
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ МУЛЬТИ-АГЕНТНОЙ НАВИГАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ РОБОТАМИ

Тимофеев Адиль Васильевич, Юсупов Рафазль Мидхатович

Abstract: Обсуждаются проблемы мульти-агентной (групповой) навигации и интеллектуального управления движением мехатронных роботов в динамической среде с препятствиями. Определяются понятия глобальной управляемости и стабилизируемости программных движений мульти-агентных робототехнических систем и рассматриваются критерии оптимизации, устойчивости и синхронизации программных движений мехатронных роботов-агентов. Дается сравнительный анализ четырех поколений локальных систем навигации и управления движением и стратегий централизованного, децентрализованного и мульти-агентного управления информационными потоками в сложных робототехнических системах. Значительное внимание уделяется методам мульти-агентной навигации и интеллектуального управления и их приложениям в информатике и робототехнике.

Keywords: Интегрированные системы, интеллектуальное управление, групповая навигация, мехатронные агенты, мульти-агентные робототехнические системы.

ACM Classification Keywords: H.1.1 Systems and Information Theory

Введение

В последние годы в России и за рубежом значительное внимание уделяется исследованию проблем интеллектуализации локальных систем управления роботов и разработке стратегий групповой навигации и управления движением сложных робототехнических систем (РТС) т.е. группы (коллектива) роботов, объединенных общей (глобальной) целью. В связи с бурным развитием систем навигации и управления движением мехатронных роботов как подвижных агентов с элементами искусственного интеллекта и необходимости организации их коллективной работы возникла потребность создания основ теории мульти-агентных робототехнических систем (МАРС). Также МАРС объединяют группу агентов-роботов (например, мобильных роботов или беспилотных летательных аппаратов) для достижения общей (глобальной) цели в динамической среде с препятствиями или запретными зонами и возможным противодействием.

Фундаментальные и поисковые исследования в области адаптивного и интеллектуального управления роботами и робототехническими системами (РТС) активно проводились в России в ряде научных школ (МГТУ, СПИИРАН, СПбГУ, МГУ, МИРЭА, НИИ МВС, ЦНИИ РТК, ИПМ РАН и др.), начиная с 70-х годов XX века [1–17]. Важная роль в становлении и развитии этих исследований принадлежит академикам И.М.Макарову, Д.Е.Охочимскому, Е.П.Попову, Г.С.Поспелову и Ф.Л.Черноузько, членам-корреспондентам РАН В.А.Якубовичу, В.А.Лопоте, Г.Г.Сербрякову, Е. Д.Теряеву, Р.М.Юсупову и И.А.Каляеву и профессорам Е.И.Юревичу, В.М.Лохину, А.В.Тимофееву и др.

Проблемы и методы адаптивной навигации и интеллектуального управления движением роботов, а также задачи группового управления РТС обсуждались на ряде Международных и Российских конференций, проведенных в последние десятилетия в России, в том числе на 2-х Международных конференциях "Мехатроника и робототехника", 20-и конференциях "Экстремальная робототехника", 7-и конференциях

“Мехатроника, автоматизация, управление”, 6-и конференциях “Управление и информационные технологии” и 3-ех Мультиконференциях по проблемам управления.

Параллельно в России проводились поисковые исследования и опытно-конструкторские разработки по созданию интегрированных систем навигации и управления движением объектов различного типа и назначения (в основном для экстремальных сред и частично неопределённых условий эксплуатации подвижных объектов и роботов). Достижения специалистов из России и зарубежный опыт в этой области обсуждались на 17-ти Международных конференциях по интегрированным навигационным системам, организованных ЦНИИ «Электроприбор», и на 15-ти научных сессиях Международной академии навигации и управления движением, президентом которой является академик В.Г.Пешехонов.

