Научная статья
Original article
УДК 681.5

УПРАВЛЕНИЕ ОТСЛЕЖИВАНИЕМ ТРАЕКТОРИИ НЕГОЛОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА БЭКСТЕППИНГА

TRACKING CONTROL OF A NON-HOLONOMIC MOBILE ROBOT BASED ON THE METHOD OF BACKSTEPPING

Ван Чжун, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва, wangzhong007626@gmail.com.

Wang Zhong, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, wangzhong007626@gmail.com.

Аннотация. В статье рассматривается проблема отслеживания траектории в управлении движением неголономного мобильного робота. Для разработки алгоритма управления отслеживанием траектории робота используется метод обратной связи с изменяющимся во времени состоянием на основе интегрального метода бэкстеппинга, а также вводится новая виртуальная величина обратной связи, доказана глобальная устойчивость системы с помощью второго метода Ляпунова. Учитывая ограничения динамики робота, закон управления вводит стратегию ограничения скорости и ускорения для обеспечения плавного движения робота. Моделирование с помощью MATLAB и CoppeliaSim, результаты показывают, что фактическая траектория может хорошо отслеживать желаемые линейные и круговые траектории, что подтверждает эффективность метода бэкстеппинга и возможность применения метода для управления траекторией неголономных мобильных роботов.

Abstract. The article discusses the problem of trajectory tracking in motion control of a non-holonomic mobile robot. The time-varying state feedback method based on the integral Backstepping method is used to develop a control algorithm for tracking the trajectory of the robot, and a new virtual feedback quantity is introduced and the global stability of the system is proved using the second Lyapunov method. Given the constraints of the robot dynamics, the control law introduces a speed and acceleration limiting strategy to ensure smooth motion of the robot. Simulations using MATLAB and CoppeliaSim, the results show that the actual trajectory can track the desired linear and circular trajectories well, which confirms the effectiveness of the Backstepping method and the possibility of applying the method to control the trajectory of non-holonomic mobile robots.

Ключевые слова: неголономный мобильный робот, отслеживание траектории, бэкстеппинг, второй метод Ляпунова.

Keywords: non-holonomic mobile robot, trajectory tracking, Backstepping, Lyapunov's Second Method

Введение

В настоящее время все более популярными становятся сервисные мобильные роботы. К данному типу можно отнести роботы-экскурсоводы, роботы-пылесосы, подвижные информационные терминалы [1]. Для выполнения своих функций эти роботы должны уметь перемещаться по определенным траекториям в автоматическом режиме.

В таких роботах часто используются дифференциальные приводы. Колесные мобильные роботы, управляемые с помощью дифференциального привода, как правило, представляют собой неголономные системы [2], Задачи управления неголономными роботами представляют в настоящее время значительный теоретический и прикладной интерес [3].

Целью разработки кинематического закона управления для неголономного мобильного робота является обеспечение того, чтобы при заданной опорной траектории и произвольном начальном положении в пространстве битовых форм

мобильного робота фактическая траектория робота сходилась к желаемой траектории, задаваемой входом закона управления, и чтобы процесс сходимости был достаточно быстрым. Поскольку неголономный мобильный робот не удовлетворяет требованию подавления плавной обратной связи Brockett [4], это делает его систему отслеживания траектории более сложной для управления, чем типичная нелинейная система. В литературе [5][6] для проектирования регулятора слежения за траекторией используется идея интегрального бэкстеппинга в сочетании с прямым методом Ляпунова. В литературе [7] предлагается простой закон управления, делающий функцию Ляпунова системы отрицательно определенной, но этот закон управления не обеспечивает абсолютную сходимость составляющей ошибки e_y мобильного робота и в некоторых случаях приводит к тому, что e_y становится неконтролируемой переменной.

В данной работе более простая виртуальная переменная обратной связи построена с использованием идеи интегрального бэкстеппинга проектирования, основанной на литературе [6], и закон управления с изменяющейся во времени обратной связью разработан в сочетании с прямым методом Ляпунова и показано, что он глобально асимптотически устойчив. Результаты моделирования показывают, что робот способен быстро и эффективно отслеживать желаемую траекторию при соблюдении закона управления.

1. Постановка задачи. При выводе кинематических уравнений для робота вспомогательные колеса можно игнорировать, их количество не влияет на кинематические уравнения. Таким образом, для двухколесного дифференциального робота кинематические уравнения могут быть получены в соответствии с литературными [47] следующим образом:

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\theta & 0 \\ sin\,\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = Jq \qquad (1)$$

где J — матрица Якоби.

