

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»  
Факультет электроники и вычислительной техники  
Кафедра «Электронно-вычислительные машины и системы»

На правах рукописи

МАРКОВ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

Разработка метода построения программной траектории и регулятора  
движения по ней беспилотного наземного транспортного средства

Магистерская программа  
«Высокопроизводительные вычислительные системы»  
Направление подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная  
техника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени  
магистра

Волгоград – 2019

Работа выполнена на кафедре «Электронно-вычислительные машины и системы» Волгоградского государственного технического университета

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор Горобцов Александр Сергеевич

Рецензент:

TODO

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Использование беспилотных систем и интеллектуальных систем помощи водителю (ADAS) на дорогах общего пользования приведет к повышению безопасности дорожного движения по причине уменьшения человеческого фактора, увеличению пропускной способности дорог и дорожной инфраструктуры, уменьшению пробок, а также уменьшить количество личных автомобилей при сохранении текущих сценариев использования, что еще сильнее снизит нагрузку на инфраструктуру и загрязнение окружающей среды.

На кафедрах ЭВМиС, ВМ и АТ ВолгГТУ в настоящее время ведется разработка прототипа беспилотного автомобиля на базе автомобиля Лада Калина.

### **Цель и задачи работы.**

Целью данной работы является разработка метода построения программной траектории и регулятора движения по ней беспилотного наземного транспортного средства. Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- 1) анализ существующих подходов к задаче управления беспилотными автомобилями в целом, выделение типичных подсистем, анализ методов планирования движения для наземных транспортных средств;
- 2) проектирование и реализация подсистемы формирования программной траектории;
- 3) проектирование и реализация подсистемы движения по траектории,
- 4) проведение экспериментов и оценка результатов работы.

**Объектом исследования является** процесс управления движением беспилотного автомобиля.

**Предметом исследования являются** алгоритмы и подходы к реализации системы управления движением беспилотного наземного транспортного средства.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) подход к построению программной траектории для беспилотного транспортного средства, совмещающий метод интерполяции кривыми с поиском кратчайшего пути на графе,

2) разработанная архитектура системы управления беспилотным наземным транспортным средством.

**Научной новизной** работы является

- 1) был разработан алгоритм построения программной траектории для наземного беспилотного транспортного средства, осуществляющий построение траектории в форме полиномов пятого порядка, отличающийся от существующего добавлением поиском кратчайшего пути на графе состояний, что позволяет осуществлять планирование на несколько шагов вперед;
- 2) был разработан регулятор для движения по программной траектории с использованием обратной связи по положению от системы SLAM.

**Практическая ценность** работы заключается в реализации системы построения программной траектории и движения по ней беспилотного наземного транспортного средства.

**Апробация** работы проводилась на ряде конференций и выставок.

**Публикации.** По материалам диссертации автором были опубликованы две работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 56 наименований и насчитывает 95 страниц, в том числе 35 рисунков и 2 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается выбор темы диссертационного исследования и ее актуальность, определяются цели и задачи работы, объект и предмет исследования, формулируется научная новизна.

**В первой главе** анализируется типичный применяемый подход к построению систем управления беспилотными автомобилями и применяемые методы планирования движения. Анализируя источники по данной тематике, можно сделать вывод, что, несмотря на большое количество архитектур систем управления беспилотными автомобилями, можно выделить общие архитектурные концепции (рисунок 1).

В общем виде, систему управления беспилотным автомобилем можно разделить на следующие подсистемы:

- интерфейс сенсоров, позволяющий получать данные от сенсоров;
- подсистема восприятия (perception), осуществляющая построение комплексной информации об окружающем пространстве, на основе данных от сенсоров;
- подсистема управления движением, осуществляющая принятие решений и построение безопасной и достижимой траектории и осуществляющая движение по траектории, формирования управляющих сигналов, таких как угол поворота руля, газ, тормоз.