Первый международный проект по исследованию MAPC на тему “Multi-Agent Robot Systems for Industrial Applications in the Transport Domain” был выполнен в 1997–1999 годах по Европейской программе COPERNICUS. Координатором этого проекта был Prof., Dr.-Ing. U.Rembold (University of Karlsruhe, Department of Computer Science, Institute for Process Control and Robotics, Germany), а его участниками – Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (Russia), Unite de Recherche INRIA Rhone-Alpes (France), Technical University of Budapest (Hungary), Technical University of Poznan (Poland), Belorussian State University, (Belarus), Ufa State Aviation Technical University (Russia), Daimler-Benz AG (Germany), Beta Computer Automation GMBH (Germany).

Развиваемые в настоящей работе новые информационные и телекоммуникационные технологии и интеллектуальные системы навигации и управления движением для MAPC в значительной степени базируются на оригинальных научных результатах поисковых и ориентированных фундаментальных исследований, полученных в последние годы при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), программ Президиума РАН и государственных заказов Министерства образования и науки РФ.

1. Глобальная управляемость и оптимизация программных движений робототехнических систем

Рассмотрим некоторую робототехническую систему (РТС) S , состоящую из n роботов $r_i, i = 1, 2, \dots, m$. Обычно роботы и РТС функционируют в динамической среде E с препятствиями или запретными зонами $O_j \in E, j = 1, 2, \dots, q$. В роли динамических препятствий для одних роботов r_i из РТС S могут выступать другие роботы $r_j, j \neq i$.

РТС будем называть гомогенной, если она состоит из однотипных роботов (например, только из манипуляционных роботов). Сложную РТС будем называть гетерогенной, если её структура включает в себя несколько разнотипных роботов (например, манипуляционных и мобильных роботов) или разных гомогенных РТС меньшего масштаба, т.е. гомогенных подсистем.

Архитектура гомогенных и гетерогенных РТС по существу является сетевой и территориально распределённой, т.е. включает в себя множество роботов, взаимодействующих между собой с помощью физических, сенсорных (информационных), управляющих и коммуникационных каналов прямой и обратной связи. Поэтому возникает потребность в разработке новых принципов сетевой организации, управления движением, навигации, обработки и передачи информации в сложных РТС в динамической окружающей среде с препятствиями или запретными зонами.

Необходимость в сетевом управлении и групповой навигации возникла прежде всего в глобальных инфотелекоммуникационных сетях (например, в Internet), в робототехнике и гибких автоматизированных производственных системах, а также в сложных автоматизированных системах вооружений (например, в стереоцентрических и мульти-агентных сетях оборонного назначения).

В сложных гомогенных и гетерогенных РТС под действием вектора управляющих воздействий

$$u(t) = |u_i(t)|_{i=1}^n, t \in [t_0, t_T], \quad (1)$$

каждый робот $r_i(u_i)$ может выполнить некоторый набор локальных технологических операций $l_j(r_i), j = 1, 2, \dots, p, p \geq m$, на заданном интервале времени $T = t_T - t_0$. В результате выполнения этих локально управляемых операций изменяются состояния как самой РТС $S(t)$, так и окружающей её среды $E(t)$.

Предположим, что эволюцию РТС $S(t)$ и окружающей среды $E(t)$ под действием вектора управления $u(t)$ формально можно описать дифференциальными уравнениями вида

$$\dot{S} = F(S, u, E), \quad S(t_0) = S_0, \quad (2)$$

$$\dot{E} = \Phi(S, E), \quad E(t_0) = E_0, \quad (3)$$

где F и Φ – некоторые операторы, а S_0 и E_0 – начальные состояния РТС и среды.