Поза робота в двумерной глобальной системе координат (XOY), показанной на рис.1, представлена обобщенным вектором координат $p = (x, y, \theta)^T$, состоящим из трех пространственных расположенных степеней свободы, а состояние движения

робота определяется его линейной скоростью v и угловой скоростью ω, выраженной в векторной форме $q = (v, \omega)^T$.

Мы можем предположить, что задача отслеживания траектории — это отслеживание реальным мобильным роботом траектории движения виртуального мобильного робота по опорной траектории. Чтобы сделать анализ ошибок неголономной системы мобильного робота более удобным, создается диаграмма анализа движения между реальным мобильным роботом и его виртуальным роботом по опорной траектории, как на рис.1.

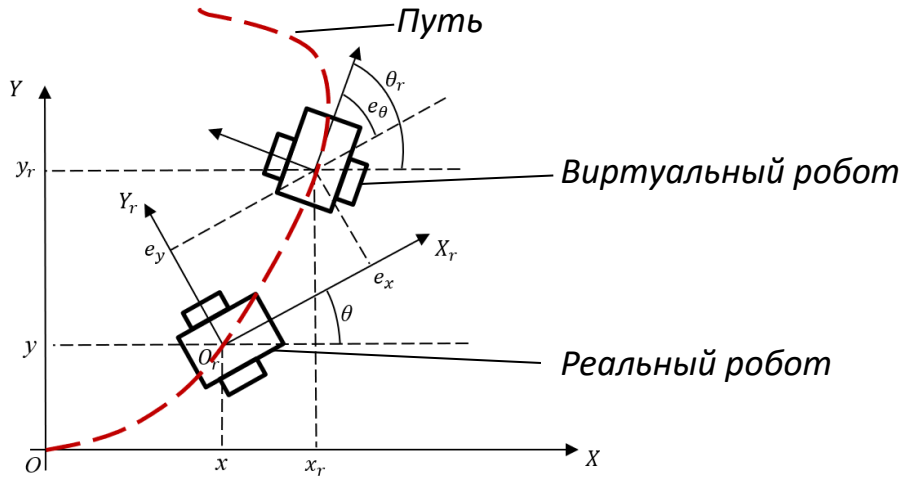

Рис.1. Схема ошибки позиции и ориентации двухколесного дифференциального мобильного

Опорное положение обозначается как $p_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$, где θ — положительное значение в направлении против часовой стрелки. Опорная скорость обозначается как $q_r = (v_r, \omega_r)^T$. Определив ошибку позиционирования в локальной системе координат робота $(X_R O_R Y_R)$ как $p_e = \left(e_x, e_y, e_\theta\right)^T$, можно получить уравнение для ошибки позиционирования в системе координат мобильного робота, выраженное уравнением (2).

$$p_e = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\theta & sin\,\theta & 0 \\ -sin\,\theta & cos\,\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} = T(P_r - P) \qquad (2)$$

где T — матрица поворота.

Поскольку θ — это угловая величина, мы указываем $e_\theta \in (0, 2\pi]$. Дифференцирование и упрощение уравнения (2) дает следующее дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned}\dot{e}_x &= (\dot{x}_r - \dot{x})\cos\theta - (x_r - x)\sin\theta\dot{\theta} + (\dot{y}_r - \dot{y})\sin\theta + (y_r - y)\cos\theta\dot{\theta} \\ &= e_y\omega - (\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta) + (\dot{x}_r\cos\theta + \dot{y}_r\sin\theta) \\ &= e_y\omega - v + (\dot{x}_r\cos\theta_r + \dot{y}_r\sin\theta_r)\cos e_\theta + (\dot{x}_r\sin\theta_r - y_r\cos\theta_r)\sin e_\theta \\ &= e_y\omega - v + v_r\cos e_\theta\end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}\dot{e}_y &= -(\dot{x}_r - \dot{x})\sin\theta - (x_r - x)\cos\theta\dot{\theta} + (\dot{y}_r - y)\cos\theta + (y_r - y)\sin\theta\dot{\theta} \\ &= -\dot{x}_r\sin\theta + \dot{y}_r\cos\theta + (\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta) \\ &\quad -(\dot{x}_r\cos\theta + \dot{y}_r\sin\theta)\theta + (x\cos\dot{\theta} + y\sin\theta)\dot{\theta} \\ &= -e_x\omega + v_r\sin e_\theta\end{aligned} \quad (4)$$

После завершения уравнений (3) и (4) дифференциальное уравнение ошибки позы робота имеет вид:

$$\dot{q}_e = \begin{bmatrix}\dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}e_y\omega - v + v_r\cos e_\theta \\ -e_x\omega + v_r\sin e_\theta \\ \omega_r - \omega\end{bmatrix} \quad (5)$$

Цель проектирования кинематического регулятора робота — найти подходящий вектор скорости системы $q = (v, \omega)^T$ такой, чтобы ошибка положения $p_e = \left(e_x, e_y, e_\theta\right)^T$ системы мобильного робота оставалась ограниченной при входной скорости и $\lim_{t\to\infty}\|[e_x \quad e_y \quad e_\theta]^T\| = 0$ такой, чтобы система мобильного робота могла отслеживать траекторию.