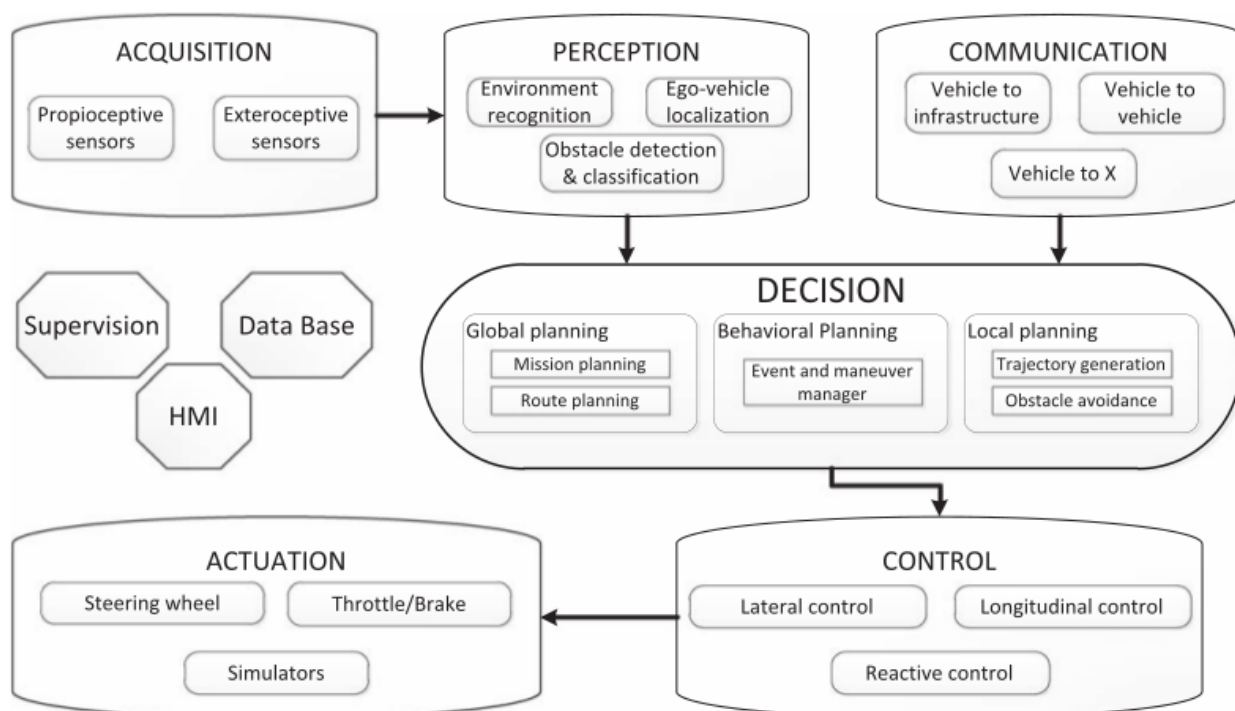


Рисунок 1 – Обобщенная абстракция архитектуры управления автономными автомобилями

Процесс планирования движения и принятия решений в современных беспилотных автомобилях обычно представлен в виде иерархии: планирование маршрута (route planning), принятие решений (behaviour planning, decision making), локально планирование (local motion planning) и управление с обратной связью.

На верхнем уровне осуществляется планирование маршрута по дорожной сети. Затем следуют уровень планирования поведения, который принимает решения и формирует локальные навигационные задачи, которые приближают автомобиль к выполнению высокоуровневой задачи и удовлетворяют

правилам дорожного движения. Затем локальный планировщик формирует непрерывный кинематически и динамически достижимый путь в обход препятствий в окружающем пространстве, который выполняет локальную навигационную задачу. Система управления с обратной связью осуществляет выполнение запланированного движения и коррекцию ошибок.

В данной работе основной акцент делается на планировании локального движения. Рассматривается ряд распространенных методов планирования движения: метод планирования на графах, в частности, метод клеточной декомпозиции, случайные (sample-based) методы, основанные на алгоритме Rapidly Exploring Random Trees (RRT) и его модификациях, методы интерполяции траектории с помощью кривых.

**Во второй главе** рассматривается проектирование системы управления движением беспилотного автомобиля.

Для планирования локальной траектории траектории выбран метод интерполяции кривыми, а именно, полиномами пятого порядка. Метод интерполяции выбран по причине его детерминированности и возможности находить оптимальное или близкое к нему решение.

Планирование траектории осуществляется в подвижной системе координат, образованной репером Френе, движущейся по идеальной траектории, как показано на рисунке 2. В качестве идеальной траектории выступает центр полосы движения. Это является распространенным подходом к планированию движения и позволяет рассмотреть независимо планирование поперечного движения и продольного движения (профиля скорости).

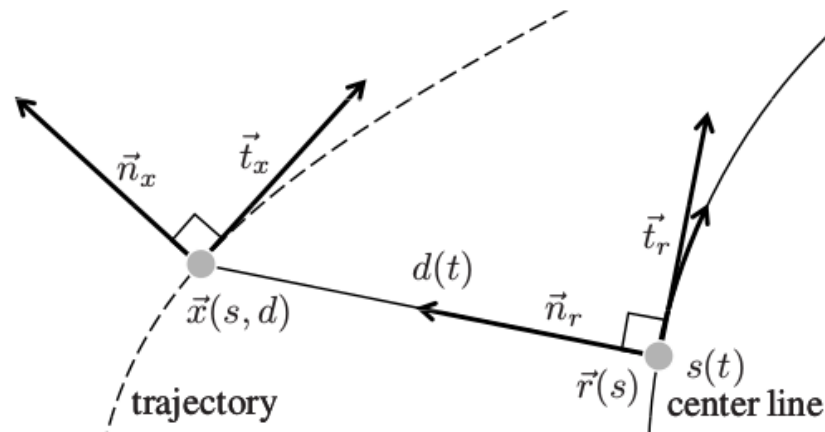


Рисунок 2 – Система координат для планирование траектории

Для нахождения оптимальной траектории, определена функция стои-

мости, основанная на минимизации рывков (jerk), т.е. производной ускорения. Такая функция стоимости позволит планировать траектории, избегающие излишнего количества маневров или резких маневров. Функции стоимости определяются независимо для поперечного (1) и продольного (2) движения.

$$C_d = K_{dj} \int_0^T \ddot{d}(t)^2 dt + K_d d(T)^2 + K_{dt} T \quad (1)$$

$$C_s = K_{sj} \int_0^T \ddot{s}(t)^2 dt + K_s (s(T) - S_1)^2 + K_v (\dot{s}(T) - \dot{S}_1)^2 + K_{st} T \quad (2)$$

где  $s(t)$  — продольная траектория,  
 $d(t)$  — поперечная траектория,  
 $T$  — время маневра,  
 $S_1$  — целевое продольное положение,  
 $K_{dj}, K_d, K_{dt}$  — весовые коэффициенты для поперечного движения,  
 $k_{sj}, k_s, K_v, k_{st}$  — весовые коэффициенты для продольного движения.

