

На правах рукописи

ТИМАКИН
ДМИТРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ

МНОГОАГЕНТНЫЕ КОГНИТИВНЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
СО СЛОЖНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации (информатика)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена на кафедре «Системный Анализ и Управление»
Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Станкевич Лев Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Гаврилова Татьяна Альбертовна

кандидат технических наук, доцент Дорогов Александр Юрьевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Институт Информатики и Автоматизации Российской Академии Наук

Защита состоится 13 февраля 2003 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.18 в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 21, корпус 9, аудитория 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского Государственного Политехнического Университета.

Автореферат разослан 29 декабря 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шашихин В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. На фоне всеобщей интеграции технических и социальных процессов все более остро встает проблема управления группами сложных динамических объектов, взаимодействующих между собой в процессе достижения общей цели.

В течение последних лет данная задача являлась предметом многих исследований. Предлагаемые подходы к ее решению основывались на идеях распределенного искусственного интеллекта и многоагентных систем.

Многоагентные управляющие системы являются важной частью современных сложных динамических систем, состоящих из автономных объектов, выполняющих совместную работу, требующую организации сложного поведения в непредсказуемой среде. Они значительно повышают эффективность управления такими системами на стратегическом, тактическом и исполнительном уровнях. Области применения таких систем многочисленны и охватывают управление промышленными предприятиями и корпорациями, транспортными и складскими комплексами, исследовательскими и инновационными проектами, экономическими и социотехническими системами, военными и космическими комплексами.

Однако имеется ряд причин, затрудняющих создание эффективных многоагентных систем управления. Компоненты такой системы должны обеспечивать сложное индивидуальное поведение каждого объекта группы в соответствии с его проблемной ориентацией. Основной задачей является управление координированным поведением членов группы, распределенным образом решающей общую задачу. Как правило, управление осуществляется в условиях изменяющейся обстановки, поэтому требуется быстрая адаптация к этим изменениям. Кроме того, многоагентная система управления должна обеспечивать решение задач в реальном времени при ограниченных вычислительных ресурсах. При этом качество принятия решений не должно быть ниже критического уровня, все еще позволяющего решить общую задачу.

Хорошо известно, что все эти проблемы в целом очень сложны и требуют применения мощных вычислительных систем, а также специальных методов распределенного искусственного интеллекта.

Несмотря на то, что в настоящее время в основном уже определены принципы, на которых могут базироваться такие системы управления, и даже созданы действующие прототипы, в целом проблема построения эффективных многоагентных управляющих систем пока еще далека от своего решения.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование и разработка многоагентной системы управления группой взаимодействующих динамических объектов со сложным поведением, функционирующих в непредсказуемой среде в реальном масштабе времени в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Поставленная цель обусловила необходимость решения следующих основных задач:

- разработка вариантов архитектуры когнитивного агента и многоагентных управляющих систем, построенных на их основе;
- разработка механизмов координации совместного поведения когнитивных агентов;
- развитие методов, моделей и алгоритмов обработки информации и обучения управлению поведением отдельных объектов с использованием когнитивных принципов;
- разработка обучаемых модулей, на базе которых реализуются наборы функций и процессов агентов, необходимые для эффективного решения задач управления сложным поведением в условиях ресурсных ограничений;
- создание программного инструмента для проектирования и исследования прототипов когнитивных управляющих систем, в том числе и когнитивных агентов.
- создание прототипа когнитивного агента для оценки эффективности разработанных методов и моделей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы: методы дискретной математики, вычислительной геометрии, динамического программирования, теория аффинных итерационных функций, методы системного анализа и искусственного интеллекта, а также имитационное моделирование на компьютере.

Научная новизна. В процессе проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие научные результаты:

1. Разработан метод многомерной адаптивной триангуляции, основанный на комбинации триангуляции Куна и уточнения триангуляции путем периодической бисекции, позволяющий осуществлять переход от непрерывного к дискретному пространству состояний объекта управления. Последнее позволяет настраивать систему управления с помощью стандартных методов обучения с подкреплением.
2. С использованием предложенного метода адаптивной триангуляции разработан эффективный вычислительный алгоритм многомерной аппроксимации целевой функции.
3. На базе предложенного алгоритма многомерной аппроксимации разработана структура когнитивного модуля, способного в реальном масштабе времени реализовать обучение с подкреплением и супервизорное обучение.
4. Предложена архитектура когнитивного агента, обеспечивающего управление группой сложных динамических объектов без использования символического представления знаний, что повышает производительность системы и снижает потребление ресурсов.