2. Построение регулятора с помощью методом бэкстеппинга. Структурная схема системы управления отслеживанием траектории движения робота показана на рис.2. Входами системы являются опорная поза p_r и опорная скорость q_r, а выходом системы является поза p робота в текущий момент времени. Системный Регулятор получает скорость управления q робота на основе ошибки отношения системы p_e и опорной скорости q_r, затем получает поза p в текущий момент

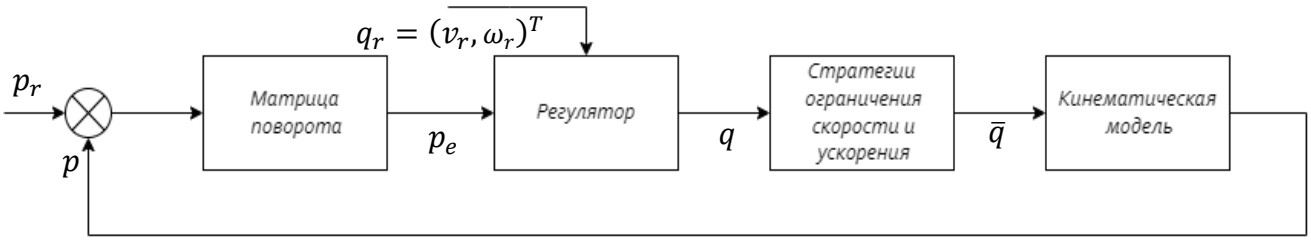

Рис.2. Структурная схема системы управления отслеживанием траектории движения робота

времени через кинетические ограничения и кинематические уравнения, и так далее

многократно через настройку контроллера, в конечном итоге заставляя ошибку отношения системы p_e сходиться к нулю.

Метод бэкстеппинга применим как к линейным, так и к нелинейным системам [8][10]. Метод бэкстеппинга состоит в том, чтобы разделить систему на несколько подсистем, а затем использовать набор функций уравнения Ляпунова для каждой подсистемы для выполнения анализа устойчивости. Через асимптотическую устойчивость каждой подсистемы, обратно к самой системе, и, наконец, разработать закон управления системой через условие асимптотической устойчивости подсистемы. Для мобильного робота в этой статье мы представляем идею метода бэкстеппинга для разработки закона управления движением. Основываясь на идеях литературы [9], вводится новая величина виртуальной обратной связи и разрабатывается регулятор отслеживания траектории с использованием идей метода бэкстеппинга и построением функции Ляпунова. Выведен регулятор отслеживания траектории с глобальной асимптотической устойчивостью для достижения глобального асимптотического устойчивого отслеживания намеченной траектории.

С учетом (1-16), если $e_\theta \to 0$, мы можем рассматривать e_x как виртуальный управляющий вход. Путем поиска подходящей обратной связи виртуального состояния, чтобы сделать $e_y \to 0$, цель управления системы сводится к тому, чтобы заставить e_x приблизиться к функции обратной связи виртуального состояния путем разработки соответствующих управляющих входных величин v и ω и сделать $e_\theta \to 0$. Таким образом, в конечном итоге мы можем гарантировать, что вся замкнутая система асимптотически устойчива. Эта статья определяет новые переменные ошибки и использует идею метода бэкстеппинга для разработки закона управления отслеживанием траектории системы мобильного робота, для компонента e_x построим виртуальную переменную обратной связи $\overline{e_x}$ следующим образом:

$$\overline{e}_x = e_x - k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} e_y \tag{6}$$

где k_1 — положительная константа..

