

УДК 681.5.01

И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян**САМООРГАНИЗАЦИЯ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

В работе рассматриваются принципы и методы функционирования самоорганизующихся мультиагентных систем. Дается формулировка задачи и математическое описание процесса автономного формирования алгоритмов группового управления агентами. Исследование предлагаемого подхода проводится на примере перемещения тела по поверхности группой интеллектуальных роботов.

Интеллектуальный агент; группа; групповое управление; самоорганизация; кластер.

I.A. Kaliaev, A.R. Gaiduk, S.G. Kapustyan**SELF-ORGANIZATION IN MULTI-AGENT SYSTEMS**

The paper describes the principles and methods of operation of self-organizing multi-agent systems. The formulation of a problem and the mathematical description of process of independent creation of algorithms of group control by agents is given. Research of the offered approach is spent on an instance of moving of a body on a surface by group of intellectual robots.

Intelligent agent; group; group control; self-organization, cluster.

Введение. В общем случае группа интеллектуальных агентов может включать агенты, ориентированные на решение разнородных задач. Это могут быть транспортные средства, роботы для ведения разведки, изучения химической, радиационной или электромагнитной обстановки, связные агенты и т.д. Естественно, перед такой группой ставятся цели, достижение которых требует участия одного, или нескольких агентов. В связи с этим возникают задачи оценки поставленных целей, условий их достижения, анализа ситуации в целом, и планирования действий отдельных агентов на уровне группы. Комплексное решение этих задач и составляет содержание группового управления [1].

Для обеспечения эффективного управления агентами группы прежде всего необходим, на наш взгляд, формальный алгоритм управления действиями агентов группы. Так как группа должна обеспечить достижение поставленных целей в заранее неизвестных условиях, то этот алгоритм должен формироваться агентами самой группы в автономном режиме. Отсюда следует, что решение задачи группового управления следует искать в классе самоорганизующихся систем [2, 3].

В связи с этим в данной работе ставится задача разработки некоторых подходов к построению самоорганизующейся системы управления группой интеллектуальных агентов, ориентированной на достижение некоторых целей.

Под группой интеллектуальных агентов будем понимать множество технических агентов, автономно (без участия человека или с минимальным его участием) функционирующих в некоторой среде, способных воспринимать информацию о среде, реагировать на изменения состояния среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи.

Существует много методов организации взаимодействия интеллектуальных агентов в группах. Для реализации этих методов могут эффективно применяться мультиагентные технологии. Однако подавляющее большинство таких методов предназначено для решения конкретных целевых задач и, зачастую, не могут быть использованы для решения других типов задач. Примером могут являться методы, основанные на принципах "рыночной экономики" и используемые для организации взаимодействия в группах мобильных роботов, решающих задачу картографирования местности [4].

Наиболее универсальными и эффективными, на наш взгляд, являются методы коллективного взаимодействия агентов, разработанные в работе [1]. Данные методы могут быть использованы и для решения задачи самоорганизации систем группового управления интеллектуальными агентами.

Рассмотрим формальную постановку задачи самоорганизации систем группового управления.

Постановка задачи. Будем предполагать, что некоторая группа (рис. 1) включает интеллектуальные агенты $O_1 \div O_N$ и систему группового управления (СГУ), в которой протекают процессы самоорганизации и формируются управления агентами [1].

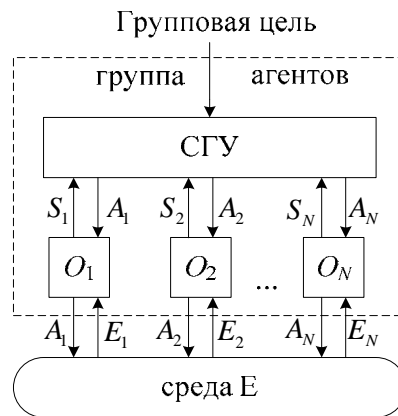


Рис. 1. Группа интеллектуальных агентов

Функционирование группы агентов, согласно рис. 1, протекает следующим образом. Агенты группы $O_1 \div O_N$ собирают информацию об окружающей их среде в виде векторов E_i и вместе с информацией о своём состоянии (вектора S_i) передают в СГУ. Здесь на основе информации о групповой цели, состоянии агентов, среды и информации о возможностях агентов группы формируются управления агентами группы, которые фактически представляют собою действия агентов, выполняемые ими в определенной последовательности, вплоть до достижения поставленной перед группой цели.

Основная сложность создания системы группового управления интеллектуальными агентами заключается в многообразии задач, которые должна решать такая группа. Как отмечалось выше, заранее неизвестны ни конкретная цель, которая будет поставлена перед группой, ни условия, в которых она должна быть достигнута, поэтому заранее нельзя указать конкретный алгоритм формирования управлений. Он должен формироваться самой группой или её лидером в зависимости от складывающейся ситуации.

