

На правах рукописи



БАБИЧ Андрей Михайлович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАВИГАЦИИ
МОБИЛЬНОГО РОБОТА С МОНОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет» на кафедре «Информационные компьютерные технологии».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Роганов Владимир Робертович.

Официальные оппоненты: **Михеев Михаил Юрьевич,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Информационные технологии
и системы» ФГБОУ ВПО «Пензенский
государственный технологический
университет»;
Урнёв Иван Васильевич,
доктор технических наук, главный
научный сотрудник
научно-исследовательского отдела
ФГБОУ ВПО «Пензенский
государственный университет».

Ведущая организация – ОАО «Пензенский научно-
исследовательский электротехнический
институт», г. Пенза.

Защита диссертации состоится 19 декабря 2013 года в 13 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, д. 1а / 11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 18 ноября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день автономные мобильные роботы и роботы, управляемые дистанционно, находят всё более широкое применение в таких областях как исследование космического пространства и океанских глубин, опасные производства, устранение последствий техногенных катастроф. Основным требованием, предъявляемым к таким роботам, является их точная ориентация в процессе перемещения в пространстве относительно неподвижных препятствий и подвижных объектов.

Одной из важных задач, решаемых в процессе перемещения мобильного робота, является определение его текущих координат. Для решения этой задачи необходимо предусматривать ввод и обработку визуальной информации об окружающей среде, полученной при навигации робота с помощью систем технического зрения.

Работа систем технического зрения, использующих несколько видеокамер, основана на сопоставлении изображений внешней среды, полученных с двух и более пространственно разнесенных точек мобильного робота. Благодаря пространственному разделению полученных изображений в подобных системах технического зрения определяется необходимая информация о пространственных характеристиках объекта.

Системы технического зрения, использующие одну расположенную на мобильном роботе видеокамеру, располагают единственным изображением и не получают информацию об объёме и удалении окружающих объектов, поэтому их использование предполагает наличие априорных сведений об окружающем их пространстве. Однако получение данных о пространственных характеристиках окружающих объектов также возможно за счёт сопоставления изображений, полученных в различные моменты времени при изменении взаимного положения наблюдателя и объектов (т.е. при наблюдении системой окружающего пространства и отслеживании изменений получаемых визуальных характеристик объектов с течением времени).

При определении навигационной системой местонахождения мобильного робота в пространстве и направления его перемещения требуется определять расстояния до подвижных и неподвижных объектов. Во многих случаях практического использования мобильных роботов оказывается достаточным определять расстояние до неподвижных объектов.

При проектировании мобильного робота, как и других мобильных устройств, особое внимание уделяется снижению массогабаритных показателей базирующихся на них приборов, в том числе и относящихся к системе технического зрения. Однако требования надежности и живучести вынуждают предусматривать в системе технического зрения специальную отдельную видеокамеру для определения дистанции до неподвижных объектов.

В работах научных коллективов ОАО «НИКФИ», группы «Транзас», Massachusetts Institute of Technology, Canadian Aviation Electronics, Defense Advanced Research Projects Agency, а также отечественных и зарубежных ученых Овечкиса Ю.Н., Роганова В.Р., Roberts L., посвященных моделированию

визуально наблюдаемых трёхмерных объектов с качеством, достаточным для профессиональной тренировки глазомера наблюдателя, показана возможность использования безочковых одноканальных систем визуализации. По сравнению с системами визуальной ориентации на основе нескольких видеодатчиков монокулярные системы обладают простотой, надёжностью, их применение позволяет сократить производственные и эксплуатационные расходы. Однако многие вопросы, связанные с получением и обработкой визуальной информации в процессе управления движением автономного мобильного робота, использующего монокулярную систему навигации для определения дистанции до выделенных объектов в условиях помех и искажений изображений, остаются недостаточно проработанными. Это не позволяет расширить масштабы практического применения таких систем. В этой связи тема диссертационного исследования является **актуальной**.

Объектом исследования являются методы навигации мобильных роботов, оборудованных монокулярной системой технического зрения.

Предмет исследования – математические и имитационные модели процессов навигации и определения дистанции до выделенного стационарного объекта с использованием монокулярной системы технического зрения.

Целью диссертационной работы является повышение надёжности и помехоустойчивости систем технического зрения автономных мобильных роботов при определении пространственных характеристик стационарных объектов в процессе навигации.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**.

1. Разработка методики определения пространственных характеристик объекта с учетом условий окружающей среды и состояния автономного мобильного робота, оборудованного монокулярной системой технического зрения.

2. Выявление критериев сопоставления динамических визуальных данных монокулярной системы технического зрения мобильного робота с пространственными характеристиками хранимых образов стационарных объектов.

3. Разработка метода определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта и алгоритмов расчета отклонения робота от заданного курса для формирования управляющего воздействия по коррекции его курса.

4. Разработка модели процесса автоматической локализации и определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по ряду разнесенных во времени его образов, обеспечивающей устойчивую работу монокулярной системы технического зрения в условиях помех и искажений изображений.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались основные положения теории подобия и моделирования, методы цифровой обработки изображений, методы теории нейронных сетей, моделирование в средах 3D Studio Max, Matlab с использованием объектно-ориентированного языка программирования C++.

Научная новизна полученных результатов.

1. Разработана методика определения пространственных характеристик объекта, отличающаяся анализом условий среды и состояния автономного мобильного робота, оборудованного монокулярной системой технического зрения, и комплексным подходом, что обеспечивает повышение помехоустойчивости системы технического зрения.

2. Разработан метод определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта на основе анализа последовательности изображений, полученных при помощи монокулярной системы технического зрения мобильного робота.

3. Разработан метод автоматической коррекции курса мобильного робота во время движения, отличающийся возможностью определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта и вычисления по изменяемым во времени входным данным угла отклонения от заданного курса.

4. Разработана нейросетевая адаптивная модель автоматического определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по его изменяющимся во времени изображениям, отличающаяся использованием двух независимых подсистем нейронных сетей, обеспечивающая устойчивую работу монокулярной системы технического зрения в условиях помех и искажений изображений.

Практическая значимость работы.

Разработанная методика определения пространственных характеристик объекта позволяет расширить возможности использования монокулярных систем технического зрения за счёт совместного использования методов определения пространственных характеристик с учетом условий окружающей среды и состояния автономного мобильного робота.

Использование нейросетевой адаптивной модели дает возможность определять пространственные характеристики выделенного стационарного объекта и корректировать курс автономного мобильного робота с точностью, достаточной для движения мобильного робота по заданной траектории при наличии помех.

