

УДК 004.3+519.6

Реализация движения LEGO-робота по заданному пути

А.Ю. Фокина, Т.В. Фролова, И.С. Яшков

Студенты, кафедра «Математическое моделирование»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: Ткачёв С.Б., д.ф.-м.н., профессор

кафедры «Математическое моделирование» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана

alexfokina@rambler.ru

tanya.frolova@gmail.com

isyashkov@mail.ru

Введение. Развитие робототехники привело к появлению полностью автономных транспортных средств, выполняющих различные задачи без участия оператора. Существует множество приложений (например, в сельском хозяйстве, строительстве дорог), где необходимо, чтобы автономное транспортное средство следовало по заданному пути с высокой точностью. При этом положение транспортного средства с высокой точностью определяется средствами дифференциальной GPS-навигации.

В лабораторных условиях разработку методов и алгоритмов управления автономными транспортными средствами проводят с использованием различных робототехнических систем. Простейший вариант такой системы может быть реализован с использованием колесных LEGO-роботов, которые широко используются во многих университетах мира.

Объектом управления является четырехколесный LEGO-робот с автомобильной компоновкой колес, у которого задние колеса являются ведущими. Управление в таком роботе служит угол поворота передних колес. Требуется, чтобы колесный робот из некоторого начального положения достиг заданного пути и двигался вдоль него с

постоянной скоростью. При движении вдоль заданного пути решается задача стабилизации. В качестве пути задается достаточно гладкая кривая, проходящая через заданную последовательность контрольных точек.

В рамках нелинейной теории управления для решения задачи путевой стабилизации будем использовать дифференциально-геометрический подход. Применение указанного подхода предполагает, что динамическая система предварительно приведена к некоторому специальному (квазиканоническому) виду, из которого может быть легко найдена обратная связь, стабилизирующая систему по части канонических переменных. Если при этом оказывается, что найденное управление обеспечивает требуемое изменение остальных переменных, то это управление решает поставленную задачу.

Для построения квазиканонического вида удобно перейти от неподвижной (земной) декартовой системы координат к путевым координатам.

Для проведения практического эксперимента использовались специальный полигон, LEGO-робот и web-камера. Робот перемещается по полигону. Его положение определяется с помощью камеры. Полученные данные используются при программном вычислении параметров, необходимых для построения управления.

Математическая модель колёсного робота. Колёсный робот (КР) представляет собой движущееся без проскальзывания транспортное средство, у которого задние колёса являются ведущими, а передние колёса отвечают за поворот платформы. В данном случае положение робота описывается двумя координатами (x_c, y_c) целевой точки платформы и одним углом, задающим ориентацию платформы относительно неподвижной системы координат xOy . В качестве целевой берётся точка, расположенная в середине задней оси платформы, а в качестве угла – угол θ между центральной линией платформы (совпадающей с направлением вектора скорости) и осью x (рис. 1).

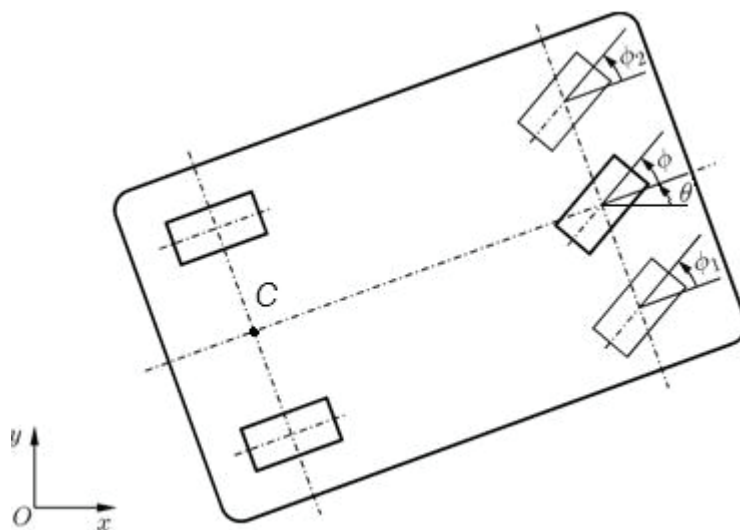


Рис. 1. Колёсный робот

Вместо четырехколёсной модели робота будем рассматривать трехколёсную, заменив два передних колеса одним, расположенным между ними. Угол ϕ поворота переднего колеса трехколёсного робота соответствует полусумме углов ϕ_1 и ϕ_2 поворота передних колёс четырехколёсного робота:

$$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}.$$

В качестве переменных состояния колёсного робота будем рассматривать:

- 1) x_c, y_c — координаты базовой точки робота;
- 2) θ — угол поворота центральной линии платформы относительно неподвижной системы координат;
- 3) v — модуль вектора скорости робота.

Величина u (мгновенное значение кривизны кривой, описываемой целевой точкой) однозначно связана с углом поворота переднего колеса ϕ соотношением $u = \tan \phi / l$, где l — расстояние между передними и задними колесами.

Кинематические уравнения движения рассматриваемого робота будут иметь следующий вид [1]:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = v \cos \theta, \\ \dot{y}_c = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = v \tan \phi / l. \end{cases}$$

В качестве управления будем рассматривать тангенс угла поворота переднего колеса ϕ . Скорость v считаем постоянной, что соответствует задаче движения вдоль заданной кривой с постоянной скоростью.

Переход к путевым координатам. Для синтеза управления колесной системой удобно перейти к путевым координатам[1] (рис. 2). Здесь

- 1) s – натуральный параметр кривой, задающей предписанную траекторию движения;
- 2) d – расстояние от базовой точки C робота до предписанной траектории движения;
- 3) ψ – угол между центральной линией платформы и касательным вектором к предписанной траектории в точке C_s , ближайшей к базовой точке робота. Полагаем, что при движении робота вдоль целевой кривой в положительном направлении выполняется ограничение $|\psi| \leq \pi/2$.

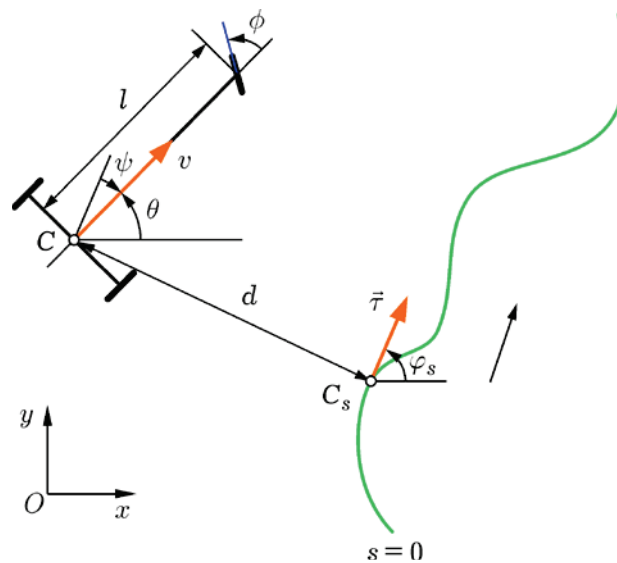


Рис. 2. Положение колесного робота относительно предписанной траектории

Используя результаты, полученные в [1], запишем исходную систему уравнений в путевых координатах:

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v \cos \psi}{1 - kd}, \\ \dot{d} = v \sin \psi, \\ \dot{\psi} = \frac{v}{l} \operatorname{tg} \phi - \frac{kv \cos \psi}{1 - kd}, \end{cases}$$

где $k \equiv k(s)$ – кривизна целевой кривой в ближайшей к роботу точке.

Замена переменных определена в области $\cos \psi \neq 0$, $v \neq 0$.

Расстояние d положительно, если целевая точка находится слева от кривой при движении в положительном направлении (в сторону увеличения натурального параметра), и отрицательно, если справа: $d = |d| \operatorname{sign}(\cos \alpha)$, где α — угол между вектором нормали $\vec{\beta} = (-y'_s, x'_s)$ к кривой в точке C_s и вектором $\overrightarrow{CC_s}$.

