



**ИВАНОВ**  
Донат Яковлевич  
младший научный  
сотрудник  
(Научно-  
исследовательский  
институт  
многопроцессорных  
вычислительных систем  
им. академика  
А.В. Каляева)

## Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово-применяемых микророботов в экстремальных условиях

**Д.Я. Иванов**

*Показана актуальность применения групп микророботов в экстремальной робототехнике. Приведен краткий анализ существующих подходов к управлению большими группами роботов. Предложен обобщенный алгоритм управления большой группой массово-применяемых микророботов на основе принципов роевого интеллекта. Рассмотрено решение ряда практических задач управления группой микророботов на основе предложенного алгоритма.*

**Ключевые слова:** роевой интеллект, микроробот, экстремальная робототехника, децентрализованное управление.

*The article considers the importance of applying the groups of microrobots in extreme robotics. A brief analysis of the existing approaches to the control of large groups of robots is presented. The generalized algorithm to control a large group of mass-applied microrobots based on swarm intelligence is proposed. The solution of a number of practical tasks to control a group of micro-robots is considered in terms of the proposed algorithm.*

**Keywords:** swarm intelligent, microrobot, extreme robotics, decentralized control.

Экстремальная робототехника по праву считается передовой робототехникой [1], на которой сконцентрировано основное внимание ученых и исследователей. Многие достижения в этой области со временем находят применение и в других направлениях, в первую очередь в промышленной робототехнике, а также в активно развивающемся в последнее время направлении бытовых и сервисных роботов (роботы-пылесосы, роботы-экскурсоводы и т. п.).

Экстремальными условиями в робототехнике принято считать прежде всего опасные для человека или технических устройств параметры окружающей среды: высокий радиационный фон, химически-агрессивная среда, сильные электромагнитные поля, высокое давление, температура [2, с. 309]. При выполнении роботами различных задач на местах природных или техногенных катастроф или боевых конфликтов особое значение принимает недетерминированность окружающей среды, где наряду с экстремальными внешними условиями имеет место априорная неопределенность не только параметров самой среды, но и самих подлежащих выполнению операций [3].

Устойчивость роботов к агрессивным условиям окружающей среды (в зарубежной литературе *hazardous environment*) обеспечивается в основном за счет инженерных и технических решений. В то же время способность роботов адекватно и своевременно реагировать на непредвиденные изменения параметров окружающей среды во многом зависит от выбранной стратегии управления, а также от уровня интеллектуальности (или даже «разумности» [4]) робота.

Обычно в статьях об экстремальной робототехнике (например [5, 6] и др.) рассматриваются вопросы, связанные с применением одиночного робота. Такой робот оснащен мощной бортовой вычислительной машиной, большим запасом бортового энергоресурса, и, зачастую, значительным набором рабочих органов. Очевидно, что такая «запасливость» приводит к увеличению габаритов и массы робота, что в свою очередь, существенно ограничивает возможную область применения. В то же время среди многообразия задач, решаемых экстремальной робототехникой, можно выделить целый ряд таких, для решения которых небольшие габариты робота желательны, а порой и необходимы. Сюда можно отнести задачи разведки территорий и акваторий в условиях организованного противодействия противника, задачи поиска пострадавших в завалах после природных или техногенных катастроф, задачи поиска и обезвреживания взрывных устройств при выполнении антитеррористических операций в условиях плотной городской застройки, задачи исследования поверхностей других планет и др. Для решения подобных задач необходимы микророботы с малыми габаритами, и масса которых позволяет беспрепятственно перемещаться в тесных проходах, оставаясь незамеченными для радиолокационных станций противника. Такие роботы характеризуются меньшими затратами на транспортировку робототехнического комплекса к месту выполнения работы.

Впрочем, небольшие размеры микророботов накладывают и некоторые ограничения:

- затруднено движение в неподготовленном пространстве, так как относительно небольшие выступы и впадины могут препятствовать движению микроробота;

- затруднено выполнение задач по перемещению крупногабаритных тел (например, пострадавших в зоне землетрясения, либо образцов породы) силами одного микроробота.

Малые габариты микроробота накладывают также и ряд косвенных ограничений:

- малый запас бортового энергоресурса микроробота;

- небольшие габариты и энергопотребление средств коммуникации приводят к ограничениям максимального радиуса радиосвязи;

- существенно ограничено количество доступных роботу рабочих инструментов.