Практическая ценность. Значение результатов для практики состоит в разработке универсального когнитивного управляющего модуля, способного путем обучения с подкреплением настраиваться на управление сложными динамическими объектами. Предложенная архитектура когнитивного агента, на базе которого может быть построена многоагентная управляющая система, требует значительно меньших вычислительных ресурсов для своей

реализации. Такая система может быть использована для эффективного управления подвижными объектами со сложным поведением, которые взаимодействуют между собой в процессе решения общей задачи. Применение разработанного программного комплекса позволяет уменьшить сроки разработки когнитивных управляющих систем и повысить их производительность.

Реализация результатов работы. В результате исследования был разработан и реализован программный комплекс, позволяющий в визуальной интерактивной среде на базе отдельных обучаемых модулей конструировать и исследовать когнитивные системы управления сложными объектами.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертации были представлены и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международный симпозиум “Интеллектуальные системы – ИНТЕЛС’98”, 30 июня - 4 июля 1998, Псков.
2. Научно-техническая конференция “Фундаментальные исследования в технических университетах” 25-26 июня 1998, Санкт-Петербург.
3. Всероссийская научно-техническая конференции “Нейроинформатика - 99”, 20-22 января 1999, Москва.
4. V Всероссийская конференция “Нейрокомпьютеры и их применение”, 17-19 февраля 1999, Москва.
5. Международная научно-техническая конференция “IS&ITC-2000”, Июнь 2000, Санкт-Петербург
6. III-я Всероссийская научно-техническая конференция “Нейроинформатика-2001”, 2001, Москва
7. VI Международная научно-практическая конференция “Системный анализ в проектировании и управлении” 28 июня – 5 июля 2002, Санкт-Петербург

Основные положения, выносимые на защиту:

- Архитектура когнитивного агента многоагентной управляющей системы.

- Метод многомерной адаптивной триангуляции, основанный на триангуляции Куна и методе периодической бисекции;
- Алгоритм линейной многомерной аппроксимации, базирующийся на применении барицентрической интерполяции;
- Метод обучения с подкреплением, основанный на предложенном алгоритме многомерной аппроксимации;

Личный вклад автора. Основные научные положения, теоретические выводы и разработки, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 138 страниц машинописного текста, 32 рисунка и список литературы на 79 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы исследования, определен объект исследования, и сформулирована актуальность проблемы, ее состояние в настоящее время и существующие трудности в ее разрешении. Сформулированы цели и задачи исследования и приведено содержание работы по главам.

В первой главе производится анализ существующих подходов к построению многоагентных систем, как средства распределенного интеллектуального управления группой взаимодействующих динамических объектов. В данной главе дается общая классификация агентов по типу среды функционирования, классу архитектуры и базовым способностям агента.

Кроме того, в первой главе дается обзор основных существующих механизмов, направленных на обеспечение взаимодействия агентов в процессе достижения общей цели.

Помимо общей классификации рассматривается несколько конкретных существующих архитектур агентов, предназначенных для работы в реальной сложной непредсказуемой среде.

В результате проведенного анализа выявлено слабое место всех рассмотренных архитектур, которое заключается в том, что для реализации сложного поведения, такого как планирование и координация совместных действий во всех этих архитектурах используется символическое представление знаний, которое обладает высокой гибкостью, но является весьма неэффективным в вычислительном отношении. В связи с этим предлагается использовать когнитивный подход, заключающийся в том, что при разработке архитектуры агента помимо учета требований, накладываемых средой, необходимо руководствоваться стремлением в максимальной степени смоделировать когнитивные процессы и функции, свойственные человеческому мозгу. Построенный таким образом агент можно назвать когнитивным.

