

Кабыш А.С.

Брестский государственный технический университет

anton.kabysh@gmail.com

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ SWARM-СИСТЕМ

### Введение

*Роевой* (или *стайный*) интеллект (англ. *swarm intelligence*) – это раздел исследований моделей коллективного поведения в системах, состоящих из простых индивидуумов, локально взаимодействующих друг с другом и внешней средой, поведение которых принимает формы децентрализованного управления и самоорганизации.

Примерами таких систем являются колонии муравьёв и термитов, косяки рыб, стаи птиц, стадное поведение животных, а также уже стаи виртуальных частиц или муравьёв в компьютерных программах для решения задач оптимизации. Во всех примерах итоговая самоорганизация поведения формируется за счет поведения индивидов на основе их локальных данных, не требуя наличия глобальной стратегии поведения системы и окончательного результата.

Исследования аналогов живого мира показывают [1], что самоорганизация строится на основе двух основных противоположных сил – *притяжение и отталкивание*. Эти силы можно трактовать как положительную или отрицательную обратную связь, учитываемую при координации поведения между индивидами в стае. Например, если индивид попадает в скопление агентов с большой плотностью, его поведение диктует ему покинуть их (отталкивание), однако если агент остается один или плотность агентов невысока, они стремятся друг к другу (притяжение). Положительная обратная связь между индивидами приводит к эффекту самоорганизации всей системы и возникновения в ней коллективного поведения; в дальнейшем самоорганизация компенсируется отрицательной обратной связью. Балансируя между циклами положительной и отрицательной обратной связи, стая находится в состоянии динамического равновесия.

В моделях роевого интеллекта, по аналогии с биологическими системами, взаимодействие между индивидами носит ограниченный характер в виде направленного или ненаправленного обмена сигналами.

- *Ограниченное взаимодействие* между индивидами обозначает, что результат поведения каждого зависит лишь от его собственного ограниченного восприятия мира. Например, если индивид определил ведомого, то он следует за ним, если нет – то выполняет случайный поиск, пока не найдет. Другим примером такого поведения является «социальное облегчение» [2] – индивид начинает выполнять те же действия, что и другие индивиды. В крайнем случае, индивиды могут даже и не обмениваться сигналами, целиком и полностью формируя коллективное поведение за счет собственного восприятия мира.

- *Ненаправленный сигнал*, так же называемый следом, индивид сообщает во внешнюю среду, без целеуказания того, кто должен получить этот сигнал. Другой индивид, обнаружив след во внешней среде, либо соглашается следовать ему (положительная обратная связь), либо нет (отталкивание). Частный случай ненаправленного обмена сигналами называется *stigmergy* – обмен сообщениями путем модификации внешней среды. Примером стигметрии являются следы феромона, оставляемые муравьями в процессе поиска оптимального пути. Итоговый найденный путь будет иметь максимум феромона, что для муравья служит сообщением – «этот путь предпочтительнее, чем другие».

- Направленный обмен сигналами обозначает направленное сообщение, способное изменить поведение, в большей или меньшей степени поведение получателей этого сообщения. Например, крик об опасности является направленным сообщением.

Исследователями найдено значительное количество способов взаимодействия между индивидами в биологических социальных системах [2], однако еще не все из них были исследованы применительно к системам искусственного интеллекта.

## 1. Свойства swarm-систем

Систему, состоящую из простых, автономных агентов, локально взаимодействующих друг с другом и внешней средой, поведение которых принимает формы децентрализованного управления и самоорганизации, назовем *много-агентной swarm-системой* или просто *swarm-системой*. Агента в swarm-системе в дальнейшем будем называть *swarm-агентом*.

Суммируем отличительные характеристики исследований swarm-систем, наблюдаемые в биологических аналогах [1, 3, 4]:

- Исследование должно быть релевантным задаче координации swarm-агентов.
- Swarm-агенты, составляющие стаю, должны быть гомогенными.
- Коммуникация между агентами должна носить только локальный характер.
- Swarm-агент самостоятельно принимает решение о своих действиях, опираясь на доступную ему информацию, формируя распределённое принятие решений агентами (*decentralized decision making*).
- Механизм координации должен масштабироваться в широком диапазоне размера стаи.
- Если исследование касается стайной робототехники, то swarm-агенты должны быть физическими роботами, способными взаимодействовать друг с другом и с внешней средой. Требования, предъявляемые к swarm-роботам, более подробно описаны ниже.