Полученную систему приведем к квазиканоническому виду [4,5]. Можно видеть, что заменой переменных

$$z_1 = d, \quad z_2 = v \sin \psi, \quad \eta = s$$

она приводится к указанному виду с индексом приводимости $r = 2$:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2, \\ \dot{z}_2 = f + g\omega, \\ \dot{\eta} = \frac{v \cos \psi}{1 - kd}, \end{cases} \quad (1)$$

где $f = -\frac{kv^2 \cos^2 \psi}{1 - kd}$, $g = \frac{v^2 \cos \psi}{l}$.

Воспользуемся методом линеаризации по части переменных для построения стабилизирующего управления и выберем управление в виде

$$\omega = \frac{f - (b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3)}{g}.$$

Коэффициенты b_1, b_2, b_3 выбираются так, чтобы решения характеристического уравнения λ_i , соответствующего уравнению $\dot{z}_3 = -\sum_i b_i z_i$ были асимптотически устойчивыми ($\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0$). Коэффициент g при управлении не обращается в ноль в области $\cos \psi \neq 0$.

Это управление линеаризует систему (1) по части переменных z и стабилизирует нулевые значения канонических переменных ($z_1 = 0, z_2 = 0$).

Нулевая динамика [3,4] системы (1) при $z_1 = z_2 = 0$ имеет вид

$$\dot{\eta} = \frac{v \cos \psi}{1 - kd} = v,$$

так как $z_2 = \dot{z}_1 = v \sin \psi = 0$, $\psi = 0$, $\cos \psi = 1$.

Хотя нулевая динамика не является устойчивой, но при выбранном управлении обеспечивается движение точки С робота вдоль заданной кривой с постоянной скоростью, то есть обеспечивается решение задачи движения вдоль заданного пути.

Проведение эксперимента. Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 3.

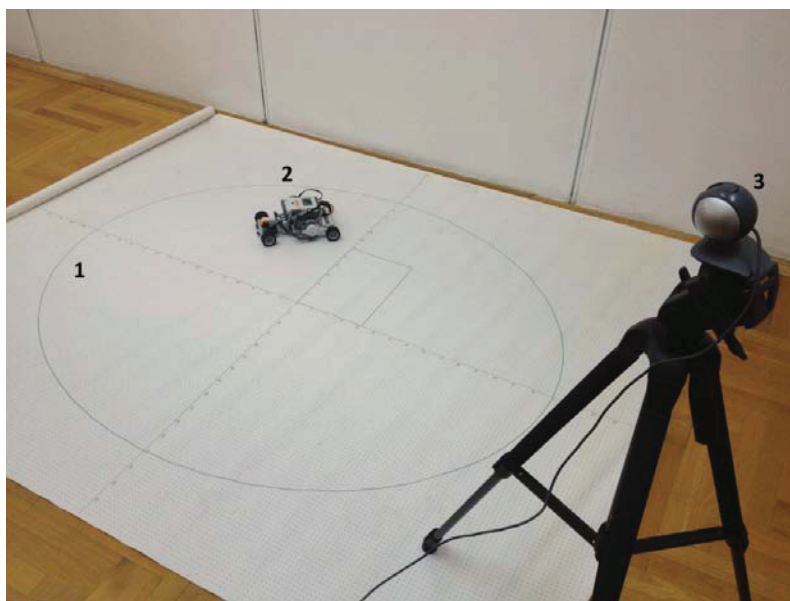


Рис. 3. Лабораторный стенд

Стенд включает полигон с нанесенной координатной сеткой (1), LEGO-робота (2) и web-камеру (3).

Вблизи полигона установлена web-камера на штативе, которая соединена при помощи USB-кабеля с компьютером, на котором запущена программа HawkEye. Данная программа предназначена для калибровки камеры, обработки изображения, определения координат и угла поворота робота, а также передачи результатов измерения в программу, предназначенную для расчета управления (программа BluetoothSendNXT).

