виноградная улитка, содержит около 10 тыс. нейронов, то у муравьев общее количество нейронов – порядка 1 млн. При этом изучение той же улитки также сопряжено с большими сложностями. В основном опыты проводятся на командных нейронах (нейронах оборонительного рефлекса и мотонейронах).

Попытки же раскрытия интересующих нас интегративных механизмов, лежащих в основе коллективного поведения, основаны прежде всего на длительных высокоточных наблюдениях. Таким же образом изучаются механизмы восприятия информации.

Муравей, повторим, – это один из основных "источников вдохновения" в исследованиях коллективного поведения. Однако на самом деле муравей – это одни из наиболее неудачных примеров для изучения коллективных форм. Он слишком сложен.

## **Муравей**

В качестве примера из известных примерно 8000 видов муравьев рассмотрим наиболее распространенного в наших широтах рыжего лесного муравья из рода *Formica*. Далее дадим его характеристику в форме краткой справки ([Длусский, 1967], [Захаров, 1978]).

**Центральная нервная система (ЦНС).** Всего нервная система муравья содержит порядка 1 млн нейронов, из них собственно в мозгу – т.н. надглоточном ганглии – порядка 500 тыс.шт. Именно там образуются *временные* связи, а зоны мозга, отвечающие за способность к образованию условных рефлексов, у рабочих *Formica* составляют 1/2 объема мозга.

**Сенсорная система весьма развита.** Это запах и вкус, слух и зрение. Область точного зрения муравья не превышает 1-2 см. При этом, как и большинство "простейших", муравьи видят прежде всего не форму, а движение и цвет. Сами органы зрения представлены большими фасеточными глазами и тремя простыми глазками, функция которых пока не очень ясна.

**Ориентация и память.** Муравьи способны запомнить относительное расположение каких-либо выдающихся предметов в ландшафте (камней, палочек и т.д.) и выстраивают свой маршрут по этим ориентирам. Судя по всему, муравьи обладают фотографической памятью, которая помогает им ориентироваться в пространстве.

**Деятельность муравьев** крайне разнообразна. Это и разведение тлей и собирательство (сбор семян и их хранение), охота, выращивание грибов, охрана своих плантации от вредителей и т.д.

**Взаимодействие муравьев.** Основные каналы взаимодействия между особями – это пищевой и сигнальный. Муравьи регулярно обмениваются пищей — кормят друг друга (т.н. трофаллакис). При этом происходит обмен ферментами. Изменения содержания различных ферментов в пищевой цепи определяет рост и развитие молоди, стимулирует взрослых муравьев к переходу в ту или иную профессиональную группу.

**Профессии и психологические склонности.** У муравьев наблюдается узкая специализация каждой особи (в мирмекологии это называется полиэтизмом). Основа для специализации рабочих муравьев - их физиологическое состояние и психические наклонности. Например, более инициативные становятся разведчикам или охотниками, крупные – солдатами, а прочие – обслуживающими рабочими и фуражирами. При этом муравьи способны в случае необходимости менять профессии.

**Обучение и профессиональный рост.** В семье одновременно присутствуют особи нескольких поколений, при взаимодействии которых происходит обучение начинающих фуражиров более опытными. В основе способности муравьев к обучению лежит хорошая память и реакции подражания.

**Механизмы социального образования.** По мере роста муравейника происходит усложнение его социальной организации. Сначала внутри муравейника формируются колонны – обособленные подгруппы муравьев. Затем строятся вспомогательные гнезда (т.н. поликалия). Далее от муравейника отпочковывается его часть - колония, причем дочерни колонии платят "дань" – часть пищи отправляется в материнское гнездо.

Длительный процесс образования отводков (колоний) ведет в конечном счете к перенаселению. И тогда формируются федерации – своего рода панмуравейник. Задача федерации – ограничение общей численности муравьев в системе. Федерация – высшее достижение социальной организации у муравьев. Устойчивость федерации значительно выше, чем обособленной колонии. Причем все это достигается одними и теми же средствами – обменами.

