

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Кафедра систем управления и информатики

Отчет по практической работе  
«РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПАРКОВКИ  
РОБОТА-МАШИНКИ»

по дисциплине  
«Бесконтактные средства локальной ориентации роботов»

Выполнили: студенты гр. Р4235  
Антонов Е. С.,  
Артемов К. А.

Преподаватель: Власов С. М.,  
ассистент каф. СУиИ

Санкт-Петербург  
2017

# Содержание

Введение	3
1 Особенности строения робота	5
2 Управление движением робота	7
2.1 Кинематическая модель . . . . .	7
2.2 Локализация робота . . . . .	8
2.3 Структура системы управления . . . . .	9
3 Поиск парковочного места	15
4 Планирование траекторий движения	17
Заключение	19
Список использованных источников	20
Приложение А Описание экспериментов по проверке состоятельности использованных методов локализации робота с помощью сторонней системы технического зрения	21

# Введение

Данный документ призван познакомить читателей с результатами работы авторов над задачей создания системы управления для робота-машинки, которая бы давала ему способность автоматически (самостоятельно) выполнять параллельную парковку.

Более конкретно ее можно описать примерно так.

Имеется робот-машинка, ходовая часть которого устроена примерно так же, как у настоящего заднеприводного автомобиля: один из пары его двигателей приводит во вращение задние колеса, второй отвечает за поворот передних, рулевых колес. Данный робот должен проехать вдоль возможного места парковки, обозначенного с помощью посторонних объектов, имитирующих собой другие стоящие неподвижно транспортные средства (см. рисунок 1), оценить его геометрические параметры, необходимые для совершения маневра, характерного для параллельной парковки, и, собственно, проделать последний.

Для ее решения авторам пришлось проработать следующие технические вопросы:

- создание упомянутого робота из конструктора LEGO Mindstorms EV3;
- подбор для него датчиков и программная реализация алгоритмов обработки поступающей с них информации;
- проектирование системы управления движением робота;
- создание алгоритма картирования парковочного места и его окрестностей.

Описанию их ключевых моментов и посвящена основная часть этого документа.



Рисунок 1 – Общий вид зоны проведения экспериментов.

# 1 Особенности строения робота

Особенности строения использованного в работе робота-машинки (см. рисунок 3) даются следующим перечислением:

- робот собран из конструктора LEGO Mindstorms EV3;
- робот имеет два двигателя со встроенными энкодерами, один из которых (тяговый, 1) приводит в движение задние колеса, а второй (рулевой, 2) поворачивает передние;
- усилие с тягового двигателя на задние колеса передается через дифференциал 3 с передаточным отношением, обеспечивающим равенство угловой скорости вращения вала двигателя с полусуммой угловых скоростей задних колес;
- рулевые колеса связаны друг с другом и с рулевым двигателем через рулевую трапецию, кинематическая схема которой изображена на рисунке 2;

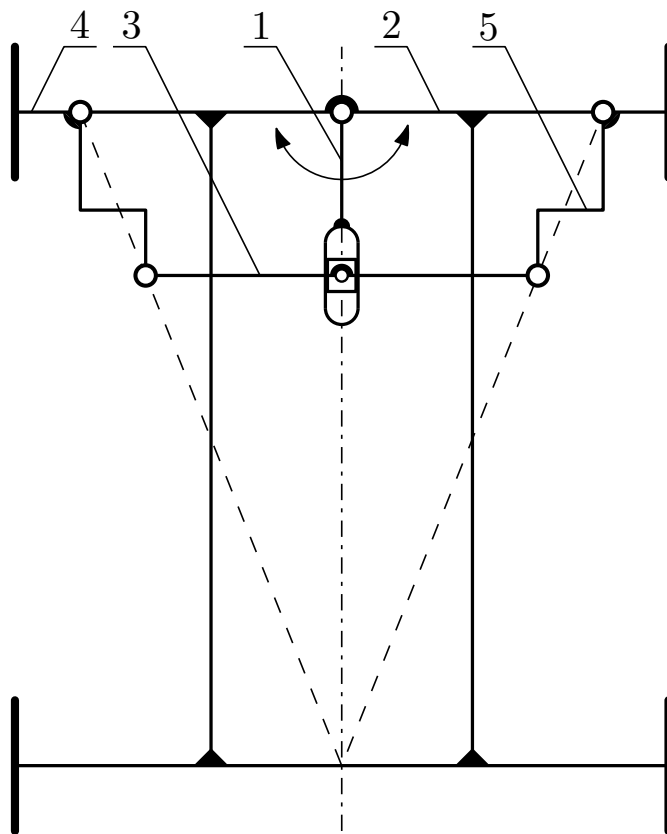
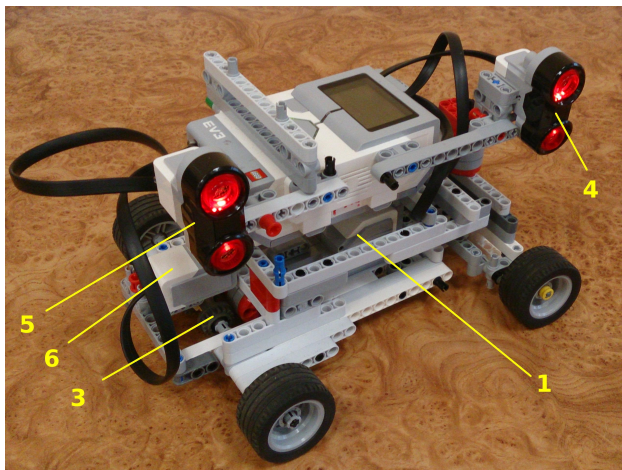


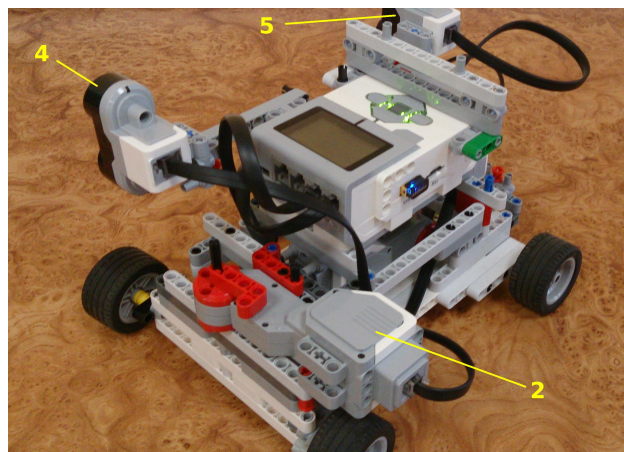
Рисунок 2 – Кинематическая схема рулевой трапеции: 1 — коромысло, приводимое в движение рулевым двигателем, 2 — шасси робота, 3 — шатун, 4,5 — коромысла, жестко соединенные с осями вращения передних колес.