Все названные выше ограничения относятся к одиночному микророботу. Поэтому очевидным решением названных проблем может стать использование группы микророботов, способных объединять усилия для решения сложных задач. Микророботы могут помогать друг другу в преодолении препятствий ([7, 8], и др.), совместно осуществлять транспортировку крупного тела [9, 10]. Информационный обмен в группе роботов позволяет расширить доступные каждому роботу сведения об окружающей среде. При этом некоторые задачи могут быть распределены между микророботами, и выполняться параллельно. Например, пока одни роботы группы занимаются сбором данных об окружающей среде, другие собирают образцы грунта.

Необходимость использования большого количества разнообразных рабочих инструментов может потребовать применения гетерогенной группы, т. е. группы, состоящей из роботов различной конструкции (например, проект *Swarmanoid*).

На первый взгляд преимущества применения группы микророботов по сравнению с использованием одиночного робота, оснащенного достаточным количеством функциональных элементов, не очевидны. Но не стоит забывать о том, что при групповом применении микророботы сохраняют все описанные выше достоинства малогабаритных роботов: в первую очередь способность двигаться в стесненных условиях, малый вес и габариты. Более того, групповое применение микророботов способствует снижению риска невыполнения задания, так как повреждение одного или нескольких микророботов группы в общем случае (в первую оче-

редь при роевых и коллективных стратегиях управления, см. ниже) не приводит к срыву выполнения задания, хотя и снижает эффективность работы группы. В то же время, повреждение отдельных блоков одиночного робота может привести к срыву выполняемой им работы, а попытки дублирования самых важных функциональных блоков робота приводит к увеличению массы, габаритов, стоимости робота, но не увеличивает эффективность работы (даже снижает, учитывая большие габариты и массу).

Эффективность применения групп микроботов во многом зависит от выбранной стратегии управления. Различают централизованные и децентрализованные стратегии управления.

При *централизованных стратегиях управления* существует некоторое центральное устройство управления, которому доступна информация о состоянии всех роботов группы и окружающей среде. Управляющее устройство оценивает текущую ситуацию и принимает решения о действиях роботов группы. Центральное устройство управления может располагаться за пределами группы (например, на пульте управления оператора), либо на борту одного из роботов группы. В последнем случае говорят о централизованном управлении «с ведущим» [2, с. 228].

Централизованные стратегии управления дают хорошие результаты при небольшом количестве роботов в группе. При увеличении численности группы растет нагрузка на канал связи и на вычислительные средства устройства управления. Одним из выходов является применение иерархических стратегий управления, при которых группа роботов делится на подгруппы, каждая из которых имеет своего лидера (обычно из числа роботов группы), а лидеры подгруппы управляются центральным устройством управления, расположенным на борту одного из роботов, либо, и чаще, за пределами группы. При иерархических стратегиях управления усложняется характер коммуникаций между роботами группы, вследствие чего предъявляются серьезные требования к бортовой аппаратуре связи. Помехи в канале связи крайне негативно отражаются на работе группы при централизованных стратегиях управления. К тому же выход из строя робота, выполняющего функции управления группой или

подгруппой приводит к серьезным проблемам — теряется связь со всеми подконтрольными ему роботами.

К *децентрализованным стратегиям* управления группами роботов относят коллективные, стайные и роевые стратегии управления.

При *коллективной стратегии управления*, каждый робот группы принимает информацию от всех других роботов группы, и передает собранную им информацию об окружающей среде и о собственном состоянии в канал связи таким образом, что эта информация доступна всем остальным роботам группы. Таким образом информационный обмен в группе роботов при коллективном управлении осуществляется по принципу «каждый со всеми». За счет этого каждый робот может самостоятельно оценивать текущую ситуацию и принимать решение о необходимых дальнейших действиях (подробнее см. [11]). Коллективные стратегии управления позволяют группе сохранять работоспособность в случае выхода из строя одного или нескольких роботов группы. Нагрузка на канал связи возрастает прямо пропорционально увеличению численности группы роботов. Также возрастает нагрузка на бортовые вычислительные устройства роботов, так как им необходимо обрабатывать принятую информацию. Хотя верхний предел допустимой численности группы у коллективных методов управления в среднем выше, чем у централизованных, «масштабируемость» этих методов оставляет желать лучшего.

При *стайных стратегиях управления* выделенный канал связи для обмена информацией между роботами отсутствует, каждый робот собирает информацию об окружающей среде самостоятельно и так же самостоятельно принимает решение о своих последующих действиях с тем расчетом, чтобы внести свой вклад в выполнение групповой задачи (подробнее см. [12]). Отсутствие коммуникаций между роботами группы при стайных стратегиях управления позволяет успешно решать лишь те задачи, которые могут легко распараллеливаться на независимые несвязные подзадачи. Главным достоинством стайных стратегий управления является масштабируемость: при увеличении численности группы роботов вычислительная сложность задач управления не возрастает, что

позволяет применять стайные стратегии для управления очень большими группами микроботов.