Калибровка проводится для того, чтобы программа HawkEye определила, где находится земная неподвижная система координат. При этом используется плоский калибровочный объект в виде "шахматной доски" (рис. 4). В программе HawkEye калибровка реализована при помощи средств открытой библиотеки OpenCV (<http://opencv.org/>).

Информацию о положении робота на полигоне программа HawkEye передает программе BluetoothSendNXT, в которой реализован алгоритм расчета параметров, необходимых для построения управления. Эти параметры передаются по каналу связи Bluetooth на робота.

Каждая из программ HawkEye и BluetoothSendNXT работает как отдельный сетевой клиент. Информация о положении робота от HawkEye к BluetoothSendNXT передается по протоколу UDP.

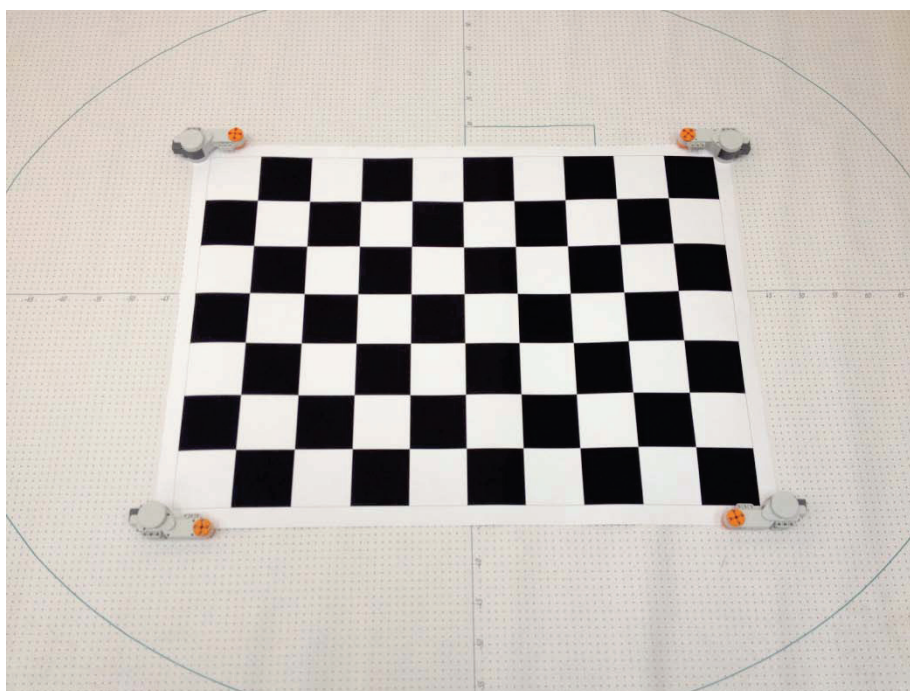


Рис. 4. Калибровочная "шахматная доска".

Расчет управления движением робота в Simulink. Управление LEGO-роботом рассчитывается с использованием системы MATLAB-SIMULINK. Общая схема программы для расчета управления представлена на рис. 5.