- для измерения расстояний до объектов окружающей среды робот имеет два ультразвуковых дальномера 4, 5;
- для определения собственного угла поворота и угловой скорости робот снабжен возвращающим их датчиком-гироскопом 6.

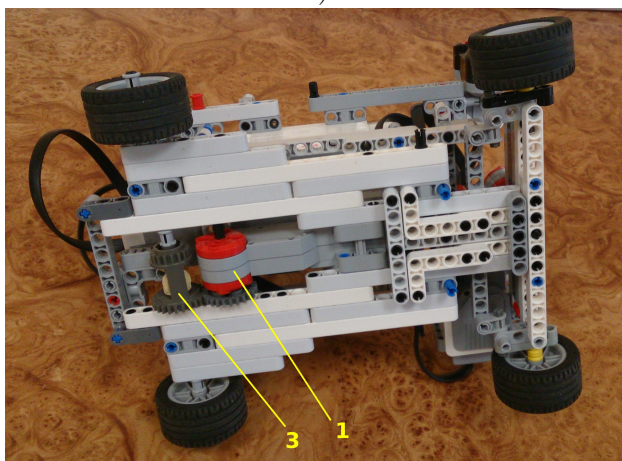




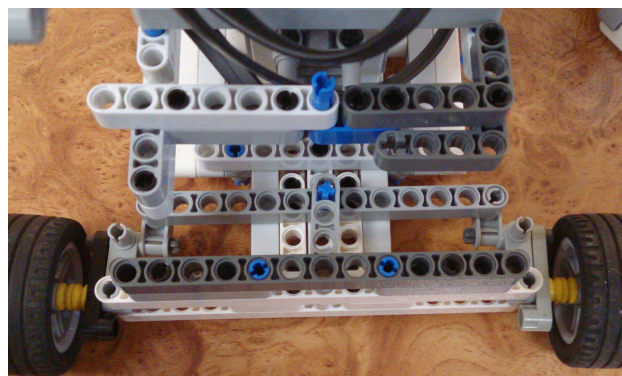
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Внешний вид использованного в работе робота-машинки: а — с одного из бортов, б — с другого, в — снизу, г — спереди без рулевого двигателя и некоторых его креплений.

## 2 Управление движением робота

### 2.1 Кинематическая модель

Кинематическая модель робота имеет вид [1]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, y$  — декартовы координаты точки  $C$ , являющейся серединой задней оси (см. рисунок 4);  $\theta$  — угол поворота робота (угол между осями абсцисс неподвижной системы координат  $Ox_0y_0$  и системы координат  $Ox_1y_1$ , жёстко связанной с роботом);  $v$  — проекция скорости  $\vec{v}$  точки  $C$  на ось абсцисс системы координат  $Ox_1y_1^*$ ;  $\omega$  — угловая скорость вращения робота.

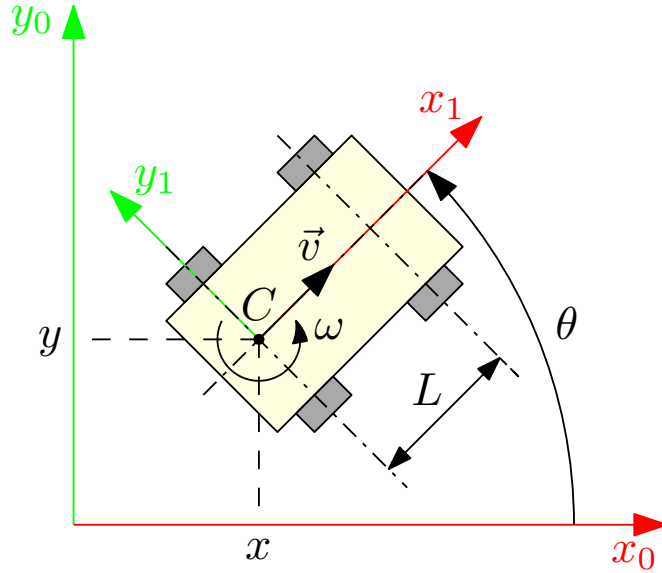


Рисунок 4 – Чертеж-пояснение к кинематической модели робота.

Угловая скорость  $\omega$  для робота-машинки с одним поворотным колесом оказывается связанной с углом его поворота  $\varphi$  выражением [1]

$$\omega = \frac{v}{L} \operatorname{tg} \varphi. \quad (2)$$

Это равенство получается объединением следующих двух уравнений:

$$\omega = \frac{v}{R}, \quad (3)$$

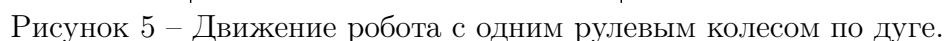
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L}{R}, \quad (4)$$

где  $R$  — радиус дуги, по которой движется робот, а точнее точка  $C$  (см. рисунок 5).

Так как у робота из данной работы колеса два, и примененная в нем рулевая трапеция не обеспечивает их точного поворота на те углы, при которых они не будут проскальзывать в

---

\* В данной работе проскальзывание задних колес робота считается отсутствующим, а, следовательно, вектор  $\vec{v}$  — всегда коллинеарным оси абсцисс системы координат  $Ox_1y_1$ .


$$\omega = \frac{v}{L} \operatorname{tg} \bar{\varphi}. \quad (5)$$

The diagram illustrates a three-surface optical cavity. The mirrors are located at points D, B, and D'. The light path is shown as a closed loop C-B-M-L-D-C. The angles at mirrors D and D' are both labeled as  $107.11^\circ$ . Dashed lines represent the unfolded path of the light, showing how the cavity can be flattened into a single plane for geometric analysis. The points C, B, and D are vertically aligned, while D' is to the right of B. The path segments are labeled with points C, B, M, L, D, and G (on segment BD).

