

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.12737/article_5b4f02c028e513.07525318

Яцун С.Ф., д-р техн. наук, проф.,
Ворочаева Л.Ю., канд. техн. наук, доц.,
Мальчиков А.В., канд. техн. наук, доц.,
Политов Е.Н., канд. техн. наук, доц.
Юго-Западный государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ТРЕХЗВЕННОГО РОБОТА С ДВУХКООРДИНАТНЫМИ ШАРНИРАМИ ПО ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе представлена конструкция трехзвеного ползающего робота с двухкоординатными сочленениями звеньев, позволяющими устройству перемещаться по шероховатой поверхности за счет изменения формы корпуса, а также благодаря управлению коэффициентом трения в опорах центрального звена. Осуществлен переход к расчетной схеме устройства, введены допущения, используемые при разработке математической модели, приведено описание поэтапной походки робота, которая характеризуется противофазными движениями боковых звеньев относительно центрального в горизонтальной плоскости и синфазными - в вертикальной. а также разработана математическая модель движения объекта. Приведено описание прототипа ползающего робота, представлен сравнительный анализ результатов натурных экспериментов и данных, полученных в ходе численного моделирования, установлено влияние на среднюю скорость движения робота коэффициента трения между опорами центрального звена и поверхностью.

Ключевые слова: *трехзвеновый ползающий робот, фрикционные опоры, управление коэффициентом трения, этапы движения, экспериментальный стенд.*

Введение. В настоящее время интенсивно растёт число роботов, разрабатываемых на основе принципов движения живых организмов. Подобные устройства доказали свою эффективность в разнообразных условиях эксплуатации. Одним из распространенных типов таких устройств являются ползающие роботы, чаще всего состоящие из нескольких звеньев и соединяющих их шарниров, в которых размещены приводы. Такая конструкция позволяет звеньям совершать движения относительно друг друга, реализуя различные варианты походки, в том числе имитирующие перемещение гусениц, червей и змей, перемещаться как по поверхностям, так и внутри труб.

Остановимся на более детальном рассмотрении некоторых работ, посвященных многозвеновым ползающим роботам. В [1] рассматривается червеподобный робот, состоящий из пяти одинаковых модулей и одного головного, оснащенного видеокамерой, предназначенный для перемещения по горизонтальным и вертикальным трубопроводам, а также обладающий способностью преодолевать соединения труб между собой. Работа [2] посвящена разработке алгоритма движения ползающего змееподобного робота по поверхности с препятствиями, за счет большого

числа звеньев, соединенных между собой шарнирами, траектория перемещения робота плавная. Другой змееподобный робот представлен в [3], данное устройство выполнено в виде последовательно соединенных между собой шарнирами параллельных механизмов, оснащенных рычагами, позволяющими секциям упираться в стенки труб и продвигаться вперед, проведенные исследования показали высокую проходимость робота в местах стыка труб. Робот-змея для перемещения по кабелям и мониторинга их состояния описан в [4], робот состоит из одинаковых секций, число которых можно изменять в зависимости от длины кабеля. Работы [5–7] посвящены разработке систем управления ползающими многозвеновыми роботами, причем в [5] рассматривается робот-змея, а в [6, 7] – робот-гусеница. В статье [8] внимание уделено вопросам управляемого движения плоских многозвеновых механизмов по горизонтальной плоскости при наличии сил сухого трения. Исследования движения трехзвенового робота в среде с сопротивлением описаны в [9–11]. Так в [9] представлено решение задачи оптимального перемещения центрального звена робота между двумя заданными положениями на плоскости, в [10] определены законы управления перемещением звеньев, обеспечивающие максимальную среднюю скорость робота.

Несмотря на большое число работ, посвященных ползающим роботам, большинство из них являются теоретическими, в них слабое внимание уделено разработке систем управления движением таких устройств, учитывающих особенности динамики роботов, обусловленные их конструкцией и взаимодействием с опорной поверхностью. Также необходимо отметить, что практически не рассмотрены механизмы и соответствующие им математические модели, позволяющие управлять силой трения между контактными элементами роботов и поверхностью, что позволило бы увеличить скорость перемещения механизмов за счет периодической фиксации одних звеньев и движения относительно них других звеньев.

В предыдущих работах авторов статьи рассматривается движение трех- и пятизвенного роботов, способных перемещаться по шероховатой поверхности за счет сил трения, управление которыми осуществляется посредством конструктивных особенностей устройства. Так в [12, 13] описан оригинальный способ перемещения трехзвенного робота по горизонтальной плоскости: при взаимодействии опор контактными элементами с большим коэффициентом трения основ-

ное звено неподвижно, а с малым коэффициентом – перемещается по поверхности. Рассмотренный в [14, 15] робот представляет собой цепочку из пяти звеньев и оснащен четырьмя опорными элементами, два из которых установлены на крайних звеньях, а два других расположены на центральном звене и являются управляемыми фрикционными элементами, обеспечивающими периодическую фиксацию звеньев на поверхности. Данная работа посвящена исследованию особенностей движения трехзвенного ползающего робота с управляемыми силами трения в опорах по поверхности с сухим трением. В статье наряду с описанием математической модели и результатами численного моделирования приводятся графики экспериментальных исследований прототипа устройства, выполнен анализ полученных зависимостей.

Описание конструкции робота. Рассматриваемый ползающий робот представлен тремя звеньями, соединенными между собой посредством двухкоординатных активных шарниров (рис. 1). На рис. 1 обозначены следующие позиции: 1 – боковые звенья робота, 2 – центральное звено, 3 – двухкоординатные шарниры, 4 – опоры звеньев, 5 – микроконтроллер системы управления, 6 – элементы питания.

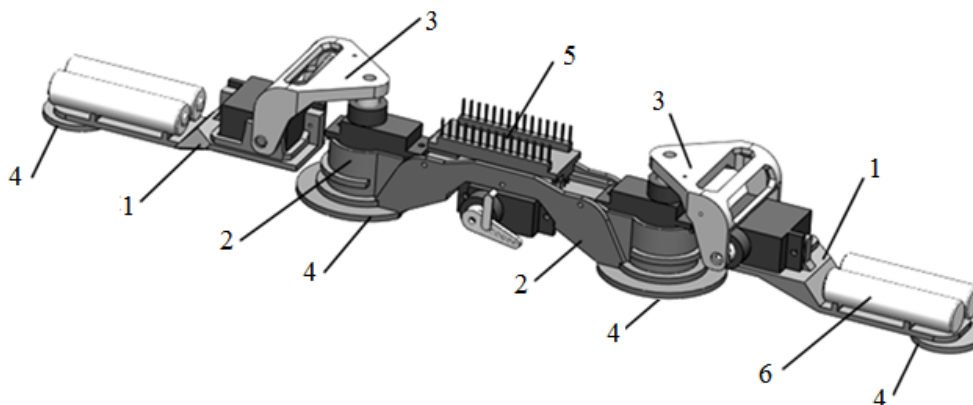


Рис. 1. Ползающий трехзвенный робот

Двухкоординатный шарнир (рис. 2) позволяет осуществлять смещение боковых звеньев как в горизонтальной, так и в вертикальных плос-

костях, что обеспечивает изменение конфигурации устройства в зависимости от используемого режима перемещения.

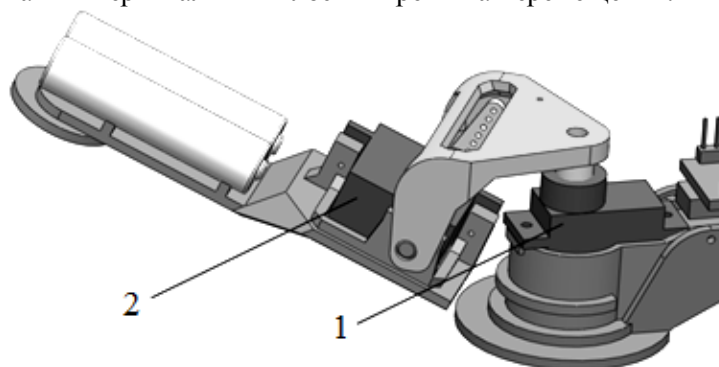


Рис. 2. Двухкоординатный шарнир: 1 – привод поворота звена в горизонтальной плоскости, 2 – привод поворота звена в вертикальной плоскости

Подъем и опускание боковых звеньев позволяет скомпенсировать неровность поверхности, а также управлять величиной нормальной реакции, распределяя необходимым образом массу на опорных точках. Смещения звеньев в горизонтальной плоскости позволяют реализовывать продольные, поперечные, а также смешанные походки. Робот оснащен системой управления, реализующей различные алгоритмы движения устройства.

Важной конструктивной особенностью робота является то, что на каждом звене установлены фрикционные опоры 4 (рис.1), посредством которых робот взаимодействует с поверхностью. Однако, опоры центрального звена могут изменять свои свойства с помощью механизма, показанного на рис. 3.

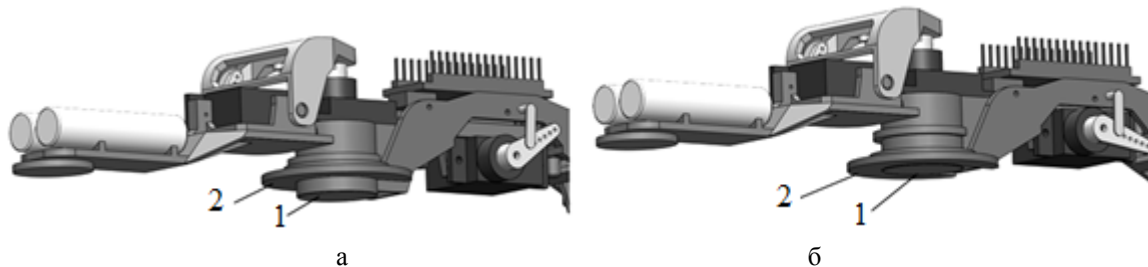


Рис. 3. Опора центрального звена:

а – контакт с поверхностью осуществляется стационарной опорой 1,
б – контакт осуществляется дополнительной опорной поверхностью 2

Как видно из рис. 3, центральное звено оснащено электроприводом, перемещающим дополнительный опорный элемент 2, поверхность которого выполнена из материала, обеспечивающего более высокий коэффициент трения опоры по поверхности.

Математическая модель робота. Перейдем от конструкции робота к его расчетной схеме (рис. 4). Будем рассматривать движение робота в пространственной системе координат $Oxyz$. Все звенья робота будем считать абсолютно твердыми телами $i=1-3$ в виде стержней O_iO_{i+1} длинами l_i и массами m_i , центры масс которых совпадают с центрами их симметрии C_i . С центром

масс звена 2 свяжем относительную систему координат $C_2x_2y_2z_2$, ось C_2x_2 которой направлена вдоль звена. Будем считать, что двухкоординатные шарниры с соответствующими приводами 4-7 располагаются в точках O_2 и O_3 , а опоры 8, 9 – в крайних точках звеньев – O_1-O_4 , причем высоту опорных элементов положим настолько малой, что ею можно пренебречь. Будем рассматривать такой способ перемещения робота, при котором звено 2 никогда не будет отрываться от поверхности, т.е. плоскости Oxy и $C_2x_2y_2$ совпадают, а сама поверхность является горизонтальной.

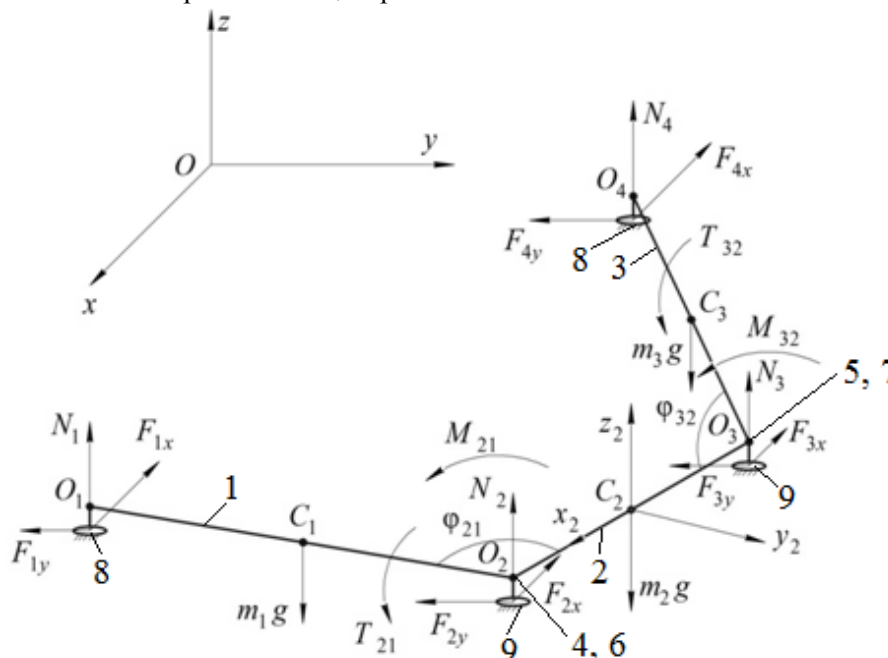


Рис. 4. Расчетная схема ползающего робота

Приводы 4 и 5 обеспечивают поворот звеньев 1 и 3 относительно звена 2 в горизонтальной плоскости на углы φ_{21} и φ_{32} , определяемые по формулам

$$\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \varphi_{32} = \varphi_3 - \varphi_2, \quad (1)$$

где φ_i – абсолютные углы поворота звеньев, отсчитываемые от положительного направления оси Ox против часовой стрелки.

Приводы 6 и 7 позволяют звеньям 1 и 3 отрываться от поверхности за счет поворотов на относительные углы θ_{21} и θ_{32} :

$$\theta_{21} = \theta_2 - \theta_1 = -\theta_1, \quad \theta_{32} = \theta_3 - \theta_2 = \theta_3, \quad (2)$$

где θ_i – абсолютные углы поворота звеньев, отсчитываемые в вертикальных плоскостях против часовой стрелки. Т.к. звено 2 не отрывается от поверхности, то $\theta_2 = 0$.

Повороты звеньев происходят под действием моментов, создаваемых соответствующими приводами: на углы φ_i за счет моментов M_{21} и M_{32} , на углы θ_i – за счет моментов T_{21} и T_{32} .

Контакт крайних звеньев с опорной поверхностью осуществляется опорами 8, расположенными в точках O_1 и O_4 , а звена 2 – опорами 9 в точках O_2 и O_3 . В опорных точках O_1 - O_4 при их контакте с поверхностью возникают нормальные реакции N_j и силы трения F_j , описываемые моделью сухого Кулонова трения

$$F_j = \begin{cases} -f_j N_j \operatorname{sgn}(v_{O_j}), & \text{если } v_{O_j} \neq 0, \\ -F_{0j}, & \text{если } |F_{0j}| \leq f_j N_j, \\ -f_j N_j \operatorname{sgn}(F_{0j}), & \text{если } |F_{0j}| > f_j N_j, \end{cases} \quad (3)$$

где F_{0j} – сила трения покоя в точке O_j , f_j – коэффициент трения скольжения, v_{O_j} – абсолютная скорость опоры в точке O_j .

Причем коэффициент трения в опорах 9 звена 2 является управляемым и может принимать два значения f_{\min} и f_{\max} , при первом из этих коэффициентов звено 2 может двигаться по поверхности, при втором данное звено считаем неподвижным:

$$x_{C2}, y_{C2} = \begin{cases} x_{C2}(t), y_{C2}(t), & \text{если } f_{2,3} = f_{\min}, \\ \text{const}, & \text{если } f_{2,3} = f_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где x_{C2}, y_{C2} – координаты центра масс звена 2.

Для описания движения робота по поверхности будем использовать следующий вектор обобщенных координат:

$$\mathbf{q} = (x_{C2} \quad y_{C2} \quad \varphi_2 \quad \varphi_1 \quad \varphi_3 \quad \theta_1 \quad \theta_3)^T. \quad (5)$$

В работе будем рассматривать походку робота, при которой звенья 1 и 3 всегда перемещаются синхронно относительно звена 2 и периодически отрываются от поверхности. Данная походка является поэтапной и состоит из четырех этапов. В качестве начального положения будем рассматривать показанное на рис. 2, в нем относительные углы звеньев равны $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{01}$, $\theta_{21} = \theta_{32} = 0$, где φ_{01} – начальное значение соответствующих относительных углов для первого этапа движения.

Первый этап заключается в синхронном повороте звеньев 1 и 3 в противофазах относительно звена 2 в горизонтальной плоскости до тех пор, пока не будет выполняться условие: $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{02}$, где $\varphi_{02} = 2\pi - \varphi_{01}$ – конечное значение соответствующих относительных углов для первого этапа движения. На данном этапе звено 2 подвижно и перемещается в требуемом направлении параллельно самому себе. На втором этапе звенья 1 и 3 отрываются от поверхности и поворачиваются на углы $\theta_{21} = \theta_{32} = \theta_0$, где θ_0 – конечные для второго этапа значения соответствующих относительных углов. Звено 2 при этом неподвижно. Во время третьего этапа звенья 1 и 3 поворачиваются относительно неподвижно расположенного на поверхности звена 2 до достижения углов $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{01}$. Четвертый этап характеризуется опусканием звеньев 1 и 3 на поверхность, т.е. до справедливости условия $\theta_{21} = \theta_{32} = 0$, звено 2 при этом остается неподвижным.

Для удобства описания данной походки в таблице 1 для каждого этапа движения приведены накладываемые на робота связи, обобщенные координаты, условия завершения этапов, а также значения управляемого коэффициента трения.

Значения нормальных реакций и сил трения на каждом из этапов сведены в таблицу 2.

Система дифференциальных уравнений, описывающая движение робота по поверхности, может быть представлена в матричном виде

$$A\ddot{\mathbf{q}} + B\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}, \quad (6)$$

где A – матрица коэффициентов при ускорениях, B – матрица коэффициентов при квадратах скоростей, D – диагональная матрица скоростей, F – матрица обобщенных сил, представленные ниже

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}^{(1)} & 0 & a_{13}^{(1)} & a_{14}^{(1)} & a_{15}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22}^{(1)} & a_{23}^{(1)} & a_{24}^{(1)} & a_{25}^{(1)} & 0 & 0 \\ a_{31}^{(1)} & a_{32}^{(1)} & a_{33}^{(1)} & a_{34}^{(1)} & a_{35}^{(1)} & 0 & 0 \\ a_{41}^{(1)} & a_{42}^{(1)} & a_{43}^{(1)} & a_{44}^{(1,3)} & a_{45}^{(1)} & 0 & 0 \\ a_{51}^{(1)} & a_{52}^{(1)} & a_{53}^{(1)} & a_{54}^{(1)} & a_{55}^{(1,3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66}^{(2,4)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{77}^{(2,4)} \end{pmatrix}, (7)$$

$$F = \begin{pmatrix} F_{11}^{(1)} \\ F_{21}^{(1)} \\ F_{31}^{(1)} \\ F_{41}^{(1,3)} \\ F_{51}^{(1,3)} \\ F_{61}^{(2,4)} \\ F_{71}^{(2,4)} \end{pmatrix}. (9)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & ba_{13}^{(1)} & b_{14}^{(1)} & b_{15}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{23}^{(1)} & b_{24}^{(1)} & b_{25}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{34}^{(1)} & b_{35}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{43}^{(1)} & 0 & b_{45}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{53}^{(1)} & b_{54}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, (8)$$

В формулах (7) – (9) верхний индекс в скобках означает номер этапа, которому соответствует коэффициент.

Таблица 1

Поэтапное описание походки робота

| Этап | Связи | Обобщенные координаты | Условие завершения этапа | Коэффициент трения |
|--------|--|---|--|----------------------|
| Этап 1 | $\theta_{21} = \theta_{32} = 0$ | $x_{C2}, y_{C2}, \varphi_2, \varphi_1, \varphi_3$ | $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{02}$ | $f_{2,3} = f_{\min}$ |
| Этап 2 | $x_{C2} = \text{const}$ $y_{C2} = \text{const}$ $\varphi_2 = \text{const}$ $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{02}$ | θ_1, θ_3 | $\theta_{21} = \theta_{32} = \theta_0$ | $f_{2,3} = f_{\max}$ |
| Этап 3 | $x_{C2} = \text{const}$ $y_{C2} = \text{const}$ $\varphi_3 = \text{const}$ $\theta_{21} = \theta_{32} = \theta_0$ | φ_1, φ_3 | $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{01}$ | $f_{2,3} = f_{\max}$ |
| Этап 4 | $x_{C2} = \text{const}$ $y_{C2} = \text{const}$ $\varphi_2 = \text{const}$ $\varphi_{21} = \varphi_{32} = \varphi_{01}$ | θ_1, θ_3 | $\theta_{21} = \theta_{32} = 0$ | $f_{2,3} = f_{\max}$ |

Таблица 2

Значения нормальных реакций и сил трения

| Этап | Контактные точки | Нормальные реакции | Силы трения |
|---------------------|----------------------|--|---|
| Начальное положение | K_1, K_2, K_3, K_4 | $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^3 m_i g$ | $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 0$ |
| Этап 1 | K_1, K_2, K_3, K_4 | | $F_{1-4} = -f_{1-4} N_{1-4} \text{sgn}(v_{O1-4})$ |
| Этап 2 | K_2, K_3 | $N_2 = N_3 = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 m_i g + \sum_{i=1,3} m_i \ddot{z}_{Ci} \right)$ | $F_{2x} = F_{3x} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1,3} m_i \ddot{x}_{Ci}$ |
| Этап 3 | K_2, K_3 | $N_2 = N_3 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 m_i g$ | $F_{2y} = F_{3y} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1,3} m_i \ddot{y}_{Ci}$ |
| Этап 4 | K_2, K_3 | $N_2 = N_3 = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 m_i g + \sum_{i=1,3} m_i \ddot{z}_{Ci} \right)$ | |

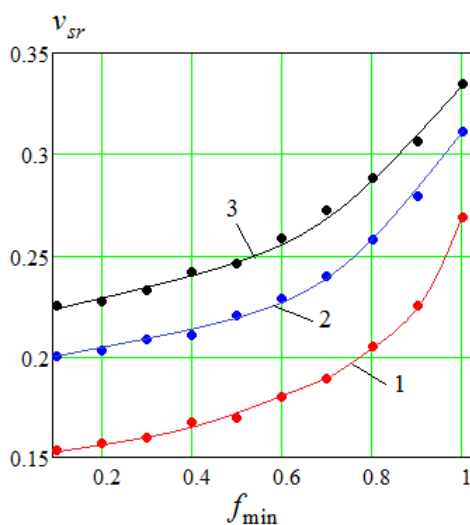
Результаты математического моделирования. В данном разделе представлены результаты численного моделирования описанной выше походки робота по горизонтальной шероховатой поверхности. Целью проводимого исследования является выявление влияния коэффициента трения между опорами робота и поверхностью на первом этапе движения f_{\min} на среднюю скорость перемещения устройства. Под этой скоростью будем понимать следующую величину

$$v_{sr} = \frac{\sum_{k=1}^N v_C}{N}, \quad (10)$$

где v_C – значение скорости центра масс робота в текущий момент времени моделирования t_k , $k \in [1, N]$, $k=1$ соответствует моменту начала первого этапа движения робота, $k=N$ – времени завершения четвертого этапа.

Текущее значение скорости центра масс робота (точки C) высчитывается по формуле

$$v_C = \sqrt{\dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2}, \quad (11)$$



а

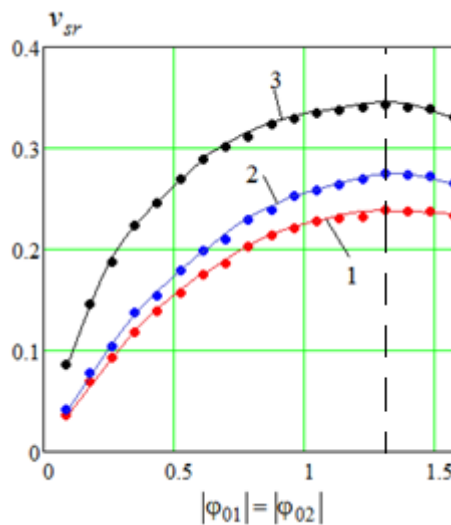
где \dot{x}_C, \dot{y}_C – проекции скорости точки C на координатные оси Ox и Oy , а ее координаты равны

$$x_C = \frac{x_{C1}m_1 + x_{C2}m_2 + x_{C3}m_3}{m_1 + m_2 + m_3},$$

$$y_C = \frac{y_{C1}m_1 + y_{C2}m_2 + y_{C3}m_3}{m_1 + m_2 + m_3}. \quad (12)$$

Моделируемый робот обладает следующими параметрами: массы звеньев $m_1 = m_3 = 0.045$ кг, $m_2 = 0.07$ кг, длины звеньев $l_1 = l_3 = 0.108$ м, $l_2 = 0.1$ м, моменты приводов $M_{21} = M_{32} = T_{21} = T_{32} = 0.03$ Нм, углы поворота звеньев $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = 5^\circ - 90^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$, коэффициент трения $f_{\min} = 0.1 - 1$.

На рис. 5, а представлена зависимость средней скорости движения робота от значения коэффициента трения. По графикам видно, что по мере увеличения f_{\min} средняя скорость возрастает по закону, близкому к параболическому, что обусловлено меньшим "откатом" звеньев 1 и 3 во время первого этапа и большим расстоянием, преодолеваемым звеном 2 на этом же этапе.



б

Рис. 5. а – Графики зависимостей $v_{sr}(f_{\min})$:

$$1 - |\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/6, 2 - |\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/4, 3 - |\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/3;$$

$$\text{б} - \text{Графики зависимостей } v_{sr}(|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}|) : 1 - f_{\min} = 0.2, 2 - f_{\min} = 0.6, 3 - f_{\min} = 1$$

Рис. 5, б иллюстрирует зависимости средней скорости робота от диапазона поворота звеньев 1 и 3 в горизонтальной плоскости. По представленным на нем графикам видно, что при $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| < 75^\circ$ средняя скорость устройства возрастает по криволинейному закону, выпуклость которого направлена вверх, при $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = 75^\circ$ наблюдается ее наибольшее

значение, а при $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| > 75^\circ$ – уменьшение v_{sr} .

Описание прототипа робота, результаты экспериментальных исследований. С целью проведения экспериментальных исследований был изготовлен прототип ползающего робота (рис. 6).

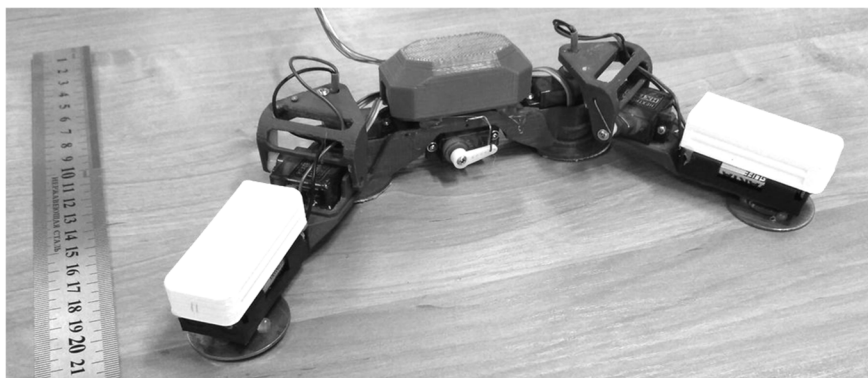
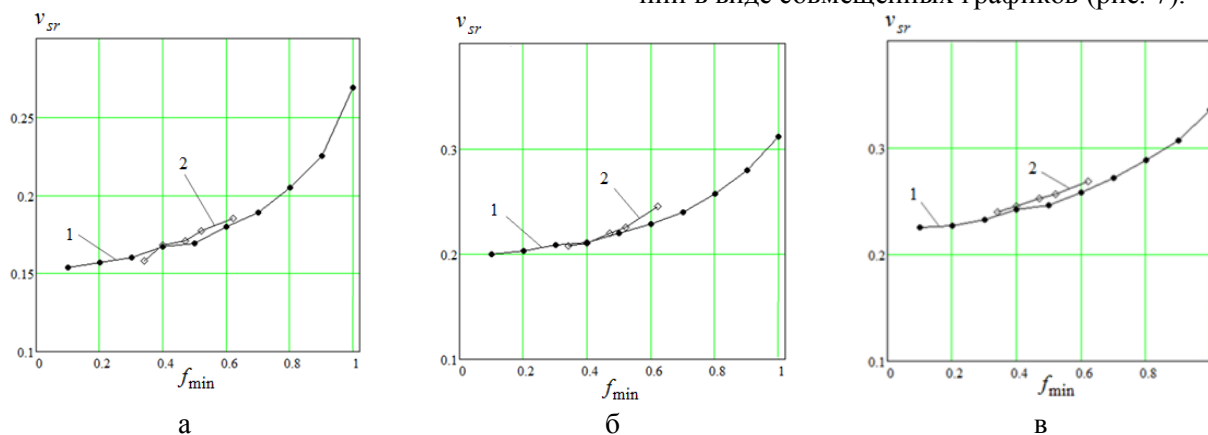


Рис. 6. Внешний вид прототипа ползающего робота

В прототипе робота используются поворотные сервоприводы Hextronik HXT900. Корпусные детали выполнены из ударопрочной технической термопластической пластмассы на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном истиролом. Использование данного полимера позволяет уменьшить массу звеньев при обеспечении необходимой жесткости конструкции. На опоры робота нанесено абразивное покрытие для обеспечения максимального сцепления с опорной поверхностью. Система автоматического управления построена на базе 8-битного микроконтроллера ATmega328. В качестве источника питания используются щелочные батарейки тип ААА.

На данном прототипе были проведены экспериментальные исследования движения робота по различным поверхностям. Коэффициенты силы трения опорных поверхностей определялись экспериментально методом наклонной плоскости.

Суть экспериментов заключается в определении средней скорости робота при движении по различным поверхностям, при этом в качестве исходных параметров так же как и при математическом моделировании, использовалась амплитуда движений боковых звеньев. Таким образом, корректным является представление результатов теоретических и экспериментальных исследований в виде совмещенных графиков (рис. 7).

Рис. 7. Графики зависимостей $v_{sr}(f_{\min})$:

1 – результаты математического моделирования, 2 – результаты экспериментальных исследований,
 а – $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/6$, б – $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/4$, в – $|\varphi_{01}| = |\varphi_{02}| = \pi/3$

Как видно из совмещенных графиков на рис. 7, результаты математического моделирования подтверждаются данными экспериментов. Незначительные отличия могут быть объяснены погрешностью экспериментального измерения коэффициентов трения, а также неоднородностью поверхности. Однако, наклон кривой результатов экспериментов и измеренные значения могут говорить об адекватности разработанной математической модели и о возможности ее применения для последующего анализа функционирования

ползающего трехзвенного робота с двухкоординатными шарнирами.

Выводы. В данной работе описана конструкция трехзвенного ползающего робота, оснащенного двухкоординатными активными шарнирами и фрикционными опорами, позволяющими устройству перемещаться по шероховатой поверхности. Предложен оригинальный метод моделирования, характеризующийся поочередной

сменой этапов движения, получены дифференциальные уравнения, описывающие движение устройства на каждом из этапов.

Для проверки адекватности предложенной походки робота и ее математической модели были проведены натурные испытания с прототипом устройства. Сравнительный анализ характеристик движения при различных параметрах системы показал соответствие результатов численного моделирования и натурных испытаний, что свидетельствует о высоком качестве разработанной математической модели и позволяет использовать ее при дальнейших исследованиях движения робота, а также для проектирования прототипов устройства с требуемыми параметрами движения.

Источник финансирования. РФФИ (проект № 17-51-12025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tanaka T., Harigaya K., Nakamura T. Development of a Peristaltic Crawling Robot for Long-Distance Inspection of Sewer Pipes // 2014 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Besacon, France. 2014.
2. Conkur E. S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm For Snake-Like Robots // Information Technology And Control. 2008. Vol. 37. №. 2. P. 159–162.
3. Lounis D., Spinello D., Gueaieb W., Sarfraz H. Planar Kinematics Analysis of a Snake-Like Robot // Robotica. 2014. V. 32. №. 5. P. 659-675.
4. Wu W., Jun X. Y., Wei H. L., Ri S. M., Chun X. C., Zhen Y. H., Zhong L. Structure Design of Climbing Snake-Like Robot for Detection of Cable-Stayed Bridge // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 598. P. 610-618.
5. Matsuo T., Ishii K. Adaptative Motion Control System of a Snake-Like Robot Using a Neural Oscillator Network // 2014 Joint 7th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th Int. Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), Kitakyushu, Japan. 2014.
6. Li G., Li W., Zhang J., Zhang H. Analysis and Design of Asymmetric Oscillation for Caterpillar-Like Locomotion // J. of Bionic Engineering. 2015. Vol. 12. №. 2. P. 190–203.
7. Li G., Zhang H., Zhang J., Bye R. T. Development of Adaptive Locomotion of a Caterpillar-Like Robot Based on a Sensory Feedback CPG Model // Advanced Robotics. 2014. Vol. 28. № 6. P. 389–401.
8. Башкиров С. А. Алгоритмы управления движением и моделирование динамики многозвенных механизмов, передвигающихся по принципу бегущей волны // Изв. РАН. ТиСУ. 2007. № 1. С. 168–172.
9. Борисенко И.Н., Фигурин Т.Ю., Черноусько Ф.Л. О квазистатических движениях системы трех тел на плоскости // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78. № 3. С. 316–327.
10. Черноусько Ф.Л. Оптимальное управление движением многозвенной системы в среде с сопротивлением // Прикладная математика и механика. 2012. Т. 76. № 3. С. 355-373.
11. Черноусько Ф.Л. Оптимальное перемещение многозвенной системы в среде с сопротивлением // Труды института математики и механики УрО РАН. 2011. Т. 17. № 2. С. 240-255.
12. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Savin S., Malchikov A. Bio-inspired adaptive control strategy for a snake-like robot // 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cheile Gradistei, Romania. 2015. P. 273-278.
13. Ворочаева Л.Ю., Наумов Г.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения трехзвенного робота с управляемыми силами трения по горизонтальной шероховатой поверхности // Известия РАН. ТиСУ. 2015. № 1. С. 156–170.
14. Jatsun S.F., Vorochaeva L., Yatsun A., Malchikov A. Theoretical and experimental studies of transverse dimensional gait of five-link mobile robot on rough surface // 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), Sharjah, United Arab Emirates. 2015. P. 1–6.
15. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Izv. RAN. TiSU. 2017. № 3. С. 191–216.

Информация об авторах

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, заведующий кафедрой механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: teormeh@inbox.ru

Юго-Западный государственный университет.

Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Ворочаева Людмила Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: mila180888@yandex.ru

Юго-Западный государственный университет.

Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Мальчиков Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: zveroknnp@gmail.com

Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Политов Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

E-mail: politovyevgeny@rambler.ru

Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Поступила в мае 2018 г.

© Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Политов Е.Н., 2018

S.F. Jatsun, L.Yu. Vorochaeva, A.V. Malchikov, E.N. Politov
THE STUDY OF THE MOTION OF THREE-LINK ROBOT WITH TWO-AXIS JOINTS
ON A ROUGH SURFACE

The paper presents the construction of a three-link crawling robot with two-axis joints of links, allowing the device to move on a rough surface by changing the form of the body, as well as by controlling the friction coefficient with the supports of the central link. The transition to the settlement scheme of the device imposed by the assumptions used in developing the mathematical model, describes the step-by-step gait of the robot, which step is characterized by anti-phase movements of the side links relative to the central in the horizontal plane and inphase movements in the vertical plane, and also developed a mathematical model of the motion of the object. The description of the prototype crawling robot is reduced, a comparative analysis of the results of experiments and numerical simulation data is obtained, the influence on the average speed of the robot friction coefficient between the supports of the central link and the surface is discovered.

Keywords: *three-link crawling robot, friction support, control of coefficient of friction, motion steps, experimental stand.*

REFERENCES

1. Tanaka T., Harigaya K., Nakamura T. Development of a Peristaltic Crawling Robot for Long-Distance Inspection of Sewer Pipes. 2014 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Besacon, France. 2014.
2. Conkur E.S., Gurbuz R. Path Planning Algorithm For Snake-Like Robots. Information Technology And Control, 2008, vol. 37, no. 2, pp. 159–162.
3. Lounis D., Spinello D., Gueaieb W., Sarfraz H. Planar Kinematics Analysis of a Snake-Like Robot. Robotica, 2014, vol. 32, no. 5, pp. 659–675.
4. Wu W., Jun X.Y., Wei H. L., Ri S. M., Chun X. C., Zhen Y. H., Zhong L. Structure Design of Climbing Snake-Like Robot for Detection of Cable-Stayed Bridge. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 598, pp. 610–618.
5. Matsuo T., Ishii K. Adaptive Motion Control System of a Snake-Like Robot Using a Neural Oscillator Network. 2014 Joint 7th Int. Conf. on Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 15th Int. Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), Kitakyushu, Japan. 2014.
6. Li G., Li W., Zhang J., Zhang H. Analysis and Design of Asymmetric Oscillation for Caterpillar-Like Locomotion. J. of Bionic Engineering, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 190–203.
7. Li G., Zhang H., Zhang J., Bye R. T. Development of Adaptive Locomotion of a Caterpillar-Like Robot Based on a Sensory Feedback CPG Model. Advanced Robotics, 2014, vol. 28, no. 6, pp. 389–401.
8. Bashkirov S.A. motion control Algorithms and simulation of the dynamics of many-segment mechanisms, moving on the principle of a traveling wave. Izv. RAN. TiSU. 2007, no. 1, pp. 168–172.
9. Borisenko I.N., Figurina T.Yu., Chernousko F.L. On quasi-static motions of a system of three bodies in the plane. Journal of Applied mathematics and mechanics, 2014, vol. 78, no. 3, pp. 316–327.
10. Chernousko F.L. Optimal motion control of a multi-link system in a medium with resistance. Applied mathematics and mechanics, 2012, vol. 76, no. 3, pp. 355–373.
11. Chernousko F. L. Optimal movement of a multi-link system in a medium with resistance. Proceedings of the Institute of mathematics and mechanics of Uro RAS, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 240–255.
12. Jatsun S., Vorochaeva L., Yatsun A., Savin S., Malchikov A. Bio-inspired adaptive control strategy for a snake-like robot. 19th International Conference on system Theory, Control and Computing (IC-STCC), Cheile Gradistei, Romania. 2015, pp. 273–278.

13. Vorochevo L.Yu., Naumov G.S., Yatsun S.F. modeling of the motion of three-link robot with operated friction forces on the horizontal rough surface. *Izv. RAN. TiSU*, 2015, no. 1, pp. 156–170.

14. Jatsun S.F., Vorochaeva L., Yatsun A., Malchikov A. Theoretical and experimental studies of transverse dimensional gait of five-link mobile robot

on rough surface. 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA), Sharjah, United Arab Emirates, 2015, pp. 1–6.

15. Voropaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Simulation of five-link crawling robot motion with controlled friction on the surface with obstacles. *Izv. RAN. TiSU*, 2017, no. 3, pp. 191–216.

Information about the author

Sergey F. Jatsun, DSc, Professor.

E-mail: teormeh@inbox.ru

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Lyudmila Y. Vorochaeva, PhD, Assistant professor.

E-mail: mila180888@yandex.ru

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Andrey V. Malchikov, PhD, Assistant professor.

E-mail: zveroknnp@gmail.com

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Yevgeniy N. Politov, PhD, Assistant professor.

E-mail: politovyevgeny@rambler.ru

South-West State University.

Russia, 305040, Kursk, st. 50 let Oktyabrya, 94.

Received in May 2018

Для цитирования:

Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В., Политов Е.Н. Исследование процесса движения трехзвенного робота с двухкоординатными шарнирами по шероховатой поверхности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №7. С. 86–95. DOI: 10.12737/article_5b4f02c028e513.07525318.

For citation:

Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V., Politov E.N. The study of the motion of three-link robot with two-axis joints on a rough surface. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2018, no.7, pp. 86–95. DOI: 10.12737/article_5b4f02c028e513.07525318.