

17. Охоцимский Д.Е., Мартыненко Ю.Г. Новые задачи динамики и управления движением мобильных колесных роботов // Успехи механики. 2003. №1. С.3–46.
18. Мартыненко Ю.Г. Проблемы управления и динамики мобильных роботов // Новости искусственного интеллекта. 2002. №4 (52). С.18–23.
19. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. – М.: Физматлит, 1994. – 368 с. (См. также Gorinevsky D.M., Formal'sky A.M., Schneider A.Yu. Force control of robotics systems. CRC Press, Boca Raton, New York, 1997, 350 p.)
20. Гришин А. А., Ленский А. В., Охоцимский Д. Е., Панин Д. А., Формальский А. М. О синтезе управления неустойчивым объектом. Перевернутый маятник // Изв. РАН. ТиСУ. 2002. № 5. С. 14–24.
21. Мартыненко Ю.Г., Формальский А. М. К теории управления моноциклом // ПММ, 2005. Т. 69. Вып. 4. С. 569–583.
22. Формальский А. М. Управляемость и устойчивость систем с ограниченными ресурсами. – М.: Наука, 1974 – 368 с.
23. Безнос А.В., Гришин А.А., Ленский А.В., Охоцимский Д.Е., Формальский А.М. Маятник, управляемый при помощи маховика // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 6. С.743–749.
24. Белотелов В.Н., Жихарев Д.Н., Кожанов А.А., Пахомов В.Б. Футбол роботов // Материалы научной школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». М. 2005. С.154–157
25. Ленский А. В., Мартыненко Ю.Г., Окунев Ю. М. Концепция «интеллектуального спорта» как новая образовательная технология в механике управляемого движения // Международная конференция «Четвертые Окуневские чтения». СПб. 2004. С.52–53.

УДК 004.89.004.3

**В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов, И.Б. Гарцеев, П.Э. Трипольский,
Р.И. Александрова, Д.В. Евстигнеев, О.А. Антипов, С.В. Епишин**

*Московский государственный институт радиотехники, электроники и
автоматики (технический университет), г. Москва*

АВТОНОМНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ МИНИ-РОБОТ

Мобильные роботы уже не одно десятилетие успешно применяются в различных областях человеческой жизнедеятельности. Наибольший опыт их разработки и использования накоплен в сфере автоматизированного промышленного производства. Задачи, стоящие перед мобильными роботами в этой области, характеризуются в первую очередь высокой степенью детерминированности среды функционирования. Это позволило добиться значительной автономности мобильных роботов, которые функционируют в условиях фактически безлюдных технологий. Однако существует целый ряд задач, существенно отличных от производственных, в которых применение мобильных роботов является чрезвычайно актуальным. Это такие задачи, как:

1. Поиск, обнаружение и эвакуация грузов и оборудования в труднодоступных условиях.
2. Целевая доставка грузов и оборудования в труднодоступных условиях.
3. Обезвреживание взрывоопасных предметов.
4. Сбор и доставка разведывательной информации.
5. Мониторинг текущей обстановки и окружающей среды.
6. Картографирование местности.
7. Выполнение непосредственных боевых задач.

Актуальность указанных задач обусловлена важнейшими факторами, которые можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся факторы жизни, здоровья и безопасности человека, такие как работа во взрывоопасных условиях, в химически или радиационно-агрессивной среде, при высоких или низких температурах, в условиях боевых действий и т.д. Вторая группа факторов связана с практической невыполнимостью человеком тех или иных задач из-за естественной ограниченности его физических возможностей.

Перечисленные задачи характеризуются в первую очередь слабой детерминированностью условий, в которых функционирует мобильный робот. В связи с этим большинство разработанных и успешно функционирующих до настоящего времени мобильных роботов для данных задач являются дистанционно управляемыми, т.е. предполагают участие человека в процессе управления. Дистанционная управляемость предполагает наличие постоянного двустороннего канала связи с роботом, причем во многих случаях для обеспечения адекватного управления этот канал должен обладать высокими техническими характеристиками быстродействия, дальности, пропускной способности и надежности. Поддержка такого канала далеко не всегда возможна как по техническим причинам, так и по соображениям информационной безопасности. В любом случае дистанционное управление существенно ограничивает круг возможных решаемых мобильным роботом задач и помимо этого вносит в процесс решения человеческий фактор. Сказанное однозначно свидетельствует в пользу необходимости разработки полностью автономных мобильных роботов для функционирования в слабо детерминированных условиях. В свою очередь возможности для таких разработок сегодня обеспечены значительным прогрессом в развитии промышленных и информационных технологий.