Методы *роевого интеллекта* [13, 14], уже используемые для решения многих практических задач [15, 16], могут применяться и для управления большими группами роботов, что привело к появлению отдельного направления, так называемой роевой робототехники (от англ. Swarm Robotics) [17, 18]. Каждый робот группы взаимодействует лишь с некоторыми соседними роботами, попадающими в зону видимости, ограниченную дальностью действия его телекоммуникационных приборов (либо ограниченную искусственно). Каждый робот самостоятельно принимает решение о дальнейших действиях, опираясь на простые локальные правила (*simple rules, local rules*). Роботу доступна та информация об окружающей среде, которую он собрал самостоятельно, а также та информация об окружающей среде и о состоянии некоторых роботов группы, которую ему передали соседние роботы. Собранную информацию об окружающей среде, а также о собственном состоянии робот передает в канал связи. Эта информация становится доступна тем роботам, в зону видимости которых попадает этот робот (в случае одинаковых по радиусу зон видимости — это те же соседние роботы). Благодаря такому подходу роботы получают больше информации об окружающей среде, чем при стайных стратегиях управления, при этом доступная им информация касается окружающей их области, т. е. наиболее актуальна. При этом сохраняется масштабируемость — увеличение численности группы не приводит к увеличению нагрузки на бортовые вычислительные устройства.

Как было показано выше, методы роевого интеллекта открывают широкие возможности для развития массово-применяемых микроботов (МППР), позволяя успешно использовать большие группы микроботов. Возникает резонный вопрос: почему же рои микроботов все еще не встречаются на практике, а достижения роевой робототехники ограничиваются несколькими экспериментальными проектами (такими как *swarm-bot* [19], *Swarmanoid*, *I-SWARM* [20]) и рядом теоретических работ?

Одним из очевидных препятствий на пути развития роевой робототехники является тот факт, что объектами управления для нее должны служить многочисленные группы микроботов, а это в свою очередь подразумевает наличие относительно недорогого массового производства микроботов. Применяемые при этом технологии сейчас находятся «на переднем рубеже» достижений техники. К счастью, прогресс в области микроэлектроники, мехатроники и нанотехнологий дает основания полагать, что в ближайшем будущем массовое производство микроботов станет не только возможным, но и экономически обоснованным.

Вторым препятствием является отсутствие общей теории и подходов в создании и разработке методов роевого управления в группах роботов. На данный момент значительная часть исследований посвящена использованию природных аналогов методов роевого интеллекта для решения технических задач: муравьи [21], пчелы [22], стаи птиц и косяки рыб [23], иммунные системы [24] послужили прототипом для создания различных методов роевого интеллекта.

Различия в задачах и возможностях природных и технических систем затрудняют поиск и адаптацию природных алгоритмов к решению технических задач. Ряд исследований посвящен созданию искусственных методов роевого интеллекта, изначально предназначенных для решения практических задач. К сожалению, отсутствие единого подхода осложняет эти исследования. По сути, каждая новая задача решается каждый раз почти «с нуля».

В данной работе предложен обобщенный алгоритм организации роевого взаимодействия, позволяющий решать некоторое множество практических задач. Предполагается, что использование единого подхода к решению ряда задач существенно упростит задачу организации роевого взаимодействия в группах массово-применяемых микроботов.

В работе [14] дано определение роевого интеллекта, как дисциплины, изучающей природные и искусственные системы, состоящие из большого количества отдельных объектов (особе, агентов и т. п.), которые осуществляют децентрализованное управление на основе



принципов самоорганизации. В частности, эта дисциплина сосредоточена на коллективном поведении в результате локальных взаимодействий отдельных объектов между собой и с окружающей средой. Несмотря на то, что такая формулировка достаточно точно отражает область исследований роевого интеллекта, применительно к нашей задаче требуется более строгое определение роя.

Под роем МПМР в дальнейшем будем понимать некоторое достаточно большое множество  $R$  микророботов  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), совместное взаимодействие которых обеспечивает решение некоторого ограниченного множества задач  $P = \langle p_1, p_2, \dots, p_c \rangle$ . При этом будем считать, что все микророботы  $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) одинаковы, т. е. рой — это гомогенная группа. Состояние каждого микроробота  $r_i \in R$  описывается некоторым вектором  $s_i = \langle s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ij} \rangle$ . Микроробот  $r_i \in R$  может выполнять некоторый ограниченный набор простейших локальных действий, определяемых вектором  $A_i = \langle a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ig} \rangle$ . Микроробот  $r_i$  может осуществлять информационный обмен с некоторым подмножеством микророботов  $R_i \in R$ , находящихся в пределах некоторой зоны, ограниченной радиусом  $L$ , которую в дальнейшем будем называть зоной видимости микроробота  $r_i$ . С помощью этого информационного обмена микророботу  $r_i \in R$  может быть доступна информация о текущем состоянии и действиях микророботов подмножества  $R_i$ .