При $e_y \to 0$ выбирается следующая функция Ляпунова:

$$V_{ey} = \frac{1}{2} e_y^2 \tag{7}$$

Принимая во внимание (7), найдем производную (8) в виде:

$$\dot{V}_{ey} = e_y \dot{e}_y = e_y(-\omega e_x + v_r \, sin \, e_\theta) \tag{8}$$

Когда $e_\theta \to 0$ и $e_x = k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} e_y$, можно получить:

$$\dot{V}_{ey} = -k_1 \frac{\omega^2}{\sqrt{1+\omega^2}} e_y^2 \leq 0 \tag{9}$$

Из критерия устойчивости Ляпунова можно доказать, что e_y является асимптотически устойчивым. Задача проектирования кинематического закона управления мобильным роботом состоит в том, чтобы найти подходящую входную величину управления, вектор скорости $q = (v, \omega)^T$, такую, чтобы для системы составляющая ошибки системы $\lim\limits_{t\to\infty} \overline{e}_x = 0$ (т.е. $\lim\limits_{t\to\infty} e_x = k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} e_y$) и $\lim\limits_{t\to\infty} e_\theta = 0$ изменялась со временем во время движения. поэтому глобальная функция Ляпунова для системы мобильного робота выбирается следующим образом:

$$V = \frac{1}{2}\overline{e}_x^2 + \frac{1}{2} e_y^2 + \frac{2}{k_2}\left(1 - cos\frac{e_\theta}{2}\right) \tag{10}$$

где k_2 — положительная константа.

Очевидно, что функция Ляпунова, показанная в (10), является локально положительно определенной функцией по отношению к компонентам $\overline{e}_x$, e_y и e_θ. Тогда и только тогда, когда $[\overline{e}_x \quad e_y \quad e_\theta]^T = 0$, $V = 0$.

Принимая во внимание (6) и (10), найдем производную (11) и (12) в виде:

$$\dot{V} = \overline{e}_x \dot{\overline{e}}_x + e_y \dot{e}_y + \frac{1}{k_2} \dot{e}_\theta \, sin \frac{e_\theta}{2} \tag{11}$$

$$\dot{\overline{e}}_x = \dot{e}_x - k_1 \dot{\omega} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}} \right) e_y - k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \dot{e}_y \tag{12}$$

Подставляя (12) в (11), перепишем (11) в виде:

$$\dot{V} = \overline{e}_x \left(\dot{e}_x - k_1 \dot{\omega} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}} \right) e_y \right) + e_y \dot{e}_y + \frac{1}{k_2} \dot{e}_\theta \, sin \frac{e_\theta}{2} \qquad (13)$$

Подставляя (5) и (6) в (13), перепишем (13) в виде:

$$\begin{aligned} \dot{V} = \overline{e}_x \Bigg(& v_r \, cos \, e_\theta - v - k_1 \dot{\omega} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}} \right) e_y \\ & -k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} (-\omega e_x + v_r \, sin \, e_\theta) \Bigg) \\ & -k_1 \frac{\omega^2}{\sqrt{1+\omega^2}} e_y^2 + \frac{1}{k_2} sin \frac{e_\theta}{2} \left(2 k_2 v_r e_y \, cos \frac{e_\theta}{2} + \omega_r - \omega \right) \end{aligned} \qquad (14)$$

Выбираются следующие законы управления:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \, cos \, e_\theta - k_1 \dot{\omega} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}} \right) e_y \\ -k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} (-\omega e_x + v_r \, sin \, e_\theta) + k_3 \overline{e}_x \\ 2 k_2 v_r e_y \, cos \frac{e_\theta}{2} + \omega_r + k_4 \, sin \frac{e_\theta}{2} \end{bmatrix} \qquad (15)$$

где k_3 и k_4 — положительная константа.

С учетом (15) можно получить:

$$\omega = 2 k_2 v_r e_y \, cos \frac{e_\theta}{2} + \omega_r + k_4 \, sin \frac{e_\theta}{2} \qquad (16)$$

Принимая во внимание (16), найдем производную (17) в виде:

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_r + 2 k_2 \, cos \frac{e_\theta}{2} \left(\dot{e}_y v_r + e_y \dot{v}_r \right) + (\omega_r - \omega) \left(\frac{1}{2} k_4 \, cos \frac{e_\theta}{2} - k_2 e_y v_r \, sin \frac{e_\theta}{2} \right) \qquad (17)$$

Подставляя (17) в (15) и упорядочить, выражение закона управления v будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_\theta - k_1 \dot{\omega}_r - 2k_1 k_2 \cos\frac{e_\theta}{2}\left(\dot{e}_y v_r + e_y \dot{v}_r\right) \\ -k_1(\omega_r - \omega)\left(\frac{1}{2}k_4 \cos\frac{e_\theta}{2} - k_2 e_y v_r \sin\frac{e_\theta}{2}\right)\left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}}\right)e_y \\ -k_1 \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}(-\omega e_x + v_r \sin e_\theta) + k_3\left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right) \\ 2k_2 v_r e_y \cos\frac{e_\theta}{2} + \omega_r + k_4 \sin\frac{e_\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Для системы мобильных роботов (1), изучаемой в этой статье, закон кинематического управления, разработанный по (18), может заставить систему мобильных роботов достичь локальной асимптотической устойчивости. Для доказательства вышеприведенного вывода с помощью второго метода Ляпунова выбираются следующие функции Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}\left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right)^2 + \frac{1}{2}e_y^2 + \frac{2}{k_2}\left(1 - \cos\frac{e_\theta}{2}\right) \quad (19)$$

