

На правах рукописи
УДК 621.865.8

Киселев Дмитрий Валериевич

**УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ
В НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Специальность: 05.02.05 - Роботы, мехатроника и
робототехнические системы.

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МОСКВА - 2002 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
кафедры РК-10 МГТУ им.Н.Э.Баумана
Ющенко Аркадий Семёнович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Романов Михаил Петрович

кандидат физико-математических наук
Романов Олег Николаевич

Ведущая организация: Государственный Институт
Физико-Технических Проблем
(Гос.ИФТП)

1600071
Киселев Д.В.
Управление мобильным
роботом в неопределенных
условиях на основе нечеткой
логики
2002 0-00

12. 2002г. на заседании
Государственного

1600071

Ч
овой печатью,

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

же МГ

Иванов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

С развитием техники мобильные роботы находят все большее число приложений. По данным исследования ActivMedia Research, мобильная робототехника находится сейчас в том же состоянии, в котором находилась индустрия персональных компьютеров в начале восьмидесятых, когда никто не мог предсказать роста производства в 3500%. Прогнозируется резкое увеличение объема продаж с 665 млн. долларов в 2000 до 17 млрд. в 2005, в соответствии с результатами исследования компании ActivMedia Research «Мобильная робототехника: следующая революция». Спектр применения мобильной робототехники очень широк: от миниатюрных роботов, предназначенных для использования в программах исследования планет, до тяжелых роботов военного назначения, предназначенных для движения по пересеченной местности с использованием систем автономной навигации.

Большая часть мобильных роботов разрабатывается для работы во вредных или опасных для человека (*экстремальных*) условиях. Такие условия имеют место при ликвидации последствий аварий, при разминировании или при работе на других планетах. Применение мобильных роботов в таких условиях позволяет исключить человеческие жертвы. Таким образом, актуальной является проблема создания мобильных робототехнических комплексов, обладающих возможностью самостоятельного передвижения и выполнения поставленной задачи. Важную роль при этом имеет проблема создания интеллектуальной системы управления, позволяющей роботу автономно выполнять поставленную задачу при минимальном участии человека.

В нашей стране большой вклад в области создания мобильной робототехники принадлежит следующим организациям. В ЦНИИ «РТК», разработана гамма мобильных роботов для работы в экстремальных средах, для ликвидации последствий аварий, и борьбы с терроризмом. Специалистами Гос.ИФТП и НИКИМТ также созданы мобильные робототехнические комплексы, предназначенные для работы в экстремальных условиях. В ИПМ им. М.В.Келдыша проводятся фундаментальные исследования в области создания интеллектуальных систем управления для мобильных роботов. В МИРЭА разрабатываются системы управления на основе технологий экспертных систем и нейроуправления. ОАО «ВНИИТРАНСМАШ» разрабатывает уникальные мобильные роботы для исследований других планет. В научно-учебном центре «Робототехника» и НИИСМ в МГТУ им. Н.Э.Баумана также проводятся разработки в области создания мобильных роботов и систем управления для них. В НИИСМ ведутся, также, работы по исследованию ходовых систем гусеничных машин. ВолгГТУ известен своими оригинальными разработками в области шагающих машин большой грузоподъемности, предназначенных для движения по труднопроходимой местности.

К основным направлениям исследований при создании автономных роботов относятся следующие: машинное зрение, оценка геометрии местности и свойств поверхности, оценка положения робота и управление роботом. Области применения мобильных роботов характеризуются высокой неопределенностью окружающей обстановки, что ограничивает возможность использования жестких алгоритмов для управления ими.

В большинстве случаев управление роботом осуществляется человеком-оператором на уровне движений, при этом от человека требуется непрерывное

наблюдение за действиями робота и оперативное управление его действиями. Такой подход определяется неспособностью робота принимать самостоятельные решения и имеет ряд недостатков. К ним можно отнести необходимость постоянного канала связи с человеком (кабельная связь или радиосвязь), существенно ограничивающего область применения робота. Радиосвязь обеспечивает высокую подвижность робота и большой радиус действия, однако обладает следующими недостатками: невысокой помехозащищенностью, невозможностью сохранять режим радиомолчания, прекращением связи в зонах радиотени. Кабельная линия связи надежна, защищена от помех, обеспечивает скрытность передачи сигналов, но ограничивает подвижность и значительно уменьшает радиус действия машины. При выполнении технологических операций оператор, используя информацию об объекте и ходе выполнения работ, полученную с телекамер и выведенную на экраны мониторов, непрерывно управляет вручную исполнительными механизмами манипулятора и транспортного средства. Сложный процесс управления в сочетании с характером выполняемых взрывотехнических работ, требующих повышенного внимания и осторожности, приводит к быстрой утомляемости оператора и, как следствие, увеличению вероятности ошибочных действий. Кроме того, человек не всегда может правильно оценить обстановку по данным телеметрии и осуществить адекватное управление. Указанных недостатков можно избежать, если управление со стороны человека-оператора будет проводиться не на уровне движений, а на уровне постановки цели. Такой подход требует от робота самостоятельного принятия решения о конкретных действиях, в связи с чем возникает проблема получения и использования знаний, лежащих в основе системы принятия такого решения. Одним из эффективных вариантов формирования базы знаний для робота является его обучение на основе действий человека-оператора.

В результате анализа существующих подходов для решения подобных задач, таких как методы экспертных систем, методы ситуационного управления, разработанные Д.А.Поспеловым и другими исследователями, системы, основанные на рассуждениях, удалось установить, что они имеют существенные ограничения, и не обладают необходимой гибкостью для решения рассматриваемых задач. В связи с этим возникает проблема реализации систем управления, способных накапливать и использовать знания человека-оператора.