Микроробот  $r_i \in R$  «знает» законы изменения своего состояния в зависимости от своих действий, а также действий и состояний других микророботов из подмножества  $R_i \subseteq R$ , т. е.  $\frac{ds_i}{dt} = f(s_i, A_i, s_{i1}, A_{i1}, \dots, s_{ij}, A_{ij})$ , где  $s_{ij}, A_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, L$ ) — текущее состояние и действие микроробота  $r_j \in R_i$ , попадающего в зону видимости микроробота  $r_i$ .

Под задачей  $p_b \in P$ , стоящей перед роем, будем понимать достижение роем такого состояния  $s_k^b = \langle s_{1k}^b, s_{2k}^b, \dots, s_{Nk}^b \rangle$  (где  $N$  — число микророботов в рое,  $s_{ik}^b$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) — целевое состояние микроробота  $r_i$ , необходимое для решения задачи  $p_b$ ), при котором достигается

минимум некоторого функционала  $Y = F_b(s_1, s_2, \dots, s_N)$ .

С учетом введенных определений задачу управления роем микророботов можно сформулировать следующим образом: найти такую последовательность локальных действий всех микророботов роя  $A = \langle A_1, A_2, \dots, A_N \rangle$ , которая преобразует текущее состояние роя  $S_0 = \langle S_{10}, S_{20}, \dots, S_{N0} \rangle$  в такое целевое состояние, соответствующее поставленной перед роем задаче  $p_b \in P$ ,  $s_k^b = \langle s_{1k}^b, s_{2k}^b, \dots, s_{Nk}^b \rangle$ , в котором достигается минимум функционала  $Y = F_b(s_1, s_2, \dots, s_N)$  при связях  $\frac{ds_i}{dt} = f(s_i, A_i, s_{i1}, A_{i1}, \dots, s_{ij}, A_{ij})$ , где  $s_{ij}, A_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, L$ ) — состояния и действия микророботов подмножества  $R_i \subseteq R$ , попадающих в зону видимости микроробота  $r_i$ .

Сформулированная выше проблема роевого взаимодействия в сильной степени коррелирует с проблемой самоорганизации систем. Под самоорганизацией понимается процесс, в котором глобальные внешние воздействия стимулируют старт внутренних для системы механизмов, которые в свою очередь дают начало специфическим структурам в системе. С точки зрения данного определения сформулированная задача роевого взаимодействия микророботов является задачей самоорганизации системы, поскольку для ее решения необходимо определить «механизмы взаимодействия отдельных компонент (т. е. локальные действия робота) для получения» желаемого результата (в нашем случае решения задачи  $p_b \in P$ ).

Одним из основополагающих подходов к проблеме самоорганизации систем является принцип гомеостаза. Гомеостаз — способность открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия. При этом равновесным называется такое стационарное состояние системы, неизменяемость которого во времени не обусловлена протеканием какого-либо внешнего по отношению к системе процесса.

Очевидно, что равновесное состояние системы будет достигнуто в случае, когда каждый из элементов системы (в наше случае — каж-

дый из микророботов) также будет находиться в равновесном состоянии.

Для того чтобы применить принцип гомеостаза к роя микророботов, необходимо в первую очередь определить, что следует понимать под равновесным состоянием микроробота  $r_i$ . В данном случае функция  $Y_k^i$  является некоторым аналогом потенциальной энергии системы, причем, что очень важно, вид этой функции должен зависеть от задачи, стоящей перед роем. Тогда, согласно принципу гомеостаза, каждый микроробот  $r_i$ , входящий в состав роя, в текущий момент времени должен выбирать такое локальное действие  $a_i$ , которое направлено на минимизацию функции  $Y_k^i$ . Периодически повторяя процедуру выбора и реализации микророботом  $r_i$  текущего локального действия, направленного на минимизацию функции  $Y_k^i$ , через некоторое время система придет в равновесное состояние, при котором функция  $Y_k^i$  каждого робота роя примет минимальное значение. Это значение не может быть уменьшено за счет каких-либо локальных действий  $r_i$ .