Общим (комплексным) динамическим состоянием РТС S и окружающей её среды E в текущий момент времени t будем называть вектор-функцию вида

$$x(t) = \begin{pmatrix} S(t) \\ E(t) \end{pmatrix}, t \in [t_0, t_T]. \quad (4)$$

Обычно на вектор группового управления (1) и состояний РТС и среды (4) наложены ограничения вида

$$u(t) \in Q_u \in R^n \quad (5)$$

$$f(x(t)) \leq 0, t \in [t_0, t_T]. \quad (6)$$

Глобальная (общая) цель управления РТС заключается в том, чтобы синтезировать такой закон группового управления локальными технологическими операциями роботов $L = |l_i(r)|_{j=1}^p$, чтобы перевести РТС S и окружающую её среду E из заданного начального состояния в желаемое конечное (целевое) состояние, т.е. в процессе групповой навигации и управления (5) должны быть выполнены граничные условия вида

$$x(t_0) = x_0, \quad x(t_T) = x_T, \quad (7)$$

с учётом заданных ограничений на вектор управлений (5) и вектор состояний (6).

РТС (2) будем называть глобально управляемой в динамической среде (3), если существует закон группового управления (вообще говоря, зависящий от текущего состояния РТС и среды) вида

$$u_p(t) = U(t, x(t)) \in Q_u, t \in [t_0, t_T], \quad (8)$$

обеспечивающий выполнение граничных условий (7) с учетом ограничений (5) и (6). Соответствующее этому групповому уравнению (8) движение $x_p(t), t \in [t_0, t_T]$, будем называть программным движением (ПД) РТС $S(t)$ в динамической среде $E(t)$ с препятствиями или запретными зонами.

Среди множества групповых управлений (8) и ПД РТС можно выделить наилучшие (оптимальные) управление и соответствующее ему ПД. Для этого зададим некоторый интегральный функционал качества групповых ПД вида

$$K(x_p) = \int_{t_0}^{t_T} \psi(x_p(t), \dot{x}_p(t)) dt \quad (9)$$

Тогда оптимальным ПД $x_p^{opt}(t), t \in [t_0, t_T]$, и соответствующим ему оптимальным групповым управлением $u_p^{opt}(t)$ будем называть то ПД и закон управления РТС, при которых достигается экстремум функционала качества (9), т.е.

$$K(x_p^{opt}) = \min K(x_p), t \in [t_0, t_T].$$

Следует отметить, что критерии глобальной управляемости мехатронных роботов с нелинейной динамикой сформулированы в [2,6,10]. Методы аналитического синтеза и оптимизации ПД мехатронных роботов, обеспечивающие выполнение граничных условий (7) с учётом заданных ограничений на векторы управлений (7) и состояний (8) при наличии препятствий предложены в [2,6,7,18].

2. Устойчивость, стабилизация, декомпозиция и синхронизация программных движений роботов

Предположим, что программное движение (ПД) РТС $x_p(t)$, $t \in [t_0, t_T]$, и соответствующий ему закон программного управления (8), удовлетворяющие граничным условиям (7) и ограничениям (5) и (6), существуют. Тогда ПД называется практически (или асимптотически) устойчивым по отношению к начальным возмущениям $e(t_0) = x_0 - x_p(t_0)$ (или, возможно, к другим возмущениям), если существует закон группового управления роботами (8) такой, что в замкнутой этим управлением РТС и окружающей её динамической среде выполняются условия вида

$$\|e(t)\| = \|x_p(t) - x(t, u)\| \leq \varepsilon, \quad t \geq t_p \geq t_0, \quad (10)$$

где $\varepsilon \geq 0$ – параметр, определяющий желаемую точность осуществления ПД, а $T_p = t_p - t_0$ – время переходного процесса. Очевидно, что для достижения цели управления (7) должно выполняться условие

$$t_p \leq t_T \quad (11)$$

Закон группового управления РТС (8), обеспечивающий выполнение целевых условий (10), (11), будем называть стабилизирующим. Этот закон управления является декомпозирующим, если целевые условия выполняются независимо для каждого робота из РТС, т.е. $e_i(t)$ не зависит от $e_j(t)$, $j \neq i$. Это означает, что локальное управление каждым роботом r_i осуществляется независимо от локального управления другими роботами r_j , $j \neq i$, с компенсацией возможных перекрёстных динамических связей между роботами РТС.