Во второй главе на основе анализа существующих подходов к построению многоагентных систем с учетом характеристик среды и физиологической обоснованности различных классов архитектуры агента в качестве основы для построения когнитивного агента выбирается комбинированная трехслойная архитектура. При этом нижний слой предлагается реализовывать на базе реактивной архитектуры, средний слой на основе модели BDI, а верхний на базе теории общих намерений.

Ввиду низкой эффективности символического представления знаний для построения когнитивного агента предлагается использовать ассоциативные структуры, поскольку они достаточно эффективны и являются наиболее близкой моделью памяти человека. При таком подходе основные ментальные понятия агента, такие, как намерения, желания и убеждения могут быть представлены в виде векторов в соответствующих пространствах состояний.

Предлагаемая структура когнитивного агента представлена на рисунке 1.

Рассмотрим основные принципы функционирования агента, имеющего такую структуру.

При инициализации формируются вектора желаний и убеждений агента. Модуль генерации вариантов на основе имеющихся желаний, убеждений и намерений формирует вектор потенциальных намерений, адекватный текущей ситуации. Модуль согласования намерений координирует эти потенциальные намерения с другими агентами. В случае возникновения конфликта потенциального намерения с убеждениями другого агента активизируется процесс согласования убеждений, осуществляемый соответствующими модулями агентов. Конфликт намерений разрешается на основе их приоритетов. В случае отсутствия конфликтов потенциальное намерение передается на модуль генерации общих намерений. При необходимости на основе данного потенциального намерения формируется общее намерение, которое поступает на модули согласования общих намерений других агентов, откуда передается на модули согласования намерений. Если общее намерение не конфликтует с текущими намерениями и убеждениями, модуль согласования намерений пытается согласовать это общее намерение с другими агентами. При отсутствии конфликтов модуль согласования общих намерений передает агенту, сгенерировавшему общее намерение о своей готовности его принять. Модуль генерации общих намерений выбирает из агентов, готовых принять общие намерения тех, которые его наиболее устраивают, и подтверждает требование принятия общих намерений. В результате эти агенты активизируют свои модули генерации общих намерений и при необходимости синтезируют на основе имеющегося общего намерения собственные общие намерения. В случае совпадения общего намерения с индивидуальным намерением, на основе которого оно было сгенерировано, данное общее намерение не служит базой для генерации новых общих намерений. В случае успеха агенты принимают общее намерение и подтверждают это. В случае неудачи агент, сгенерировавший общее намерение, пытается изменить конфигурацию агентов, принимающих это намерение. Если это не удастся, намерение, вызвавшее

генерацию общего намерения, не принимается. В случае успеха агент передает намерение модулю коррекции намерений и это намерение становится текущим намерением агента. Все текущие намерения поступают на модуль исполнения намерений, который осуществляет настройку слоя управления на исполнение текущих намерений.

В случае выполнения намерения или возникновения ситуации, в которой выполнение намерения оказывается невозможно, модуль коррекции убеждений соответствующим образом настраивает убеждения и модуль коррекции намерений на основе новых убеждений снимает данное намерение. Если снимаемое намерение являлось групповым, активизируется модуль согласования убеждений, который ставит в известность о факте исполнения или нерелевантности группового намерения всех остальных агентов.

По аналогии со структурой мозга, в котором все когнитивные функции реализуются на основе сетей нейронов, предлагается реализовать все основные функции когнитивного агента на основе единых базовых элементов, представляющих собой обучаемые модули, способные настроиться на произвольное вектор-векторное отображение входов на выходы. Такая настройка должна происходить как на основе супервизорного обучения, так и путем обучения с подкреплением. Высокая размерность пространств состояний ментальных понятий накладывает на структуру обучаемого модуля требование эффективного функционирования и обучения в случае высокой размерности пространства входов.

В третьей главе решается задача разработки структуры обучаемого модуля, являющегося базовым элементом при построении когнитивного агента. В общем виде данная задача сводится к задаче функциональной аппроксимации, однако накладываемые ограничения значительно сужают класс возможных решений. Существует ряд методов нелинейной аппроксимации, эффективных в пространствах высокой размерности, однако анализ литературы показал, что в общем случае такие методы не обеспечивают сходимости при обучении с подкреплением. Линейные методы аппроксимации позволяют

обеспечить сходимость с вероятностью 1, однако, как правило, большинство таких методов неэффективно для пространств высокой размерности.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать класс линейных функций, известных как барицентрические интерполяторы.

