

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Дасеев Ферас

**УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОВ В СРЕДЕ
С АКТИВНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ**

Направление подготовки 15.06.01 «Машиностроение»

Код и наименование

Направленность 15.06.01_03 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Дасеев Ф
Волков А.Н., д.т.н., доцент

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена на высшей школе автоматизации и робототехники институт машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ/зав. кафедрой: – *Мацко О.Н., к.т.н.*

Научный руководитель: – *Волков А.Н., д.т.н., доцент*

Рецензент: – *Знаменский И.С., к.т.н.,
руководитель продаж в
Европейской части РФ ООО
«ФЕСТО-РФ»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современной быстроразвивающейся экономике, ориентированной на клиентов, отрасли складского хранения и логистики, как никогда ранее, ищут робототехнические решения для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке. Робототехнические технологии уже оказали экономическое влияние на производственный сектор, а в настоящее время они начинают преобразовывать операции в цепочке поставок для повышения их скорости, безопасности и продуктивности. Спрос на роботов и предложение зрелых роботизированных решений для оптимизации логистических процессов создали переломный момент, который может привести к широкому признанию и присутствию роботов на складах и в логистических операциях. Автономные транспортные средства (AGV) являются ключевым элементом для выполнения гибких транспортных задач на складах. В неизвестных или неструктурированных средах необходимо объединить метод планирования маршрута с локальной или реактивной навигацией с использованием встроенных датчиков, чтобы локально наблюдать небольшую часть окружающего пространства в каждый момент времени. В данном случае возникает проблема обнаружения и реагирования при наличии препятствий. Для этих задач используются различные датчики, что приводит к разнообразным вариантам решения задачи навигации. В основном используются следующие два типа датчика: дорогостоящие лазерные сканеры и камеры для обнаружения подвижных препятствий.

Итак, есть два основных способа решить эту проблему. Одно решение на основе данных о расстоянии, и для этого нужна очень высокая точность данных датчика, поэтому используется очень дорогое устройство (лидар). Другой подход – системы компьютерного зрения, в которых используются визуальные данные, и отсутствуют данные скорости подвижных объектов из-за некоторых нерешённых проблем, связанных с обнаружением движущихся объектов при движущейся камере. Поэтому является актуальной научной задачей управление транспортным роботом в среде с активными препятствиями на основе системы компьютерного зрения

В работе рассматриваются проблемы создания системы управления транспортным роботом на неизменном линейном пути на основе камеры 3D, которая содержит алгоритмы определения подвижных объектов в среде робота и параметры их движения, а также система управления скоростью робота.

При разработке системы управления были использованы методы обработки изображения для определения объектов и их следования на видеопоследовательности, и система нечеткой логики для коррекции скорости робота.

К достоинствам системы можно отнести сравнительно невысокую стоимость устройств при хорошей точности определения объектов в среде робота, а также оптимизацию времени движения к цели в условиях динамической среды.

Цель и задачи исследования

Разработка принципов построения системы адаптации скорости транспортных роботов на заданной траектории на основе 3D-камеры в среде с активными препятствиями является целью работы.

Задачи для достижения цели:

- доработать методы обработки изображения для определения объектов в среде робота с помощью 3D-данных от 3D-камеры;
- разработать способ определения параметров движения объектов относительно робота;
- реализовать контролер управления скоростью мобильного робота на основе нечеткой логики в среде с активными препятствиями;
- реализовать компьютерную систему для управления;
- провести эксперименты в виртуальной среде для проверки способности системы в среде с активными препятствиями.

Научная новизна

1. Предложен метод для определения параметров движения объектов на основе обработки визуальных данных при известных данных о глубине объектов (3D- данные от камеры-3D).
2. Разработан принцип построения и схема контроллера на основе нечеткой логики для управления скоростью транспортного робота с использованием параметров (положение и скорость) объектов.

Теоретическая и практическая значимость

- Схема, алгоритмы и математическая модель могут использоваться для исследования определения параметров движения подвижных объектов в среде робота.
- Пакет программного обеспечения для коррекции скорости робота, оснащенного 3D-камерой в среде с активными препятствиями.
- Разработана система оптимизирует решение задачи автономного перемещения транспорта робота на складах, цехах и так далее.

Апробация работы

Результаты работы рассказывались на семинарах кафедры «Автоматы» Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого в 2016–2020 гг.