В диссертации рассмотрены теоретические и практические вопросы, связанные с синтезом подобных систем, алгоритмы управления и обучения, а также вопросы их программной и аппаратной реализации.

Актуальность темы исследования.

Актуальность темы проведенного исследования заключается в том, что методика, полученная в результате проведенного исследования, позволит повысить эффективность работы и расширить сферу применения мобильных роботов, за счет обеспечения их автономной работы в частично недетерминированных условиях. При этом, по мнению автора, упрощается задача человека-оператора, который, будучи освобожденным от управления роботом на уровне действий, получает возможность лучше сосредоточиться на более принципиальных задачах управления. Кроме того, при использовании такого подхода, снижаются требования к квалификации оператора, поскольку отсутствует необходимость его обучения на управление элементарными

движениями робота. Представляется, что предложенные методы могут быть использованы для широкого класса задач экстремальной робототехники.

В настоящее время сложилось несколько стандартных подходов к решению задач по интеллектуальному управлению роботами. К ним относятся экспертные системы, системы ситуационного управления, системы, основанные на методах нечеткого логического вывода, а также нейроуправление. К сожалению, каждая из перечисленных систем имеет существенные ограничения по применению, и не обладает необходимой гибкостью для решения рассматриваемых задач. Вместе с тем, удалось установить, что на стыке теории нейроуправления, теории нечетких множеств и ситуационного управления возможно реализовать системы управления, способные качественно накапливать и использовать знания человека-оператора. Основная задача, поставленная в данной работе, заключается в разработке такого метода, а также алгоритмов для его практической реализации.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является разработка методики, которая может быть использована в качестве основы для построения обучаемых систем управления мобильными роботами в недетерминированных условиях на основе нечеткой логики и принципа ситуационного управления.

В работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка общей архитектуры и обобщенного алгоритма работы системы управления поведением мобильного робота в недетерминированных условиях на основе нечеткой логики и принципа ситуационного управления.
- Разработка способа нечеткого логического вывода, пригодного для использования в обучаемых системах управления мобильными роботами.
- Разработка метода обучения системы управления движением мобильного робота на основе действий человека-оператора.
- Выбор способа классификации и распознавания ситуаций, возникающих при движении робота в частично недетерминированных условиях.
- Экспериментальное исследование работы отдельных компонентов предлагаемой системы управления мобильным роботом.

Методы исследования.

При решении поставленных задач автором были использованы теория нечетких множеств, теория нейроуправления, теория ситуационного управления, методы вычислительной и дискретной математики, среди которых: метод градиентного спуска, метод наименьших квадратов, теория конечных автоматов. Разработка программных средств велась с использованием технологии объектно-ориентированного программирования.

Исследование работоспособности разрабатываемых алгоритмов проводилось путем моделирования с использованием математических пакетов Matlab, Simulink, Realtime Workshop, языка C++.

Научная новизна работы.

Область применения методов ситуационного управления была расширена за счет объединения теории ситуационного управления и теории нечетких множеств. Полученный метод был использован для автоматического опознавания

ситуаций, возникающих при движении мобильного робота, с целью обеспечения управления в рамках текущей ситуации.

Разработан метод, позволяющий анализировать действия человека-оператора, выделения из них правил управления роботом, накопления этих правил и их последующего использования в автоматическом режиме. Метод основан на анализе возникающей при движении робота ситуации и принятии решения об управлении роботом на основе нечеткого логического вывода.

Предложена оригинальная архитектура системы управления поведением мобильного робота, предназначенная для функционирования в условиях частичной неопределенности, обладающая свойством обучения. В отличие от существующих работ данная методология основана на сочетании принципов ситуационного управления, нейроуправления и теории нечетких множеств.

Практическая ценность.

Разработана система автоматического управления конфигурацией шасси мобильного робототехнического комплекса, предназначенного для функционирования в опасных для человека условиях. В данной системе отсутствует необходимость управления движением робота со стороны оператора на уровне действий.

Предложены алгоритмы, позволяющие автоматически создавать и настраивать систему нечеткого логического вывода, формирующую управляющее воздействие на приводы мобильного робота, по действиям человека-оператора.

Разработана методика распознавания ситуаций, возникающих при движении мобильного робота. Метод основан на нечеткой кластеризации данных.

Предложены методы аппаратной реализации элементов систем нечеткого логического вывода, использующие современную элементную базу. Эти методы позволяют повысить производительность систем, использующих нечеткий логический вывод для принятия решения об управлении.

Внедрение.

Проведенные исследования являются частью фундаментальных исследований в области теории нечетких множеств и нечеткой логики, которые проводились Учебном Научно-Техническом Центре «Робототехника» в МГТУ им. Н.Э.Баумана в течении последних лет.

Результаты диссертационной работы были использованы в учебном процессе на кафедре «Робототехнические системы» в МГТУ им. Н.Э.Баумана в виде отдельного экспериментального курса для студентов специальности 210300 - «Роботы и робототехнические системы» направления 652000 - «Мехатроника и робототехника» и в соответствующих лабораторных работах.

Результаты диссертационной работы были использованы при проектировании системы управления конфигурацией шасси мобильного робототехнического комплекса «Богомол», разработанного в Гос.ИФТП.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 11-й и 12-й научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» в Государственном Научном Центре ЦНИИ РТК (г.Санкт-Петербург, Россия) в 2000г., 2001г. и на научных семинарах Учебного Научно-Технического Центра «Робототехника» в МГТУ им. Н.Э.Баумана в 1998-2002г..