### **Механизмы реализации**

Рассмотрим далее некоторые возможные механизмы, могущие лежать в основе моделей деятельности муравьев.

**Допущение об инстинктивных реакциях.** При этом подходе считается, что муравьи по отдельности и колонии в целом описываются лишь жесткими инстинктами. Однако в "чистом виде" стимул-реактивная организация управления пригодна лишь для решения простейших индивидуальных задач, а нас же интересуют муравьиные сообщества.

**Распределенный мозг.** Весьма экзотической теорией, пытающейся объяснить механизм управления муравьиным сообществом, является теория распределенного мозга. Согласно этой теории, в муравьином сообществе существуют носители этого "распределенного мозга" – т.н. "ленивые" муравьи, составляющие около 20% от состава муравьиной семьи и не принимающим участия в трудовой деятельности. Механизм же коммуникации внутри распределенного мозга и между мозгом и прочими членами социума является совершенно неизученным.

**Центральные моторные программы.** На самом деле, вместо моделирования целого ансамбля из 1 млн. нейронов можно реализовать ограниченное количество функциональных блоков (подсистема распознавания, ориентации, коммуникации, обучения, выполнения действий и т.п.). Дело не в формировании из этих блоков или подсистем хорошо известной структуры интеллектуального робота. Речь идет о реализации идеи многоуровневого иерархического управления. Эта идея применительно к построению движений была сформулирована Н.А. Бернштейном (*пирамидная двигательная система*) еще в 30-40-е гг. прошлого века ([Бернштейн, 1997]). По такому же принципу, используя хорошо изученный нейрофизиологами механизм центральных моторных программ, можно строить и системы управления роботами [Карпов, 2007].

В этом случае вместо реализации всей совокупности нейронов можно обойтись моделированием целых их фрагментов и областей.

Кроме того, даже такие аспекты, как *психологические особенности поведения* муравья также могут быть промоделированы достаточно простыми средствами, что было подтверждено рядом экспериментов ([Карпов, 2010]).

Так что в этом смысле создается впечатление, что построение модели муравья – это достаточно реальная выполнимая задача. Правда, в результате мы получим в лучшем случае более или менее адекватную модель особи, а вопросы реализации механизма социального поведения, образования сложных социальных форм и т.п. останутся все равно открытыми.

### 3.4. Роевые алгоритмы

Роевые алгоритмы и методы зачастую относят к методам т.н. роевого интеллекта. Задачей роевого интеллекта (РИ) является изучение и описание коллективного поведения децентрализованной самоорганизующейся системы, при этом методы РИ рассматриваются прежде всего как некие специфические механизмы поисковой оптимизации. Большинство алгоритмов РИ относятся к классу метаэвристик.

Системы РИ состоят из множества агентов (многоагентная система), локально взаимодействующих между собой и с окружающей средой. Сами агенты обычно довольно просты, но все вместе, локально взаимодействуя, создают так называемый роевой интеллект. Ниже представлен перечень некоторых алгоритмов РИ, названия которых хорошо отражают суть подхода к решению задач:

- Муравьиный алгоритм.
- Метод роя частиц.
- Пчелиный алгоритм.
- Оптимизация передвижением бактерий.
- Стохастический диффузионный поиск.
- Алгоритм гравитационного поиска.
- Алгоритм капель воды.
- Светляковый алгоритм.

Характерно, что значительная часть роевых алгоритмов посвящена реализации моделей стайного поведения, и прежде всего – стайному движению.

#### Модели движения

Правила передвижения роевых животных относительно просты. Эти правила позволяют множеству относительно простых элементов формировать "коллективный мозг" способный принимать решения и заставлять двигаться стаю подобно единому организму. При этом зачастую эти правила применимы и к действиям толпы людей.