Публикации

Опубликовано 2 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ и одна статья принята к публикации в издании из перечня ВАК РФ.

Представление научного доклада: основные положения

- Методы обработки изображения для определения подвижных объектов в среде робота на основе принципа характерных фрагментов объекта.
- Новый метод для определения параметров движения найденных объектов (положение и скорость) в среде робота с помощью данных о глубине, полученных от 3D-камеры.
- Система нечеткой логики для управления скоростью мобильного робота на основе определяемых параметров подвижных объектов (положение и скорость) в среде с активными препятствиями.
- Программное обеспечение для реализации системы и визуализации процесс управления.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Объем работы 110 печатных страниц, 15 рисунков, 5 таблиц. Библиография содержит 110 наименований, из них 90 иностранных источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, так же определены цель и задачи исследования, подтверждена теоретическая и практическая значимость, представлено представление о работе и методах исследования, показаны научная новизна работы и структура диссертации.

В первой главе проведен обзор текущих решений проблемы определения подвижных объектов и так же обсуждены методы управления роботом в среде с активными препятствиями. Определение подвижных объектов на основе системы технического зрения в случае движущейся камеры еще не решена, у текущих подходов несколько недостатков. С другой стороны методы определения подвижных объектов на основе датчиков расстояния требуют очень высокой точности данных датчиков, и для получения нужной точности используются очень дорогие устройства (лазерные сканеры). И так, в области определения движущегося объекта в видеопоследовательностях, за последнее десятилетие, несмотря на большое количество алгоритмов, предложенных для обнаружения движущихся объектов, в случае использования стационарной камеры, лишь немногие из них сосредоточены на работе при движущейся камере и большинство были опубликованы недавно. Все усилия в этой области можно классифицировать по четырем категориям, которые показаны в таблице 1.

Таблица 1- Сравнительное исследование методов обнаружения движущихся объектов

Категория	Недостатки	Достоинства
Фоновое моделирование	<ul style="list-style-type: none"> • Не подходит для свободного движения камеры • Точность сильно зависит от фоновой модели 	<ul style="list-style-type: none"> • Средней сложности • Подходит для приложений в реальном времени • Обеспечение хорошего силуэта объекта
Классификация траекторий	<ul style="list-style-type: none"> • Очень чувствителен к шуму • Не предоставляет информацию о силуэте объекта 	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечение хорошей траектории объекта с течением времени • Средней сложности
Низкий ранг и редкое представление	<ul style="list-style-type: none"> • Требуется коллекция кадров • Не подходит для приложений в реальном времени • Высокая сложность 	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошая точность • Обеспечение хорошего силуэта объекта
Отслеживание объектов	<ul style="list-style-type: none"> • Не предоставляет информацию о силуэте объекта • Требует хорошего первоначального выбора объекта 	<ul style="list-style-type: none"> • Хорошо работает при всех движениях камеры • Средней сложности

Также в диссертационной работе рассмотрены существующие способы управления мобильным роботом в среде с активными препятствиями: методы потенциального поля (PFM), векторное поле гистограммы (VFH), скорость препятствий (VO), система нечеткой логики. Последний метод наиболее подходит для решения поставленных задач.

Первая глава заканчивается конкретизацией задачи адаптации скоростью робота.

Вторая глава посвящена разработке методов обнаружения подвижных объектов для движущейся камеры. Находится мобильный робот, статические и подвижные препятствия в помещении с плоской подстилающей поверхностью. На робот поставлена камера 3D. Необходимо определять объекты на каждом кадре из видеопоследовательности, в результате чего будет получена черно-белая картинка, где белые пиксели образуют границы или края, которые отделяют объекты. Данные одометре присутствуют. Автор предложил новый метод, при котором используются данные о глубине вместе с визуальными данными от камеры 3D для обнаружения подвижных объектов и определения параметров их движения.

Для его понимания необходимо рассмотреть математическую модель предлагаемого метода. Используется «Пинхол» (pinhole - булавочное отверстие) - камера с маленьким отверстием вместо объектива. Описать матрицу проекции можно следующим выражением:

$$P = K \times [R | t]$$

где K — это внутренняя матрица, которая преобразует трехмерные координаты камеры в двумерные однородные координаты изображения, а $[R | t]$ — это внешняя матрица камеры, которая описывает камеру, расположенную в пространстве, и её направление (рис. 1).