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в девяти печатных работах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 175 печатных страниц, включая рисунки и список литературы. Библиография содержит 95 наименований, из них 67 иностранных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена область исследования и сформулирована цель работы. Показано практическое значение диссертационной работы, отражена апробация и внедрение результатов. Описана структура работы.

В первой главе на основе выполненного обзора существующей литературы автором обоснована необходимость проведения исследований в области адаптивных систем нечеткого вывода для управления поведением мобильных роботов. Анализ существующих решений показал, что они имеют недостатки, вследствие слабого использования интеллектуальных технологий, которые в последнее время находят широкое применение в других областях робототехники. Большинство мобильных роботов имеют ручное управление со стороны человека-оператора на уровне движений, что затрудняет задачу управления робота в опасных для человека условиях. Наиболее целесообразным решением этой проблемы является управление роботом на уровне постановки цели. Реализация такого метода управления требует применения современных интеллектуальных технологий среди которых наиболее перспективными являются методы ситуационного управления, нейруправления и управления на основе нечеткой логики. Проведенный анализ возможности применения этих методов для задач управления мобильными роботами показал, что применение их по отдельности не обеспечивает желаемой эффективности работы системы. Наиболее целесообразно использование технологий, объединяющих все три указанных метода. Разработка такого способа управления и была выбрана автором в качестве цели исследования.

Во второй главе на основе анализа существующих методов нечеткого управления был сделан вывод, что их можно разделить на два основных класса: методы, базирующиеся на априори заданных знаниях и адаптивные методы. На базе методов, основанных на априорных знаниях, можно создать системы управления мобильными роботами если заранее известны правила их поведения в недетерминированных условиях сцены. На базе адаптивных методов можно построить обучаемые системы управления с использованием обучения на основе анализа действий человека-оператора. Архитектура системы управления роботом в недетерминированных условиях, представлена схемой на рис. 1.

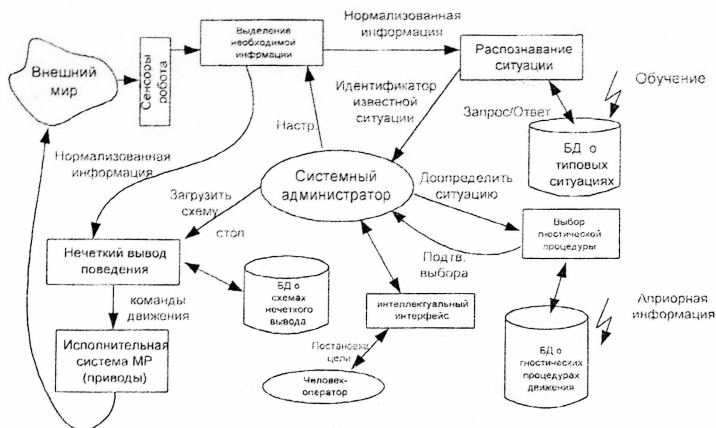


Рис.1. Архитектура системы управления мобильным роботом в недетерминированных условиях.

Для управления движением мобильного робота в условиях частично недетерминированной среды цель управления формулируется априори в вербальной форме, в соответствии с представлениями человека-оператора. Для нечеткого вывода решений об управлении был выбран метод Мамдани как наиболее простой и распространенный метод. Для получения решения здесь необходимо выполнить три этапа: фаззификация, то есть нечеткое представление входных значений, собственно нечеткий вывод, осуществляемый на основе известного набора продукционных правил, и дефаззификация, то есть преобразование полученного выходного значения из нечеткого в числовой вид. Дефаззификация при этом производится методом центра тяжести.

В тех случаях, когда заранее сформулировать набор продукционных правил затруднительно или невозможно, предлагается использовать систему управления на базе адаптивных обучаемых систем нечеткого вывода, которая должна решить следующие основные задачи: распознавание ситуации, формирование системы вывода, адаптация системы (ее обучение), формирование управления, а также синхронизации и управления всеми компонентами системы (рис.1).

Понятие «ситуации» было расширено на область нечетких множеств. Для выделения и распознавания «ситуаций» предложено использовать методы нечеткой кластеризации. Метод «нечетких с-средних» (НСС) используется непосредственно для выполнения кластеризации, а метод субтрактивной кластеризации - для оценки числа кластеров.

В целом метод принятия решения об управлении в соответствии со схемой на рис.1 может быть определен как нечеткий логический вывод. В качестве основного управляющего элемента предлагается использовать 5-слойную сетевую структуру, функционально эквивалентную системе нечеткого логического вывода, названную Адаптивной Системой Нечеткого Вывода (АСНВ). На рис.2 показана АСНВ, имеющая два входа и девять правил.

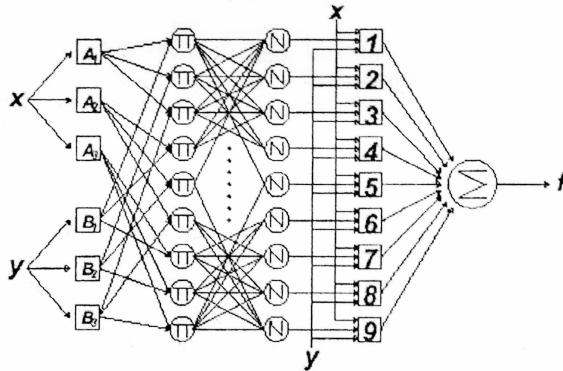


Рис. 2. АСНВ, имеющая девять правил.

