

Шилов Максим Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность 05.13.06: Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (сфера услуг).

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Леонтьев Александр Георгиевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

кандидат технических наук,
доцент

Ведущая организация - Открытое акционерное общество «Концерн «Научно-производственное объединение «Аврора».

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.21 ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» по адресу:

_____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета _____

Редько С.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время возрос интерес к мобильным мехатронным системам, что связано как с практической необходимостью использования таких систем для целей проведения работ в средах, недоступных для человека, так и с необходимостью изучения интеллектуальных способностей технических систем. Мобильные мехатронные системы (мобильные роботы) начинают использоваться с целью диагностики неисправностей протяжённых и высотных объектов, мониторинга окружающей среды, поиска объектов в труднодоступных местах, доставки грузов на производствах и т.д.

Большинство существующих систем, функционирующих в условиях существенной неопределённости и динамичности окружающей среды, работают под управлением оператора по каналу связи и не способны действовать самостоятельно. Такие факторы, как ограниченный радиус действия и ненадёжность канала связи, время реакции и утомляемость оператора в сочетании с динамичностью и неопределённостью окружающей среды требуют решений, обеспечивающих повышение автономности функционирования мобильных систем.

В настоящее время разрабатываются системы управления, обеспечивающие автономное выполнение ограниченного набора операций и ряда предопределённых сценариев, однако, как правило, это существенно детерминированные действия, а их реализация ориентирована на высокопроизводительные вычислительные платформы. Тенденции развития таких систем отражают целесообразность их реализации на встраиваемых платформах, обеспечивающих возможность распределённого управления и имеющих, наряду с малыми габаритными размерами, высокой надёжностью и низкой стоимостью, ограничения по вычислительным ресурсам. Для реализации на таких платформах перспективных подходов к построению адаптивных систем необходима разработка алгоритмов адаптивного поведения и управления объектом с учётом вычислительной производительности встраиваемых приложений.

Вопросы построения интеллектуальных систем управления отражены в работах акад. Макарова И.М., проф. Юревича Е.И., проф. Кемурджиана А.Л., проф. Ющенко А.С., проф. Бурдакова С.Ф., проф. Терехова В.А., проф. Колесникова А.А. и др.

Актуальность решаемых в диссертационной работе проблем обусловлена необходимостью повышения автономности мобильных технических объектов и потребностью совершенствования методологии проектирования соответствующих систем. В данной работе рассматриваются методологические подходы к решению проблемы построения систем управления передвижением автономных мобильных технических объектов, позволяющих реализовать алгоритмическое обеспечение планирования поведения мобильного объекта на встраиваемой платформе.

Тематика диссертационной работы согласуется с приоритетными направлениями науки и техники, утверждёнными Правительственной комиссией РФ по научно-технической политике (направление «Фундаментальные исследования», раздел «Информационная, вычислительная

техника, автоматизация»)), а также с планами работ по грантам правительства Санкт-Петербурга (раздел «Технические науки», направление «Автоматика, телемеханика. Вычислительная техника», «Робототехника»).

Цель диссертационной работы заключается в создании структуры, методики и инструментальных средств проектирования интеллектуальных систем управления передвижением мобильных технических объектов, обеспечивающих повышение степени их автономности и качества управления в условиях частичной неопределённости среды функционирования.

Задачи, решаемые в диссертационной работе.

1. Разработка иерархической структуры системы адаптивного управления на основе алгоритмов интеллектуальной обработки данных, обеспечивающей возможность модульного построения систем, и реализуемость на встраиваемых вычислительных платформах.
2. Определение подходов для реализации каждого уровня иерархии управления и их модификация, обеспечивающая физическую реализуемость движений.
3. Реализация разрабатываемых подходов на современных встраиваемых вычислительных средствах и оценка требований к производительности вычислительной системы.
4. Разработка методики проектирования интеллектуальных систем управления передвижением мобильных технических объектов и реализация на её основе автономной мобильной аппаратной платформы с необходимыми исполнительными механизмами и системой технического зрения для исследования разрабатываемых систем интеллектуального траекторного и целевого управления при кооперативном функционировании.
5. Проведение экспериментальных исследований разработанной методологии построения интеллектуальных систем.

Основные методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теории поля, теории дифференциальных уравнений, теории нечётких множеств, теории управления, теории терминального управления, синергетические методы управления, теории программирования.

Научная новизна работы. Научную новизну составляют следующие положения, предложенные в работе:

1. На базе иерархической структуры системы управления мобильными техническими объектами разработан подход на основе логических преобразователей и сети нечётких контроллеров, обеспечивающий повышение автономности и качества управления при ограничениях на вычислительные ресурсы.
2. Предложена модификация волнового алгоритма Ли для задачи поиска траектории движения, обеспечивающая сокращение длины траектории и возможность учёта ограничений по физической реализуемости движений.

3. Предложена методика проектирования интеллектуальных систем управления передвижением мобильных технических объектов при кооперативном функционировании.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанная структура системы управления мобильными техническими объектами обеспечивает нахождение траектории движения к цели в заранее неопределенной динамически меняющейся обстановке при любой конфигурации препятствий, если такая траектория существует, и маневрирования с движением задним ходом с учётом габаритов подвижного объекта.

2. Предложенная структура взаимодействующих нечётких контроллеров благодаря декомпозиции задач позволяет упростить разработку базы знаний для рассматриваемых интеллектуальных систем управления.

3. Применяемый подход к анализу карты сцены позволяет организовать эффективное кооперативное поведение подвижных объектов на сцене в смысле минимизации потока данных между агентами.

4. Предложенная структура системы управления может быть эффективно реализована на перспективных встраиваемых аппаратных платформах типа «система на кристалле» в смысле минимизации затрат на аппаратную реализацию.

5. Создан комплекс инструментальных средств моделирования и разработки программного обеспечения встраиваемых систем управления передвижением мобильных технических объектов, позволяющий минимизировать требования к вычислительным ресурсам целевой системы.

6. Разработана универсальная платформа колёсной мобильной системы, позволяющая проводить натурные исследования различных подходов.

7. Проведены модельные и натурные экспериментальные исследования разработанной интеллектуальной системы планирования траектории движения мобильных систем в заранее неизвестной динамически меняющейся окружающей среде с препятствиями.