В некоторых случаях (например, на конвейерах) от закона группового управления требуется обеспечить полную или частичную синхронизацию движений различных роботов из РТС. В этих случаях целевые условия (10) приобретают вид

$$\|e_{ij}(t)\| = \|x_{p,i}(t) - x_j(t, u_j)\| \leq \varepsilon_{ij}, \quad i \neq j, \quad t \geq t_{p,i,j}. \quad (12)$$

Возникают также задачи группового управления роботами, связанного с достижением консенсуса (consensus), когда каждый робот из РТС стремится, чтобы его ПД было близко к ПД своих соседей или рандеву (rendezvous), когда все роботы и РТС должны попасть в заданное состояние в заданный момент $T = t_T - t_0$.

Следует отметить, что для локальных систем навигации и управления движением мехатронных роботов с нелинейной динамикой законы стабилизирующего, модального (спектрального) и декомпозирующего управления были предложены в [2,6,18].

3. Четыре поколения систем навигации и управления движением роботов

В работах [1,2] была предложена классификация локальных систем навигации и управления движением (СНУД) роботов на четыре класса:

- 1) программные СНУД;
- 2) адаптивные СНУД;
- 3) интеллектуальные СНУД;
- 4) нейросетевые СНУД.

Программные СНУД роботов основаны на классических принципах программного или оптимального управления движением, если модель динамики роботов или РТС (2) полностью известна, а среда (или связанные с ней возмущения) известны и неизменны, т.е. в модели динамики среды

$$\dot{E} = 0, \quad \text{а } E = S, \quad t \in [t_0, t_T] \quad (\text{см., например, [2]}).$$

Адаптивные СНУД базируются на современных принципах робастного или адаптивного управления, когда модель динамики РТС (2) и среды E (или связанных с ней возмущений) (3) частично неизвестны. В этом

случае программные СНУД дополняются специальными средствами адаптации или идентификации факторов неопределённости или нестационарности, к числу которых можно отнести неизвестные возмущения или препятствия [2,6].

Интеллектуальные СНУД дополняются не только средствами адаптации, но и некоторыми элементами (алгоритмами) искусственного интеллекта (например, способностью распознавать речевые команды или идентифицировать неизвестные препятствия). Как правило, эти элементы искусственного интеллекта описываются логическими, алгебраическими и нечёткими алгоритмами. Поэтому они могут быть программно реализованы на традиционных микропроцессорах и компьютерах [3–5,6].

Нейросетевые СНУД основываются на обучении, самоорганизации и распараллеливании процессов обработки информации, навигации и управления на нейронных сетях или нейрокомпьютерах [7]. В этом заключается их основное отличие и преимущество по сравнению с СНУД роботов первых трёх поколений.

4. Стратегии централизованного, децентрализованного и мульти-агентного управления робототехническими системами

Важно отметить, что роботы редко используются изолированно. Обычно они входят в состав РТС и предназначены для группового (коллективного) выполнения некоторой сложной общей (глобальной) задачи, которую каждый робот самостоятельно (автономно) решить не может.

Сложная гетерогенная РТС может включать в себя десятки или сотни роботов или гомогенных РТС, функционирующих в динамической среде с препятствиями. В связи с этим важное значение приобретают проблемы системного (сетевого) анализа и синтеза интегрированных систем групповой навигации, управления движением и обработки сенсорной информации. Однако проектирование и создание интегрированных систем невозможно без организации и координации взаимодействия роботов в РТС с помощью коммуникационной сети [5,13,14].

