

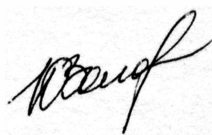
На правах рукописи

Володин Юрий Сергеевич

**ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ОБЪЕМНОГО
ЗРЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
МОБИЛЬНОГО РОБОТА**

Специальность 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана

**Научные
руководители:**

Доктор технических наук, профессор
Норенков Игорь Петрович

Кандидат технических наук, доцент
Михайлов Борис Борисович

**Официальные
оппоненты:**

Доктор физико-математических наук,
профессор
Соколов Сергей Михайлович

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1988131

Володин Ю.С. Телевизионная

Кандидат технических наук, доцент
Трипольский Павел Эдуардович

организация:

75

Государственный научный центр РФ
ЦНИИ РТК (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 27 декабря 2011 г. в 14.30 на заседании
диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском
Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул. д. 5.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, просим отсылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я
Бауманская ул. д. 5, ученому секретарю совета Д 212.141.02, ауд.
613М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н., доцент
Муратов И.В.

25.12.11

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка робототехнических систем для замены человека в экстремальных и опасных для жизни условиях является приоритетной задачей робототехники. Мобильные роботы сегодня используются при проведении спасательных операций, разборе завалов после землетрясений, выполняют широкий спектр работ для ликвидации последствий разрушений.

Для дистанционного управления мобильным роботом обычно используются системы технического зрения. Но распознать объект или захватить его манипулятором может быть сложно при недостаточной освещенности, в условиях неизвестной среды или сложной сцены. Для мобильных роботов, действующих автономно, традиционные СТЗ требуют от робота совершения гностических движений для получения дополнительной информации о структуре сцены и более сложных алгоритмов управления, комплексизирующих информацию с датчиков различных типов. Системы объемного зрения позволяют справиться с данными задачами лучше, благодаря измерению дальности до объектов и воссозданию трехмерной структуры наблюдаемой сцены. Однако существующие системы объемного зрения на основе сканирующих лазерных дальномеров требуют большого времени для получения трехмерного изображения сцены и не могут использоваться в процессе движения мобильного робота. Применение стереосистем накладывает повышенные требования к мощности бортового компьютера, а поскольку надежность их работы зависит от условий освещения, во многих случаях необходима дополнительная подсветка. Поэтому разработка систем объемного технического зрения, обеспечивающих возможность работы в сложных условиях видимости при движении мобильного робота без остановки, является актуальной научно-технической задачей.

В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой телевизионной системы объемного зрения (ТСОЗ), основанной на методе структурированной подсветки. Достоинством такой системы является возможность работать при недостаточном освещении и в полной темноте. Разработанная система осуществляет съемку с высокой скоростью, что позволяет получать объемное описание сцены в процессе движения мобильного робота. По объемному описанию сцены, формируемому системой, можно проводить измерения, осуществлять поиск объектов на сложном фоне, осуществлять автоматическую идентификацию объектов и типовых ситуаций для принятия решений в системе управления мобильным роботом.

Разработками систем объемного зрения для мобильной робототехники заняты ведущие исследовательские центры в нашей стране и за рубежом. Среди крупнейших академических учреждений, ведущих подобные работы, нужно отметить Стэндфордский университет (США), Оксфордский университет (Великобритания), INRIA (Франция). В нашей стране это: ЦНИИ РТК, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка и исследование телевизионной системы объемного зрения для мобильного робота, создание необходимого программно-алгоритмического обеспечения. В соответствии с этим в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка метода измерения координат точек поверхности сцены, алгоритмического обеспечения и программных средств формирования объемного описания рабочей сцены.
2. Разработка методики калибровки системы объемного зрения, исследование точности измерений координатной информации.
3. Разработка метода построения много ракурсного объемного описания сцены.
4. Разработка алгоритмов анализа объемного описания сцены, сегментации сцены на отдельные объекты, идентификации ситуации по объемному описанию.
5. Разработка макета ТСОЗ, проверка работоспособности макета. Проведение экспериментального исследования системы объемного зрения и системы управления мобильным роботом.
6. Проведение испытаний системы в составе робототехнического комплекса.

Методы исследования. Поставленные задачи были решены с привлечением классических методов теории кодирования и передачи информации, теории графов, математического аппарата цифровой обработки изображений, методов математической статистики и теории распознавания образов. Проверка работоспособности алгоритмов, исследование точностных характеристик системы осуществлялись при помощи численного моделирования, проведением экспериментального исследования в лабораторных условиях и испытаний системы на мобильном роботе.

Научная новизна работы. Разработан новый метод кодирования сигнала опорной подсветки и эффективные алгоритмы обработки изображений и декодирования сигнала. Предложен метод объединения результатов измерений сцены с нескольких неизвестных ракурсов для построения много ракурсного объемного описания для осмотра объектов сцены. На основе данного метода реализованы алгоритмы регистрации траектории перемещения мобильного робота и построения трехмерной карты помещения. Разработана математическая модель системы объемного зрения и предложен метод калибровки. Предложен способ использования объемного описания для управления движением мобильного робота. Полученное описание рабочей зоны мобильного робота позволило решить задачи обнаружения препятствий, их идентификации, измерения линейных размеров, определения положения и ориентации препятствий.