При выборе оптимальной траектории необходимо учитывать ограничения на максимальную скорость, ускорение, угол поворота, накладываемые кинематикой и динамикой автомобиля, а также выбирать траекторию, не пересекающуюся с препятствиями. Оптимизация с учетом этих ограничений является затруднительной и типичным подходом является формирование набора траекторий и выбора оптимальной. Происходит формирование набора траекторий путем варьирования конечных условий, а затем выбор наиболее оптимальной из них, удовлетворяющей ограничениям. Пример формирования набора траекторий и выбора оптимальной приведен на рисунке 3б.

В результате экспериментальной проверки было установлено, что рассмотренный метод формирования программной траектории обладает такими недостатками, как сильная зависимость от весовых коэффициентов функционалов стоимости и застревание в локальном минимуме, т.е. метод формирует траектории, оптимальные в данный момент, но неоптимальные с точки зрения достижения цели. Иллюстрация этой проблемы представлена на рисунке 3.

На рисунке изображена смоделированная ситуация. Автомобиль дви-

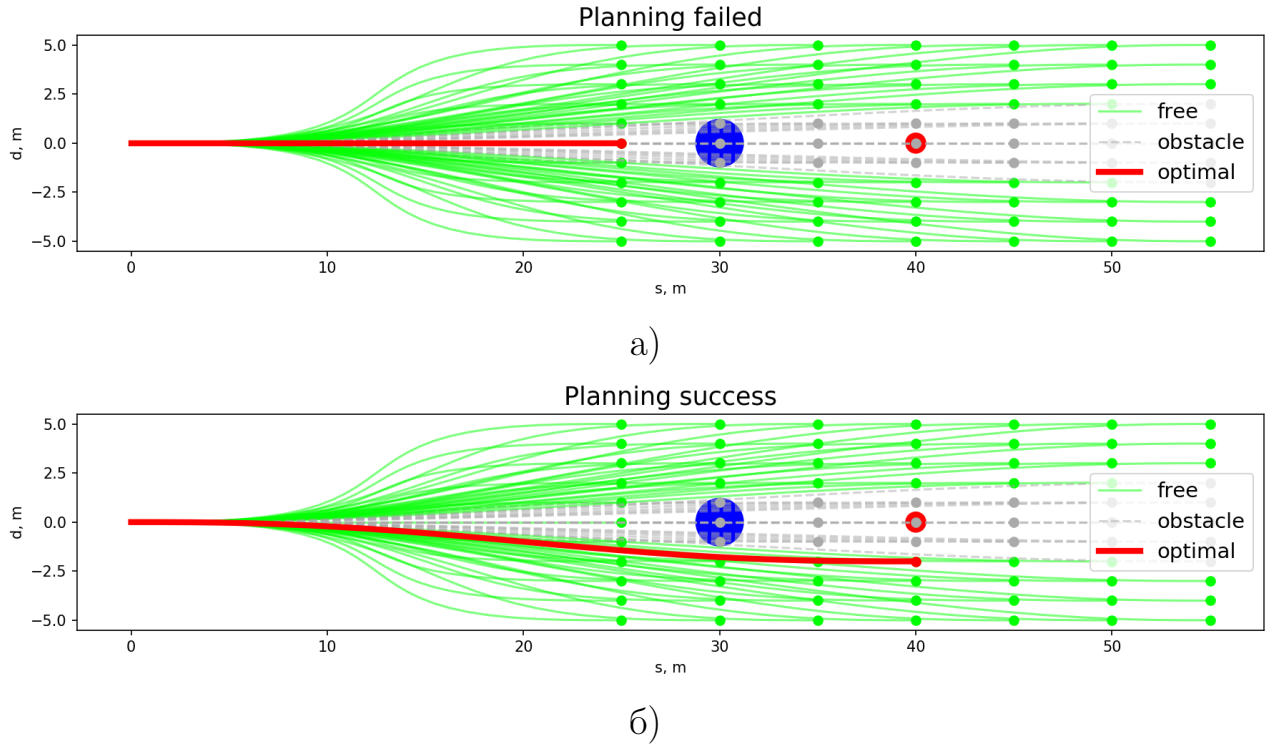


Рисунок 3 – Пример планирования траектории с учетом препятствия при различных весовых коэффициентах: а) подходящая траектория не была найдена, б) подходящая траектория была найдена

жется по дороге с постоянной скоростью, имеется локальная цель с продольной координатой 40 м. Препятствие в форме окружности радиусом 1.5 м имеет продольную координату 30 м. Для наглядности изображения осуществлялось варьирование только продольных и поперечных координат конечного состояния, скорость и время маневра не изменялись. На рисунке изображены два результата планирования с различными весовыми коэффициентами в функционале стоимости.