Внедрение результатов работы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы в ООО «Видео3» (информационно-ресурсный центр по Пензенской области программы «Робототехника: инженерно-технические кадры инновационной России») для разработки программ перемещения мобильных роботов класса ПРОФИ, в ООО «Новые технологии» при решении задач автоматизированной загрузки пиролизных печей, в ОАО «НПП «Рубин» при решении задач определения расстояний до выделенных объектов, а также внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные компьютерные технологии» Пензенского государственного технологического университета, что подтверждено соответствующими актами.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректным выбором основных допущений и ограничений, обоснованием

критериев и показателей эффективности использования нейросетевых методов для определения расстояния до выделяемых объектов с использованием монокулярной системы ввода визуальной информации, подтверждается результатами имитационного моделирования и экспериментальными данными, полученными при испытаниях опытного образца мобильного робота.

На защиту выносятся.

1. Методика определения пространственных характеристик объекта с учетом условий получения исходных изображений и состояния автономного мобильного робота, оборудованного монокулярной системой технического зрения.

2. Метод определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта по его изменяющимся визуальным характеристикам.

3. Метод вычисления угла отклонения от заданного курса по изменяющимся во времени исходным данным для формирования управляющего воздействия по корректировке курса.

4. Нейросетевая адаптивная модель процесса автоматической локализации и определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по совокупности разнесенных во времени его образов.

Личный вклад автора. Приведённые результаты получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежит: в [1] – разработка математической модели и выполнение расчетов, в [7, 8] – систематизация подходов и обработка численных данных, в [10] – участие в разработке базового исследовательского модуля, в монографии [6] автору принадлежит глава 6.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VI, VIII Всероссийских научно-технических конференциях «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов» (Пенза, 2008, 2010); Международном молодёжном научно-техническом форуме-олимпиаде по приоритетным направлениям развития Российской Федерации (Москва, 2010); Международных научно-технических конференциях «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2011, 2013); XIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2013).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, из них 5 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, автору принадлежит глава в коллективной монографии.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, 4 разделов, основных результатов и выводов по работе, библиографического списка из 139 наименований и приложения. Текст изложен на 154 страницах, содержит 6 таблиц и 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность выбранной темы, обоснованы и сформулированы цель и задачи исследования, обозначены его научная новизна

и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о реализации и внедрении результатов, апробации работы и публикациях.

Первая глава посвящена анализу существующих алгоритмов искусственного интеллекта, используемых системами технического зрения автономных мобильных роботов. Рассмотрены существующие системы навигации автономных мобильных роботов. Выделены системы навигации, основанные на использовании монокулярных систем технического зрения (СТЗ), отмечено, что разработка таких систем базируется на использовании искусственного интеллекта.

Рассмотрены актуальные аспекты применения подходов и методов искусственного интеллекта для решения поставленных задач, существующие модели подобных систем технического зрения, выполнен обзор основополагающих работ в данной области. Определено, что при решении задачи создания системы технического зрения, способной адекватно воспринимать визуальные объекты окружающей среды, можно выделить два основных аспекта задачи: машинное восприятие и машинное понимание.

В процессе восприятия чувствующее живое существо организует свои ощущения физического мира в виде образов и формирует своё внутреннее представление внешнего мира, описывающее «важные» отношения между этими образами. На этапе понимания имеющееся внутреннее представление преобразуется в некоторое выходное сообщение или реакцию. Необходимые для этого действия могут включать сравнение образов своего внутреннего мира с образами реальных или воображаемых миров.

Определено, что на сегодняшний день задача машинного восприятия в связи со сложностью определения пространственных характеристик окружающей среды системой технического зрения, представляет собой наиболее ответственную составляющую общей задачи проектирования автономных роботов.

Очевидно, что монокулярные системы технического зрения в настоящее время достаточно востребованы, однако их функциональные возможности далеко не исчерпаны, а дальнейшее их развитие требует проведения глубоких исследований в области распознавания визуальной информации.

Выполненный обзор позволил уточнить задачи дальнейших исследований в рамках диссертационной работы.

Во **второй главе** разрабатывается методика определения пространственных характеристик объекта на основе данных, получаемых с монокуляра, с учетом условий окружающей среды и текущего состояния автономного мобильного робота.

Предполагается, что мобильный робот, оборудованный монокулярной СТЗ, перемещается в некоторой среде, где присутствуют объекты-препятствия. В задачу робота входит определение параметров этих объектов путём анализа информационного потока, поступающего с видеокамеры монокулярной СТЗ.

На основании анализа выполнена общая математическая постановка задачи.

Пусть S – рассматриваемая система, v_1, v_2, \dots, v_k – параметры внешней среды, u_1, u_2, \dots, u_d – параметры, определяющие состояние робота, m_1, m_2, \dots, m_q – выбираемые методы, k – количество параметров внешней среды, d – количество параметров, определяющих состояние робота, q – количество выбираемых методов. Тогда общая постановка задачи выглядит следующим образом: разработать методы и алгоритмы, определяющие функционал S , удовлетворяющий равенству

$$m^0 = S(v_1, v_2, \dots, v_k, u_1, \dots, u_d), m^0 \in \mathbf{M}, \quad (1)$$

где m^0 – конкретный выбранный метод, \mathbf{M} – множество методов, то есть $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_q\}$.

Сформулированная таким образом общая постановка задачи требует уточнения. В среде V , определяемой значениями параметров v_1, v_2, \dots, v_k , находятся объекты o_1, o_2, \dots, o_n , пространственные характеристики которых необходимо определить (здесь n – количество объектов). Состояния объектов характеризуются параметрами v_{ij} , где i – номер объекта, а j – номер параметра объекта, причем $i=1, \dots, n, j=1, \dots, l$, где l – количество характеризующих объект параметров. Каждый объект o_i может быть связан с множеством \mathbf{O}^i других объектов путем определения пространственных характеристик объекта o_i , что предполагает изучение объектов из множества \mathbf{O}^i .

Для конкретизации условий функционирования автономного робота введены некоторые обозначения. Символом z обозначена цель определения пространственных характеристик объекта. Например, цель 1 – определение формы объекта, цель 2 – определение размеров объекта. Пусть g – количество целей, тогда существует множество целей $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_g)$. Через ξ_z обозначены функции, которые преобразовывают определяемые роботом параметры среды в переменные, с которыми можно производить анализ среды. Совокупность таких функций ξ_z составляет множество \mathbf{F} .

Тогда уточненная постановка задачи будет выглядеть следующим образом:

$$m^0_i = S(\mathbf{F}(v_1, v_2, \dots, v_k), u_1, \dots, u_d, \mathbf{F}(v_{i1}, \dots, v_{in}), \mathbf{O}^i(\mathbf{Z}), z^i), m^0_i \in \mathbf{M}, \quad (2)$$

где m^0_i означает конкретный выбранный метод из множества \mathbf{M} для определения пространственных характеристик объекта o_i , z^i – цель определения пространственных характеристик для объекта o_i . Очевидно, что множество объектов \mathbf{O}^i , связанных с объектом o_i , также зависит от множества целей, то есть каждый объект из \mathbf{O}^i исследуется с определенной целью их множества \mathbf{Z} . Ниже символами S_1, S_2, S_3, \dots обозначены подфункции системы S .

Решение задачи выполняется в несколько шагов.