Принимая во внимание (19), найдем производную (20) в виде:

$$\dot{V} = \left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right)\left(\dot{e}_x - k_1\omega\dot{\omega}\left(\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2}} - \frac{\omega^2}{\sqrt{(1+\omega^2)^3}}\right)e_y - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}\dot{e}_y\right) + e_y\dot{e}_y + \frac{1}{k_2}\dot{e}_\theta \sin\frac{e_\theta}{2} \quad (20)$$

Подставляя (5) и (18) в (20), перепишем (21) в виде:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right)\left(\omega e_y - k_3\left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right)\right) + \omega e_x e_y \\ &\quad + e_y v_r \sin e_\theta + \frac{1}{k_2}\sin\frac{e_\theta}{2}(\omega_r - \omega) \\ &= -k_1\frac{\omega^2}{\sqrt{1+\omega^2}}{e_y}^2 - k_3\left(e_x - k_1\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}}e_y\right)^2 - \frac{k_4}{k_2}\sin^2\frac{e_\theta}{2}\end{aligned} \quad (21)$$

Очевидно, что $\dot{V} < 0$. Таким образом, из критерия устойчивости по Ляпунову мы можем получить, что для системы мобильного робота в данной работе система локально асимптотически устойчива в своем конфигурационном пространстве.

3. Моделирование управление движением робота по траектории. На основе разработанных кинематических законов управления (18), MATLAB и

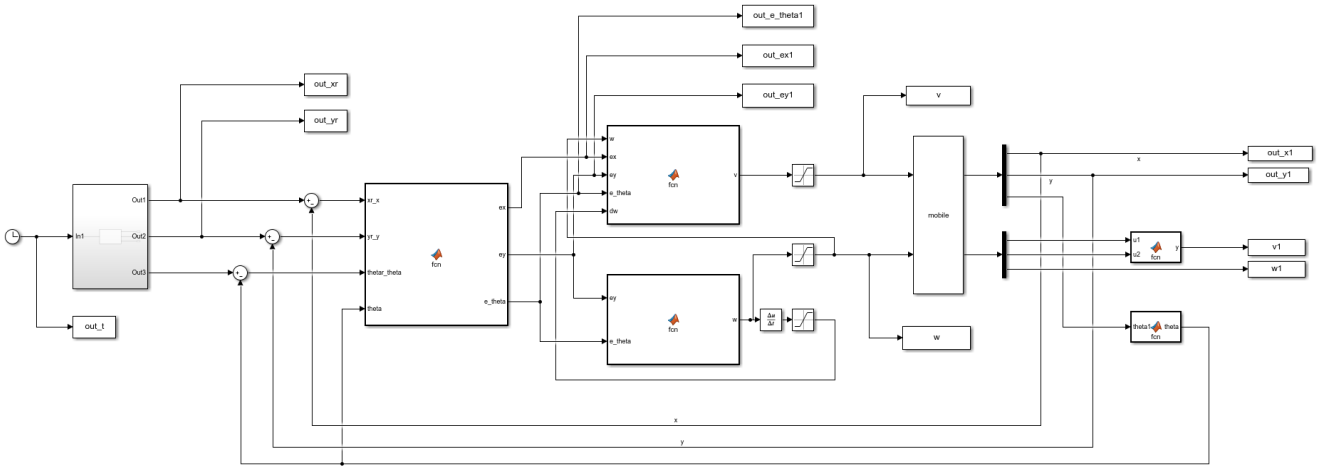

Рис.4. Модель системы отслеживания траектории мобильного робота



Рис.3. Модель робота в Coppeliasim

CoppeliaSim используются для моделирования и анализа характеристик отслеживания траектории мобильного робота, модель которого представлена на рис.3 и рис.4. Результаты моделирования используются для проверки совершенства кинематического закона управления, разработанного в данной работе. Чтобы обеспечить плавное движение робота, мы выбираем $(v_{max}, \omega_{max}) = (0.5\ \text{м/с}, 3\ \text{рад/с})$, $(a_{max}, \alpha_{max}) = (1\ \text{м/с}, 3\ \text{рад/с})$.