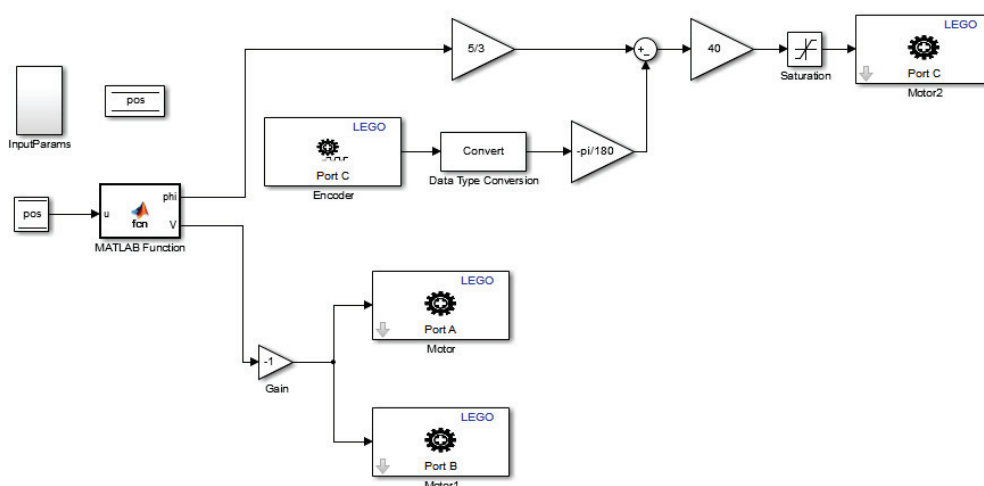


Рис. 5. Схема программы расчета управления LEGO-роботом

В соответствии с данной схемой LEGO-робот с помощью специализированных блоков получает данные, описывающие его положение в пространстве, из программы BluetoothSendNXT. Данные поступают в виде массива в блок MATLAB Function, в котором проводятся все необходимые вычисления, и на выход подаются управления — искомый угол поворота передних колес и скорость задних колес. Отметим, что скорость вращения задних колес постоянна.

Представленная на рис. 6 конструкция используется для поворота передних колес.



Рис. 6. Конструкция узла поворота передних колес

Передаточное число I от вала двигателя к вертикальной оси поворота рулевых колес равно $5/3$. На скорость вращения управляющего мотора наложены ограничения, позволяющие избежать больших погрешностей и проскальзывания зубьев шестерней. Эти ограничения найдены экспериментально.

Результаты моделирования. Для отладки разработанного алгоритма управления использовалось математическое моделирование.

Рассмотрим случай, когда путь представляет собой окружность, заданную параметрически уравнениями $\begin{cases} x(\tau) = 0,6 \cos \tau, \\ y(\tau) = 0,6 \sin \tau, \end{cases}$ где τ — произвольный параметр.

Примем $v = 0,04$ м/с, $l = 0,2$ м.

Начальные условия:

$x(0) = 0,3$ м, $y(0) = -0,3$ м, $\theta(0) = \pi/2$ рад.

Результаты моделирования представлены на рис. 7 - 10.