Здесь используются нечеткие правила продукционного типа:

ЕСЛИ x есть A_i и y есть B_i , ТО $f_i = p_i x + q_i y + r_i$,

Каждый слой в схеме имеет собственную функцию.

Каждый i -й узел в первом слое определяется лингвистической переменной A_i с функцией принадлежности:

$$Q_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad (1)$$

где x – вход узла i .

Функция $\mu_{A_i}(x)$ зависит от набора настраиваемых параметров антеседента $\{a_i, b_i, c_i\}$, которые далее будут называться параметрами антеседента.

Функцией узлов во втором слое является перемножение входящих сигналов и передача произведения на выход в соответствии с формулой:

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1, 2. \quad (2)$$

Каждый узел, таким образом, представляет определенное правило.

Выход i -го узла в третьем слое вычисляется по формуле:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2. \quad (3)$$

Каждый узел сети в четвертом слое имеет следующую узловую функцию:

$$Q_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (4)$$

, где вектор w_i – выход третьего слоя, а $\{p_i, q_i, r_i\}$ – набор настраиваемых параметров консеквента.

В единственном узле последнего, пятого слоя вычисляется в соответствии с формулой:

$$f = Q_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5)$$

Таким образом, построенная сеть содержит настраиваемые элементы, что обеспечивает возможность её адаптации.

Для обучения АСНВ предложен метод, позволяющий провести процесс обучения используя опыт человека-оператора. Вначале управление мобильным роботом производится человеком-оператором в условиях, близких к реальным. При этом данные об управлении и данные, получаемые с сенсорных систем робота, записываются в файл. Далее на основе этих данных проводится обучение АСНВ, после чего она может самостоятельно функционировать в схожих условиях.

На первой стадии процесса обучения на вход сети подаются входные данные и функциональные сигналы распространяются от слоя 1 к слою 5. При этом производится оценка параметров консеквента методом наименьших квадратов.

Будем считать, что адаптивная сеть имеет один выход:

$$u = F(\bar{I}, S), \quad (6)$$

где I – вектор входных переменных, а S – вектор настраиваемых параметров. Тогда подставляя значения данных P , получаемых в эксперименте, в выражение (6) получим матричное уравнение:

$$AX = B, \quad (7)$$

где X – неизвестный вектор, элементы которого являются параметрами консеквента. Количество пар данных P обычно превышает размерность M вектора X , поэтому используется минимизация квадратичной ошибки $\|AX - B\|^2$. В результате нахождения X получается псевдо-обратная матрица от A :

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (8)$$

Для практических вычислений предлагается применить рекуррентную формулу:

$$\begin{cases} X_{i+1} = X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \\ S_{i+1} = \frac{1}{\lambda} \left[S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{\lambda + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right] \end{cases} \quad (9)$$

, где a_i^T – i -я строка в матрице A , b_i^T – i -й элемент в B , S_i – ковариационная матрица. Начальные условия для вычисления по формуле (9): $X_0 = 0$ и $S_0 = \gamma I$, где γ – это большое положительное число.

Величина $\lambda \in (0..1]$ определяет «фактор забывания» и позволяет обеспечить более высокий весовой фактор для более «новых» пар данных.

В результате выполнения первой стадии мы получаем выход сети, что позволяет определить ошибку сети E как разность между ожидаемым и полученным значениями выхода сети.

На второй стадии обучения производная ошибки распространяется назад и параметры консеквента модифицируются методом градиентного спуска с учетом формул:

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha}, \quad \text{где} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{q \in S} \frac{\partial E_p}{\partial Q^*} \frac{\partial Q^*}{\partial \alpha} \quad (11)$$

, где α – узловый параметр, адаптивной сети, S – набор узлов, выходы которых зависят от α , η – параметр, влияющий на степень обучения.

Был предложен алгоритм, позволяющий построить АСНВ на основе имеющихся экспериментальных данных. При этом была показана целесообразность использования на этапе формирования АСНВ метода субтрактивной кластеризации.

В третьей главе были продемонстрированы возможности использования разработанных методов для управления мобильными роботами.

Задача управления движением мобильного робота относится к классу задач с априорным формированием знаний. Робот представляет собой трёхколесную платформу, снабженную независимыми электродвигателями правого и левого колеса. На платформе установлена видекамера, а также смонтирована система управления. В определенный момент времени на рабочей сцене появляются сигналы двух инфракрасных маяков, расположение которых заранее не было известно. Робот должен их обнаружить, двигаться в их направлении и пройти в "ворота", образованные этими маяками.

Управляемыми нечеткими переменными являются вектор скорости V и вектор угловой скорости ω . Текущее положение и ориентация робота задается величиной дистанции до маяков и курсовыми углами φ_1 и φ_2 на маяки. Таким образом, пять нечетких параметров φ_1 , φ_2 , d , V , ω образуют фрейм, характеризующий текущую ситуацию. В цикле управления необходимо осуществить фаззификацию, то есть преобразование, измеренных значений переменных φ_1 , φ_2 , d в значения соответствующих нечетких переменных, принять решение о выборе управляемых переменных V и ω , дефаззифицировать решение и, в конечном итоге, сформировать управляющие сигналы на каждый привод.

Структура системы управления представлена на рис.3.