Реализация результатов. Разработанные методы и средства внедрены в учебный процесс СПбГПУ и научно-исследовательскую деятельность Центра наукоёмкого инжиниринга, что подтверждено актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- фундаментальные исследования в технических университетах Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы;
 - Всероссийская научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника»;
 - компьютерное моделирование, труды международной научно-технической конференции;
 - научные исследования и инновационная деятельность (научно-практическая конференция).
- и др.

Работа поддержана грантом КЦФЕ СПб. Получена медаль Всероссийского конкурса «За лучшую научную работу».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, в том числе 5 – в изданиях перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Материал работы изложен на 204 страницах машинописного текста, основное содержание – на 143 страницах. Работа содержит 2 таблицы и 75 рисунков. В списке литературы 73 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования, приводятся наиболее существенные результаты исследования.

Первая глава посвящена обзору существующих мобильных мехатронных систем, характеризующихся разнообразием в организации движения, степени интеллектуальности и области применения, и рассматриваются основные требования к решению задачи автономного планирования траектории движения, которые должна выполнять система управления:

1. Решение задачи поиска траектории движения без необходимости классификации карты сцены.
2. Нахождение траектории движения к цели при любой конфигурации препятствий, если траектория существует.
3. Минимизация длины траектории.
4. Определение ситуации отсутствия траектории движения к цели.
5. Формирование траектории движения при любом количестве информации о конфигурации препятствий.
6. Минимизация влияния потенциальных ям.
7. Формирование в памяти карты сцены.
8. Построение траектории движения по данным, полученным от других агентов на сцене.
9. Корректировка траектории с учётом различных характеристик участков пути.
10. Учёт габаритных размеров объекта управления при построении траектории и планировании движения.
11. Построение траектории и планирование движения с учётом их физической реализуемости объектом управления.
12. Корректировка траектории движения в условиях динамически меняющейся карты сцены.
13. Высокая скорость анализа сцены, обеспечивающая необходимую реакцию системы при динамическом характере сцены.
14. Формирование траектории с учётом возможности движения задним ходом.
15. Формирование траектории манёвров при развороте в несколько приёмов.

Движение к цели должно осуществляться автономно – без вмешательства оператора – на основе данных об окружающей среде, полученных с помощью бортовой системы технического зрения.

Проведённый обзор показал, что большинство существующих систем управления описывается иерархической структурой с трёхуровневой моделью, содержащей стратегический, тактический и исполнительный уровни, как показано на рис. 1.

Стратегический уровень обычно осуществляет организацию целевого управления в зависимости от окружающей обстановки и положения мобильной системы. Здесь учитывается

положение препятствий и цели относительно мобильной системы, осуществляется планирование маршрута. В результате для тактического уровня управления формируются локальные цели.



Рис. 1. Иерархическая система управления перемещением мобильного объекта

Тактический уровень осуществляет управление передвижением по спланированному маршруту с учётом ориентации объекта управления в точках локальных целей.

Реализация управления на исполнительном уровне зависит от конструкции ходовой части мобильной системы и используемой математической модели. Наиболее хорошо разработаны кинематические и динамические модели колёсных систем и способы траекторного управления такими системами, основанные на разработанных моделях.

На основании проведённого анализа в заключение главы формулируются основные задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке подходов для каждого уровня структуры системы управления мобильными мехатронными системами. Для этого рассматриваются основные существующие подходы к решению задачи автономного планирования траектории движения и выявляются их особенности и недостатки.

Для решения задачи планирования траектории на стратегическом уровне в настоящее время широко применяются два основных подхода – полевой и поведенческий. В каждом из них может быть реализована различная степень интеллектуальности поведения системы.

При поведенческом подходе обрабатываются различные манеры поведения системы в типовых ситуациях, например, движение по коридору, обход препятствий и т.д. В данной главе рассматривается применение логико-лингвистического нечёткого подхода, приводятся результаты

разработки нечётких систем планирования и выявляются недостатки таких систем и недостатки поведенческих подходов в целом.

При полевом подходе создаётся полевая модель среды с препятствиями и моделируется движение системы в этом поле. В качестве исходной модели может быть взято какое-либо физическое поле – электромагнитное, потенциальное, потоковое и т.д., либо создано особое потенциальное или логическое поле. В данной главе среди полевых подходов уделено внимание рассмотрению принципа полевой организации управления движением на основе логического поля скоростей и на основе клеточного автомата. Подробно рассматривается применение каждого подхода, предлагаются их модификации, необходимые для применения в задачах планирования траектории движения подвижного объекта, оцениваются необходимые для их реализации ресурсы и выделяются достоинства и недостатки.

При использовании логики-лингвистического нечёткого подхода база правил системы управления строится по принципу:

- «если препятствие со стороны S , а цель со стороны T , то двигаться в сторону N »;
- «если препятствие на расстоянии R , а цель на расстоянии D , то двигаться со скоростью V »;
- «если препятствие движется со стороны A , то двигаться в сторону B »

где S , T , N , A и B – термы, описывающие направления, а R , D и V – термы, описывающие скорость.

Основное преимущество применения этого подхода на стратегическом уровне состоит в простоте его реализации и в том, что он позволяет учесть направление движения препятствий, а также дополнительную информацию о характеристиках поверхности сцены (сцепление, наклон и пр.). Однако с его помощью могут быть рассмотрены лишь случаи с небольшим количеством препятствий на сцене и несложной их конфигурацией. Кроме того, следует принять во внимание, что в полученной в данной главе системе нечёткого планирования траектории обработке подвергались только препятствия, попадающие в область прямой видимости СТЗ объекта. При таком подходе неизменно существует большое количество классов сцен, на которых цель оказывается недостижимой. В таком случае при выходе препятствия за границу области видимости или при скрытии другим препятствием пространство, ранее занимаемое препятствием, уже рассматривается как свободное. Для некоторого класса сцен это позволяет достичь цели, но в общем случае необходимо сохранять информацию об обнаруженных ранее препятствиях и учитывать её при планировании траектории движения.

В главе приводятся результаты моделирования данного подхода с описанием структуры нечёткого контроллера, функций принадлежности и разработанной базы правил.

