

КАЛЯЕВ Игорь Анатольевич
ГАЙДУК Анатолий Романович
КАПУСТЯН Сергей Григорьевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
КОЛЛЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
В ГРУППАХ РОБОТОВ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 007.52:621.865.8:

004.896

ББК 32.81

К 17



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 09-08-07024*

Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. **Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 280 с. — ISBN 978-5-9221-1141-6.

Рассматривается современное состояние проблемы группового управления роботами. Дается формальная постановка задачи управления группой роботов в условиях заранее неизвестной, недетерминированной и противодействующей среды. Формулируется задача коллективного управления в группе роботов. Предлагается подход к решению данной задачи, в основе которого лежит итерационная процедура оптимизации коллективных действий в группе роботов. Рассматриваются алгоритмы решения задач оптимального распределения целей между роботами группы, а также алгоритмы коллективного управления роботами в условиях активного противодействия среды, реализующие указанную итерационную процедуру. Предлагаются оригинальные методы решения проблемы управления большими группами, состоящими из сотен и даже тысяч роботов.

Для научных работников, инженеров, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области разработки и создания систем управления групповым взаимодействием роботов, функционирующих в условиях заранее неизвестной и динамически изменяющейся обстановки.

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© И. А. Каляев, А. Р. Гайдук,
С. Г. Капустян, 2009

ISBN 978-5-9221-1141-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	5
Предисловие	6
Введение	8
Глава 1. Задачи группового управления роботами.	12
1.1. Проблема группового управления роботами: современное состояние	12
1.1.1. Управление группами роботов в стационарных условиях (15).	
1.1.2. Управление группами роботов в сложных нестационарных средах (18).	
1.1.3. Управление группами роботов в условиях противодействия (25).	
1.1.4. Управление большими группами роботов (28).	
1.2. Формальная постановка задачи группового управления роботами.	31
1.2.1. Задача управления одиночным роботом (32).	
1.2.2. Задача управления группой роботов (34).	
1.2.3. Классификация задач группового управления по уровню сложности (37).	
Глава 2. Метод коллективного управления группой роботов	44
2.1. Стратегии группового управления.	44
2.2. Принципы организации систем группового управления роботами	54
2.2.1. Централизованные системы группового управления роботами (54).	
2.2.2. Распределенные системы группового управления роботами (56).	
2.2.3. Иерархическая организация систем группового управления роботами (57).	
2.3. Коллективное управление в группе роботов	61
2.4. Формулировка задачи коллективного управления в группе роботов	63
2.5. Итерационная процедура оптимизации коллективных действий в группе роботов	65
2.6. Исследование итерационной процедуры оптимизации коллективных действий в группе роботов	71
2.6.1. Оценка числа итерационных циклов (71).	
2.6.2. Оптимальность коллективного управления, получаемого с помощью итерационной процедуры (72).	
2.6.3. Устойчивость итерационной процедуры оптимизации коллективных действий в группе роботов (76).	
Глава 3. Алгоритмы коллективного распределения целей в группах роботов	79
3.1. Задача коллективного распределения целей	79
3.2. Алгоритмы коллективного улучшения плана.	81
3.3. Ускоренные алгоритмы коллективного распределения целей	102
3.4. Сравнительный анализ алгоритмов коллективного распределения целей.	118

Глава 4. Модельные и прикладные задачи коллективного распределения целей в группах роботов	123
4.1. Нанесение максимального ущерба противнику	123
4.2. Покрытие максимальной площади.	126
4.3. Управление группой роботов-лифтов	140
4.4. Коллективное управление группой складских роботов	145
4.4.1. Принципы организации автоматизированных складов (145).	
4.4.2. Коллективное распределение заданий в группе складских роботов (149).	
4.4.3. Система управления группой роботов-штабелеров (154).	
Глава 5. Модели и алгоритмы коллективного управления роботами в условиях противодействия.	156
5.1. Управление группами роботов в условиях боевых действий.	156
5.1.1. Формальная постановка задачи управления группами роботов в боевых условиях (156).	
5.1.2. Коллективное управление группами роботов в условиях боестолкновения (158).	
5.1.3. Программная модель коллективного управления группами роботов на поле боя (163).	
5.2. Игра роботов в виртуальный футбол.	166
5.2.1. Организация и правила игры (167).	
5.2.2. Локальные алгоритмы управления отдельным роботом-футболистом (172).	
5.2.3. Групповое управление роботами-футболистами (182).	
5.2.4. Задача группового управления при игре роботов в виртуальный футбол (185).	
5.3. Модели стайного управления группой роботов в условиях противодействия.	196
5.3.1. Принципы стайного управления (196).	
5.3.2. Алгоритм оптимизации действий робота в составе стаи (198).	
5.3.3. Программная модель стайного управления группой роботов (201).	
Глава 6. Алгоритмы коллективного управления группами роботов большой численности	209
6.1. Проблема управляемости в больших группах роботов	209
6.2. Иерархическая кластеризация	213
6.3. Образование непересекающихся кластеров постоянного состава.	222
6.4. Последовательная кластеризация	228
6.5. Безрезервная последовательная кластеризация	237
6.6. Динамическая кластеризация.	240
6.7. Метод пересекающихся кластеров	251
Заключение	263
Предметный указатель	265
Список литературы	267
Сведения об авторах.	279

Список сокращений

АРМ — автоматизированное рабочее место
АТТ — автоматическая транспортная тележка
БВ — бортовой вычислитель
БППИ — блок приема-передачи информации
ВБ — вычислительный блок
ГВК — глобальная видеокамера
ИУ — исполнительные устройства
КС — контроллер связи
КСиПОД — контроллер связи и предварительной обработки данных
МПД — модуль планирования действий
ПВУ — приемо-выдающее устройство
РШ — робот-штабелер
СГУР — система группового управления роботами
СУ — система управления
СПР — стационарный погрузочный робот
ТР — транспортный робот
ЦУУ — центральное управляющее устройство
ЦС — центральная станция

Предисловие

Эра робототехники, которая началась в 60-е годы прошлого века, набирает все больший темп. Роботы все активнее входят в различные сферы жизни и деятельности человека. Еще недавно промышленные роботы, работающие на сборочном производстве, казались чем-то фантастическим, а сегодня — это обыденное явление. Однако время одиночных роботов, способных решать узкоспециализированные, частные задачи проходит. Разработчикам становится все более понятным, что решение сложных задач возможно только путем группового взаимодействия нескольких роботов.

Эволюция робототехники очень прозорливо показана знаменитым польским фантастом Станиславом Лемом в повести «Непобедимый». Вершиной этой эволюции должны стать огромные коллективы (тучи) простейших микророботов, которые за счет своей простоты и массовости могут решить самые сложные задачи, обладают огромной живучестью и быстротой реакции на внешние воздействия и поэтому становятся практически непобедимыми. И исторический опыт показывает, что это действительно так. Если первые небольшие группы сборочных и транспортных роботов, работающих на промышленных предприятиях, появились совсем недавно в начале 90-х годов, то уже сейчас ставится задача создания так называемой «умной пыли», которая должна представлять собой огромное число микророботов, объединенных общей целью, как это и было описано в повести С. Лема. При этом проблема обеспечения внутрigrуппового взаимодействия роботов для оптимального достижения групповой цели выходит на первый план.