Таким образом, резюмируя сказанное выше, можно предложить следующий обобщенный алгоритм функционирования роя микророботов при выполнении задачи  $k_i$ :

1) все микророботы, входящие в состав роя, получают из некоторого пункта управления тип (номер)  $k$  задачи, стоящей перед роем;

2) каждый микроробот  $r_i$ , входящий в состав роя, определяет (или получает по каналам связи) информацию о текущем состоянии и локальных действиях микророботов роя, попадающих в зону видимости;

3) на основании полученных данных микроробот  $r_i$  определяет состояние  $S_i^{\min}$ , в котором функция  $Y_k^i$  принимает минимальное значение;

4) микроробот  $r_i$  определяет действие  $a_i$ , направленное на преобразование его текущего состояния  $S_i$  в состояние  $S_i^{\min}$ ;

5) микроробот  $r_i$  реализует локальное действие  $a_i$ , после чего переходит к п. 2.

Данный обобщенный алгоритм делает возможным организацию взаимодействия в больших группах МПМР. При этом участие удален-

ного оператора сведено к минимуму и заключается в трансляции роботам роя кодов задач, которые ставятся перед роем. Очевидно, что нагрузка на канал связи дистанционного устройства управления с роботами роя в этом случае незначительна. Рассмотрим подробнее примеры решения некоторых, наиболее распространенных задач, ставящихся перед группой роботов: соблюдение дистанций роботами между собой, обход препятствий, барражирование в заданном направлении, поиск целей и движение к ним.

Задача соблюдения дистанций между роботами группы актуальна для всех случаев группового применения мобильных роботов как наземного, так и воздушного или подводного применения. Чрезмерное сближение роботов снижает рабочую область группы и чревато взаимными повреждениями роботов. В то же время нельзя допускать и излишнего удаления роботов друг от друга, так как это может привести к нарушению в работе системы коммуникаций, а также образованию «белых пятен» в рабочей области группы роботов. При решении задач о перемещении грузов группой роботов (например, таких как описанные в работе [10]) может стоять задача «окружения» транспортируемого груза по периметру, либо выстраивания в цепочку, с последовательным захватом друг за друга (см. например: [25, 26]). В общем случае, необходимо поддерживать дистанции между соседними роботами в определенном интервале значений. Такая задача может ставиться при необходимости компактного расположения роя роботов без взаимных помех, либо при выполнении задач сбора данных на большой территории без «брешей» и с минимальным перекрытием, обработки поверхностей и т. п.

Пусть  $m$  — минимальная допустимая дистанция между роботами,  $d$  — текущая дистанция между роботами  $r_i$  и  $r_j$ ,  $L$  — радиус видимости каждого робота  $r_i$ ,  $F_i(k)$  — вектор силы, действующий на робота  $r_i$  для выполнения действия  $a_i$ . Так как необходимо поддерживать требуемую дистанцию в заданном интервале со всеми соседними, т. е. попадающими в зону видимости, микророботами то вектор силы, действующей на робота, будет определяться аддитивной суммой векторов сил взаимодействия с каждым соседним роботом, а также силы взаимодейст-

вия с окружающей средой  $F_{iE}(k)$  в соответствии с формулой:

$$F_i(k) = \sum_{j=1}^n F_{ij}(k) + F_{iE}(k). \quad (1)$$

Тогда при выполнении условия  $m < d < L$ , вектор результирующей силы  $F_{ij}(k)$  будет направлен на робота  $r_j$  и прямо пропорционален дистанции между ними  $d$ :

$$\begin{cases} |F_{ij}(k)|d, & m < d < L; \\ |F_{ij}(k)|d^{-1}, & d < m < L. \end{cases}$$

Под задачей барражирования группы роботов  $R$  будем понимать такое пространственное перемещение группы, при котором рой перемещается в определенном направлении и дистанции между роботами соблюдаются. Такая задача может ставиться при необходимости перемещения роя к месту выполнения работ, при сборе информации об окружающей среде, при выполнении задач по радиоэлектронному противодействию (роботы, оснащенные уголковыми отражателями могут создавать засветку на радиолокаторах противника, и имитировать перемещение ложной цели) и в ряде других задач.

В том случае, когда каждый робот владеет информацией о направлении требуемого перемещения, задача легко решается. Но, учитывая специфику роевого применения больших групп микроботов, оснащенных малогабаритными приемными устройствами, действующих в условиях недетерминированной среды, а возможно, и в условиях организованного противодействия противника, особое значение приобретает задача барражирования роя роботов при условии, что не все роботы информированы о требуемом направлении движения. Неполная информированность роботов роя о направлении движения также наблюдается при поиске целей: ближайшие к цели роботы уже обнаружили цель и устремляются к ней, в то время как в зоне видимости остальных роботов цель еще не появилась.