1. Исходя из состояния среды v_1, v_2, \dots, v_k и состояния робота u_1, \dots, u_d определяется подмножество совместимых методов:

$$\mathbf{M}^1 = S_1(\mathbf{F}(v_1, v_2, \dots, v_k), u_1, \dots, u_d), \mathbf{M}^1 \subset \mathbf{M}. \quad (3)$$

2. Для каждого объекта o_i и его состояния, заданного множеством значений

параметров $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il}$, определяется множество связанных с ним объектов:

$$\mathbf{O}^i = S_2(o_i, \mathbf{F}(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il})). \quad (4)$$

3. Для каждого объекта $o \in \mathbf{O}^i$ и множества значений параметров \mathbf{V}_0 , определяющих его состояние, выбирается множество методов \mathbf{M}^{20} , принадлежащих \mathbf{M}^1 :

$$\mathbf{M}^{20} = S_3(o, \mathbf{F}(\mathbf{V}_0), \mathbf{M}^1), \mathbf{M}^{20} \subset \mathbf{M}^1. \quad (5)$$

4. Учитывая цели исследования, для каждого объекта $o \in \mathbf{O}^i$ выбирается из множества \mathbf{M}^{20} подмножество методов \mathbf{M}^{30} , то есть

$$\mathbf{M}^{30} = S_4(o, z_o, \mathbf{M}^1), \mathbf{M}^{30} \subset \mathbf{M}^{20}. \quad (6)$$

5. Исходя из предположения, что все связанные с объектом o_i объекты из \mathbf{O}^i изучены, из множества \mathbf{O}^i , для каждого объекта o_i , с учетом его характеристик $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il}$ определяется подмножество совместимых методов \mathbf{M}^{4i} .

$$\mathbf{M}^{4i} = S_5(\mathbf{O}^i, \mathbf{F}(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il}), \mathbf{M}^1), \mathbf{M}^{4i} \subset \mathbf{M}^1. \quad (7)$$

6. Для каждого объекта o_i из множества \mathbf{M}^{4i} выбирается конкретный метод m^0_i , то есть

$$m^0_i = S_6(o_i, z^i, \mathbf{M}^{4i}), m^0_i \subset \mathbf{M}^{4i}. \quad (8)$$

Для реализации предложенной методики необходимо проанализировать возможные пути и методы определения пространственных характеристик (m^0_i) и найти функции ξ_z .

На сегодняшний день имеется множество методов определения пространственных характеристик объекта или окружающего пространства на основе данных, получаемых с монокуляра. К этим методам относятся методы, определяющие форму из затенения; форму из текстуры; форму из фокуса; форму из движения.

Существующие методы можно подразделить на две основные группы: требующие и не требующие жёстких условий внешней среды (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение методов определения формы объекта монокулярными СТЗ

Жесткая привязка к условиям внешней среды		Отсутствие жёсткой привязки к условиям внешней среды	
Форма из затенения	Форма из текстуры	Форма из фокуса	Форма из движения
Строго определённые параметры освещения. Требования к визуальным параметрам объекта	Наличие хорошо выраженного и выделяемого шаблона текстур. Наличие дополнительных средств определения дальности	Требования к точности оптики. Отсутствие помех	Наличие достаточных вычислительных ресурсов при увеличении количества точек наблюдения и для коррекции ошибок

Исходя из выявленных свойств методов определения пространственных характеристик, можно уточнить и упростить задачу (2) и метод ее решения (3)–(8). Так как существует четыре основных метода определения пространственных характеристик объекта, то $q=4$ и множеством методов \mathbf{M} будем считать

множество $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, m_3, m_4\}$, где m_1 – метод «Форма из затенения», m_2 – метод «Форма из текстуры», m_3 – метод «Форма из фокуса», m_4 – метод «Форма из движения» (таблица 1).

Метод «Форма из фокуса» несовместим с методом «Форма из движения», поскольку при вычислении формы из движения, как правило, используются объективы, практически не требующие фокусировки (например, объектив типа «рыбий глаз»).

Метод «Форма из движения» может быть применен только, если $v_{роб}$ больше заранее определенной величины V_{min} , где $v_{роб}$ – скорость движения робота, поскольку при медленном движении мобильной платформы методы определения формы из движения становятся неэффективными за счёт высокой схожести получаемых изображений.

Таким образом, выполняются условия:

$$(m_3 \in \mathbf{M}^1 \setminus m_4) \wedge (m_4 \in \mathbf{M}^1 \setminus m_3).$$

$$\text{Если } ((v_{роб} > V_{min}) \wedge (v_{роб} \in (u_1, u_2, \dots, u_d))), \text{ то } ((m_4 \in \mathbf{M}^1) \wedge (m_3 \notin \mathbf{M}^1)). \quad (9)$$

$$\text{Если } ((v_{роб} < V_{min}) \wedge (v_{роб} \in (u_1, u_2, \dots, u_d))), \text{ то } ((m_3 \in \mathbf{M}^1) \wedge (m_4 \notin \mathbf{M}^1)).$$

К множеству параметров робота можно отнести такие параметры как скорость мобильной платформы, параметры видеокамеры (угол обзора, тип и точность объектива), частота получения изображения с видеокамеры, вычислительная мощность аппаратуры, параметры подвижной платформы.

К параметрам среды относятся: наличие подсвечиваемых маячков, наличие в области видимости хорошо выраженного и выделяемого шаблона текстур, наличие источников освещения с известными параметрами, размеры экспериментального стенда, запылённость воздуха и параметры поверхности, по которой движется мобильная платформа (возможность возникновения дополнительных помех за счёт тряски или пыли). Параметры объекта – это его текстура, отражательная способность, прозрачность, геометрическая сложность и габариты.

Исходя из анализа известных методов определения формы объектов монокулярными СТЗ, основными методами, используемыми в разработанной системе, признаны методы определения формы объекта из фокуса и методы определения формы объекта из движения. Эти методы не имеют жёсткой привязки к условиям внешней среды, в то время как методы определения формы из текстуры и затенения могут работать только в определённых условиях, и, следовательно, включаются в работу эпизодически.

Так как исследуемая система технического зрения предназначена для использования на мобильном роботе, наиболее широко применяется метод определения формы из движения. Основным недостатком данного метода является увеличение сложности вычислений при увеличении количества изображений с разных точек наблюдения, что требует дополнительных вычислительных ресурсов. Кроме того, наличие помех хотя бы в одном изображении или же полная потеря кадра видеопотока, негативно сказывается на работе всей системы в целом. Таким образом, данный метод требует доработки с целью повышения его устойчивости к помехам, что позволит находить пространственные харак-

теристики объекта при его наблюдении монокулярной СТЗ без выделения дополнительных вычислительных ресурсов.

В этой связи дальнейшие усилия были сосредоточены на методе, основанном на фиксации изменений размера изображения объекта с течением времени без непосредственного сопоставления каждого нового изображения с остальными. Примером может послужить приближение человека к некоторому неподвижному объекту. Если по мере приближения изображение объекта увеличивается незначительно, то становится ясно, что этот объект имеет значительные габариты и находится на удалении. В то же время объект, изображение которого увеличивается быстрее при приближении к нему, имеет меньшие размеры и находится ближе.