Для того, чтобы объехать препятствие, автомобиль должен отклониться от опорной траектории. Этот маневр приведет к следующим изменениям в функционале стоимости 2:

- отклонение  $d$  от опорной траектории увеличиться, что приведет к увеличению члена  $K_d d(T)^2$ ;
- совершенные маневры приведут к увеличению  $K_{dj} \int_{t_0}^{t_1} \ddot{s}(t)^2 dt$ ;
- общее время маневра приведет к увеличению члена  $K_{st} T$ ;
- автомобиль будет ближе к продольной цели, что приведет к уменьшению  $K_s (s(T) - S_1)^2$

Итоговое значение функционала стоимости и принятое решение зависит от соотношения весовых коэффициентов  $K_d$ ,  $K_{dj}$ ,  $K_{st}$ ,  $K_s$ .



Эту проблему можно решить, если модифицировать алгоритм планирования движения путем осуществления нескольких шагов планирования, т.е. рекурсивно запустить планирование повторно из каждого конечного состояния. Такой метод существенно увеличит вычислительную сложность алгоритма, но позволит осуществлять планирование с большим горизонтом и осуществлять более сложные маневры.

Поэтому была предложена модификация метода формирования программного движения, совмещающая планирование программного движения метод интерполяции кривых с применением поиска кратчайшего пути на графе. В предложенном методе сначала осуществляется построение графа возможных состояний, вершины которого получаются аналогично методу, описанному ранее, т.е. путем варьирования конечного состояния: продольного и поперечного положения, продольной скорости и длительности маневра. Затем осуществляется выбор вершины и пути к ней, которые минимизируют функционал стоимости. Для этого функционал стоимости был переписан следующим образом, разделившись на стоимость вершины, описывающую, насколько это состояние отдалено от целевого, и стоимость пути на графе к этой вершине, описывающую маневры, которые необходимо совершить для достижения этой вершины:

$$C_{move} = K_{lon}K_{sj} \int_0^T \dot{s}(t)^2 dt + K_{lat}K_{dj} \int_0^T \ddot{d}(t)^2 dt \quad (3)$$

$$C_{state} = K_{lon} \left[ K_s (s(T) - S_1)^2 + K_v (\dot{s}(T) - \dot{S}_1)^2 + K_{st}T \right] + K_{lat} \left[ K_d d(T)^2 + K_{dt}T \right] \quad (4)$$

Поиск кратчайшего пути на графе осуществляется с помощью алгоритма Дейкстры. Пример формирования набора траекторий представлен на рисунке 4. Для наглядности осуществлялось варьирование только поперечных конечных состояний.

**В третьей главе** представлена реализация системы управления беспилотным автомобилем с использованием подхода, описанной во второй главе.

Система управления построена на базе Robot Operation System (ROS)