Swarm-системы, построенные по указанным принципам, обладают *устойчивостью, гибкостью и масштабированием* на системном уровне [3,5]. *Устойчивость* обеспечивается не зависимостью работы системы от конкретных агентов,

а только от их плотности; отказ одного агента может быть немедленно компенсирован другим агентом. *Гибкость* означает наличие и использование различных коллективных стратегий в достижении цели. *Масштабирование* означает, что та же задача может быть решена как большим, так и небольшим числом агентов при применении тех же правил; правила не должны зависеть от количества агентов.

Благодаря наличию указанных свойств, swarm-системы являются привлекательной областью исследований. Исследуются как сами алгоритмы формирования коллективного поведения и координации в swarm-системах, так и анализируются свойства этих алгоритмов по указанным характеристикам.

## 2. Исследования в области Swarm-Intelligence

Наблюдаемые в природе модели коллективной организации вдохновили исследователей на разработку нового «стайного» подхода к решению существующих проблем. На основе swarm-подхода было разработано несколько алгоритмов оптимизации, получивших широкое распространение в последние годы [4]. Основными семействами алгоритмов являются *муравьиный алгоритм (ant colony optimization, ACO)* и *алгоритм роя частиц (particle swarm optimization, PSO)*. Другой областью swarm-исследований, получившей широкое распространение и признание, является стайная робототехника [1, 3]. Первые предложенные модели стайного поведения [7] нашли свое применение в кинематографе и компьютерных играх для отрисовки коллективного поведения [1]. На основе стайных принципов был спроектирован ряд протоколов маршрутизации следующего поколения [3].

Стайное поведение проявляется при решении следующих задач [1-6]:

1. *Агрегация* – самоорганизующееся поведение, приводящее к формированию кластера агентов и их группированию.

2. *Дисперсия* – противоположность агрегации: необходимо добиться равномерного распределения агентов по внешней среде, максимизируя область покрытия. Развитие этой задачи может включать в себя распределенное исследование и мониторинг внешней среды.

3. *Стайное поведение* – формирование стаи из распределенной группы агентов и демонстрация стайного поведения, при котором наблюдается эффект самоорганизации поведения.

4. *Коллективный поиск и доставка ресурсов (фуражирование)* – богатая область исследований, посвященная разработке оптимальных стратегий поиска и доставки ресурсов на базу стаей агентов.

5. *Самоорганизация* – создание коллективом агентов структур посредством «физического» единения и кооперации. Примерами задач, где требуется самоорганизация агентов, являются *коллективное передвижение, кооперативный транспорт и формирование паттернов*.

6. Отдельным классом задач стоят задачи самоконфигурации и реконфигурации. В этих задачах swarm-система представляет собой множество соединенных в одно целое модулей (unit). Исследуются способности данных систем и перестройке собственной структуры, изменению формы и решению проблем посредством изменения собственной формы.

7. В последние годы развитие получили исследования стайного поведения гетерогенных swarm-систем, или нескольких стай (multi-swarm). Например, в работе [10] исследуется коллективное поведение и кооперация наземных и воздушных роботов в задаче поиска и добывания «еды» в неизвестной среде, напоминающей лабиринт. Воздушные агенты решают задачу кооперативного исследования и навигации для наземных, а наземные – доставку ресурсов.

Данные задачи решаются как численными способами, моделированием, так и постановкой экспериментов над группами роботов, формирующих стаю.

