003170596

23

На правах рукописи

КАПУСТЯН Сергей Григорьевич

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КОЛЛЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ ПРИ ИХ ГРУППОВОМ ПРИМЕНЕНИИ

Специальность: 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

29 ИЮЛ 2008

Таганрог – 2008

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте многопроцессорных вычислительных систем имени академика А В Каляева Южного федерального университета и на кафедре "Интеллектуальные и многопроцессорные системы" Технологического института Южного федерального университета в г Таганроге

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Каляев Игорь Анатольевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Теряев Евгений Дмитриевич

доктор технических наук, профессор
Паршин Дмитрий Яковлевич

доктор технических наук, профессор
Глебов Николай Алексеевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ. Государственный научный центр Российской Федерации "ЦНИИ робототехники и технической кибернетики"
(г Санкт-Петербург)

Защита состоится "27" июня 2008 г. в 14^{20} на заседании диссертационного совета Д 212.208.24 при Южном федеральном университете в зале заседаний Ученого совета Научно-исследовательского института многопроцессорных вычислительных систем имени академика А В Каляева Южного федерального университета по адресу 347928, г. Таганрог, ул Чехова, 2, корп И, комн 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148.

Автореферат разослан "17" мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд техн. наук
доцент **А.П. Кухаренко**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Роботы используются во многих областях науки, техники и промышленности, в первую очередь, там, где жизнедеятельность человека либо затруднена, либо вообще невозможна, например, в зонах радиоактивного или химического загрязнения, в условиях боевых действий, при проведении подводных или космических исследований и т п Проблеме создания интеллектуальных роботов посвящено достаточно большое число исследований, проводимых как у нас в стране, так и за рубежом, начиная с середины 60-х годов прошлого века В результате этих исследований достаточно хорошо проработаны основные проблемы, с которыми приходится сталкиваться разработчикам при создании роботов, такие как распознавание объектов и сцен, формирование моделей окружающей среды, планирование маршрутов движения и последовательностей действий для достижения цели, управление движением с учетом динамики робота и т д

В то же время понятно, что одиночный робот, каким бы интеллектуальным он не был, может использоваться только для решения некоторых частных задач, либо выполнения довольно простых операций, поскольку он, как правило, обладает сравнительно малыми возможностями для выполнения поставленной задачи (небольшой радиус действия, ограниченный бортовым энергоресурсом, небольшое число выполняемых функций, невысокая вероятность выполнения задачи в экстремальных ситуациях и т п)

Очевидным решением указанных выше проблем является применение при решении сложных задач сразу нескольких роботов, то есть группы роботов

Преимущества группового применения роботов очевидны Во-первых, это больший радиус действия, во-вторых, расширенный набор выполняемых функций, и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них Поэтому такие сложные задачи как, например, масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе и под водой, участие в боевых и обеспечивающих операциях, разминирование территорий и т п , могут быть эффективно решены роботами только при их групповом взаимодействии При этом возникают новые проблемы группового управления и коммуникации, связанные с организацией взаимодействия роботов в группе

Особую важность проблема группового взаимодействия роботов принимает в такой перспективной области современной робототехники, каковой является микроробототехника, поскольку только массовое применение микророботов делает их использование эффективным

Основные исследования в области управления группами роботов ведутся во многих индустриально развитых странах мира, прежде всего в интересах обороны Наиболее интенсивный характер этих работ, применительно к направлению военной робототехники, наблюдается в США по линии Управления перспективных исследо-

ваний Министерства обороны США ДАРПА (DARPA – Defense Advanced Research Projects Agency) Здесь следует выделить программу "Распределенные робототехнические системы", которая финансировалась этим агентством и выполнялась рядом ведущих университетов и научно-исследовательских организаций США

В настоящее время разработке методов организации взаимодействия в группах роботов на основе децентрализованного способа управления посвящены исследования, проводимые под патронажем управления DARPA в рамках программ "Программное обеспечение для распределенных робототехнических систем" (Software for Distributed Robotics (SDR)), "Программное обеспечение автономных мобильных роботов" (Mobile Autonomous Robot Software (MARS)) и MARS–2020

Таким образом, научная проблема группового управления роботами, функционирующими автономно в условиях сложной, недетерминированной, динамической среды, является **актуальной** Решение данной проблемы позволит, во-первых, значительно расширить области применения роботов, во-вторых, вплотную приблизиться к решению проблемы массового применения микророботов в составе больших групп, насчитывающих тысячи и десятки тысяч микророботов Применение групп роботов, способных выполнять сложные работы, например, при ликвидации последствий природных или техногенных катастроф, рост числа которых наблюдается в последнее время, в свою очередь, позволит снизить риск для людей в условиях вредных или даже опасных сред, сократить затраты, связанные с обеспечением безопасности, увеличить производительность предприятий и т.п

Решением проблемы группового управления занимались многие известные ученые, в нашей стране – И.М. Макаров, Д Е Охоцимский, Е П Попов, Е И Юревич, И А Каляев, В Е Павловский, А В Тимофеев и др , за рубежом – Т Фукуда, Т Балч, Р. Аркин, М Матарик, М Диас, М Велосо и др

Анализируя результаты упомянутых выше исследований, можно сделать вывод об отсутствии в настоящее время какого-либо общего подхода к проблеме группового управления роботами Каждая исследовательская группа пытается разработать свой способ решения стоящей перед ней частной задачи, который, как правило, не может быть применен при решении других задач подобного типа

Отсутствие общей методологии решения задач, возникающих при групповом управлении роботами в заранее неизвестной и динамически изменяющейся среде, существенно ограничивает их реальное применение

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке новых подходов, которые могли бы быть использованы при решении широкого класса задач управления роботами при их групповом применении в реальных средах

Целью диссертационного исследования является расширение функциональных возможностей и областей использования, а также повышение эффективности применения роботов за счет их группового взаимодействия при решении сложных задач в условиях недетерминированных динамических сред

Научная проблема, решение которой содержится в диссертации, – разработка методов и алгоритмов распределенного (децентрализованного) управления коллективным взаимодействием роботов при их групповом применении в условиях заранее неизвестных динамически изменяющихся ситуаций

В соответствии с поставленной целью для решения сформулированной научной проблемы определены **задачи диссертации**

- провести анализ существующих подходов к проблеме группового управления роботами,

- разработать метод коллективного управления роботами при их групповом взаимодействии и провести анализ его эффективности,

- разработать принципы организации распределенных систем управления группами роботов, реализующих метод коллективного управления,

- на основе метода коллективного управления разработать алгоритмы распределения заданий (целей) в группах роботов, решающих общую групповую задачу,

- разработать методы и алгоритмы коллективного управления роботами в условиях противодействия со стороны противника;

- разработать методы и алгоритмы управления большими группами роботов, насчитывающими сотни и тысячи единиц,

- разработать методы и алгоритмы управления отдельным роботом при отработке им коллективных действий в составе группы,

- провести экспериментальные исследования и анализ эффективности разработанных методов и алгоритмов,

- разработать технические решения по реализации предложенных методов и алгоритмов при решении прикладных задач группового управления роботами

Методы исследований. При проведении исследований были использованы методы современной теории автоматического управления, методы оптимального управления, методы линейного программирования, элементы теории множеств и теории дискретных систем, методы вычислительного эксперимента, методы имитационного моделирования Теоретические исследования подтверждены реализацией в реальных системах группового управления роботами и другими объектами

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем

- предложен новый подход к решению проблемы управления группами роботов, отличающийся от известных тем, что он основан на принципах коллективного взаимодействия,

- разработан новый метод коллективного распределенного управления группой роботов, обеспечивающий по сравнению с известными централизованными методами снижение вычислительной сложности задачи группового управления не менее чем в N раз (N – число роботов в группе),

- предложена оригинальная итерационная процедура оптимизации коллективных действий, отличающаяся тем, что ее использование позволяет за число итерационных

циклов, не превышающее число роботов в группе, найти для каждого робота группы такое действие, которое бы являлось оптимальным или близким к нему в смысле достижения общей групповой цели,

- разработаны алгоритмы коллективного распределения заданий (целей) в группах роботов, реализующие метод коллективного управления и обеспечивающие возможность решения данной задачи в реальном времени, во-первых, за счет снижения вычислительной сложности по сравнению с известными алгоритмами, а, во-вторых, за счет их децентрализованной реализации,

- разработаны методы и алгоритмы коллективного выбора действий в группах роботов, функционирующих в условиях организованного противодействия, отличающиеся тем, что они обеспечивают возможность принятия решений о коллективных действиях роботов в условиях дефицита времени;

- предложены методы и алгоритмы управления большими группами роботов, насчитывающими сотни и тысячи единиц, обеспечивающие их управляемость в условиях динамически изменяющихся ситуаций,

- разработаны метод и алгоритмы управления отдельным роботом группы при отработке им коллективных действий, основанные на использовании однородных нейроподобных структур (ОНС) и отличающиеся возможностью выработки управляющих воздействий в реальном времени изменения ситуации в среде

Наиболее существенные новые научные положения и результаты, выдвигаемые для защиты.