Рисунок 6 – Рулевая трапеция в смещенном относительно центрального положении  
 $(\angle CBM = \bar{\varphi}, GM = ML, |BM| = var)$ .

В качестве угла  $\theta$  и угловой скорости  $\omega$  в работе использовались угол и угловая скорость, возвращаемые установленным на робота датчиком-гироскопом. Координаты  $x$  и



$y$ , в свою очередь, непосредственно не измерялись, а рассчитывались с использованием первых двух уравнений модели (1). При этом линейная скорость точки  $C$  с учетом третьего пункта перечня, представленного в разделе 1, определялась в соответствии со следующим выражением

$$v = \underline{\omega}r, \quad (6)$$

где  $\underline{\omega}$  — угловая скорость вращения вала тягового двигателя,  $r$  — радиус задних колес робота.

Состоятельность описанного принципа локализации робота была проверена с помощью сторонней системы технического зрения. Подробности соответствующих экспериментов и полученные результаты доступны в Приложении А.

## 2.3 Структура системы управления

Общая структура системы управления движением робота, позволяющая ему двигаться по желаемой траектории, показана на рисунке 7. Указанные на ней физические величины, ранее не упоминавшиеся в тексте данного отчета, значат следующее:

$U_1$  ( $U_2$ ) — напряжение, подаваемое на тяговый (рулевой) двигатель, выраженное в процентах от максимального напряжения (знак определяет направление вращения);

$\bar{\varphi}$  — угол поворота вала рулевого двигателя;

$\bar{\varphi}_{min}$ ,  $\bar{\varphi}_{max}$  — его минимальное и максимальное значения ( $\bar{\varphi}_{min} = -\bar{\varphi}_{max}$ );

$x_r$  и  $y_r$  — координаты, которые должен иметь робот в данный момент времени, чтобы следовать по желаемой траектории;

$X_{des}$  — желаемое значение величины  $X$ .

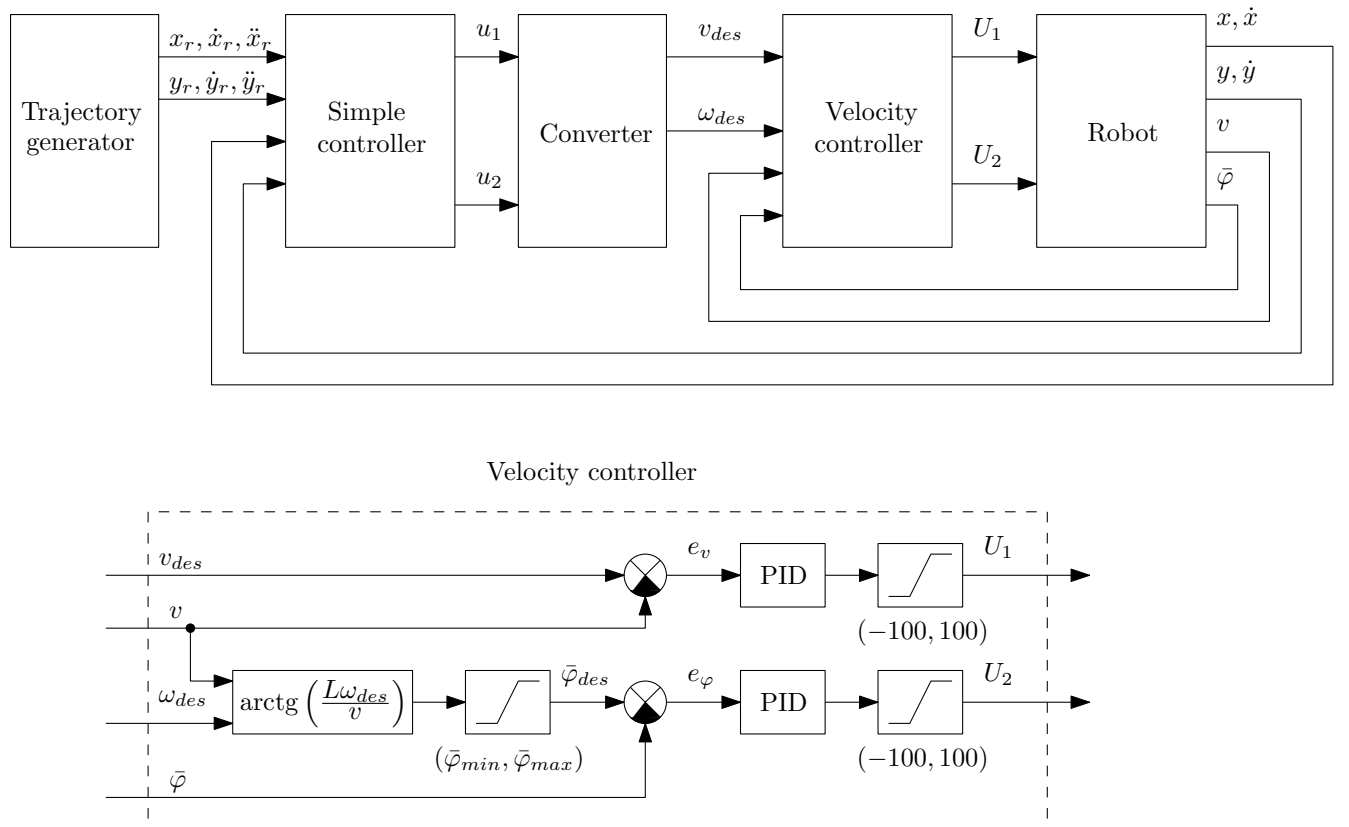


Рисунок 7 – Структура системы управления движением робота.

Входящие в блок Velocity Controller ПИД-регуляторы были настроены вручную. Качество их работы можно оценить из переходных функций, показанных на рисунках 8 и 9.

Качество управления угловой скоростью по прямой связи, включающей в себя функцию  $\arctg()$ , можно оценить из рисунка 10.