### 3. Swarm Robotics

*Роевая (Стайная) робототехника* или *Swarm Robotics* – это применение идей Swarm Intelligence к физическому коллективу простых роботов. Вместо разработки сложных роботов и сложных алгоритмов поведения, исследования в области swarm robotics фокусируются на решении проблем посредством эмерджентных эффектов коллективного поведения, основанного на применении простых правил взаимодействия к коллективу роботов [1]. Традиционно, в качестве роботов, составляющих стаю, используются простые, недорогие, гомогенные роботы с возможностью к коммуникации друг с другом [5]. Роботы должны быть просты в том смысле, что возможности одного индивида должны быть ограничены и недостаточны для решения поставленной задачи. Коллективное поведение и достижение некоторой цели (например, сохранение формации) может быть тривиальной задачей при моделировании, но с учетом ограниченных возможностей малых роботов задача координации их поведения становится сложным вызовом [8].

При стайном взаимодействии канал связи между роботами либо отсутствует вовсе, либо сильно ограничен [5, 6]. Взаимодействия между роботами (обмен сигналами) должны носить только локальный характер. Роботы принимают решение о своих дальнейших действиях на основе сенсорных данных об окружающей среде. При этом информация о состоянии других роботов группы может не поступать вовсе либо поступать посредством той же сенсорной информации. Робот участвует в информационном обмене с другими роботами в стае, находящимися в пределах зоны видимости робота, ограниченной радиусом  $L$ .

Область исследований Swarm Robotics включает как исследования алгоритмов коллективного стайного поведения для решения различных задач, так и вопросы проектирования роботов для таких алгоритмов. Как правило, любые исследования по swarm-робототехнике используют предварительное моделирование для быстрого доказательства работы и оценке свойств алгоритма коллективного поведения.

#### 4. Проектирование swarm-системы роботов

Задача разработки алгоритмов управления swarm-роботами для создания swarm-системы является непростой задачей, которая формируется следующим образом: *как сформировать стаю и создать стайное поведение, имея все ограничения, присущие swarm-роботу*. При проектировании swarm-систем можно выделить два ключевых фактора:

1. **Swarm-коммуникация** определяет конкретный способ взаимодействия между swarm-агентами, с целью получения локальных данных у других агентах, для последующего использования этих данных при принятии решений о конкретной стратегии поведения в swarm-алгоритме. Способ коммуникации должен быть единообразен для всех swarm-агентов в стае. Например, способ коммуникации может определить дистанцию до соседа, его ориентацию и т.д. Примеры различных способов коммуникации рассмотрены ниже.

2. **Swarm-алгоритм** определяет стратегии поведения на каждом swarm-агенте в зависимости от получаемых данных коммуникации. Когда взаимодействие между роботами налажено, требуется задать правила поведения, единообразные для каждого робота, совместное выполнение которых всеми роботами приведет к ожидаемым коллективным эффектам и решению поставленной цели.

Способ коммуникации роботов на всем коллективе должен быть стандартным, единообразным. Роботы могут быть гетерогенными, но на уровне коммуникации их идентичность должна сохраняться. Swarm-алгоритм может быть либо спроектирован вручную и закодирован в робота, либо может быть использована какая-либо обобщенная методология, результат работы которой содержит итоговые стратегии поведения. В качестве такой методологии может выступать: эволюционный алгоритм, нейронная сеть, генетическое программирование и т.д.

Следовательно, стаям можно охарактеризовать группу роботов гомогенных на уровнях коммуникации и используемого алгоритма коллективного поведения.

#### 5. Способы коммуникации swarm-роботов

В простейшем случае, для коммуникации роботы используют свои сенсоры. В зависимости от типа сенсоров и их конфигурации изменяется вид получаемой информации и диапазон восприятия мира роботом. В большинстве случаев робот оснащается датчиками или камерой. Вне зависимости от вида сенсорных данных, робот должен получать следующие характеристики из внешней среды:

- Наличие соседей в непосредственной близости.
- По каждому соседу необходима следующая информация:
  - Положение соседа относительно робота.
  - Ориентация соседа относительно робота.
  - Ведущий или нет (опционально).
  - Другие данные, специфичные для конкретного алгоритма.