- новый подход к проблеме управления группами роботов, основанный на принципах коллективного взаимодействия,

- метод коллективного распределенного управления, позволяющий не менее чем в N (N – число роботов в группе) раз снизить вычислительную сложность задачи группового управления роботами по сравнению с централизованными методами,

- итерационная процедура оптимизации коллективных действий, которая позволяет за число итерационных циклов, не превышающее числа роботов в группе, находить для каждого робота группы оптимальное или близкое к оптимальному действие для достижения общей групповой цели,

- алгоритмическая реализация метода коллективного управления при решении задач распределения заданий (целей) в группах роботов,

- метод и алгоритмы коллективного управления группами роботов при наличии противодействия со стороны противника,

- методы кластеризации больших групп роботов, обеспечивающие их управляемость при коллективном взаимодействии в условиях динамических, недетерминированных изменений ситуации,

- методы и алгоритмы решения задачи управления отдельным роботом группы при реализации им коллективных действий на основе ОНС

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе ре-

зультатов подтверждается полнотой и корректностью исходных посылок, теоретическим обоснованием, непротиворечивостью математических выкладок Теоретические исследования подтверждены вычислительными экспериментами с использованием программных моделей, а также реализацией полученных научных результатов при создании систем группового управления различного назначения, в частности, систем группового управления складскими роботами, а также бортовых систем управления интеллектуальными мобильными роботами, способными функционировать в составе группы

Научная значимость работы заключается в том, что разработаны и развиты теоретические основы коллективного управления роботами при их групповом взаимодействии в условиях динамических, недетерминированных ситуаций

Практическая ценность работы Практическое использование научных результатов позволяет

- расширить функциональные возможности и области применения роботов за счет их группового применения,
- создать предпосылки к массовому применению микророботов за счет использования методов коллективного управления большими группами, а также снижения требований к массогабаритным характеристикам бортовых устройств управления микророботов и возможности их миниатюрного исполнения,
- повысить производительность автоматизированных складов, обслуживаемых группами роботов-штабелеров, на 20-30% за счет применения предложенных методов и алгоритмов, повысить безопасность складских операций, а также обеспечить сохранность грузов за счет исключения человека-оператора,
- повысить живучесть распределенных мультиплексных систем управления (МСУ) роботизированных транспортных средств (РТС) за счет обеспечения возможности перераспределения функций между исправными элементами системы в случае отказов, а также повысить уровень унификации программно-технических средств базовых элементов МСУ и, соответственно, снизить затраты при монтаже системы не менее, чем 2-2,5 раза,
- обеспечить режим автономного функционирования в условиях пересеченной местности дистанционно-управляемых наземных робототехнических комплексов специального назначения

Разработанные в рамках диссертации системы управления группой роботов-штабелеров, обслуживающих автоматизированный склад, демонстрировались на Первой и Второй специализированных выставках "Робототехника", г Москва, ВВЦ, февраль и ноябрь 2004 г (диплом и золотая медаль ВВЦ)

Реализация и внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы использованы при выполнении госбюджетных и хоздоговорных НИОКР в НИИ МВС ТРТУ (НИИ МВС ЮФУ), научным руководителем, ответственным исполнителем и непосредственным участником которых являлся

автор диссертации Результаты диссертационной работы внедрены в НИИ МВС ЮФУ (г Таганрог), НИИ специального машиностроения МГТУ им Н Э Баумана (г Москва), ОАО "ВНИИ ТРАНСМАШ" (г Санкт-Петербург), ОАО "СКБ "Точрадиомаш" (г Майкоп), Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, ГОУ ВПО "Московский государственный институт электронной техники (технический университет)", войсковой части 93603 (г Москва)

Внедрение результатов диссертации позволило расширить функциональные возможности и области применения робототехнических комплексов и систем, уменьшить или даже исключить непосредственное участие людей в выполнении опасных и тяжелых работ, повысить эффективность автоматизированных технологических процессов на базе мультиробототехнических систем

Внедрение полученных в диссертационной работе результатов вносит значительный вклад в развитие экономики и обороноспособности страны

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на ряде научно-технических конференций, в том числе на 14-и международных конференциях и с международным участием, на 7-и всесоюзных, всероссийских конференциях и молодежных научных школах, среди них 14-th Workshop on Distributed Control Systems. - Seoul, Korea, July 1997, VII, VIII и IX научно-технических конференциях "Экстремальная робототехника", С -Петербург, 1996, 1997 и 1998 г г , Всероссийской научно-технической конференции "Новые технологии управления робототехническими и автотранспортными объектами", г Ставрополь, 1998 г , The 4-th ECPD Inter Conference on Advanced Robotics Intelligent Automation and Active System Proceedings, Moscow, Russia, 1998; Международной конференцией "Интеллектуальные многопроцессорные системы (ИМС'99)", Таганрог, 1999 г , IARP Int Workshop on Micro Robots, Micro Mashines and Systems. Moscow, Russia, nov 24-25, 1999, Молодежной научной школе "Интеллектуальные робототехнические системы", пос Дивноморское, Геленджик, 2001 г , Международной научно-технической конференции "СуперЭВМ и многопроцессорные вычислительные системы" (МВС'2002), г Таганрог, 2002г., Первой научной молодежной школе "Интеллектуальные роботы" (ИР-2002), п Кацивели, Крым, Украина, 2002г , Юбилейной Международной конференции по нейрокибернетике "Проблемы нейрокибернетики", посвященной 90-летию со дня рождения профессора А Б Когана, г Ростов-на-Дону, 2002 г ; Международных конференциях "Интеллектуальные и многопроцессорные системы", пос. Дивноморское, Геленджик, 2003 г и 2005 г ; Научной молодежной школе "Экстремальная робототехника – 2003", пос Дивноморское, Геленджик, 2003 г , Первой Всероссийской конференцим с международным участием "Мехатроника, автоматизация, управление", г Владимир, 2004 г , Международных научных конференциях "Искусственный интеллект Интеллектуальные и многопроцессорные системы" (ИМС-2004 и ИМС-2006), п Кацивели, Крым, Украина, 2004 г , 2006 г, Международной научной молодежной школе "Микросистемная техника", п. Кацивели, Крым, Украина, 2004 г , IX

Международной конференции "Устойчивость, управление и динамика твердого тела", г Донецк, Украина, 2005 г , Международной научно-технической выставке-конгрессе "Мехатроника и робототехника (МиР-2007)", г. Санкт- Петербург, 2007 г , Международной научно-технической конференции "Мехатроника, автоматизация и управление – 2007 (МАУ-2007)" пос Дивноморское, Геленджик, 2007 г

Личный вклад автора Все научные результаты, полученные при решении крупной научной проблемы разработки теоретических и практических основ организации, функционирования и построения распределенных систем коллективного управления роботами при их групповом применении в условиях заранее неизвестных динамических сред, **получены автором лично**

Публикации. По теме диссертации опубликовано 80 печатных работ, в том числе 2 монографии, 18 статей в центральной печати, из них 12 – в изданиях, входящих в "Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации", утвержденный ВАК

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 229 наименований Диссертация содержит 376 страниц текста, 2 таблицы, 92 рисунка, 71 страницу приложений

Во введении обоснована актуальность работы, дана ее общая характеристика, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные научные результаты, полученные в диссертации, сведения о практической ценности работы, а также дан краткий обзор содержания диссертации

В первой главе сформулирована проблема группового управления, проведен аналитический обзор существующих систем и методов группового управления Дана формальная постановка задачи управления группой роботов Проведена классификация задач группового управления роботами по уровню сложности в зависимости от условий функционирования Рассмотрены принципы организации систем группового управления роботами. Показаны нерешенные проблемы в области группового управления роботами, функционирующими в условиях сложной недетерминированной среды и в условиях противодействия Предложен новый подход к решению этих проблем

На основе анализа известных подходов, принципов, методов и систем группового управления различными объектами, в том числе и роботами, в работе сделан обоснованный вывод, что до сих пор нет общей теории группового управления роботами в условиях динамических, недетерминированных сред Разрабатываемые методы и алгоритмы группового управления роботами направлены, в основном, на решение частных, зачастую узкоспециализированных задач Реализация существующих методов и алгоритмов группового управления роботами в реальном времени затруднена и требует, как правило, значительных аппаратных затрат, что зачастую несовместимо с требованиями бортового варианта исполнения устройств управления роботами.

Отсутствие общих подходов к решению задач, возникающих при групповом

управлении роботами в заранее неизвестной и динамически изменяющейся среде, существенно ограничивает их реальное применение

Задача группового управления роботами формулируется в работе следующим образом

Пусть некоторая группа $\mathfrak{R}$, состоящая из N роботов R_j $(j=\overline{1,N})$, функционирует в некоторой среде E Состояние каждого робота $R_j \in \mathfrak{R}$ $(j=\overline{1,N})$ в момент времени t описывается вектор-функцией $\mathbf{R}_j(t)=<r_{j1}(t), r_{j2}(t), \ldots, r_{jh}(t)>$ Состояние группы роботов $\mathfrak{R}$ задается вектором $\mathfrak{R}(t)=<\mathbf{R}_1(t), \mathbf{R}_2(t), \ldots, \mathbf{R}_N(t)>$ Состояние среды вокруг j-го робота – $\mathbf{E}_j$ в момент времени t описывается вектором $\mathbf{E}_j=<e_{1j}(t), e_{2j}(t), \ldots, e_{wj}(t)>$ Тогда состояние среды, в которой функционируют роботы рассматриваемой группы, при условии, что среда стационарна, в момент времени t описывается вектором $\mathbf{E}(t)=<\mathbf{E}_1(t), \mathbf{E}_2(t), \ldots, \mathbf{E}_N(t)>$

Роботы и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему "группа роботов - среда", под состоянием которой в момент времени t понимается состояние, описываемое парой $\mathbf{S}_c=<\mathfrak{R}, \mathbf{E}>$ Множество различных состояний системы "группа роботов - среда" описывается точками $N(h+w)$-мерного пространства состояний $\{\mathbf{S}_c\}$ Под начальным и конечным (целевым) состояниями системы "группа роботов - среда" понимаются состояния

$$\mathbf{S}_c^0=<\mathfrak{R}^0, \mathbf{E}^0>, \quad \mathbf{S}_c^J=<\mathfrak{R}^J, \mathbf{E}^J>, \tag{1}$$

соответственно

Состояние системы "группа роботов - среда" $\mathbf{S}_c^t=<\mathfrak{R}^t, \mathbf{E}^t>$ в текущий момент времени называется текущим

Каждый робот $R_j \in \mathfrak{R}$ $(j=\overline{1,N})$ может выполнять действия, описываемые вектором $\mathbf{A}_j(t)=<a_{1j}(t), a_{2j}(t), \ldots, a_{mj}(t)>$, причем множество действий, которые может выполнять робот $R_j \in \mathfrak{R}$, – $\{\mathbf{A}\}_j$ Множество действий, которые может выполнять группа роботов, есть объединение множеств действий отдельных роботов группы $\{\mathbf{A}_c\}=\{\mathbf{A}\}_1 \cup \{\mathbf{A}\}_2 \cup \ldots \cup \{\mathbf{A}\}_N$

Действия, выполняемые группой роботов в момент времени t, могут быть описаны с помощью вектор-функции $\mathbf{A}_c(t)=[\mathbf{A}_1(t), \mathbf{A}_2(t), \ldots, \mathbf{A}_N(t)]^T$ Изменения состояния системы "группа роботов - среда" описываются системой дифференциальных уравнений вида

$$\mathbf{S}_c=\mathbf{f}_c(\mathbf{S}_c(t), \mathbf{A}_c(t)) \tag{2}$$

При этом на ситуации, а также на действия роботов группы могут накладываться некоторые ограничения

$$\mathbf{S}_c(t) \in \{\mathbf{S}_c^p(t)\} \subset \{\mathbf{S}_c\}, \quad \mathbf{A}_c(t) \in \{\mathbf{A}_c^p(t)\} \subset \{\mathbf{A}_c\}, \tag{3}$$

где $\{\mathbf{S}_c^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t состояний системы "группа роботов - среда",

$\{\mathbf{A}_c^p(t)\}$ – множество допустимых в момент времени t действий группы роботов