Роботов группы, владеющих информацией о требуемом направлении движения, будем называть ведущими роботами, а остальных — ведомыми. У ведущих роботов формула расчета результирующей силы взаимодействия (1) по-

полнится еще одним слагаемым — вектором требуемого движения, обозначим его  $F_M$ . Тогда формула (1) приобретет вид:

$$F_i(k) = \sum_{j=1}^n F_{ij}(k) + F_{iE}(k) + F_{iM}.$$

При этом ведомые роботы двигаются по прежним правилам, за счет «притяжения» и «отталкивания» относительно ведущих роботов и друг друга, весь рой будет совершать направленное движение в заданном направлении.

Задача обхода препятствий чрезвычайно актуальна для экстремальной робототехники, и особенно для наземных микроботов, проходимость которых сильно ограничена (см. например [27]). Рассмотрим случай, когда роботы не имеют априорной информации о расположении непреодолимых препятствий на пути движения, а также роботы, обнаружившие препятствие не способны передавать информацию о нем другим роботам роя. Тогда формула расчета результирующей силы взаимодействия (1) пополнится еще одним слагаемым — вектором, лежащим на нормали к препятствию, но направленному в противоположную от препятствия сторону, обозначим его  $F_{iH}$  (рис. 1):

$$F_i(k) = \sum_{j=1}^n F_{ij}(k) + F_{iE}(k) + F_{iH}.$$

В ряде практических задач, выполняемых группой роботов, необходимо обеспечить барражирование роя роботов, либо его части (кластера) к некоторой цели. Примером такой цели может служить место дозаправки энергоносителем, зона уверенного приема радиосигнала, груз, который необходимо переместить, или даже военный объект, который надо уничтожить.

В зависимости от характера информационного обмена в рое роботов, возможны два сценария:

1) робот, обнаруживший цель, сообщает соседним роботам координаты цели, те передают по цепочке эту информацию своим соседям, и в скором времени все роботы роя имеют информацию о местоположении цели и могут двигаться в этом направлении;

2) робот, обнаруживший цель, не может сообщить ее координаты другим роботам роя.

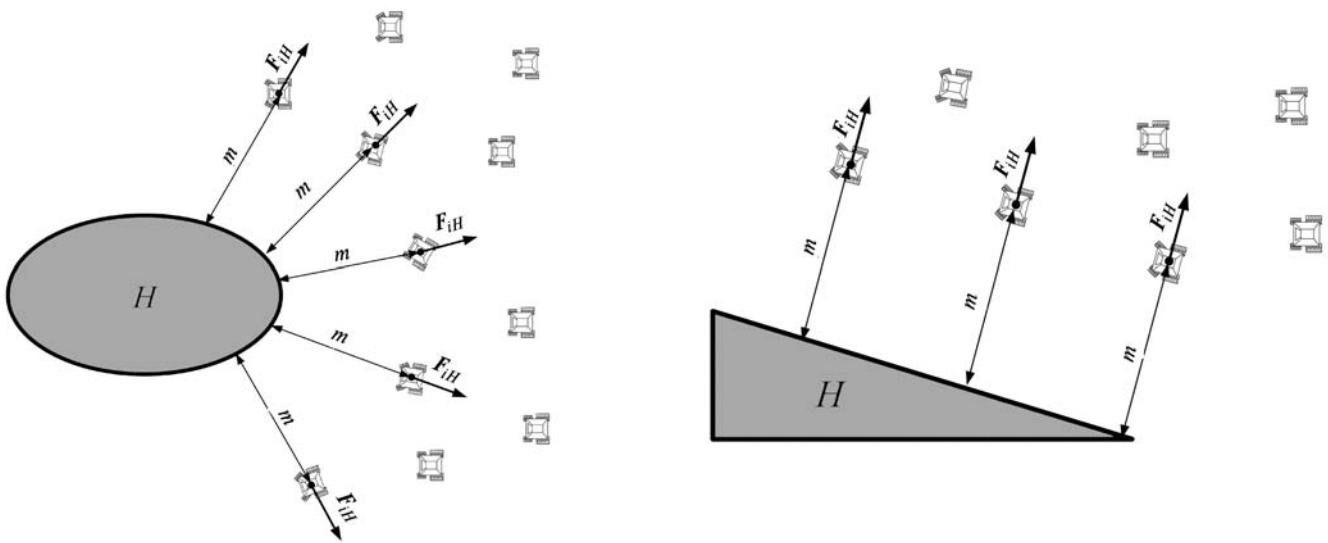


Рис. 1. Обход препятствий роём роботов

Поскольку в первом случае действия роя роботов вполне очевидны, рассмотрим подробнее второй. Робот, обнаруживший цель, может устремиться к ней, но не может сообщить другим роботам о причине изменения направления своего движения. В этом случае он становится «ведущим» (о «ведущих» и «ведомых» роботах