С другой стороны, группа агентов даже интеллектуальных и большой численности не может обеспечить достижение всевозможных целей. Очевидно, каждая группа агентов ориентируется на достижение определенного круга целей. Следовательно, и круг алгоритмов формирования управлений, вообще говоря, может быть ограничен. Именно это дает основание полагать, что рассматриваемая задача может быть решена.

В данной работе основное внимание уделяется способам описания целей и методам обеспечения условий самоорганизации в группах интеллектуальных агентов.

Самоорганизация. Первоначально явления самоорганизации наблюдались в естественных и экспериментальных физико-химических системах: структуры А, Тьюринга, реакции Белоусова-Жаботинского, ячейки Бенара и т.п. [2, 3]. По мнению большинства исследователей, самоорганизующиеся явления (СО-явления) в естественных системах возникают из-за потери структурной устойчивости системы в силу изменившихся внешних условий. Возникающая в соответствии с естественными законами природы новая структура иногда оказывается "организованной структурой", т.е. упорядоченной структурой с устойчивым положением равновесия или с устойчивым установившимся движением. Известно, что системам такого типа в установившемся состоянии соответствует минимум функции Ляпунова. На этом основании можно сказать, что самоорганизация – это образование структуры динамической системы с устойчивым положением равновесия или с устойчивым невозмущенным движением, соответствующей экстремуму некоторого критерия в сложившихся условиях.

Явление самоорганизации подробно рассматривается в коллективной монографии [2]. В частности, С.В. Корниенко и О.А. Корниенко вводят понятия "естественной" и "искусственной" самоорганизации и отмечается, что правила искусственной самоорганизации, которая протекает в искусственных, технических системах, "задает разработчик системы". По их мнению, самоорганизация всегда идет по определённым *локальным правилам самоорганизации*.

Следовательно, для построения самоорганизующейся системы, прежде всего, необходимо найти или сформулировать локальные правила самоорганизации. Чтобы процесс искусственной самоорганизации был реализуемым в технической системе, примем следующее определение: *самоорганизация в технической системе – это процесс автономного формирования оптимальной структуры и оптимального алгоритма её функционирования в соответствии с поставленной перед системой целью, некоторым критерием качества и внешними условиями*.

Управление группой агентов. Обычно для достижения некоторой цели требуются не все агенты группы, поэтому в группе агентов, прежде всего, должны автономно образовываться «специфические структуры» – кластеры, агенты которых ориентированы на достижение конкретной цели. Ряд алгоритмов формирования кластеров в структуре группы агентов, когда перед нею поставлено несколько целей, предложены в работе [1]. Здесь же для большей ясности будем предполагать, что группе поставлена одна цель. Состав, численность, техническое и программное обеспечение агентов, включаемых в соответствующий кластер, определяются как теми действиями, которые необходимо выполнить для достижения конкретной цели, так и возможностями агентов.

Математически процесс автономного формирования структурного кластера можно описать следующим образом. Каждый агент O_i , $i = \overline{1, N}$ группы может выполнить некоторую совокупность действий $A_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{m_i}\}$. С другой стороны, для достижения некоторой цели T_μ в условиях $f_\mu^\circ = \{f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots\}$ необходимо выполнить определенную совокупность действий $T_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{q_\mu}\}$, причем каждое из них характеризуется, по крайней мере, двумя признаками: типом и интенсивностью.

Кроме того, на процесс достижения цели T_μ обычно накладывается множество других требований $Q_\mu = \{J(\mu), t_{\text{дост}}(\mu), n(\mu), \dots\}$, связанных с процес-

сом достижения цели. Здесь $J(\mu)$ – критерий эффективности, $t_{\text{дост}}(\mu)$ – время достижения цели, $n(\mu)$ – число агентов кластера, ориентированного на достижение цели T_μ и т.п.

Если все элементы $T_{v\mu}$, $v = \overline{1, q_\mu}$ по типу и по интенсивности имеются среди элементов A_{ji} агента O_i данной группы, т.е. $T_{v\mu} \in A_i$, $v = \overline{1, q_\mu}$, то достижение цели T_μ в "проектных" условиях f_μ° , очевидно, может обеспечить один агент, тогда в структуре группы выделяется кластер из этого агента. Однако обычно возможностей одного агента недостаточно, и достижение цели T_μ могут обеспечить лишь несколько агентов O_i , таких, что выполняется следующее условие:

$$T_{v\mu} \in \{A_{i_1(\mu)}, A_{i_2(\mu)} \dots A_{i_{n(\mu)}(\mu)}\}, v = \overline{1, p_\mu}, \quad (1)$$

где $n(\mu)$ – число агентов группы, среди множества действий которых имеются все действия $T_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p_\mu\mu}\}$, выполнение которых в условиях f_μ° обеспечивает достижение этой цели.