Применение аппарата нечёткой логики для более сложных конфигураций препятствий (более одного), учёт ранее обнаруженных препятствий, не попадающих в область прямой видимости СТЗ, влечёт существенное усложнение базы правил нечёткого контроллера. С

увеличением количества входов сложность базы правил растёт по экспоненциальному закону. Таким образом, применение нечёткого логического вывода для обработки всей карты сцены затруднено, результат носит вероятностный характер, и эмпирически формируемая база правил практически не поддаётся отладке.

При использовании потенциального полевого подхода объект управления представляется частицей, движущейся в некотором потенциальном поле, в котором цель притягивает объект, а препятствия – отталкивают. Под действием результирующей этих виртуальных сил объект достигает цели. При этом также неизменно существует некоторое множество классов сцен, на которых цель оказывается недостижима – в частности, по причине действия, так называемых, потенциальных ям. Кроме того, для расширения классов результативно обрабатываемых сцен необходимо сохранять информацию об обнаруженных ранее препятствиях и динамически изменять коэффициенты влияния составляющих равнодействующей силы.

В главе приводятся результаты моделирования полевого подхода на основе поля скоростей.

При всех возможных модификациях данного алгоритма, траектория движения и само достижение цели по-прежнему будут носить вероятностный характер, поскольку, как и при создании базы знаний в нечётком подходе, при выборе коэффициентов влияния виртуальных сил в полевым подходе, необходимо находить компромисс между результативностью алгоритма и оптимальностью траектории движения.

Алгоритм Ли для клеточного автомата можно отнести к потоковому полевому подходу в дискретном виде. В кибернетике автоматом называется математическая модель реально существующих или принципиально возможных систем, осуществляющих преобразование дискретной информации. Клеточным автоматом называется набор клеток, образующих некоторую периодическую решетку с заданными правилами перехода, определяющими состояние клетки в следующий момент времени через состояние клеток, находящихся от неё на расстоянии не больше некоторого, в текущий момент времени. И в данной задаче клеточный автомат представляет собой дискретный вид среды функционирования подвижного объекта, т.е., карту в виде матрицы, элементы которой (клетки) представляют собой соответствующую часть карты. Выделяются клетки, где располагаются препятствия (*obst*), индекс клетки, где располагается цель (*tgt*) и индекс клетки, где располагается сам объект (*obj*).

Траектория движения находится при помощи последовательного изменения состояний автомата по алгоритму Ли:

1. Все элементы матрицы $k_{i,j} \neq obst$, не занятые препятствиями, инициализируются нулевыми значениями: $\forall i \in [1, I], \forall j \in [1, J]: k_{i,j} \neq obst, k_{i,j} = 0$, а элемент, соответствующий точке цели, – единичным значением $k_{tgt} = 1$.

2. Итерационно выполняется процедура формирования поля: $\forall i \in [1, I], \forall j \in [1, J]: k_{i,j} \neq 0, k_{i,j} \neq obst, k_{m,n} = 0; k_{m,n} = k_{i,j} + 1 \quad m \in [i-1, i+1] \cup [1, I], n \in [j-1, j+1] \cup [1, J]$ до тех пор, пока $[m, n] \neq obj$, где *obst* – значения элементов, соответствующих обнаруженным препятствиям, *obj* – индекс элемента, соответствующего координатам подвижного объекта.
3. Выполняется процедура формирования траектории по максимальному градиенту сформированного поля из элемента, соответствующего координатам подвижного объекта: $r_p = \max(m), m \in [i-1, i+1] \cup [1, I], n \in [j-1, j+1] \cup [1, J], p = p + 1.$

Однако существует ряд особенностей, не позволяющих использовать данный алгоритм для задач формирования траектории движения подвижного объекта без ряда принципиальных изменений на каждом из этапов поиска траектории, главные из которых представление подвижного объекта материальной точкой, что не позволяет учитывать его габариты при формировании траектории объезда препятствий, а также большой квант поворота участков траектории, составляющий минимум 45° .

Анализ всех особенностей рассмотренных подходов для стратегического уровня позволяет предложить в данной работе решение, обеспечивающее получение преимуществ каждого из них. Это возможно благодаря комбинированию полевого и поведенческого подходов в дискретном поле: клеточного автомата, определяющего локальные цели, на стратегическом уровне и нечёткого управления на участках движения *между* локальными целями на тактическом уровне.

Такой подход позволяет:

- ограничить возможную сложность конфигурации препятствий для обработки нечётким контроллером, т.к. полученные локальные цели всегда находятся в прямой видимости;
- упростить разработку и отладку базы правил для нечёткого контроллера;
- учитывать движущиеся препятствия;
- учитывать дополнительные данные о качестве поверхности.

С другой стороны, применение клеточного автомата позволяет:

- получить траекторию движения к цели при любой конфигурации препятствий, если такая траектория существует;
- хранить в памяти карту сцены с информацией о ранее обнаруженных препятствиях;
- хранить информацию о характеристиках поверхности сцены.

Однако применение нечёткого подхода без специальной модификации не обеспечивает сложное маневрирование и развороты в несколько приёмов, что необходимо для успешного достижения цели при сложной конфигурации препятствий. С другой стороны, применение алгоритма Ли на клеточном автомате также сохраняет все описанные выше недостатки, не позволяющие использовать его в реальных условиях и не позволяющие получить оптимальные траектории без специальных модификаций.

Третья глава посвящена адаптации выбранных подходов к решению задачи планирования траектории движения.

Для стратегического уровня предлагаемая в работе модификация траектории, полученной по алгоритму Ли на клеточном автомате, обеспечивает:

1. Формирование траектории объезда смежных препятствий при любой конфигурации;
2. Корректный объезд препятствий с учётом габаритов подвижного объекта.