С учетом введенных выше обозначений задача группового управления роботами

заключается в определении на интервале $[t_0, t_f]$ таких оптимальных действий $\overline{A}_j(t)$ для каждого робота $R_j \in \mathcal{R}$, которые переводят систему "группа роботов - среда" из начального состояния в конечное (целевое) и при которых удовлетворяются система связей (2), ограничения (3), а также обеспечивается экстремум функционала

$$Y_c = \int_{t_0}^{t_f} F(S_c(t), A_c(t), t)dt = \int_{t_0}^{t_f} F(R_1(t), R_2(t), \ , R_N(t), E(t), A_1(t), A_2(t), \ , A_\lambda(t), t)dt, \qquad (4)$$

задающего цель функционирования группы роботов и оценивающего качество процесса управления

В работе дана классификация по уровню алгоритмической сложности задач группового управления роботами для различных условий их применения Выделено три класса задач задачи группового управления в стационарных организованных средах, задачи группового управления в динамических, недетерминированных ситуациях и задачи группового управления в условиях противодействия противника, например, со стороны другой группы роботов Показано, что наиболее сложными в алгоритмическом плане являются, именно, задачи группового управления роботами в условиях динамических, недетерминированных ситуаций, и эта сложность возрастает при наличии активного организованного противодействия, например, со стороны другой группы роботов

Для задач группового управления роботами, функционирующими в условиях динамических, недетерминированных сред, недостаточно существования оптимального управления Необходимо еще, чтобы это управление было найдено в течение времени, за которое состояние $S_c(t)$ системы "группа роботов - среда" существенным образов не изменится

На решение задач группового управления роботами, функционирующими в условиях динамической, недетерминированной среды, а также в условиях противодействия, направлены рассматриваемые в настоящей диссертационной работе исследования

В работе установлено, что для организации систем управления группами роботов целесообразно использовать некоторые общие стратегии, применяемые для управления во всех технических, социальных и природных группах. В работе выделены стратегии централизованного, децентрализованного и смешанного (комбинированного) управления

Практическая реализация рассмотренных выше стратегий группового управления приводит к соответствующим принципам организации систем группового управления (СГУ) роботами

В общем случае СГУ состоит из подсистемы планирования групповых действий (ППГД), локальных бортовых систем управления (БСУ$_j$, $j=\overline{1,N}$) отдельных роботов группы, отвечающих за реализацию групповых действий и бортовых исполнительных устройств (БИУ$_j$, $j=\overline{1,N}$) отдельных роботов Обобщенная структура системы группового управления роботами может иметь вид, представленный на рисунке 1

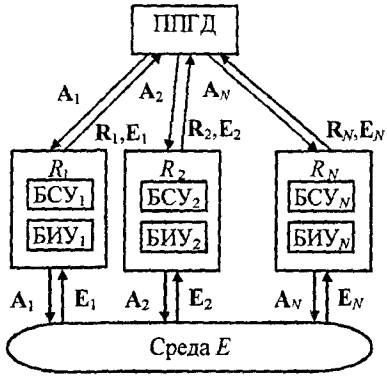

Рисунок 1 – Обобщенная структура системы группового управления роботами

Ключевую роль в данном случае играет организация ППГД В работе рассмотрены различные способы организации этих подсистем, в частности – централизованные, распределенные (децентрализованные) и смешанные, например, иерархические централизованные и иерархические распределенные

Как показал анализ существующих систем группового управления, централизованная организация ППГД имеет ряд существенных недостатков, основными из которых являются, во-первых, низкая живучесть системы, так как выход из строя центрального устройства управления (ЦУУ) или канала связи с роботами приводят к выходу из строя всей системы группового управления, а во-вторых, большие объемы информации, которой ЦУУ обменивается с роботами При децентрализованной (распределенной) организации ППГД данные недостатки отсутствуют, так как планирование, точнее, выбор своих действий $\mathbf{A}_j$ каждый робот осуществляет сам с помощью локальной подсистемы планирования действий

Распределенная ППГД обладает рядом преимуществ по сравнению с ППГД с централизованной организацией Во-первых, локальные бортовые подсистемы планирования действий роботов решают более простые задачи Во-вторых, существенно снижаются требования к каналам связи В-третьих, подсистема планирования групповых действий является надежной и робастной, потому что может динамически приспосабливаться к изменениям ситуации и потере отдельных роботов группы, а также способна противостоять прерываниям связи и сбоям

Смешанные или комбинированные системы группового управления основаны на комбинации принципов централизованного и децентрализованного управления и обычно используются для управления большими группами роботов Среди таких систем можно выделить иерархические централизованные, в которых преобладают принципы централизованного управления, и иерархические распределенные системы, в которых преобладают принципы децентрализованного управления

На основе анализа различных вариантов в работе показано, что выбор того или иного варианта построения и организации систем группового управления роботами зависит от требований, предъявляемых к скорости (или времени) выработки решения о действиях роботов, входящих в группу.

На рисунке 2 приведены оценки времени принятия решения о групповых действиях роботов в системах, использующих различные принципы организации, в зави-

симости от числа роботов в группе Данные оценки получены на основе анализа существующих методов группового управления и способов организации систем группового управления, предназначенных для решения различных частных задач

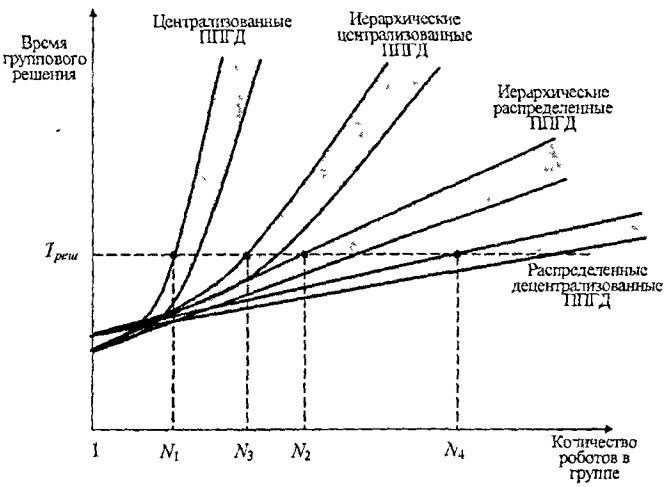

Рисунок 2 – Зависимости времени группового решения от способа организации подсистемы планирования групповых действий

На основании проведенного анализа в диссертационной работе сделан вывод, что наиболее эффективными являются распределенные системы, реализующие стратегию децентрализованного группового управления роботами, так как время принятия решений о групповых действиях роботов в таких системах значительно меньше, чем при других способах организации Также этот анализ позволяет сделать вывод об отсутствии в настоящее время эффективных подходов к решению проблемы группового управления, реализующих децентрализованную стратегию Существующие методы достаточно громоздки и могут использоваться при управлении группами роботов, как правило, для решения частных задач

Отсутствие эффективных методов решения задач группового управления роботами в заранее неизвестной и динамически изменяющейся среде, существенно ограничивает их реальное применение

В основу предлагаемого в настоящей диссертации подхода к решению проблемы группового управления роботами положены принципы коллективного управления

Коллективным управлением называется управление, в выработке которого участвуют все члены коллектива

Коллективное управление используется в группах, решающих одну или несколько взаимосвязанных целевых задач, но не имеющих в своем составе явно выраженного командира или начальника Чтобы эффективно функционировать в условиях быстро изменяющейся недетерминированной ситуации, группы, именуемые коллек-

тивами, должны руководствоваться следующими принципами коллективного управления

- каждый член коллектива самостоятельно формирует управление (определяет свои действия) в текущей ситуации,

- выбор действий членами коллектива осуществляется только на основе информации о цели, стоящей перед коллективом, ситуации в среде в текущий момент времени, текущих состояниях и действиях других членов коллектива,

- в качестве оптимального действия члена коллектива понимается такое действие, которое вносит максимально возможный вклад в достижение общей цели,

- допускается принятие компромиссных решений

В общем случае процессы в системе "группа роботов - среда" непрерывны, но в реальности вектор-функции управления (действия) $\mathbf{A}_c(t)$ не являются непрерывными Это обусловлено такими факторами, как

- дискретность представления данных в цифровых вычислительных устройствах систем управления роботов,

- разрешающая способность (по времени) сенсорных устройств,

- цикличность вычислений и т д

По этим причинам групповые действия роботов $\mathbf{A}_c(t)$ представляют собой разрывную функцию времени, которая изменяется скачкообразно лишь в определенные моменты времени t Δt (t – дискретное время, т е $t=0,1,2,\ \ldots$)

Показано, что в дискретной постановке задача управления группой роботов сводится к задаче выбора и выполнения в текущий момент времени роботами группы таких групповых действий $\mathbf{A}_c(t)$, которые обеспечивают экстремум (максимум, если оцениваются выгоды от действий роботов группы, или минимум, если оцениваются затраты) целевого функционала

$$\mathbf{Y}_c(\hat{t})=\sum_{t=\hat{t}}^{t_f-1}\mathbf{F}(\mathfrak{R}(t),\mathbf{E}(t),\mathbf{A}_c(t),\mathbf{g}(t))\Delta t, \qquad (5)$$

где $\mathbf{g}(t)$ – вектор противодействующих сил Далее, для простоты рассмотрения материала, речь будет идти о максимуме целевого функционала

В этом случае задача каждого робота группы $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j=\overline{1,N}$) заключается в том, чтобы выполнять такие действия $\mathbf{A}_j(t)$ ($t=0,1,2,\ \ldots,t_f-1$), которые бы приводили к достижению цели, стоящей перед роботом $\mathbf{R}_j$, и при этом максимизировали функционал

$$\mathbf{Y}_j(\hat{t})=\sum_{t=\hat{t}}^{t_f-1}\mathbf{F}_j(\mathbf{R}_j(t),\mathbf{E}_j(t),\mathbf{A}_j(t),\mathbf{g}_j(t))\Delta t\rightarrow\mathbf{Y}_j^{max}(\mathbf{Y}_j^{min}), \qquad (6)$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned}&\mathbf{R}_j^0=\mathbf{R}_j(t_0)=\mathbf{R}_j(\hat{t}),\ \mathbf{E}_j^0=\mathbf{E}_j(t_0)=\mathbf{E}_j(\hat{t}),\\&\mathbf{A}_j^0=\mathbf{A}_j(t_0)=\mathbf{A}_j(\hat{t}),\ \mathbf{g}_j^0=\mathbf{g}_j(t_0)=\mathbf{g}_j(\hat{t}),\end{aligned} \qquad (7)$$

