

УДК 531.011

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-98-105

Идентификация коэффициента трения для управляемой колесной системы типа Roller Racer на основе экспериментальных данных*

К. С. Ефремов, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе проводятся исследования движения управляемой колесной системы, направленные на согласование математической модели, описывающей ее движение, с экспериментом. Полученные результаты направлены на повышение точности следования мобильного робота по заданным траекториям.

В качестве объекта исследования в работе выбрана мобильная колесная система с приводной шарнирной рамой и свободно вращающимися колесами (в литературе данная компоновка мобильного колесного робота называется Roller Racer). В работе приведена структурная схема объекта исследования, математическая модель, описывающая ее движение с конструктивными ограничениями. Согласование модели движения с экспериментальными исследованиями обеспечивается идентификацией параметров Roller Racer. Идентификация параметров Roller Racer проводится за счет разработанного метода идентификации параметров управляемой колесной системы. Предложенный в работе метод идентификации параметров управляемой колесной системы позволяет определять геометрические и динамические параметры Roller Racer, учитываемые в модели движения управляемой колесной системы. Результаты экспериментальных траекторий движения, снятые на систему захвата движения, сравниваются с смоделированными траекториями согласно точные значения движения управляемой колесной системы. Согласно полученному рассогласованию определяются точные значения параметров управляемых колесных систем. В работе приведены выражения для расчета рассогласования на основе экспериментальных данных с системы захвата движения и теоретических данных модели движения управляемой колесной системы. Приведен алгоритм идентификации значения коэффициента трения качения на основе экспериментальных исследований управляемой колесной системы типа Roller Racer. Сделаны выводы о возможности применения метода идентификации параметров системы.

Ключевые слова: Roller Racer, коэффициент вязкого трения колеса, экспериментальная оценка параметров системы, управляемая колесная система.

Введение

Мобильные роботы являются одним из наиболее активно развивающихся направлений исследований в современном мире. Это обусловлено, прежде всего, несколькими факторами: удешевление аппаратной части, широкое распространение аддитивных технологий [1], появление готовых наборов компонентов (звенья манипуляторов в сборе с приводами, колесные платформы шасси с электродвигателями и т. п.). Большую долю от всей мобильной робототехники составляют мобильные колесные роботы.

Для управления мобильными колесными роботами применяют различные модели движения в зависимости от конструкции. В основе моделирования движения, как правило, используется кинематика робота, так как динамические процессы требуют идентификации большого количества параметров, в том числе описывающих взаимодействие управляемой колесной системы с окружающей средой. От точности определения кинематических и динамических параметров мобильного робота зависит точность следо-

вания вдоль заданных траекторий. Задача точности следования вдоль траектории актуальна для транспортных логистических систем [2, 3], сервисных мобильных роботов [4, 5], когда необходимо обеспечить точность позиционирования как в процессе движения, так и в конечной точке. Решение данной проблемы обеспечивается как техническими средствами, что приводит к удорожанию мобильных роботов, так и с помощью разработки алгоритмов управления, основанных на кинематических и динамических моделях движения. При реализации второго варианта возникает задача обеспечения точности определения кинематических и динамических параметров управляемой колесной системы. Проблема точности движения мобильного робота проанализирована в [6–10].

В данной работе рассмотрен наиболее простой вариант управляемой колесной системы с точки зрения конструкции – мобильный робот с приводной шарнирной рамой и свободно вращающимися колесами – Roller Racer [11]. Приведение в движение осуществляется за счет пе-

риодического вращательного движения одной полурамы относительно второй.

Модель движения Roller Racer и структурная схема

Мобильный робот, реализующий конструкцию Roller Racer, состоит из двух сочлененных между собой относительно вертикальной оси полурам. Полурамы могут вращаться относительно друг друга в горизонтальной плоскости. В месте сочленения полурам мобильного робота располагается сервопривод, позволяющий

управлять вращательными движениями одной полурамы относительно другой. К полурамам на некотором расстоянии от центра их сочленения крепятся колесные оси с посаженными на них свободно вращающимися колесами. В движение данная конструкция приводится управлением по периодической функции. Скорость движения зависит от формы, периода и амплитуды функции управления. Схема конструкции мобильного робота типа Roller Racer приведена на рис. 1.