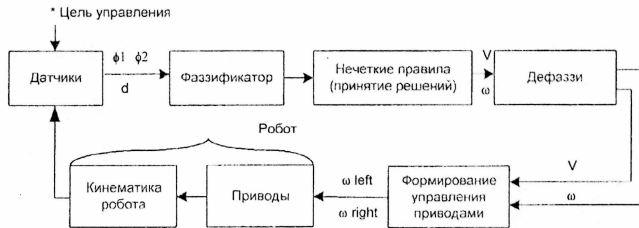


Рис.3. Структура системы нечеткого управления

Кинематика робота была описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 3-го порядка:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\rho}{2}(\omega_L + \omega_R) \cos \varphi \\ \dot{y} = \frac{\rho}{2}(\omega_L + \omega_R) \sin \varphi \\ \dot{\varphi} = \frac{\rho}{l}(\omega_R - \omega_L) \end{cases} \quad (12)$$

где ρ - радиус колеса, l - расстояние между колесами.

Приводы робота - управляемые по скорости двигатели постоянного тока с ПИ-регуляторами в контуре скорости, их управление имеет вид:

$$\begin{cases} \varepsilon = \dot{q}^* - k_\omega \dot{q} \\ Q' = \varepsilon \cdot \frac{R_s^{-1} \cdot k_m}{T_s p + 1} - Q_{comp} \\ \dot{q} = Q' \cdot \frac{1}{Jp} \\ q = \dot{q} \cdot \frac{1}{ip} \end{cases} \quad (13)$$

где:

$\dot{q}$ – угловая скорость вращения вала, ε - ошибка скорости, R_x – сопротивление обмотки якоря двигателя, T_ε – электрическая постоянная двигателя, K_m – коэффициент момента, K_ω -коэффициент скорости, i – передаточное число редуктора, $Q_{дв}$ – момент на валу двигателя, $Q'_{сopr}$ – приведенный момент сопротивления,

$$J = J'_{нагрузки} + J_{дв}, \quad J_{дв} = \frac{T_m \cdot k_m \cdot k_\omega}{R_x} - \text{суммарный момент инерции.}$$

Особенностью схемы управления является наличие независимых нечетких логических контроллеров, в которых формируются управляющие сигналы на приводы колес робота по формулам (14) и (15).

$$\omega_{right} = k_1 \cdot V + k_2 \cdot \omega \quad (14)$$

$$\omega_{left} = k_1 \cdot V - k_2 \cdot \omega \quad (15)$$

Параметры k_1 и k_2 подбираются экспериментально. Характерные функции принадлежности входных и выходных величин показаны на рис.4 а) и б). Нечеткие продукционные правила представлены в таблице 1. Параметры функций принадлежности и набор нечетких продукционных правил уточняются на этапе моделирования работы системы.

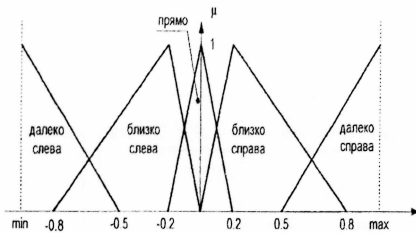


Рис. 4. а)

Нечеткое разбиение входных переменных (азимуты на маяки).

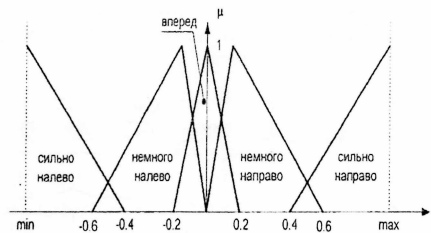


Рис. 4. б)

Нечеткое разбиение выходной переменной (угловая скорость).

Таблица 1

П 1:	ЕСЛИ	$\phi 1$ = далеко слева	,ТО	ω = сильно налево
П 2:	ЕСЛИ	$\phi 1$ = близко слева	,ТО	ω = немного налево
П 3:	ЕСЛИ	$\phi 1$ = в центре	,ТО	ω = немного налево
П 4:	ЕСЛИ	$\phi 1$ = близко справа	,ТО	ω = вперед
П 5:	ЕСЛИ	$\phi 1$ = далеко справа	,ТО	ω = сильно направо
П 6:	ЕСЛИ	$\phi 2$ = далеко слева	,ТО	ω = сильно налево
П 7:	ЕСЛИ	$\phi 2$ = близко слева	,ТО	ω = вперед
П 8:	ЕСЛИ	$\phi 2$ = в центре	,ТО	ω = немного направо
П 9:	ЕСЛИ	$\phi 2$ = близко справа	,ТО	ω = сильно направо
П 10:	ЕСЛИ	$\phi 2$ = далеко справа	,ТО	ω = сильно направо

, обозначено $\phi 1$ – азимут на правый маяк, $\phi 2$ – на левый.

Для проверки работоспособности предложенной схемы было проведено моделирование ее работы. Дополнительно к схеме 1 при моделировании были введены блоки, эмулирующие внешнюю среду и сенсорные системы робота. В процессе моделирования настраивались параметры функций принадлежности входных и выходных переменных (рис.4), что позволило уменьшить время движения к цели с 40 до 31 секунд, а максимальное значение поворота робота при движении с 2 до 0.95 рад.

В результате удалось получить удовлетворительный процесс движения робота к цели (рис.5). Таким образом, моделирование подтвердило эффективность предложенного способа управления и позволило сделать вывод о целесообразности использования разработанного метода управления движением мобильного робота для задач с возможностью априорного формирования знаний о цели движения.

