

УДК 007.52 + 621.865.8

DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-68-72

А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин

ОБ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ ТРЕХОПОРНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ*

Волгоградский государственный технический университет

Aram-081097@mail.ru, dtm@vstu.ru

Предложена расчетная схема и математическая модель трехопорной робототехнической системы, предназначенной для перемещения по вертикальной плоскости за счет управления величиной и направлением усилия, развиваемого актуатором. Решена задача динамики мобильного робота, прижатие которого к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия. Получены уравнения движения центра масс мобильного робота.

Ключевые слова: мобильные робототехнические средства, перемещение, математическая модель, задача динамики, вертикальная плоскость.

© Хачатрян А. А., Брискин Е. С., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00882, <https://rscf.ru/project/22-21-00882/>

A. A. Khachatryan, E. S. Briskin

ON THE CONTROL OF A THREE-SUPPORT MOBILE ROBOT ON A VERTICAL PLANE

Volgograd State Technical University

The design scheme and mathematical model of a three-support robotic system designed to move on a vertical plane by controlling the magnitude and direction of the force developed by the actuator is presented in this article. The task of the dynamics of a mobile robot is solved, the pressing of which to the working surface is carried out due to external force. The equations of motion of the center of mass of the mobile robot are obtained.

Keywords: mobile robotics, displacement, mathematical model, the task of dynamics, vertical plane.

Введение

Роботы для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям имеют ряд актуальных применений, включая обслуживание и обследование зданий и сооружений; выполнение технологических операций на труднодоступных поверхностях, исключая в том числе присутствие человека. Под произвольно ориентированными поверхностями понимается относительно ровная поверхность, расположенная под углом от 0 до 90° к горизонтали.

В целом роботы для перемещения по вертикальным стенам могут повысить безопасность и эффективность работ на высоте, а также снизить риски для человеческой жизни.

Известны разработки роботов, предназначенных для перемещения по произвольно ориентированным поверхностям за счет электромагнитного взаимодействия, вакуумных устройств, тросовых движителей и адгезии [1–5]. Рассматривается робот, опирающийся на обрабатываемую поверхность за счет прижатия

к ней «толкающим» движителем, который может быть выполнен с использованием одноопорного механизма [6–7], и в котором за счет работы одного линейного привода осуществляется реализация усилия «прижатия» робота к обрабатываемой поверхности.

1. Постановка задачи

Ставится задача определения перемещения центра масс мобильного робота и его ориентации при известном выдвигании штока линейного привода (актуатора) и усилия, развиваемого актуатором для обеспечения требуемого перемещения.

2. Расчетная схема робототехнической системы с одной опорой на горизонтальную плоскость

Расчетная схема рассматриваемой робототехнической системы с одной опорой представлена на рис. 1, а. Рассматривается движение робототехнической системы, которая состоит из робота 1, представленного на рисунке характерной поверхностью S , перемещающегося по рабочей

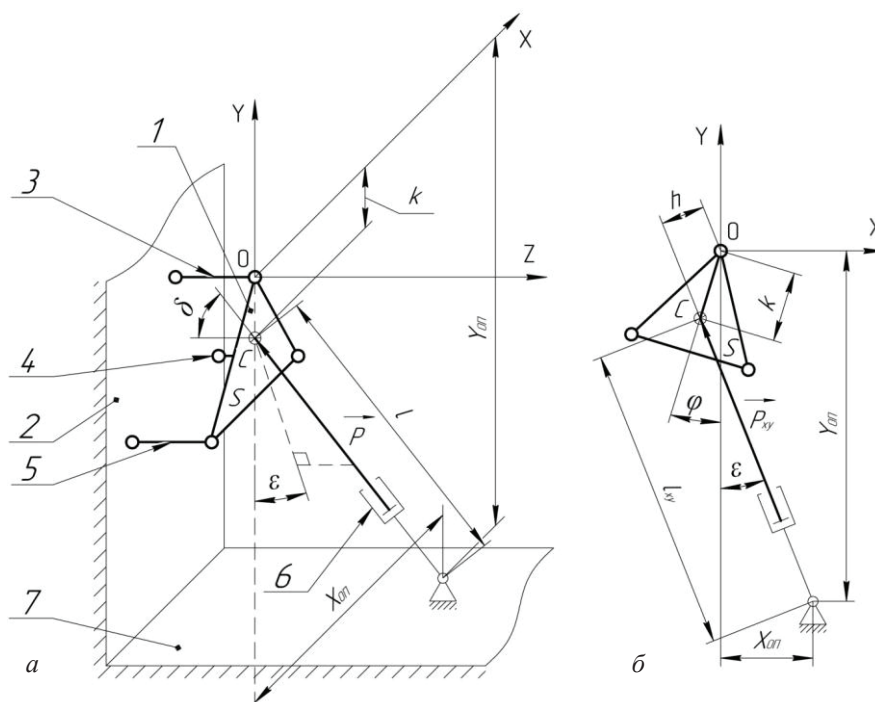


Рис. 1. Расчетная схема робота с прижимным механизмом:

а – общий вид робототехнической системы; б – проекция робототехнической системы на плоскость XOY

поверхности 2, опираясь на нее тремя опорами 3–5, за счет приложенного со стороны актуатора 6 усилия P . Актуатор при этом закреплен на опорной поверхности 7. Изучается вращательное движение мобильного робота вокруг оси Z за счет торможения опоры 3 при расторможенных остальных опорах и воздействия усилием P со стороны актуатора на мобильный робот.

При описании расчетной схемы использованы следующие обозначения: C – центр масс робота; k – расстояние от начала координаты (от опоры 3) до центра масс робота; $x_{\text{оп}}, y_{\text{оп}}$ – соответственно координаты основания одноопорного механизма робота в плоскости XOY ; δ – угол между усилием P и отрицательным направлением оси Z ; ε – угол между проекцией усилия P на плоскость XOY и осью Y ; ϕ – угол поворота мобильного робота вокруг начала координат, совпадающего с опорой 3; l – длина линейного привода одноопорного механизма; l_{xy} – проекция линейного привода одноопорного механизма на плоскость XOY ; P_{xy} – проекция усилия P на плоскость XOY ; h – расстояние от оси вращения до линии действия силы P в плоскости XOY .

3. Метод решения

Принимается, что усилие прижатия P обеспечивает вращательное движение робота вокруг неподвижной опоры 3; при этом силами трения между опорами 4, 5 и рабочей поверхностью пренебрегается. Уравнение вращательного движения в дифференциальной форме представим в виде:

$$I_z \ddot{\phi} = M_z, \quad (1)$$

где I_z – момент инерции мобильного робота относительно оси Z , проходящей через опору 3; M_z – главный момент внешних сил, действующих на мобильный робот относительно оси Z :

$$M_z = P_{xy} h. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи задаемся законом движения мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности (зависимостью изменения угла поворота мобильного робота вокруг начала координат, совпадающего с опорой 3, от времени в вертикальной плоскости XOY :

$$\phi = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (3)$$

где a, b, c, d – неизвестные, определяемые при заданных граничных условиях.

Тогда координаты центра масс робота x_C и y_C в момент времени t можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} x_C = -k \sin \phi; \\ y_C = -k \cos \phi. \end{cases} \quad (4)$$

Зависимость длины линейного привода от времени можно задать выражением

$$l = \frac{\sqrt{(x_C - x_{\text{оп}})^2 + (y_C - y_{\text{оп}})^2}}{\sin \delta}. \quad (5)$$

При этом уравнение прямой, совпадающей с осью линейного привода одноопорного механизма, вдоль которой действует усилие актуатора P , определяется следующей зависимостью:

$$xA + yB + C = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= (y_C - y_{\text{оп}}), \\ B &= (x_{\text{оп}} - x_C), \\ C &= y_{\text{оп}}(x_C - x_{\text{оп}}) - x_{\text{оп}}(y_C - y_{\text{оп}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Для нахождения расстояния h от оси вращения до линии действия силы P воспользуемся следующим выражением:

$$h = \frac{|Ax_O + By_O + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (8)$$

где x_O, y_O – координаты точки O , вокруг которой происходит вращение мобильного робота (рис. 1, б).

Таким образом, получены все необходимые зависимости для решения дифференциального уравнения вращательного движения мобильного робота (1).

4. Имитационное моделирование

Для решения уравнения (1) и определения направления действия и величины усилия актуатора задаются необходимые массово-геометрические параметры робототехнической системы, начальные и граничные условия при движении мобильного робота по рабочей поверхности (см. таблицу ниже).

Исходные данные для имитационного моделирования

Массово-геометрические параметры				Начальные условия при $t = 0$ с	Граничные условия при $t = \tau = 3$ с
$I_z = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$K = 0,5 \text{ м}$	$x_{\text{оп}} = 1 \text{ м}$	$x_0 = 0 \text{ м}$	$\varphi_0 = 0 \text{ рад}$	$\varphi_\tau = \pi/2$
	$\delta = 60^\circ$	$y_{\text{оп}} = -3 \text{ м}$	$y_0 = 0 \text{ м}$	$\dot{\varphi}_0 = 0 \text{ с}^{-1}$	$\dot{\varphi}_\tau = 0 \text{ с}^{-1}$

Для указанных начальных и граничных условий получена зависимость угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от времени:

$$\varphi = -\frac{\pi}{\tau^3} t^3 + \frac{3\pi}{2\tau^2} t^2. \quad (9)$$

Для определения перемещения мобильного робота по рабочей поверхности, а также его ориентации на ней, получены соответственно графики зависимости координат его центра масс x_c и y_c и угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от длины l линейного привода одноопорного механизма (рис. 2, 3).

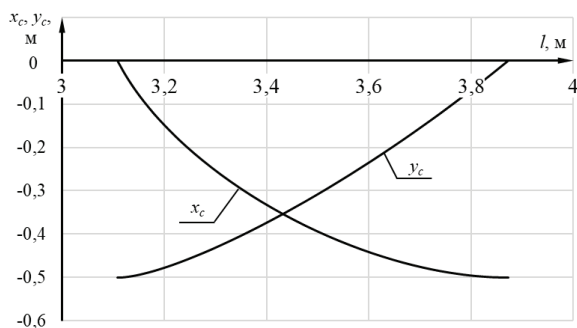


Рис. 2. График зависимости координат центра масс мобильного робота от длины линейного привода одноопорного механизма

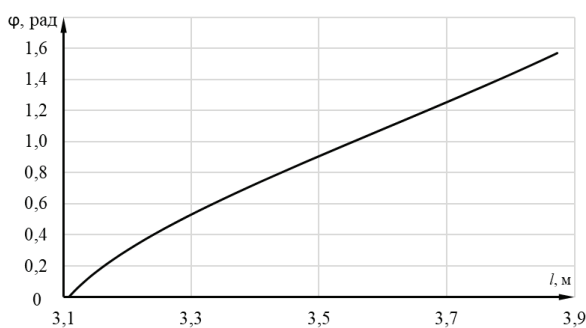


Рис. 3. График зависимости угла поворота мобильного робота вокруг начала координат от длины линейного привода одноопорного механизма

Для обеспечения требуемого перемещения мобильного робота вычислены значения усилия, возникающего на штоке линейного привода одноопорного механизма и получен график

зависимости указанного усилия от длины линейного привода одноопорного механизма, показанный на рис. 4.

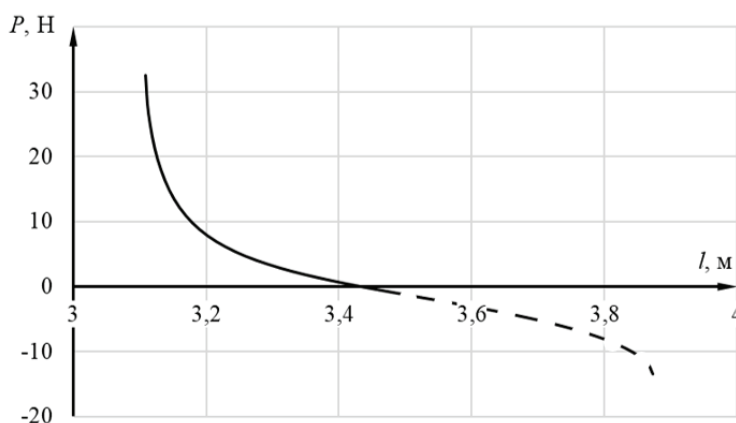


Рис. 4. График зависимости усилия, возникающего на штоке линейного привода одноопорного механизма, от длины линейного привода одноопорного механизма

Выполненные расчеты позволили получить диапазон изменения длины линейного привода одноопорного механизма l от 3,1 до 3,8 м. Уд-

линение линейного привода составило 0,7 м. При этом максимальное значение усилия P составило 32,6 Н.

Однако при удлинении штока более 0,35 м усилие P принимает отрицательные значения (штриховая часть графика на рис. 4). При этом изменяется направление действия усилия актуатора, а реакции опор мобильного робота принимают отрицательные значения. Это приводит к потере работоспособности робототехнической системы, заключающейся в «отрыве» мобильного робота от произвольно ориентированной поверхности.

Выводы

Решена задача динамики мобильного робота, прижатие которого к рабочей поверхности осуществляется за счет внешнего усилия:

- получены уравнения движения центра масс мобильного робота;
- определена ориентация робота на рабочей поверхности при известном выдвигании штока актуатора;
- вычислено усилие, развиваемое актуатором, необходимое для обеспечения требуемого перемещения.

Для обеспечения работоспособности (исключения «отрыва») мобильного робота во время движения по рабочей поверхности необходимо включить в конструкцию робототехнической системы дополнительную опору на горизонтальную поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Градецкий, В. Г. Состояние и перспективы развития роботов вертикального перемещения для экстремальных сред / В. Г. Градецкий, М. М. Князьков // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 1 (2). – С. 9–16.
2. Silva, Manuel & Tenreiro Machado, José. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. 10.5772/8826. – 2010.
3. Хачатрян, А. А. Мобильные робототехнические системы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям: основные недостатки, достоинства, перспективы использования / А. А. Хачатрян // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 57–64.
4. Побегайлов, О. А. Мобильные роботы вертикального перемещения / О. А. Побегайлов, И. В. Кравченко, С. О. Кожуховский // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 4 (14). – С. 85–95.
5. Xiao, J. City Climber: a new generation of mobile robot with wall-climbing capability / J. Xiao, W. Morris, N. Chakravarthy, A. Calle // Proc. of the SPIE, 2006. – Vol. 6230.
6. Хачатрян, А. А. О перемещении трехопорного мобильного робота по произвольно ориентированной поверхности / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 89–95.
7. Хачатрян, А. А. О перемещении мобильного робота по произвольно ориентированным поверхностям / А. А. Хачатрян, Е. С. Брискин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 86–93.