**Макромодели.** Для описания движения больших масс роевых организмов вполне подходящим оказывается математический аппарат *гидродинамики*. По сути дела, речь идет о статистических макромоделях. Эти модели превосходно описывают и движение стай *бродячих муравьев* (реагирующих на запахи следов их ближайших соседей), и движение *стай саранчи* (выравнивающих движение по своему соседу), и *движение сверчков* (морمونские сверчки образуют стаи, спасаясь от своих же сородичей-каннибалов).

**Общие механизмы роения** в подобного рода моделях основаны на подражательном поведении и действиях лидеров.

Другим классом моделей являются формальные математические методы, описывающие локальное поведение членов стай (роев).

**Формальные методы.** Речь идет о достаточно хорошо известных и проработанных методах и алгоритмах. Говоря о моделях движения объектов, выделяются следующие базовые правила (алгоритмы), которым должны следовать эти объекты:

- движение в направлении цели;
- движение в направлении центра масс своих соседей;
- поддержка минимально допустимого расстояния друг между другом и препятствиями.

Хорошо проработаны различного рода алгоритмы обхода препятствий и уклонения от столкновений, алгоритмы, учитывающие такие взаимоисключающие тенденции, как "отталкивание" и "притяжение" особей в стае и т.п. (см., например, [Павловский и др., 2002]). В целом же следует отметить, что подобного рода модели – это лишь реализация неких частных механизмов. Эти модели не претендуют, разумеется, на объяснение природы стайного поведения, предпосылок его появления или некие глубокие обобщения.

Тем не менее, на практике эти модели вполне применимы для решения частных технических задач. Иллюстрацией этому может служить, например, робот EPORO фирмы Nissan (2009 г). Здесь коллектив роботов имитирует поведенческие модели стаи рыб, избегающих препятствий и столкновений друг с другом и способных двигаться целенаправленно ("инстинктивная навигация"). Основная цель этих исследований – создание безопасных автомобилей. Разработанные методы должны позволить роботам соответствовать "трем правилам поведения рыб":

- изменять направление движения без столкновений с другими;
- двигаться в общем потоке, сохраняя дистанцию и скорость;
- уметь безопасно сближаться.

### ***3.5. Эволюционные методы***

Разумеется, ни о какой эволюции роботов как технических устройств речи здесь не идет. В лучшем случае можно говорить о попытках реализации эволюционным путем механизмов внутрискотайного (внутрироевого) взаимодействия. Однако в этом направлении успехи весьма и весьма скромны, даже если речь идет о сугубо модельной эволюции. Отсутствие адекватных моделей (как

методами генетических алгоритмов (ГА), так и методами классического эволюционного моделирования (ЭМ)) эволюции, приводящей к появлению коллективов можно объяснить, видимо, тем, что для появления стайных образований нужны более сложные модели особей. Кроме того, неясны многие теоретические вопросы, такие, как:

- каковы должны быть условия, при которых эволюционный процесс идет не путем усложнения структуры особи, а путем синтезогенеза (понимая под этим объединение разрозненных элементов в систему);
- каким образом формируется функция качества для роевого организма, какие составные его части подлежат оценке ("поощрению" и "наказанию");
- каковы механизмы взаимодействия между особями и проч.

Подавляющее большинство исследований в области эволюции коллективов роботов (эволюции их поведения) сводятся к тому, что:

- реализуется искусственная, модельная среда эволюции, в которой стандартными методами (ГА, ЭМ и проч.);
- моделируется эволюция;
- структуры особей, полученные в результате эволюционного процесса, загружаются в систему управления роботов.

Таким образом, сейчас результатом эволюции является отдельная особь, а коллектив, по сути, – это просто множество отдельных роботов. Если речь идет о применении ГА, то это набор отдельных хромосом, перенесенный в системы управления, а если используются методы классического ЭМ, то, в случае автоматной модели, – автоматный газ в чистом виде. Не хотелось бы называть все это спекуляциями на эволюционные темы, но что-то от этого есть.