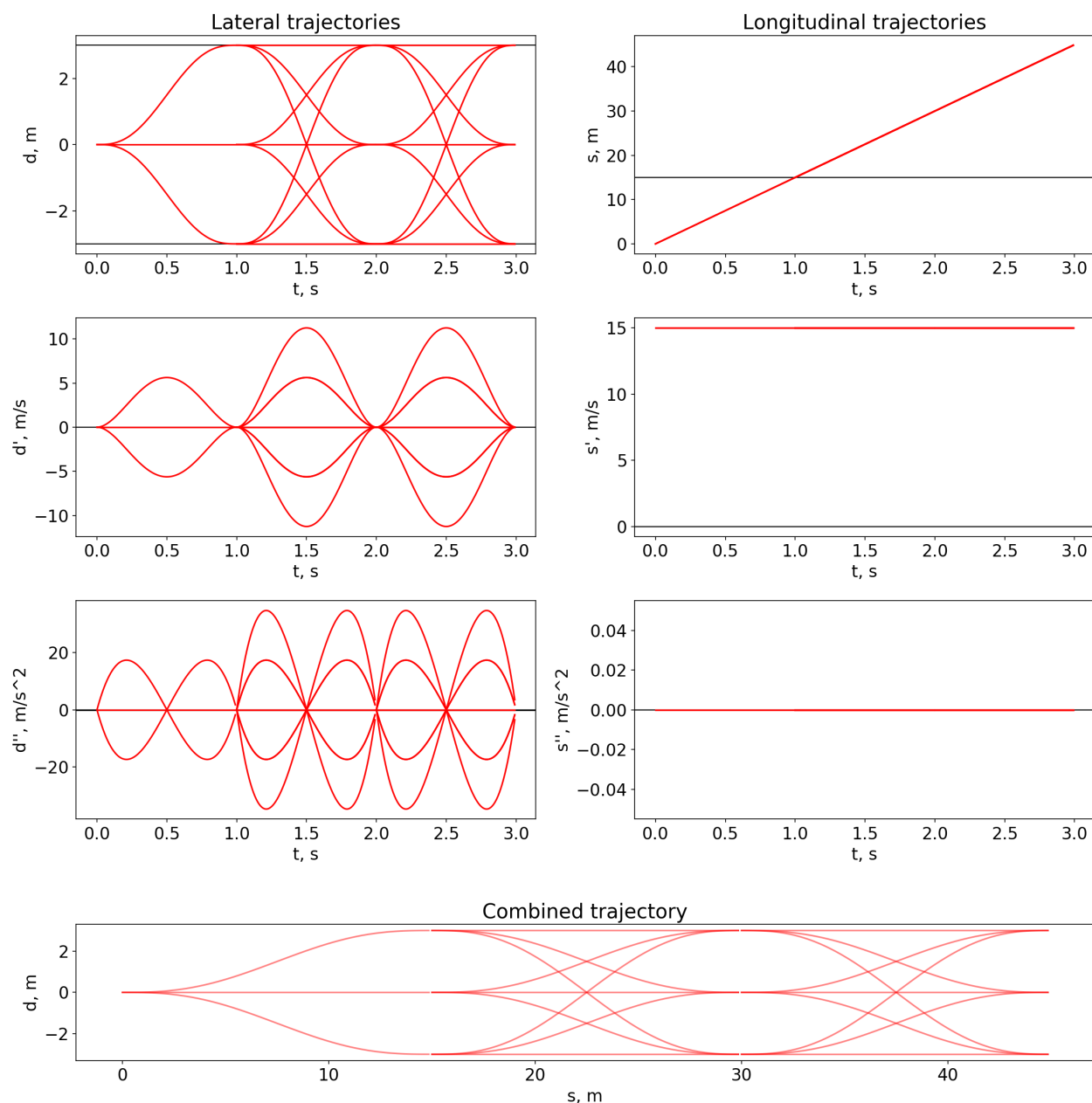


Рисунок 4 – Пример формирования набора траекторий

— фреймворк для разработки программного обеспечения для роботов. Использование ROS обладает большим количеством преимуществ и существенно упрощает процесс разработки ПО:

- модульная архитектура, основанная на нодах (nodes), позволяющая разрабатывать и тестировать отдельные модули системы независимо,
- встроенный удобный механизм межпроцессного взаимодействия (топики и сервисы),
- большое количество библиотек, реализующих распространенные в робототехнике алгоритмы,
- большое количество библиотек, реализующих работу с распространенным оборудованием,

- хорошая документация и сообщество.

Был реализован прототип системы управления беспилотным автомобилем и испытан на мобильной колесной платформе, представленной на рисунке 5.

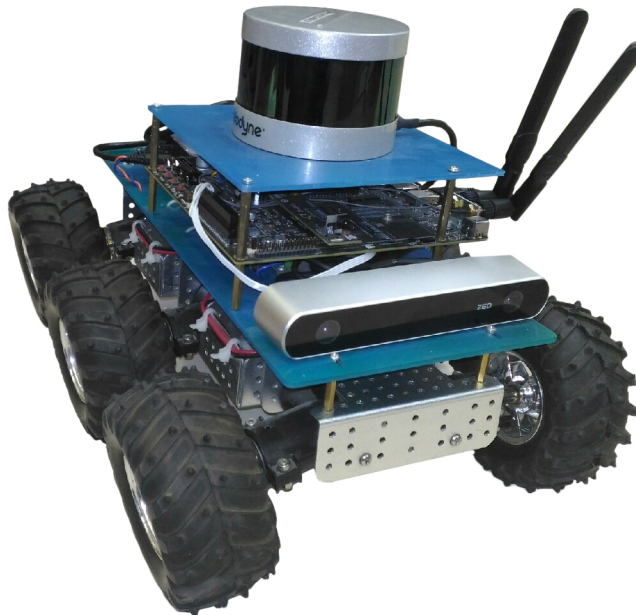


Рисунок 5 – Внешний вид колесной платформы

В качестве бортового компьютера применена встраиваемая система NVidia Jetson TX2. На платформе размещены стереокамера ZED Camera и LiDAR Velodyne VLP-16. Стереокамера используется для определения текущего локального положения и ориентации платформы в пространстве с помощью SLAM-алгоритма, поставляемого с библиотекой камеры. LiDAR используется для определения препятствий. Т.к. целью данной работы была разработка алгоритмов движения, разработка полноценной системы компьютерного зрения не проводилась. С целью проведения экспериментов по движению с объездом препятствий, была реализована система обнаружения препятствий, использующая облако точек, получаемое с помощью LiDAR. Алгоритм работы системы следующий:

- 1) в облаке точек осуществляется выделение плоскости с помощью алгоритма RANSAC,
- 2) облако точек, получаемое от LiDAR разбивается с помощью двумерной регулярной сетки,
- 3) за препятствия считаются те клетки сетки, в которых присутствует более определенного количества точек, отмеченные как выбросы (outliers);

- 4) применяется трассировка пути с помощью алгоритма Брезенхема для растривания линии, чтобы разделить пространство на свободные клетки до препятствия, клетки препятствия и клетки в неизвестном состоянии позади препятствия;
- 5) происходит расширение препятствий путем растривания круга определенного радиуса вокруг каждой клетки препятствий для учета габаритов мобильной платформы.

Результат работы алгоритма приведен на рисунке 6.