Пионерские научные исследования в области группового взаимодействия роботов появились в начале 80-х годов XX века. Однако, не смотря на достаточно большое число работ в данном направлении, до сих пор не существует более-менее сформировавшейся методической основы для создания систем группового управления роботами различного назначения. Каждая исследовательская группа, как правило, пытается решить некоторую частную задачу, разрабатывая при этом узкоспециализированные методы и алгоритмы, которое не могут быть применены при решении других задач подобного класса.

В настоящей монографии делается попытка систематизации исследований в области коллективного управления роботами при их групповом взаимодействии и построения некоторой теоретической и методологической базы для их дальнейшего развития. Монография является обобщением многолетних исследований, проведенных авторами в Научно-исследовательском институте многопроцессорных вычислительных систем им. акад. А. В. Каляева Южного федерального университета (ранее НИИ МВС Таганрогского государственного радиотехнического университета).

Часть материала, представленного в главе 5 монографии и касающегося виртуального футбола роботов, была любезно предоставлена сотрудниками ИПМ РАН им. Келдыша и МГУ им. М. В. Ломоносова профессором В. Е. Павловским и к. ф.-м. н. А. Г. Плаховым, с которыми авторы имеют многолетнее творческое сотрудничество. Авторы считают также своим долгом вспомнить выдающегося ученого академика Д. Е. Охоцимского, который оказал огромное влияние на становление и развитие исследований, результаты которых представлены в настоящей монографии.

Авторы выражают также искреннюю благодарность всем сотрудникам НИИ МВС ЮФУ и, в первую очередь, сотрудникам лаборатории «Интеллектуальные системы обработки информации, принятия решений и управления», которые оказали неоценимую помощь в доведении теоретических исследований до программных моделей и практических разработок, а также в подготовке и оформлении монографии.

Книга ориентирована, прежде всего, на научных работников, инженеров, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области разработки и создания систем управления групповым взаимодействием роботов, функционирующих в условиях заранее неизвестной и динамически изменяющейся обстановки.

Все замечания и пожелания по данной книге следует направлять по адресу: 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, тел.: (8634) 315-494; факс (8634) 369-376, E-mail: mvs@tsure.ru.

И. А. Каляев

Введение

Область применения роботов с каждым годом все более расширяется. Они применяются во многих областях промышленного производства, в зонах радиоактивного и химического заражения, в борьбе с террористами, в условиях боевых действий и космических исследований. Применение роботов, в особенности интеллектуальных, позволяет решать задачи поиска и изъятия радиоактивных, биологических, химических и взрывчатых веществ, выполнять сложные сборочные, сварочные, покрасочные и другие опасные для людей работы при минимальном участии оператора. Поэтому проблеме разработки принципов построения роботов и алгоритмов управления ими посвящено большое число исследований, проводимых как в России, так и за рубежом. В значительной мере этот процесс стимулируется очередным этапом миниатюризации электронных устройств, что позволяет значительно расширить интеллектуальные возможности как роботов, так и микро-роботов. На повестку дня встает вопрос о применении многочисленных групп — «туч» последних.

В этих исследованиях установлено, в частности, что одиночный даже интеллектуальный робот может решать лишь несложные задачи частного порядка или выполнять простые операции. Складывающаяся ситуация с полным правом можно описать пословицей «Один в поле не воин». Это обусловлено небольшим радиусом действий, ограниченным бортовым энергоресурсом, небольшим числом выполняемых операций, ограниченным набором исполнительных устройств, невысокой вероятностью выполнения поставленной задачи в экстремальных условиях, связанной с возможностью выхода из строя одиночного робота.

Поэтому более эффективным является решение сложных задач одновременно несколькими роботами, т. е. группой роботов. При групповом использовании роботов резко увеличивается радиус действия за счет рассредоточения роботов по всей рабочей зоне, расширяется набор выполняемых функций, что обеспечивается путем установки на отдельных роботах группы исполнительных устройств различных типов. Достигается более высокая вероятность решения поставленной задачи за счет перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них. Именно поэтому такие сложные задачи, как сборка сложных конструкций на Земле, в космосе или под водой, участие в боевых и обеспечивающих операциях, разминирование территорий и т. п., могут быть успешно решены роботами только при их групповом использовании. Недаром в большинстве детских сказок самые сильные существа это «драконы о трех, девяти и даже двенадцати головах».

Проблема группового применения роботов является особенно важной в такой перспективной области современной робототехники, как

микроробототехника. По очевидным причинам указанные выше ограниченные возможности одиночного робота проявляются здесь особенно остро. Поэтому только групповое применение микророботов может привести к эффективному решению поставленных задач.

Однако при групповом использовании роботов возникает ряд весьма сложных задач, в первую очередь, связанных с проблемой управления ими и организацией коллективного взаимодействия отдельных роботов для наиболее эффективного достижения цели, поставленной перед группой роботов. В особенности эта проблема относится к мобильным роботам, т.е. к интеллектуальным роботам с автономной системой передвижения и навигации, оснащенным соответствующими рабочими органами. Совершенно ясно, что без коллективного управления группа роботов рискует быть подобной известным коллективам из басен И. А. Крылова.

Проблеме группового управления роботами посвящен ряд крупных научно-исследовательских проектов, выполняемых в наиболее развитых в технологическом отношении странах мира, таких как США, Япония, Германия, Китай и Россия. Анализ результатов этих проектов показывает, что в настоящее время отсутствуют достаточно общие подходы к решению проблемы группового управления роботами при их функционировании в заранее неизвестной, недетерминированной среде и, в частности, в условиях активного противодействия. В целом необходимо отметить, что управление группой роботов с целью их эффективного взаимодействия является комплексной проблемой. С одной стороны, требуется разработка методов и алгоритмов управления взаимосвязанными действиями отдельных роботов, направленными на достижение общей (групповой) цели, а с другой стороны, — разработка методов и средств реализации этих действий роботами группы в реальном времени и с учетом изменений, происходящих в среде.

Именно разработке методов и алгоритмов управления группой роботов с целью наиболее эффективного решения поставленной перед ней задачи в условиях заранее неизвестной, недетерминированной среды при возможном активном противодействии последней посвящена настоящая монография. Подобно тому, как в известной сказке Людоед демонстрировал Коту все свои возможности, работоспособность и эффективность всех предлагаемых в книге методов и алгоритмов демонстрируется на конкретных примерах.