При этом значение некоторой функции $f(x)$ в заданной точке x , лежащей внутри выбранного симплекса с вершинами $x^{(0)}, \dots, x^{(n)} \in \square^n$ аппроксимируется линейной комбинацией значений функции в этих вершинах:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n \lambda_{x^{(i)}}(x) f(x^{(i)}), \quad x \in T_{(x^{(0)}, \dots, x^{(n)})} \quad (1)$$

где $\lambda_{x^{(i)}}(x)$ - барицентрические координаты x , определяемые как положительные коэффициенты, однозначно задаваемые системой уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^n \lambda_{x^{(k)}} = 1 \\ \sum_{k=0}^n \lambda_{x^{(k)}} x^{(k)} = y \end{cases} \quad (2)$$

В общем случае вычисление барицентрических координат для произвольного симплекса является достаточно трудоемкой задачей, поскольку оно требует обращения матрицы симплекса.

В связи с этим предлагается использовать новый метод многомерной триангуляции, основанный на комбинации триангуляции Куна и периодическом методе бисекции, заключающемся в рассечении самого длинного ребра симплекса, не содержащего вершин, созданных в течение текущего периода. Показано, что при использовании данного метода триангуляции возникает не более n классов конгруэнтности, следовательно, метод устойчив. Любой симплекс, полученный в результате такой триангуляции, с помощью простых аффинных преобразований масштабирования и инверсии порядка и значений координат может быть приведен к базовой форме, которой соответствует треугольная единичная матрица, обращение которой не составляет никаких проблем.

Состоятельность триангуляции поддерживается путем определения для каждой добавляемой вершины симплексов, в которые она входит и их последовательного уточнение до тех пор, пока данная вершина не станет одной из вершин уточненных симплексов.

В результате применения предложенной триангуляции все пространство состояний может быть дискретизовано на сетке переменного разрешения структурированной в виде дерева симплексов.

Предложен простой алгоритм сложности $O(N)$, где N – средняя глубина дискретизации, позволяющий определить симплекс, которому принадлежит произвольная точка $x \in \square^n$ и, осуществив преобразование координат этой точки в пространство базового симплекса, найти барицентрические координаты $\lambda_{x^{(i)}}(x)$, $1 \leq i \leq n+1$.

Предложены алгоритмы обучения модуля, построенного на основе данного барицентрического аппроксиматора, путем супервизорного обучения и обучения с подкреплением.

При супервизорном обучении для обновления значений функции в вершинах $f(x^{(i)})$ и степеней доверия этим значениям $p_{x^{(i)}}$ на базе примеров, задающих $f(x)$ предлагается следующая итерационная схема:

$$f_{n+1}(x^{(i)}) = f_n(x^{(i)}) + \left(f(x) - f_n(x^{(i)}) \right) \frac{\lambda_{x^{(i)}}(x)}{p_{n+1}(x^{(i)})} \quad (3)$$

$$p_{n+1x^{(i)}} = p_{nx^{(i)}} + \lambda_{x^{(i)}}(x) \quad (4)$$

Алгоритм обучения с подкреплением строится на основе методов динамического программирования. Решается задача максимизации значения функционала подкрепления (5), путем выбора оптимального управления $u^*(t)$.

$$J(x; u(t)) = \int_0^{\tau} \gamma^t r(x(t), u(t)) dt + \gamma^{\tau} R(x(\tau)) \quad (5)$$

где $r(x, u)$ – текущее подкрепление, $r_b(x)$ – граничное подкрепление, γ – коэффициент $0 \leq \gamma < 1$.