Для этого предлагается следующий итерационный алгоритм формирования траектории на заполненном клеточном поле:

1. Пусть $[i, j] = [i_0, j_0]$, $m \in \mathbb{N}$, $m = 1$, $[i, j] \neq [i_k, j_k]$, где $[i_0, j_0]$ и $[i_k, j_k]$ – координаты начальной и конечной точек траектории (индексы клеток).
2. $[i, j]_{m+1} = \text{index}(\min\{k_{i+1,j}, k_{i-1,j}, k_{i,j+1}, k_{i,j-1}, k_{i+1,j+1}, k_{i-1,j-1}, k_{i+1,j-1}, k_{i-1,j+1}\})$.
3. $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} \neq \text{obst}, k_{i-1,j} = \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i, j-1] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} = \text{obst}, k_{i-1,j} \neq \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i-1, j] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} = \text{obst}, k_{i-1,j} = \text{obst} \quad k_{i,j} = \text{obst}$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} \neq \text{obst}, k_{i-1,j} = \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i, j+1] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} = \text{obst}, k_{i-1,j} \neq \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i-1, j] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m > i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} = \text{obst}, k_{i-1,j} = \text{obst} \quad k_{i,j} = \text{obst}$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} \neq \text{obst}, k_{i+1,j} = \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i, j-1] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} = \text{obst}, k_{i+1,j} \neq \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i+1, j] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m < j_{m+1} \quad k_{i,j-1} = \text{obst}, k_{i+1,j} = \text{obst} \quad k_{i,j} = \text{obst}$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} \neq \text{obst}, k_{i+1,j} = \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i, j+1] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} = \text{obst}, k_{i+1,j} \neq \text{obst} \quad [i, j]_{m+1} = [i+1, j] \quad m = m+1$
 $\forall [i, j]_m, [i, j]_{m+1} : i_m < i_{m+1}, j_m > j_{m+1} \quad k_{i,j+1} = \text{obst}, k_{i+1,j} = \text{obst} \quad k_{i,j} = \text{obst},$

где $\text{index}(\min\{\})$ – индекс минимального из перечисленных элементов, obst – значение клетки, соответствующее препятствию.

Суть модификации заключается в третьем шаге, который позволяет определить характер расположения траектории относительно близкорасположенных препятствий и скорректировать её, а при программной реализации выполняется в едином цикле в объединении с шагом 2. Код программных реализаций на языке Си и скриптовом языке Matlab представлен в приложении к работе.

Вторая модификация направлена на решение следующих задач:

1. Корректные направления всех участков сформированной траектории движения с произвольным квантом поворота;
2. Сокращение траектории движения при наличии и отсутствии препятствий.

Для этого предлагается следующий алгоритм:

Пусть T – множество координат клеток, составляющих траекторию, P – множество координат точек поворота траектории, t_z – количество клеток, составляющих отрезок z траектории, $[x_k^t, y_k^t] \in T$, $[p_n, q_n] \in P$, $k, n \in \mathbb{N}$.

$$\forall k \in [1, t], \forall t \in [1, t_z], \forall dr \in \left[width, \sqrt{(y_k^1 - y_{k+2}^t)^2 + (x_{k+2}^t - x_k^1)^2} \right],$$

$$\frac{(y_k^1 - y_{k+2}^t)(x + dr \cdot \cos \alpha) + (x_{k+2}^t - x_k^1)(y + dr \cdot \sin \alpha) + (x_k^1 y_{k+2}^t - x_{k+2}^t y_k^1)}{\sqrt{(y_k^1 - y_{k+2}^t)^2 + (x_{k+2}^t - x_k^1)^2}} < width/2$$

$$[p_n, q_n] = [x_{k+2}^t, y_{k+2}^t], n = n + 1.$$

где $width$ – габаритный размер подвижного объекта по ширине, dr – переменный шаг детектирования препятствий на участке траектории.

Применение описанных подходов позволяет получить корректные, кратчайшие траектории обхода препятствий, учитывающие габариты подвижного объекта, адекватные направления движения к цели уже на начальных участках, а также сокращение длины траекторий на большинстве сцен при наличии и отсутствии препятствий.

Можно оценить эту величину сокращения длины траектории в относительных единицах:

$$k = \left(1 - \frac{d}{l_1 + l_2} \right) \cdot 100\%, \text{ где } d \text{ – длина сокращённой траектории; } l_1, l_2 \text{ – длина исходных отрезков траектории.}$$

Выразив d через l_1 и l_2 , в общем случае получим:

$$k = \left(1 - \frac{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos\left(\frac{3}{4}\pi\right)}}{l_1 + l_2} \right) \cdot 100\%.$$

Очевидно, что сокращение траектории зависит от конфигурации препятствий, и от сокращения траектории на каждом из отдельных участков, однако максимальным выигрыш окажется в том случае, когда длины сокращаемых участков равны $l_1 = l_2 = l$ (иначе длина прямой, соединяющей начальную и конечную точки спрямляемого участка, приближается к длине одного из участков). В этом случае сокращение траектории может быть найдено из упрощённого выражения: $k_{max} = (1 - \sin(3/8\pi)) \cdot 100\%$, где аргумент синуса – это угол между первым и вторым участками траектории, т.е. угол поворота, получаемый при непосредственном использовании

алгоритма Ли. Таким образом, при $l_1 = l_2$ получим максимальное сокращение траектории, равное $k_{\max} \cong 7,6\%$.

Для подтверждения возможности реализации описанного подхода во встраиваемых системах в главе приводится оценка требуемого объёма оперативной памяти для реализации клеточного автомата и объёма памяти, необходимого для описания окружающей подвижный объект обстановки: $N = S \cdot \left(\frac{1}{M} \cdot m\right)^2 \cdot n$, где S – площадь местности в квадратных метрах, карта которой должна храниться в памяти; $M = \max(W, L)$ – максимальный из габаритов подвижного объекта в метрах; m – разрешение карты (количество клеток на минимальный элемент свободного пространства, через который может пройти подвижный объект); n – количество байт, которым представлена одна клетка (определяется сложностью сформированной траектории и не сильно ограничено сверху значением $\frac{1}{8} \log_2 \frac{N}{n}$, т.е. количеством байт, необходимых для представления

всего количества клеток). Более сильное ограничение можно оценить значением $\frac{1}{8} \log_2 \frac{k + \sqrt{k}}{2}$,

где $k = S \cdot \left(\frac{1}{M} \cdot m\right)^2$ – в предположении, что максимально длинная траектория может быть зигзагообразной через всю сцену или спиралевидной на всю площадь сцены.

Рассмотрим пример оценки необходимой памяти для хранения карты сцены.

Вообще, размер клетки имеет смысл принять равным габаритам подвижного объекта, т.к. для формирования траектории не имеет смысла хранить информацию о свободном пространстве, если траектория через данный участок не может быть проложена. Если принять габариты объекта примерно равными 0,5 м на 0,5 м, то требуется 4 клетки на квадратный метр сцены. Для формирования фронта волны по рассматриваемому алгоритму на поле 4000 на 4000 клеток (2х2 км) для представления клетки можно ограничиться двумя байтами. Таким образом, для хранения детальной карты для площади четыре квадратных километра требуется менее 8 МБ памяти. Современные мультимедийные портативные устройства содержат до 256 МБ оперативной памяти и до 16 ГБ встроенной программируемой постоянной памяти.