Монография содержит шесть глав. В главе 1 рассматривается современное состояние проблемы группового управления роботами. Кратко анализируются известные научно-исследовательские проекты, посвященные разработке методов группового управления роботами, и существующие системы управления группами роботов. Даются формальные постановки задач управления одиночным роботом и группой роботов в условиях заранее неизвестной, недетерминированной и противодействующей среды. Приводится классификация задач группового управления по уровню сложности.

В главе 2 сначала рассматриваются известные подходы к решению задач управления группами объектов или живых организмов (в частности, людей). Выявлены основные стратегии группового управления в живой природе и в человеческом обществе. На основе обобщения этих стратегий сформулирована задача коллективного управления в группе роботов и дана ее формальная, математическая постановка. Для решения поставленной задачи коллективного управления в группе роботов разработана итерационная процедура оптимизации коллективных действий в группе роботов. Показана устойчивость этой процедуры и оптимальность решения задачи группового управления роботами, доставляемого итерационной процедурой оптимизации коллективных действий в группе роботов.

Главы 3 и 4 монографии посвящены разработке и применению алгоритмов решения задач оптимального распределения целей между роботами группы. В основе всех предлагаемых алгоритмов коллективного распределения целей лежит итерационная процедура оптимизации коллективных действий в группе роботов. Показано применение и высокая эффективность этих алгоритмов для решения конкретных модельных и прикладных задач управления группами роботов, такими как группа лифтов одного здания, группа складских роботов, группа роботов военного назначения и т. п.

В главе 5 также на основе итерационной процедуры оптимизации коллективных действий в группе роботов разрабатываются алгоритмы коллективного управления роботами в условиях активного противодействия среды. В частности, дается формальная постановка задачи управления группой роботов в условиях боевых действий и ее решение. Исследование задачи проводится с помощью специализированной программной модели.

В последние годы весьма популярной среди специалистов, занимающихся проблемами группового управления роботами, стала игра роботов в виртуальный футбол. Фактически эта игра является прекрасной возможностью проверки эффективности новых алгоритмов управления группами роботов в условиях противодействия. В книге показано, что разрабатываемые модели и алгоритмы коллективного управления роботами могут успешно применяться и при игре роботов в виртуальный футбол. Здесь же рассматриваются принципы и модели стайного управления группами роботов, которое строится на принципах, аналогичных существующим в природных стаях хищников, насекомых и других живых организмов.

Глава 6 посвящена проблемам управления в группах роботов большой численности. Здесь, прежде всего, возникает задача управляемости большой группы роботов. Для ее решения предлагается осуществлять кластеризацию большой группы роботов на ряд групп меньшей численности, в каждой из которых выполняется условие управляемости. Эта задача особенно актуальна при использовании групп роботов очень большой численности («туч» роботов). Разработан ряд мето-

дов кластеризации, которые могут применяться в различных условиях функционирования группы роботов большой численности.

Внимательный читатель, несомненно, заметит, что все алгоритмы управления группами роботов, в основе которых лежит итерационная процедура оптимизации коллективных действий, ориентированы на выполнение их самими роботами. Тем самым коллективное управление группой роботов превращается в процесс ее самоорганизации на достижение поставленной перед нею цели. Именно на этом пути может быть в полной мере использован интеллектуальный потенциал современных, а в большей степени будущих, интеллектуальных роботов. По существу, эти алгоритмы можно рассматривать как этапы создания «коллективного интеллекта», о котором идет речь в книге известного специалиста по робототехнике Е. И. Юревича.

Рассмотренные в книге модели и алгоритмы коллективного управления группами роботов могут использоваться при создании систем управления роботами различного назначения. Прежде всего, это группы роботов, функционирующие в реальном времени в заранее неопределенной, недетерминированной среде. Именно в этих случаях разработанные методы коллективного распределения целей и коллективного управления роботами являются наиболее эффективными в плане оптимального достижения целей, поставленных перед группами роботов.

Глава 1

ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

1.1. Проблема группового управления роботами: современное состояние

Проблема группового управления — это глобальная проблема, актуальная для многих сфер жизни. Везде, где существует некоторая группа живых или технических объектов, которые должны совместными усилиями выполнять некоторую работу или решать некоторую задачу, возникает проблема группового управления или группового взаимодействия. Можно привести самые различные примеры таких групп объектов. Например, в технической сфере это может быть группа роботов, осуществляющих сборку узлов машин. Еще один пример из технической сферы — это группа процессоров в многопроцессорной вычислительной системе, решающих общую задачу. В принципе любая техническая система, состоящая из каких-либо отдельных узлов (например, автомобиль) может рассматриваться как объект группового управления.

Примеры группового взаимодействия в живой природе — это колонии муравьев, стаи птиц и рыб; в социальной сфере — это, например, строители, осуществляющие сборку жилых конструкций, спортивные (например, футбольные) команды, боевые подразделения, участвующие в боевых действиях, и т. п.

В технической области проблема группового управления наиболее актуальна в робототехнике. Для решения многих практических задач могут эффективно использоваться группы роботов. Например, это задачи, связанные с обследованием крупных объектов и больших территорий, перевозкой или переработкой больших объемов разнородных грузов и т. п. Как правило, при решении таких задач роботы должны функционировать в неорганизованной или плохо организованной, недетерминированной среде.

Группой роботов будем называть совокупность однотипных, то есть имеющих одинаковую конструкцию, одинаковое функциональное назначение и функциональные возможности, или разнотипных, имеющих разные конструкции, разное функциональное назначение и, соответственно, разные функциональные возможности, роботов, объединенных общей целевой задачей. В первом случае группа называется однородной или гомогенной, а во втором — неоднородной или гетерогенной.

Для достижения конкретной цели, стоящей перед группой роботов, в случае детерминированной среды каждый робот может выполнять заранее определенную последовательность действий. В случае же недетерминированной, динамической среды эта последовательность должна быть найдена системой управления группой роботов в процессе достижения цели. Причем действия роботов группы, очевидно, должны быть определенным образом скоординированы, согласованы. Таким образом, возникает задача управления группой роботов. Эта задача заключается либо в реализации системой управления роботами *заранее найденной* последовательности действий всех роботов группы, либо в отыскании такой последовательности и ее реализации в *процессе достижения* поставленной цели.

Задачу управления группой роботов, действия которых направлены на достижение общей групповой цели, будем называть задачей группового управления. Суть задачи группового управления заключается в отыскании и реализации таких действий каждого отдельного робота группы, которые приводили бы к оптимальному, с точки зрения некоторого группового критерия, достижению общей групповой цели.

Среди известных подходов к решению задачи группового управления роботами можно выделить два диаметрально противоположных подхода. В первом случае эта задача решается одним, сосредоточенным (центральный) устройством управления. Во втором случае решение осуществляется некоторым, распределенным по роботам группы устройством управления. В дальнейшем первый подход будем называть централизованным групповым управлением, а второй подход — децентрализованным групповым управлением.