В последнее время разработки автономных мобильных роботов успешно ведутся главным образом зарубежом. Подавляющее большинство этих устройств предназначены для военных целей и работ по ликвидации последствий аварий и катастроф. Примерами таких разработок являются:

MPRS/URBOT (Man Portable Robotic System) (Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, USA) - малогабаритная переносная Мобильная робототехническая система. Основные технические характеристики:

- ◆ длина – около 0.8 м;
- ◆ масса – около 40 кг (с аккумуляторами);
- ◆ скорость – до 25 км/час

Состав бортового оборудования включает ультразвуковые и инфракрасные датчики обнаружения препятствий, бортовую телекамеру, аппаратуру приема/передачи данных по радиоканалу и автономную систему управления.

Dragon Runner (Marine Corps Warfighting Lab, USA) – экспериментальный прототип дистанционно-управляемого мобильного колесного мини-робота для спецподразделений морской пехоты США. Оснащен средствами радиосвязи, сенсорами, датчиками и несколькими видеокамерами спереди и по бокам. Обладает высокой удароустойчивостью. Основные технические характеристики:

- ◆ дальность действия – 500 м;
- ◆ максимальная скорость – до 30 км/час;
- ◆ масса – около 7 кг;

RATLER (Robotic All Terrain Lunar Exploration Rover) (Sandia National Laboratories, USA) – прототип мобильного робота для исследования Луны. Универсальная конструкция шасси с продольным разделением на два гусеничных модуля обеспечивает высокую проходимость и положена в основу одноименного ряда ма-

логабаритных мобильных роботов военного назначения, типоразмеры которых варьируются по длине в диапазоне 20 – 90 см.

SandDragon (*Sandia National Laboratories, USA*) – дистанционно-управляемый малогабаритный переносной наземный мобильный робот наблюдения и разведки. Максимальная скорость составляет приблизительно 7,2 км/час, вес без аккумуляторных батарей – 13,6 кг, штатный комплект батарей типа *NiMH BB-390A/U* (1,5 А ч, 36 В): – 2, 3, 4 или 6 шт., вес батареи – 1,75 кг, средняя продолжительность работы – 5 ч при скорости 3,2 км/ч или 12 ч в неподвижном состоянии при включенной бортовой электронике, максимальная полезная нагрузка – от 18 до 36 кг в зависимости от условий работы, дальность управления по радио- и оптоволоконному каналу – 1 км и 100 м соответственно.

Характерной особенностью задач применения автономных мобильных роботов является наличие значительных факторов неопределенности, возникающих в процессе их функционирования. Среди этих факторов наиболее существенными являются:

1. Неопределенность постановки задачи и целеуказания.
2. Изменяемость параметров и идентификационных признаков целей.
3. Погрешности измерений физических параметров окружающей среды, пространственно-габаритных параметров препятствий и целей.
4. Априорная неопределенность диапазонов и скоростей изменений параметров среды функционирования.

Наличие таких неопределенностей обуславливает необходимость использования интеллектуальных технологий в системе управления автономным мобильным роботом.

Анализ задач и условий функционирования автономных мобильных роботов и обзор примеров разработок таких устройств позволяет сделать следующий принципиальный вывод: при большом разнообразии конструктивных и массогабаритных характеристик мобильных роботов функциональные требования, предъявляемые к их системам управления, схожи и определяются, с одной стороны, ключевыми характеристиками всех наземных мобильных роботов как объектов управления и, с другой стороны, специфическими особенностями, присущими всем вышеперечисленным задачам. Среди этих функциональных требований важнейшими являются следующие:

1. Автономное планирование поведения, связанное с перемещением в среде с препятствиями, обнаружением и достижением целевых точек перемещения и возвратом в исходную точку.
2. Локальная навигация для определения текущего положения робота и обеспечения возможности возврата в исходную точку
3. Детектирование и классификация внешних объектов, определение их геометрических характеристик и расстояний до них.
4. Управление исполнительными устройствами, в первую очередь двигателями постоянного тока и шаговыми двигателями в условиях широкого диапазона возможных нагрузок.
5. Возможность функционирования в широком диапазоне параметров окружающей среды.
6. Возможность получения аудиовизуальной и телеметрической информации об окружающей среде в любых условиях функционирования, в том числе с ограниченной видимостью.
7. Обработка и долговременное энергонезависимое хранение информации с датчиков, в первую очередь видеоинформации.

8. Обеспечение связи с внешним управляющим устройством в исходной точке, конечной точке и резервной связи в процессе работы.
9. Максимизация времени автономного функционирования без восстановления энергозапаса.