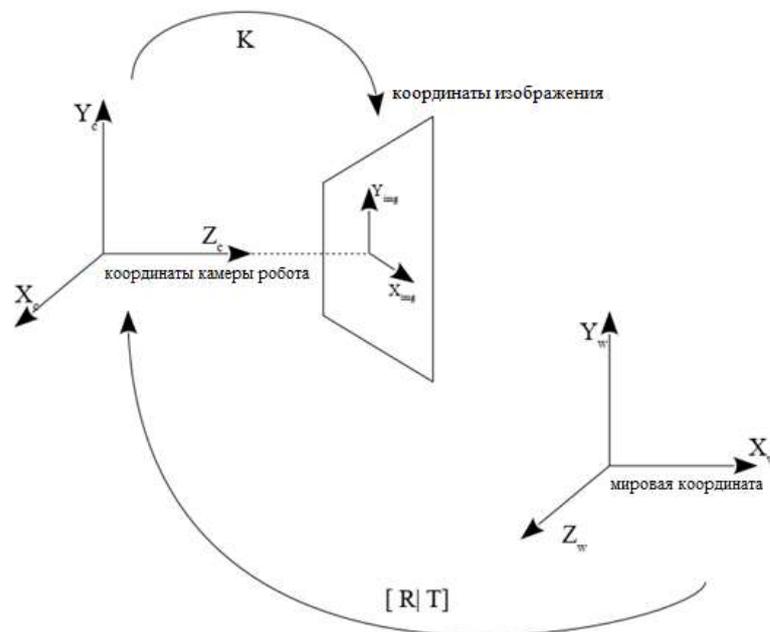


Рисунок 1- Внешняя и внутренняя матрицы для преобразования координат из системы координат окружающего пространства в координаты изображения

Матрица для преобразования координат из системы координат робота $[X_c Y_c Z_c]$ в систему координат камеры (пиксели изображения) $[X_{img} Y_{img}]$ задается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} X_{img} \\ Y_{img} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F}{Z_c}(X_c) + w/2 \\ \frac{F}{Z_c}(Y_c) + h/2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

где F , w , h – параметры камеры (F – фокусное расстояние, w , h – высота и ширина датчика). Допустим, что на картинке 2 пикселя (X_{1img}, Y_{1img}) (X_{2img}, Y_{2img}) они представляются как две точки одного объекта в системе координат робота $[X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}]$ $[X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}]$, длина отрезков на картинке L задается как:

$$L = \sqrt{(X_{img1} - X_{img2})^2 + (Y_{img1} - Y_{img2})^2} \quad (2)$$

На основе уравнения (1) можно записать:

$$(L)^2 = \left(\frac{F * X_{c1}}{Z_{c1}} - \frac{F * X_{c2}}{Z_{c2}} \right)^2 + \left(\frac{F * Y_{c1}}{Z_{c1}} - \frac{F * Y_{c2}}{Z_{c2}} \right)^2$$

Когда рассматриваются 2 точки одного объекта, который не меняет свое положение, не поворачивается относительно робота, можно принять, что $Z_{c1} = Z_{c2}$ и тогда:

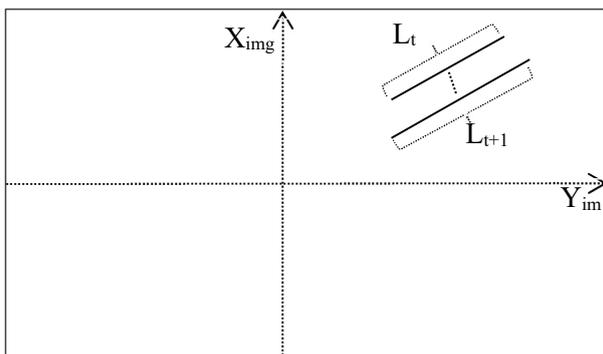
$$(L)^2 = \left(\frac{F * Lx}{Z_c} \right)^2 + \left(\frac{F * Ly}{Z_c} \right)^2 \quad (3)$$

где $(X_{c1} - X_{c2}) = Lx$, $(Y_{c1} - Y_{c2}) = Ly$.