В процессе решения этой задачи вводится целевая функция:

$$V(x) = \sup_{u(t)} J(x; u(t)) \quad (6)$$

Путем аппроксимации уравнения Гамильтона-Якоби-Белмана с помощью конечно-разностной схемы получаем следующее выражение для целевой функции:

$$V^\Sigma(x) = \sup_{u \in U} \left[\gamma^{\tau(x, u)} \sum_{j=0}^n \lambda_{x^{(j)}}(\eta(x, u)) V^\Sigma(x^{(j)}) + \tau(x, u) r(x, u) \right] \quad (7)$$

где $\eta(x, u)$ – проекция x в направлении, параллельном $f(x, u)$ на противоположную грань симплекса, а $\tau(x, u)$ такого, что:

$$\eta(x, u) = x + \tau(x, u) f(x, u) \quad (8)$$

Вводятся Q -значения:

$$\begin{aligned} Q^\Sigma(x, u) &= \gamma^{\tau(x, u)} V^\Sigma(\eta(x, u)) + \tau(x, u) r(x, u) \\ Q^\Sigma(x, u) &= R(x), \text{ при } x \notin X \end{aligned} \quad (9)$$

Для итеративного решения (9) необходимо знание $\eta(x, u)$ и $\tau(x, u)$. Они могут быть определены путем взаимодействия с объектом на основе построенных траекторий изменения его состояния, в зависимости от приложенного управления. При этом возможно два подхода.

Безмодельный подход заключается в использовании теоремы Талеса для аппроксимации $\tau(x, u) f(x, u)$ на основе точки входа траектории в симплекс x_1 и точки выхода из симплекса x_2 :

$$\tau(x, u) f(x, u) = \frac{x_2 - x_1}{\lambda_x(x_1)} \quad (10)$$

На основе выражений (9) и (10) строится итерационная схема вычисления $Q^\Sigma(x, u)$:

$$Q_{n+1}^{\Sigma}(x, u) = \gamma^{\frac{\tau_x}{\lambda_x(x_1)}} \left(\frac{V^{\Sigma}(x_2) - V^{\Sigma}(x_1)}{\lambda_x(x_1)} + V^{\Sigma}(x) \right) + \frac{\tau_x}{\lambda_x(x_1)} r(x, u) \quad (10)$$

здесь τ_x время движения по траектории от точки x_1 до точки x_2 .

Для обеспечения сходимости такая динамика обучения комбинируется со структурной динамикой, заключающейся в уточнении симплексов с нерегулярной целевой функцией.

При использовании подхода, связанного с моделированием на основе текущей траектории для каждого из возможных управляющих воздействий в каждом из симплексов на основе траектории $x(u, t)$ строятся усредненные вектора градиента $f(x, u)$. Если для данного управляющего воздействия градиент на текущем участке траектории отличается от текущего усредненного вектора градиента на величину, превышающую заданный порог, происходит уточнение данного симплекса. По построенному усредненному вектору градиента, путем решения системы уравнений, включающей уравнение прямой, на которой лежит вектор, и уравнение субсимплекса, пересекаемого этой прямой, могут быть найдены $\eta(x, u)$ и $\tau(x, u)$. Данный подход требует на этапе обучения использования несколько большего объема памяти, по сравнению с безмодельным подходом. Однако полученная модель динамики объекта управления позволяет помимо обучения решать ряд других практических задач.

В четвертой главе приводятся практические результаты работы, и описывается разработанный программный комплекс, позволяющий в визуальной интерактивной среде на основе созданных обучаемых объектов конструировать и исследовать прототипы когнитивных систем управления сложными динамическими объектами.

Эффективность разработанных обучаемых модулей и программного комплекса в целом была продемонстрирована на примерах разработки и исследования ряда когнитивных систем управления. В частности была создана относительно простая обучаемая система управления многоканальным

регулятором температуры криогенного узла инжектора твердотеловодородных частиц и система подбора кадров для выполнения инновационных проектов.