Проблема группового управления роботами возникла практически сразу, как только первые роботы появились на производственных предприятиях. Действительно, применение роботов эффективно только в случае, если их много и они выполняют, по крайней мере, большинство технологических операций. При этом они должны работать согласовано друг с другом и с другим технологическим оборудованием.

Простейший случай группового управления в робототехнике — это управление системой приводов одного манипулятора с целью обеспечения заданных перемещений его рабочего органа. На первых порах здесь использовалось централизованное, разомкнутое управление приводами. С ростом требований к точности изменения положений рабочего органа чаще всего используется централизованное управление непосредственно по его координатам, т.е. манипулятор оснащается

соответствующими сенсорами. Управляющие воздействия на отдельные приводы рассчитываются, в этом случае, путем решения обратной задачи кинематики или динамики в зависимости от требуемого быстродействия манипулятора. В результате происходит переход к управлению «с ведущим», где роль последнего играет рабочий орган манипулятора (захват, звено с закрепленным инструментом и т. п.) [1–3].

С развитием адаптивного и интеллектуального управления роботами все более четко просматривается тенденция децентрализации за счет распределения между отдельными подсистемами робота или отдельными роботами группы задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, базы знаний и т. д., то есть тенденция применения методов распределенных вычислений и распределенного управления [4–8].

Следующая по сложности задача группового управления роботами — это координация их движения в пространстве. Простейший пример — предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Предельный случай — это работа манипуляторов на общем рабочем месте, например, в составе сборочного центра. В этом случае помимо обеспечения рабочих движений роботов система группового управления должна обеспечивать их безопасность, заключающуюся в исключении столкновений.

Более сложная задача группового управления — это обеспечение совместной работы нескольких манипуляторов с координацией их движений одновременно и в пространстве и во времени, т. е. координация производственных траекторий движения манипуляторов в реальном масштабе времени [1, 3]. Примером может быть операция сборки различных узлов путем механического соединения деталей, одновременно перемещаемых несколькими манипуляторами.

Далее, по сложности, следует задача группового управления гибкими производственными системами, где промышленные роботы функционируют совместно с различным технологическим оборудованием, транспортной и складской системами. Общая тенденция развития систем управления такими комплексами заключается в прогрессивном ослаблении централизованного начала и переходе к распределенным гибким производственным системам, состоящим из объединенных локальной сетью технологических модулей и функциональных модулей, выполняющих общесистемные функции. В таких системах может отсутствовать единое планирование и диспетчеризация, а последовательность изготовления каждого очередного изделия определяется в процессе выполнения технологических операций, исходя из текущей ситуации.

Наиболее сложная задача группового управления — это управление группой роботов в естественной неорганизованной среде (поверхность Земли или других планет, вода, воздух, космос) и, особенно, в условиях организованного противодействия со стороны объектов среды или других групп роботов (борьба двух или более групп).

Впервые проблема управления группой роботов была сформулирована известными российскими учеными Е. П. Поповым и Е. И. Юревичем в начале 80-х годов прошлого века [9, 10]. Приблизительно в то же время появились первые работы, посвященные ее решению. Здесь можно упомянуть работы И. М. Макарова [11] и Д. Е. Охочимского в области группового управления роботами-манипуляторами и И. А. Каляева — в области группового управления транспортными роботами [12–15].

В настоящее время проблема группового управления роботами принимает все более актуальное значение, что подтверждается большим числом исследований, проводимых в странах Западной Европы, США, Японии и России.

В России активные исследования в данной области ведутся научными коллективами в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша под руководством проф. Павловского В. Е. [16–23], в НИИ многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ под руководством члена-корреспондента РАН Каляева И. А. [24–32], на кафедре системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного технического университета под руководством проф. Куприянова В. Е. [33–37] и в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК под руководством проф. Юревича Е. И. [1–3], в Московском институте радиотехники, электроники и автоматики (МИРЭА) под руководством акад. РАН Макарова И. М. [38, 39]. Проблеме группового управления уделяется значительное внимание в работах ученых МГТУ им. Н. Э. Баумана [40, 41], Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения [42–45], а также ряда других научных организаций [46–49].

За рубежом исследования в области группового управления роботами проводятся, как правило, в рамках закрытых программ по созданию новейших образцов вооружений, финансируемых министерствами обороны соответствующих государств [50–52]. Однако существует тенденция возрастающей потребности использования групп роботов и в мирных целях.

Рассмотрим существующие в настоящее время системы группового управления роботами различного назначения, а также современные разработки, выполняемые проекты и научные исследования по данному направлению.

1.1.1. Управление группами роботов в стационарных условиях.

Примером исследований в области группового управления роботами может служить проект «MARTHA», который выполнялся в лаборатории Анализа системных архитектур Франции [53]. Целью данного проекта являлась разработка методов организации группового взаимодействия роботов (от 10 до 100 шт.), предназначенных для транспортировки грузов в складских терминалах. В проекте «MARTHA» используется централизованное управление группой роботов, при ко-

тором планирование действий каждого робота группы осуществляется одним центральным устройством управления.

Концепция проекта «MARTHA» заключается в следующем.

Система управления группой роботов состоит из двух основных частей: центральной станции (ЦС) и бортовых вычислителей (БВ) с контроллером связи (КС). Центральная станция устанавливается стационарно в командном центре и решает задачу планирования действий всей группы роботов. Кроме того, ЦС обеспечивает связь человека-оператора с каждым роботом группы в случае непредвиденных ситуаций, а также используется для постановки целевой задачи. На борту каждого робота устанавливается БВ, который предназначен для решения задачи маршрутизации его движения к указанной цели. Контроллер связи служит для обеспечения связи робота с центральной станцией и с другими роботами группы.

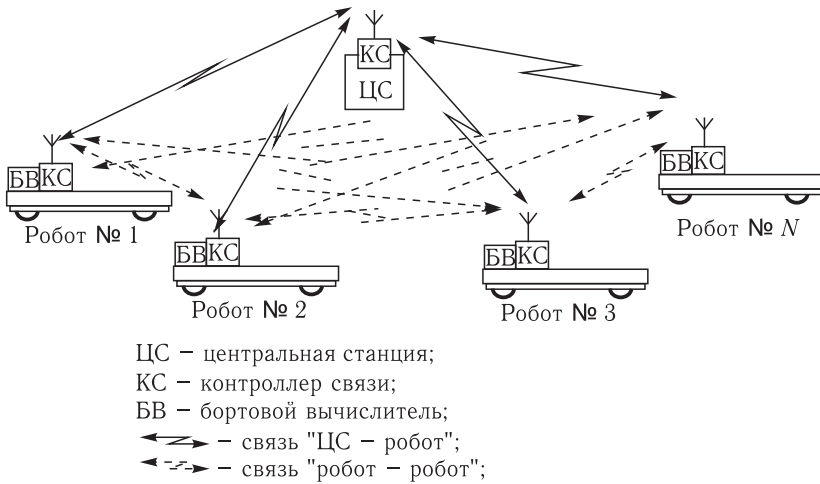


Рис. 1. Структура системы управления проекта «MARTHA»

Структура организации системы управления проекта «MARTHA» представлена на рис. 1.