Формирование желаемых значений для линейной и угловой скоростей робота блоком Converter, а также расчет «предварительных» управляющих воздействий в блоке Simple Controller производятся в соответствии со следующими выражениями [3]:

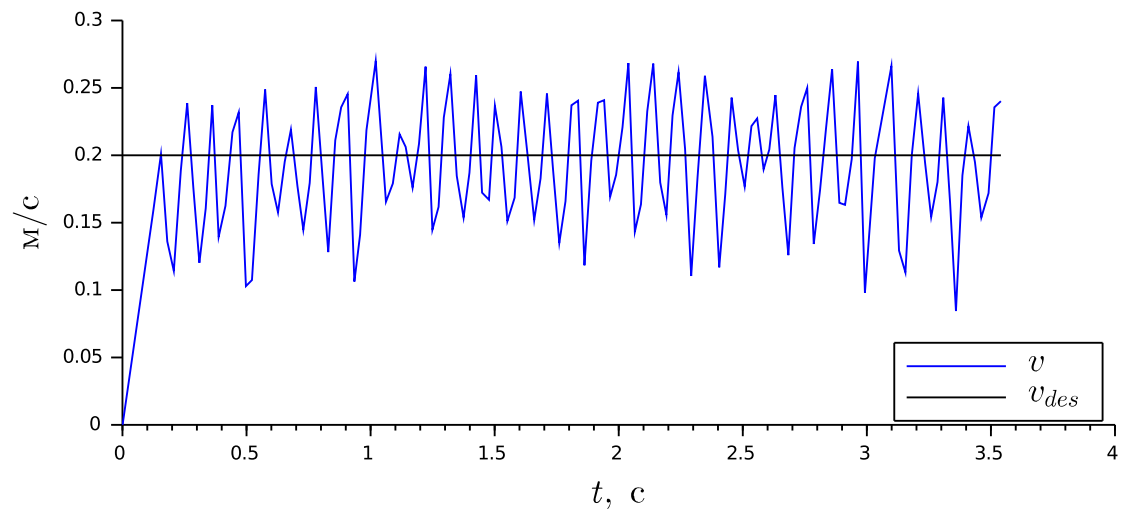
$$\begin{cases} \dot{\xi} = u_1 \cos \theta + u_2 \sin \theta, \\ v_{des} = \xi, \\ \omega_{des} = \frac{-u_1 \sin \theta + u_2 \cos \theta}{\bar{\xi}}, \end{cases} \quad \bar{\xi} = \begin{cases} -0.01, & 0 > \xi \geq -0.01 \\ 0.01, & 0 \leq \xi \leq 0.01 \\ \xi, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_1 = \ddot{x}_r + k_{p1}(x_r - x) + k_{d1}(\dot{x}_r - \dot{x}), \\ u_2 = \ddot{y}_r + k_{p2}(y_r - y) + k_{d2}(\dot{y}_r - \dot{y}). \end{cases} \quad (8)$$

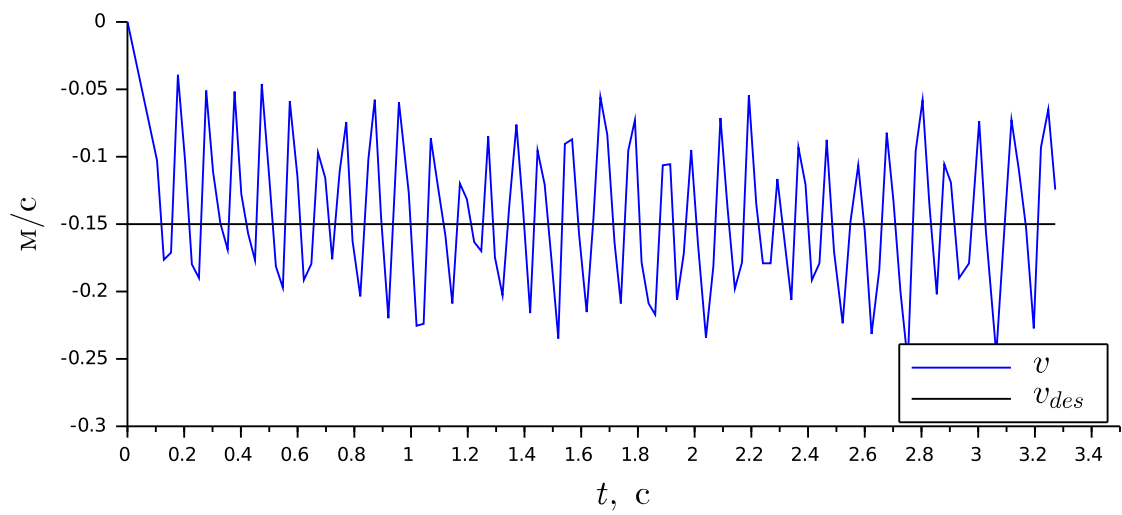
Результаты запуска схемы моделирования, показанной на рисунке 11\*, свидетельствуют о надлежащем функционировании этой системы управления (см. рисунок 12). То же следует и из реальных экспериментов — см. рисунок 13.

---

\* В данной схеме в качестве модели робота-машинки использована модель (1). Другими словами, блок Velocity Controller опущен «за ненадобностью», и  $v_{des} = v$ ,  $\omega_{des} = \omega$ .

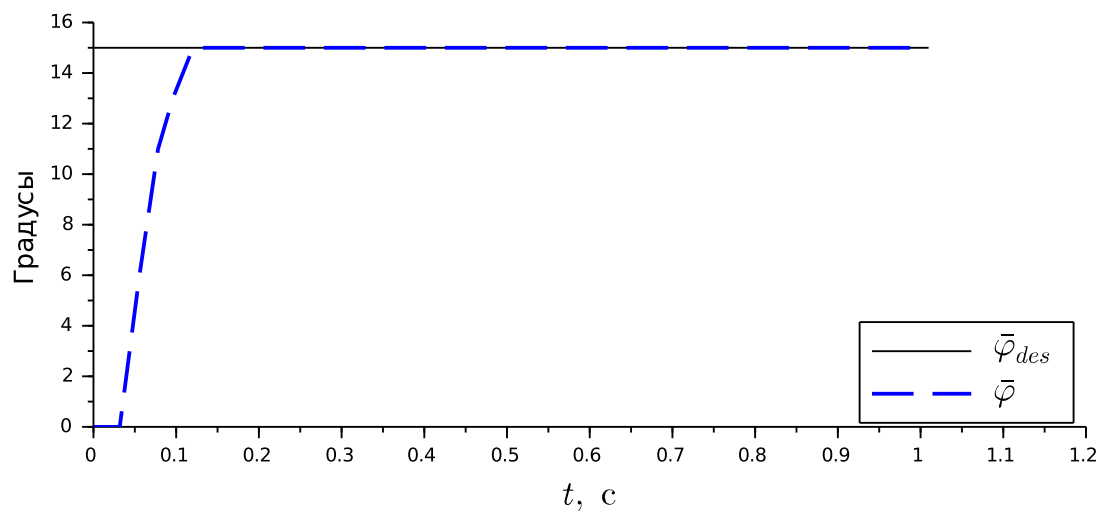


а)