Практическая ценность и внедрение. В работе предложен информационно-измерительный комплекс объемного технического зрения, основанный на методе структурированной подсветки, предназначенный для управления движением мобильного робота, работающего автономно в условиях

недетерминированной среды. Координатная информация, предоставляемая системой объемного зрения, позволяет эффективно решать задачи, связанные с оценением размеров, положения и ориентации объектов рабочей зоны робота. Объемное описание сцены в направлении движения робота дает возможность автоматического обнаружения и идентификации препятствий для корректировки курса мобильного робота. Достоинством предлагаемой системы является возможность получения и анализа трехмерной координатной информации в масштабе реального времени, что позволяет использовать результаты анализа для управления движением мобильного робота. Предоставление объемного описания сцены и результатов измерения координат объектов оператору на посту управления помогает принимать решения при дистанционном управлении мобильным роботом, облегчает труд оператора, повышает эффективность управления.

Результаты экспериментального исследования макетного образца системы свидетельствуют о применимости заложенных технических и алгоритмических решений. Достигнутые тактико-технические характеристики системы соответствуют современным требованиям практических задач робототехники. Результаты исследования могут быть использованы при создании робототехнических комплексов, для различных областей применения, включая промышленную, аэрокосмическую и экстремальную робототехнику.

Материалы диссертации были использованы в НИР, проводимой НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках темы «Разработка технологий и создание робототехнических и кибернетических систем обеспечения безопасности и противодействия терроризму» в 2006 году. Созданный экспериментальный образец телевизионной системы объемного зрения принимал участие в нескольких выставках и используется в НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана при выполнении научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе при изучении курсов «Сенсорные системы роботов» и «Адаптивные системы управления».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на:

- Конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2003», Москва, 2003;
- 13-й международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению Graphicon'2003, Москва, 2003;
- 15-й международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2004;
- 16-й международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург, 2005;
- Научном семинаре по робототехническим системам, Москва, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2008;
- 20-й международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», с. Дивноморское, Геленджик, 2009;

- VI-й международной научно-технической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», Коломна, 2011;
- Научных семинарах НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003-2011 гг.

Публикации. Результаты диссертационной работы нашли отражение в 11 научных трудах, среди которых 9 статей, в том числе 2 публикации в издании из перечня ВАК, и 2 отчета по НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 208 печатных страниц (включая 5 страниц приложений), 133 рисунка, 8 таблиц. Библиография содержит 71 наименование, из них 56 иностранных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена область исследования, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, дана структура работы.

В первой главе рассмотрена задача управления движением мобильного робота внутри помещения, план которого известен до начала движения. Ситуация не является полностью детерминированной, и на пути мобильного робота могут оказаться неизвестные заранее препятствия. Появление препятствий обусловлено отсутствием полной информации о расположении объектов на плане помещения, а также непрогнозируемыми обстоятельствами, такими как, закрытые двери, перемещенные или упавшие объекты. Подобный сценарий работы возникает во многих областях использования мобильных роботов. Проведенный анализ выявил основные трудности и ограничения, связанные с использованием традиционных двумерных (2D) систем технического зрения для дистанционного и автоматического управления мобильным роботом. Среди них отмечены трудоемкость работы оператора, управляющего мобильным роботом дистанционно, особенно при плохой видимости и недостаточном освещении, в условиях сложного фона, при работе с малоконтрастными объектами.

В рассматриваемой задаче для управления движением робота необходима система зрения, работающая в масштабе реального времени и обеспечивающая съемку и обработку данных в процессе движения мобильного робота без остановки. Важным требованием является помехозащищенность системы, устойчивость работы при различных условиях внешнего освещения, неоднородном фоне и сложном составе сцены. В главе проанализированы особенности известных систем объемного зрения: сканирующих лазерных дальномеров, стереосистем, систем со структурированной подсветкой. На основе проведенного анализа делается вывод о целесообразности использования метода структурированной подсветки для решения задачи.

Во второй главе дается описание метода структурированной подсветки и разрабатывается математическая модель ТСОЗ. Оптические системы

телекамеры и блока подсветки рассматриваются в геометрикооптическом приближении. Нелинейные искажения описываются при помощи модели радиальной дисторсии. Получены выражения для вычисления пространственных координат точки методом триангуляции в случае одномерной и двумерной структуры подсветки.

Центральной проблемой создания системы объемного зрения со структурированной подсветкой является выбор структуры подсветки, обеспечивающей однозначное решение задачи вычисления координат точки сцены. Как показано во второй главе, периодическая линейчатая структура не позволяет однозначно определить координаты точки в случае значительных перепадов глубины сцены. Для того чтобы однозначно идентифицировать фрагменты структуры подсветки по её изображению, в работе был предложен метод кодирования подсветки. Проведенное сравнительное исследование методов показало, что для анализа рабочей сцены во время движения мобильного робота наиболее целесообразно использовать пространственное кодирование подсветки. В соответствии с этим была разработана структура и способ кодирования подсветки, показанные на рис. 1.