Математической моделью такой, вообще говоря, динамической коммуникационной сети РТС может служить коммуникационный граф вида

$$G(t) = \{R(t), C(t), w(t)\}, t \in [t_0, t_T] \quad (13)$$

где R – множество узлов, соответствующих локальным системам навигации, управления движением и обработки информации роботов $r_i, i = 1, 2, \dots, m$, C – множество каналов связи между ними, а W – множество весов (например, длина или пропускная способность) каналов связи.

В процессе решения общей (глобальной) задачи структура и параметры РТС могут изменяться (например, некоторые роботы или каналы связи между ними могут выйти из строя). Тогда будут изменяться структура (топология узлов и каналов связи) или параметры (веса) коммуникационного графа (13). Этот граф характеризует информационное взаимодействие между роботами r_i из РТС $S(t)$. Поэтому его структура тесно связана со стратегией группового управления ПД роботов и РТС (8), обеспечивающей достижение общей (глобальной) цели управления.

Первоначально (начиная с 70-х годов XX века) стратегии группового управления роботами в РТС разделялись на два класса:

- стратегии централизованного (глобального) управления РТС из общего командного центра;
- стратегии децентрализованного управления, основанные на локальном управлении каждым роботом из РТС.

Преимущества стратегии централизованного (глобального) управления РТС заключаются в простоте иерархической организации и программно-аппаратной реализации систем группового (в том числе оптимального) управления. Однако её недостатки проявляются в низкой живучести (надёжности) и возможности искажений и временных задержках при передаче команд программного управления от верхнего уровня иерархии к нижнему.

Преимущества стратегии децентрализованного (локального) управления роботами из РТС заключаются в высокой локальной производительности (малом времени принятия локальных решений) и параллелизме локального управления роботами, а также в повышенной живучести (надёжности) РТС. В тоже время ей свойственны такие недостатки, как повышенные требования к надёжности узлов и каналов информационной связи между роботами и невысокое качество группового управления РТС, т.к. даже из локальной оптимальности управления отдельными роботами, вообще говоря, не следует глобальная оптимальность управления РТС в целом.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков традиционных стратегий централизованного и децентрализованного управления территориально распределённых РТС привёл к необходимости разработки (начиная с 90-х годов XX века) новой гибридной (смешанной) стратегии мульти-агентного управления РТС на современном уровне развития робототехники, мехатроники и инфотелекоммуникационных технологий [5–17]. Этот уровень развития характеризуется всё более широким внедрением роботов с интеллектуальным и нейросетевым управлением, глобальных систем навигации типа ГЛОНАСС и (или) GPS и инфотелекоммуникационных систем типа Internet и Grid.

5. Принципы интеграции систем навигации и управления движением в мульти-агентных робототехнических системах

В современной робототехнике и мехатронике, а также в информационных технологиях навигации и теории управления движением, существует ряд проблем, связанных с проектированием, созданием и интеграцией систем адаптивной (локальной) и мульти-агентной (групповой) навигации, функциональной диагностики и интеллектуального управления движением мобильных роботов в динамической среде с известными или неизвестными препятствиями. Некоторые из этих проблем, а также перспективные подходы и новые методы их решения рассмотрены в [1–20].

В настоящей работе обсуждаются принципы проектирования интегрированных систем мульти-агентной навигации и интеллектуального управления мобильными роботами и РТС.

Мобильный робот рассматривается как интеллектуальный подвижный мехатронный агент, имеющий на борту [1,2]:

- сенсорную систему датчиков внутренней и внешней информации;
- интеллектуальную систему навигации и управления движением;
- двигательную систему с традиционным (например, гусеничным или четырёхколёсным) или нетрадиционным (например, с одноосным двухколёсным или ползающим, т.е. перемещающимся по поверхностям произвольной ориентации) шасси;
- коммуникационную систему для информационного взаимодействия с человеком-оператором и другими роботами-агентами.