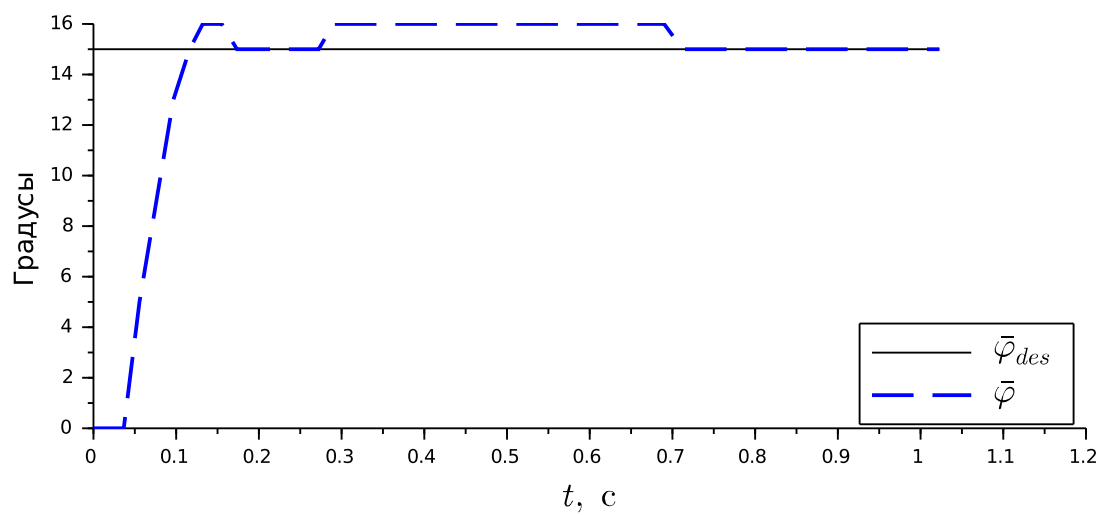


б)

Рисунок 8 – Переходные функции ПИД-регулятора, управляющего значением скорости  $v$ :  
а — при  $v_{des} > 0$ , б — при  $v_{des} < 0$ .

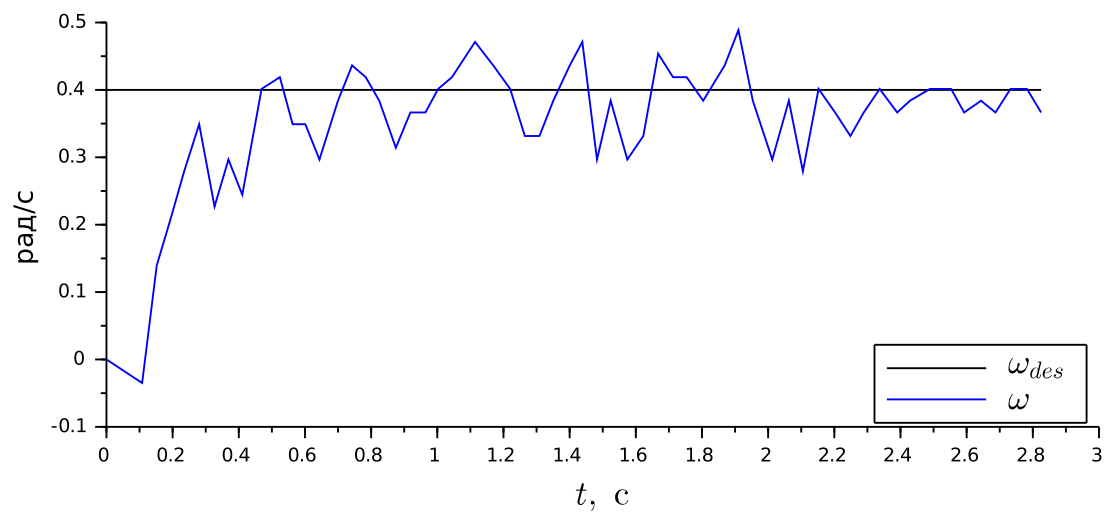


а)

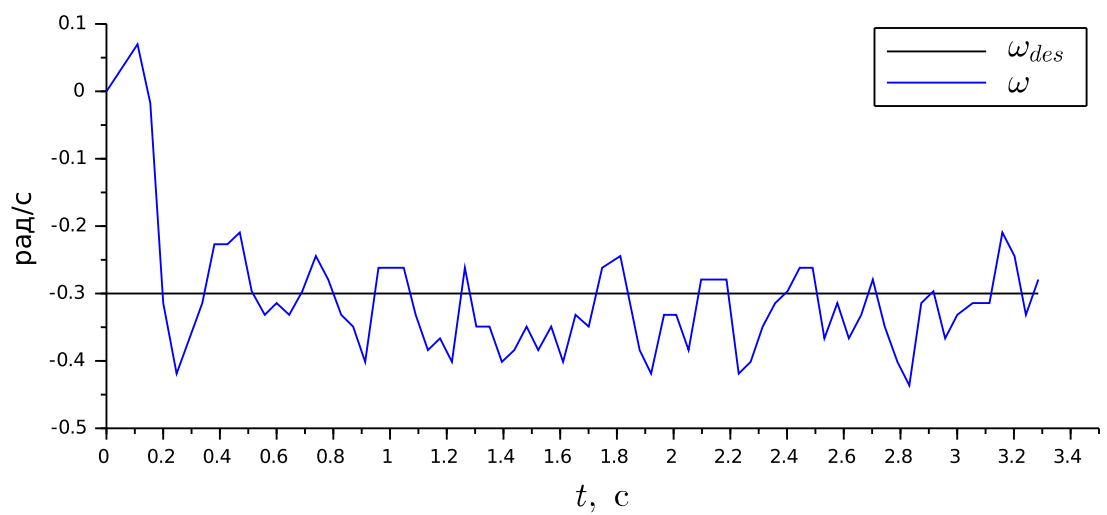


б)

Рисунок 9 – Переходные функции ПИД-регулятора, управляющего значением угла  $\bar{\varphi}$ :  
а — при  $v = 0$ , б — при  $v \neq 0$ .