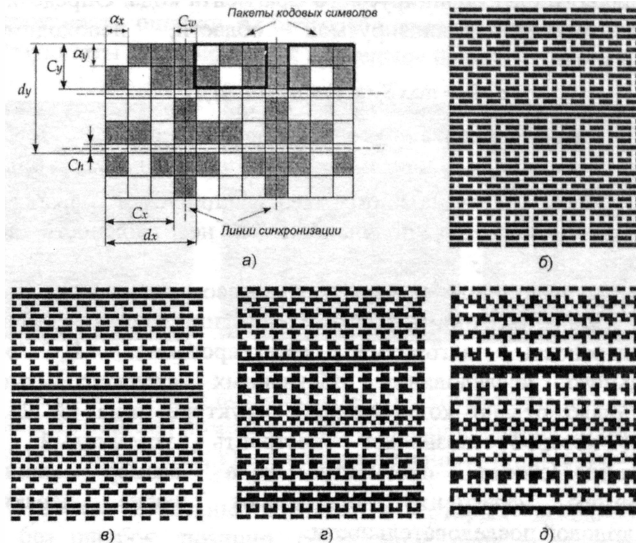


Рис. 1. Пространственное кодирование подсветки.

а) – параметрический синтез структуры; б) – структура $C_x=1, C_y=1$; в) $C_x=3, C_y=1$; г) $C_x=3, C_y=2$; д) $C_x=5, C_y=3$

Особенностью структуры является использование двух координат для пространственного кодирования. Данный способ кодирования позволяет однозначно декодировать элемент подсветки и вычислить пространственные координаты точки объекта. Для повышения устойчивости детектирования структуры использовалось 2 уровня сигнала. Помимо кодовых символов в

состав структуры введены символы синхронизации, служащие для облегчения детектирования структуры. В качестве характеристики соотношения используемых кодовых символов и символов синхронизации введем параметр плотность кода как отношение площади, занимаемой кодовыми символами, к общей площади структурной картины, включая символы синхронизации:

$$\rho = \frac{C_x \cdot C_y \cdot S_a}{(C_x \alpha_x + C_w)(C_y \alpha_y + C_h)},$$

где $S_a = \alpha_x \alpha_y$ - площадь кодового символа. В целях сравнения различных структур удобно положить $C_w = \alpha_x$, $C_h = \alpha_y$, тогда $\rho = \frac{C_x \cdot C_y}{(C_x + 1)(C_y + 1)}$. Плотности

кода для структур, показанных на рис. 1 б)-д) равны соответственно $\rho_{(1,1)} = 1/4$, $\rho_{(3,1)} = 3/8$, $\rho_{(3,2)} = 1/2$, $\rho_{(5,3)} = 5/8$. При пространственном кодировании для определения координат точки в системе координат проекционной системы используются пространственные соотношения между элементами подсветки. В качестве характеристики пространственного кода введем параметр $d = (d_x, d_y)^T$ - размер минимального идентифицируемого фрагмента кода. Определим его как максимальный размер анализируемой области, необходимой для идентификации точки:

$$d : S_d = \max_{x,y} S_d(x, y) = \max_{x,y} (d_x \cdot d_y),$$

где $S_d(x, y)$ - площадь фрагмента d в точке с координатами x и y . Для объектов сцены, размеры которых $W_x < d_x$ или $W_y < d_y$, где W_x , W_y - размеры объекта, а d_x , d_y - размеры проекции минимального идентифицируемого фрагмента кода, объемное описание не будет получено из-за невозможности выполнить декодирование.

Для структуры, показанной на рис. 1, более высокая плотность кода ведет к уменьшению размера d минимального идентифицируемого фрагмента, но повышает сложность алгоритма детектирования. В результате экспериментального исследования полученных структур (рис. 1б-д) предпочтение было отдано кодированной структуре типа (3, 2) рис. 1г, конфигурация которой позволяет построить устойчивый алгоритм детектирования. Помимо плотности кода размер минимального идентифицируемого фрагмента определяют также характеристики используемой кодовой последовательности.

Для построения системы, основанной на принципе пространственного кодирования подсветки, необходимо выбрать кодовые последовательности, которые позволили бы определять координаты каждого элемента структуры, анализируя некоторую локальную окрестность вокруг него. Данная задача была решена при помощи последовательностей, обладающих свойством «скользящего окна». Для последовательностей, обладающих свойством «скользящего окна», таких как М-последовательности, декодирование можно выполнить однозначно. Но только в том случае, если в пределах окна не произошло ошибок детектирования символов. При наличии ошибок в

декодируемой последовательности координаты всех окон, содержащих неверные символы, будут определены неправильно. Построение последовательностей со свойством «скользящего окна», обладающих способностью корректировать ошибки, является важной практической задачей. Отдельные вопросы создания кодов, исправляющих ошибки, на основе М-последовательностей затрагиваются в литературе, однако в целом построение корректирующих кодов из последовательностей и массивов со свойством «скользящего окна» мало изучено. В данной работе автором было выполнено исследование помехоустойчивости кодирования, основанного на М-последовательностях, а также предложены способы улучшения корректирующих свойств последовательностей со свойством «скользящего окна», такие как: декодирование по расширенному окну, генерация последовательностей с заданным минимальным кодовым расстоянием d_{min} .