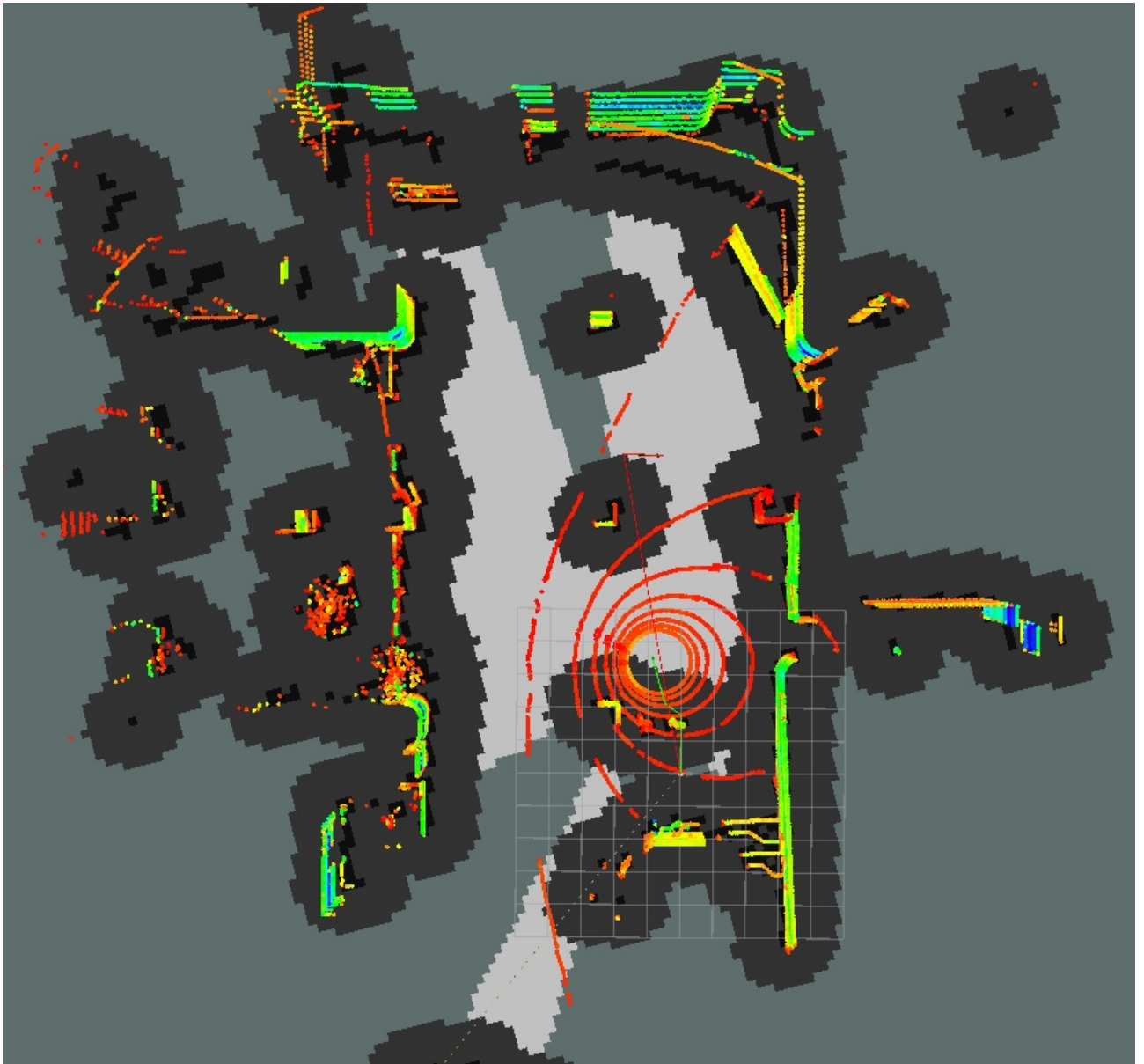


Рисунок 6 – Результат работы алгоритма детектирования препятствий

Для реализации рулевого управления с обратной связью применена упрощенная модель на базе модели МакАдама.

Применяемая в этой работе модель автомобиля управляется изменением относительной скорости вращения колес левого и правого борта. В модели

используются двигатели постоянного тока, а изменение скорости вращения осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Управляющий сигнал для рулевого управления, а именно скважность ШИМ для двигателей левого и правого бортов пропорционален углу отклонения между текущим направлением движения автомобиля (вектором скорости) и направлением на точку программной траектории на некотором расстоянии впереди. Использование точки на некотором удалении позволяет учитывать будущие изменения в траектории и заранее начинать маневр.

По причине того, что траектория представлена в виде большого количества плотно расположенных точек, выбор необходимой точки осуществляется следующим образом: в начале находится ближайшая к автомобилю точка на кривой, а затем от этой точки вперед по траектории перебираются точки, до тех пор, пока расстояние от очередной точки до положения автомобиля не будет больше заданного (рисунок 7).

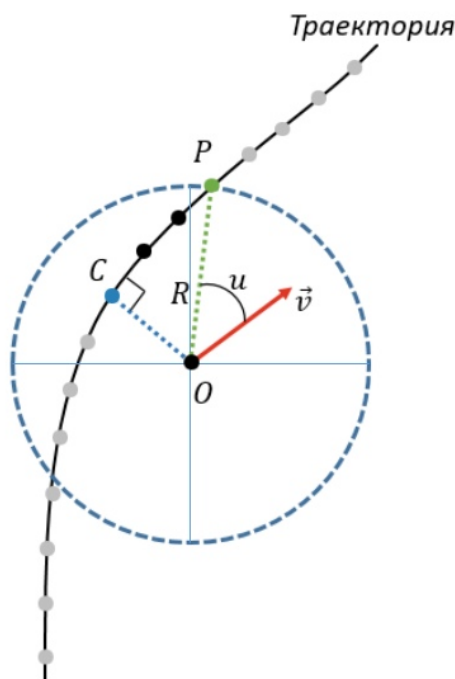


Рисунок 7 – Схема определения угла поворота

Архитектура системы управления представлена на рисунке 8.