В третьей главе разрабатывается метод решения задачи автоматического определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по его изменяющимся визуальным характеристикам, которые служат входной информацией для мобильного робота. Также уделено внимание разработке алгоритма, реализующего данный метод.

Мобильная платформа робота перемещается относительно внешних стационарных объектов. Угол между прямой, соединяющей объектив фотокамеры робота и центр объекта, обозначается как φ . Для простоты изложения из последовательности o_1, o_2, \dots, o_n выделяется всего один объект o , то есть $n=1$, поскольку алгоритм автоматического определения пространственных характеристик объекта можно будет распространить и на все остальные объекты. Соответственно рассматриваются лишь параметры v_{1j} только одного объекта. Чтобы отличить их от параметров среды, переобозначим их через w_j , то есть $v_{1j} = w_j$. Так как объект стационарен, то все его наблюдаемые визуальные параметры w_j неизменны во времени, то есть $w_j = \text{const}$.

В процессе наблюдения объекта движущимся роботом параметры w_j некоторыми функциями ξ_j преобразуются в информацию, воспринимаемую роботом в качестве входных данных. Так, ширину объекта робот воспринимает в качестве определенного количества пикселей. Так как робот находится в движении, то функции ξ_j зависят от времени. Например, робот воспринимал длину объекта в размере 50 пикселей, а после сближения с ним – в 60. Таким образом, получаем $\xi_j = \xi_j(w_j, t)$ и

$$\mathbf{IN} = F^1(\mathbf{W}, t), \quad (10)$$

где \mathbf{IN} – входные данные мобильного робота о наблюдаемом объекте, $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_l)$, $F^1 = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l)$. Вектор \mathbf{IN} можно представить в виде $\mathbf{IN} = (in_1, in_2, \dots, in_l)$.

Можно поставить дополнительное условие. Мобильный робот содержит базу данных B_s об известных характеристиках объектов, наблюдавшихся ранее. Обозначим их через \mathbf{O}' ($\mathbf{O}' \subset \mathbf{O}$, где \mathbf{O} – множество всех возможных объектов o_i). В базу данных информация об объектах попадает после некоторого преобразования F^2 , то есть

$$B_s = F^2(\mathbf{IN}'), \quad (11)$$

где \mathbf{IN}' входные данные, полученные на основе наблюдения за объектами \mathbf{O}' . Учитывая (10), получаем

$$Bs = F^2(F^1(\mathbf{W}, t)). \quad (12)$$

Таким образом, база данных должна быть темпоральной, то есть ее данные существенно зависят от времени.

С учетом (10), (12) задача, поставленная ранее, распадается на ряд подзадач.

Первая подзадача. Используя формулы (3)–(8) необходимо определить метод m^0 , который бы мог, в общем случае с учетом базы данных, входных данных, характеристик среды и состояния робота определить пространственные характеристики объекта \mathbf{W} . То есть необходимо определить метод m^0 , для которого, исходя из (1), выполняется

$$\mathbf{W} = m^0(v_1, v_2, \dots, v_k, u_1, \dots, u_d, \mathbf{IN}, Bs), m^0 \in \mathbf{M}. \quad (13)$$

Заметим, что \mathbf{W} является обратной функцией к функции $F^2(F^1(\mathbf{W}, t))$, то есть $m^0(F^2(F^1(\mathbf{W}, t))) = \mathbf{W}$.

В (13) $m^0 \in \mathbf{M}$, поэтому в первую очередь необходимо найти множество \mathbf{M} , то есть множество алгоритмов, определяющих пространственные данные объекта в зависимости от состояния среды и робота.

Вторая подзадача. Так как в Bs хранится информация, полученная о ранее наблюдавшихся объектах \mathbf{O}' , а входные данные \mathbf{IN} получены в результате наблюдений за новыми объектами в реальном времени, то в общем случае $\mathbf{IN} \neq \mathbf{IN}'$. Поэтому следующей подзадачей является нахождение функции, интерполирующей данные \mathbf{IN} данными \mathbf{IN}' .

Третья подзадача. Обработывая информацию из базы данных Bs , после выполненной интерполяции можно хранящиеся характеристики объектов \mathbf{O}' поставить в соответствие характеристикам новых объектов из $\mathbf{O} \setminus \mathbf{O}'$. То есть можно выполнить преобразование

$$o \rightarrow o'; W(o) \rightarrow W(o'), o' \in \mathbf{O}'; o \in \mathbf{O} \setminus \mathbf{O}', \quad (14)$$

тем самым находя функцию m^0 . Однако для этого необходимо определить, какие зависимости F^3 должны храниться в базе данных.

Четвертая подзадача. Так как в процессе движения мобильной платформы возможно отклонение от выбранного курса, то возникает следующая подзадача. Необходимо определить метод и реализующий его алгоритм F^4 , определяющий по изменяемому во времени входным данным \mathbf{IN} угол отклонения от заданного курса φ для управляющего воздействия по корректировке курса, где $\varphi \neq 0$. То есть необходимо определить функцию F^4 , для которой

$$\varphi = F^4(\mathbf{IN}). \quad (15)$$

Прежде чем приступить к решению первой и второй подзадач, необходимо определить тип и характер зависимостей, хранящихся в базе данных, то есть решить третью подзадачу.

Зависимость величины размера проекции объекта на изображении x от фокусного расстояния f , размера объекта X и дистанции Z вычисляется по следующей формуле:

$$x = f \cdot \left(\frac{X}{Z} \right). \quad (16)$$

Предположим, что дистанция между объектом и видеокамерой сократилась на величину a то есть текущая дистанция между объектом и видеокамерой равна $Z-a$. Найдём величину, на которую изменился размер проекции объекта на изображении:

$$\Delta x = f \cdot \left(\frac{X}{Z-a} \right) - f \cdot \left(\frac{X}{Z} \right) = f \cdot X \cdot \frac{a}{Z^2 - a \cdot Z} \quad (17)$$

В соответствии с этой формулой можно сделать достаточно очевидный вывод о том, что чем больше фокусное расстояние объектива используемой видеокамеры, тем больше изменение размера проекции на изображении при взаимном сближении видеокамеры и объекта. Кроме того, значение Δx тем больше, чем меньше разность $Z-a$ (то есть когда дистанция между объектом и видеокамерой минимальна).