Для сравнения корректирующих свойств различных последовательностей было проведено численное моделирование. В сообщения, закодированные с помощью разных последовательностей, вносилась помеха, моделирующая заданный уровень вероятности ошибки в канале связи. В качестве критерия для сравнения помехоустойчивости кодирования использовалась зависимость средней вероятности ошибки на бит сообщения P_b от вероятности ошибки в канале p . Результаты моделирования приведены на рис. 2.

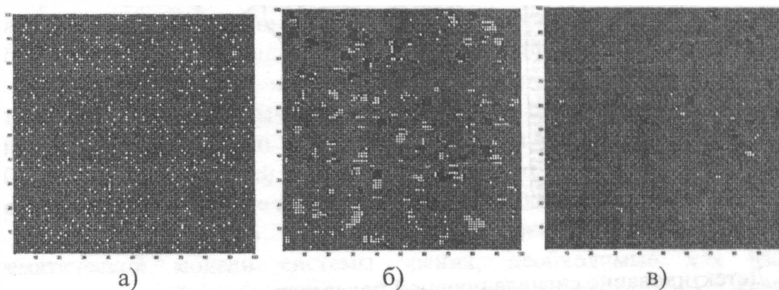


Рис. 2. Сравнительное исследование помехоустойчивости методов кодирования. а) – сигнал помехи $p=0.1$; б) – декодирование по расширенному окну $d_{min}=3$, $P_b=0.15$; г) – последовательность $d_{min}=5$, $P_b=0.025$

Серым цветом показаны позиции, в которых декодирование было выполнено без ошибок, позиции, содержащие ошибки показаны белым и черным цветами. Проведенное исследование показало, что при наличии ошибок детектирования символов, декодирование М-последовательностей приводит к многократному увеличению количества ошибок. Декодирование М-последовательности по расширенному окну означает использование кодовых слов большего размера ($l=4$), чем порядок характеристического многочлена последовательности ($m=2$). Данный подход позволил построить линейный код с минимальным кодовым расстоянием $d_{min}=3$, который позволяет исправлять одиночные ошибки в пределах окна декодирования (рис. 2б). Для генерации последовательности с минимальным кодовым расстоянием $d_{min}=5$ был

разработан алгоритм поиска последовательностей со свойством «скользящего окна» с заданным кодовым расстоянием между подстроками. Использование кодовой последовательности, полученной при помощи данного алгоритма, дало возможность уменьшить количество ошибок в среднем в 4 раза при вероятности ошибки на бит в исходном сигнале $p=0.1$. По результатам моделирования данная последовательность обладает лучшими корректирующими свойствами (рис. 2в).

На основании результатов, полученных во второй главе, было разработано алгоритмическое обеспечение для получения объемного описания сцены. Последовательность обработки данных показана на рис. 3.

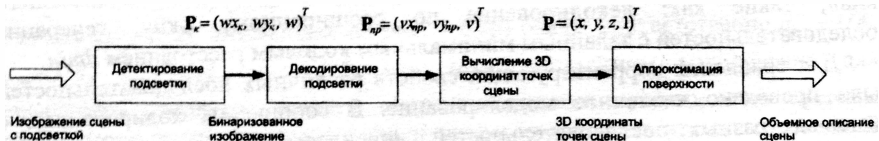


Рис. 3. Последовательность обработки данных для получения объемного описания сцены

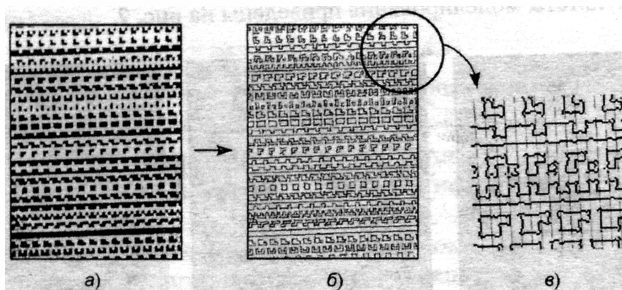


Рис. 4. Детектирование сигнала опорной подсветки. а) – исходное изображение; б) – изображение после выделения контуров; в) – фрагмент сегментированной кодовой структуры

При работе с реальными объектами неоднородность отражающих свойств поверхности объектов, наличие внешних источников излучения, резкие перепады рельефа поверхности приводят к необходимости построения специализированных алгоритмов обработки изображений (рис. 4). Алгоритм детектирования подсветки включает в себя этапы фильтрации, выделения контуров, бинаризации, связывания контуров. В основе алгоритма декодирования – сравнение детектированной кодовой структуры с исходной кодовой структурой. Алгоритм декодирования реализует стратегию декодирования по принципу максимума правдоподобия. Эта стратегия минимизирует вероятность ошибки декодера. Далее решается триангуляционная задача, и вычисляются трехмерные координаты точек сцены. В качестве способа представления объемного описания объекта выбрана

кусочно-линейная аппроксимация поверхности. На рис. 5 дано изображение объекта со структурированной подсветкой (рис. 5а), детектированная кодовая структура (рис. 5б), визуализация поверхности с ракурса, отличающегося от ракурса съемки (рис. 5в).