уравнениях связи

$$\mathbf{S}_j(\hat{t}+1)=\mathbf{f}_j(\mathbf{S}_j(\hat{t}),\mathbf{A}_1(\hat{t}),\mathbf{A}_2(\hat{t}),\ \ldots,\mathbf{A}_j(\hat{t}),\ \ldots,\mathbf{A}_N(\hat{t}),\mathbf{g}_j(\hat{t})),\ j=\overline{1,N},\ \hat{t}=\overline{0,t_f-1} \qquad (8)$$

и ограничениях

$$\mathbf{A}_j(t)\in\{\mathbf{A}_j^p(t)\},\ \mathbf{R}_j(t)\in\{\mathbf{R}_j^p(t)\},\ \mathbf{E}_j(t)\in\{\mathbf{E}_j^p(t)\} \tag{9}$$

Решение задачи (6) – (9) в работе предлагается осуществлять на основе сформулированного выше метода коллективного управления путем отыскания для каждого робота $R_j\in\mathcal{R}$ вектор-функции действии $\mathbf{A}_j(\hat{t})$ $(j=\overline{1,N})$, при которои достигается экстремальное приращение целевого функционала (5), то есть

$$\Delta\mathbf{Y}_c=\mathbf{Y}_c(\hat{t}+1)-\mathbf{Y}_c(\hat{t}) \tag{10}$$

при связях (8), начальных условиях (7), ограничениях (9) и фиксированных значениях $\mathbf{R}_i(t_0)=\mathbf{R}_i(\hat{t})=\mathbf{R}_i^0$, $\mathbf{A}_i(t_0)=\mathbf{A}_i(\hat{t})=\mathbf{A}_i^0$ и $\mathbf{g}_i(t_0)=\mathbf{g}_i(\hat{t})=\mathbf{g}_i^0$ $(i=1,2,\ ,j-1,j+1,\ ,N)$ текущих состояний, действий других роботов $R_i\in\mathcal{R}$ $(i=\overline{1,N},\ i\neq j)$ группы и помех, соответственно В качестве текущего действия $\mathbf{A}_j^0$ робота R_j $(j=\overline{1,N})$ на интервале $[\hat{t},\hat{t}+1]$ принимается действие, определяемое начальным значением вектор-функции $\mathbf{A}_j(t)$ на интервале $[\hat{t},t_f]$, т е $\mathbf{A}_j^0=\mathbf{A}_j(\hat{t})$

Предложен подход к решению дискретной задачи коллективного управления группой роботов, основанный на использовании итерационной процедуры, в рамках которой роботы последовательно выбирают свои очередные действия Для того чтобы реализовать итерационную процедуру решения оптимизационной задачи (6) – (9), роботы в группе должны быть определенным образом пронумерованы Существо итерационного метода решения оптимизационной задачи (6) – (9) заключается в следующем Каждый робот R_j группы выбирает свое очередное действие на основе информации о групповой цели, своем текущем состоянии, текущем состоянии среды, текущем значении помехи (если таковая имеет место) и выбранных до него действиях остальных роботов группы, т.е в соответствии с итерационной формулой

$$\mathbf{A}_j^{k+1}=f_j\left(\mathbf{A}_1^{k+1},\ ,\mathbf{A}_{j-1}^{k+1},\mathbf{A}_j^k,\mathbf{A}_{j+1}^k,\ ,\mathbf{A}_V^k,\mathbf{R}_j^0,\mathbf{E}_j^0,\mathbf{g}_j^0\right),\quad j=\overline{1,N}, \tag{11}$$

где $k=0,1,2,3$ – номер итерации

При этом, естественно, должны учитываться ограничения (9)

Следует отметить, что к допустимым в текущий момент времени действиям $\{\mathbf{A}_j^p\}^0$ робота $R_j\in\mathcal{R}$ относятся лишь те действия из множества допустимых $\{\mathbf{A}_j^p\}$, при которых выполняется условие $\Delta\mathbf{Y}_c^j\geq 0$ Это неравенство можно рассматривать как условие того, что действия отдельных роботов не наносят ущерб коллективу в целом

Действие $\mathbf{A}_j^{k+1}$ робота R_j учитывается всеми остальными роботами группы при выборе своих новых текущих действий Поэтому при выборе роботом R_j своего нового текущего действия $\mathbf{A}_j^{k+1}$ путем решения дискретной задачи (6) – (9) все остальные роботы группы должны попытаться осуществить новый выбор своих оптимальных с точки зрения достижения групповой цели действий, поскольку старый выбор не учитывал нового действия робота R_j Итерационные циклы оптимизации повторяются до тех пор, пока приращение (10) целевого функционала (5) не прекращается или значение этого приращения становится пренебрежимо малым

В диссертации показано, что предложенная итерационная процедура оптимизации коллективных действий является конечной, сходящейся и устойчивой Она по-

зволяет за число итерационных циклов, не превышающее число роботов в группе, найти для каждого робота группы такое действие, которое является оптимальным или близким к нему в смысле достижения общей групповой цели Эта процедура лежит в основе всех последующих методов и алгоритмов, разработанных в диссертационной работе

Во второй главе дана постановка задачи распределения заданий (целей) в группе роботов, и показано применение метода коллективного управления для ее решения

Предложены алгоритмы, позволяющие получить точное, то есть дающее экстремум целевого функционала, решение задачи распределения целей в группах роботов при различных соотношениях числа роботов в группах и числа целей Рассмотрены условия оптимальности решения

Задача распределения целей в группе роботов ставится следующим образом.

Каждый робот $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j \in [1,N]$) может решать m_j целевых задач, на которые разбивается общая для группы роботов целевая задача (цель) $\mathbf{T}_c$ Достижение каждой из целей $T_l \in \mathbf{T}_c$, $l \in [1,m_j]$ дает приращение целевого функционала $\Delta \mathbf{Y}_{l_j}$ ($l \in [1,m_j]$)

Задача состоит в том, чтобы в момент времени $\hat{t}$ распределить цели $T_l \in \mathbf{T}_c$, $l \in [1,m_j]$ между роботами группы таким образом, чтобы

$$\Delta \mathbf{Y}_c = \sum_{j=1}^{N} \sum_{l=1}^{m_j} \Delta \mathbf{Y}_{l_j} \to \max, \ ], \qquad (12)$$

при условии, что каждый робот группы может выбирать одну или несколько целей.

В работе показано, что задача распределения целей в группах роботов может решаться как на основе точных, так и приближенных методов и алгоритмов Одним из точных алгоритмов решения задачи назначения является алгоритм последовательного улучшения плана Основная идея данного подхода может быть положена в основу алгоритма распределения целей, реализующего метод коллективного управления и итерационную процедуру оптимизации коллективных действий Такой алгоритм, предложенный в диссертации, называется *алгоритмом коллективного улучшения плана*

Решение задачи распределения целей (12) разбивается на два этапа

На первом этапе решается задача формирования первоначального опорного плана Для этого каждый робот группы $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j \in [1,N]$) сначала определяет для каждой цели $T_l \in \mathbf{T}_c$, $l \in [1,m_j]$ значение оценки эффективности $d_{j\,l} = f(\mathbf{R}_j(t_0), \mathbf{E}_j(t_0))$, формируя таким образом одномерный массив $\mathbf{D}_j = [d_{j\,1}, d_{j\,2}, \ , d_{j\,l}, \ , d_{j\,v}]$ Затем с помощью итерационной процедуры формируется первоначальный опорный план, для чего каждый робот определенным образом выбирает одну из целей $T_l \in \mathbf{T}_c$ ($l \in [1,N]$) случайно, или с таким же номером, как и у самого робота или по максимуму оценки эффективности $d_{j\,l}$ в массиве $\mathbf{D}_j$

В последующих циклах итерационной процедуры оптимизации коллективных действий роботы пытаются улучшить первоначальный опорный план

При этом исследуются возможности обменов целями между роботами, сначала

между парами роботов, а затем тройные, четверные и т.д. обмены, то есть цепочки обменов.

В работе предложены модификации алгоритма коллективного улучшения плана для различного соотношения числа роботов и числа целей, в частности, когда число роботов больше числа целей и наоборот, а также для различных ограничений, например, когда одну цель могут выбрать несколько роботов группы.

Показано, что предложенные алгоритмы коллективного улучшения плана позволяют снизить вычислительную сложность задачи, решаемой бортовой системой управления каждого отдельного робота группы, по сравнению с известными централизованными алгоритмами последовательного улучшения плана, реализуемыми ЦУУ группы роботов. Например, при исследовании парных обменов сложность уменьшается в $N/2$ раз, а при исследовании цепочек обменов – в N раз, где N – число роботов в группе.

Для решения задачи коллективного распределения целей также предложено использовать алгоритмы, направленные на отыскание ближайшего локального экстремума целевого функционала на интервале времени $[t_0,t_0+1]$. В некоторых случаях этот локальный экстремум может совпадать с глобальным, естественно, на указанном интервале времени. Эти алгоритмы являются приближенными или ускоренными, поскольку за счет отказа от поиска глобального экстремума достигается быстрота решения задачи распределения целей, являющегося если не оптимальным в текущей ситуации, то близкого к оптимальному.

В основе этих алгоритмов лежит та же итерационная процедура оптимизации коллективных действий. При этом роботы группы при выборе целей должны руководствоваться предложенными в работе правилами, вытекающими из принципов коллективного управления.

На основе этих правил и их модификаций разработано три алгоритма решения задачи коллективного распределения целей при различных соотношениях числа роботов и числа целей, а также различных ограничениях. Так предложены алгоритм последовательного выбора целей и алгоритм одновременного выбора целей, когда все роботы одновременно выбирают цели, затем обмениваются информацией и корректируют свой выбор на основе анализа этой информации, а также уточненный ускоренный алгоритм, при использовании которого роботы анализируют последствия отказа от выбора той или иной цели.

Эти алгоритмы позволяют либо сократить временные затраты на решение задачи, либо повысить точность решения. Работоспособность алгоритмов показана на модельных примерах.

Доказана сходимость этих алгоритмов.