Важными задачами при создании мобильных мехатронных роботов как подвижных агентов является интеллектуализация бортовых интегрированных систем навигации и управления движением, обеспечивающая возможность автоматического планирования и оптимизации движений для обхода известных или неизвестных препятствий, адаптации к динамическим факторам неопределённости (например, к возмущениям и неизвестным подвижным препятствиям) и к возможным дефектам или отказам, распознавания образов (например, стерео-изображений препятствий), моделирования и анализа сложных 3-D сцен и диагностики состояний мобильного робота-агента в реальном масштабе времени [1–7, 18–20].

Новые актуальные проблемы возникают при групповом (коллективном) использовании мобильных мехатронных роботов-агентов в составе МАРС для решения общей (глобальной) задачи.

Группа (коллектив) мобильных мехатронных роботов-агентов, объединённых общей (глобальной) целью и функционирующая в едином информационном и коммуникационном пространстве на базе

соответствующих стандартов, команд и форматов передачи потоков данных, называется мобильной мульти-агентной робототехнической системой (МАРС).

Ключевыми проблемами при создании интегрированных систем навигации и управления движением мобильных МАРС являются [7–10]:

- декомпозиция общей (глобальной) задачи, возлагаемой на группу (коллектив) мобильных роботов, на ряд локальных задач для каждого робота-агента,
- мульти-агентное (групповое) планирование маршрутов движения и навигация мобильных роботов-агентов в динамической среде с известными или неизвестными препятствиями,
- функциональная диагностика и отказоустойчивое управление движением мобильных роботов-агентов,
- интеллектуализация и интеграция систем навигации и управления движением на базе бортовых средств распознавания сложных образов (мульти-изображений, речевых команд и т.п.) и мобильных навигаторов (спутниковые системы ГЛОНАСС и GPS и т.п.) в составе мобильных МАРС.

Важными задачами являются также организация интеллектуального человеко-машинного интерфейса и комплексирование перспективных решений этих проблем для создания интегрированных систем мульти-агентной навигации и интеллектуального управления движением мобильных роботов как агентов МАРС.

Заключение

Актуальность проведённых исследований связана с повышенным интересом во всём мире к интеллектуальным мехатронным роботам как подвижным агентам и мобильным МАРС ввиду их способности автоматически функционировать под контролем человека как в традиционных отраслях производства (машиностроение, приборостроение, микроэлектроника и т.п.), так и в нетрадиционных областях и экстремальных средах (космическая и подводная робототехника, атомная энергетика, ликвидация техногенных аварий и террористических угроз и т.п.). Следует отметить, что круг задач, решаемых мехатронными роботами-агентами и мобильными МАРС, непрерывно расширяется и усложняется (необходимость эффективно работать в экстремальных средах в условиях неопределённости или противодействия при наличии препятствий или запретных зон и т.п.).

Большую научную значимость и актуальность имеют поисковые исследования в области создания интегрированных систем мульти-агентной (групповой) навигации и интеллектуального управления движением мехатронных роботов-агентов и мобильных МАРС в динамических (изменяющихся) средах с препятствиями. Сегодня этим инновационным исследованиям и опытно-конструкторским разработкам во всём мире уделяется приоритетное внимание.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 09–08–00767–а "Моделирование поведения и анимация движений подвижных агентов" и РФФИ–ГФЕН Китая № 10–08–91159–ГФЕН–а "Исследование научных проблем интеллектуального управления магистральными транспортными средствами и мобильными роботами" и Программы № 13 (Грид) Президиума РАН.

Литература

- [1] Тимофеев А.В. Роботы и искусственный интеллект. – М.: Наука, 1978.
- [2] Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы. Л.: Машиностроение, 1988.
- [3] Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Интеллектуализация систем автоматического управления. – Известия АН. Техническая кибернетика, 1994, № 5.
- [4] Timofeev A. V., Yusupov R.M. Principles of Artificial Intelligence Applied to Adaptive Control Systems – Proceedings of International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of Future (Saint-Petersburg, Russia, SPIIRAS, 1993), vol. 2, 1993, pp. 415-421.