#### 4. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

Поскольку речь идет о проблемах коллективного поведения роботов, как физических устройств, нельзя обойти вопрос об элементной базе.

**Универсальные колесные платформы.** Это – наиболее распространенный способ реализации члена коллектива роботов. На рис.2 представлены типичные представители этого класса - робот, выпускаемый фирмой POLOLU и т.н. s-бот.

Такие устройства обычно достаточно дороги и сложны. Например, упомянутые выше s-боты оснащены процессором Xscale с частотой 400 MHz, 64 MB оперативной памяти и 32 MB флеш-памяти, а также 12 PIC-микроконтроллерами для низкоуровневой обработки.

**Специализированные мини-роботы.** В рамках открытого проекта SwarmRobot предполагается создание множества минироботов размером порядка  $3 \text{ см}^3$ . (рис.2, в). Если будут созданы надежные и простые технологии производства таких роботов, то возникнет реальная возможность появления действительно больших коллективов из нескольких сотен членов.

**Микроробот, летающий на магнитных полях** (университет Ватерлоо, Канада, 2009 г.). Микроробот MEMS (рис.2, г), использует для полета использует магнитное поле Земли. Микроробот весит 0,83 г. Он оснащен крошечными электромагнитами, создающими вокруг него трехмерное параболическое магнитное поле.

**Миниатюрные роботы Kilobot** (Группа исследования самоорганизующихся систем Гарвардского университета) Вместо колес робот оснащен двумя вибромоторами, позволяющими роботу двигаться вперед и совершать вращение (рис.2, д). Отличительной особенностью таких роботов является их дешевизна (порядка \$14).

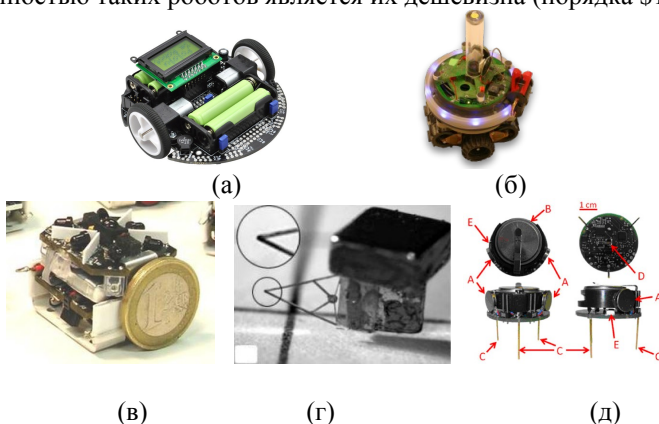


Рис.2. Колесные платформы. (а) робот POLOLU; (б) s-бот; (в) робот проекта SwarmRobot; (г) микроробот MEMS; (д) робот Kilobot (А – вибродвигатель, В –батарея, С –опорная нога

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, анализируя результаты исследований в области коллективного поведения роботов, можно сделать вывод о том, что остается очень много нерешенных вопросов как технического, так и теоретического характера. В целом это направление выглядит как множество разрозненных фрагментов, зачастую несвязанных друг с другом. Среди основных открытых вопросов выделим следующие.

**Отсутствие единого подхода** к проблеме коллективного поведения роботов. Всякий раз решаются лишь частные задачи. Отсутствует общая методология решения задач, возникающих при групповом управлении роботами, особенно в динамической среде, в условиях неполноты и противоречивости информации, меняющихся целей и задач. Пожалуй, единственной попыткой построения общих методов построения коллективов роботов является теория МАС, однако эта теория опирается прежде всего на сценарные описания со всеми вытекающими из этого проблемами и слабостями.

**Применимость языковых (сценарных) подходов.** Фактически, задание сценариев действий роботов в коллективе – это своего рода искусственная алгоритмизация деятельности роботов-агентов. Сейчас на практике лучше всего реализуются жесткие алгоритмы взаимодействий. Применимость же методов адаптации и самообучения, динамического изменения целеполагания, критериев оценок и проч. – все это весьма проблематично в условиях отсутствия общей конструктивной теории коллективного поведения.