Анализ функциональных требований позволяет сформулировать ряд технических требований к системе управления автономным мобильным роботом, таких как:

1. Построение системы управления по распределенному принципу с использованием как универсальных, так и специализированных вычислительных средств.
2. Наличие мощной бортовой вычислительной подсистемы, способной решать два класса ресурсозатратных задач:
3. универсальные алгоритмические вычисления;
4. обработка больших параллельных информационных потоков.
5. Наличие системы локальной навигации, не связанной с датчиками, расположенными непосредственно на приводах движения.
6. Наличие многокамерной или подвижной системы технического зрения, способной работать в условиях пониженной освещенности.
7. Наличие системы автономного электропитания, обеспечивающей максимальное время функционирования при минимальных массогабаритных параметрах и с возможностью оперативного восстановления.
8. Минимизация энергопотребления всех систем и узлов.
9. Наличие проводных или беспроводных каналов связи с умеренными требованиями по быстродействию и пропускной способности.
10. Высокая нагрузочная способность силовых элементов управления исполнительными устройствами с минимизацией энергетических потерь.
11. Использование в системе компонентов, отвечающих жестким требованиям по внешним условиям функционирования: температуре, давлению, влажности, вибростойкости и т.д.

Указанные требования послужили основой разработки на кафедре «Проблемы управления» МИРЭА автономного мобильного мини-робота (АММР). АММР построен на базе колесной полноприводной платформы, оснащен системой управления, включающей мощный бортовой вычислитель, системой технического зрения и лазерной дальнометрии. Технические характеристики АММР представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики АММР

Параметр	Значение
Длина x Ширина x Высота	240 x 160 x 110 мм
Эффективное расстояние между колес	130 мм
Радиус колеса	35 мм
Максимальная линейная скорость движения	1.3 м/с
Максимальная скорость поворота	6 рад/с
Суммарный ток потребления при линейном движении	0.3 А
Суммарный ток потребления при поворотном движении	1 А
Суммарный пусковой ток	3 А
Напряжение питания	6 В
Время непрерывной работы	2.5 часа

Ключевой особенностью системы управления этого мобильного робота является использование интеллектуальных технологий, в первую очередь на стратегическом уровне управления для решения задач планирования поведения, что коренным образом отличает автономный мобильный робот от дистанционно управляемого. Интеллектуальная система управления АММР позволяет решать следующие задачи:

- ◆ автономное движение по заданному маршруту;
- ◆ автономное или дистанционно-управляемое движение с составлением карты местности на пути движения;
- ◆ автономное или дистанционно-управляемое движение с фотографированием участков местности, сохранением фотографий в памяти и отображением соответствующих точек на построенной карте местности;
- ◆ перемещение в заданную точку карты и выполнение фотографирования, выгрузки или загрузки контейнера;
- ◆ автономное поисковое движение с формированием карты по пути следования и фотографированием, с последующим возвращением в точку старта.

В целом система управления АММР состоит из бортового комплекса и удаленного терминала, связь с которым осуществляется по радиоканалу. Структура бортового комплекса аппаратных средств интеллектуальной системы управления АММР представлена на рисунке 1.

Бортовой комплекс системы управления представляет собой иерархическую многопроцессорную систему, верхний уровень которой (бортовой вычислитель) реализован с помощью встраиваемого вычислительного устройства на базе микропроцессора Intel PXA-255. Контроллер беспроводного интерфейса Ethernet подключается к бортовому вычислителю через интерфейс Compact Flash. Через второй такой же интерфейс к бортовому вычислителю может быть опционально подключен навигационный модуль GPS.

Ориентирование АММР в пространстве осуществляется по информации, поступающей от системы технического зрения. Эта система обеспечивает выполнение следующих функций:

- ◆ обработка изображений с бортовой телекамеры;
- ◆ распознавание объектов внешней среды;
- ◆ определение параметров удаленности объектов внешней среды и автоматическое формирование локальной карты расположения препятствий.

Система бортового технического зрения включает в себя два основных модуля:

- ◆ модуль получения изображения, включающий в свой состав малогабаритную цифровую телевизионную камеру, систему освещения рабочей зоны АММР на базе импульсной лампы и систему подсветки рабочей сцены на базе полупроводникового лазера;
- ◆ модуль ввода и хранения изображения, осуществляющий ввод одного кадра изображения с телевизионной камеры и хранение этого кадра.