Выразим значение a из формулы (17):

$$a = \frac{Z^2 \cdot \Delta x}{f \cdot X + Z \cdot \Delta x} \quad (18)$$

Предположим, что два наблюдаемых видеокамерой объекта различных размеров X_1 и X_2 , переместились на одно и то же расстояние a по направлению к видеокамере. Тогда из формулы (18), получается следующее равенство:

$$\frac{Z_1^2 \cdot \Delta x_1}{f \cdot X_1 + Z_1 \cdot \Delta x_1} = \frac{Z_2^2 \cdot \Delta x_2}{f \cdot X_2 + Z_2 \cdot \Delta x_2}$$

При равенстве начальной дистанции $Z_1=Z_2=Z_s$ имеем

$$\frac{X_1}{\Delta x_1} = \frac{X_2}{\Delta x_2} \quad (19)$$

Таким образом, если $X_1 > X_2$, то $\Delta x_1 > \Delta x_2$. Следовательно, чем больше размер объекта, тем сильнее изменится при перемещении размер его полученного с видеокамеры изображения. Таким образом, по изменению размера объекта на изображении можно судить о его пространственных характеристиках.

Из сказанного следует, что база данных должна содержать последовательность значений размера объекта на изображении и соответствующую ему информацию о пространственных характеристиках объекта. Таким образом, целесообразно исследовать метод, основанный на анализе последовательности значений размера объекта на изображении. Следует также определить, каким образом будет осуществляться наблюдение за выделенным объектом.

Промежуток времени наблюдения выделенного объекта определяется как $(T_{jk}-T_d, T_{jk})$, где T_{jk} – момент времени в котором размер выделенного объекта на изображении достиг ключевого значения j_k , а T_d – длина данного промежутка времени. Из формулы (16) следует, что $Z = \frac{f \cdot X}{x}$. Это означает, что чем меньше размер объекта X , тем меньше дистанция между объектом и видеокамерой Z . Следовательно, руководствуясь выбором значения j_k , и исходя из того, что в момент времени T_{jk} объект будет в наименьшей допустимой близости от видеокамеры, необходимо выбирать это значение для наименьшего объекта из базы

данных, поскольку в этом случае дистанция между ним и видеокамерой будет минимальна.

При сопоставлении друг с другом последовательных изображений выделенного стационарного объекта, полученных от видеокамеры с заданным интервалом, обычно сложно получить точное ключевое значение j_k , поскольку момент времени, когда размер изображения объекта достиг данного значения, может оказаться незафиксированным, тогда на последнем полученном кадре размер объекта будет превышать j_k . Поэтому следующей подзадачей задачи автоматического определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по его изменяющимся характеристикам является нахождение функции интерполяции полученных входных данных \mathbf{IN} . В ходе практической реализации алгоритма, подробно описанного в главе 4, были исследованы различные методы интерполяции, среди которых наиболее эффективным оказалась интерполяция сплайнами.

Далее решались две оставшиеся подзадачи, связанные с разработкой метода m^0 определения пространственных характеристик объекта \mathbf{W} , и с разработкой алгоритма F^4 нахождения по меняющимся во времени входным данным \mathbf{IN} угла φ отклонения робота от заданного курса для формирования управляющего воздействия по корректировке курса. Основываясь на полученных решениях подзадач определения характера зависимостей, интерполирующей функции входных данных и соответствии между полученной информацией и информацией в базе данных, можно сформировать общую Use-Case диаграмму предлагаемого метода для использования на подвижной платформе (рисунок 1).

Диаграмма алгоритма, реализующего данный метод, показана на рисунке 2. Изображение, получаемое с видеокамеры, поступает на вход двух подсистем, работающих параллельно. Первая предназначена для удержания мобильной платформы на курсе по направлению к объекту-ориентиру. При получении каждого нового изображения с видеокамеры подсистема формирует управляющее воздействие для корректировки направления движения мобильной платформы таким образом, чтобы она двигалась по направлению к ориентиру.

В задачу второй подсистемы входит определение дистанции и геометрических размеров объекта. При сближении платформы и объекта на определённое расстояние система принимает решение об изменении действий всей системы в целом (остановка, смена курса, выполнение каких-либо действий), что подразумевает завершение данной части алгоритма и переход к следующей части.

Подсистема удержания мобильной платформы на курсе по направлению к объекту-ориентиру основана на нейронной сети Nn_1 с одним скрытым слоем, на вход которой поступают цифровые данные, отображающие яркость пикселей изображения с видеокамеры, установленной на мобильной платформе и ориентированной по направлению её движения.