Представление карты сцены в виде клеточного автомата не только сокращает объём хранимой информации обо всей сцене, но и унифицирует представление сцены, что позволяет обмениваться информацией о наличии препятствий при кооперативном функционировании на сцене. Благодаря данному подходу возможно сократить объём передаваемой между подвижными объектами информации для согласования собранных данных о конфигурации препятствий и качестве поверхности до двух-трёх сотен байт для каждой итерации.

Для тактического уровня в работе предлагается структура взаимодействующих нечётких контроллеров (рис. 2).

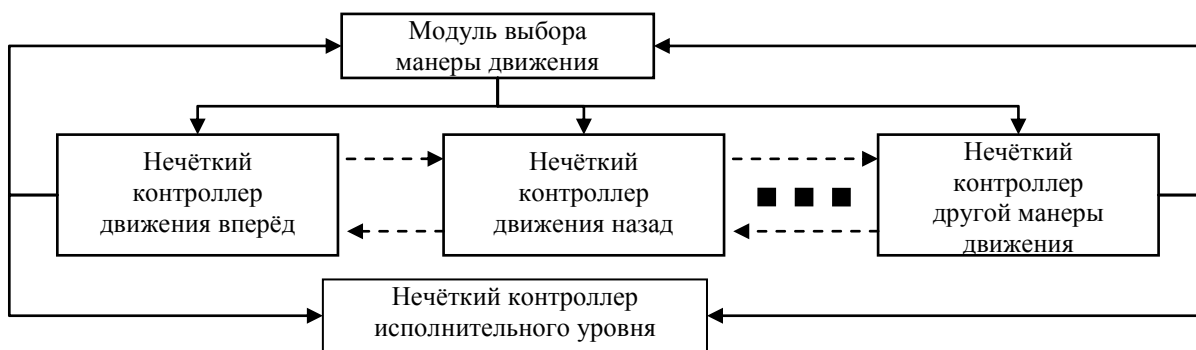


Рис. 2. Иерархическая структура нечётких контроллеров

В главе приводится структура каждого контроллера в отдельности, а также функции принадлежности и базы правил, позволяющие реализовать перечисленные выше функции планирования сложного движения подвижного объекта.

Применение нечёткого подхода на данном этапе, когда цель (локальная цель от стратегического уровня) находится в прямой видимости, позволяет реализовать простую и эффективную базу правил. На основе логико-лингвистического нечёткого подхода целесообразно реализовать сразу два уровня управления: тактический – планирование траектории движения между локальными целями и исполнительный – формирование управления для исполнительного уровня, непосредственно для драйверов исполнительных механизмов. Расположение нечёткой системы управления на данном уровне иерархии управления позволяет эффективно реализовать сопряжение уровня планирования траектории движения с исполнительным уровнем благодаря возможности с её помощью формировать непосредственно сигналы управления для драйверов исполнительных устройств.

В работе показано, что такая структура позволяет реализовать различные сложные манёвры с движением задним ходом, развороты в несколько приёмов – при наличии только двух представленных на рисунке контроллеров: контроллера движения вперёд и контроллера движения назад. При этом каждый отдельный нечёткий контроллер обладает несложной базой знаний, которая легко поддаётся отладке. В рассмотренной в главе структуре в качестве примера каждый нечёткий контроллер непосредственно передаёт управление другому в случае невозможности продолжать движение и при достижении заданных условий.

Моделирование и натурные испытания предлагаемого комбинированного подхода показывают, что база знаний системы управления, построенная для каждого контроллера на общих принципах, обеспечивает корректное поведение подвижного объекта даже в новых для неё ситуациях, например, необходимость движения к цели задним ходом при невозможности осуществить разворот, и выполнение разворота при первой физически реализуемой возможности, а также разворот в узких местах в несколько приёмов.

Величину скорости и ускорения должны определять дополнительные факторы, к которым следует отнести качество поверхности, её наклон, сцепление колёс с поверхностью, погодные условия, снаряжённую массу подвижного объекта, тип перевозимого груза. Для аналитического представления функции, определяющей манеру движения, сложно обоснованно выбрать нелинейные зависимости, учитывающие все эти факторы. Для реализации управления возможно использовать различные аналитические функции, однако дополнительную сложность представляет нечисленный характер некоторых входных данных – таких как тип груза и погодные условия, а также сложность адаптации к изменяющимся условиям. Для учёта подобных гетерогенных факторов целесообразно использовать логико-лингвистический нечёткий подход к управлению.

В таблице представлено сравнение рассмотренных подходов к планированию траектории движения по основным признакам, их отличающим: полевой подход, нечёткий, на основе волнового алгоритма и предлагаемый подход на основе модифицированного волнового алгоритма с логико-лингвистическим планированием движения между локальными целями.

Таблица. Сравнение подходов к планированию траектории движения

Фактор сравнения	Логическое поле скоростей (полевой подход)	Логико-лингвистический подход (поведенческий подход) (ЛЛП)	Волновой алгоритм (клеточный автомат) (ВА)	Предлагаемый подход (модифицированный волновой алгоритм с логико-лингвистическим планированием движения)
Отсутствие необходимости дополнительной обработки данных СТЗ	х	х	+	+ (ВА)
Простота настройки	х	х	+	+ (ДЕКОМП, КОМБ)
Учёт ранее обнаруженных препятствий	+	х	+	+ (ВА)
Исключение влияния потенциальных ям	х	х	+	+ (ВА)
Учёт дополнительных факторов	х	+	х	+ (ЛЛП)
Учёт габаритов платформы	х	+	+	+ (ЛЛП, МОДИФ)
Учёт ориентации платформы	+	+	х	+ (ЛЛП)
Учёт кинематической схемы	х	+	х	+ (ЛЛП)
Сложное маневрирование	х	+	х	+ (ЛЛП, ДЕКОМП)
Достижение цели при любых конфигурациях	х	х	+	+ (ВА)
Корректные направления движения	+	+	х	+ (МОДИФ)
Исключение дискретности анализа карты сцены	+	+	х	+ (ЛЛП)
Рейтинг подхода	4	7	6	12

Из таблицы видно, что благодаря предложенным в работе модификациям волнового алгоритма, предложенной комбинации клеточного автомата и нечёткого подхода, предложенной

декомпозиции задач исключаются недостатки применяемых подходов и сохраняются преимущества каждого из них.