Нижний уровень бортового комплекса системы управления разработан на основе микроконтроллера (однокристалльной микро ЭВМ) P89C662. В иерархии бортовой вычислитель—микроконтроллер последний является подчиненным. Команды управления работой микроконтроллера поступают от бортового вычислителя в последовательном коде через интерфейс RS-232. Этот же интерфейс используется для передачи от бортового вычислителя программных координат углов поворота и скорости вращения электродвигателей, а также команд управления освещением и подсветкой рабочей сцены. Так как объем информации, поступающей от телевизионной камеры (и соответственно хранящийся в модуле ввода и хранения изобра-

жения) большой, то для ее передачи на бортовой вычислитель использован высокоскоростной 8-разрядный параллельный интерфейс. Аналогичный интерфейс использован для управления режимами работы телевизионной камеры.



Рис.1. Структурная схема комплекса аппаратных средств ИСУ АММР

Система построения локальной карты местности решает задачи построения карты расположения препятствий непосредственно вокруг АММР. Для этого видеоизображение, получаемое с бортовых телекамер, обрабатывается с помощью детектора лазерного луча. Используя информацию о перемещении робота, данная система дискретно передвигает локальную карту в невидимую с телекамеры зону, формируя локальную карту препятствий в невидимой зоне. Пример работы системы построения локальной карты местности приведен на рисунке 2.

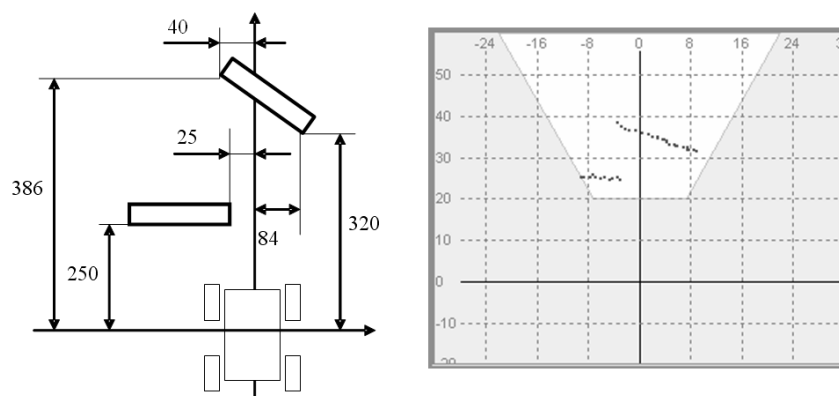


Рис.2. Построение локальной карты местности: а) схематический вид сцены; б) локальная карта местности, полученная бортовой системой технического зрения

Система построения глобальной карты решает задачи навигационной привязки местоположения робота. Разделение карты на локальную и глобальную обусловлено с одной стороны наличием «мертвых зон» системы технического зрения, что позволяет строить точную карту препятствий только в локальной области, а с другой стороны существенной неопределенностью глобальных координат АММР из-за накапливаемой ошибки. Эти причины обуславливают значительную разницу в алгоритмах работы систем построения локальной и глобальной карт местности. Система построения глобальной карты местности работает в двух режимах: в режиме формирования карты и в режиме движения по карте. Пример работы системы построения глобальной карты местности в режиме формирования карты приведен на рисунке 3.

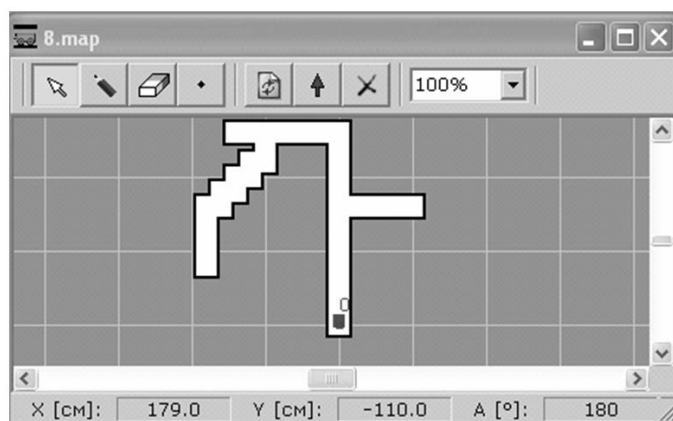


Рис.3. Работа системы построения глобальной карты местности

Удаленный терминал системы управления АММР при работе мобильного робота на открытой местности позволяет осуществлять дистанционное управление и постоянный контроль параметров движения АММР, в том числе отображение текущей информации с видеокамер, загрузку текущей локальной и глобальной карты. При полностью автономной работе АММР удаленный терминал используется для формирования задания роботу и получения информации о выполненном задании, которая до возврата в исходную точку сохраняется бортовой системой управления.

Следует отметить, что значительная часть аппаратных средств системы управления АММР построена с использованием зарубежной элементной базы. Принципиальная возможность построения подобного робота на основе отечественной элементной базы существует, однако аппаратная реализация такой системы значительно усложнится, а габаритные размеры АММР возрастут.