**Элементная база.** С одной стороны, имеются технологии производства дешевых миниатюрных роботов. Это – фундамент для т.н. групповой робототехники, которой важно наличие большого количества роботов. Однако смогут ли здесь возникнуть системные эффекты – неясно, т.к. повторим, объекты биологической природы очень сложны (не исключено, что эти системные эффекты возникают у насекомых уже на уровне их собственного устройства). Возможно также, что приемлемыми окажутся имеющиеся технологии создания интеллектуальных роботов, основанных на реализации центральных моторных программ, механизмов их психической организации и проч. Коллектив вряд ли окажется большим, но для той же теории МАС количество членов коллектива не существенно.

Видимо, наиболее привлекательным направлением создания систем коллективного поведения все же является "естественный", эволюционный путь развития. Однако пока не определены условия, при которых эволюционный процесс идет путем создания коллективов, пока не ясно даже то, каким образом формируется функция качества для роевого организма. Не ясно, как создать условия для появления новых свойств и образования сверхорганизма.

Все это приводит к тому, что сейчас речь идет в лучшем случае именно о создании коллективных систем для решения конкретных очень частных задач, а не их – систем – образовании. Пока имеется лишь множество натуральных и полунатурных моделей, решающих с разной степенью успеха некоторые частные задачи из области



коллективного поведения. Особенно это касается роевых алгоритмов, когда из общего поведенческого контекста берутся отдельные внешние проявления и механизмы.

## ИСТОЧНИКИ

- [Александров и др., 2011] Александров В.А., Кобрин А.И. Архитектура мобильного робота — элемента программно-аппаратного комплекса для исследования алгоритмов группового управления // "Журнал радиоэлектроники" N 5, 2011
- [Бернштейн, 1997] Бернштейн Н.А. Биомеханика и физиология движений. Избранные психологические труды. -Москва-Воронеж: 1997. 608с.
- [Варшавский и др., 1984] Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции технических систем и управления ими. —М.:Наука, 1984, —208с.
- [Гаазе-Раппопорт и др, 1987] Гаазе-Раппопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. —:Наука, 1987, — 288 с.
- [Городецкий, 2010] Городецкий В.И. Коллективное поведение автономных агентов (с приложением к командной работе автономных подводных роботов) //СПИИ РАН, 2010 <http://space.ias.spb.su/share/Gorodetsky-teamwork.pdf>
- [Городецкий и др., 2011] Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В. Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов // Изв ЮФУ. Технические науки № 3 (116). 2011 г. с 23-41
- [Длусский, 1967] Длусский Г.М. Муравьи рода Формика —М.: Наука, 1967
- [Захаров, 1978] Захаров А.А. Муравей, семья, колония. —М.: Наука, 1978
- [Карпов, 2007] Карпов В.Э. Импринтинг и центральные моторные программы в робототехнике //IV-я Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" Сб. научн. трудов, М.: Физматлит, 2007, 1, с.322-332
- [Карпов, 2010] Карпов В.Э. Эмоции роботов //XII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010: Труды конференции, М.: Физматлит, 2010, 3, с.354-368
- [МакКоннелл, 2004] МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов. - М.: Техносфера, 2004. - 368 с.

- [Павловский и др., 2002]** Павловский В.Е., Кирикова Е.П. Моделирование управляемого адаптивного поведения гомогенной группы роботов // Искусственный интеллект. 2002, № 4, с. 596-605.
- [Стефанюк, 2004]** Стефанюк В.Л. Локальная организация интеллектуальных систем. -М.: Физматлит, 2004. – 328с.
- [Цетлин, 1969]** Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. М.:Наука,1969. 316с.
- [Штовба, 2003]** Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях, 2003, №4с.70-75