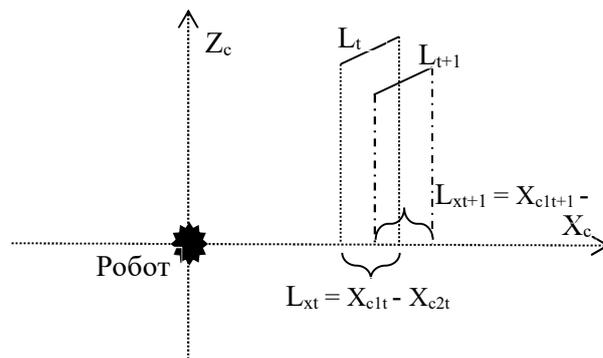
На рисунке 2 можно наблюдать изменение L между двумя последовательными кадрами t и $t+1$ (L_t, L_{t+1}) в системе координат робота и на картинке.

Если предложенный объект не меняет свою форму, не поворачивается относительно робота между кадрами, тогда можно записать: $L_{xt} = L_{xt+1}$, $L_{yt} = L_{yt+1}$, в итоге на основе уравнения 3 можно записать отношение между L_t, L_{t+1} :

$$\frac{(L_t)^2}{(L_{t+1})^2} = \frac{\frac{(F * L_{xt})^2 + (F * L_{yt})^2}{Z_{ct}^2}}{\frac{(F * L_{xt+1})^2 + (F * L_{yt+1})^2}{Z_{ct+1}^2}} = \frac{Z_{ct+1}^2}{Z_{ct}^2} \quad (4)$$



(a) фрагмент на изображении от камеры



(b) Фрагмент в системе координат робота

Рисунок 2- Изменения длины фрагмента объекта на двух последовательных кадрах ($t, t+1$)

Следовательно, если мы знаем Z_c объекта (прямого отрезка), тогда можно определить скорость его между двумя кадрами. Для этого используется камера RGB-D, которая нам дает нужные данные.

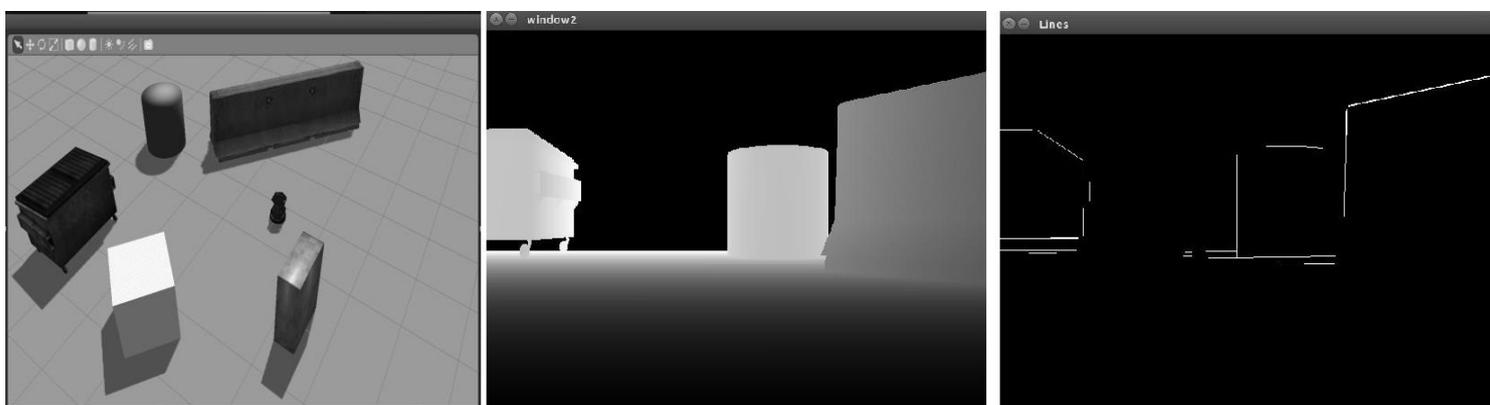
Предлагаемый подход состоит из трех этапов, следующих так, как показано на рисунке. 3.



Рисунок 3- Блок-схема предлагаемого подхода.

На первоначальном этапе выполняется идентификация динамических объектов по исходным выбранным фрагментам в нижеследующей последовательности:

1) инициализация выделенных фрагментов: фрагмент будет определяться выделением границ на изображении с применением оператора Кэнни. В результате обработки данных по алгоритму Кэнни получают черно-белое изображение, в котором белые пиксели образуют границы или ребра динамического объекта. Применяется фильтр по длине и «глубине» найденного фрагмента объекта. Например, на рисунке 4 показан график получаемого результата на основе визуальных данных и данных о глубине - 3D-данные.