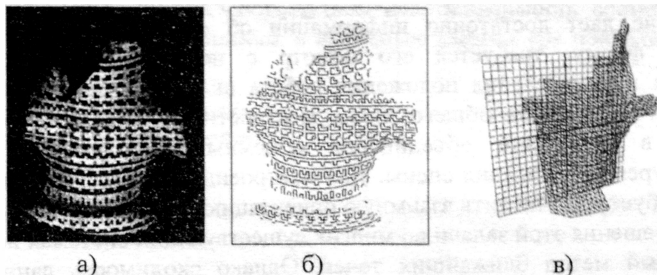


Рис. 5. Построение объемного описания объекта «Амфора»

Третья глава диссертационной работы посвящена калибровке телевизионной системы объемного зрения и исследованию точности измерения координат. Целью калибровки является определение физических параметров оптических систем телекамеры и блока подсветки, а также вычисление геометрических параметров триангуляционной схемы. В диссертации проанализированы различные подходы к построению калибровочной сцены. На основе анализа была предложена методика калибровки. Основную сложность при калибровке представляет выделение реперных точек на изображениях эталонного объекта и вычисление координат центров реперов с высокой точностью. С этой целью разработан алгоритм поиска центров реперов на изображении. Полученный алгоритм позволил определить центры проекций реперных точек с субпиксельной точностью (0.1-0.2 пикс).

Таким образом, в процессе калибровки определены параметры математической модели системы зрения, необходимые для измерения координат и линейных размеров объектов рабочей зоны. Метод калибровки был проверен экспериментально и проведено исследование точности измерения координат. Цель данного исследования – определение систематической и случайной составляющих ошибки, получение вероятностных моделей и оценка параметров распределения выходных данных алгоритмов. Были получены параметры распределения случайной составляющей ошибки измерения в зависимости от дальности до объекта и его положения в поле зрения системы. Также было проведено сравнительное исследование точности нескольких методов калибровки. В ходе исследования выяснены параметры калибровочной сцены, оказывающие наибольшее влияние на систематическую ошибку измерений, вносимую калибровкой. Получены зависимости точности от количества реперных точек, их взаимного расположения, точности выделения центров проекций реперов на изображении, положения эталонного объекта в поле зрения системы при калибровке. Разработанный метод калибровки в

дальнейшем использовался для калибровки опытного образца системы объемного зрения.

В четвертой главе диссертации разрабатывается метод построения многоракурсного описания сцены. Во многих практических задачах, связанных с идентификацией или захватом объекта, изображение, полученное с одного ракурса, не дает достаточно информации об объекте. Если объект имеет сложную форму, требуется его осмотр с нескольких ракурсов. Задачи навигации и определения положения робота включают осмотр окружающей среды для построения общего плана местности. Данный план может быть получен в результате объединения объемных описаний и построения многоракурсного описания сцены. Для построения многоракурсного описания сцены требуется вычислить взаимную ориентацию отдельных ракурсов.

Для решения этой задачи во многих существующих системах используется итеративный метод ближайших точек. Однако сходимость данного метода сильно зависит от начального приближения, кроме того метод неприменим для сцен, инвариантных к сдвигу или повороту. Поэтому для вычисления взаимной ориентации ракурсов в диссертации предложен алгоритм, основанный на съемке 2D изображения синхронно с объемным описанием сцены. Для этого в описываемой системе добавлена цветная камера, синхронизированная с камерой ТСОЗ. Новизна подхода заключается в том, что в данном методе используются одновременно и дополняют друг друга информация о геометрии сцены и информация об отражающей способности сцены.

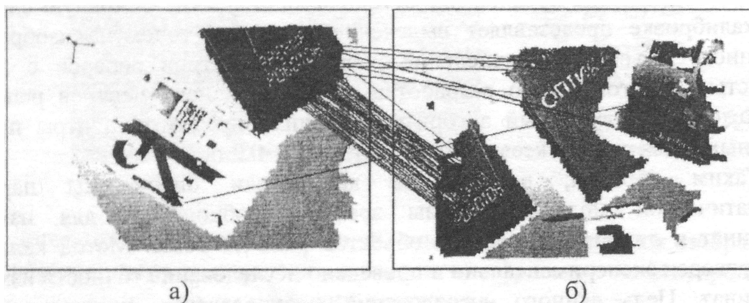


Рис. 6. Сопоставление точек объемных описаний сцены по 2D изображению

Для сопоставления точек объемных описаний, полученных с двух ракурсов, используется 2D изображение. На рис 6а и б показаны объемные описания сцены с проекцией 2D изображения. Соответствие точечных особенностей двух изображений обозначено линиями. Далее для выделенных реперных точек вычисляются трехмерные координаты по известной матрице калибровки 2D камеры. Вычисление взаимной ориентации двух множеств реперных точек выполняется аналитическим методом, минимизируя среднеквадратическое расстояние между соответствующими парами точек. Особенностью алгоритма поиска взаимной ориентации ракурсов является использование методов робастной статистики для получения точного решения