Пусть мобильный робот отслеживает прямолинейную опорную траекторию. Учитывая, что опорная линейная и угловая скорости равны $v = 0.3$ м/с и $\omega =$

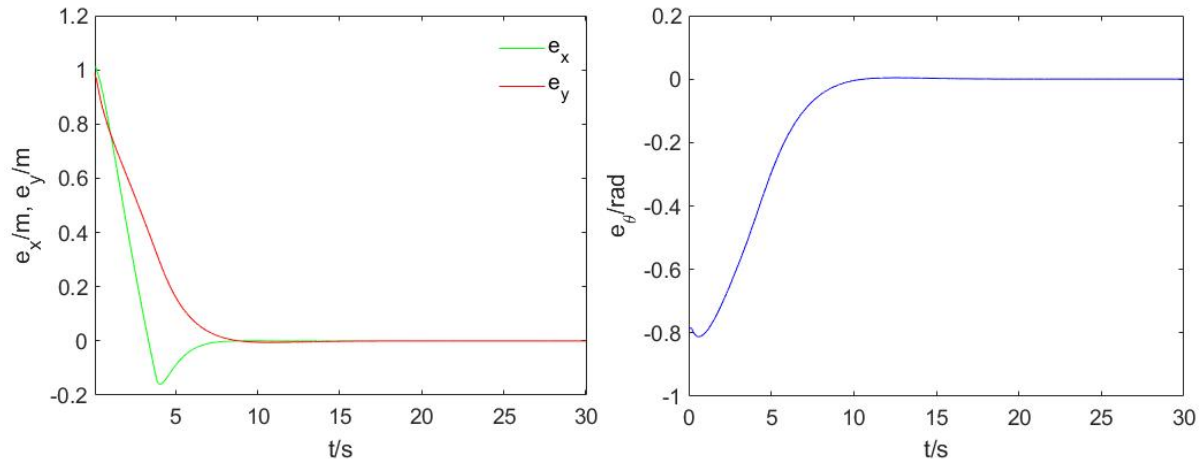

Рис.6. Результат ошибки отслеживания траектории

0 рад/с соответственно, начальное положение опорного робота равно$\left(0 \quad 0 \quad \frac{\pi}{4}\right)$, а начальное положение реального робота равно $\left(1 \quad -1 \quad \frac{\pi}{3}\right)$. Пусть параметры $k_1 =$

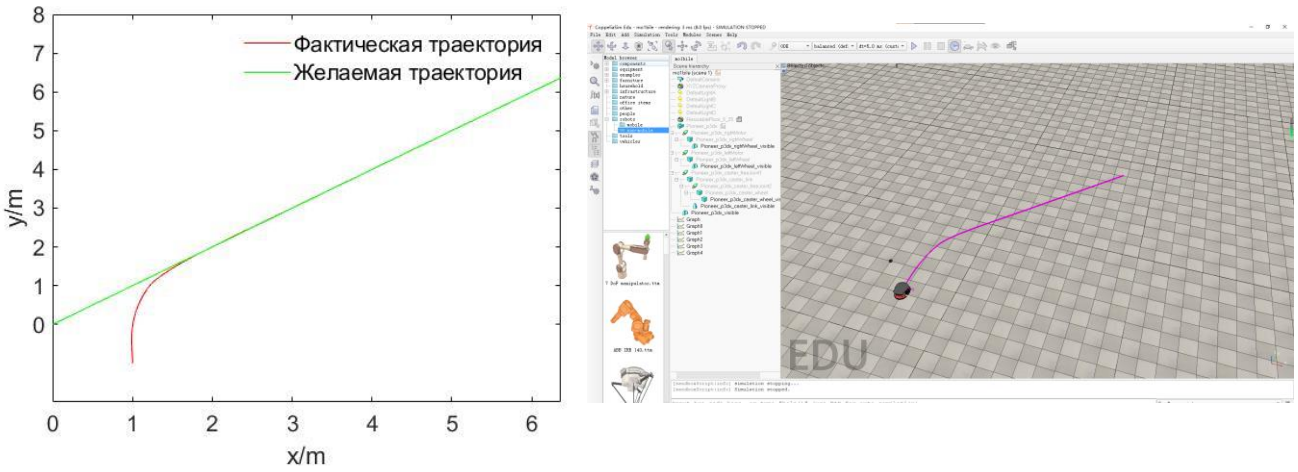

Рис.5. Результат моделирования движения робота вдоль линейной траектории

4, $k_{12} = 1{,}7$, $k_3 = 5$, $k_4 = 2$. Результаты моделирования показаны на следующих рисунках, где на рис.5 показано отслеживание линейной траектории; на рис.6 — сравнение компонентов ошибки отслеживания линейной траектории e_x, e_y и e_θ

