

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

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).

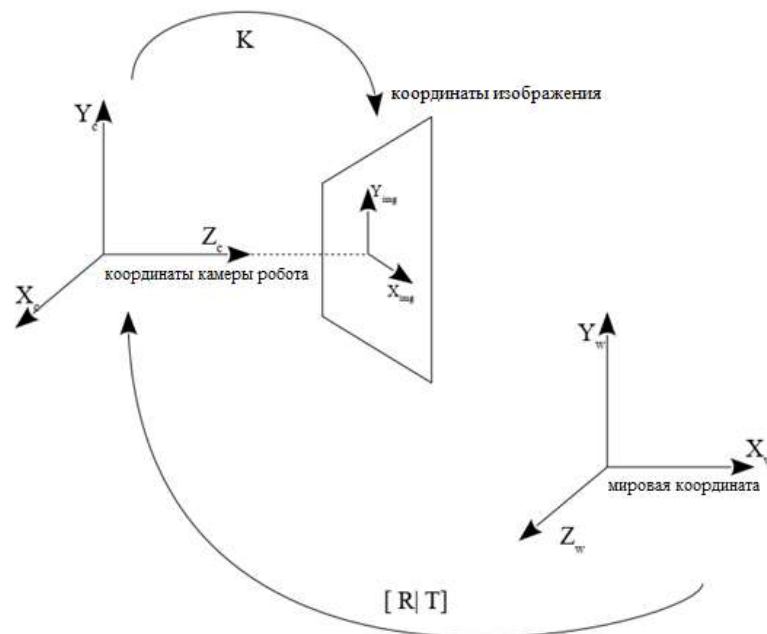


Рисунок 1- Внешняя и внутренняя матрицы для преобразования координат из системы координат окружающего пространства в координаты изображения

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:

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

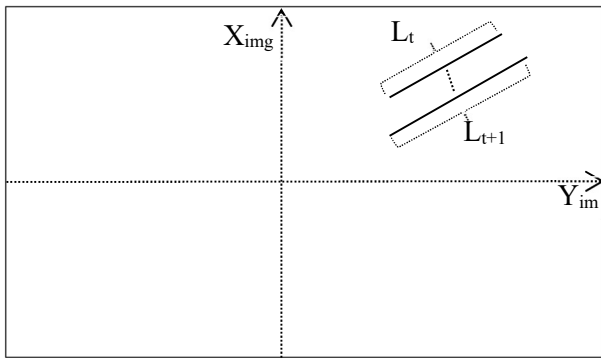
где  $(X_{c1} - X_{c2}) = Lx$ ,  $(Y_{c1} - Y_{c2}) = Ly$ .

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.

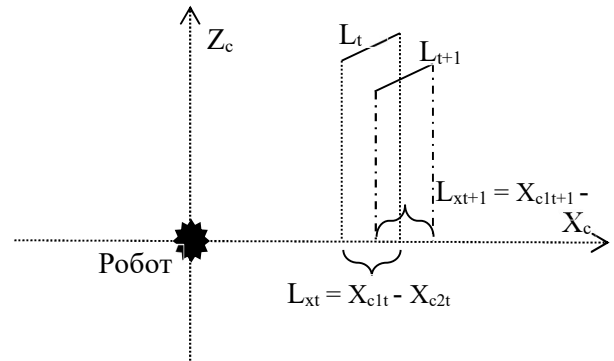
Если предложенный объект не меняет свою форму, не поворачивается относительно робота между кадрами, тогда можно записать:  $L_{xt} = L_{xt+1}$ ,  $L_{yt} = L_{yt+1}$ , в итоге на основе уравнения 3 можно записать отношение между  $L_t, L_{t+1}$ :

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





(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.

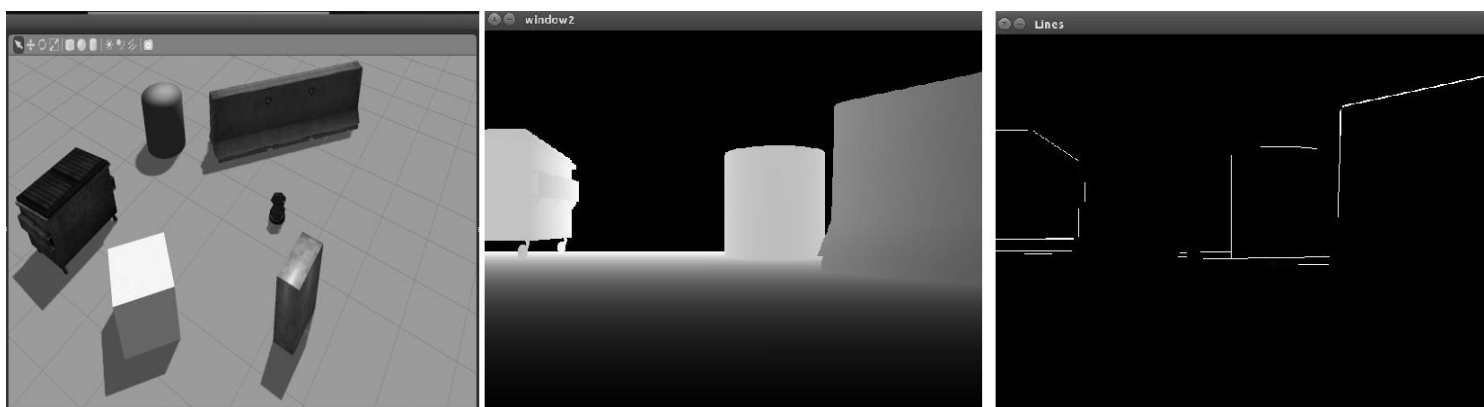
Предлагаемый подход состоит из трех этапов, следующих так, как показано на рисунке. 3.