Другим примером использования централизованного управления группой роботов или, что чаще встречается в зарубежной литературе, мультиробототехнической системы, является проект, выполнявшийся в Центре распределенных робототехнических систем Университета Миннесоты (США) при поддержке управления DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Министерства обороны США. Проект был связан с разработкой программного обеспечения и аппаратных средств системы управления группой миниатюрных роботов-разведчиков («Scout») (рис. 2), предназначенных для решения задач

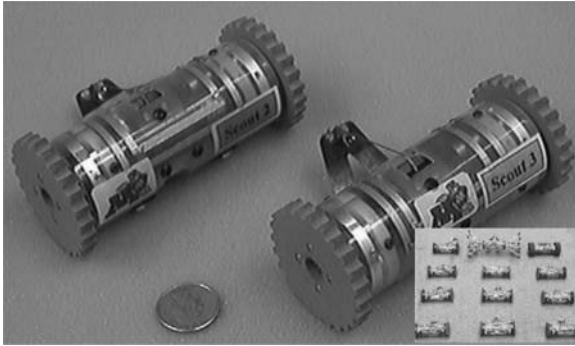


Рис. 2. Группа миниатюрных роботов-разведчиков

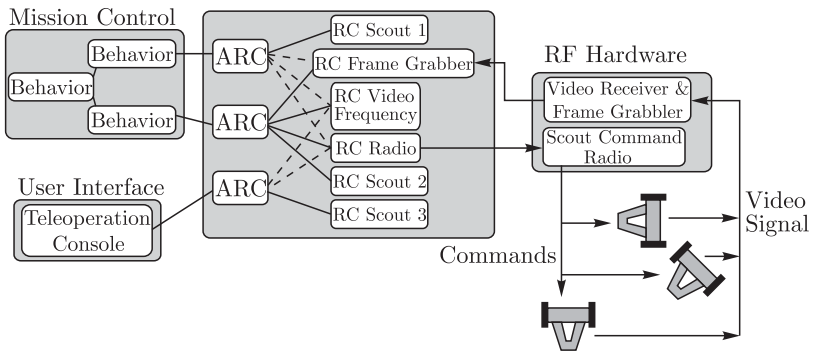


Рис. 3. Структура программного обеспечения управления группой миниатюрных роботов-разведчиков «Scout»

охраны, разведки и наблюдения за обстановкой в различных помещениях [54–56].

В этом проекте упор делается на разработку программного обеспечения, имеющего иерархическую распределенную организацию, представленную на рис.3, для центрального устройства управления на базе ПЭВМ, с помощью которого оператор может управлять роботами группы в супервизорном режиме.

Целью проекта «AMADEUS», предложенного японскими разработчиками [57], является создание группы роботов, обеспечивающих подвоз и вывоз изделий для конвейерных линий. Используются два типа роботов: транспортный робот (ТР), выполняющий непосредственную перевозку изделий, и стационарный погрузочный робот (СПР), расположенный в непосредственной близости от конвейерной линии и выполняющий разгрузочно-погрузочные работы с ТР на конвейер и наоборот. Имеется множество ТР и СПР. Транспортные роботы перемещаются от одного СПР к другому СПР по заданному маршруту. Движение осуществляется по одной направляющей линии в оба

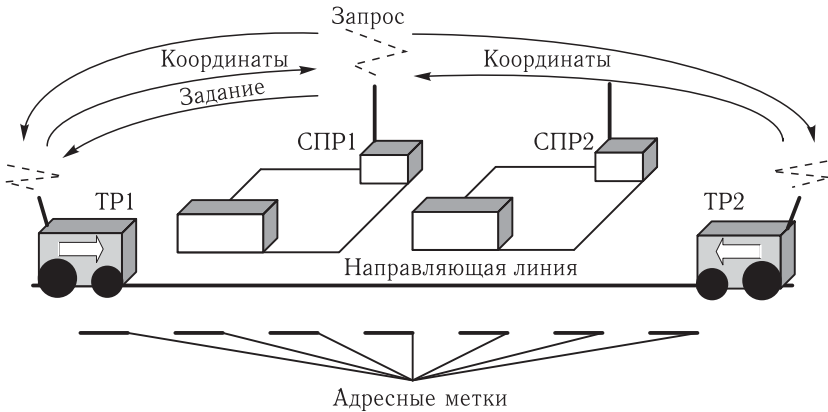


Рис. 4. Архитектура проекта «AMADEUS»

направления, однако, в случае возникновения препятствия (в виде человека, другого ТР или иного объекта), ТР должен сойти с линии и обойти препятствие. Когда возникает необходимость в подвозе или вывозе изделий с некоторой конвейерной линии, соответствующий СПР выдает запрос по каналам связи на все ТР. Свободные ТР отправляют в ответ свой идентификационный номер и текущие координаты. Свободный ТР определяется ближайшим СПР, который и передает этому ТР свое задание. Погрузочные роботы действуют независимо друг от друга в выборе того или иного ТР.

Архитектура проекта «AMADEUS» показана на рис. 4.

Основной отличительной особенностью проекта «AMADEUS» является то, что он построен на основе децентрализованного управления, при котором планирование действий роботов группы осуществляется несколькими устройствами. Действительно, в отличие от проекта «MARTHA», в проекте «AMADEUS» действия ТР планируют несколько СПР, каждый из которых выбирает из всего множества транспортных роботов (по определенным признакам) нужный ему и формирует для него необходимое задание на выполнение некоторого действия.

Описанные выше группы роботов предназначены для использования в стационарных, заранее подготовленных средах, что позволяет заранее найти всевозможные оптимальные варианты действий роботов группы, а в процессе функционирования воспроизводить соответствующие действия в зависимости от сложившейся ситуации [1–3, 58].

Проблема группового управления роботами существенно усложняется в случае функционирования роботов в заранее неизвестной и динамически изменяющейся среде, в которой могут действовать некоторые внешние силы, не зависящие от роботов группы.

1.1.2. Управление группами роботов в сложных нестационарных средах. Проблеме группового управления роботами, функцио-

нирующими в реальных заранее неизвестных средах, посвящен ряд исследований, проводимых в Японии и США. Здесь можно упомянуть следующие проекты.

В Японии работы в области систем группового взаимодействия роботов активно ведутся в университете г. Нагоя. Здесь разработана система DARS (Distributed Autonomous Robotic System), с помощью которой отрабатываются алгоритмы и методы планирования и управления скоординированными действиями группы роботов, функционирующих в естественной неорганизованной среде [59], из единого мобильного командного центра.