Если каждое действие $T_{v\mu}$ выполняется одним агентом O_i , то численность кластера K_μ , ориентированного на достижение цели T_μ , будет равна числу действий $T_{v\mu}$, т.е. $n(\mu) = p_\mu$. В противном случае – $n(\mu) < p_\mu$.

Как правило, одно и то же действие $T_{v\mu}$ выполняется различными агентами O_i с различной эффективностью. Пусть $q_{iv}(\mu)$ – это оценка эффективности выполнения агентом O_i действия $T_{v\mu}$. Очевидно, в кластер K_μ , ориентированный на достижение цели T_μ , целесообразно включать те агенты группы $O_1 \div O_N$, которые обеспечивают достижение цели с наибольшей эффективностью, т.е. те агенты, для которых выполняется условие

$$J = \sum_{v=1}^{p_\mu} q_{iv}(\mu) \rightarrow \max_{i \in \overline{1, N}}. \quad (2)$$

При этом число агентов кластера, ориентированного на достижение цели T_μ в проектных условиях f_μ° , должно быть минимальным, т.е.

$$n(\mu) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Условия (1) – (3) фактически являются локальными правилами самоорганизации кластера K_μ , ориентированного на достижение цели T_μ , а их реализация является алгоритмом формирования этого кластера. Создание алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных агентов для выполнения этого алгоритма самими агентами, очевидно, не представляет каких-либо проблем [1].

Подчеркнём, что если для некоторой группы условие (1) не может быть выполнено, то данная группа, очевидно, не способна обеспечить достижение цели T_μ в условиях f_μ° .

Конечно, для реализации алгоритма, соответствующего условиям (1) – (3), должны быть сформированы множества $A_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}\}$, $f_\mu^\circ = \{f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots\}$, $T_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p_\mu\mu}\}$ и $Q_\mu = \{J_\mu, t_{\text{дост.}\mu}, n(\mu), \dots\}$. Формирование множеств A_i , очевидно, не представляет больших сложностей. Поскольку здесь рассматриваются искусственные интеллектуальные агенты, то множество A_i определяется назначением и конструкцией агента O_i , а компоненты A_{ji} этого множества представлены в техническом паспорте агента O_i .

Основные проблемы создания СО-систем связаны с формированием целевых множеств $T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots$, $f_{1\mu}^\circ, f_{2\mu}^\circ, \dots$ и $J_\mu, t_{\text{дост.}\mu}, n(\mu), \dots$, содержание которых определяется заранее неизвестной целью. Поэтому существование СО-алгоритмов формирования в реальном времени этих множеств в общем случае, т.е. при целях произвольного вида, представляется весьма проблематичным.

Как отмечалось выше, та или иная группа агентов всегда формируется для достижения *лишь определенного круга* целей $T_\mu \in \Xi$, где Ξ – множество целей, на достижение которых ориентирована данная группа агентов. Необходимые для достижения каждой конкретной цели T_μ действия $T_{v\mu}$, $v = \overline{1, q_\mu}$ и порядок их выполнения в определенных условиях f_μ° , Q_μ вполне определяются известными законами природы.

В принципе возможны два подхода к формированию множеств $T_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p_\mu\mu}\}$ и f_μ° . Первый "ИИ-подход" состоит в том, что эти множества формируются методами теории интеллектуальных систем самими агентами в реальном времени [2] на основе соответствующих законов природы. Второй – "экспертный подход" – состоит в априорной формулировке этих множеств экспертами также на основе соответствующих законов природы в виде онтологических моделей и запоминании их в базах знаний агентов группы [1, 2, 5]. В дальнейшем будем иметь в виду "экспертный подход".

Совокупность действий $T_{v\mu}$, $v = \overline{1, q_\mu}$ и последовательность их выполнения в некоторых "проектных" условиях f_μ° , разработанные экспертами, фактически представляют собой некоторый алгоритм достижения поставленной цели: $L_\mu(T_\mu, f_\mu^\circ, Q_\mu) = \{T_{v_1(\mu)}, T_{v_2(\mu)}, \dots, T_{v_{p_\mu}(\mu)}, f_\mu^\circ, Q_\mu\}$. Этот алгоритм включает p_μ действий $T_{v\mu}$. Однако действительные условия f_μ , при которых агентам кластера необходимо будет обеспечивать достижение цели, скорее всего, будут отличаться от проектных, т.е. $f_\mu \neq f_\mu^\circ$. Поэтому алгоритм $L_\mu(T_\mu, f_\mu^\circ, Q_\mu)$ должен обладать свойством робастности или быть самоорганизующимся, т.е. способным обеспечить выполнение необходимых действий в изменившихся условиях [3, 6, 7].