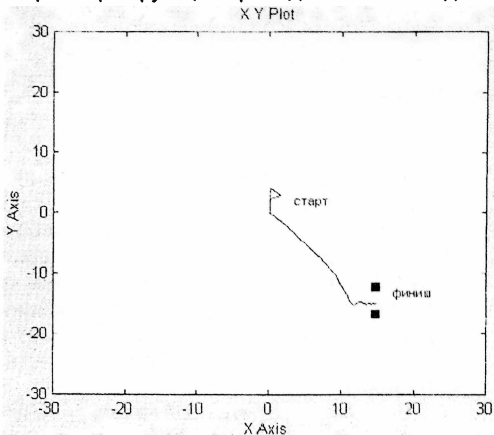


Рис.5. Процесс движения робота.

Задача, в которой требовалось осуществить обучение робота, состояла в управлении шасси мобильного робота «Богомол» (рис.6). Шасси робота имеет левую и правую группу гусеничных трактов, каждая группа состоит из основного и двух дополнительных трактов – переднего и заднего. Каждый трак имеет привод, обеспечивающий его поворот на угол до 90°, в результате чего имеется возможность преодолевать сложный рельеф. Изменением конфигурации можно добиться преодоления препятствий различных видов без потери устойчивости роботом.

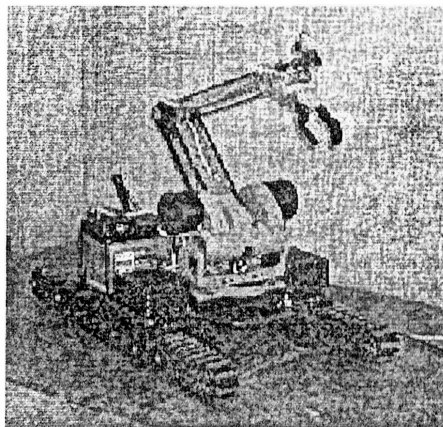


Рис.6. Внешний вид робота «Богомол».

Преодоление сложного рельефа может быть реализовано только при правильном управлении конфигурацией шасси. Эта функция возложена на человека-оператора, который, наблюдая за препятствиями впереди робота при помощи видеокамеры, установленной на роботе, вручную управляет углами поворота трактов, обеспечивая тем самым требуемую конфигурацию шасси. При функционировании робота в экстремальных условиях необходимо обеспечить автономность его работы, в связи с чем возникает задача автоматического управления конфигурацией шасси при движении по сложному рельефу.

В качестве сенсорной системы используются датчики моментов в двигателях поворота трактов, датчики отклонения от горизонтального положения платформы

(гировертикаль), и датчики относительных углов поворотов траков. Эти углы ($\alpha, \beta_1, \gamma_1, \gamma_2$) показаны на рис.7. В результате управления вырабатываются команды на изменение положения траков.



Рис.7. Угловые параметры.

Для формирования и обучения системы управления использовались рассмотренные выше теоретические методы.

В режиме обучения управление роботом осуществляется человеком-оператором на уровне действий. В процессе управления данные, получаемые от сенсорной системы, и данные об управлении записываются в файл телеметрии. Затем на основе этих данных производится формирование управляющей структуры АСНВ и ее обучение. В общем потоке данных методом нечеткой кластеризации выделяются «ситуационные кластеры». Обучение системы производится в пределах распознанной «ситуации».

В режиме работы «обученная» АСНВ самостоятельно формирует управление траками на основе информации от сенсорной системы. В процессе работы производится опознавание возникающей в текущий момент времени «ситуации» и используется та настройка системы, которая соответствует этой «ситуации». Эти настройки хранятся в ассоциативной памяти системы. Количество настроек соответствует количеству ситуаций, известных системе.

Работоспособность предлагаемого метода управления конфигурацией шасси мобильного робота была проверена на примере задачи по преодолению роботом «барьера». На рис.8 показан фрагмент последовательности положений мобильного робота при управлении оператора в задаче по преодолению роботом «барьера».

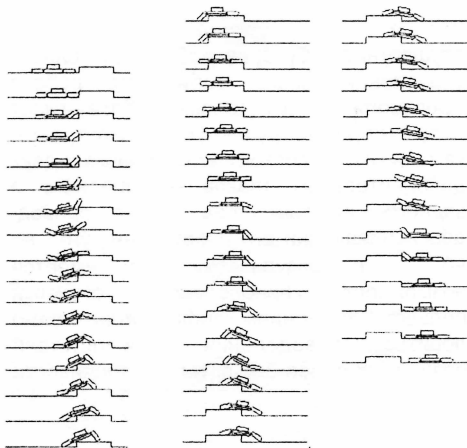


Рис.8. Преодоление «барьера».

Используя рассмотренные в гл.2 алгоритмы, система управления смогла выделить при «преодолении барьера» четыре ситуационных кластера, в рамках которых было проведено её обучение. Пользуясь интуитивными представлениями человека, можно сопоставить выделенные «ситуации» с движением по горизонтальной поверхности, заездом на барьер (рис.8), движением на барьере и съездом с барьера.

После проведения процесса обучения система вырабатывала самостоятельное управление. Вначале управление тестировалось в пределах каждой «ситуации» отдельно, чем проверялось качество обучения в пределах «ситуационного кластера» без их распознавания. Среднее значение ошибки при этом менялось в пределах от 3 до 10%.