а)



б)

Рисунок 10 – Переходные функции системы управления угловой скоростью.

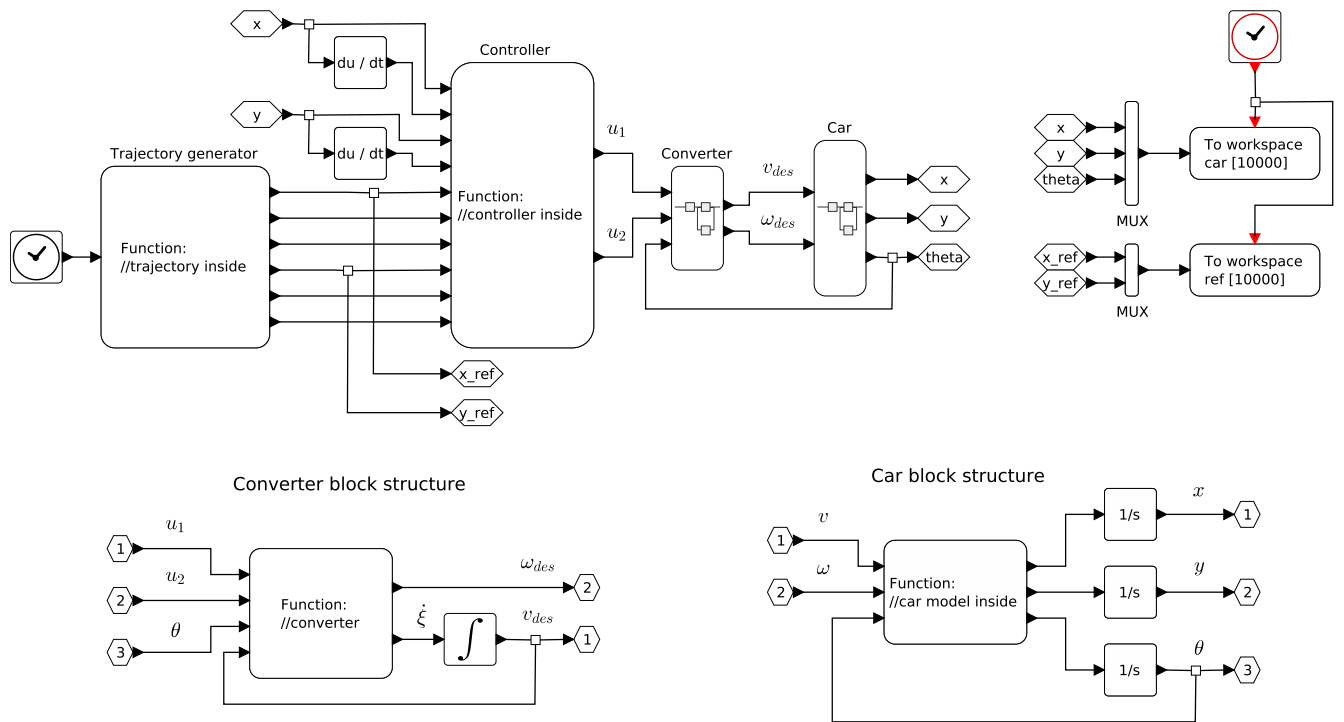


Рисунок 11 – Схема моделирования системы управления движением робота.

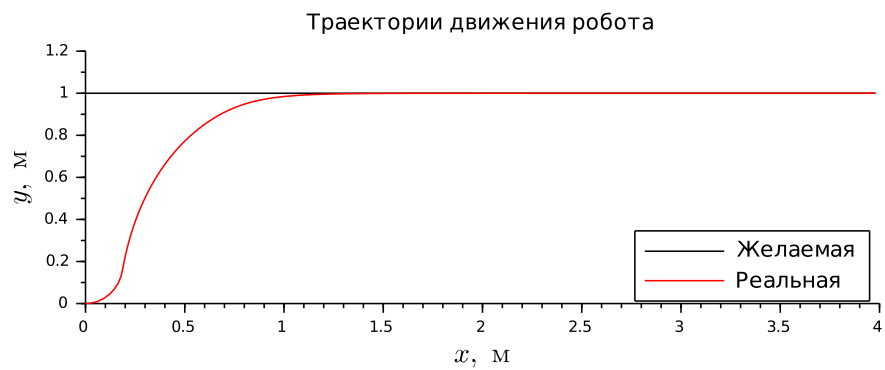


Рисунок 12 – Результаты запуска схемы моделирования.