Система управления состоит из четырех основных блоков: блока работы с сенсорами, блока восприятия, реализующего алгоритмы компьютерного зрения, блока управления движением, реализующего алгоритмы планирования движения, и блока работы с платформой, управляющего двигателями.

Основными нодами являются `motion_planner_node` и `controller_node`,

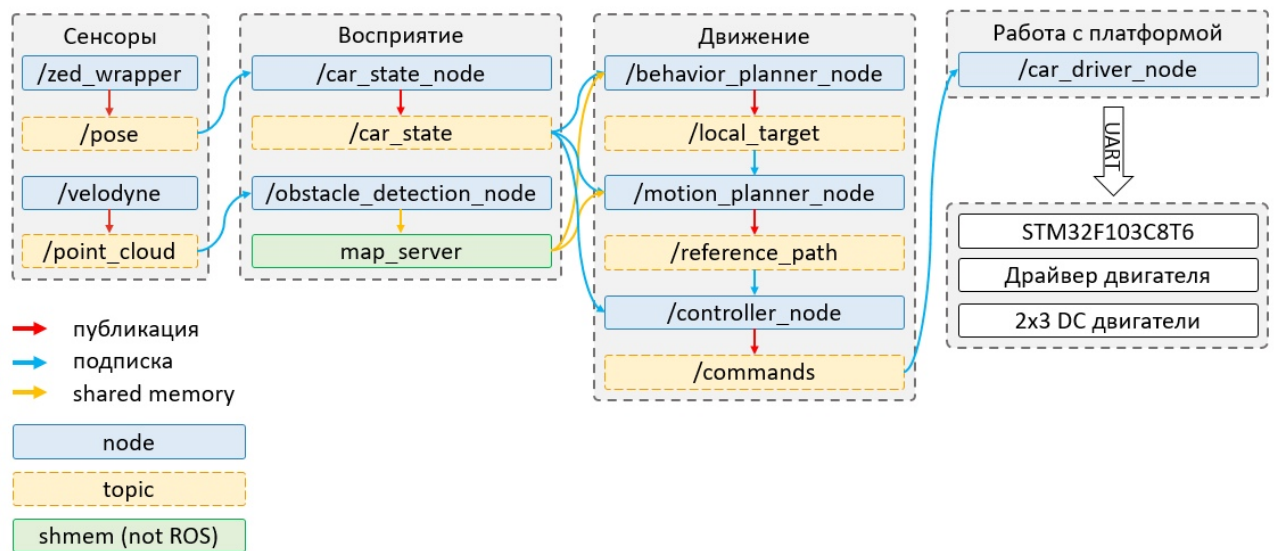


Рисунок 8 – Архитектура системы управления

реализующих локальное планирование траектории и регулятор обратной связью соответственно.

**В четвертой главе** представлен анализ результатов работы. В рамках диссертационного исследования была разработана и реализована система управления движением беспилотного автомобиля с использованием представленного подхода. Алгоритм планирования движения основан на интерполяции траектории с помощью полиномов пятого порядка, регулирование рулевого управления с обратной связью реализовано на основе модели МакАдама.

Для оценки работы системы управления беспилотным автомобилем было проведено экспериментальное исследование с помощью мобильной платформы. Поставленные задачи: определение точности следования по заданной траектории с помощью регулятора с обратной связью и проверка работы алгоритма планирования траектории.

На рисунке 9 представлено сравнение программной (оранжевая линия) и измеренной с помощью SLAM-алгоритма (синяя линия) траекторий при движении автомобиля по кругу. Максимальное отклонение составило примерно 5 см.

На рисунке 10 представлена визуализация движения с объездом статических препятствий.

Текущее положение и ориентация модели автомобиля, полученное с помощью SLAM-алгоритма, отмечено красной стрелкой. Черным и темно-серым отмечены препятствие, определенное с помощью LiDAR и буферная зона вокруг него соответственно. Зеленая линия отмечает идеальную траек-