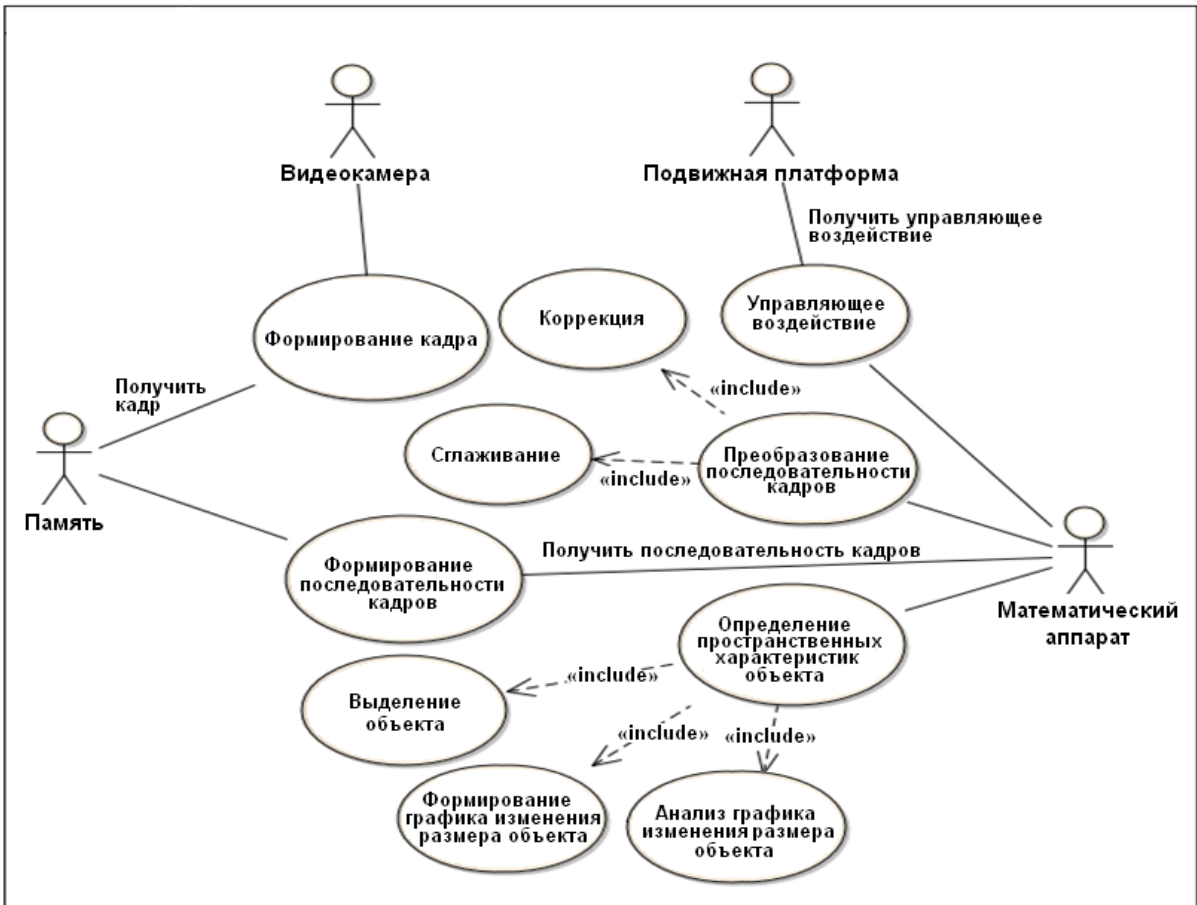


Рисунок 1 – Use-Case диаграмма предлагаемого метода

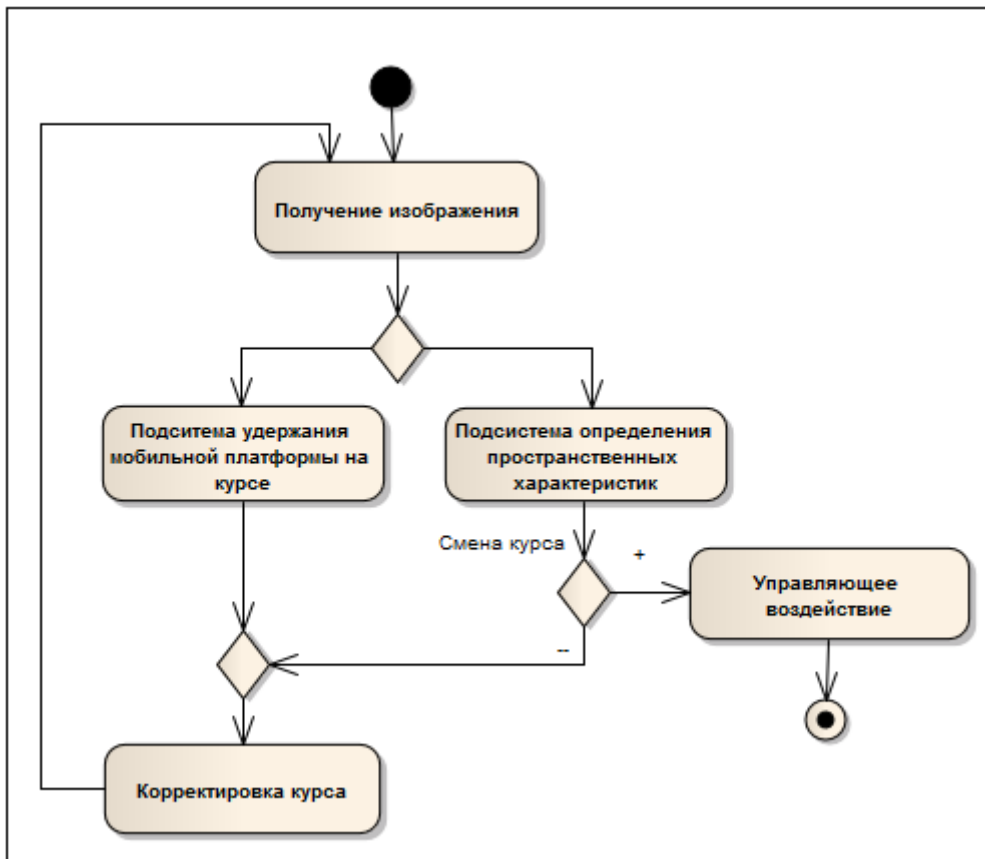


Рисунок 2 – Activity диаграмма алгоритма

Предполагается, что изначально видеокамера захватывает изображение, на котором присутствует объект-ориентир. Изображение также предварительно отфильтровывается по цвету объекта-ориентира. Выходом нейронной сети является вектор Y из 30 значений, одно из которых равняется единице, а остальные – нулю, то есть выполняется условие

$$Y = \{y_i\}, \quad 1 < i < 30, \quad \exists i_0, \text{ что } y_{i_0} = 1, \quad y_i = 0, \text{ если } i \neq i_0. \quad (20)$$

В зависимости от позиции единицы в выходном векторе нейронной сети совершается поворот мобильной платформы на определённый угол φ .

Обучение нейронной сети происходит при помощи метода обратного распространения ошибки на выборке, представляющей собой набор из входных и соответствующих им выходных значений. В качестве входных значений используются изображения, отображающие объект-ориентир в различных возможных позициях этого изображения. Выходные значения отражаются соответствующим вектором Y , соответствующим требуемому углу поворота φ мобильной платформы для корректировки курса.

Таким образом, нейронная сеть стремится к тому, чтобы удерживать изображение объекта в центре получаемого от видеокамеры изображения, и при отклонении движения мобильной платформы от заданного направления происходит автоматическая коррекция.

Для корректного функционирования подсистемы определения пространственных характеристик объекта-ориентира необходимо провести предварительный этап, в ходе которого в базу данных системы вводится информация о пространственных характеристиках распознаваемых объектов, дистанции до них и соответствующие им графики зависимости размера изображения объекта от времени при приближении к нему видеокамеры

Рисунок 3 иллюстрирует отличия разработанного алгоритма подсистемы определения пространственных характеристик объекта-ориентира от существующих алгоритмов, основанных на решении системы уравнений. Пунктирными стрелками показаны действия, которые отличают разработанный алгоритм от уже существующих.

Данный алгоритм позволяет определять пространственные характеристики объекта и удерживать мобильную платформу на заданном курсе при помощи монокулярной системы технического зрения. Такой алгоритм может применяться как самостоятельно, так и в составе более сложных систем навигации для движения по ориентирам или выполнения операций с объектами.

Одним из недостатков использования традиционных способов оценки сходства или различия двух процессов является то, что они не учитывают наличия помех. Ошибка при выделении объекта или искажения поступающих с видеокамеры изображений приводят к некорректному определению параметров объекта.