Каждый алгоритм стайного поведения предъявляет свои требования к способу коммуникации роботов. Например, в работе [8] разработан стайный алгоритм роботов только на основе 3-х датчиков, описанный и предъявляющий

самые минимальные требования к роботу. Роботы, оснащенные видеосистемой, могут получить необходимый минимум информации о находящихся поблизости роботах группы, если все роботы группы оборудованы цветовыми индикаторами. Например, в [12] роботы s-bot используют светодиодные паттерны для коммуникации друг с другом, чтобы согласовать направление коллективного движения в задаче кооперативного транспорта. Каждый робот имеет треугольный цветовой паттерн, составленный из светодиодов, где красный цвет указывает направление движения робота. Каждый робот имеет всенаправленную камеру с оперативным расстоянием 60 см. На роботе используется программное обеспечение, позволяющее определить по «цвету» направление движения соседей в области наблюдения камеры.

Вместо световых индикаторов, могут быть использованы другие паттерны или QR-коды. Наиболее распространенными являются видеокamеры в различных диапазонах спектра, акустические и вибрационные датчики, газовые анализаторы, лазерные дальномеры, широкополосные приемники и т.д.

Для коммуникации роботы также могут использовать внешнюю среду. Для этого и роботы, и внешняя среда должны быть специальным образом подготовлены. В [11] приведены эксперименты, когда стая роботов повторяла классический алгоритм муравьиной колонии. Для этого «передатчик феромона» в виде кругового инфракрасного излучателя и приемника в виде отдельного модуля был установлен прямо на роботе. Чем сильнее был суммарный сигнал, тем сильнее след феромона. Также во внешней среде могут находиться светодиоды, радиометки и другие источники информации для робота.

## 6. Swarm-алгоритмы

В классической работе К. Рейнольдса [7], исследовавшего поведение стай птиц и косяков рыб, был предложен стайный алгоритм, в котором самоорганизация стайного поведения – результат суперпозиции во времени и пространстве следующих трёх принципов, применимых по каждому агенту [7-9]:

1. **Отгалкивание**, или дисперсия (*collision avoidance, separation*) – соблюдать дистанцию  $d_{min}$  до препятствий и других агентов.

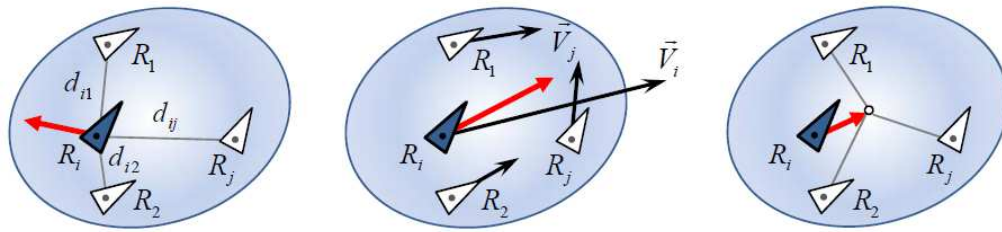
2. **Выравнивание** (скорости, ориентации) стаи (*alignment*) – придерживаться средней скорости движения соседей по стае в наблюдаемой области видимости  $L$  или выровнять свою ориентацию по ориентации соседних роботов.

3. **Притяжение** (*flock centering, cohesion*) – стремиться занять положение, близкое к центру тяжести, по всем наблюдаемым агентам в окрестности  $L$ .

4. **Поведение по умолчанию** выполняется, если наблюдаемых агентов в поле видимости нет. Может принимать самые различные формы.

а. **Блуждание** – агент выполняет случайное блуждание, пока другие агенты не будут найдены.

б. **Ожидание**, пока в области видимости появится какой-либо агент.



**Рисунок 1 – Принципы самоорганизации движения swarm-агентов в модели К. Рейнольдса [7] (адаптировано из [9])**

На основе описанных принципов (1) – (3) можно сформировать огромное множество стереотипов стратегий стайного поведения [7-9]:

Индивидуальное поведение	Коллективное поведение
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Приблизиться к объекту.</li> <li>• Удаляться от объекта.</li> <li>• Преследовать объект.</li> <li>• Убегать от объекта.</li> <li>• Следовать за лидером.</li> <li>• «Блуждать» (бродить) в заданном районе случайным образом.</li> <li>• Преследовать объект с заданным смещением.</li> <li>• Прибыть в заданную точку.</li> <li>• Избегать столкновений (с подвижными или неподвижными объектами).</li> <li>• Следовать по сигналу (следу).</li> <li>• Следовать по траектории.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Сформировать стаю при заданных параметрах: близости/скорости/притяжения.</li> <li>• Агрегация – собраться в заданной точке. Дисперсия – рассредоточиться в заданном районе.</li> <li>• Блокировать передвижение объекта.</li> <li>• Искать объект.</li> <li>• Охранять территорию или периметр.</li> <li>• Защищать периметр или объект.</li> <li>• Сформировать хаос</li> <li>• Сформировать формацию.</li> <li>• Групповое передвижение.</li> <li>• Другое</li> </ul>

Исследования в области алгоритмов стайного поведения включают различные реализации описанных принципов, их взаимосвязь, различные комбинации, частичные реализации и т.д. Например, в работе [13] предложен способ реализации данных принципов на основе физических законов, получивший название «искусственная физика» (artificial physics). В каждый момент времени рассчитывается вектор силы  $\mathbf{f}$ , действующий на робота, определяемый тремя составляющими:

- $\mathbf{p}$  – проксимальная сила, действующая на робота. *Проксимальное поведение* [14] (proximal control) [1] означает, что робот воспринимает относительные позиции (дальность и ориентацию) своих соседей в своей области видимости и корректирует свое поведение по принципам агрегации и дисперсии;
- $\mathbf{h}$  – вектор выравнивания ориентации робота вычисляется на основе суммарных показаний ориентаций соседних роботов;
- $\mathbf{g}$  – вектор направления цели. Вектор цели доступен для одних роботов (ведущие) и недоступен для других.

Итоговое значение вектора силы, действующей на робота, определяется как  $\mathbf{f} = \alpha \mathbf{p} + \beta \mathbf{h} + \gamma \mathbf{g}$ , где  $\alpha, \beta, \gamma$  – это коэффициенты относительного вклада различных сил, задаваемые эмпирическим путем.

## 7. Управление swarm-роботами

Конкретный способ управления роботами зависит от имеющихся возможностей роботов и инфраструктуры. Можно выделить два принципиальных подхода – внешнее и внутреннее управление.

Подход на основе внутреннего управления заключается в том, что робот использует только показания своих датчиков для выбора текущего правила поведения. Робот также может опрашивать собственные устройства связи и принимать/отсылать сообщения другим роботам. При этом подходе все вычисления происходят на роботе. Данный вид управления по отношению к swarm-системе называется *микроконтроль*.

Преимуществом данного подхода является то, что робот воплощает классическую модель автономного swarm-агента. К недостаткам можно отнести общую сложность решения, требуемое большое количество сенсоров и электроники, а также только ограниченное количество swarm-алгоритмов и методов коммуникации, которые могут быть реализованы при помощи встроенных, ограниченных возможностей робота.

Альтернативный подход состоит в разработке коммуникационной инфраструктуры для управления стаей роботов, внешней по отношению к самим роботам. В этом случае робот может отсылать показания своих сенсоров на удаленный сервер, а в ответ получает команды для выполнения. При данном подходе swarm-агент управляется внешним источником, но с соблюдением всех правил проектирования и поведения swarm-систем. Другим примером может быть система позиционирования, на основании подвешенной под потолком камеры, которая для каждого робота определяет его местоположение и отношение к другим роботам в стае. В этом случае стайный робот даже может обходиться без датчиков. Подход, при котором управление выполняется на уровне всей swarm-системы, получил название *макроконтроль*. Недостатком данного подхода является необходимость создавать внешнюю инфраструктуру для управления роботами. Стоимость полученной инфраструктуры может быть сопоставима со стоимостью самих роботов.

### Заключение

В данной статье был дан краткий обзор областей исследований Swarm Intelligence и Swarm Robotics с описанием отличительных характеристик исследований в данной области. Адаптивные робототехнические системы, реализующие стайную модель поведения, способны автономно и гибко изменять параметры поведения – в зависимости от выполняемой работы, условий внешней среды, технического состояния роботов – с минимальными затратами ресурсов.