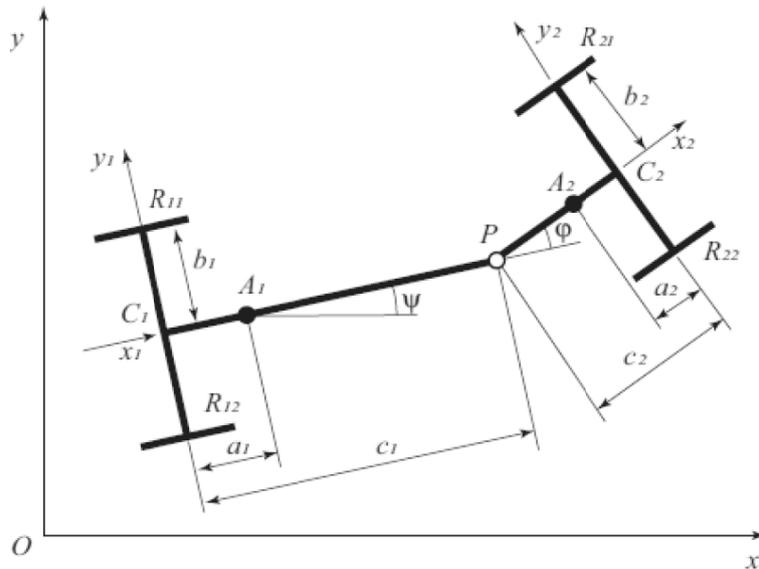


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции Roller Racer

Fig. 1. Design schematic of the Roller Racer

На рис. 1 Oxy – неподвижная система координат; $C_1x_1y_1$ – подвижная система координат связанная с первой полурамой; $C_2x_2y_2$ – подвижная система координат связанная со второй полурамой; A_1, A_2 – центры тяжести полурам мобильного робота; ψ – угол между осями C_1x_1 и Ox определяющий ориентацию первой платформы; φ – угол между осями C_1x_1 и C_2x_2 определяющий ориентацию первой платформы относительно второй; C_1, C_2 – центры колесных пар первой и второй полурам соответственно; $R_{11}, R_{12}, R_{22}, R_{21}$ – радиусы колес; a_1, a_2 – расстояние от центра масс до центра колесной пары первой и второй полурам соответственно; b_1, b_2 – расстояния от точки контакта колеса до центра колесной пары первой и второй полурам соответственно; c_1, c_2 – расстояние от точки P управляемой колесной системы, до центра колесной пары первой и второй полурам соответственно.

Динамическая модель движения мобильного робота типа Roller racer более подробно рас-

смотрена в работе [12]. Рассмотрим далее уравнения движения записанные для точки P (точки сочленения полурам).

С учетом обозначений на рис. 1 скорость точки P определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned} v_1 &= \dot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi, \\ v_2 &= -\dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi, \quad \omega = \dot{\psi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $v = (v_1, v_2)$ – вектор скорости точки сочленения полурам P в подвижной системе координат $C_1x_1y_1$; ω – угловая скорость первой платформы робота.

Ограничения, наложенные кинематикой управляемой колесной системы типа Roller Racer, определяются следующими выражениями:

$$v_2 + c_1 \omega = 0,$$

$$v_1 \sin \varphi(t) - v_2 \cos \varphi(t) + c_2 (\omega + \dot{\varphi}(t)) = 0. \quad (2)$$

Динамика управляемой колесной системы типа Roller Racer описывается уравнениями

движения в форме уравнений Лагранжа в квази-скоростях (уравнения Пуанкаре). Более подро-

ный вывод уравнений движения Roller Racer приведен в работах [11, 12]:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= (A(t) - C(t))v_1 - B_1(t) - B_2(t) - D(t), \\ A(t) &= -\frac{\dot{\varphi} \sin \varphi (J_1 S_2 + \delta S_1)}{S_1 (J_1 \sin^2 \varphi + MS_1^2)}, \quad B_1(t) = \frac{\ddot{\varphi} \sin \varphi (J_1 c_2 + J_2 S_1)}{J_1 \sin^2 \varphi + MS_1^2}, \\ B_2(t) &= \frac{\dot{\varphi}^2 (J_1 c_1 c_2 \sin^2 \varphi + S_1 (c_1 \delta \cos \varphi + \varepsilon c_2 S_1))}{S_1 (J_1 \sin^2 \varphi + MS_1^2)}, \\ C(t) &= 2 \frac{(k_1 b_1^2 + k_2 b_2^2) \sin^2 \varphi + k_1 S_1^2 + k_2 S_2^2}{J_1 \sin^2 \varphi + MS_1^2}, \\ D(t) &= 2 \frac{\dot{\varphi} \sin \varphi (c_1 k_2 (b_2^2 + c_2^2) \cos \varphi + c_2 (b_1^2 k_1 + k_2 c_1^2))}{J_1 \sin^2 \varphi + MS_1^2}, \\ S_1 &= c_1 \cos \varphi - c_2, \quad S_2 = c_1 - c_2 \cos \varphi, \quad \varepsilon = m_1 a_1 - c_1 m_2, \\ \delta &= c_1 a_1 m_2 - c_2 a_1 m_1, \end{aligned} \quad (3)$$

где J_1, J_2 – моменты инерции относительно точки P ; k_1, k_2 – коэффициенты вязкого трения качения первой и второй полурам соответственно; b_1, b_2 – геометрические размеры управляемой колесной системы, приведенные на рис. 1; m_1, m_2 – массы соответствующих полурам; $A, B_1, B_2, C, D, S_1, S_2, \varepsilon, \delta$ – сокращенная для удобства запись правых частей уравнений.

Эволюция конфигурационных переменных описывается системой

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{v_1 \sin \varphi(t) + c_2 \dot{\varphi}(t)}{c_1 \cos \varphi(t) - c_2}, \\ \dot{x} &= v_1 \cos \psi - c_1 \frac{v_1 \sin \varphi(t) + c_2 \dot{\varphi}(t)}{c_1 \cos \varphi(t) - c_2} \sin \psi, \\ \dot{y} &= v_1 \sin \psi - c_1 \frac{v_1 \sin \varphi(t) + c_2 \dot{\varphi}(t)}{c_1 \cos \varphi(t) - c_2} \cos \psi. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве управления будем использовать периодическую функцию изменения угла φ , рассмотренную в работе [13] в виде:

$$\varphi(t) = \alpha \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \varphi_0, \quad (5)$$

где T – период; φ_0 – начальное смещение; α – амплитуда сигнала управления.

Таким образом, система (3) и (4) описывает поведение Roller Racer, в случае если угол $\varphi(t)$ между тележками является заданной функцией времени. Решая систему (4) при управлении (3) можем получить траекторию движения управляемой колесной системы типа Roller Racer.

На скорость движения мобильного робота типа Roller Racer влияет большое количество компонентов. Большинство из них можно изме-

нить напрямую – это геометрические параметры и массы полурам. Моменты инерции с достаточной точностью измеряются в программном продукте Solid Works по созданным 3-мерным моделям. Реальные геометрические размеры после измерений уточняются с помощью специального экспериментального алгоритма, приведенного в работе [14].

Структурная схема влияния параметров и съемки движения прототипа мобильного робота типа Roller Racer приведена на рис. 2.

В качестве управляющего воздействия для управляемой колесной системы типа Roller Racer применяется периодическая функция изменения угла, приведенная в выражении (5). Модель движения мобильной колесной системы преобразует управляющее воздействие в траекторию движения согласно системе (4) с учетом конструктивных параметров и окружающей среды.

Конструктивные параметры системы и параметры окружающей среды, такие как коэффициент трения, непосредственно влияют на траекторию движения управляемой колесной системы. От коэффициента трения зависит скорость движения и длина пройденного пути для модели мобильного робота типа Roller Racer. Моделирование траектории для различных коэффициентов трения колес: $k = 0,3$; $k = 0,5$; $k = 0,9$, приведено на рис. 4. Видно, что значения k оказывают существенное влияние на траекторию движения даже для выбранного широко-заданного интервала значений коэффициента. Рассмотрим далее методику идентификации значения k из экспериментальных данных.

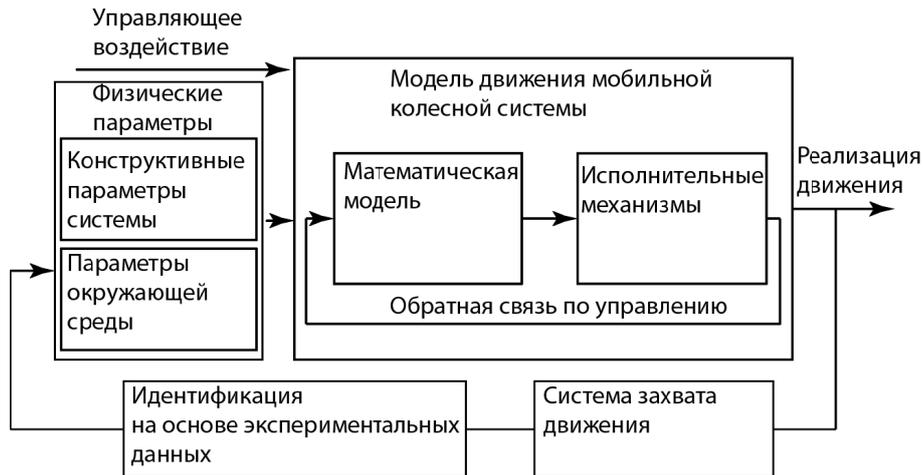


Рис. 2. Структурная схема влияния параметров и съемки движения прототипа мобильного робота

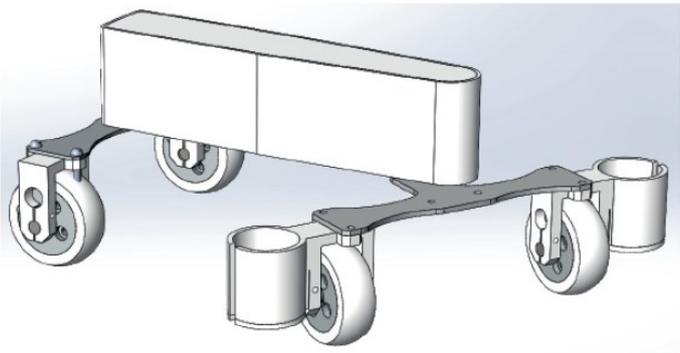
Fig. 2. Structural diagram of the influence of parameters and motion capturing of a prototype of a mobile robot

Натурный прототип

Согласно схеме мобильного робота и модели движения собран натурный прототип, фото и 3-мерная модель которого приведены на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Натурный прототип робота типа Roller Racer: а – фото сверху, б – 3D-модель

Fig. 3. A prototype of a Roller Racer. а – Picture, б – 3D model

Параметры натурального прототипа:

$a_1 = 0,029$ м, $M_1 = 0,6$ кг, $c_1 = 0,185$ м, $b_1 = 0,075$ м, $J_1 = 0,0185406$ кг·м²;

$a_2 = -0,005$ м, $M_2 = 0,48$ кг, $c_2 = 0,05$ м, $b_2 = 0,075$ м, $J_2 = 0,011751$ кг·м².

Колеса мобильного робота изготовлены из резины. Коэффициент вязкого трения резины о твердые поверхности составляет от 0,4–0,9. Так как покрытие колес на изготовленном прототипе одинаковое, то коэффициент вязкого трения для всех колес принят одинаковый. Проведем исследования по определению точного значения этого показателя.

Для управления прототипом мобильного робота разработана плата управления на основе микроконтроллера STM32. В качестве привода полурам использовался сервопривод CDS5516. Максимальная скорость сервопривода составляет 0,18 с на 60°, что составляет 6,28 рад/с. Это является ограничением для функции управления. Поэтому для управления использовались параметры: $T = 1$ с, 2 с; $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\varphi_0 = 0$. Результаты моделирования системы (4) с управлением (5) с параметрами управления $T = 1$ с, $\alpha = 45^\circ$, $\varphi_0 = 0$, с параметрами натурального прототипа, приведенного на рис. 3, приведены на рис. 4.

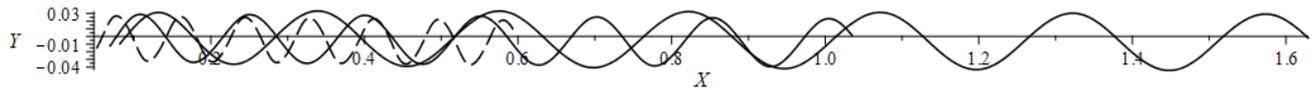


Рис. 4. Моделируемые траектории движения точки P: сплошной линией при $k = 0,3$; штриховой линией при $k = 0,9$; и пунктирной линией при $k = 0,5$

Fig. 4. Simulated trajectories of the point P: a solid line for $k = 0,3$; a dashed line for $k = 0,9$; and a dotted line for $k = 0,5$

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проведены на плоском горизонтальном полигоне, выполненном из ПВХ-подложки. Параметры функции управления: $T = 1$ с, 2 с; $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\varphi_0 = 0$. Всего проведено 6 экспериментов, снятых на систему захвата движения Vicon [15, 16].

Для идентификации коэффициента трения качения колес и получения количественной оценки рассогласования траекторий разработан алгоритм идентификации коэффициента вязкого трения качения колес, в котором оценку рассогласования предполагается проводить суммиро-

ванием отклонений всех эквивалентных точек траектории по следующему выражению:

$$d = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i^e - x_i^m)^2 + (y_i^e - y_i^m)^2}, \quad (6)$$

где n – количество сравниваемых точек; x^e – координаты x экспериментальной траектории; x^m – координаты x моделируемой траектории, y^e, y^m – соответственно. Псевдокод алгоритма идентификации коэффициента вязкого трения приведен в листинге 1.

Алгоритм 1: Алгоритм идентификации коэффициентов трения колес мобильного робота:

Algorithm 1: Algorithm for identifying the friction coefficients of the wheels of a mobile robot

```

1. for T from 1 to 2 do:
2.   for A from 15 by 15 to 45 do:
3.     XE, YE – (x,y) координаты экспериментальной траектории;
4.     EndFile = numrow(XE);
5.     for k from 0 by 0.01 to 1 do:
6.       XC(t), YC(t) = f(t,k,T,A) – (x,y) координаты модели движения;
7.       sum = 0;
8.       for t from 1 to EndFile do:
9.         sum = sum +  $\sqrt{(XE(t) - XC(t))^2 + (YE(t) - YC(t))^2}$ 
10.      end do;
11.      array_sum(k) = sum;
12.    end do
13.    min_sum = array_sum(1), paramK=0;
14.    for k from 0 by 0,01 to 1 do:
15.      if min_sum > array_sum(k) do:
16.        min_sum = array_sum(k);
17.        paramK = k;
18.      end do
19.    end do
20.  end do
21. end do

```

Согласно приведенному алгоритму экспериментальная и теоретическая траектории сравниваются между собой по координатам (по точкам). Количество точек и периодов экспериментальной траектории и теоретической совпадают. Координаты для экспериментальной траектории

снимаются по маркерам, установленным на роботе, при помощи системы захвата движения Vicon с частотой 100 раз в секунду. В зависимости от параметров функции управления и времени съемки получается различное количество точек траектории. Эквивалентная теоретическая

траектория моделируется в зависимости от количества точек экспериментальной траектории с учетом количества периодов. Далее вычисляется интегральное отклонение всех точек моделируемой траектории от эквивалентных им точек экспериментальной траектории.

Выбирается коэффициент трения, соответствующий минимуму суммарного отклонения всех точек моделируемой траектории от экспериментальной. Суммарное отклонение рассчитано согласно выражению (6). Для каждой траектории количество точек суммирования зависит от времени движения управляемой колесной системы. Так как система захвата движения ра-

ботает на частоте 100 Гц, в каждую секунду движения снимается 100 точек. Алгоритм реализован в программном продукте Maple. Результаты исследования всех экспериментальных траекторий приведены в таблице. Результат подбора коэффициента вязкого трения согласно суммарному отклонению траектории приведен на рис. 5. Параметры функции управления для данного графика – $T = 1$ с, $\alpha = 45^\circ$, $\varphi_0 = 0$. Минимальное значение интегрального отклонения соответствует значению $k = 0,17$. Отклонение определено для 650 точек.

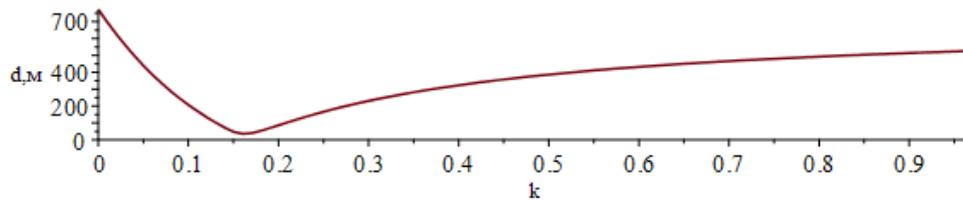


Рис. 5. График изменения суммарного отклонения в зависимости от коэффициента трения

Fig. 5. A plot of changes in the total deviation depending on the coefficient of friction

Согласно графику, приведенному на рис. 5, максимальное совпадение экспериментальной и моделируемой траекторий достигается при коэффициенте трения $k = 0,17$, что соответствует минимальному суммарному отклонению всех эквивалентных точек траектории. Для $k = 0,17$ суммарное отклонение $d = 45$. Максимальное

суммарное отклонение $d = 771$ соответствует значению параметра $k = 0,01$.

Пример реализации экспериментального движения с моделируемой траекторией для подобранного k приведен на рис. 6. Параметры функции управления для данной траектории – $T = 1$ с, $\alpha = 45^\circ$, $\varphi_0 = 0$.



Рис. 6. Экспериментальная (штриховая) и теоретическая (сплошная) траектории движения мобильного робота типа Roller Racer

Fig. 6. Experimental (dash) and theoretical (solid) trajectories of motion of the Roller Racer

Зависимость коэффициента вязкого трения от параметров функции управления

Dependence of the viscous friction coefficient on the parameters of the control function

T, c	1			2		
$\alpha, ^\circ$	15	30	45	15	30	45
k	0,56	0,24	0,19	0,68	0,45	0,79

Несмотря на полученные отклонения, значение коэффициента, определенное из экспериментов, находится в диапазоне от 0,19 до 0,74. А в среднем коэффициент трения колес для данной модели Roller Racer получился $k = 0,505$,

что соответствует табличным значениям для резины на сухом твердом покрытии.

Выводы

1. Методика идентификации параметров системы на основе экспериментальных данных апробирована на модели управляемой колесной системы и может использоваться в других подобных системах.

2. Получено значение коэффициента вязкого трения, которое позволило уточнить динамику движения мобильного робота типа Roller Racer.

3. Результаты исследования модели движения мобильного колесного робота с приводной шарнирной рамой и свободно вращающимися

колесами соответствуют экспериментально полученным результатам.

Библиографические ссылки

1. Oliveira J. P., Santos T. G., Miranda R. M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice // *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 107. Pp. 100590.

2. Liu T. et al. The role of the hercules autonomous vehicle during the covid-19 pandemic: An autonomous logistic vehicle for contactless goods transportation // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2021. – Vol. 28. No. 1. Pp. 48-58.

3. Pedemonte, N., Rasheed, T., Marquez-Gamez, D., Long, P., Hocquard, É., Babin, F., Caro, S. Fastkit: A mobile cable-driven parallel robot for logistics. In *Advances in Robotics Research: From Lab to Market*. 2020. Pp. 141-163. Springer, Cham.

4. Ravankar, A., Ravankar, A. A., Kobayashi, Y., Hoshino, Y., Peng, C. C. Path smoothing techniques in robot navigation: State-of-the-art, current and future challenges. *Sensors*, 2018, 18(9), 3170.

5. Barakat, M. H., Azar, A. T., Ammar, H. H. Agricultural service mobile robot modeling and control using artificial fuzzy logic and machine vision. In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications* (2019, March). Springer, Cham. Pp. 453-465.

6. Cybulski B., Wegierska A., Granosik G. Accuracy comparison of navigation local planners on ROS-based mobile robot // 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). IEEE, 2019. Pp. 104-111.

7. Dudzik S. Application of the Motion Capture System to Estimate the Accuracy of a Wheeled Mobile Robot Localization // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 23. P. 6437.

8. Zafari F., Gkelias A., Leung K. K. A survey of indoor localization systems and technologies // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. Pp. 2568-2599.

9. Röwekämper, J., Sprunk, C., Tipaldi, G. D., Stachniss, C., Pfaff, P., & Burgard, W. On the position accuracy of mobile robot localization based on particle filters combined with scan matching. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012, October. Pp. 3158-3164. IEEE.

10. Han, S., Lim, H., Lee, J. An efficient localization scheme for a differential-driving mobile robot based on RFID system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. 54 (6), pp. 3362-3369.

11. Bizyaev, I. A., Borisov, A. V., Mamaev, I. S. Exotic dynamics of nonholonomic roller racer with periodic control. *Regular and Chaotic Dynamics*. 2018. No. 23 (7), pp. 983-994.

12. Kilin A., Karavaev Y., Yefremov K. Experimental Investigations of the Controlled Motion of the Roller Racer Robot // *Climbing and Walking Robots Conference*. Springer, Cham, 2021. Pp. 428-437.

13. Yefremov, K. S., Ivanova, T. B., Kilin, A. A., Karavaev, Y. L. Theoretical and experimental investigations of the controlled motion of the Roller Racer. In *2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*. 2020, December. Pp. 1-5. IEEE.

14. Ardentov A. A., Karavaev Y. L., Yefremov K. S. Euler elasticas for optimal control of the motion of mobile wheeled robots: the problem of experimental realization // *Regular and Chaotic Dynamics*. 2019. Vol. 24, no. 3. Pp. 312-328.

15. Karavaev, Yu. L. and Kilin, A.A., Nonholonomic Dynamics and Control of a Spherical Robot with an Internal Omniwheel Platform: Theory and Experiments, *Proc. Steklov Inst. Math.*, 2016, vol. 295, pp. 158-167; see also: *Tr. Mat. Inst. Steklova*, 2016, vol. 295, pp. 174-183.

16. Kilin, A.A. and Karavaev, Yu. L., Experimental Research of Dynamic of Spherical Robot of Combined Type, *Nelin. Dinam.*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 721-734 (Russian).

References

1. Oliveira J.P., Santos T.G., Miranda R.M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. In *Progress in Materials Science*. 2020. Vol. 107. Pp. 100590.

2. Liu T. et al. The role of the hercules autonomous vehicle during the covid-19 pandemic: An autonomous logistic vehicle for contactless goods transportation. In *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2021. Vol. 28. No. 1. Pp. 48-58.

3. Pedemonte, N., Rasheed, T., Marquez-Gamez, D., Long, P., Hocquard, É., Babin, F., Caro, S. Fastkit: A mobile cable-driven parallel robot for logistics. In *Advances in Robotics Research: From Lab to Market*. 2020. Pp. 141-163. Springer, Cham.

4. Ravankar, A., Ravankar, A. A., Kobayashi, Y., Hoshino, Y., Peng, C. C. Path smoothing techniques in robot navigation: State-of-the-art, current and future challenges. *Sensors*, 2018, 18(9), 3170.

5. Barakat, M. H., Azar, A. T., Ammar, H. H. Agricultural service mobile robot modeling and control using artificial fuzzy logic and machine vision. In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications* (2019, March). Springer, Cham. Pp. 453-465.

6. Cybulski B., Wegierska A., Granosik G. Accuracy comparison of navigation local planners on ROS-based mobile robot. In 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). IEEE, 2019. Pp. 104-111.

7. Dudzik S. Application of the Motion Capture System to Estimate the Accuracy of a Wheeled Mobile Robot Localization. In *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 23. P. 6437.

8. Zafari F., Gkelias A., Leung K. K. A survey of indoor localization systems and technologies. In *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 3. Pp. 2568-2599.

9. Röwekämper J., Sprunk C., Tipaldi G.D., Stachniss C., Pfaff P., & Burgard W. On the position accuracy of mobile robot localization based on particle filters combined with scan matching. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012, October. Pp. 3158-3164. IEEE.

10. Han, S., Lim, H., Lee, J. An efficient localization scheme for a differential-driving mobile robot based on RFID system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. 54, pp. 3362-3369.

11. Bizyaev I.A., Borisov A.V., Mamaev I.S. Exotic dynamics of nonholonomic roller racer with periodic control. *Regular and Chaotic Dynamics*. 2018. No. 23, pp. 983-994.

12. Kilin A., Karavaev Y., Yefremov K. Experimental Investigations of the Controlled Motion of the Roller Racer Robot. In *Climbing and Walking Robots Conference*. Springer, Cham, 2021. Pp. 428-437.

13. Yefremov K.S., Ivanova T.B., Kilin A.A., Karavaev Y.L. Theoretical and experimental investiga-

tions of the controlled motion of the Roller Racer. In *2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*. 2020, December. Pp. 1-5. IEEE.

14. Ardentov A. A., Karavaev Y. L., Yefremov K. S. Euler elasticas for optimal control of the motion of mobile wheeled robots: the problem of experimental realization // *Regular and Chaotic Dynamics*. 2019. Vol. 24, no. 3. Pp. 312-328.

15. Karavaev Yu.L. and Kilin A.A., Nonholonomic Dynamics and Control of a Spherical Robot with an Internal Omniwheel Platform: Theory and Experiments, *Proc. Steklov Inst. Math.*, 2016, vol. 295, pp. 158-167; see also: *Tr. Mat. Inst. Steklova*, 2016, vol. 295, pp. 174-183.

16. Kilin A.A. and Karavaev Yu. L. Experimental Research of Dynamic of Spherical Robot of Combined Type, *Nelin. Dinam.*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 721-734 (Russian).

Identification of Friction Coefficient of Controlled Wheel System Roller Racer Type Based on Experimental Data

K. S. Yefremov, Kalashnikov ISTU, Russia

The work studies the motion of the controlled wheel system to provide coordination of mathematical model describing its motion and the experiment. The obtained results allow improving the accuracy of the mobile robot trajectory following.

A mobile wheel system with a drive articulated frame and freely rotating wheels (Roller Racer) was chosen as the research object of the work. The paper presents a structural diagram of the research object, a mathematical model describing its motion with design constraints. The coordination of the motion model with experimental studies is provided by the identification of Roller Racer parameters. Identification of Roller Racer parameters is carried out due to the developed method of the controlled wheel system parameters identification. The proposed method of controlled wheel system identification allows determining the geometric and dynamic parameters of Roller Racer, which are considered in the motion model of the controlled wheel system. The results of the experimental trajectories captured on the motion capture system are compared with the simulated trajectories according to the motion model of the controlled wheel system. According to the obtained mismatch, the exact values of controlled wheel system parameters are determined. The paper presents expressions for calculating the mismatch based on experimental data from the motion capture system and theoretical data of the controlled wheel system motion model. An algorithm for identifying the value of the rolling friction coefficient based on experimental studies of the Roller Racer is presented. Conclusions about the possibility of using system parameter identification method are made.

Keywords: Roller Racer, coefficient of viscous friction of the wheel, experimental evaluation of system parameters, controlled wheel system.

Получено: 30.11.22

Образец цитирования

Ефремов К. С. Идентификация коэффициента трения для управляемой колесной системы типа Roller Racer на основе экспериментальных данных // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Том 20, № 4. С. 98–105. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-98-105.

For Citation

Efremov K.S. [Identification of the coefficient of friction for a steerable wheel system of the Roller Racer type based on experimental data]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 4, pp. 98-105 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-98-105.