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;  $\sigma_d$  – 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)

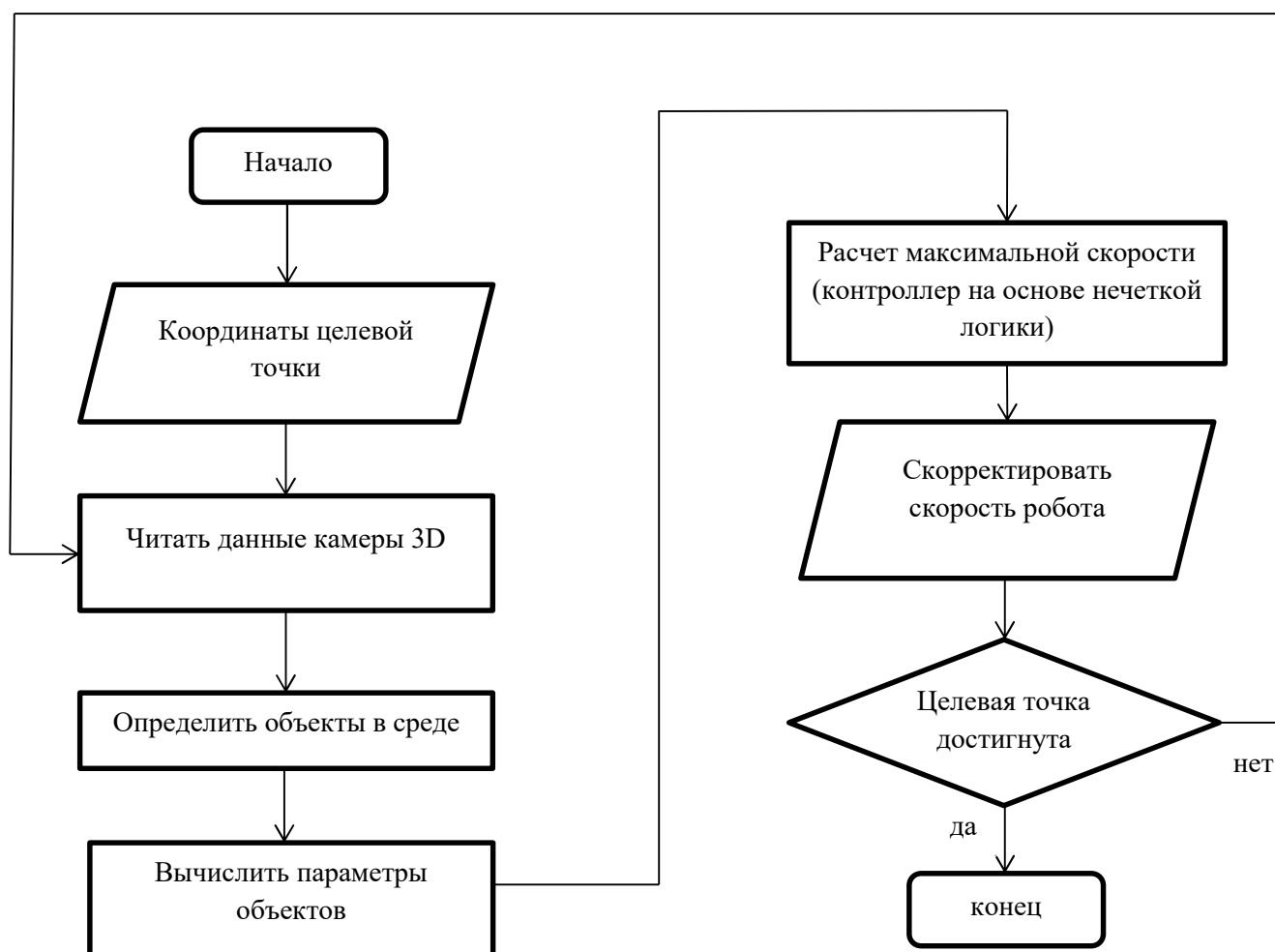


Рисунок 5- Алгоритм коррекции скорости робота в динамической среде

Первый шаг это определения каждого из объектов. Получив данные по изменению глубины между кадрами  $\Delta Z$ , 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  $\Delta X$  – 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:

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

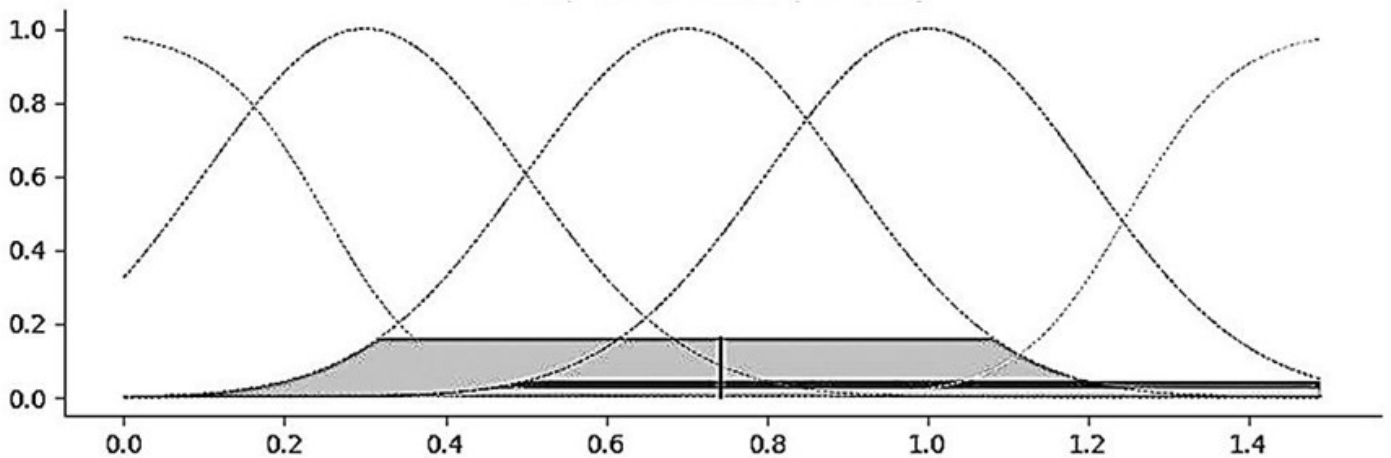


Рисунок 6- Дефаззификация методом центра тяжести для выходного параметра скорости

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)

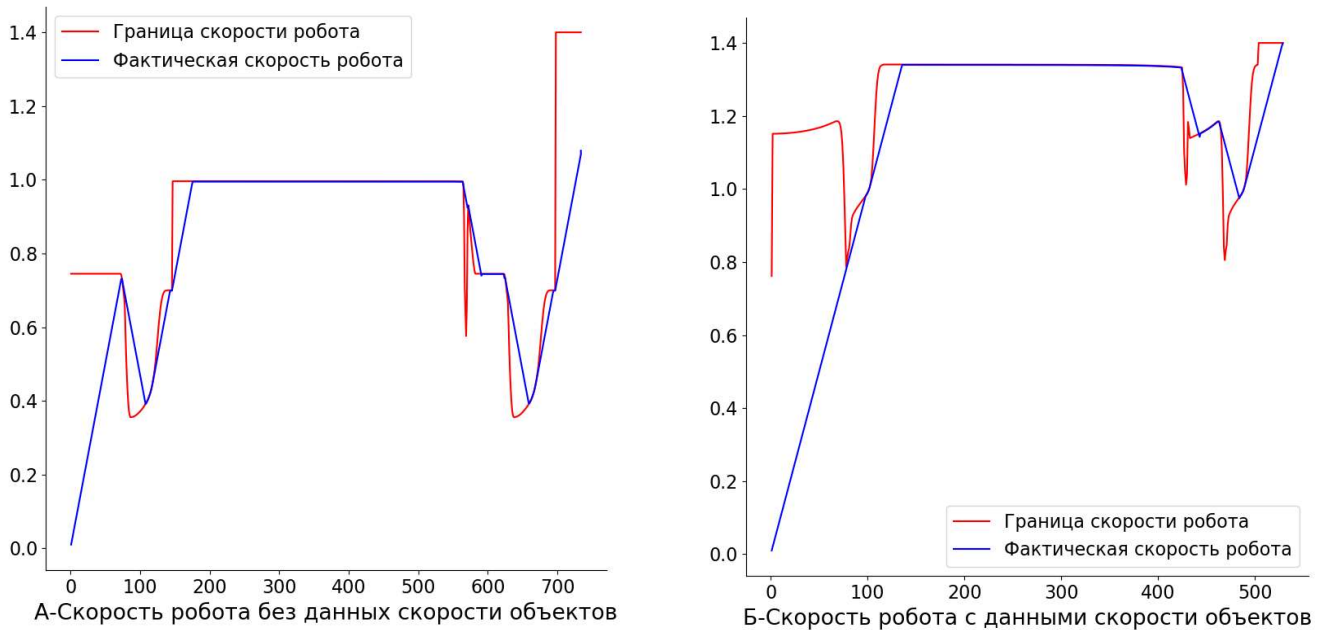


Рисунок 7- скорость робота при выполнении задачи в условиях зала при наличии 2 объектов

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)