Для оценки эффективности разработанных алгоритмов проведен сравнительный анализ их вычислительной сложности с вычислительной сложностью известных алгоритмов, в частности, алгоритма полного перебора и алгоритма последовательного

улучшения плана Графики зависимости числа вычислительных операций, требуемого для решения задачи распределения целей в группах роботов, от их численности групп приведены на рисунке 3

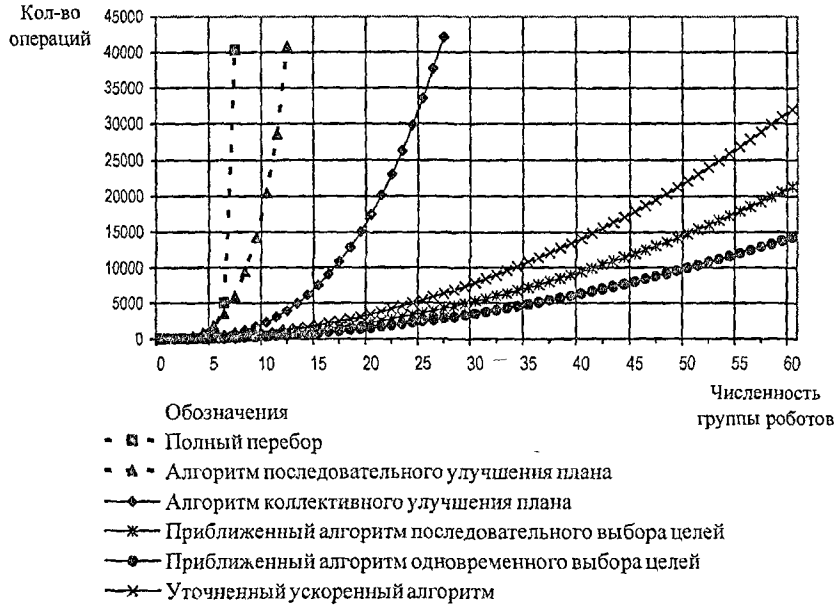

Рисунок 3 – Зависимость количества вычислительных операций от численности группы роботов

В работе приведены примеры использования предложенных методов и алгоритмов для решения прикладных задач коллективного распределения целей, в частности, в группе боевых роботов, а также в группе космических роботов при дистанционном зондировании поверхности, или в группе роботов, решающих задачу картографирования местности.

Для оценки эффективности предложенного подхода на примере решения задач картографирования местности группой роботов проведены эксперименты на имитационной модели с использованием различных стратегий выбора целей роботами· случайной, "жадной", когда роботы последовательно выбирают ближайшие ранее не выбранные цели, и коллективной стратегии

Данные экспериментов подтверждают эффективность предлагаемых алгоритмов В качестве показателя эффективности применения той или иной стратегии при решении задачи картографирования в работе использовалось значение удельных затрат группы роботов на картографирование одной единицы площади

$$q = \frac{L_\Sigma}{S \cdot K_п}, \qquad (13)$$

где L_Σ – суммарный путь, пройденный роботами группы при картографировании поверхности; S – площадь обработанной поверхности (число дискретных участков); $K_п$ – коэффициент покрытия поверхности.

Обобщенные результаты одного из экспериментов для группы из трех роботов приведены в таблице.

Алгоритм	Путь, пройденный роботом №			Суммарный путь	Коэффициент покрытия	q
	1	2	3			
Коллективный	195	195	185	575	0,98	0,235
Жадный	180	189	171	540	0,82	0,263
Случайный выбор	273	246	262	781	0,92	0,339

Из таблицы видно, что алгоритм коллективного распределения целей требует наименьших удельных затрат, чем другие алгоритмы.

Предложенные в данной главе алгоритмы нашли применение при разработке различных систем группового управления, в частности, системы управления группой роботов, обслуживающих автоматизированный склад, представленной на рисунке 4, а также бортовых распределенных систем управления узлами и агрегатами РТС. Применение методов коллективного управления позволило: повысить производительность складов на 20 – 30% за счет коллективного распределения заданий, упростить эксплуатацию складских систем, что, в свою очередь, позволило снизить требования к персоналу, работающему на автоматизированном складе, повысить живучесть распределенных систем управления РТС за счет возможности перераспределения функций между элементами системы при отказах отдельных элементов и обеспечить оптимальные режимы функционирования узлов и агрегатов РТС за счет коллективной оптимизации действий составных элементов системы.

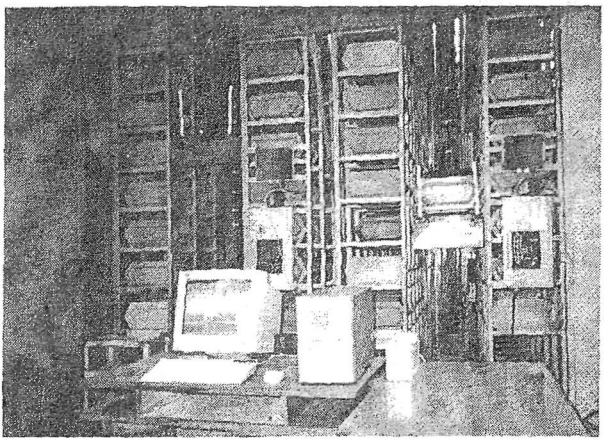

Рисунок 4 – Система группового управления роботами, обслуживающими автоматизированный склад

В третьей главе исследуются задачи управления группами роботов при органи-

зованном противодействии со стороны другой группы роботов Исследование проведено на модельных задачах игры роботов в футбол и при ведении группой роботов боевых действий

Задача планирования групповых действий при игре в футбол формулируется следующим образом каждому роботу-игроку B_j $(j=\overline{1,N})$ необходимо в текущий момент времени в качестве цели своего движения выбрать такой участок поля $S_i \in \mathbf{S}_j^c$, чтобы в результате этого выбора достигалось максимальное значение функционала

$$\mathbf{Y}=\sum_{j=1}^{N} d_{ji}, \tag{14}$$

где d_{ji} – оценка эффективности выбора игроком B_j участка $S_i \in \mathbf{S}_j^c$ в качестве цели своего движения В свою очередь, оценка эффективности d_{ji} определяется некоторым функционалом

$$d_{ji}=F\left(\gamma_1^{ij},\gamma_2^{ij},\ \ ,\gamma_n^{ij}\right), \tag{15}$$

где γ_l^{ij} $\left(l=\overline{1,w}\right)$ – функции, зависящие от параметров положения участка $S_i \in \mathbf{S}_j^c$ относительно мяча, относительно других роботов-игроков обеих команд, своих и чужих ворот и т п

В работе получены аналитические выражения для определения оценок эффективности d_{ji} для типовых ситуаций, возникающих во время игры

Предложенные выражения позволяют получить нормированные оценки параметров целевого положения роботов-игроков Приведены примеры выбора тактики игры с использованием предложенных оценок эффективности

Показано, что сформулированная задача планирования групповых действий роботов-футболистов эффективно решается с помощью алгоритмов коллективного распределения целей, основанных на методе коллективного управления

С целью экспериментальных исследований предложенных методов и алгоритмов коллективного управления действиями роботов при игре в футбол, предложенных в настоящей главе, была разработана и создана программная модель, имитирующая игру двух команд роботов в футбол Разработанная программная модель является удобным средством для сравнения различных алгоритмов коллективного взаимодействия роботов-футболистов, наглядно демонстрирующим их преимущества и недостатки

Поскольку в игре участвуют две команды, то алгоритмы решения задачи планирования групповых действий, используемые каждой из команд, могут быть различными, что позволяет проводить наглядное сравнение их эффективности Эксперименты показали, что предложенные алгоритмы позволяют быстрее реагировать на изменения в игровой ситуации, то есть более эффективны в условиях дефицита времени на принятие решений об очередных действиях роботов-игроков

Для исследования различных подходов к решению проблемы группового управления роботами в условиях противодействия исследована модельная задача целераспределения в группе роботов при ведении ими игровых боевых действий Предполагается что в игре участвуют две неоднородные группы роботов, каждая из которых

включает в свой состав боевые и обеспечивающие роботы различных типов

При этом робот каждого типа характеризуется некоторым обобщенным параметром, который будем в дальнейшем называть его боевым потенциалом. Цель функционирования каждого из подразделений, участвующих в боевых действиях, состоит в нанесении максимального урона противнику при допустимом уровне собственных потерь

Задача планирования групповых действий роботов в смешанном подразделении на поле боя формулируется следующим образом. Предположим, что в боевых действиях участвуют две группы $\mathfrak{R}^B=\{R_j^B, j=\overline{1,N}\}$ (условно "наша"), содержащая N боевых единиц, и группа роботов противника $\mathfrak{R}^C=\{R_i^C, i=\overline{1,M}\}$, содержащая M боевых единиц. Состояние каждой боевой единицы описывается некоторым вектором параметров

$$\mathbf{R}_j^B=<r_{1j}^B, r_{2j}^B, \ldots, r_{vj}^B> \; j=\overline{1,N} \quad \text{или} \quad \mathbf{R}_i^C=<r_{1i}^C, r_{2i}^C, \ldots, r_{vi}^C> \; i=\overline{1,M}, \tag{16}$$

таких как, например, скорость, боекомплект, подвижность, огневая мощь, дальнобойность, координаты местоположения и т. п.

Задача, стоящая перед "нашей" группой боевых роботов $\mathfrak{R}^B$ состоит в определении таких действий $\mathbf{A}_j^B(t)$ $(j=\overline{1,N})$, в результате выполнения которых с учетом связей (8) и ограничений (9) достигается максимум целевого функционала

$$\mathbf{Y}=K_1\,\mathbf{P}_{\mathfrak{R}^B}-K_2\,\mathbf{P}_{\mathfrak{R}^C}, \tag{17}$$

где $\mathbf{P}_{\mathfrak{R}^B}=\sum_{j=1}^{N}P_{R_j^B}$ – суммарный боевой потенциал группы $\mathfrak{R}^B$,

$\mathbf{P}_{\mathfrak{R}^C}=\sum_{i=1}^{M}P_{R_i^C}$ – суммарный боевой потенциал группы $\mathfrak{R}^C$,

K_1 и K_2 – стратегические коэффициенты

Данная задача может решаться с использованием методов теории игр. Однако эти методы, как правило, являются достаточно сложными и предполагают, обычно, наличие некоторых априорных знаний о возможных действиях противной стороны. Сложность этих методов делает их не эффективными в условиях дефицита времени на принятие решений и в условиях динамических и априори неизвестных изменений ситуации.

В диссертации показано, что задача планирования групповых действий подразделений боевых роботов эффективно решается с использованием итерационной процедуры оптимизации коллективных действий.

Наиболее эффективными для этого являются быстрые алгоритмы приближенного решения задачи коллективного распределения целей, дающие близкое к оптимальному решение в условиях дефицита времени.

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенных алгоритмов была разработана программная модель, имитирующая действия на поле боя групп роботов двух противоборствующих сторон, каждая из которых стремится нанести максимально возможные потери противнику при некотором допустимом уровне собственных потерь.