(a) Обще видь сценария

(b) данные глубины от камеры

(c) найдены характерны фрагменты

Рисунок 4- Пример инициализации выделенных фрагментов

2) поиск выделенных фрагментов в следующем кадре: на этом шаге найденные выделенные фрагменты преобразуются в контур. Для этого используются два принципа: преобразование Хафа (Hough transforms) – нахождение несовершенных экземпляров объектов в определенном классе фигур (отрезков) и использование двух концов контуров в качестве двух концов отрезка.

В результате образуются две точки, которые будут новыми выделенными фрагментами для отслеживания параметров объекта между двумя кадрами с использованием алгоритма оптического потока, основанного на алгоритме Лукаса –Канады;

3) расчет изменения положения $[X_c, Z_c]$ для каждого показанного фрагмента между двумя кадрами. Тут главная проблема состоит в расчете изменения Z координат, поскольку для модели камеры Kinect (RGB-D) неопределенность измерения пропорциональна квадрату значения «глубины»:

$$\sigma_z = \frac{1}{f} \sigma_d d^2$$

где d – глубина; σ_d – стандартное отклонение; f – фокусное расстояние.

Поэтому определение изменения «глубины» между кадрами на основании сравнения данных глубин, полученных от RGB-D камеры невозможно, но решить данную проблему можно с помощью уравнения (2), где можно использовать изменение длины для поиска изменения Z координат объекта.

По результатам написания главы получены данные о наличии объектов в среде робота и изменениях их параметров между кадрами.

В третьей главе рассмотрены вопросы управления скоростью мобильного робота. К ним относится расчет параметров движения объектов и определение максимальной скорости, с которой робот может двигаться. Предложен алгоритм управления (адаптации скорости) с использованием контроллера на основе нечеткой логики (рис. 5)