Методика проектирования интеллектуальных систем управления, обеспечивающая возможность кооперативного функционирования подвижных объектов, заключается в применении следующих этапов:

1. По предложенной формуле определить объём необходимой памяти для хранения карты сцены и определить требования к ресурсам системы управления.
2. Использовать функции предлагаемой библиотеки, реализующие отображение данных СТЗ на клеточный автомат, задав её параметры (квант поворота СТЗ, угол обзора СТЗ).
3. Использовать функции предлагаемой библиотеки, реализующие клеточный автомат, задав параметры объекта и сцены (габариты объекта, размеры сцены).
4. Выделить манеры движения подвижного объекта и разработать базы знаний для них с помощью предлагаемой модели или использовать предлагаемые базы знаний.
5. Разработать алгоритм выбора манеры движения и модуль, реализующий этот алгоритм, или использовать предлагаемый подход.
6. Настроить предлагаемую модель и провести моделирование работы системы планирования траектории движения, задав параметры кинематической схемы подвижного объекта (тип шасси, тип трансмиссии, расстояние между осями, предельные углы поворота).
7. Использовать предлагаемый модуль программной реализации нечёткого контроллера и подключить отлаженные на модели базы знаний к проекту.
8. Подключить к среде моделирования натурную систему управления по последовательному интерфейсу и отладить её функционирование адекватно модели.

Предлагаемая структура системы управления приведена на рис. 3. Принцип планирования траектории движения заключается в реализации следующих этапов:

1. Проецирование видимой части сцены на клеточный автомат, находящийся в нулевом состоянии.
2. Обработка сцены с помощью волнового алгоритма Ли на клеточном автомате.
3. Планирование траектории с применением предложенной модификации алгоритма Ли.
4. Оптимизация полученной траектории с помощью предлагаемых модификаций с учётом габаритов подвижного объекта.
5. Для ближайшей локальной цели движения (точки поворота) применение структуры взаимодействующих нечётких контроллеров с формированием управляющих сигналов для движения к ближайшей локальной цели, осуществления различных манёвров и разворотов.
6. Формирование управления для программных драйверов с учётом требуемых переходных процессов исполнительных механизмов.



Рис. 3. Структура системы интеллектуального управления подвижным объектом

Таким образом, разработанная система планирования траектории подвижного объекта позволяет решить следующие задачи:

1. Формирование кратчайшей траектории движения для любой конфигурации препятствий, если траектория существует;
2. Определение ситуации отсутствия траектории движения к цели;
3. Поиск траектории движения в условиях её отсутствия по существующим на настоящий момент данным;
4. Формирование траектории движения при отсутствии информации о конфигурации препятствий;
5. Решение задачи поиска траектории движения без необходимости классификации карты сцены;
6. Исключение влияния потенциальных ям;
7. Формирование в памяти карты сцены и сохранение информации о карте;
8. Построение траектории движения при кооперативной работе на сцене;

9. Корректировка траектории с учётом различных характеристик участков пути;
10. Формирование траектории движения с учётом габаритных размеров объекта управления;
11. Формирование траектории движения и её корректировка в условиях динамически меняющейся карты сцены;
12. Обеспечение высокой скорости формирования траектории, обеспечивающей необходимую реакцию системы при динамическом характере сцены;
13. Передвижение с учётом возможности внезапного возникновения (обнаружения) препятствий и необходимости движения задним ходом;
14. Формирование траектории манёвров при развороте или малом пространстве при поворотах.

Четвертая глава содержит результаты модельных и натурных экспериментальных исследований предлагаемых подходов управления мехатронными мобильными системами в автономном и кооперативном режимах с применением разработанных программно-аппаратных средств.

Управление мобильной системой на исполнительном уровне сильно зависит от конструкции системы и её рулевого управления. При этом различают кинематическое и динамическое управление. В данной работе предполагается проведение экспериментов с классической колёсной системой автомобильного типа, обладающей достаточной динамической устойчивостью. Поэтому рассматривается кинематический способ управления с применением кинематической модели переднеприводного и заднеприводного колёсных шасси, а также гусеничного шасси робота. В этом случае задачей исполнительного уровня управления является выработка величины скорости ведущего двигателя шасси и скорости изменения угла поворота руля с учётом переходных процессов исполнительных устройств для обеспечения движения подвижного объекта по траектории, заданной тактическим уровнем.

На рис. 4 приведён пример траектории движения объекта с заднеприводным шасси. Объект должен достичь цели в правой части сцены из её центра в обход препятствий.

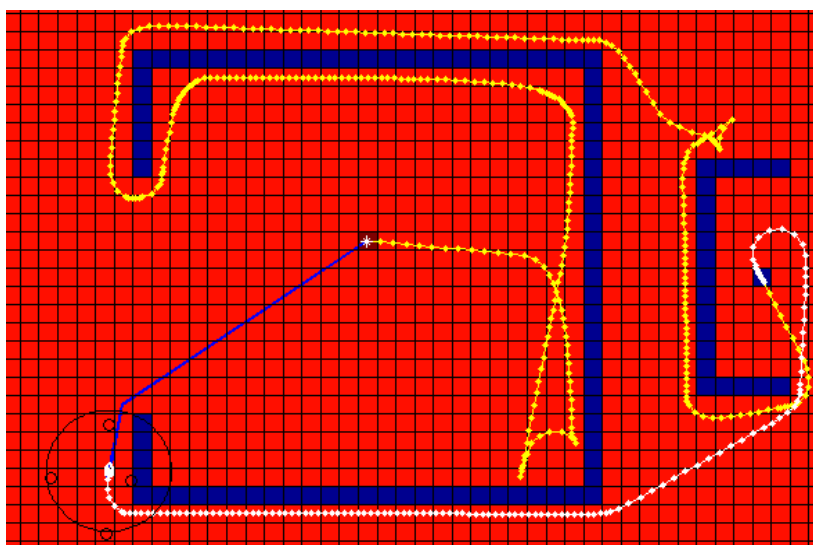


Рис. 4. Пример поиска траектории движения к цели

В модели дальность действия системы технического зрения подобно реальным условиям ограничена (показано окружностью). В начальный момент система управления не располагает никакой информацией о расположении препятствий, известны лишь координаты цели относительно начальных координат объекта. В приведённом примере препятствия располагаются вне зоны действия СТЗ, поэтому объект начинает движение в направлении цели. Затем в поле зрения СТЗ попадает часть препятствия, и объект начинает его объезжать справа. При объезде препятствия в памяти формируется карта сцены, определяется размер препятствия и принимается решение об объезде препятствия с другой стороны. Для разворота в противоположную сторону осуществляется разворот в три приёма. После объезда первого препятствия в поле зрения СТЗ постепенно попадает второе препятствие. Объект определяет его конфигурацию и достигает цели. Затем, развернувшись, возвращается в начальную точку.