Таким образом, если алгоритмы L_μ достижения всех целей $T_\mu \in \Xi$ сформированы и находятся в базе знаний всех агентов группы $O_1 \div O_N$, то алгоритм

самоорганизации группы интеллектуальных агентов при одной цели T_μ , поставленной перед группой, заключается в следующем:

- ◆ получив цель $T_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p,\mu}\}$ и условия f_μ° , Q_μ , агенты $O_1 \div O_N$ на основе соотношений (1) – (3) формируют кластер $K_\mu = \{O_{i_1(\mu)}, O_{i_2(\mu)}, \dots, O_{i_n(\mu)}\}$ мощностью $n(\mu)$. При формировании кластера могут использоваться алгоритмы коллективного взаимодействия, предложенные в работе [1];
- ◆ из своих баз знаний агенты $O_i \in K_\mu$ кластера извлекают алгоритм $L_\mu(T_\mu, f_\mu^\circ, Q_\mu)$ и адаптируют его к текущим условиям f_μ° ;
- ◆ агенты $O_i \in K_\mu$ выполняют действия $A_{i_1(\mu)} = T_{v_1(\mu)}$, $A_{i_2(\mu)} = T_{v_2(\mu)}$, ..., $A_{i_q(\mu)} = T_{v_q(\mu)}$ в соответствии с алгоритмом $L_\mu(T_\mu, f_\mu^\circ, Q_\mu)$.

Исследование предложенного подхода проводилось на примере задачи перемещения группой мобильных роботов твердого круглого тела по горизонтальной поверхности из исходной точки в заданную, целевую точку [8]. Роботы группы на основе информации о координатах целевой точки и своем расположении относительно тела формируют один или два активных кластера, которые осуществляют перемещение тела. На основе пробных движений роботы этих кластеров устанавливают характер трения, сопровождающего движения тела, формируют и реализуют тот или иной алгоритм своих действий. Перемещение тела может быть прямолинейным, если существует соответствующий кластер, или зигзагообразным вдоль прямолинейной или криволинейной траектории.

Выводы. В процессах искусственной самоорганизации важную роль играют локальные правила самоорганизации, которые формулируются разработчиком самоорганизующейся системы. При этом могут использоваться известные законы управления, в частности, оптимальные управления и соответствующие критерии качества. Локальные правила самоорганизации – являются многовариантными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009.
2. От моделей поведения к искусственному интеллекту [Текст]: Монография / Под ред. В.Г. Редько. – М.: КомКнига, 2006.
3. *Новиков Д.А.* Математические модели организации и функционирования команд. – М.: Физматлит, 2008.
4. *Zlot R., Stentz A., Dias M. B., Thayer S.* Multi-Robot Exploration Controlled By A Market Economy, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2002.
5. *Колчин А.Ф.* Представление модели знаний специалиста-проектировщика на основе онтологического подхода / А.Ф. Колчин, Н.В. Елисеева // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2006. – № 3. – С. 66-69.
6. *Красовский А.А.* Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта / А.А. Красовский, А.И. Наумов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 6. – С. 69-75.
7. *Гайдук А.Р.* Алгоритмическое обеспечение самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 3. – С. 56-63.
8. *Каляев И.А.* Проблемы интеллектуального управления мультиробототехническими системами / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян // Мехатроника, автоматизация,

управление (МАУ-2009): Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 190-194.

Каляев Игорь Анатольевич

Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем Южного федерального университета.

E-mail: kaliaev@mvs.tsure.ru.

347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2.

Тел.: 88634360376, 88634615459.

Капустян Сергей Григорьевич

E-mail: kap@mvs.tsure.ru.

Гайдук Анатолий Романович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: gaiduk_2003@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634315494.

Kalyaev Igor Anatol'evich

Scientific research institute of multiprocessor computing systems of SFU.

E-mail: kaliaev@mvs.tsure.ru.

2, Chehova Street, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634360376, 88634615459.

Kapustyan Sergey Grigor'evich

E-mail: kap@mvs.tsure.ru.

Gaiduk Anatoliy Romanovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: gaiduk_2003@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634315494.

УДК 528.8

А.В. Тимофеев

**МУЛЬТИ-АГЕНТНЫЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
И НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ***

Рассматриваются основы теории и перспективы развития мульти-агентных робототехнических систем. Описываются интеллектуальные и нейросетевые технологии групповой навигации, сетевого управления и параллельной обработки информации и решения конфликтов в прикладных задачах.

Системы интеллектуального управления; сетевые и нейросетевые агенты; мульти-агентные технологии.

A.V. Timofeev

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-08-00767-а, РФФИ № 08-08-12183-офи и РФФИ-ГФЕН Китая 10-08-91159 и Проекта № 1.6 Программы № 1 Президиума РАН.