Кроме того, в процессе исследования был разработан авиасимулятор, представляющий собой имитационную среду, позволяющую в упрощенной форме моделировать условия воздушного боя. С использованием разработанного программного комплекса был создан и исследован в авиасимуляторе прототип когнитивного агента, управляющего поведением отдельной боевой единицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В процессе проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие основные результаты:

1. Анализ существующей литературы посвященной многоагентным системам управления показал, что в основе практически всех таких систем лежит символическое представление знаний, что затрудняет управление сложным поведением группы динамических объектов в реальном времени. В данной работе предлагается использовать когнитивных агентов с нервно-системной организацией, что позволяет решить данную проблему.
2. Анализ существующих архитектур агентов позволил разработать когнитивного агента, основанного на применении гибридной архитектуры, включающей три слоя: слой взаимодействия, слой BDI и управляющий слой. Такая архитектура позволяет скомбинировать достоинства всех представленных архитектур и объединить реактивность реакции агента со способностями к планированию и групповому взаимодействию.
3. Разработан комбинированный метод адаптивной многомерной триангуляции, основанный на применении триангуляции Куна с ее последующим уточнением методом периодической бисекции. Триангуляция непрерывного пространства состояний позволяет его дискретизировать, тем самым, упростив задачу управления объектом.

4. Разработан эффективный алгоритм многомерной аппроксимации, основанный на использовании барицентрических интерполяторов, базирующихся на предложенном методе адаптивной многомерной триангуляции.
5. На основе предложенного аппроксиматора с использованием методов динамического программирования построены модельный и безмодельный алгоритмы обучения с подкреплением, позволяющие настраивать систему на базе информации о текущем качестве управления.
6. На основе предложенных алгоритмов обучения и обработки информации разработан обучаемый модуль, который может служить базовым элементом для построения когнитивного агента предложенной архитектуры. Исследования эффективности данного модуля показали значительно более высокую скорость обучения и обработки информации, чем у нейросетевых и нейрологических модулей, разработанных ранее.
7. Разработан оригинальный программный комплекс, позволяющий на основе разработанных обучаемых модулей проектировать и исследовать когнитивные системы различного назначения. Эффективность программного комплекса продемонстрирована на ряде примеров.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л. Нечетко-логические когнитивные системы управления динамическими объектами, Труды III-го Международного симпозиума «Интеллектуальные системы – ИНТЕЛС'98» (30 июня-4июля 1998, Псков), МПУ «Сигнал», Москва, 1998.
2. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л. Когнитивные системы управления динамическими объектами, Материалы НТК «Фундаментальные исследования в технических университетах» (25-26 июня 1998, СПбГТУ), Изд-во СПбГТУ, СПб., 1998.
3. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л., Капралов В.Г., Клочков И.В. Самообучающийся нейросетевой контроллер криогенных узлов, Сб.

Научных трудов Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика - 99» (20-22 января 1999, Москва), Часть 2, М., 1999.

4. Станкевич Л.А., Капралов В.Г., Тимакин Д.Л., Клочков И.В. Нечетко-логический нейросетевой самообучающийся контроллер, V Всероссийская конференция «Нейрокомпьютеры и их применение» (17-19 февраля 1999, Москва), М.: Радио и связь, 1999.
5. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л., Капралов В.Г., Клочков И.В. Применение нейронных сетей для определения транспортных коэффициентов, V Всероссийская конференция «Нейрокомпьютеры и их применение» (17-19 февраля 1999, Москва), М.: Радио и связь, 1999.
6. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л. Когнитивный подход к моделированию и прогнозированию в социотехнических системах, Труды конференции «Системный анализ в проектировании и управлении» (30 июня – 3 июля 1999, С-Петербург), Изд-во СПбГТУ, СПб., 1999.
7. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л. Когнитивные системы управления, Сб. Научных трудов Международной научно-технической конференции “IS&ITC-2000”, (Июнь, Санкт-Петербург/Псков, 2000), СПб., 2000, стр. 79-83.
8. Тимакин Д.Л., Станкевич Л.А., Капралов В.Г. Многоагентные нейробиологические контроллеры, Сб. научных трудов «Нейроинформатика-2001» (III-я Всероссийская НТК), часть 2. М.: МИФИ, 2001, стр. 140-147.
9. Станкевич Л.А., Тимакин Д.Л. Когнитивное прогнозирование и планирование в транспортных системах, VI Международная научно-практическая конференция “Системный анализ в проектировании и управлении” (28 июня – 5 июля 2002, С-Петербург), Изд-во СПбГТУ, СПб., 2002, стр. 373-376
10. Spirov A.V., Timakin D.L. Experimental determination of drosophila embryonic coordinates by genetic algorithms, te simplex method, and their hybrid.