Рассмотрим сцену (рис. 5), когда объект находится в узком коридоре с уширением, а цель находится позади объекта. В этих условиях система управления, получив информацию об окружающих препятствиях, принимает решение двигаться задним ходом, т.к. не имеет возможности осуществить разворот. Начав движение задним ходом, и обнаружив расширение коридора, система управления принимает решение о развороте и достигает цели. Достигнув цели, система управления принимает решение развернуться в три приёма, выехав на свободное пространство, и возвращается в начальную точку.

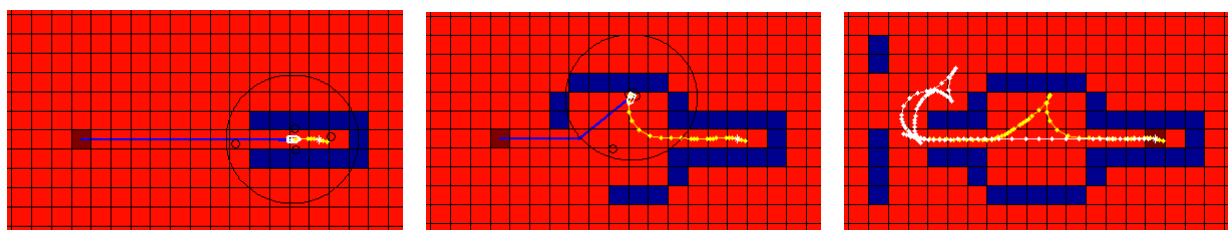


Рис. 5. Движение объекта задним ходом

Описанное поведение обеспечивается системой принятия решений, построенной по структуре рис. 3. На тактическом уровне для её реализации используется только нечёткий контроллер движения вперёд с 12 правилами и нечёткий контроллер движения назад с 13 правилами.

Испытания также проводились с помощью натурной платформы (рис. 6).

Комплекс имеет открытую архитектуру и построен по модульному принципу, широко используемому при проектировании сложных систем. Аппаратная структура комплекса и отладочной платформы комплекса показана на рис. 7. Для обеспечения интерфейса с пользователем комплекс включает инструментальную ЭВМ, предназначенную для задания параметров проектируемой системы, целей движения, визуализации состояния и поведения мехатронной мобильной системы, а также для моделирования и модификации ПО и загрузки его во встраиваемую микроконтроллерную систему управления подвижной платформой.



Рис. 6. Внешний вид натурной платформы

Объекты окружающей среды обнаруживаются с помощью специально разработанной инфракрасной системы технического зрения (СТЗ), позволяющей снимать карту сцены в формате наиболее удобном для обработки во встраиваемой системе. При этом карта сцены, полученная с помощью данной СТЗ и описывающая положение всех окружающих видимых препятствий, представляется в формате, обеспечивающем минимальный занимаемый объём памяти – 200 байт. Для вращения СТЗ используется шаговый двигатель с оптическим конечным датчиком положения.

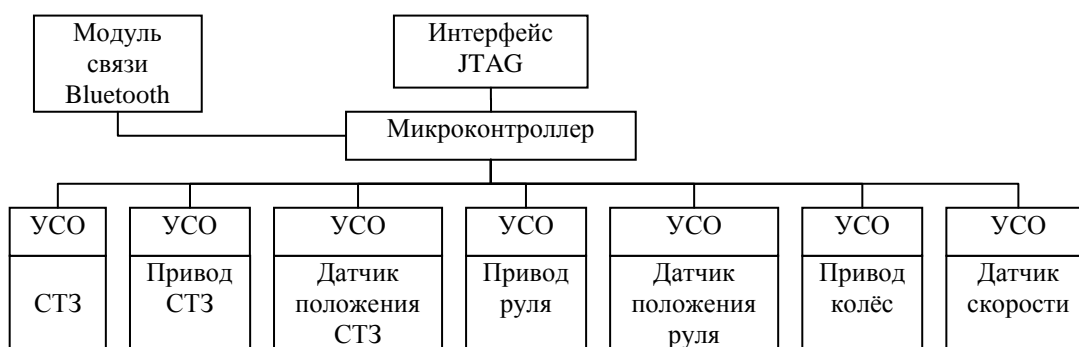


Рис. 7. Модульная структура мобильного объекта

В качестве привода колёс используется двигатель постоянного тока с редуктором и оптическим датчиком частоты вращения. Скорость вращения регулируется с помощью ШИМ управления. Для поворота руля используется сервопривод со встроенным датчиком угла поворота. Угол поворота меняется в диапазоне $[0^\circ, 180^\circ]$, и код угла также задаётся с помощью ШИМ. Все ШИМ сигналы формируются с помощью внутреннего аппаратного блока управляющего микроконтроллера.

Связь инструментальной ЭВМ с отладочной платформой осуществляется по проводному последовательному интерфейсу RS-232C или по беспроводному интерфейсу Bluetooth.

Программная часть комплекса представляет собой реализацию драйверов-регуляторов используемых исполнительных механизмов, а также разрабатываемых алгоритмов управления тактического и стратегического уровней для управляющего микроконтроллера. Программа составлена на языках Си и ассемблер для контроллеров 51-го семейства.

Для взаимодействия инструментальной ЭВМ с управляющим микроконтроллером реализованы интерфейсные программы в среде Builder C++, а также в среде MatLab.