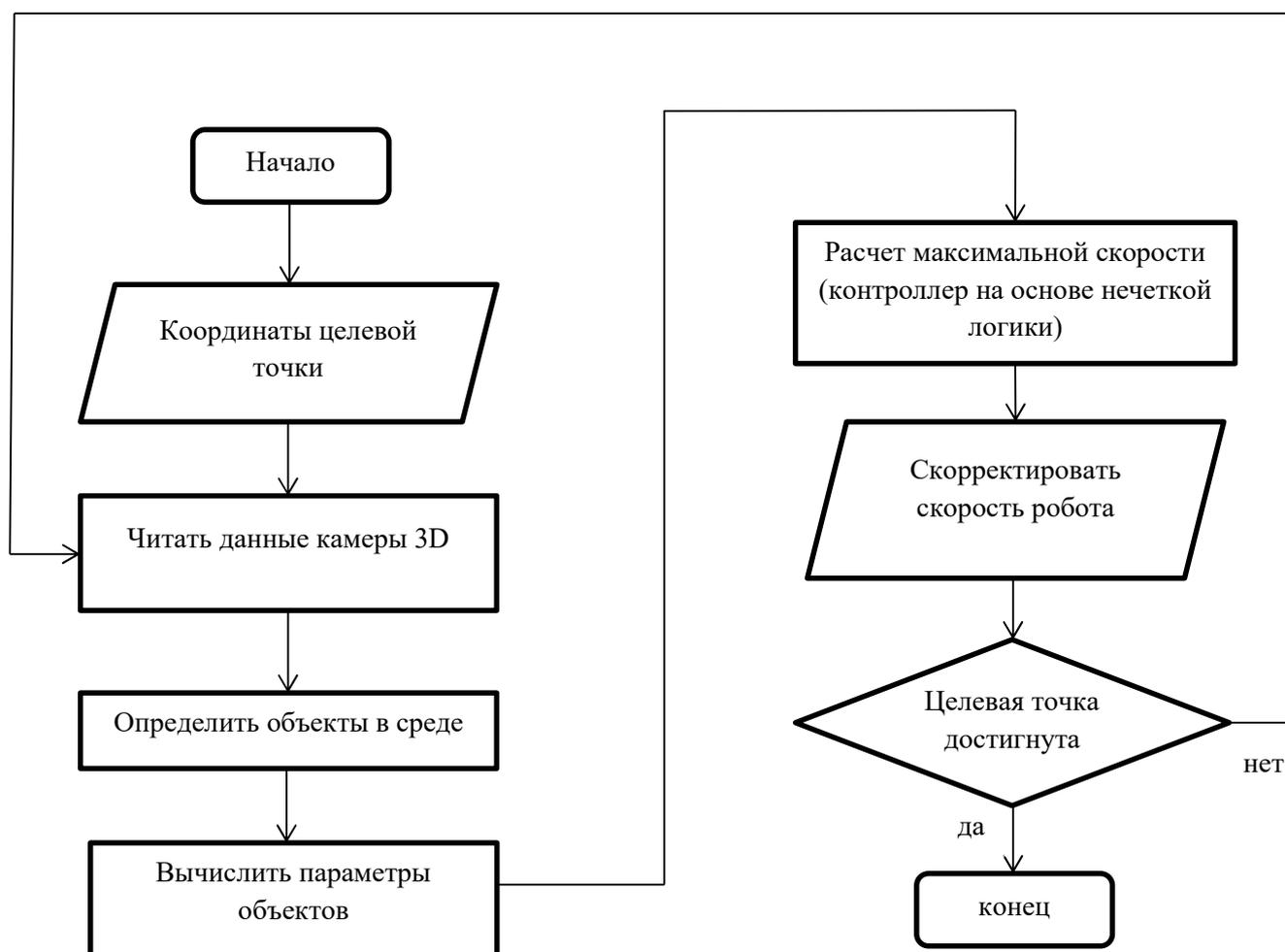


Рисунок 5- Алгоритм коррекции скорости робота в динамической среде

Первый шаг это определения каждого из объектов. Получив данные по изменению глубины между кадрами ΔZ , скорость объекта V_{Oz} относительно

системы координат робота по оси глубины Z можно определить по выражению:

$$V_{Oz} = \Delta Z / t$$

где t - время между двумя кадрами.

А для V_{Ox} , что является скоростью объекта относительно системы координат робота по горизонтальной оси X , вычисляется ΔX – изменение горизонтальной координаты, с помощью уравнения (1):

$$\Delta X = \frac{X_{ct}}{X_{ct+1}} = \frac{X_{imgt} - W/2}{X_{imgt+1} - W/2} * \frac{Z_{ct}}{Z_{ct+1}}$$

И тогда V_{Ox} – скорость объекта относительно системы координат робота:

$$V_{Ox} = \Delta X / t$$

Далее решается задача определения границы максимальной скорости робота. Для этой цели используется система нечеткой логики, поскольку:

- сложное описание объекта управления;
- нестационарные параметры системы управления;
- присутствует сложность формализованного описания среды;
- не стационарность среды;

Далее описывается система нечеткой логики (лингвистические переменные, нечеткие множества, правила системы, методы нечеткого вывода и дефаззификации). Предложены 5 лингвистических переменных (4 входные переменные, 1 –выходная).

Входные параметры:

- расстояние от объекта до робота по оси Z (Z координата в системе координат робота)
- расстояние от объекта до робота по оси X (X координата в системе координат робота),
- изменение расстояния (скорость) объекта относительно системы координат робота по вертикальной оси Z (V_{Oz}),
- изменение расстояния (скорость) объекта относительно системы координат робота по горизонтальной оси X (V_{Ox}),

А выходной параметр – это граница максимальной скорости робота.

Для каждого параметра предложено нечеткое множество.

Для входных переменных:

- расстояние от робота до объекта по оси X большое (big – B), среднее (medium – M), малое (small – S).

- расстояние от робота до объекта по оси Z большое (big – B), среднее (medium – M), малое (small – S).
 - изменение расстояния объекта относительно системы координат робота по вертикальной оси Z: увеличение (decrease – D), уменьшение (increase – I).
 - изменение расстояния объекта относительно системы координат робота по горизонтальной оси X: увеличение (decrease – D), уменьшение (increase – I)
- Для выходной переменной – границы максимальной скорости робота – предложено 5 множеств: очень низкая (very low – VL), низкая (low – L), средняя (medium – M), высокая (high –H) и очень высокая (very high –VH).

Правила нечеткой логики:

- самым популярным методом описание знаний является экспертный подход, Автор написал правила предлагаемой системы управления на основе экспериментов, которые проводил при исследовании системы.