Управлением DARPA Министерства обороны США также финансировалась разработка тактических мобильных микророботов для группового применения в городских условиях, выполнявшаяся в рамках программы «Тактические мобильные робототехнические системы» [60]. Исследования были направлены на отработку командного взаимодействия группы, состоящей из людей и роботов. Система управления позволяет оператору управлять несколькими роботами из единого командного центра (переносного). Оператор задает цель для каждого робота, а роботы перемещаются к целям автономно. В группу входят роботы различного назначения, разновидности которых представлены на рис. 5.



Рис. 5. Группа тактических мобильных роботов

Исследования проводились несколькими научными центрами в рамках таких программ управления DARPA как Mobile Autonomous Robot Software (MARS) и Tactical Mobile Robots (TMR). В данном случае верхний, самый интеллектуальный уровень управления, на котором осуществляется декомпозиция общей целевой задачи на отдельные подзадачи, реализуется оператором, а роботы, управляемые в супервизорном режиме, только решают их, адаптируясь к условиям среды.

В Университете Карнеги-Меллона разработана система GRAMMPS (Generalized Robotic Autonomous Mobile Mission Planning System), предназначенная для решения задач планирования действий группы мобильных роботов в неструктурированных средах [61, 62]. Разработка финансировалась управлением DARPA. Система была успешно продемонстрирована на реальной местности, на паре автономных тележек.

Другим способом группового управления, применяемым для робототехнических систем, является управление «с ведущим» [1–3]. При использовании такого способа группового управления один из роботов является ведущим и управляется автономно или дистанционно опера-

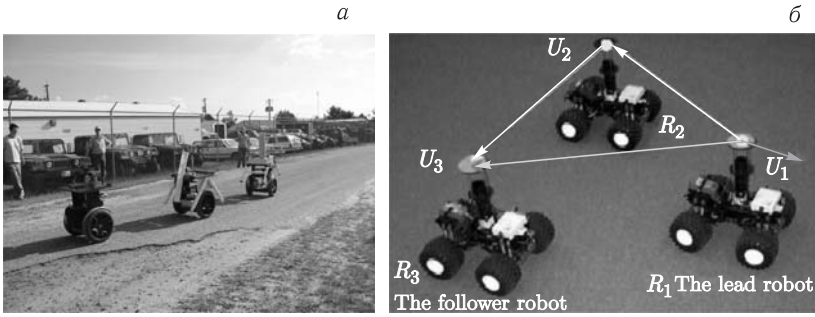


Рис. 6. Отработка методов управления «с ведущим» с использованием: а) роботов Segway RMP; б) роботов Clodbuster

тором, а остальные роботы — ведомые. Они управляются в режиме слежения за ведущим или командами, поступающими от ведущего робота. Способ группового управления «с ведущим» позволяет человеку-оператору, дистанционно управляя одним роботом (ведущим), фактически управлять целой группой роботов.

В США в данном направлении работает ряд университетов. Так, в Пенсильванском университете в рамках проекта MARS (Multiple Autonomous Robots) были разработаны методы управления движением группы мобильных роботов на основе локальной сенсорной информации в режиме «ведущий-ведомый» [63]. Система включает один ведущий робот и несколько ведомых роботов (рис. 6).

Методы отработывались с использованием двухколесных робототехнических мобильных платформ Segway RMP (см. рис. 6, а) и четырехколесных робототехнических платформ Clodbuster (см. рис. 6, б), а также Clodbuster-II и Clodbuster-III.

В частности, при выполнении проекта отработывались методы координации групп мобильных автономных роботов-агентов Clodbuster с использованием правил ближайшего соседства [64–66]. В основу этих правил положена теория связанных систем. Суть метода заключается в том, что роботы определяют свои действия по действиям, выполняемым соседями. Например, если в группе есть ведущий, который движется по запланированной траектории, то и все остальные роботы группы будут выполнять те же движения, что и ведущий.

В Центре распределенных робототехнических систем Университета Миннесоты проводились исследования по управлению группой роботов, предназначенной для решения задач охраны и наблюдения (рис. 7) [67, 68]. Группа является неоднородной и состоит из большого мобильного робота, называемого «Ranger», и нескольких миниатюрных роботов, снабженных различными сенсорными устройствами и называемых «Scout» (разведчик). Робот «Ranger» предназначен для транспортировки, развертывания и наблюдения за роботами-разведчиками.

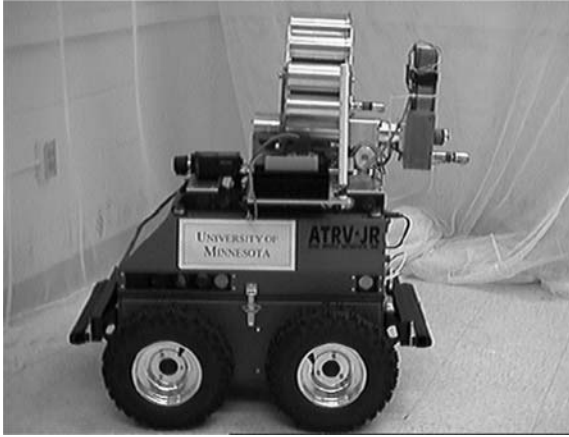


Рис. 7. Робот «Ranger», управляющий группой роботов-разведчиков «Scout»

При этом, если робот «Ranger» может функционировать автономно, то роботы-разведчики не являются автономными, а управляются командами, поступающими от робота «Ranger», бортовая система управления которого на основании информации о текущей ситуации определяет ту или иную стратегию поведения роботов-разведчиков.

Следующее направление исследований составляют проекты, направленные на разработку полностью распределенных мобильных мульти-робототехнических систем, управляемых децентрализованно.

В Японии, в университете г. Нагоя проводились исследования, связанные с разработкой алгоритмов и методов организации стайного поведения группы роботов, функционирующих в естественной неорганизованной среде [69]. Идея подхода заключается в том, что каждый робот группы может выполнять, например, одну из двух работ и в процессе функционирования может менять ее на другую. Первоначально роботы выбирают себе работы произвольно. Периодически, в определенные моменты времени, обмениваясь информацией с ближайшими соседями, роботы принимают решение о продолжении выполнения выбранной ими работы или о ее изменении. Если большинство ближайших соседей выполняют ту же работу, что и данный робот, он продолжает ее выполнение, если — другую работу, то робот принимает решение об изменении своей работы.

В основу организации управления группами роботов и других технических объектов могут быть положены принципы и модели, взятые из живой природы и социальной жизни [70–76].

Например, в Калифорнийском технологическом институте (Пасадена, США) разрабатывались методы планирования скоординированных действий группы роботов, предназначенных для обеспечения безопасности охраняемых объектов и предотвращения несанкционированных

вторжений [77]. Поведение группы роботов напоминало поведение стаи зверей во время охоты. Если какой-либо из роботов группы обнаруживал подозрительный объект, то сообщал об этом другим роботам и направлялся к этому объекту. Остальные роботы также направлялись к объекту, рассредоточиваясь, окружая и сопровождая его. Координация действий в группе заключалась в определении вектора движения каждого робота на основании информации о текущем положении и параметрах движения объекта-цели и других роботов группы.