-
-
- [5] Тимофеев А.В., Сырцев А.В. Модели и методы маршрутизации потоков данных в телекоммуникационных системах с изменяющейся динамикой. М.: Новые технологии, 2005.
- [6] Тимофеев А.В. Методы высококачественного управления, интеллектуализации и функциональной диагностики автоматических систем. Часть I, Часть II. – Мехатроника, автоматизация, управление, 2003, № 5, 2004, № 2.
- [7] Timofeev A. V. Intelligent Control Applied to Non-Linear Systems and Neural Networks with Adaptive Architecture // International Journal on Intelligent Control, Neurocomputing : Fuzzy Logic. 1996. P. 1–18.
- [8] Тимофеев А. В., Сырцев А. В. Мультиагентная и нейросетевая маршрутизация потоков данных в телекоммуникационных сетях // Труды 10-й международной конференции "Knowledge–Dialogue–Solution" (16–26 июня. 2003, Варна) 2003. С. 187–190.
- [9] Тимофеев А. В. Модели мульти-агентного диалога и информационного управления в глобальных телекоммуникационных сетях // Труды 10-й международной конференции "Knowledge–Dialogue–Solution" (16–26 июня, 2003, Варна). 2003. С. 180–186.
- [10] Cai Z., He H., Timofeev A. Navigation and Control of Mobile Robots in Unknown Environment: A Survey // Proceedings of 10-th International Conference on Integrated Navigation Systems (June 27–29, St-Petersburg). 2003. Vol. 1. P. 158–166.
- [11] Timofeev A. V. Models for Multi-Agent Dialogue and Informational Control in Global Telecommunicational Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. N 1.
- [12] Timofeev A. V., Syrtzev A. V. Neural Approach in Multi-Agent Routing for Telecommunicational Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. N 10. P. 167–172.
- [13] Timofeev A. V. Multi-Agent Information Processing and Adaptive Control in Global Telecommunication and Computer Networks // International Journal "Information Theories and Their Applications". 2003. N 10. P. 54–60.
- [14] Timofeev A. V. Adaptive Control and Multi-Agent Interface for Infotelecommunication Systems of New Generation // International Journal "Information Theories & Applications". 2004. Vol. 11.
- [15] Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
- [16] Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.
- [17] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Наука, 2009.
- [18] Зотов Ю.К., Тимофеев А.В., Шишкин Д.С. Информационные технологии навигации и управления полетом малоразмерных летательных роботов корабельного базирования. – Информационно-измерительные и управляющие системы, № 8, т. 6, 2008.
- [19] Лютикова Л.А., Тимофеев А.В., Сгурев В.В., Иоцов В.И. Развитие и применение многозначных логик и сетевых потоков в интеллектуальных системах. // Труды СПИИРАН, вып. 2, 2005. С. 114–126.
- [20] Тимофеев А.В., Дерин О.А., Гуленко И.Е., Андреев В.А. Распознавание объектов в сложных мультиизображениях и методы и средства видеозахвата движений. - Мехатроника, автоматизация, управление, № 6 (111), 2010.

Сведения об авторах

Юсупов Рафаэль Мидхатович, Директор Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (с 1991 г.), 1934 года рождения, член-корреспондент Российской Академии наук (2006), доктор технических наук (1968 г.), профессор (1974 г.), Заслуженный деятель науки и техники РФ (1984 г.). Тел.: (812)328-3311, (812)328-34-11 Факс: (812)328-4450 E-mail: yusupov@ias.spb.su

Тимофеев Адиль Васильевич, Заведующий лабораторией информационных технологий в управлении и робототехнике Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (с 1990 г.), доктор технических наук (1984 г.), профессор (1986 г.), Заслуженный деятель науки и техники РФ (2002 г.). Тел.: (812)328-0421 Факс: (812)328-4450 E-mail: tav@ias.spb.su