см. выше) и устремляется по направлению к цели. Соседние с ним роботы испытывают «силы притяжения» к ведущему роботу и устремляются за ним. Те роботы, в зону видимости которых не попал ведущий робот, со временем обнаружат, что значительная часть соседних им роботов устремилась в некотором направле-

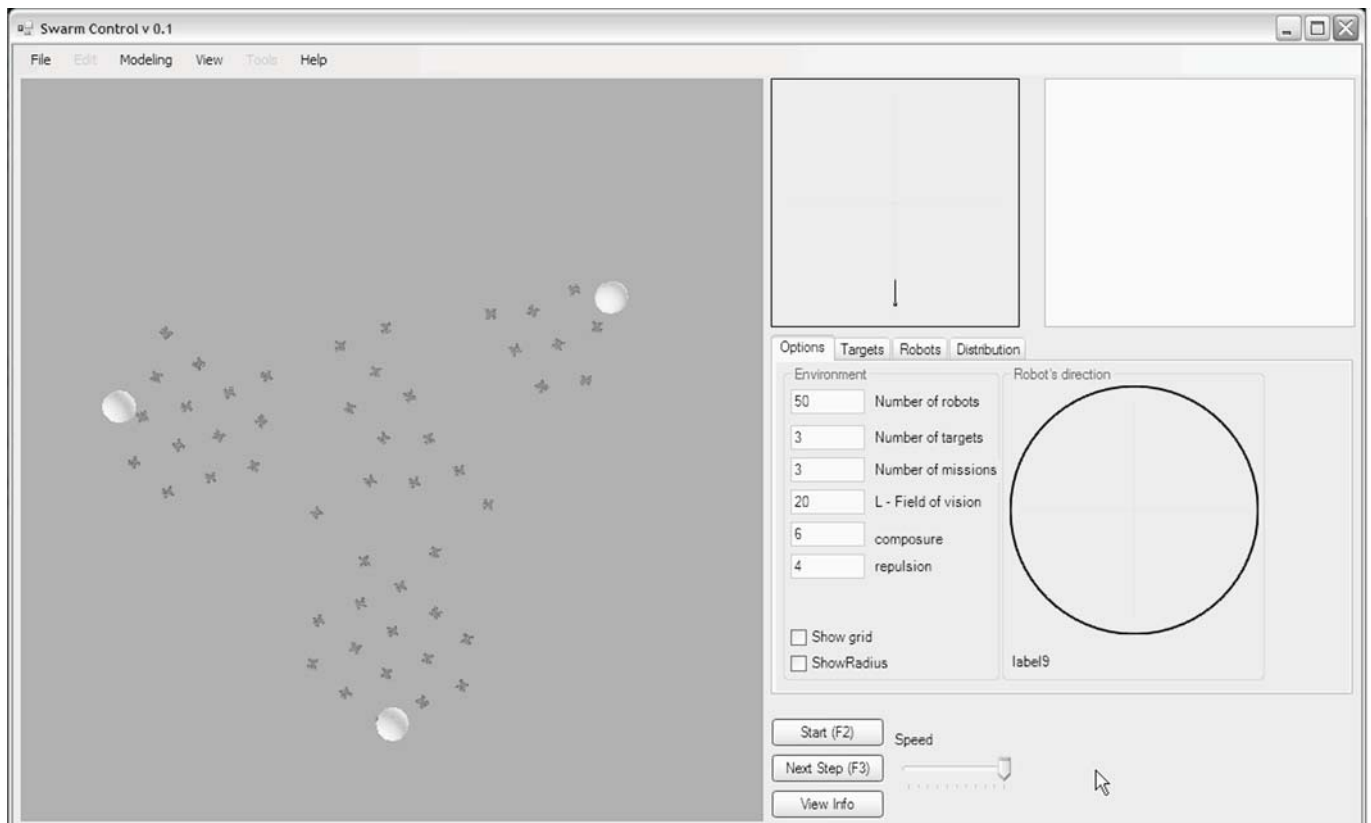


Рис. 2. Окно программы моделирования поведения роя МПМР при поиске целей и движении к ним



нии, тогда, и эти роботы устремятся вслед за ведущим роботом, сами того не подозревая.

На рис. 2 показано окно программы моделирования поведения роя из пятидесяти МПМР при поиске трех целей, обозначенных сферами. Стоит отметить что со временем каждый робот роя приблизился к одной из целей.