- для нечеткого вывода автор применил метод Мамдани, в котором значения входных и выходной переменной заданы нечеткими множествами:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}$$

В результате дефаззификации нечеткого множества y определяется четкий выход y . Для дефаззификации использован метод центра тяжести (рис. 6) по формуле:

$$y = \frac{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} y \cdot \mu_y(y) \cdot dy}{\int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_y(y) \cdot dy}.$$

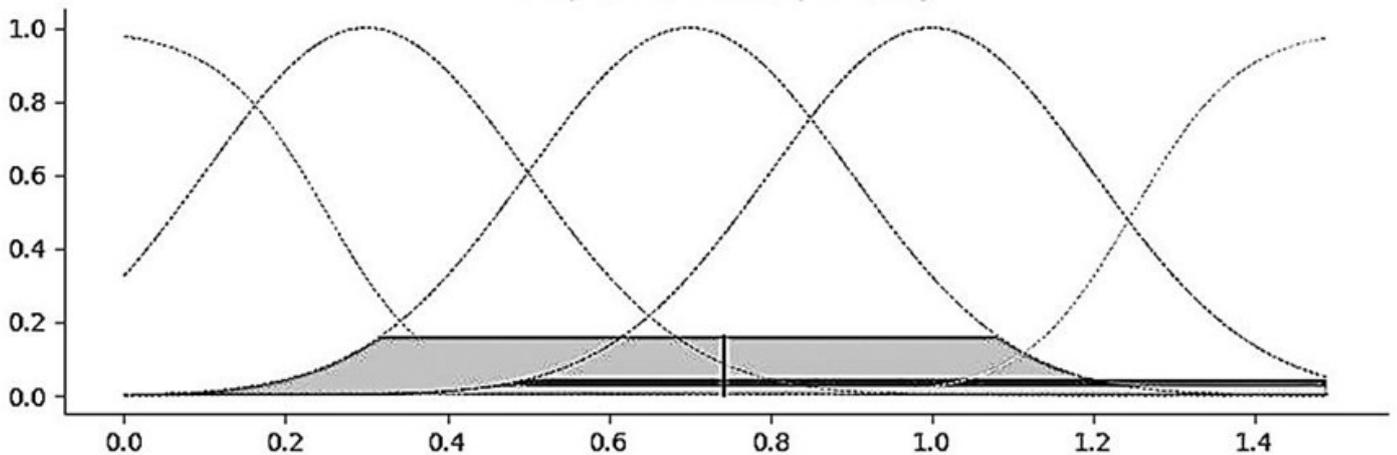


Рисунок 6- Дефаззификация методом центра тяжести для выходного параметра скорости

На рисунке видно, как влияют значения функции принадлежности входных параметров каждого из нечетких множеств на выходное значение.

Четвертая глава посвящена разработке ПО и экспериментальному исследованию предлагаемой системы с помощью виртуальной среды робота и библиотеки `opencv` для обработки изображения. Для проверки работоспособности предложенных методов и оценки их параметров было проведено математическое моделирование.

Сравнение результатов, полученных по новому методу, с данными работ, где использован датчик Лидара, показало, что они достаточно близки по значениям и вполне адекватны несмотря на то, что в предлагаемом методе используются более дешевые устройства (камера 3D).

Таблица 2- Сравнение предлагаемого метода с обнаружением с помощью лидара

	#объекты наземной проверки.	# Правильные объекты	#Неправильные объекты	точность	отзыв	секунд. /кадры
Lidar	52	48	0	1	0.9231	0.26
Предлагаемый метод	50	40	2	0.96	0.8	0.3

Согласно данным таблицы, разница в точности и в отзыве пропорциональна разнице в цене рассматриваемых устройств.

Автор показал, что применение нечеткой логики приводит к увеличению скорости выполнения задачи роботом при использовании данных об изменении положения объектов между кадрами (рис. 7).

Также автор проверил выполнение задачи перемещения робота к целевой точке с помощью контроллера на основе нечеткой логики и коррекции скорости в условиях зала при наличии 2 объектов:

- график А – коррекция скорости при известных данных о положении объектов в среде и отсутствии данных о скорости объекта (время перемещения робота в целевую точку 734 с)
- график Б – коррекция скорости при известных данных о положении и скорости объектов в среде (время перемещения робота в целевую точку 529 с)