В настоящее время в США разработке методов организации управления группами роботов на основе распределенного 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. Ключевыми задачами этих исследований являются: создание алгоритмов управления, организация коммуникационных и вычислительных сетей, а также разработка вычислительных технологий, обеспечивающих объединение малых ресурсов роботов, особенно микроботов, для совместного решения крупномасштабных задач.

В Пенсильванском Университете в рамках программы Управления DARPA «Боевые системы будущего» выполняется проект «Adaptive Autonomous Robot Teams for Situational Awareness» («Адаптивные автономные группы роботов для распознавания ситуации»), направленный на разработку технологий для реализации коммуникационных и вычислительных систем с целью организации взаимодействия и обеспечения функционирования небольших групп роботов как единого целого [78, 79]. Такие группы предназначены для информационного обеспечения бойцов сухопутных подразделений армии.

В Технологическом институте штата Джорджия (США), в Лаборатории мобильных роботов колледжа вычислительной техники, возглавляемой профессором Рональдом Аркиным, а также в Лаборатории робототехники Университета Южной Калифорнии (США) в рамках программы MARS-2020 проводятся исследования, связанные с разработкой методов организации распределенных систем управления поведением групп роботов, функционирующих в естественной заранее неизвестной среде. В частности, разрабатываются методы организации взаимодействия групп роботов при решении задач обследования помещений и территорий, методы формирования стратегий поведения групп роботов, отрабатываются сетевые технологии связи в группах роботов [80]. Исследования основываются на применении технологий мультиагентных систем [80–89].

Основные исследования ведутся с использованием групп роботов, решающих задачу «фуражирования», в основу которой положена модель пищевого поведения стайных живых организмов: птиц, пчел, муравьев и др. [89–92]. При этом используется поведенчески-базисный

подход, реализующий принципы ситуационного управления [93]. Идея подхода основывается на использовании методов управления, которые базируются на наборах различных типов поведения [83, 94–98]. Другими словами, для каждого робота заранее определено несколько типов поведения, которые он использует в зависимости от ситуации.

В Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (США) специалисты работают над созданием воздушных и наземных роботов военного назначения, связанных друг с другом и с центром управления беспроводной сетью. Проект получил сложное название «Интеллектуальная мультимедийная сеть автономных мобильных агентов» (Multimedia Intelligent Network of Unattended Mobile Agents или «Minuteman»). В результате ВМФ США рассчитывает получить новую разведывательную систему, способную работать в самой сложной боевой обстановке.

В Исследовательской лаборатории робототехнических систем Университета Южной Калифорнии выполняются два взаимосвязанных проекта, направленных на разработку методов организации взаимодействия в мультиробототехнических системах: «Распределение задач в мультиробототехнических системах через цепочку вакансий» и «Пространственно-временная организация в мультиробототехнических системах».

Первый проект направлен на разработку и исследование децентрализованных алгоритмов распределения целевых задач, основанных на обучении. Эти алгоритмы должны обеспечить комплексное управление группой динамических мультиробототехнических систем в процессе достижения ими общей цели. Комплексное управление заключается в том, что общая групповая задача разбивается на подзадачи, каждая из которых может решаться неоднократно в связи с другими подзадачами. Для решения некоторой подзадачи может назначаться несколько роботов. С этой целью создаются списки «вакансий» для решения каждой подзадачи. «Вакансии» заполняются теми роботами, которые имеют больше возможностей для решения соответствующей задачи. В процессе функционирования группы оценивается вклад каждого робота в решение общей задачи [99, 100].

Второй проект предусматривает развитие общих адаптивных возможностей мультиробототехнических систем, расширяющих области их применения и увеличивающих их автономность. В этом проекте используются методы закрепляющего обучения, чтобы обеспечить роботам возможность динамической корректировки поведения и адаптации к любым заданным средам при выполнении множества задач. Возможности подхода демонстрируются на примере задачи транспортировки грузов [101].

Интересный подход к проблеме организации взаимодействия в группах роботов развивается в Институте Робототехники Университета Карнеги–Меллона. Для координации действий в мультиробототехнических системах, решающих задачу обследования и картографирования местности, здесь предложено использовать методы свободной

рыночной экономики [102–107]. В общем случае рыночная экономика подразумевает децентрализованное управление, обеспечивающее высокую эффективность фирм, предприятий и т. п., поэтому аналогичный подход был применен к группе роботов, выполняющих распределенные задачи сбора информации в среде с известной инфраструктурой [104, 108, 109]. Роботы в группе взаимодействуют на основе законов рыночной экономики, причем высокая общая производительность группы обеспечивается путем максимизации каждым роботом собственного вклада. Это достигается тем, что роботы периодически, используя ту или иную стратегию (случайную, «жадную», квадродерево и др.), формируют списки целевых задач, каждая из которых определенным образом оценивается. Из своего списка каждый робот выбирает одну наиболее выгодную для себя целевую задачу, а остальные выставляет на аукцион для продажи другим роботам. Если для какого-либо робота задача, выставленная другим роботом, оказывается более выгодной по сравнению с той, которую он выбрал ранее, то он может приобрести ее, заплатив соответствующую цену, а ранее выбранную выставить на аукцион.

Группе роботов придается центральное управляющее устройство (ЦУУ), роль которого заключается в обеспечении интерфейса между группой роботов и человеком-оператором. Таких устройств может быть несколько.

Основная цель роботов группы — получить максимальную прибыль [107]. Доход отдельным роботам группы за предоставляемую ими информацию о среде выплачивается ЦУУ, представляющим интересы человека-пользователя. Могут учитываться различные затраты: временные, энергетические, связи, вычислительные и т. д. Прибыль рассчитывается как доход минус затраты. Значение дохода умножается на некоторый коэффициент, определяемый значением минимально допустимых затрат на получение единицы информации, при которых



Рис. 8. Группа роботов, предназначенная для решения задач сбора информации и картографирования местности

получение этой информации является еще выгодным. Каждый робот группы пытается максимизировать количество получаемой им новой информации и минимизировать собственные затраты.

Таким образом, действуя в своих личных целях, как и предприниматели в условиях рыночной экономики, отдельные роботы группы максимизируют информацию, получаемую всей группой, и минимизируют используемые группой ресурсы. Группа роботов, предназначенная для решения задач сбора информации и картографирования местности, представлена на рис. 8.

1.1.3. Управление группами роботов в условиях противодействия. Хорошей моделью для отработки методов и алгоритмов группового управления роботами в условиях противодействия может служить игра двух команд роботов в футбол, которая в первоначальном виде предназначалась для чисто исследовательских целей. Однако данное направление получило такую широкую популярность среди ее разработчиков, что в конечном итоге переросло в новый вид интеллектуального спорта, именуемый как «игра роботов в футбол» [16, 17, 19–21, 109–119].