Анализ функционирования программной модели показал, что автоматическое решение задачи распределения целей в подразделении боевых роботов осуществляется на порядок быстрее, чем эту же задачу решает человек Причем, чем больше роботов в подразделении, тем меньше удельные временные затраты на принятие решений при автоматическом распределении

Метод коллективного управления предполагает наличие канала обмена информацией, с использованием которого и осуществляется оптимизация коллективных действий в группе роботов

Однако выход из строя этого канала, что характерно в условиях противодействия противника, может привести, вообще, к потере возможности коллективного взаимодействия и возможности решения группой роботов поставленной перед ней целевой задачи Поэтому в работе предложено для решения задачи группового управления в условиях противодействия применять принципы стайного управления

Стайное управление является частным случаем коллективного управления, но в отличие от коллектива роботов, роботы стаи не имеют специально выделенного канала обмена информацией, а могут получать информацию о действиях других роботов стаи только опосредованно через среду

Преимуществами стайного управления группой (стаей) являются во-первых, высокая живучесть группы (поскольку стая состоит из большого числа достаточно простых роботов, а выход из строя даже некоторого множества из них не причинит существенного вреда стае, и групповая цель будет достигнута), во-вторых, быстрота реагирования на изменения ситуации

Отличие задачи стайного управления заключается в отсутствии у каждого робота прямой и достоверной информации о наличии и действиях других роботов группы, а также о возможных противодействиях со стороны внешних сил, в том числе и организованного противодействия со стороны других групп роботов В то же время, он располагает информацией о своих индивидуальных возможностях по трансформации своего состояния $\mathbf{S}_i$ и окружающего его участка среды $\mathbf{E}_i$ за счет своих индивидуальных действий, а также имеет возможность определять действующие на него в текущий момент времени силы $\mathbf{G}_i$ Иными словами, каждый робот R_i, входящий в стаю, не имеет информации о действиях всех роботов стаи и состояния среды вокруг них, а может только определять изменения своего состояния, состояния участка окружающей среды в соответствии с выражениями

$$\mathbf{R}_i = f_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{A}_i, \mathbf{E}_i, \mathbf{G}_i), \qquad \mathbf{E}_i = f_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{A}_i, \mathbf{E}_i, \mathbf{G}_i), \tag{18}$$

с учетом ограничений

$$\varphi_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{E}, \mathbf{G}) \le 0, \quad \gamma_i(\mathbf{R}_i, \mathbf{A}_i, \mathbf{E}, \mathbf{G}) \le 0, \tag{19}$$

которые описывают его исходное "представление" о возможностях его индивидуального влияния на среду с учетом ограничений

При этом робот R_j адаптирует свою индивидуальную модель (18) и (19) к стайному взаимодействию посредством анализа изменений состояния среды $\mathbf{E}_i$, произо-

шедших в результате действий всей стаи

Этот процесс адаптации модели (18) и (19) фактически является "самообучением" В работе предложен метод и алгоритм оптимизации действий отдельных роботов в составе стаи, реализующий данный процесс адаптации модели (18) и (19)

С целью экспериментальной проверки предложенного выше подхода к проблеме стайного управления была рассмотрена модельная задача *перемещения твердого тела* группой роботов по горизонтальной плоскости в условиях, когда каждый робот стаи не имеет информации ни о численности стаи, ни о действиях остальных роботов стаи, ни о силах, действующих в среде

Как показали проведенные исследования с использованием имитационного моделирования, предложенные в работе алгоритмы стайного управления обеспечивают малое время принятия решений каждым роботом стаи. При этом каждый робот выбирает, возможно, не самое лучшее с точки зрения оптимального достижения общей цели действие, *но оптимальное в рамках имеющейся у него на данный момент информации о сложившейся ситуации* Проведенные исследования подтверждают работоспособность предложенных принципов и алгоритма стайного управления

Четвертая глава посвящена решению проблемы управления большими группами роботов

Процесс управления группой роботов, основанный на методе коллективного управления, представляет собой систематическое принятие решений об их очередных действиях с учетом цели управления и изменений текущей ситуации При этом предпринимаемые роботами действия должны быть актуальными в текущей ситуации, т е. направленными на достижение цели оптимальным (или близким к оптимальному) образом В больших группах роботов время обмена информацией и принятия решений *об очередных действиях может быть столь велико, что актуальность* этих решений теряется

Процедура решения задачи управления группой роботов с использованием метода коллективного управления считается законченной, когда по завершении K итерационных циклов никакие изменения в действиях роботов группы не приводят к увеличению целевого функционала

При этом общее время $t_{кд}$ решения задачи оптимизации коллективных действий в группе роботов будет составлять

$$t_{кд} = (t_{покд} + t_{пи})\ N\ K, \qquad (20)$$

где $t_{покд}$ – время реализации процедуры оптимизации коллективных действий одним роботом группы,

$t_{пи}$ – время реализации процедуры передачи информации о выбранном действии каким-либо роботом остальным роботам группы,

N – число роботов в группе,

K – число итерационных циклов

С другой стороны, для того чтобы действия, выбранные роботами с использова-

нием метода коллективного управления, отвечали текущей ситуации (т е соблюдался режим реального времени), необходимо, чтобы выполнялось условие

$$t_{КД} \le \tau_p, \qquad (21)$$

где τ_p – время изменения ситуации в системе "группа роботов – среда" (т е время, за которые параметры состояния роботов и среды изменяются таким образом, что могут быть измерены сенсорными устройствами роботов и могут быть учтены при выборе очередных действий)

Будем считать, что группа роботов "управляема", если выполняется условие (21)

Из (20) и (21) следует, что допустимое число роботов в "управляемой" группе, которые могут принимать участие в итерационной процедуре оптимизации коллективных действий, должно быть ограничено величиной

$$N_{max} = \frac{\tau_p}{K\,(t_{ПОКД} + t_{ПИ})}, \qquad (22)$$

где N_{max} – максимально допустимое число роботов в группе, при котором выполняется условие управляемости (21)

Таким образом, возникает проблема "управляемости" больших групп роботов в случае, когда $N >> N_{max}$

Проблема управляемости больших групп роботов особенно актуальна для такой перспективной области современной робототехники, какой является микроробототехника, так как микророботы, как правило, обладают крайне ограниченными возможностями, и только их массовое (до нескольких десятков тысяч) применение может привести к эффективному решению поставленной перед ними задачи

Одним из возможных подходов к решению проблемы управляемости большой группы роботов (или микроробототов) является ее разбиение на некоторые подгруппы, численность которых не превышает граничного значения N_{max} (22), при котором выполняется условие управляемости (21) для этих подгрупп

Такое разбиение больших групп роботов в диссертации предложено называть кластеризацией, при этом выделяются два этапа образование кластера, т е его инициализация, и рост кластера, т е сам процесс разбиения группы роботов на кластеры Сочетание различных способов инициализации и роста кластеров позволяет предложить несколько методов кластеризации больших групп роботов

Одним из таких методов является иерархическая кластеризация

Структура большой группы роботов, разбитой на кластеры по иерархическому принципу, подобна структуре таких четко организованных групп людей, как трудовой коллектив крупного предприятия или воинское соединение, например, дивизия, которые разбиваются на структурные подразделения различного уровня, и во главе которых стоит руководитель. Например, дивизия разбивается на полки, полки – на батальоны, батальоны – на роты, и т д вплоть до отделений, являющихся подразделениями самого низкого уровня Такая организация обеспечивает достаточно хорошую управляемость коллектива при решении определенного класса целевых задач

В этом случае при проведении кластеризации, в каждый кластер включаются роботы, которые имеют постоянную связь между собой и число которых не превышает N_{max} - максимального числа роботов в кластере, при котором еще выполняется условие его управляемости (21) Выбор действий для каждого робота в этом случае, осуществляется с учетом текущих действий других роботов только данного кластера, и кластеры между собои при определении текущих действий никак не взаимодействуют Взаимодействие между кластерами осуществляется на этапе распределения между ними целевых подзадач соответствующего уровня, которое в диссертации предложено также осуществлять с использованием итерационной процедуры оптимизации коллективных действий, реализующей метод коллективного управления

В работе предлагается для решения задачи коллективного управления в такой иерархически организованной группе роботов множество целей {T} разбивать на целевые задачи также по иерархическому принципу. При этом, учитывая, что в общем случае группа роботов разбивается на кластеры h уровней, целесообразно и множество целей разбивать на множество целевых задач h уровней

В процессе кластеризации и в распределении целевых задач между кластерами могут участвовать не все роботы, входящие в состав кластеров, а только их "лидеры" В работе вводится понятие "лидера" кластера (подгруппы) который может быть "формальным", т е назначенным заранее, или "неформальным" Последний появляется в процессе кластеризации Показано, что для решения задачи выбора "лидера" среди роботов большой группы можно использовать тот же подход, который использован в итерационной процедуре оптимизации коллективных действий Отличие будет лишь в том, что для выбора "лидера" может потребоваться лишь один итерационный цикл принятия решения

Предложен также ряд методов кластеризации, не приводящих к образованию сложной иерархической структуры Среди них метод разбиения большой группы роботов на непересекающиеся кластеры переменного состава (метод последовательной кластеризации) В отличие от метода иерархической кластеризации, при использовании которого образуются кластеры, как правило, постоянной численности и постоянного состава, при последовательной кластеризации роботы могут переходить из кластера в кластер, как в процессе кластеризации, так и в процессе решения целевых задач Например, при выходе из строя некоторых роботов в каком-либо кластере, в него переходят роботы из ближайшего кластера или из резервного кластера

Метод динамической кластеризации базируется на методе последовательной кластеризации, но здесь процесс инициализации кластеров совмещается с процессом их роста Решение задачи управления кластеризацией группы роботов определяется установившимся решением дифференциальных уравнений, образующих математическую модель большой группы роботов как динамической системы

Метод разбиения больших групп роботов на пересекающиеся кластеры постоянной численности и переменного состава заключается в следующем Вначале образу-

ется первый кластер численностью $N_1 < N_{max}$, роботы которого определяют свои действия с помощью одного из приведенных во второй главе алгоритмов, реализующих итерационную процедуру оптимизации коллективных действий После завершения этой процедуры некоторое число роботов N_0, действия которых наиболее эффективны, приступают к их отработке, а оставшиеся $N_1 - N_0$ роботов служат основой для второго кластера К ним присоединяются N_0 новых роботов, еще не вошедших ни в один из кластеров, и процесс определения действий осуществляется уже для нового кластера той же численности и т д

Этот метод кластеризации позволяет распараллелить процедуру оптимизации коллективных действий, так как в большинстве случаев в составе группы можно выделить несколько непересекающихся кластеров, в которых данная процедура может выполняться одновременно, и тем самым сократить временные затраты на ее реализацию в большой группе роботов

Работоспособность и эффективность методов кластеризации при управлении большими группами роботов показана на модельных примерах

В пятой главе анализируется комплекс задач, решаемых отдельным роботом при выполнении очередного действия в составе группы и предлагаются методы и алгоритмы их решения с использованием однородных нейроподобных структур (ОНС)

В результате реализации процедуры оптимизации коллективных действий для каждого робота группы определяется действие, направленное на достижение групповой цели Для его выполнения бортовая система управления (БСУ) каждого робота группы должна сформировать соответствующие управляющие воздействия на исполнительные механизмы робота.