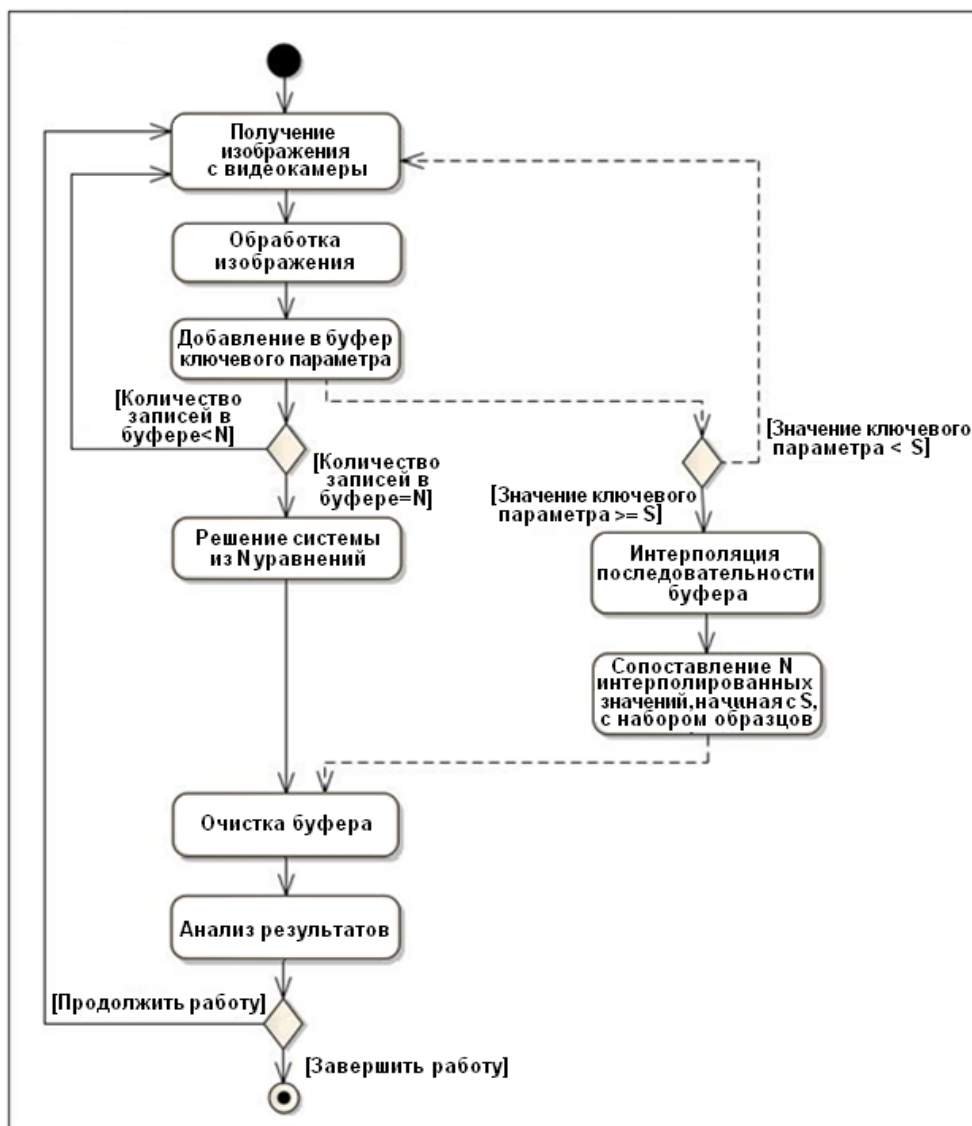


Рисунок 3 – Activity диаграмма сравнения алгоритмов СТЗ подвижного модуля

Как известно, одним из основных свойств нейронных сетей является способность к обобщению – возможность распознавать образы в условиях шумов и искажений входного сигнала. Это свойство можно использовать для повышения надёжности работы алгоритма при наличии повреждённых или зашумлённых изображений в видеосигнале. Применительно к разработанному алгоритму это будет означать замену этапа сопоставления из N интерполированных значений с набором образцов из базы данных простой передачей этих значений на вход обученной нейронной сети Nn_2 . На предварительном этапе работы алгоритма предусмотрено обучение нейронной сети Nn_2 путем имитации приближения объектов разного размера. Каждый входной вектор представляет собой последовательность значений, соответствующих ширине объекта в пикселях в заданный момент времени, начиная с момента, когда ширина объекта была равна некоторому значению S .

Таким образом, обработка поступающего с видеокamеры изображения осуществляется двумя независимыми, основанными на нейронных сетях прямого распространения подсистемами для удержания мобильной платформы на

курсе и для определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта. Благодаря тому, что нейронные сети обобщают входную информацию, их использование позволяет повысить устойчивость работы системы в условиях помех и искажений изображений.

Использование данного алгоритма позволяет упростить СТЗ робота за счёт уменьшения количества видеокамер, требуемых для определения пространственных характеристик объекта, сделать СТЗ более компактной. Кроме того, подобная система может использоваться как дублирующая в случае выхода из строя одной из видеокамер бинокулярной СТЗ.

Эффективная работа алгоритма требует наблюдения выделенного стационарного объекта в течение некоторого времени. Это является особенностью предложенного алгоритма, которую следует учитывать при отслеживании ключевого параметра мелких объектов, поскольку в этом случае время для реакции мобильного робота уменьшается.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию и проверке работоспособности разработанного метода.

Проведено моделирование работы данной СТЗ с применением трёхмерного редактора 3D Studio Max. Полученные с его помощью данные использовались для обучения нейронной сети. Для создания нейронной сети использовался пакет программ Neural network toolbox, входящий в состав Matlab. При помощи редактора 3D Studio Max моделировалось движение четырёх объектов с различными пространственными характеристиками относительно наблюдателя-видеокамеры.

Для тестирования на вход сети подавалась зашумлённая последовательность ключевых параметров каждого из объектов. При этом максимальное значение случайной ошибки Err последовательно увеличивалось от 1 до 25. Для каждого значения Err каждого из четырёх объектов шириной 40, 80, 120 и 160 мм проводилось 100 экспериментов и подсчитывалось общее количество ошибочного распознавания объекта нейронной сетью. Результаты данного теста приведены на рисунке 4.

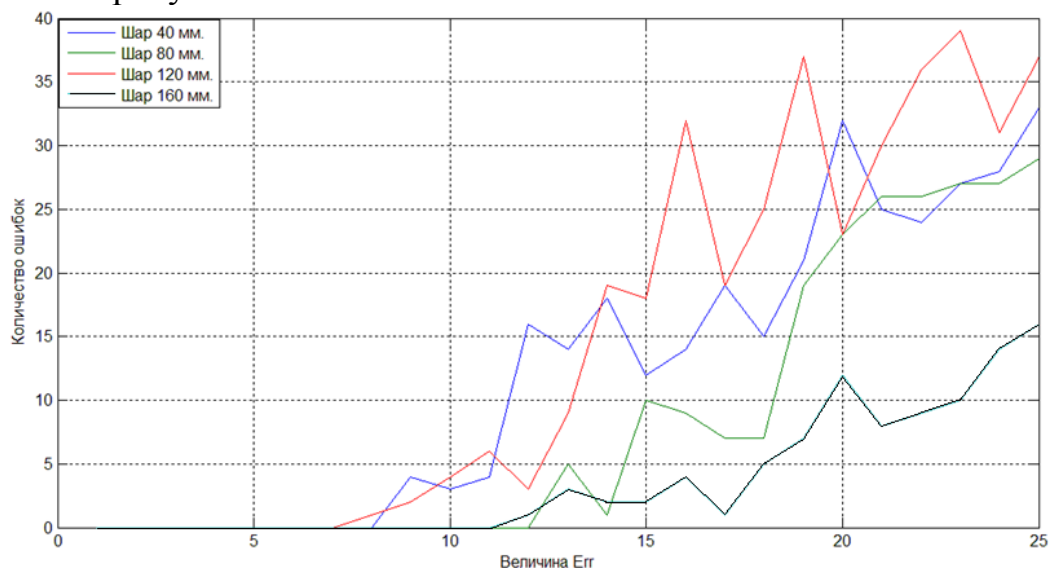


Рисунок 4 – График зависимости количества ошибочно распознанных объектов на 100 экспериментов от величины Err для каждого из объектов

Проведенный эксперимент продемонстрировал работоспособность предложенного алгоритма, подтвердил его высокую помехоустойчивость. Для проверки работоспособности предложенного метода в реальных условиях был создан экспериментальный стенд, состоящий из подвижного модуля и стационарного объекта. В задачу данного стенда входило определение размера и дистанции до стационарного объекта. При этом к разрабатываемой системе предъявлялось требование – использование в качестве стационарных объектов ряда подсвечиваемых маячков. Остальные объекты внешней среды не рассматривались.