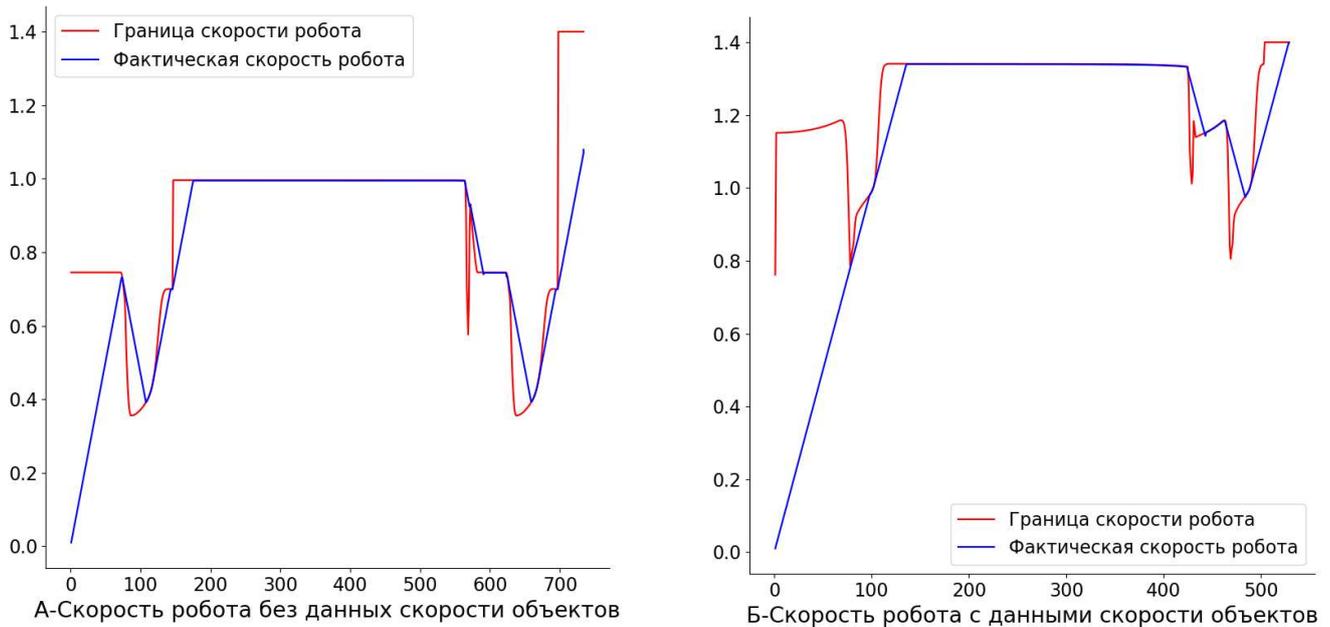


Рисунок 7- скорость робота при выполнении задачи в условиях зала при наличии 2 объектов

На графике показано, что при использовании данных не только о положении объектов, но и данных об их движении, получена более высокая скорость выполнения задачи роботом за более короткий временной промежуток.

Объекты, (предмет) и методы исследования

Для решения поставленных задач применялась аналитическая геометрия, система нечеткой логики, методы обработки изображения и математическое моделирование.

Методы исследования: компьютерное и математическое моделирование, статический анализ, практический эксперимент.

Заключение

1. Проведен обзор существующих алгоритмов для обнаружения объектов в случае движущейся камеры, и алгоритмов управления роботами в динамической среде.
2. Разработан новый метод для определения параметров движения подвижных объектов на основе обработки визуальных данных с помощью информации о глубине, полученные от 3D-камеры.
3. Реализован контроллер на основе нечеткой логики для адаптации скорости мобильного робота на основе параметров (положения и скорости) подвижных объектов в среде робота.

4. Разработана программа для реализации предлагаемых алгоритмов.
5. Проведены эксперименты системы управления при наличии активных препятствий, результаты показывают ее работоспособность.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной
работы (диссертации)**

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

Даетеф Ф., Юдин Д. А. Анализ динамической среды мобильного робота при его движении по неизменному пути // Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 52–62.

Даетеф Ф. Применение системы технического зрения при управлении мобильным роботом в динамической среде // Информатика, телекоммуникации и управление. 2020. Т. 13. №1. С. 19-30. DOI: 10.18721/JCSTCS.13102

Даетеф Ф., Тимофеев А. Н. Управление мобильным роботом в динамической среде с помощью нечеткой логики // Журнал Автоматизация. Современные технологии. 2020. № 10

Аспирант _____ Даетеф Ферас

(подпись)