при большом количестве ошибок поиска соответствия реперных точек. Экспериментальные исследования продемонстрировали способность алгоритма вычисления ориентации находить решение в условиях до 90% ошибочных соответствий. На рис. 7а показана зависимость ошибки вычисления ориентации E от количества ошибочных соответствий eps . Зависимость времени работы алгоритма T от количества ошибок в исходных данных eps приведена на рис. 7б.

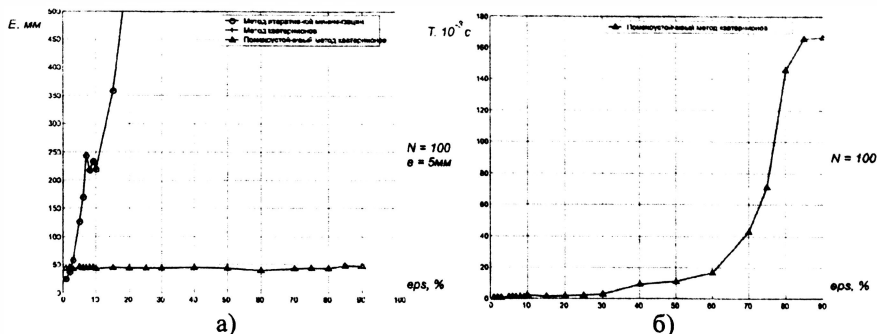


Рис. 7. Экспериментальное исследование алгоритма вычисления ориентации

Эксперименты показали, что предложенный алгоритм позволяет находить решение и в тех случаях, когда начальное приближение для взаимной ориентации ракурсов приводит к попаданию метода ближайшей точки в локальный минимум. Алгоритм применим для сцен, инвариантных к сдвигу или повороту, например, в случае движения робота вдоль плоской стены. Метод построения многоракурсного описания сцены дает возможность вычислять траекторию движения мобильного робота (рис. 8а), что может быть использовано в качестве дополнительного источника информации для задачи навигации. Многоракурсное описание сцены, полученное при осмотре помещения, представляет собой трехмерную карту (рис. 8б), удобную для прокладки маршрута.

Для принятия решения о возможности движения в выбранном направлении необходимо выполнить анализ сцены перед роботом. Он заключается в сегментации сцены на отдельные объекты, измерении их координат и геометрических размеров, а также обнаружении препятствий, преодоление которых невозможно.

В пятой главе диссертации представлены алгоритмы анализа объемного описания сцены и идентификации ситуации по объемному описанию. Для решаемой задачи автором был определен набор типовых ситуаций, характерных для работы внутри помещений, таких как «Стена», «Дверь», «Порог», «Блок» и др. Этой информации достаточно для решения задачи движения в выбранном направлении. При необходимости список препятствий может быть расширен, что потребует добавления процедур идентификации и коррекции курса. Первым этапом анализа сцены является сегментация. В

данной работе было проведено обобщение известных алгоритмов обработки 2D изображений для решения задачи сегментации объемного описания сцены. Сегментация сцены на отдельные объекты выполнялась при помощи алгоритма роста областей, где в качестве критерия сегментации использовались дифференциальные геометрические инварианты – средняя и гауссова кривизны поверхности в точке.

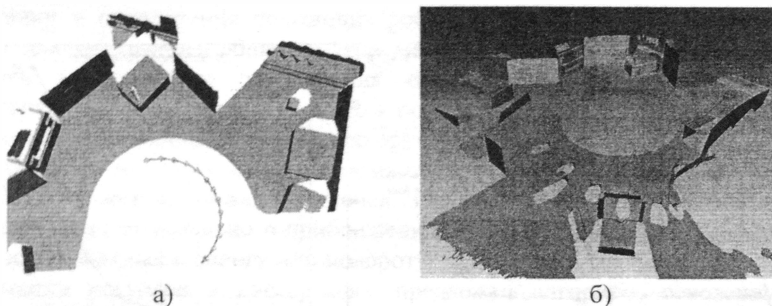


Рис. 8. Применение метода построения многоракурсного объемного описания:
а) - вычисление траектории движения робота, б) – построение трехмерной карты помещения

На основании результатов сегментации построены алгоритмы идентификации и измерения параметров типовых препятствий. Алгоритм идентификации препятствий представляет собой систему нечеткого логического вывода, оперирующую нечеткими признаками объектов-эталонов, которые составляют базу знаний о препятствиях. База данных сцены, полученная на шаге фаззификации, подается на вход нечеткого классификатора, который работает по процедуре нечеткого вывода Мамдани. Выходом алгоритма идентификации для каждого объекта сцены является вектор принадлежности известным классам препятствий, из которого на этапе дефаззификации получаем класс объекта. В качестве метода дефаззификации (приведения к четкости) использован метод первого максимума. Заметим, что носитель каждого из нечетких множеств, соответствующих классам препятствий, это единственная точка (синглетон). Разработанные алгоритмы были проверены на реальных объектах и сценах. Для этого был создан макет системы объемного зрения и необходимое программное обеспечение.