В диссертации показано, что задача управления действиями отдельного робота группы сводится к определению вектор-функции управлений, переводящих систему "робот-среда" из текущего состояния в конечное (целевое) и обеспечивающих экстремум целевого функционала, задающего качество управления, с учетом установленных ограничений

В главе дана математическая постановка данной задачи в виде задачи оптимального управления, которая может быть отнесена классу неклассических задач вариационного исчисления Стандартные методы решения таких вариационных задач требуют решения систем дифференциальных уравнений высокого порядка, что, в свою очередь, приводит к большим временным затратам при их реализации на ЭВМ Данный фактор не позволяет использовать эти методы при решении задач управления роботом в составе группы в реальном времени с учетом всех непредвиденных заранее изменений, происходящих в среде

В работе предложен иной подход к решению задач данного класса. Основная идея этого подхода заключается в сведении вариационной задачи к задаче анализа графовой модели, которая, в свою очередь может эффективно решаться с помощью ОНС с параллельным принципом обработки информации

Для этого множество различных состояний системы "робот-среда" описывается точками S_i, $i\in[1,n]$ n-мерного пространства состояний системы "робот-среда" ($n=h+w$), которое можно обозначать, как {S} Предлагается выполнить ряд преобразований, в результате которых исходная задача управления роботом сводится к задаче определения дискретной последовательности состояний системы "робот-среда" $\mathbf{S}_0,\mathbf{S}_1,\ ,\mathbf{S}_f$, реализующих экстремум интегральной суммы

$$\mathbf{Y}=\sum_{m=0}^{k-1}F_0^*(\mathbf{S},\Delta\mathbf{S}) \qquad (23)$$

При этом определяется последовательность управлений, соответствующая получаемой последовательности состояний

В работе показано, что при функционировании робота в динамически изменяющейся среде строить и реализовывать весь план управления роботом для достижения конечной цели не имеет смысла, поскольку параметры среды могут измениться таким образом, что построенный план будет либо не оптимален, либо не выполним Поэтому предлагается периодически в текущий момент времени t_0 определять новое управление и формировать соответствующие управляющие воздействия на исполнительные устройства робота с учетом новых значений параметров, описывающих состояние системы "робот-среда"

Также показано, каким образом сформулированная выше задача может быть представлена в графовой форме Для этого пространство состояний {S} системы "робот-среда" покрывается однородным графом-решеткой $\mathbf{G(Q,X)}$, Каждая вершина $q_j\in\mathbf{Q}$ этого графа соответствует некоторой дискретной точке $\mathbf{S}_m$ пространства состояний {S} Дуга $x(q_m,q_{m+1})\in\mathbf{X}$ соединяет вершины q_m и q_{m+1}, соответствующие соседним дискретным точкам $\mathbf{S}_m$ и $\mathbf{S}_{m+1}$, пространства состояний. Кроме того, каждой дуге $x(q_m,q_{m+1})$ приписывается вес γ, значение которого может определяться различными способами и быть равным, например, приращению интегральной суммы (23) при преобразовании ситуации $\mathbf{S}_m$ в ситуацию $\mathbf{S}_{m+1}$ Также веса, характеризующие приоритеты тех или иных состояний могут быть приписаны и вершинам графа

Кроме того, на графе $\mathbf{G(Q,X)}$ выделяется вершина q_0, координаты которой в пространстве {S}" соответствуют координатам точки $\mathbf{S}_0$, определяемой, в свою очередь, параметрами текущего состояния $\mathbf{S}_0$, а также подмножество вершин $\mathbf{Q}_f\subseteq\mathbf{Q}$, координаты которых удовлетворяют параметрам целевых (конечных) состояний $\{\mathbf{S}\}_f$. Также на графе $\mathbf{G(Q,X)}$ выделяется множество допустимых вершин $\mathbf{Q}_g\subseteq\mathbf{Q}$, соответствующих допустимым состояниям системы "робот-среда", а также множество допустимых дуг $\mathbf{X}_g\subseteq\mathbf{X}$, соответствующих допустимым действиям робота

В результате этих построений задача определения последовательности состояний $\mathbf{S}_0,\mathbf{S}_1,\ ,\mathbf{S}_f$, дающих экстремум интегральной сумме (23) и удовлетворяющих установленным в главе 1 ограничениям, сводится к задаче построения пути на графе $\mathbf{G(Q,X)}$ между вершиной q_0 и одной из вершин множества $\mathbf{Q}_f$, проходящего только

через вершины множества $\mathbf{Q}_g$ и дуги множества $\mathbf{X}_g$, и имеющего экстремальный суммарный вес принадлежащих ему дуг.

Рассмотрены различные варианты топологии графа $\mathbf{G(Q,X)}$ и способы его построения.

Для аппаратной реализации процедуры поиска экстремального пути на графе предложена структура, топологически подобная графу $\mathbf{G(Q,X)}$. Так как данная структура реализует не численные вычисления, а волновую процедуру, моделирующую процесс поиска всех возможных путей на графе, то она может быть отнесена к классу однородных нейроподобных структур.

Преимуществами ОНС являются: их высокая живучесть, так как выход из строя отдельных элементов (ячеек) не приводит к выходу из строя всей структуры, высокое быстродействие, достигаемое за счет параллельной аппаратной реализации процедуры поиска и анализа всех возможных путей на графовой модели пространства состояний системы "робот-среда", регулярность структуры, позволяющая легко реализовать ОНС в виде СБИС, представленной на рисунке 5 или на базе ПЛИС, что позволяет значительно уменьшить массогабаритные характеристики бортовых систем управления роботов. Такие СБИС были разработаны при непосредственном участии автора. Архитектура СБИС позволяет их соединять между собой для отображения графов любых размерностей.

Автором предложен метод и алгоритмы управления отработкой коллективных действий отдельными роботами группы с использованием ОНС.

В диссертации также предложен метод и реализующий его алгоритм управления роботом с использованием иерархической системы моделей пространства состояний системы "робот-среда", представляющих данное пространство с разным масштабом. Показана работа этого алгоритма на примере управления движением мобильного робота к цели. Описаны способы получения значений весов дуг и вершин графа $\mathbf{G(Q,X)}$.

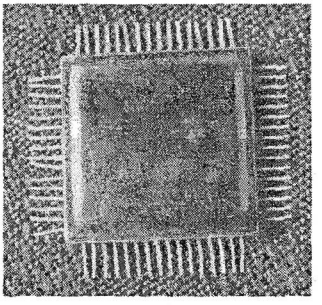

Рисунок 5 – СБИС однородной нейроподобной структуры

Приведены результаты экспериментальных исследований метода и алгоритмов управления отдельным роботом группы при отработке им коллективных действий с использованием ОНС. Исследования проводились как с использованием действующих макетных и экспериментальных образцов мобильных роботов, в том числе и на полигоне на Камчатке (представлено на рисунке 6), так и с использованием программных моделей, имитирующих движение роботов в виртуальной среде. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предложенного в диссертационной работе подхода к управлению отдельными роботами группы.

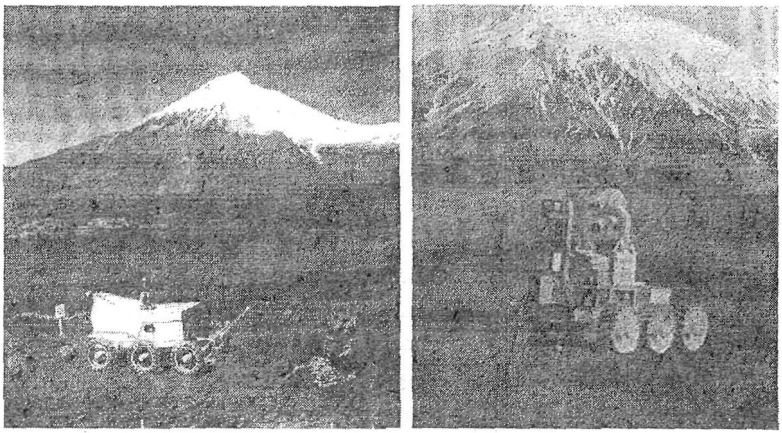

Рисунок 6 – Фрагменты полигонных испытаний макетных образцов систем управления на базе ОНС в составе прототипов роботов-планетоходов

В заключении обобщаются основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены модельные примеры, демонстрирующие работоспособность и эффективность предложенных в диссертации алгоритмов коллективного распределения заданий (целей) в группах роботов и методов кластеризации больших групп роботов, имитационные программные модели функционирования отдельных роботов при отработке ими выбранных действий, а также акты реализации результатов работы.

Основной научный результат диссертации заключается в решении единой крупной научной проблемы разработки научных основ распределенного (децентрализованного) управления коллективным взаимодействием роботов при их групповом применении в условиях сложных, заранее неизвестных динамически изменяющихся ситуаций. Данная проблема имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку ее решение позволяет значительно расширить функциональные возможности и области применения робототехнических систем, сократить временные и финансовые затраты на создание систем группового управления роботами, заменить людей при выполнении опасных работ, например, в зонах техногенных и экологических катастроф, повысить производительность технологических процессов.