Пусть мобильный робот отслеживает круговую опорную траекторию. Учитывая, что опорная круговая угловая скорости равны $v = 0{,}3$ м/с и $\omega =$

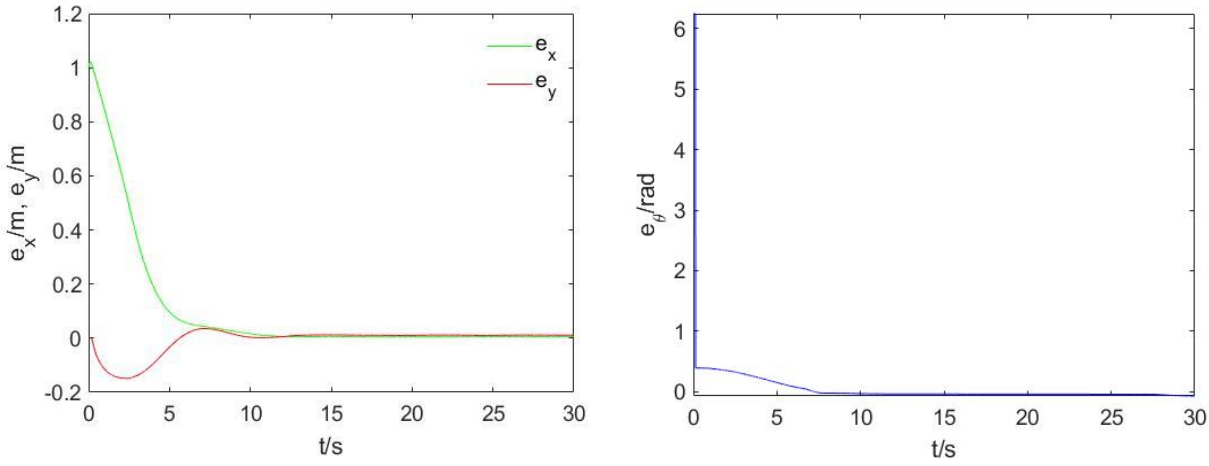

Рис.8. Результат ошибки отслеживания траектории

$0{,}3$ рад/с соответственно, начальное положение опорного робота равно$\left(1 \quad 0 \quad \frac{\pi}{2}\right)$, а начальное положение реального робота равно $\left(1 \quad -1 \quad \frac{\pi}{3}\right)$. Пусть параметры $k_1 = 0.2$, $k_{12} = 4$, $k_3 = 0.5$, $k_4 = 1.5$. Результаты моделирования показанына следующих рисунках, где на рис. 7 показано отслеживание круговой траектории;

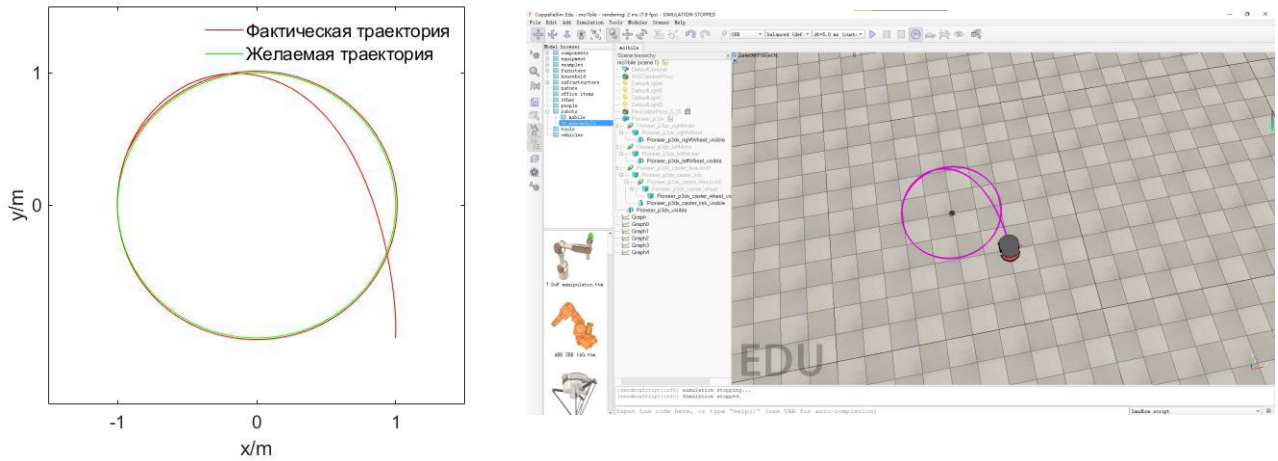

Рис.7. Результат моделирования движения робота вдоль линейной траектории

на рис. 8 — сравнение компонентов ошибки отслеживания линейной траектории e_x, e_y и e_θ

Из результатов моделирования видно, что метод управления отслеживанием траектории, предложенный в (18), позволяет роботу хорошо отслеживать опорную

траекторию. Поэтому метод управления, предложенный в данной работе, является эффективным.