Полученные результаты подтвердили возможность проведения обучения системы. Далее системе была поставлена задача распознавания «ситуаций» и проведение управления на основе распознанной «ситуации». Для этого на вход системы управления подавался поток данных, имитирующих преодоление препятствия «барьер». Результаты работы системы показаны на рис.9. Графики соответствуют управлению одним трактом. Видно, что АСНВ вырабатывает управление близкое к тому, которое было задано оператором. Для остальных ситуация аналогична. Верхний график есть образцовое управление человеком-оператором, второй – управление, вырабатываемое системой, третий – ошибка системы.

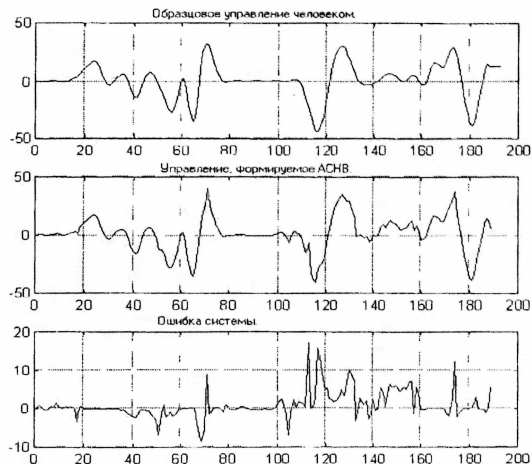


Рис.9. Результаты моделирования работы системы.

Таким образом, моделирование показало эффективность предложенного метода управления конфигурацией трактов робота, что позволяет сделать вывод о целесообразности применения такой методики для задач, когда обучение системы управления может проводиться на основе действий человека-оператора.

Разработан алгоритм, позволяющий автоматизировать процедуру формирования структуры АСНВ. С помощью предложенного алгоритма было проведено формирование структуры АСНВ двумя способами: с использованием субтрактивной кластеризации и без неё. Сформированная структура оценивалась по шести, указанным в таблице 2, параметрам.

Таблица 2.

Параметр	Без применения субтрактивной кластеризации	с применением
1: количество узлов	131	53
2: количество параметров в уравнениях консеквента	147	24
3: количество параметров функций принадлежности	42	32
4: общее количество параметров	189	56
5: количество пар данных	45	45
6: количество нечетких правил	49	8

Из таблицы 2 можно заметить, что использование метода субтрактивной кластеризации на этом этапе дает существенные преимущества, а именно снижает количество узлов, правил, линейных и нелинейных параметров системы, что позволяет уменьшить скорость обучения, и повышает эффективность работы системы в целом.

В четвертой главе рассмотрены вопросы аппаратной реализации элементов систем нечеткого логического вывода.

Предлагается структурная схема аппаратной реализации блока нечеткого управления (рис.10). Основным управляющим устройством в системе является микроконтроллер, который осуществляет функции загрузки, координации работы остальных элементов схемы и дефазификации.

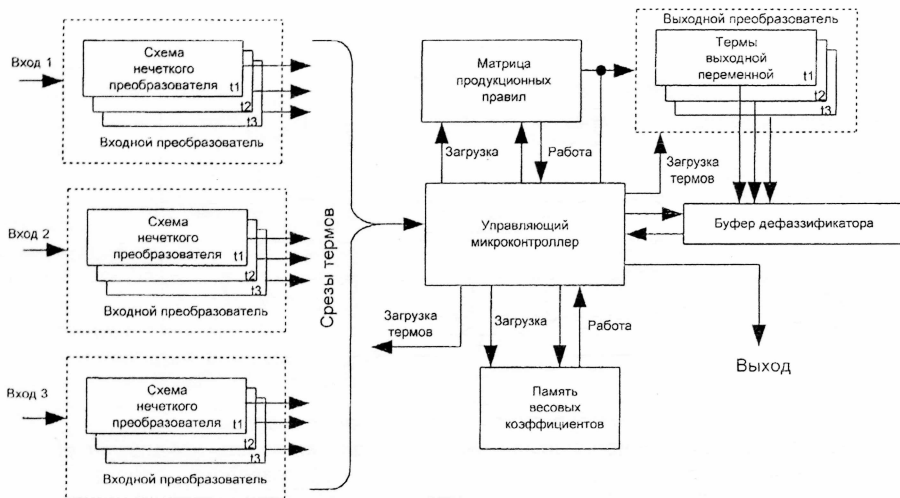


Рис.10. Структурная схема блока нечеткого управления.

Схемы нечетких преобразователей осуществляют преобразование реальных значений входных величин в значения срезов функций принадлежности. Предложено построить нечеткие преобразователи как табличный вычислитель, что обеспечит максимальное быстродействие работы схемы, и возможность программирования произвольного вида функции принадлежности.

В качестве элемента, на основе которого можно реализовать такой вид преобразования автором предложено использовать схемы статической памяти. Нормализованное значение лингвистической переменной (младшие разряды) и номер терма (старшие разряды), в котором осуществляется преобразование, образуют код, подаваемый на адресные разряды схемы памяти. После этого, подав сигнал разрешения работы, на шину данных преобразователем будет выдано соответствующее значение среза.

Полученные значения срезов считываются микроконтроллером, который проводит процедуру нечеткого вывода на основе набора продукционных правил, хранящихся в матрице продукционных правил. В качестве элемента, позволяющего реализовать данную структуру автором предлагается использование дешифратора на основе микросхемы памяти. Суммарное количество термов при этом не должно превышать разрядность шины адреса используемой микросхемы. Каждому правилу

может быть поставлен в соответствие весовой коэффициент, набор которых хранится в памяти весовых коэффициентов.

