УДК 62-503.5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЫЖКА ЧЕТЫРЕХЗВЕННОГО РОБОТА

Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Серебровский В.В., Волкова Л.Ю.

ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», Курск, e-mail: teormeh@inbox.ru

В статье представлена расчетная схема четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности, соединения звеньев которого представляют собой две пары вращательного движения и одну пару поступательного движения. Вращательные пары используются для позиционирования объекта перед отрывом от поверхности, а поступательная пара выступает в роли разгонного модуля. Для исследуемого объек разработана математическая модель и предложен алгоритм моделирования прыжка. В работе рассматрив ется реализация объектом прыжка, при которой во время позиционирования перед прыжком устр йствс взаимодействует с поверхностью корпусом, во время разгона на поверхности находится звено и риземление и позиционирование после приземления происходит при взаимодействии корпуса с по стью. В соответствии с разработанной последовательностью этапов прыжка осуществлено тестиро алгорит ма и программы моделирования, получены закономерности перемещения устройства в зав сти от с соба втягивания звеньев ноги во время этапа полета.

Ключевые слова: прыгающий робот, многозвенный механизм, этапы прыжка, позиционирование, разгон, полет, приземление

MODELLING OF THE JUMP OF THE FOURLINK ROBOT

Jatsun S.F., Loktionova O.G., Serebrovsky V.V., Volkova L.Y.

South-West State University, Kursk, e-mail: teormeh@inbox.r.

The settlement scheme of the four-link robot moving with a jump from a surface which connections of links represent two couples of rotary motion and one couple of progress motion is presented in article. Rotary couples are used for object positioning before a jump from a surface, and th pr ogress couple is sented the lift-off module. The mathematical model of movement of object is developed, gorithm of mod of a jump of the robot is offered. Realization of a jump of the object at which during positionin bdy of the device interacts before jump with a surface, during lift-off on a surface there is a foot link, the ioning after a landing occurs at and posi body interaction to a surface is considered. According to developed sequence and the modeling program is carried out, regularities of movement of the dev of a jump testing of algorithm pending of a method of retraction of foot links during a flight stage are received.

Keywords: jumping robot, multilink mechanism, stages of the jump, positioning, lift-off, flight, landing

Роботы, перемещающиеся с отрывом от поверхности, являются объектами исследования многих ученых, таких как Б. Браун, Дж. Цеглин, С. Дубовский, П. Фиорини, М. Ковас, Д. Флориано [9–13], и крупных инженерных компаний, включая Бостон Дайиемикс [14]. Исследуемые роботы разнообразны по конструкции, массогабаритным параметрам, высоте и длине реализуемого прыжка. Но их можно классифицировать по ряду признаков: способам иозиционирования до и после отрыва от поверхности, количеству звеньев, типу привода, посредством которого осуществляется разгон до отрыва от поверхности. Среди способов позиционирования до

Среди способов позиционирования до полета наиболее распространенными являются цоворот корпуса робота на колесах или ногах или же изменение угла наклона корпуса к поверхности за счет изменения положения его центра масс, а также поворот разгонного модуля относительно неподвижного корпуса. После приземления прыгающие роботы могут позиционироваться для достижения устойчивого положения, из которого возможна реализация следующего прыжка путем изменения геометрии звеньев устройства или же за счет изменения положения центра масс. Еще одним классификационным признаком прыгающих роботов является количетво входящих в них звеньев. Различают роботов двух-, трех- и четырехзвенных. Для отрыва роботов от поверхности могут использоваться различные приводы: пневматические, гидравлические, с накопителями энергии, работающие на топливно-воздушной смеси, а по виду движения, совершаемого звеньями в момент разгона, различают пары вращательного и поступательного движения.

В данной работе рассматривается четырехзвенный прыгающий робот, разгон которого до отрыва от поверхности осуществляется парой поступательного движения, в качестве привода используется привод с накопителем энергии, причем в момент отрыва от поверхности с последней взаимодействует нога устройства, а при приземлении – корпус. Позиционирование объекта для реализации прыжка с заданными параметрами осуществляется путем поворота разгонного модуля относительно корпуса, позиционирования робота после приземления не требуется, т.к. следующий прыжок устройство может совершить с той из сторон корпуса, на которую произошло приземление. Приведен алгоритм моде-

FUNDAMENTAL RESEARCH №10, 2013

лирования одного прыжка объекта, представлены результаты, полученные численным путем.

Математическая модель прыгающего робота

Будем рассматривать прыгающего робота, состоящего из четырех звеньев 1–4, первое из

которых является стопой, второе и третье образуют ногу, а четвертое представляет собой корпус (рис. 1). На звеньях 2 и 4 установлены приводы, обеспечивающие поворот звеньев 1 и 3 относительно звеньев 2 и 4. На звене 2 также установлен привод, позволяющий звеньям 2 и 3 поступательно перемещаться друг относительно друга [2, 7, 8].



Рис. 1. Расчетная схема четырехзвенного прыгающего робота

Прыжок робота происходит в вертикальной плоскости Oxy с горизонтальной шероховатой поверхности. совпадающей с осью Ox. При разработке математической модели будем считать, что звенья i = 1 3 объекта являются абсолютно твердыми стержнями длинами l_i , а звено 4 – абсолютно твердым прямоугольником $A_1A_2A_3A_4$ размерами $2a \times 2b$. Масса m_i каждого вена сосредоточена в центре его симметрии – точке C_i . Расстояние l_{23} между точками O_2 и C_4 соответствует длине ноги.

Положение центров масс звеньев робота определяется радиусами-векторами

$$= \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}; \tag{1}$$

$$\left. \begin{array}{c} x_1 + l_1 / 2\cos\phi_1 + l_2 / 2\cos\phi_2 \\ y_1 + l_1 / 2\sin\phi_1 + l_2 / 2\sin\phi_2 \end{array} \right\}; \quad (2)$$

$$= \left(\frac{x_1 + l_1/2\cos\phi_1 + (l_{23} - l_3/2)\cos\phi_2}{y_1 + l_1/2\sin\phi_1 + (l_{23} - l_3/2)\sin\phi_2} \right); (3)$$

$$\vec{r}_4 = \begin{pmatrix} x_1 + l_1/2\cos\phi_1 + l_{23}\cos\phi_2\\ y_1 + l_1/2\sin\phi_1 + l_{23}\sin\phi_2 \end{pmatrix}.$$
 (4)

Положение звеньев робота описывается вектором координат [7]

$$q = (x_1 \ y_1 \ x_4 \ y_4 \ \phi_1 \ \phi_2 \ \phi_4 \ l_{23})', \quad (5)$$

где x_1, y_1, x_4, y_4 – координаты центров масс звеньев 1 и 4, ϕ_1, ϕ_2 и ϕ_4 – углы поворота звеньев 1, 2 и 4, l_{23} – длина ноги робота. Углы ϕ_1 и ϕ_2 представляют собой углы между звеньями 1, 2 и положительным направлением оси *Ox*. Угол ϕ_4 представляет собой угол, под которым сторона корпуса A_1A_4 наклонена к горизонтальной оси.

Для записи системы дифференциальных уравнений движения объекта используются уравнения Лагранжа второго рода. Кинетическая энергия системы определяется по формуле

$$T = \sum_{i=1}^{4} T_i,$$
 (6)

где i = 1 - 4 - 3венья робота.

Каждое звено робота совершает плоское движение, поэтому кинетическая энергия *i*-го звена вычисляется следующим образом

$$T_i = m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) / 2 + J_i \dot{\phi}_i^2 / 2, \qquad (7)$$

где $J_{i,i=1...3} = m_i l_i^2 / 12; \quad J_4 = m_4 (a^2 + b^2)$ – центральные моменты инерции звеньев; \dot{x}_i ,

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ №10, 2013

*у*_{*i*} – проекции скорости центра масс *i*-ого звена на оси системы координат; ϕ_i – угловая скорость *i*-го звена.

Система дифференциальных уравнений движения робота может быть записана в матричной форме

$$A(q)\ddot{q} + B(q)\dot{q}^{2} + C(q)\dot{\phi}_{2}\dot{l}_{23} = F, \quad (8)$$

где A(q), B(q), C(q) – матрицы коэффициентов; F – матрица обобщенных сил.

Прыжок устройства состоит из последовательности семи этапов, каждый из которых характеризуется определенным видом движения звеньев [5, 6]. Во время этапов 1-3 происходит позиционирование объекта для совершения прыжка, при этом корпус робота взаимодействует с поверхностью, а разгонный модуль, состоящий из звеньев 1-3, меняет свое положение относительно корпуса для реализации прыжка под требуемым углом к горизонту. Четвертый этап соответствует разгону устройства, во время которого звено 1 находится на поверхности, а звенья 3 и 4 приобретают скорость, достаточную для отрыва робота от поверхности. Этап 5 характеризует движение робота с отрывом от поверхности, при этом наблюдается втягивание звеньев 1 и 2 в корпус, а этапы 6 и 7 – приземление объ екта на корпус и его позиционирование д 0 тех пор, пока одна из сторон корпуса не бу дет лежать на поверхности.

На геометрические размеры звеньев ро-бота наложены ограничения, обусловленные последовательностью этапов движения

 $l_{23}^{\min} + l_1 \le b; \quad l_{23}^{\min}$ $l_3 \le b; \ l_3 \le a; \ l_{23}^0 > 0$ (9)

где ϕ_2^0 угол наклона звена 2, при котором происходит разгон объекта до его отрыва от поверхности.

 $F_{fr} = \begin{cases} -fN \operatorname{sgn}(\dot{x}_K), \\ -F_{0x}, \\ -fN \operatorname{sgn}(F) \end{cases}$

- торизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к звену, которое взаимодействует с поверхностью; f - коэффициент трения скольжения; N – нормальная реакция в опорной точке K; \dot{x}_{K} – скорость точки К вдоль оси Ох.

Будем рассматривать случай, когда модуль возникающей силы трения всегда меньше предельного значения $|F_{0x}| < fN$,

Прыжок исследуемого робота является программно-управляемым, причем управление осуществляется на этапах 1-5, когда происходит позиционирование и разгон устройства для отрыва от поверхности, а также непосредственно полет, этапы 6 и 7, во время которых осуществляется приземление, являются неуправляемыми Управляющими воздействиями являются моменты, формируемые приводами вращательного движения, которые обеспечивают повороты звеньев робота на требуемые углы, а также сила, создаваемая линейным приводом, за счет которой происходит от-носительное перемещение звеньев 2 и 3, В данной работе будем рассматривать случай, когда указанные величины являютс кусочно-постоянными функциями, численные значения которых на каждом из этапов прыжка являются константами.

Модель взаимодействия с поверхностью

При реализации одного прыжка робот взаимодействует с шероховатой поверх-ностью звеном 1 или 4 на одних этапах и перемещается с отрывом от поверхности на других. Будем считать, что при нахож-дении звена 1 или 4 на поверхности возникают распределенные силы трения и нормальной реакции, которые приводятся к центру приведения – точке К, расположение которой на данном этапе исследований не рассматривается. Сила взаимодействия цанной точки с поверхностью может быть описана различными моделями трения: сухое кулоново трение, трение с непрерывно падающей характеристикой (некулоново трение), трение с уменьшенной динамической составляющей [3, 4]. Будем рассматривать случай, когда в точке К при взаимодействии с поверхностью будет возникать сила сухого трения, изменяющаяся по закону [1]:

если
$$\dot{x}_{K} \neq 0;$$

если $\dot{x}_{K} = 0, |F_{0x}| \leq fN;$ (10)
если $\dot{x}_{K} = 0, |F_{0x}| > fN.$

скольжение тела по поверхности отсутствует. Силами вязкого сопротивления в данной работе будем пренебрегать.

Алгоритм моделирования движения робота

Моделирование движения робота проводится по алгоритму, приведенному на рис. 2, 3. Определение этапа прыжка, в котором находится объект, осуществляется

при помощи счетчика *n*. Значение n = 1 соответствует первому этапу, заключающемуся в повороте ноги до достижения угла $\phi_2 = \phi_2^0$. После этого объект переходит во

второй этап при n = 2, на котором стопа робота поворачивается до тех пор, пока не станет параллельной опорной поверхности ($\phi_1 = \phi_1^0 = \pi - для$ прыжка вперед).



ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ №10, 2013



Рис. 3. Алгоритм моделирования одного прыжка робота (конец)

После выполнения указанного условия счетчик увеличивается на единицу n = 3, объект находится в третьем этапе, который заканчивается при достижении стопой опорной поверхности – $y_1 = 0$. Четвертый этап (n = 4), во время которого объект разгоняется, завершается в момент отрыва стопы от поверхности, чему соответствует выполнение условия N = 0, начинается пятый этап (n = 5) движения устройства до тех пор, пока одна из точек корпуса A_j , j = 1-4не начнет взаимодействовать с поверхностью $y_{A_j} = 0$.

При приземлении происходит обнуление скорости точки (точек) контакта с поверхностью, чему соответствует шестой этап движения робота (n = 6), а затем (n = 7) наблюдается движение, которое закончится после того, как одна из сторон корпуса станет взаимодействовать с поверхностью.

Результаты численного моделирования

Преобразуем разработанную математическую модель реализации одного прыжка робота к безразмерному виду, используя масштабные коэффициенты: M = 0,05 кг, T = 0,1 с, L = 0,1 м. Объектом моделирования является прыгающий робот, массы и геометрические размеры звеньев которого равны: $m_1 = 1, m_2 = 1, m_3 = 1, m_4 = 7, a = 1, b = 1, l_1 = 0,5, l_2 = 0,9, l_3 = 0,9$. Начальными условиями моделирования являются следующие: $t = 0, x_4 = a, \dot{x}_4 = 0, y_4 = b, \dot{y}_4 = 0, \phi_4 = 0, \dot{\phi}_4 = 0, \phi_1 = \pi, \dot{\phi}_1 = 0, \phi_2 = \pi/2, \dot{\phi}_2 = 0.$

Для тестирования разработанных алгоритма и программы моделирования прыжка робота был рассмотрен случай, когда во время этапа полета не происходит втягивания звеньев ноги в корпус. Это соответствует движению робота как материальной точки, брошенной под углом к горизонту.



Рис. 4. а, в – траектории движения центра масс корпуса при отсутствии втягивания ноги в полете, полученные программно, при $a - \dot{l}_{23}^0 = 4$, h = 1,5: $1 - \phi_2^0 = \pi/4$, $2 - \phi_2^0 = \pi/3$, $3 - \phi_2^0 = 4\pi/9$, $4 - \phi_2^0 = \pi/2$, $e - \phi_2^0 = \pi/4$, h = 1,5: $1 - \dot{l}_{23}^0 = 3$, $2 - \dot{l}_{23}^0 = 4$, $3 - \dot{l}_{23}^0 = 5$, $6, 2 - 3abucumocmu H(\phi_2^0), L(\phi_2^0), \times \times -$ программные, ООО – аналитические

Вращения корпуса в полете относительно его центра масс не происходит в связи с тем, что разгоняющая сила проходит через точку C_4 . Было проведено сравнение рассчитанных в программе высоты H и длины L прыжка объекта, под которыми понимались наибольшие расстояния вдоль осей Oy и Ox с момента отрыва звена 1 от поверхности до завершения прыжка, с вычисленными аналитическим способом высотой и дальностью полета тела, брошенного под углом к горизонту, результаты которого приведены на рис. 4. На данном и последующих рисунках при-

няты обозначения: ϕ_2^0 – угол наклона ноги к оси Ox, под которым приложена сила, осуществляющая отрыв робота от поверхности, I_{23}^0 – скорость робота в момент начала этапа полета, h – значение ординаты центра масс корпуса робота в момент отрыва последнего от поверхности.

По приведенным графикам видно, что относительная погрешность между значениями высоты и длины прыжка, определенными программно и аналитически, не превышает 0,5%, что свидетельствует о достаточной точности разработанных алгоритма и программы.





Так как при реализации прыжка роботом звенья ноги будут, втягиваться в корпус во время полета, это движение будет оказывать влияние на траекторию центра масс корпуса и на значения высоты и длины прыжка. Рассмотрим два способа втягивания ноги в ролете: с постоянной скоростью \dot{l}_{23}^5 и под действием постоянной силы F_{23}^5 . На рис. 5 приведены траектории движения точки C_4 и зависимости высоты и длины прыжка от значений l_{23}^5 и F_{23}^5 .

По графикам рис. 5, а, в видно, что траектория прыжка робота при равномерном втягивании ноги в корпус имеет вид параболы, выпуклость которой направлена вверх, втягивание ноги под действием силы сильно меняет характер траектории.

Прыжок на наибольшие высоту и длину происходит при отсутствии втягивания ноги в полете, а с увеличением скорости \dot{l}_{23}^5 и силы F_{23}^5 высота и длина прыжка убывают по некоторым криволинейным зависимостям (рис. 5, б, г), причем при постоянной скорости l_{23}^5 кривая убывает достаточно плавно, а при действии силы F_{23}^5 вначале наблюдается резкое падение высоты и длины прыжка, а затем их плавное убывание.

Заключение

В статье рассмотрен четырехзвенный прыгающий робот, состоящий из корпуса, ноги, образованной двумя звеньями, и стопы, прыжок устройства представлен в виде последовательности этапов, характеризующихся определенными видами движений звеньев. Для указанного объекта разработана математическая модель, в соответствии с которой осуществлено численное моделирование прыжка устройства по специальному алгоритму.

В статье приведены результаты движения робота в полете как материальной точки, для этого случая проведено тестирование алгоритма и программы, которое показало высокую сходимость с данными аналитического решения. Выявлено влияние на траекторию движения робота и на значения высоты и длины прыжка скорости втягивания звеньев ноги в полете, а также силы, под действием которой это втягивание осуществляется.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 10-08-00769-а, госконтракта № П699 тема № 1.109.10ф.

Список литературы

1. Динамика управляемых движений вибрационных систем / Н.Н. Болотник, И.М. Зейдис, К. Циммерман и др. // Изв. РАН.ТиСУ. – 2006. – № 5. – С. 157–167.

2. Волкова Л.Ю., Серебровский В.В., Яцун С.Ф. Исследование движения многозвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 1 (40). – Ч. 2. – С. 12–18.

3. Лушников Б.В. Испытательный стенд для идентификации динамических параметров сухого некулонова трения // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – Ч. 3. – С. 238–241.

4. Лушников Б.В. Компьютерное моделирование динамики элемента сухого некулонова трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т.12. – № 1(2). – С. 439–444.

5. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Исследование влияния закона втягивания ноги в полете на высоту и длину прыжка многозвенного робота // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická conference «Moderní vymoženosti vědy – 2013» – Praha, Str. 77–81.

6. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю. Управление высотой и дляной прыжка робота путем его позиционирования и разгона/ Известия ЮЗГУ. Серия Техника и технологии. – 2012. -№ 2. – Ч. 1. – С. 210–213.

 Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Рублев С.Б. Исследование управляемого прыжка многозвенного робоча // Актуальные вопросы технических наук (II): материалы межлунар. заоч науч. конф. – Пермь, 2013. – С. 62–65.

8. Яцун С.Ф., Рукавицын А.Н., Волкова Л.Ю. Исследование динамики управляемого прыжка робота // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1355–1358.

9. Brown, B., Zeglin, G. Control of a bow leg hopping robot // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 1998. – № 1. – P. 793–798.

10. Dubowsky S., Plane JS., Boston P. Low Cost Micro Exploration Robots for Search and Rescue in Rough Terrain // TEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, USA. – 2006. – P. 25–30.

11. Florint P., Hayati S., Heverly M., Gensler J. A Hopping ot for Planetary Exploration // Proc. of IEEE Aerospace f., Snewmass. – 1999 – P. 38–43.

12 Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.C., Floreano D. A miniature jumping robot with self-recovery capabilities // IEEE/RSJ international conference on robotics and automation. – 2009. – P. 583–588.

13. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot // Autonomous Robots. – 2010. – № 28. – P. 295–306.

14. SandFlea – Leaps Small Buildings in a Single Bound Available at: http://www.bostondynamics.com/robot_sandflea. html (accessed 5 July 2012).

References

1. Bolotnik N. N., Zeidis I.M., Zimmerman K. et. al. Dynamics of operated movements of vibration systems // Izv. RAN. TiSU. 2006. no. 5. pp. 157–167.

2. Volkova L.Yu., Serebrovsky V.V., Jatsun S.F. Research of movement of the multilink robot moving with a jump from a surface // Izvestia South-West State University. 2012. no. 1 (40). Part 2. pp. 12–18.

3. Lushnikov B.V. The test bench for identification of dynamic parameters dry nocoulomb friction // Basic researches. 2012. no. 3. Part 3. pp. 238–241.

4. Lushnikov B.V. Computer modeling of dynamics of an element dry nocoulomb friction // Izvestiya Samara scientific centre of Russian Academy of Sciences 2010, Vol. 12 no. 1(2). P. 439–444.

5. Jatsun S.F., Volkova L.Yu. Research of influence of the law of retraction of a leg in flight on height and length of a jump of the multilink robot // Materiály IX mezinárodní vědecko – praktická conference «Moderní vymoženosti vedy – 2013». Praha. 2013/ pp. 77–81.

6. Jatsun S.F., Volkova L.Yu. Control of height and length of a jump of the robot by its positioning and lift-off // Izvestia South-West State University. 2012. no. 2. Part. 1. pp. 210–213.

7 Jatsun S F, Volkova L.Yu., Rublev S.B. Research of an operated jump of the multilink robot // Actual questions of technical science (II): materials international correspondence scientific conference. Perm, **2013**, pp. 62–65.

8. Jatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Yu. Research of dynamics of operated jump of the robot // Izvestiya Samara scientific centre of Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 14. no. 4(5). pp. 1355–1358

9. Brown B., Zeglin, G. Control of a bow leg hopping robot // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1998. no.

10. Dubowsky S., Plante J.S., Boston P. Low Cost Micro Exploration Robots for Search and Rescue in Rough Terrain // IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, USA. 2006. pp. 25–30.

11. Fiorini P., Hayati S., Heverly M., Gensler J. A Hopping Robot for Planetary Exploration // Proc. of IEEE Aerospace Conf., Snowmass. 1999. pp. 38–43.

12. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.C., Floreano, D. A miniature jumping robot with self-recovery capabilities // IEEE/RSJ international conference on robotics and automation, 2009. pp. 583–588.

13. Kovac M., Schlegel M., Zufferey J.-C., Floreano D. Steerable miniature jumping robot // Autonomous Robots. 2010. no. 28. pp. 295–306.

14. SandFlea – Leaps Small Buildings in a Single Bound Available at: http://www.bostondynamics.com/robot_sandflea. html (accessed 5 July 2012).

Рецензенты:

Кобелев Н.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, ЮЗГУ, г. Курск;

Игнатенко Н.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ЮЗГУ, г. Курск.

Работа поступила в редакцию 07.08.2013.