Заключение. На основе кинематической модели неголономного мобильного робота в данной работе используется метод бэкстеппинга и функции Ляпунова для разработки кинематического регулятора для отслеживания заданной траектории. Локальная асимптотическая устойчивость системы демонстрируется с помощью второго метода Ляпунова, а эффективность предложенного в статье метода управления проверяется с помощью моделирования.

Литература

1. В. Н. Герасимов, Б. Б., Михайлов. Решение Задачи Управления Движением Мобильного Робота При Наличии Динамических Препятствий // Управление Движением Роботов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012. С. 83-91.
2. Kawka P A, Alleyne A G, Stability and feedback control of wireless networked systems // American Control Conference. IEEE. 2005.
3. Пахомов К. В., О. А. Перегудова д.ф.-м.н., Силантьев П. П., Управление Движением Неголономного Мобильного Робота На Основе Метода Бэкстеппинга // Научно-Технический Вестник Поволжья. 2011. № 3.С. 30-33.
4. George, Nikolakopoulos, and, et al, Experimental controller tuning and QoS optimization of a wireless transmission scheme for real-time remote control applications // Control Engineering Practice, 2008.
5. Dumitrascu B, Filipescu A, Minzu V, et al. Backstepping control of wheeled mobile robots // 15th International Conference on System Theory, Control and Computing. IEEE. 2011, pp. 1-6.
6. Zidani G, Drid S, Benmakhlouf A, et al. Backstepping controller for a wheeled mobile robot // 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC). IEEE. 2015, pp.443-448.
7. Fukao T, Nakagawa H, Adachi N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot // IEEE transactions on Robotics and Automation. 2000, 16(5), pp. 609-615.

8. Kokotovic P.V. The joy of feedback: nonlinear and adaptive // IEEE Control systems. 1992. vol. 12. no. 3, pp. 7–17.
9. Ma Haitao. Motion control of non-holonomic wheeled mobile robot // Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
10. X. Chen, Q. Zhang and S. Liu, "Adaptive backstepping control of nonlinear systems," 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019, pp. 1912-1917.

References

1. V. N. Gerasimov, B. B., Mikhailov. Solution of the Problem of Motion Control of a Mobile Robot in the Presence of Dynamic Obstacles // Motion Control of Robots. Bulletin of MSTU im. N.E. Bauman. Ser. "Instrument making". 2012, pp. 83-91.
2. Kawka P A, Alleyne A G, Stability and feedback control of wireless networked systems // American Control Conference. IEEE. 2005.
3. Pakhomov K. V., O. A. Peregudova Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Silantiev P. P., Motion Control of a Nonholonomic Mobile Robot Based on the Backstepping Method // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2011. No. 3, pp. 30-33.
4. George, Nikolakopoulos, and, et al, Experimental controller tuning and QoS optimization of a wireless transmission scheme for real-time remote control applications // Control Engineering Practice, 2008.
5. Dumitrascu B, Filipescu A, Minzu V, et al. Backstepping control of wheeled mobile robots // 15th International Conference on System Theory, Control and Computing. IEEE. 2011, pp. 1-6.
6. Zidani G, Drid S, Benmakhlouf A, et al. Backstepping controller for a wheeled mobile robot // 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC). IEEE. 2015, pp. 443-448.
7. Fukao T, Nakagawa H, Adachi N. Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot // IEEE transactions on Robotics and Automation. 2000, 16(5), pp. 609-615.

8. Kokotovic P.V. The joy of feedback: nonlinear and adaptive // IEEE Control systems. 1992. vol. 12. No. 3, pp. 7–17.
9. Ma Haitao. Motion control of non-holonomic wheeled mobile robot // Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
10. X. Chen, Q. Zhang and S. Liu. Adaptive backstepping control of nonlinear systems // 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019, pp. 1912-1917.

© Ван Чжун, 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Ван Чжун УПРАВЛЕНИЕ ОТСЛЕЖИВАНИЕМ ТРАЕКТОРИИ НЕГОЛОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА БЭКСТЕППИНГА// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.