Таким образом, использование методов роевого интеллекта в экстремальной робототехнике открывает широкие возможности по применению больших групп микророботов.

## Литература

1. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 37–42.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.
3. Юревич Е.И. Групповое применение роботов в экстремальных ситуациях. Организация и управление // Известия ТРТУ. 2006. № 3. С. 24–27.
4. Юревич Е.И. Робот будущего — робот разумный // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12.
5. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиниченко С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированному в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001.
6. Lee C.H., Kim S.H., Kang S.C., Kim M.S., Kwak Y.K. Double-track mobile robot for hazardous environment applications // *Advanced Robotics*, Vol. 17. 2003. N. 5. P. 447–459.
7. Mondada F., Guignard A., Colot A., Floreano D., Deneubourg J.-L., Gambardella L.M., Nolfi S., Dorigo M. SWARM-BOT: A New Concept of Robust All-Terrain Mobile Robotic System // Technical report, LSA2 — I2S — STI, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, March 2002.
8. O'Gra R., Groß R., Christensen A.L., Mondada F., Bonani M., Dorigo M. Performance Benefits of Self-Assembly in a Swarm-Bot. // *IEEE Computer Society Press*. 2007. P. 2381–2387.
9. Nouyan S., Groß R., Dorigo M., Bonani M., Mondada F. Group Transport Along a Robot Chain in a Self-Organised Robot Colony // *IOS Press*, Amsterdam, The Netherlands. In Proc. of the 9th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems. P. 433–442.
10. Гайдук А.Р., Селимов Ч.Д. Перемещение тела группой интеллектуальных роботов в среде с препятствиями // Материалы научно-технического семинара «Управление в распределенных сетцентрических и мультиагентных системах». СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 22–24.
11. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.
12. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Стайные принципы управления в группе объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 12. С. 27–38.
13. Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. From Natural to Artificial Swarm Intelligence. Oxford University Press. 1999.
14. Dorigo M., Birattari M. Swarm intelligence // *Scholarpedia*. 2007. N 2(9).
15. Bonabeau E., Meyer Ch. Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business // *Harvard Business Review*. 2001. Vol. 79. N. 5. P. 106–114.
16. Abraham A., Grosan C., Ramos V. Swarm Intelligence in Data Mining. *Studies in Computational Intelligence*, Springer Verlag, Germany, 2006.
17. Beni G. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics // *Swarm Robotics SAB 2004 International Workshop*, Santa Monica, CA, USA, July 17, 2004, Revised Selected Papers (Lecture Notes in Computer Science Vol. 3342, 2005). Springer. P. 1–10.
18. Şahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application. // *Swarm Robotics. Lecture Notes in Computer Science*. 2005. Vol. 3342/2005. P. 10–20.
19. Mondada F., Guignard A., Bonani M., Bär D., Lauria M., Floreano D. SWARM-BOT: From Concept to Implementation. // In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems 2003*, IEEE Press. P. 1626–1631.
20. Seyfried J., Szymanski M., Bender N., Estaña R., Thiel M., Wörn H. The I-SWARM Project-Intelligent Small World Autonomous Robots for Micro-manipulation // *Swarm Robotics. Lecture Notes in Computer Science*. 2005. Vol. 3342/2005. P. 70–83.
21. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies // *Actes de la première conférence européenne sur la vie artificielle*, Paris, France, Elsevier Publishing, 1991. P. 132–142.
22. Karaboga D. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization // *Technical Report-TR06*, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
23. Reynolds C. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model // *SIGGRAPH '87: Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (Association for Computing Machinery)*. 1987. P. 25–34.
24. Timmis J., Andrews P., Hart E. On artificial immune systems and swarm intelligence // *Swarm Intelligence*. December 2010. Vol. 4. N. 4. P. 247–273.
25. Groß R., Dorigo M. Group Transport of an Object to a Target that Only Some Group Members May Sense // *Parallel Problem Solving from Nature — 8th International Conference, PPSN VIII*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2004. Vol. 3242 of *Lecture Notes in Computer Science*. P. 852–861.
26. Nouyan S., Groß R., Dorigo M., Bonani M., Mondada F. Group Transport Along a Robot Chain in a Self-Organised Robot Colony. In Proc. of the 9th Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems. IOS Press, Amsterdam, The Netherlands. P. 433–442.
27. Павловский В.Е., Кирикова Е.П., Павловский В.В. Моделирование поведения больших групп роботов в среде с препятствиями // Материалы научно-технического семинара «Управление в распределенных сетцентрических и мультиагентных системах». СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С.10–13.

Статья поступила в редакцию 05.09.2011 г.