При проектировании swarm-систем стоит уделить особое внимание вопросам коммуникации, алгоритму стайного поведения, способу управления роботами и возможной симуляции стайного поведения до начала экспериментов с физическими роботами. Способ коммуникации определяет, каким образом робот узнает необходимую ему информацию о соседях. В основе стайного поведения лежат принципы этологии, заимствованные из животного мира. Большинство алгоритмов стайного поведения основаны на описании законов притяжения, от-



талкивания и выравнивания между соседними роботами в стае. Целенаправленное, внешне «интеллектуальное» поведение группы формируется спонтанно, в результате суперпозиции актов местного взаимодействия роботов и их реакции на изменения в локальном пространстве.

Моделирование стайного поведения значительно упрощает задачу и может использоваться для концептуального доказательства формирования стайного поведения алгоритмом. Существует множество разработанных симуляторов стайного поведения. Если эксперименты ставятся на реальных роботах, то необходимо обеспечить управление стаей роботов. Для этого либо все вычисления остаются на роботе, либо создается коммуникационная инфраструктура, управляющая всей стаей. Один и тот же стайный алгоритм может значительно отличаться в реализации для разных видов систем управления.

### Литература

1. Floreano D, Mattiussi C. Bio-inspired artificial intelligence: theories methods and technologies. The MIT Press; 2008
2. Резникова, Ж.И. Сравнительный анализ различных форм социального обучения у животных // Журн. общ. биол. – 2004. – Т. 65. – № 2. С. 136-152.
3. Blum, C., Merkle, D. Swarm Intelligence-Introduction and Applications. Natural Computing Series. Springer. – 2008.
4. Christian Blum, Xiaodong Li. Swarm Intelligence in Optimization. In Christian, B. and Daniel, M. (eds) Swarm Intelligence: Introduction and Applications. Springer, Berlin Heidelberg, 2008. – P. 43-85.
5. Sahin, E., Girgin, S., Bayindir, L. and Turgut, A.E. Swarm Robotics. In Christian, B. and Daniel, M. (eds) Swarm Intelligence: Introduction and Applications. Springer. – Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 87-101.
6. Иванов, Д.Я. Информационный обмен в больших группах роботов // Искусственный интеллект. – 2010. – № 4. – С. 513-522.
7. Reynolds, C.W. Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, № 4. – P. 25-34.
8. Möslinger, C., Schmickl, T., & Crailsheim, K. A minimalist flocking algorithm for swarm robots. In *Lecture notes in computer science. Proceedings of the 10th European conference on artificial life (ECAL)*. Berlin: Springer. – 2008.
9. Бурдун, И.Е. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений / И.Е. Бурдун, А.Р. Бубин // Доклад на Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», СибГУТИ, 9–13 августа 2010 года, г. Новосибирск.
10. F. Ducatelle, G. Di Caro, C. Pinciroli, and L. Gambardella. Self-organized cooperation between robotic swarms. *Swarm Intelligence*. – 2011. – Vol. 5, № 2. – P. 73-96.
11. Payton, D., Estkowski, R., Howard, M. Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones. In , Sahin, E. and Spears, W. M., editors, *Proceedings of the Swarm Robotics Workshop*. – Germany, Heidelberg: Springer-Verlag. – 2005.
12. Campo, A., Nouyan, S., Birattari, M., Groß, R., Dorigo, M.: Negotiation of goal direction for cooperative transport. In: Dorigo, M., Gambardella, L.M., Birattari, M., Martinoli, A., Poli, R., Stutzle, T. (eds.) ANTS 2006. LNCS. Heidelberg: Springer, 2006. – Vol. 4150. – P. 191-202.
13. Spears, W.M., Spears, D.F., Hamann, J.C., Heil, R.: Distributed, physics-based control of swarms of vehicles. *Autonomous Robots* 17, 137–162, 2004.
14. Ferrante, E., Turgut, A.E., Mathews, N., Birattari, M., Dorigo, M. Flocking in stationary and non-stationary environments: A novel communication strategy for heading alignment. In Schaefer, R., Cotta, C., Kolodziej, J., and Rudolph, G., editors, *Parallel Problem Solving from Nature. PPSN XI*, volume 6239 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 331-340. Springer. – 2010.