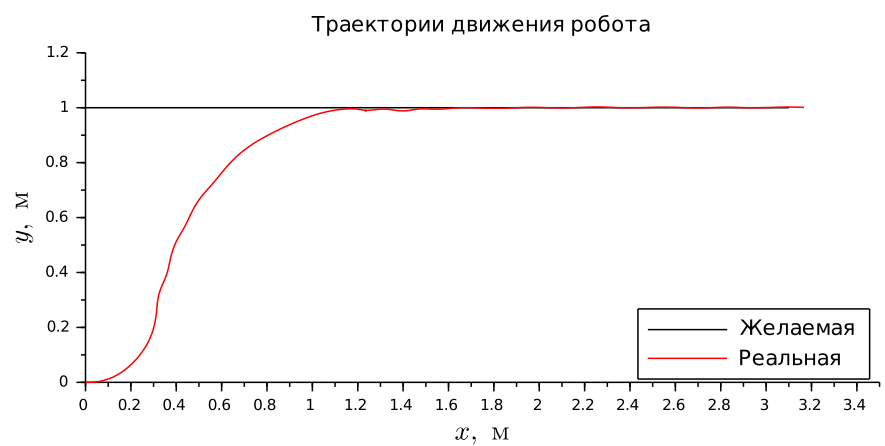


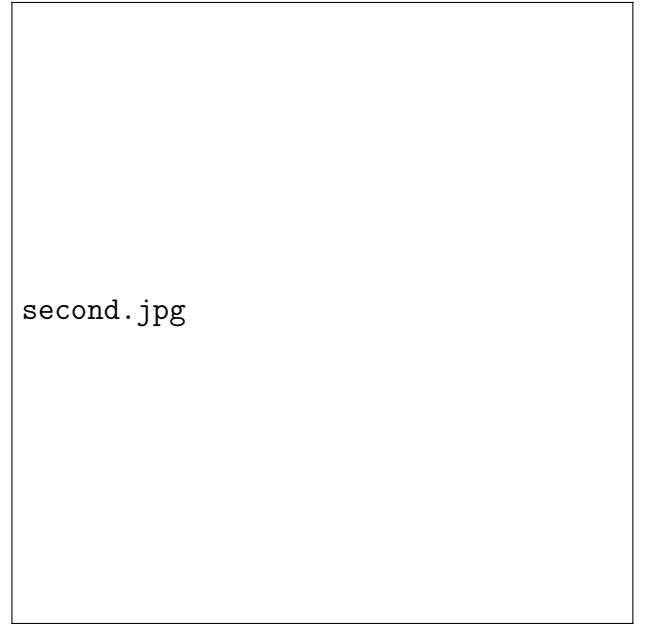
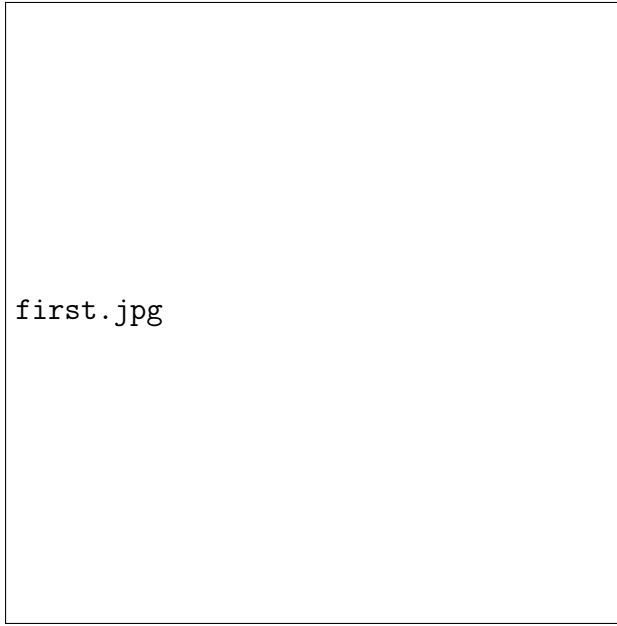
Рисунок 13 – Результат одного из экспериментов, проверяющего работоспособность системы управления движением.



### 3 Поиск парковочного места

В этой работе рассматривается правостороннее движение, поэтому парковка производится с правой стороны дороги.

Поиск парковочного места осуществляется по тому же принципу, что и в реальной жизни: робот-машинка движется параллельно припаркованному ряду автомобилей с постоянной скоростью  $v$ , одновременно сканируя пространство справа от себя. Сканирование олицетворяет собой измерение расстояния между роботом и объектами справа от него. Измерения производятся двумя ультразвуковыми датчиками ( $S_{front}$  и  $S_{rear}$ ), расположение которых на роботе изображено на рисунке 14.



а) вид сверху

б) вид справа (по ходу движения)

Рисунок 14 – Расположение ультразвуковых датчиков.

Измерения показаний ультразвуковых датчиков представляется в локальной СК робота в точках ( $p_1$  и  $p_2$ ) (9). После чего преобразуются в глобальную СК путем перемножения матрицы однородных преобразования  $H$  и соответствующей измеренной точки (??)–(??)

$$p_1 = \begin{bmatrix} x_{p_1} \\ y_{p_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ -(S_{front} + d) \end{bmatrix}; \quad p_2 = \begin{bmatrix} x_{p_2} \\ y_{p_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l \\ -(S_{rear} + d) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

где  $L$  — база робота-машинки;  $l$  — расстояние между задней осью и ультразвуковым датчиком, закрепленным на задней части робота;  $d$  — расстояние от продольной оси робота до сенсоров датчиков.

$$H = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = H * p = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

В результате описанного выше сканирования строится карта, на которую наносятся проекции препятствий на плоскость дорожного полотна. На рисунке 15 показан пример такой карты.



Рисунок 15 – Пример карты.

## 4 Планирование траекторий движения

Для выполнения парковочного маневра система строит траекторию, показанную на рисунке 16. Координаты зеленых точек на нем становятся известными после выполнения этапа картирования, остальных — рассчитываются после с учетом ширины робота  $H$ , параметров  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , задаваемых системе перед началом ее работы вручную, удвоенного минимального радиуса дуги, по которой может пройти робот,  $R$  и некоторых математических соотношений. Из последних стоит отметить лишь уравнения, совместное решение которых дает координаты  $(x_5, y_5)$  — координаты точки касания нижней из дуг и прямой, на которой лежит отрезок, ограниченный точками с координатами  $(x_3, y_3)$  и  $(x_5, y_5)$ :

$$\begin{cases} (x_7 - x_5)^2 + (y_7 - y_5)^2 = R^2, \\ \frac{y_4 - y_5}{x_4 - x_5} \cdot \frac{y_5 - y_7}{x_5 - x_7} = -1. \end{cases} \quad (12)$$

Задача же определение координат остальных точек авторам представляется тривиальной.