Шестая глава диссертации посвящена экспериментальному исследованию системы объемного зрения. В рамках НИР, проводимой НУЦ «Робототехника», был изготовлен опытный образец ТСОЗ и разработано программное обеспечение, реализующее алгоритмы формирования объемного описания, сегментации сцены, идентификации препятствий и измерения их параметров, необходимые для функционирования системы объемного зрения (рис. 9).

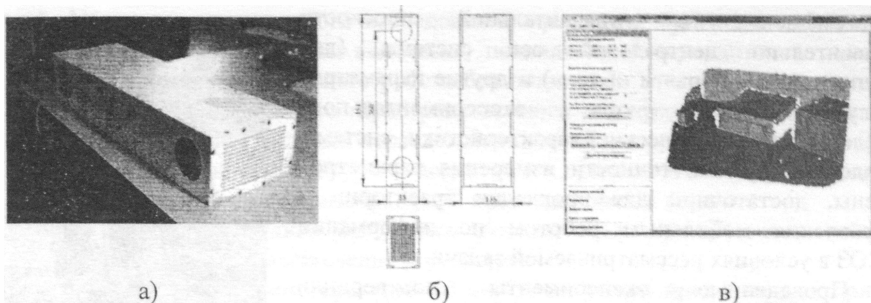


Рис. 9. Опытный образец ТСОЗ. а) – внешний вид, б) – габаритный чертеж, в) – главное окно программы

В состав ТСОЗ входит цифровая камера на базе ПЗС матрицы высокой чувствительности разрешением 1392x1040 пикселей и импульсный источник подсветки, работающие в видимом оптическом диапазоне спектра. В результате серии автономных испытаний опытного образца ТСОЗ получены его основные технические характеристики (табл. 1).

Таблица 1
Технические характеристики экспериментального образца ТСОЗ

Параметр	Значение
Размеры рабочей зоны по дальности (диапазон), м	0.5 – 4
Угловые размеры поля зрения, градусы	
- по горизонтали	38.7
- по вертикали	30.8
Угловое разрешение, рад	0.004
Ошибка измерения дальности в пределах сцены, среднеквадратическое отклонение, мм	5.5
Допустимый диапазон внешней освещенности, люкс	0-1000
Длительность экспозиции одного кадра, мс	0.2
Частота кадров, Гц	7.7
Скорость измерения координат, точек/с	350 000

В диссертации дано сравнение технических характеристик системы с характеристиками сканирующих лазерных дальномеров. Среди достоинств разработанной системы отмечены высокое пространственное разрешение, более высокая точность и скорость съемки. При этом разработанная система имеет меньшее угловое поле зрения и ограничена по дальности по сравнению с лазерными дальномерами.

В главе представлены результаты экспериментального исследования работы системы с реальными объектами. В ходе экспериментов были получены зависимости точности измерения параметров типовых препятствий от их конфигурации и положения в поле зрения системы. В частности, измерялись: дальность до препятствия, высота (для препятствий «Порог» и «Блок»), ширина

и смещение в горизонтальной плоскости относительно центральной оси системы (для препятствий «Дверь» и «Блок») и другие параметры. Полученные в ходе экспериментального исследования технические характеристики системы свидетельствуют о точности измерения параметров сцены, достаточной для прокладки траектории и управления мобильным роботом по информации ТСОЗ в условиях рассматриваемой задачи.

Проведенные эксперименты подтвердили предположения о невозможности использования ТСОЗ для получения объемного описания полупрозрачных объектов, объектов с зеркально полированной поверхностью, что является ограничением используемого метода измерения координат. Эксперименты показали недостаточную надежность измерения координат и размеров таких объектов.

Испытания ТСОЗ в составе робототехнического комплекса (рис. 10) продемонстрировали эффективность применения системы для обнаружения препятствий на пути движения мобильного робота, измерения их размеров и положения. Во время движения мобильного робота система зрения осуществляла непрерывный контроль состояния рабочей зоны непосредственно перед роботом. При поступлении сигнала о наличии препятствия в направлении движения, система управления робота планировала маневр обхода препятствия и выполняла корректировку курса. Результаты измерений, полученные от системы объемного зрения, использовались для параметрической адаптации маневров. Если препятствие оказывалось непреодолимым, робот останавливался. Специфика эксперимента состояла в том, что у робота не было датчиков обратной связи, и управление движением осуществлялось только по информации системы объемного зрения.