Для тестирования системы технического зрения экспериментального стенда было проведено эксперименты со стационарными объектами различного размера. В ходе работы экспериментального стенда СТЗ показала устойчивое распознавание объектов при условии сохранения скорости, при которой проводилось обучение.

Кроме того, СТЗ корректно распознавала объекты при искажениях входных данных. В ходе эксперимента часть из 50 значений, передающихся на вход нейронной сети, была заменена на нулевые. Нейронная сеть продолжала корректно распознавать образ при количестве нулевых значений, не превышающем десяти (20%) при условии целостности последних четырех значений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика определения пространственных характеристик объекта с учетом условий окружающей среды и состояния автономного мобильного робота, оборудованного монокулярной системой технического зрения.

2. Выполнена декомпозиция общей задачи автоматического определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного стационарного объекта по его изменяющимся визуальным данным, полученным монокулярной системой технического зрения. Решены четыре основные подзадачи: выбор метода определения пространственных характеристик объекта, определение функции интерполяции, определение типа хранящихся в базе данных, и разработка метода, определяющего по изменяющимся во времени входным данным угол отклонения от заданного курса.

3. Выявлены зависимости и установлен порядок сравнительного анализа последовательности размерных параметров стационарного объекта на его изображении с образцами, хранящимися в базе данных, обеспечивающие определение пространственных характеристик объекта.

4. Разработан новый алгоритм определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта и вычисления по его изменяющимся во времени изображениям угла отклонения от заданного курса, позволяющий сформировать управляющее воздействие для корректировки курса робота на основании сравнения данных по текущему состоянию робота и условиям среды с данными из базы данных.

5. Разработана нейросетевая адаптивная модель процесса автоматического определения пространственных характеристик наблюдаемого выделенного

стационарного объекта по ряду разнесенных во времени его образов, описывающая работу монокулярной системы технического зрения в условиях помех и искажений изображений.

6. Изготовлен и апробирован экспериментальный стенд, реализующий разработанный алгоритм нейросетевой идентификации и определения пространственных характеристик выделенного стационарного объекта с выработкой управляющих воздействий по корректировке курса робота.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бабич, А.М. Использование монокулярной системы технического зрения при оценке расстояния до препятствий [Текст] / А.М. Бабич, В.Р. Роганов // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Электронная вычислительная техника». – 2008. – Вып. 5. – С. 107–111.

2. Бабич, А.М. Один из подходов к созданию монокулярной системы технического зрения [Текст] / А.М. Бабич // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Электронная вычислительная техника». – 2010. – Вып. 5. – С. 124–129.

3. Бабич, А.М. Алгоритм использования нейронной сети в системе технического зрения мобильного робота [Текст] / А.М. Бабич // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Общетехническая». – 2011. – Вып. 2. – С. 116–122.

4. Бабич, А.М. Методы определения характеристик окружающего пространства при помощи монокулярных систем технического зрения [Текст] / А.М. Бабич // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Системы отображения информации и управления спецтехникой». – 2012. – Вып. 1. – С. 156–162.

5. Бабич, А.М. Анализ погрешности определения пространственных характеристик объекта бинокулярными системами технического зрения [Текст] / А.М. Бабич // Радиопромышленность. – 2011. – Вып. 4. – С. 68–72.

Глава в коллективной монографии:

6. Бабич, А.М. Математические и компьютерные методы в медицине, биологии, экологии: монография [Текст] / В.И. Левин, А.М. Бабич, Е.Ю. Буркина, Я.А. Гельфандбейн, В.Я. Гельфандбейн, А.А. Казанцев, Т.Г. Копченко, А.В. Крошилин, С.В. Крошилина, Е.Г. Крушель, П.А. Набродов, А.Н. Пылькин, В.Р. Роганов, Э.В. Роганова, А.А. Смирнов, О.Н. Смирнова, И.В. Степанченко, О.В. Степанченко, А.Ю. Чемерисов, Р.П. Шиповский. – Пенза – Москва: Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 78–90.

Публикации в других изданиях:

7. Бабич, А.М. Подход к классификации систем ввода информации мобильных роботов [Текст] / А.М. Бабич, В.Р. Роганов // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сб. ст. VI Всеросс. науч.-техн. конф. – Пенза, 2008. – С. 75–78.

8. Бабич, А.М. Подходы к разработке систем навигации мобильных роботов [Текст] / А.М. Бабич, В.Р. Роганов // Проблемы развития боеприпасов,

средств поражения и систем управления: труды 6-ой науч.-техн. конф. РАРАН. – Пенза, 2008. – С. 361–364.

9. Бабич, А.М. Определение пространственных параметров объекта при помощи анализа сигналов, полученных монокулярно [Текст] / А.М. Бабич // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: сб. ст. VIII Всеросс. науч.-техн. конф. – Пенза, 2010. – С. 95–97.

10. Бабич, А.М. Базовый исследовательский модуль [Текст] / А.М. Бабич, И.Г. Турыгин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 19–22 апреля 2011 г.). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. – 2 т. – С. 232–233.

11. Бабич, А.М. Актуализация видеопотока в системах автоматического видеонаблюдения [Текст] / А.М. Бабич // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 23–25 апреля 2013 г.). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – С. 130–132.

12. Бабич, А.М. Экспериментальный стенд для отработки алгоритма монокулярной системы технического зрения для определения размера и дистанции до стационарного объекта [Текст] / А.М. Бабич // Радиолокация навигация связь: сб. ст. XIX междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 16–18 апреля 2013 г.). – Воронеж: Изд-во НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2013. – С. 161–169.

БАБИЧ Андрей Михайлович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ НАВИГАЦИИ
МОБИЛЬНОГО РОБОТА С МОНОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 05.13.17 – теоретические основы информатики

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Компьютерная верстка Т.А. Антиповой

Сдано в производство 13.11.13. Формат 60x84 ¹/₁₆
Бумага типогр. № 1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,23. Уч.-изд л. 1,39. Заказ № 2378. Тираж 100.

Пензенский государственный технологический университет.
440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1^а/11