При проведении исследований и разработок по теме настоящей диссертационной работы получены следующие новые теоретические и прикладные результаты:

- на основе анализа существующих разработок систем группового управления роботами, реализующих различные стратегии поведения, показано, что для группового управления роботами, функционирующими в сложной динамической, недетерминированной среде, наиболее эффективным является децентрализованное (распределенное) управление, но в то же время эффективных методов распределенного управления не существует;

- предложен подход к проблеме управления группами роботов, основанный на принципах коллективного управления Сформулированы основные принципы коллективного управления, которое по своей сути является децентрализованным (распределенным), так как предполагает участие всех членов коллектива в процессе принятия решений,

- разработан метод коллективного распределенного управления группой роботов, обеспечивающий по сравнению с известными централизованными методами снижение вычислительной сложности задачи группового управления, решаемой бортовыми устройствами роботов, не менее чем в N раз (N – число роботов в группе),

- предложена итерационная процедура оптимизации коллективных действий, позволяющая за число итерационных циклов, не превышающее число роботов в группе, найти для каждого робота группы такое управление, которое бы являлось оптимальным или близким к нему в смысле достижения общей групповой цели Данная процедура наиболее эффективна при реализации в распределенных системах группового управления,

- разработаны алгоритмы коллективного распределения заданий (целей) в группах роботов, реализующие итерационную процедуру оптимизации коллективных действий и обеспечивающие возможность решения задачи распределения в реальном времени, во-первых, за счет снижения вычислительной сложности по сравнению с известными алгоритмами, а во-вторых, за счет возможности их децентрализованной реализации При этом разработаны как алгоритмы коллективного распределения, позволяющие получать точное решение (точные алгоритмы), так и ускоренные алгоритмы, дающие приближенное решение и являющиеся наиболее эффективными в условиях дефицита времени на принятие решений Эффективность и работоспособность этих алгоритмов подтверждена экспериментально с использованием имитационных моделей, а также при практической реализации систем группового управления роботами,

- разработаны методы и алгоритмы коллективного выбора и оптимизации действий в группах роботов, функционирующих в условиях организованного противодействия, отличающиеся тем, что они обеспечивают управляемость групп роботов в условиях динамических и недетерминированных изменений ситуации, когда действия противной стороны непредсказуемы Эффективность этих методов и алгоритмов показана на имитационных программных моделях игры роботов в виртуальный футбол, а также моделях боестолкновения смешанных подразделений роботов,

- предложены новые методы и алгоритмы кластеризации больших групп роботов, обеспечивающих их управляемость в условиях динамически изменяющихся ситуаций В частности, предложены метод иерархической кластеризации больших групп роботов, позволяющий эффективно использовать иерархические распределенные системы группового управления роботами, а также алгоритм выбора роботов-"лидеров" кластеров при иерархической кластеризации, методы и алгоритмы после-

довательной кластеризации, позволяющие оптимально распределить роботов группы по кластерам, метод и алгоритм динамической кластеризации, позволяющии совместить процессы инициализации и роста кластеров и, тем самым, сократить время процесса кластеризации, метод пересекающихся кластеров, позволяющий распараллелить процедуру оптимизации коллективных действий в разных кластерах,

- показано, что задача управления отдельным роботом группы при отработке им выбранных коллективных действий может быть представлена в виде вариационной задачи, которую, в свою очередь, можно представить в графовой форме В этом случае решение задачи управления роботом может быть сведено к отысканию оптимального пути в графе состояний системы "робот-среда" между вершинами текущего и целевого состояния, что позволяет использовать для ее решения быстродействующую ОНС. Разработаны методы и алгоритмы управления отдельным роботом группы при отработке им коллективных действий, основанные на использовании ОНС,

- предложены технические решения ОНС, реализованные в виде СБИС и микросборок

Теоретические и прикладные результаты диссертационной работы были реализованы при разработке систем группового управления, в частности, систем управления группами роботов, обслуживающих автоматизированные склады, а также при создании систем управления мобильными роботами различного назначения

Эффективность полученных теоретических и прикладных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, а также практической реализацией, внедрением и использованием этих результатов на ряде предприятий, в частности, СПП РАН (г Москва), НИИ СМ МГТУ им Н Э Баумана (г Москва), МИЭТ (г Москва), ОАО "СКБ "Точрадиомаш" (г Майкоп), ОАО "ВНИИТРАНСМАШ" (г Санкт-Петербург), НИИ МВС ЮФУ (г Таганрог), войсковой части 93603 (г Москва)

Основные публикации по теме диссертации

1 Капустян, С Г. Распределенные системы планирования действий коллективов роботов [Текст] монография / И А Каляев, А Р Гайдук, С Г Капустян –М Янус-К, 2002 –292 с

2 Капустян, С Г Основы построения распределенных систем управления коллективами роботов [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян, Л Ж Усачев // Информационные технологии - 1998 -№ 5 - С 13-18

3 Капустян, С Г Метод оптимального распределения целей в коллективе роботов [Текст] / С Г Капустян, Л Ж Усачев, С.В Стоянов // Информационные технологии - М . Машиностроение - 1998 -№4, - С 29-34

4 Капустян, С Г Децентрализованное планирование действий коллектива интеллектуальных роботов [Текст] / С Г Капустян //Интеллектуальные робототехнические системы – 2001 мат-лы молодеж науч школы.- Таганрог Из-во ТРТУ, 2001 - С 184-187

5 Капустян, С Г Метод организации мультиагентного взаимодействия в распре-

деленных системах управления группой роботов при решении задачи покрытия площади [Текст] / С Г Капустян //Искусственный интеллект - 2004 - №3 - С 715-727

6 Капустян, С Г Многоуровневая организация коллективного взаимодействия в группах интеллектуальных роботов [Текст] / С Г Капустян //Известия ТРТУ - Таганрог Изд-во ТРТУ - 2004 - №9 - С 149-158

7 Капустян, С Г Децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов [Текст] / С Г Капустян // Известия высших учебных заведений, Электроника - 2006 -№2 - С 84-91

8 Капустян, С Г Алгоритмы коллективного улучшения плана в задачах группового управления роботами [Текст] / С Г Капустян //Искусственный интеллект - 2006 - №3 - С 409-420

9 Капустян, С Г. Алгоритм коллективного улучшения плана в задачах распределения ресурсов многопроцессорных информационно-управляющих систем [Текст] / В А Гандурин, С Г. Капустян, Э В Мельник // Вестник компьютерных и информационных технологий - 2007 - №12 - С 40-50

10 Капустян, С Г Ускоренный децентрализованный метод коллективного распределения целей в группе роботов [Текст] / С Г Капустян // Интеллектуальные и многопроцессорные системы-2005 мат-лы Междунар науч конф, Т 3 - Таганрог Изд-во ТРТУ, 2005 - С 45-51

11 Капустян, С Г. Распределенная система управления группой роботов-штабелеров [Текст] / С Г Капустян, А А Вьюшин //Мехатроника, Автоматизация, Управление - 2003 - №3 - С 22–28

12 Капустян, С Г Склад, где ничего не теряется [Текст] / С Г Капустян // Промышленный еженедельник - 2004, №35(84), 27 сентября-3 октября - С 9

13 Капустян, С.Г Распределенная система управления группой складских роботов-штабелеров [Текст] / С Г Капустян // Интеллектуальные и многопроцессорные системы – 2003 мат-лы Междунар науч -техн конф, Т 2 - Таганрог Изд-во ТРТУ, 2003.- С. 185–194.

14 Капустян, С Г Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов [Текст] / И А Каляев, А Р Гайдук, С Г Капустян //Вестник ЮНЦ РАН - 2005 - т 1, выпуск 2 - С 20-27

15 Капустян, С Г Принципы организации больших коллективов роботов [Текст] / И А Каляев, А Р Гайдук, С Г Капустян, В М Чистяков // Интеллектуальные робототехнические системы – 2001 мат-лы Молодеж науч школы - Таганрог Из-во ТРТУ, 2001 - С 178-181

16 Капустян, С Г Исследование метода кластеризации больших коллективов микророботов [Текст] / И А Каляев, А Р Гайдук, С Г Капустян, Р Н Кулиничев, Е А Плаксиенко //Экстремальная робототехника – 2003 мат-лы науч. молодеж школы - Таганрог Изд-во ТРТУ, 2003 - С 213–216

17 Капустян, С Г Методы организации локальной координации действий в боль-

ших группах микроробогов [Текст] / С Г Капустян, Ю П Бондарев // Известия ТРТУ - Таганрог Изд-во ТРТУ, 2004 - №9 - С 158-167

18 Капустян, С Г Однородные структуры для решения вариационных задач оптимизации и планирования [Текст] монография / И А Каляев, С Г Капустян - Львов НТЦ "Интеграл", 1991 - 82 с

19 Капустян, С Г Опыт использования однородных структур для планирования оптимальных движений адаптивных роботов [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян, М В Петручук // "Распределенная обработка информации" – IV Всесоюзный семинар тез докладов - Новосибирск Изд-во СО АН СССР, 1991 - С 62

20 А с 1252755 СССР, МКИ[3] G 05 B 19/00 Устройство для управления адаптивным роботом [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян, В П Носков, Л Ж Усачев - № 3836284/24-24, заявл 04 01 85, опубл 23 08 86, Бюл № 31 - 10 с

21 А с 1361537 СССР, МКИ G 06 F 7/00 Ячейка однородной трассирующей структуры [Текст] /С Г. Капустян [и др] - 4098256/24-24, заявл 30 05 86, опубл 23 12 87, Бюл № 47 - 3 с

22 А с № 1590998 СССР, МКИ G 06 F 7/00 Ячейка однородной трассирующей структуры [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян - №46078851/24-24, заявл 21 11 88, опубл 07 09 90, Бюл № 33 - 3 с

23 Капустян, С Г. Системы управления интеллектуальных мобильных роботов для исследовательских и промышленных работ [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян, Л Ж Усачев, С В Стоянов // Наука производству - 1999 -№ 11.- С 28-32

24 Капустян, С Г Системы технического зрения на базе сканирующих лазерных дальномеров [Текст] / И А Каляев, С Г Капустян, Л Ж Усачев // Наука производству - 1999 - № 11 - С 45-47

25 Капустян, С Г Интеллектуальная система автоматического вождения безэкипажного транспортного средства [Текст] / С Г Капустян // Известия ТРТУ, Таганрог 2002 - №1 (24) - С 53-54

26 Капустян, С Г Система управления движением транспортного робота с иерархическим планированием траектории [Текст] / И А Каляев, С Г. Капустян, В К Мишкинюк // Многопроцессорные вычислительные структуры,- 1987 - Вып 9 - Таганрог Изд-во ТРТИ - С. 71-74

27 Капустян, С Г Программно-аппаратный комплекс для моделирования систем управления движением мобильных роботов в виртуальной среде [Текст] / И А Каляев, С Г. Капустян, Л Ж Усачев, О А Луконин // Информационные технологии - 1998 -№ 6 - С 9-13

28 Капустян, С Г Моделирование функционирования мобильных роботов в виртуальной среде на ПЭВМ [Текст] / С Г Капустян, Л Ж Усачев // Известия ТРТУ - 2002 - №1 (24) - С 52-53

ЛР № 020565 от 23 июня 1997 г Подписано к печати 18 03 2008 г
Формат 60x84 1/ 0 Бумага офсетная Печать офсетная
Усл п л – 2,0 Уч – изд л – 1,9
Заказ № 148 Тираж 120 экз

ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44
Типография Технологического института Южного федерального университета в г Таганроге