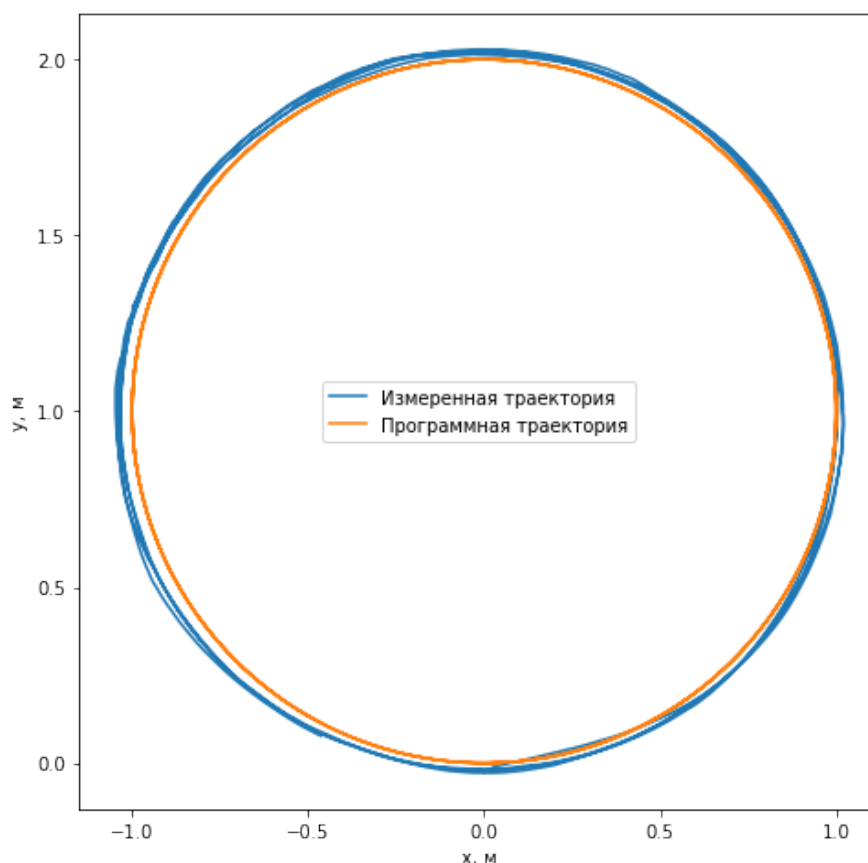


Рисунок 9 – Результаты эксперимента с движением по заданной траектории, представляющую середину дороги. В данном эксперименте идеальная траектория представляла собой спираль и считывалась из файла, в реальности за формирование цели и идеальной траектории отвечает behaviour planner. Белые линии отмечают виртуальные границы дороги. Многочисленные серые линии — множество сгенерированных траекторий-кандидатов. Красная линия — выбранная оптимальная траектория в объезд препятствия.

**В заключении** работы сформулированы общие выводы о значимости данной работы для организации и перспективах исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1) Проведен анализ подходов к построению систем управления беспилотными автомобилями, определена общая архитектура и выделены общие блоки.
- 2) Проведен анализ методов формирования программного движения применительно к беспилотным наземным транспортным средствам.
- 3) Спроектирован и реализован прототип системы управления движением беспилотного наземного транспортного средства на базе мобиль-



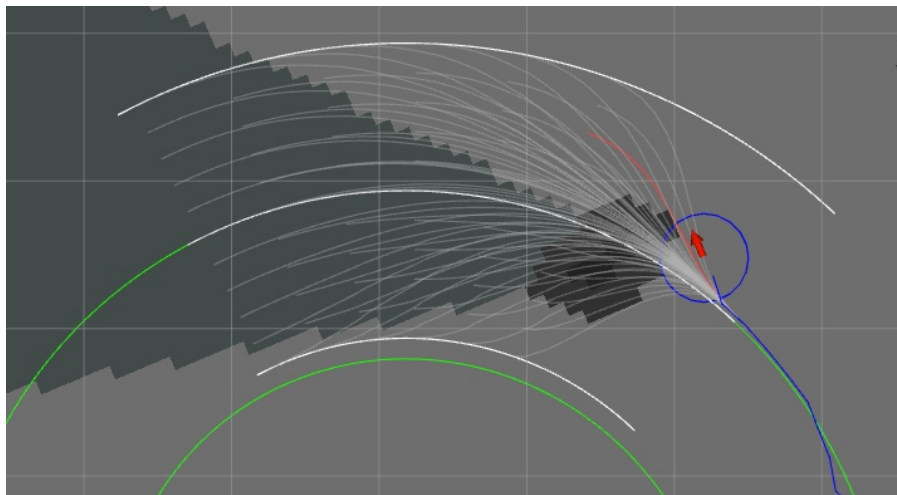


Рисунок 10 – Результаты эксперимента с объездом препятствий колесной платформой.

- 4) Проведены испытания на базе мобильной платформы, которые показали возможность реализованной системы планировать траекторию движения в объезд препятствий и точно следовать запланированной траектории с помощью обратной связи от камеры глубины.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РАБОТЫ

Данная работа является начальным этапом в исследовании разработке системы управления беспилотным автомобилем. Дальнейшее улучшение возможностей системы построения программных траекторий может быть осуществлено путем использования программы "ФРУНД" для проверки и/или формирования участков траектории с целью достижения лучшего учета динамических ограничений транспортного средства.

Вторым направлением работ является исследование и разработка системы компьютерного зрения, которая является важнейшим блоком в архитектуре управления беспилотным автомобилем.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Опубликованные:

- 1) Марков, А.Е. Проект системы компьютерного зрения для беспилотного автомобиля / А.Е. Марков, П.С. Тарасов // Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, 16-20



апреля 2018 г.) : тез. докл. / редкол.: А. В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.] ; Волгоградский гос. техн. ун-т, Совет СНТО. - Волгоград, 2018. - С. 166-167.

2) Марков, А.Е. Система управления беспилотным автомобилем / А.Е. Марков, П.С. Тарасов, Ан.В. Скориков // Прогресс транспортных средств и систем – 2018 : материалы междунар. науч.-практ. конф. (г. Волгоград, 9-11 октября 2018 г.) / редкол.: И. А. Каляев, Ф. Л. Черноусько, В. М. Приходько [и др.] ; ВолгГТУ, РФФИ, «ФНПЦ «Титан–Баррикады». - Волгоград, 2018. - С. 206.

Поданные на публикацию:

- 1) Система движения по заданной траектории для беспилотного автомобиля / А. Е. Марков [и др.]
- 2) Построение программной траектории движения беспилотного наземного транспортного средства / В. А. Егунов [и др.] // ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ УПРАВЛЕНИЕ И ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