В результате испытаний было показано, что задача управления мобильным роботом, поставленная в первой главе, решается успешно. Принятие решения о возможности движения в выбранном направлении и выбор маневра объезда препятствия может эффективно осуществляться с использованием разработанной системы объемного зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научно-технические результаты:

1. Разработана ТСОЗ, основанная на методе структурированной подсветки, для управления движением мобильного робота, работающего автономно в условиях недетерминированной среды.

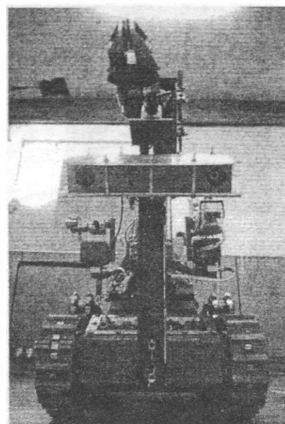


Рис. 10. Мобильный робот МРК-РП с установленной на борту ТСОЗ

2. На основе проведенного исследования предложен оригинальный метод кодирования структуры подсветки, позволяющий осуществлять съемку при движении мобильного робота без остановки. Эта задача решена при помощи позиционного пространственного кодирования подсветки с использованием кодовых последовательностей с коррекцией ошибок. Для разработанной структуры подсветки представлены эффективные алгоритмы обработки изображений и декодирования сигнала.
3. Разработана методика калибровки системы объемного зрения, получены оценки точности вычисления координат.
4. Для построения многоракурсного описания сцены предложен алгоритм автоматического вычисления взаимной ориентации ракурсов съемки, который не зависит от начального приближения, и применим для сцен, инвариантных к сдвигу или повороту.
5. Разработаны алгоритмы анализа объемного описания сцены, включающие алгоритм сегментации и алгоритмы идентификации препятствий, которые позволяют распознавать обстановку в рабочей зоне мобильного робота и принимать решение о совершении маневра обхода препятствия.
6. Изготовлен опытный образец системы объемного зрения. Проведено автономное экспериментальное исследование опытного образца ТСОЗ и испытания системы в составе робототехнического комплекса, подтвердившие работоспособность и эффективность предложенных методов и алгоритмов.

Список работ по теме диссертации:

1. Володин Ю.С., Михайлов Б.Б., Ющенко А.С. Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы пространственного зрения // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник научных трудов VI-й Международной научно-технической конференции. – М., 2011. – Т.1. – С. 372-380.
2. Володин Ю.С. Метод кодирования структурной подсветки для телевизионной системы объемного зрения робототехнического комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №11. – С. 35-42.
3. Володин Ю.С., Михайлов Б.Б. Использование телевизионной системы объемного зрения для обнаружения препятствий // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции. – СПб., 2009. – Т. 5: Экстремальная робототехника. – С. 368-370.
4. Volodin Y.S. Using Three-dimensional Vision System for Obstacles Detection // Extreme robotics. Nano-, micro- and macrorobots: Proceedings of International Conference with Elements of Scientific School for Youth. – СПб., 2009. – С. 179-180.

5. Телевизионная система технического зрения: Отчет о научно-исследовательской работе БТ-КП.2/02-СТЗ (промежуточный, этап 3) / НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н.Э. Баумана; Рук. Михайлов Б.Б; исп.: Володин Ю.С. [и др.]. – № ГР 0120100054602. – Инв. № 01201000822. – М., 2006. – 43 с.
6. Телевизионная система технического зрения: Отчет о научно-исследовательской работе БТ-КП.2/02-СТЗ (промежуточный, этап 2) / НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н.Э. Баумана; Рук. Михайлов Б.Б; исп.: Володин Ю.С. – № ГР 0120100054602. – Инв. № 01201000822. – М., 2005. – 25 с.
7. Володин Ю.С., Орлов А.В. Нечеткое сопоставление стереоизображений для построения карты в условиях недостаточной видимости // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды восьмой Всероссийской научно-практической конференции. – СПб., 2005. – Т. 5: Экстремальная робототехника. – С. 322-327.
8. Володин Ю.С., Орлов А.В., Михайлов Б.Б. Калибровка системы трехмерного зрения со структурной подсветкой при помощи плоских объектов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды восьмой Всероссийской научно-практической конференции. – СПб., 2005. – Т. 5: Экстремальная робототехника. – С. 314-322.
9. Володин Ю.С. Система трехмерного зрения для поиска и идентификации объектов в экстремальных условиях // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды седьмой Всероссийской научно-практической конференции. – СПб., 2004. – Т. 4: Экстремальная робототехника. – С. 324-331.
10. Volodine I. Statistical Error Model of Active Triangulation Method for CAI // Proceedings of Graphicon'2003. – Moscow, 2003. – С. 173-176.
11. Володин Ю.С. Анализ точности измерения координат точек поверхности при калиброванной стереосъемке // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы: Труды V-й молодежной научно-технической конференции. – М., 2003 – С. 145-148.