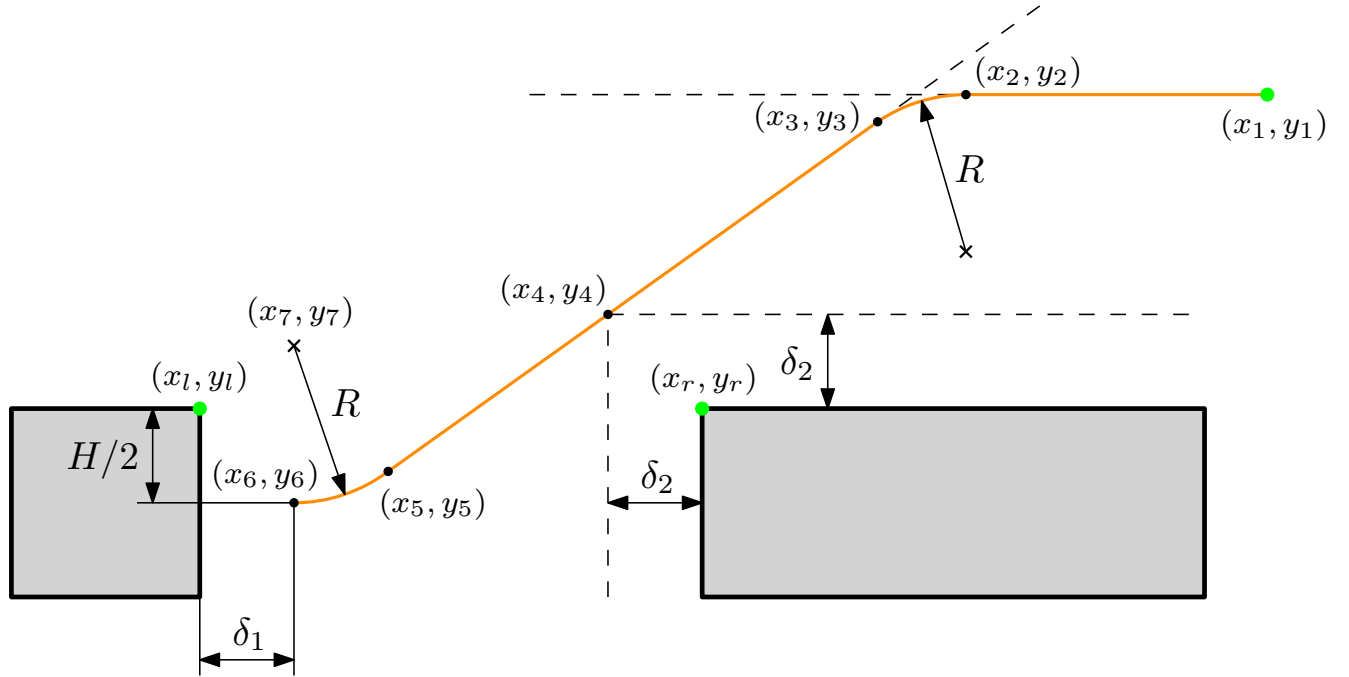


Рисунок 16 – Пояснения к принципам планирования траектории парковочного маневра.

Пример траектории, спланированной благодаря созданному авторами ПО, можно видеть на рисунке 17.

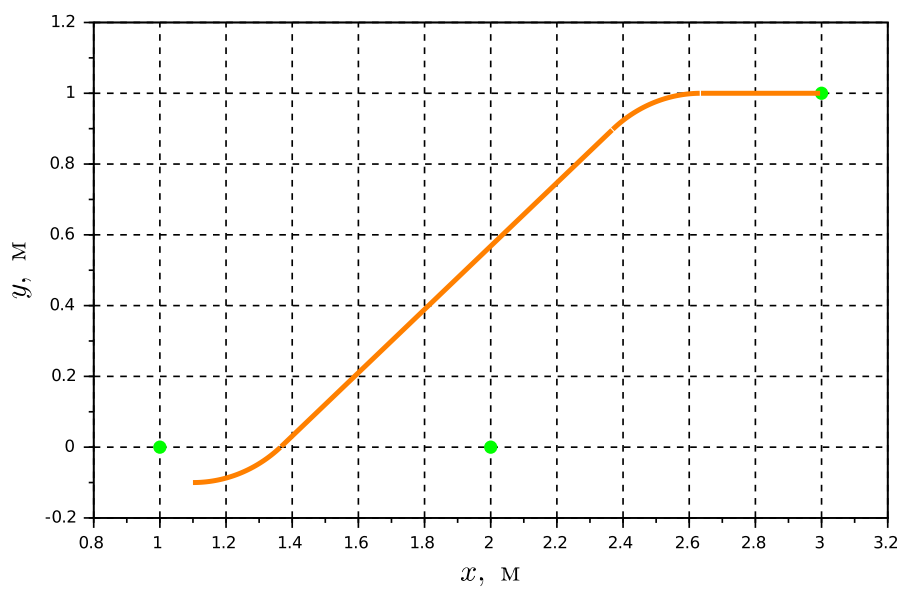


Рисунок 17 – Пример спланированной траектории движения.

## Заключение

В результате проделанной работы авторы смогли решить все из подзадач, составляющих проблему автоматической парковки мобильного робота. Ими успешно:

- была собрана машинка с рулевым управлением и составлена ее математическая модель;
- были решены вопросы, касающиеся управления ее движением и локализации (локальной ориентации): в первом из случаев была построена система управления, дающая роботу возможность двигаться по желаемой траектории, а во втором — подобраны датчики и выбраны алгоритмы расчета, позволяющие получать хорошую оценку положения робота в пространстве, что, в свою очередь, было проверено с помощью сторонней системы технического зрения;
- был разработан метод (алгоритм) картирования окрестностей предполагаемого места парковки и поиска последнего;
- был синтезирован алгоритм планирования траектории парковочного движения.

При этом, однако, из-за нехватки (или нерационального использования) времени система целиком протестирована не была.

Исходный код данного отчета и относящихся к проекту программ (расчетных, управляющих и проч.) доступны по адресу <https://github.com/kirilllin/parking-lego-car>.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles / B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong et al. // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. — 2016. — March. — Vol. 1, no. 1. — P. 33–55.
2. Ackerman Steering. — URL: <http://datagenetics.com/blog/december12016/index.html> (дата обращения: 25.11.2017).
3. Luca Alessandro De, Oriolo Giuseppe, Vendittelli Marilena. Stabilization of the Unicycle Via Dynamic Feedback Linearization // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33, no. 27. — P. 687 – 692. — 6th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO 2000), Vienna, Austria, 21-23 September 2000. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017380114>.



## Приложение А

(обязательное)

### **Описание экспериментов по проверке состоятельности использованных методов локализации робота с помощью сторонней системы технического зрения**

Текст