В качестве управляющего контроллера во встраиваемой системе управления применяется микроконтроллер фирмы SiLabs C8051F120 широко распространённого 51-го семейства с широким спектром периферийных устройств на кристалле. В данной главе приводится описание его характеристик. Кроме того, рассматривается реализация разрабатываемых подходов на современной системе на кристалле (СНК) с жёсткой структурой Colibri XScale PXA270 фирмы Toradex (существует отечественный аналог – одноплатный компьютер Тион-270), имеющей ядро архитектуры ARM9. Данная СНК применяется во многих современных электронных устройствах типа карманных компьютеров. Здесь же приводятся сравнительные характеристики реализованного программного обеспечения для этих двух принципиально разных вычислительных платформ.

В настоящее время для решения аналогичных задач применяются системы на основе 64-битных процессоров архитектуры RISC (роботы AIBO), а также многоядерные и многопроцессорные системы (робот-пылесос NaviBot).

В данной главе также предлагается вариант реализации предлагаемых подходов на СНК с программируемой структурой. Проведённые эксперименты показали, что реализация нечёткого контроллера на кристалле программируемой логики позволяет увеличить его производительность приблизительно на порядок. Таким образом, реализация предлагаемой системы, сочетающей клеточный автомат и нечёткий контроллер, на СНК с чётким вычислителем и дополнительной программируемой структурой позволяет наиболее полно использовать ресурсы СНК.

В заключении обсуждаются основные результаты исследования.

В приложениях приведены исходные коды программной реализации описанных подходов в среде моделирования и для платформы C8051F120.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработана иерархическая структура системы управления мобильными техническими объектами на базе логических преобразователей и сети нечётких контроллеров, обеспечивающая повышение автономности и качества управления при ограничениях на вычислительные ресурсы.
2. Предложена модификация волнового алгоритма Ли для задачи поиска траектории движения, обеспечивающая сокращение длины траектории и возможность учёта ограничений по физической реализуемости движений.
3. Разработанная структура системы управления мобильными техническими объектами обеспечивает нахождение траектории движения к цели в заранее неопределённой динамически меняющейся обстановке при любой конфигурации препятствий, если такая траектория

существует, и маневрирования с движением задним ходом с учётом габаритов подвижного объекта.

4. Предложенная структура взаимодействующих нечётких контроллеров благодаря декомпозиции задач позволяет упростить разработку базы знаний для рассматриваемых интеллектуальных систем управления.

5. Применяемый подход к анализу карты сцены позволяет организовать эффективное кооперативное функционирование на сцене в смысле минимизации потока данных между агентами.

6. Предложенная структура системы управления может быть эффективно реализована на перспективных встраиваемых аппаратных платформах типа «система на кристалле» в смысле минимизации затрат на аппаратную реализацию.

7. Создан комплекс инструментальных средств моделирования и разработки программного обеспечения встраиваемых систем управления передвижением мобильных технических объектов, позволяющий минимизировать требования к вычислительным ресурсам целевой системы.

8. Разработана универсальная платформа колёсной мобильной системы, позволяющая проводить натурные исследования различных подходов.

9. Проведены модельные и натурные экспериментальные исследования разработанной интеллектуальной системы планирования траектории движения мобильных систем в заранее неизвестной динамически меняющейся окружающей среде с препятствиями.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, из них 5 – в изданиях перечня ВАК.

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Шилов М.М. Исследование алгоритмов полевого подхода к планированию траектории движения мобильного робота (статья). Научно-технические ведомости СПбГПУ. №5-1(47)/2006. Т.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – с. 165-169.

2. Васильев А.Е., Криушов А.В., Шилов М.М. Научно-исследовательская лаборатория встраиваемых интеллектуальных систем управления робототехническими объектами (статья). Научно-технические ведомости СПбГПУ. №4-2(52)/2007. Т.2.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – с. 185-189.

3. Васильев А.Е., Шилов М.М., Криушов А.В. Инструментальные средства и методология подготовки специалистов в области встраиваемых интеллектуальных систем управления (статья). Информационно-управляющие системы, №4(41).– СПб.: Политехника, 2009. – с. 43-52.

4. Шилов М.М., Воробьёва О.С., Кракау Т.К. Применение систем технического зрения и средств нечётких вычислений в интеллектуальных устройствах автоматики и робототехники (статья).

Научно-технические ведомости СПбГПУ. №4-2(97)/2010 – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – с. 75-79.

5. Пат. 2402822. Российская Федерация, МПК⁷ G 09 В 23/18. Стенд для изучения микроконтроллерных систем управления. / Васильев А.Е., Криушов А.В., Шилов М.М.; заявл. 21.04.2008; опубл. 27.10.2010.

**Список основных публикаций в других журналах, сборниках научных трудов,
материалах международных и всероссийских научных конференций**

1. Шилов М.М. Планирование движения в неопределённой динамической среде, моделируемой с помощью клеточного автомата и нечёткой системы управления (статья). Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сборник научных трудов / под ред. Ю.Б. Сениченкова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – с. 22-29.
2. Васильев А.Е., Шилов М.М., Литвинчук А.В., Петров Д.Д., Воробьева О.С. Синтез систем обработки нечеткой информации с применением сетей элементарных вычислителей нечетких логических функций (статья). Научные исследования и инновационная деятельность. Материалы научно-практической конференции 15-17 июня 2009 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – с. 296-303.
3. Шилов М.М., Литвинчук А.В., Комар В.В., Полуновский С.И. Применение аппарата генетического моделирования в задачах автоматизации проектирования нечетких контроллеров (статья). Научные исследования и инновационная деятельность. Материалы научно-практической конференции 15-17 июня 2009 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – с. 344-349.
4. Васильев А.Е., Литвинчук А.В., Шилов М.М. Автоматизированная генерация баз знаний для встраиваемых интеллектуальных систем управления (статья). Материалы конференции «Адаптивные и интеллектуальные роботы». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – с. 54-57.
5. Братолобова А.И., Мурго А.И., Ненашев О.В., Шилов М.М. Автоматизация проектирования встраиваемых систем управления колебательными процессами (статья). Вычислительные, измерительные и управляющие системы: сборник научных трудов / под ред. Ю.Б. Сениченкова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – с. 22-29.

ШИЛОВ Максим Михайлович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДИЧЕСКОГО И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
МОБИЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 1.0

Тираж 100

Типография Издательства СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.