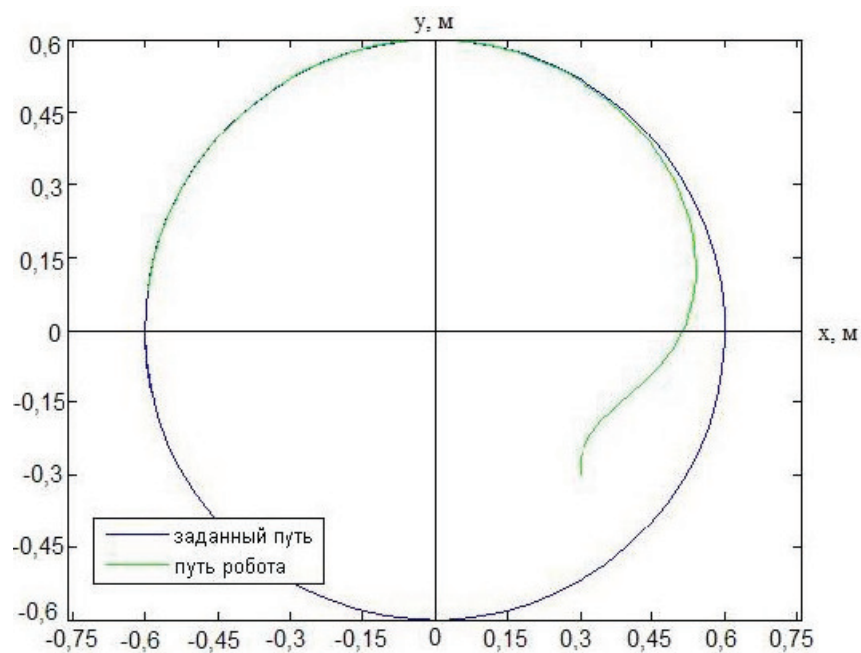


Рис. 7. Заданный путь и путь робота

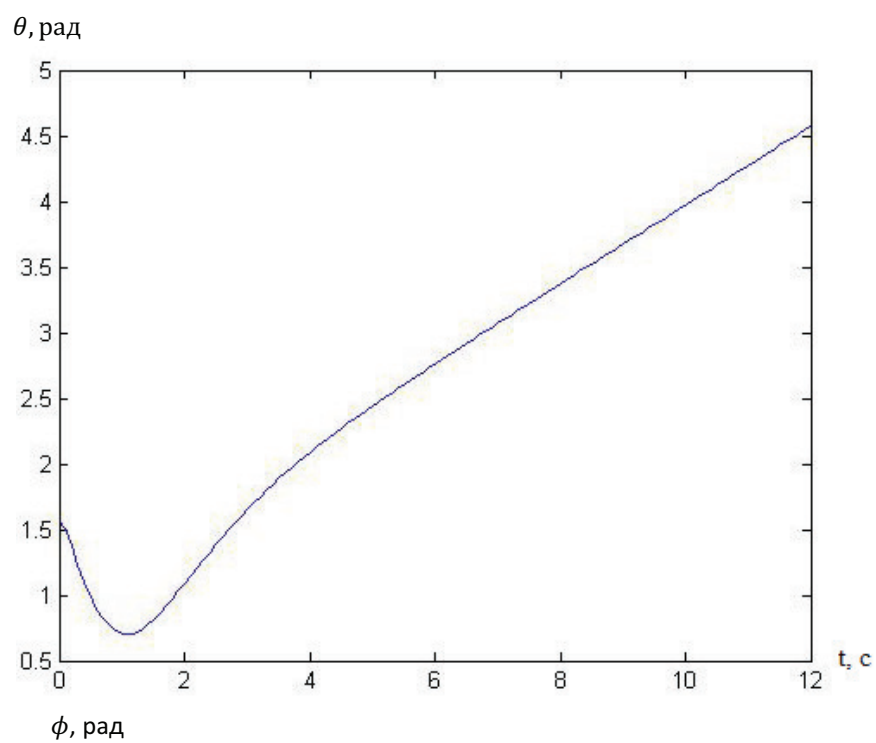


Рис. 8. Зависимость угла ориентации робота θ от времени t

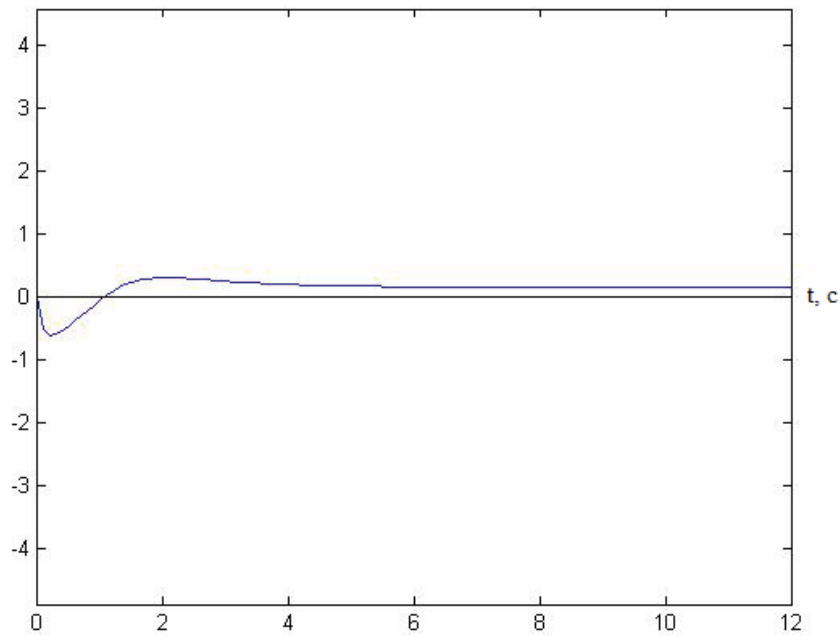


Рис. 9. Зависимость угла поворота колес ϕ от времени t

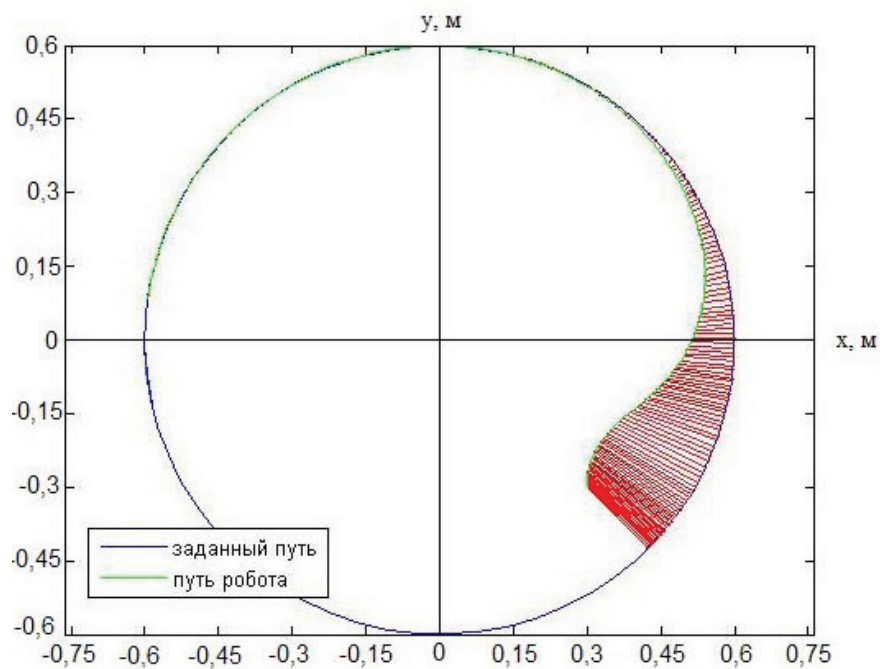


Рис. 10. Расстояние от целевой точки до заданного пути

Результаты экспериментов. Разработанный алгоритм управления был успешно реализован на лабораторном стенде. Робот проехал по кругу заданного радиуса и по прямой линии. К недостаткам реализации можно отнести достаточно частое подруливание передними колесами.

Заключение. В данной работе построено стабилизирующее управление методом линеаризации по части переменных. Описаны переход от декартовой системы координат к

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

путевой системе координат и преобразование исходной системы, записанной в путевой системе координат, к квазиканоническому виду. Представлен алгоритм вычисления расстояния от точки до заданной кривой.

Методами математического моделирования показана работоспособность предложенного метода синтеза управления, обеспечивающего движение колёсного робота вдоль заданного пути. Осуществлено получение координат робота с web-камеры. Представлена модель управления роботом в терминах MATLAB-SIMULINK. Приведены результаты моделирования.

Список литературы

1. Канатников А.Н., Касаткина Т.С. Особенности перехода к путевым координатам в задаче путевой стабилизации // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журнал. 2012. №7. С.211-222. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/445496.html>. (дата обращения: 20.03.2013).
2. Пестерев А.В. Синтез стабилизирующего управления в задаче следования колесного робота вдоль заданной кривой // Автоматика и телемеханика. 2012. №7. С.25-39.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебник для вузов – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2004. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2004. – 440 с.
4. Ткачев С.Б., Шевляков А.А. Преобразование аффинных систем со скалярным управлением к квазиканоническому виду // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Естественные науки. 2013. № 1. С. 3-16.
5. Крищенко А.П., Клинковский М.Г. Преобразование аффинных систем с управлением и задача стабилизации // Дифференциальные уравнения. 1992. Т.28, № 11. С. 1945-1952.