В настоящее время проводятся ежегодные международные соревнования по футболу роботов под эгидой RoboCup Federation (федерация кубка робота) [109–117]. Соревнования проходят по двум основным категориям: программные и аппаратные модели.

В категории «программные модели» игра проходит на программном уровне, на базе сервера. Сервер формирует виртуальное поле, арбитра, моделирует перемещение игроков и мяча по полю, обеспечивает связь между игроками одной команды и выводит изображение на экран монитора. Роботы-игроки представляют собой клиентские программы, которые могут планировать действие как одного, так и нескольких

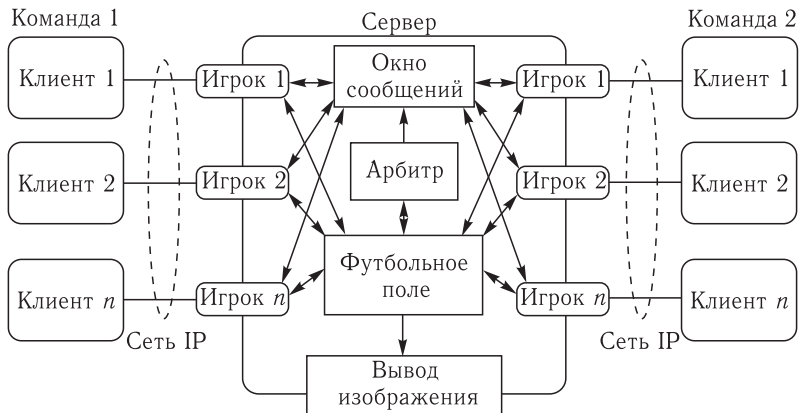


Рис. 9. Структура организации игры роботов в футбол в категории «программные модели», проводимой федерацией «RoboCup»



Рис. 10. Вид поля и игроков в лиге «программные модели»

игроков одной команды на отдельном компьютере, подключаемом к серверу через сетевой IP протокол. Структура организации игры роботов в футбол в категории программных моделей показана на рис. 9, а изображение поля и игроков — на рис. 10.

Категория «аппаратные модели», в свою очередь, разбита на три подкатегории — лиги малых (Small Size Robot League), средних (Middle Size Robot League) и шагающих роботов (Sony Legged Robot League), а в последнее время появилась новая лига — гуманоидных (человекоподобных) (Humanoid Robot League) роботов.

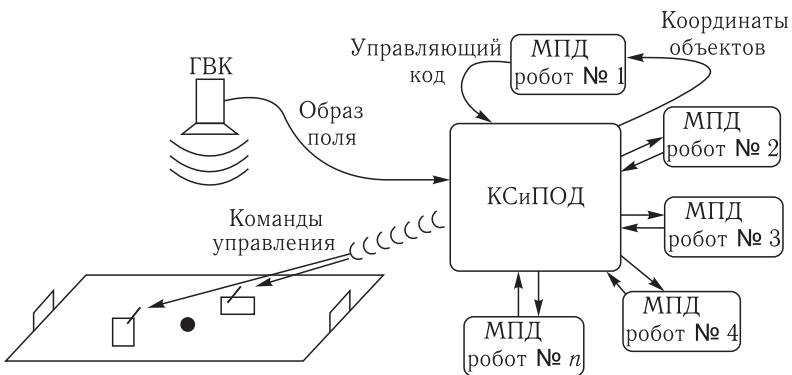


Рис. 11. Структура организации игры роботов в футбол в категории «аппаратные модели малых роботов», проводимой федерацией «RoboCup»



Рис. 12. Внешний вид игрового поля и роботов-футболистов в лиге малых роботов



Рис. 13. Внешний вид игрового поля и роботов-футболистов в лиге средних роботов

При проведении соревнований в лиге аппаратных моделей малых роботов для управления ими применяется система, структура которой показана на рис. 11. Структура состоит из глобальной видеокамеры (ГВК), расположенной над полем, контроллера связи и предварительной обработки данных (КСИПОД) [120] и нескольких модулей планирования действий (МПД), каждый из которых соответствует одному из игроков команды.

Внешний вид поля и роботов-футболистов в лиге малых роботов представлен на рис. 12.

В лиге среднеразмерных роботов играют роботы размером примерно 50×50 см, на базе колесных шасси (рис. 13). Роботы оснащены бортовыми компьютерами, а также имеют собственную систему технического зрения с управляемой подвижной телекамерой. Такие

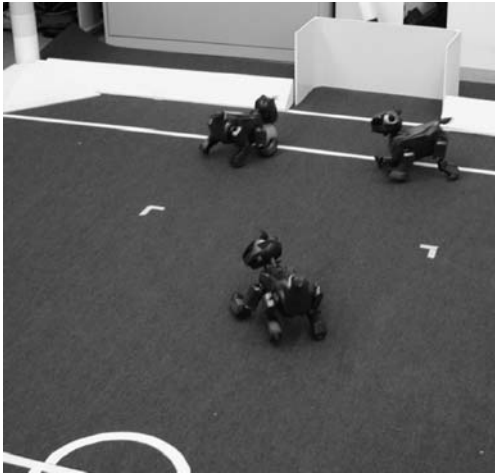


Рис. 14. Внешний вид игрового поля и роботов-футболистов в лиге Sony Legged Robot League

роботы обладают достаточно высоким уровнем интеллекта и являются практически полностью автономными.

В лиге Sony Legged Robot League играют четырехногие шагающие роботы японской фирмы Sony (рис. 14). Они являются полностью автономными и оснащены миниатюрной цветной телекамерой. В данном случае отрабатываются не только методы группового взаимодействия, но и методы управления движением сложных объектов в условиях динамически изменяющейся ситуации [113] и противодействия.

1.1.4. Управление большими группами роботов. Приведенные выше разработки и используемые в них подходы ориентированы на решение задач управления сравнительно небольшими группами роботов, численность которых не превышает 2–10 единиц. Однако для решения некоторых задач, таких как обследование больших территорий, зданий и сооружений, патрулирование и охрана крупных объектов, нанесение массированного удара по противнику и т. п., требуется применение больших групп роботов, насчитывающих сотни и даже тысячи единиц.

Задача управления большими группами роботов в условиях динамических сред значительно сложнее, чем задача управления небольшими группами роботов, и для ее решения нужны иные подходы. Особенно это важно для больших групп мини- и микророботов, функциональные возможности и вычислительные ресурсы каждого из которых весьма ограничены.

В настоящее время исследования по этой проблеме проводятся несколькими научными центрами США, в частности, Исследовательской лабораторией робототехнических систем Университета Южной Калифорнии и Лабораторией распределенного интеллекта Универси-