Поскольку в системе используются специализированные алгоритмы, ориентированные на быстрое проведение операций нечеткого вывода, то к управляющему микроконтроллеру не предъявляются специальные требования по быстродействию. Нечеткие преобразования величин и кодирование продукционных правил осуществляются специальными схемами на основе микросхем статической памяти.

Процедура дефаззификации проводится контроллером на основе информации в буфере дефаззификатора, для заполнения которого контроллер использует рассчитанные выходы правил и нечеткие преобразователи выходной переменной. Результатом расчета является значение выходной переменной.

Предложен принцип организации дефаззификатора, разработан алгоритм его работы, который отличается невысокими требованиями к оперативной памяти и потому пригоден для использования в компактных встраиваемых системах управления.

Дефаззификация проводится в два этапа. На первом этапе вектор срезов $\vec{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ поэлементно умножается на вектор весовых коэффициентов $\vec{w}'$. Полученный вектор накладывается на термы выходной переменной и производится формирование фигуры, записываемой в буфер дефаззификатора.

На втором этапе дефаззификации производится непосредственно вычисление выходного значения, которое является выходом системы нечеткого логического вывода. Вычисление производится при помощи метода, который можно назвать "метод накопления средних". Этот, предложенный автором, метод отличается минимальными требованиями к оперативной памяти и базируется на операциях, легко выполняемых двумя командами микропроцессора: сложения с переносом и циклического сдвига вправо.

Важной характеристикой системы нечеткого вывода является общее время выполнения вывода td (индекс d означает *deduction*).

При использовании микроконтроллера Intel 80C51, работающего на частоте 12МГц, время выполнения элементарной инструкции составляет 1 мкс. для большинства команд, и 2 мкс. для остальных команд. При этом наибольшее время ~100мс тратится на процедуру дефаззификации, оно в основном и определяет время выполнения нечеткого вывода. С учетом этого обстоятельства производительность системы составляет от 5 до 25 нечетких логических выводов в секунду, что является удовлетворительным показателем для решаемых задач.

Рассмотрены, также, вопросы, касающиеся аппаратной реализации элементов адаптивных систем нечеткого вывода (АСНВ). Были выделены основные направления, которые представляется целесообразным использовать для решения поставленной задачи. Был сделан вывод что наиболее эффективно элементы АСНВ могут быть реализованы на схемах программируемой логики высокой степени интеграции и цифровых сигнальных процессорах. В этом случае можно добиться высокой производительности за счет распараллеливания вычислений.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные научно-технические результаты:

1. Разработана архитектура системы управления, ориентированная на работу в условиях неопределенности, и основанная на принципах нечеткого логического вывода и ситуационного управления.

2. Для задач управления движением мобильных роботов с возможностью априорного вербального задания знаний была разработана методика, основанная на представлении знаний о цели движения в виде нечетких продукционных правил.
3. На основе принципов нечеткой кластеризации предложены методы распознавания ситуаций, возникающих при движении робота. Для реализации предложенных методов разработаны соответствующие алгоритмы.
4. Предложен алгоритм обучения адаптивной системы нечеткого вывода, работоспособность которого подтвердилась при решении задачи управления конфигурацией шасси мобильного робота.
5. Предложены схемотехнические решения, позволяющие аппаратно реализовать основные компоненты системы управления.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что предложенный автором метод управления движением мобильного робота позволяет построить систему управления для такого робота с вербальным формулированием нечетких продукционных правил, отражающих цель движения.

Предложенный метод адаптивного управления движением мобильного робота позволяет обеспечить обучение робота по действиям человека-оператора.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Киселев Д.В., Ющенко А.С. Нечеткое управление поведением мобильных роботов // Вестник МГТУ. - 2001. - №1. - С.86-99.
2. Ющенко А.С., Киселев Д.В., Григорьев А.А. Ситуативное поведение манипуляционных роботов в условиях неопределенности // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Материалы международного научно-практического семинара. - Коломна, 2001. - С.305-310.
3. Ющенко А.С., Киселев Д.В., Вечканов В.В. Нечеткое управление поведением мобильных роботов // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий: Материалы всероссийской научно-технической конференции. - Улан-Уде, 2001. - С.9-12.
4. Ющенко А.С., Киселев Д.В. Ситуационный подход к организации поведения мобильного робота в условиях неопределенности // Мехатроника. - 2000. - №5. - С.10-15.
5. Киселев Д.В., Ющенко А.С., Вечканов В.В. Адаптивная система нечеткого управления мобильным роботом // Мехатроника. - 2002. - № 1. - С.20-26.
6. Ющенко А.С., Киселев Д.В. Ситуационный подход к организации поведения мобильного робота в условиях неопределенности // Экстремальная робототехника: Материалы XI всероссийской научной конференции. - СПб., 2000. - С.52-59.
7. Система нечеткого управления конфигурацией шасси мобильного робота / Д.В.Киселев, А.С.Ющенко, В.В.Вечканов, Ю.А.Коротавев // Экстремальная робототехника: Материалы XII всероссийской научной конференции. - СПб., 2000. - С.119-129.
8. Киселев Д.В. Система нечеткого управления поведением мобильных роботов // Экстремальная робототехника: Материалы XII всероссийской научной конференции. - СПб., 2000. - С.130-138.
9. Управление мобильным роботом с использованием фильтра Калмана / С.П.Зенкевич, А.В.Назарова, Д.В.Киселев и др. // Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы всероссийской научной школы-конференции. - Москва, 2000. - С.28 - 41.

Подписано к печати 11.11.02г. Объём 1.0.п.л., Тир. 100, Зак. 69Т

Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана.