

УДК 004.8; 007.52; 519.713

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДРЕВОВИДНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА РОБОТА-КРАБА

Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

E-mail: swshaytura@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается кинематическая схема исполнительного механизма восьминогого шагающего робота, оснащённого двумя манипуляторами. Предложенный в статье алгоритм выбора древовидных кинематических структур исполнительных механизмов роботов и исследования их динамики, а также программа моделирования в системе MATLAB являются эффективным средством, позволяющим сократить сроки проектирования перспективных образцов шагающих роботов.

Ключевые слова: шагающий робот, древовидный исполнительный механизм, уравнение динамики робота.

THE STUDY OF THE DYNAMICS OF TREE-ACTUATOR ROBOT-CRAB

Kovalchuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V.

MSTU named N.E. Bauman, Moscow, Russia

E-mail: swshaytura@gmail.com

Abstract. The article considers the kinematics of the actuator eight-legged walking robot, equipped with two manipulators. Proposed in the article selection algorithm tree kinematic structures of the actuators of robots and the study of their dynamics, and simulation program in MATLAB system is an effective means by which to reduce the time of designing advanced models of robots.

Keywords: walking robot, a tree-like actuator, the dynamic equation of the robot.

При создании роботов, выполняющих работы в экстремальных условиях, ученые и конструкторы стали уделять большое внимание изучению их биологических прототипов, которым характерны перемещения без сплошной колеи и высокая проходимость в сложных дорожных условиях. Оригинальные кинематические схемы (КС) их скелетов, доведенные до совершенства в ходе биологической эволюции, являются образцом для подражания при создании робототехнических систем, перемещение которых основано на принципе шагания.

Огромное число двуногих шагающих роботов, роботизированных манекенов и экзоскелетов, работающих как в автоматическом, так и в копирующем режимах, создано на основе биологического прототипа скелета человека [1-6].

Изучение кинематической структуры скелета человека, а также животных позволило фирме Boston Dynamics (США) при финансировании (Defense Advanced Research Projects Agency-(DARPA) – Агентство передовых исследовательских проектов

США создать такие шагающие роботы, как Pet Man, Little Dog, Big Dog, Rise и др. Примером роботов нового класса, так называемых морфороботов, может служить робот Sguish Bot, который может изменять свою форму, а так же жесткость и пластичность своего материала по программе, определяемой оператором или условиями перемещения [7].

При разработке исполнительного механизма (ИМ) восьминогого шагающего робота в качестве его биологического прототипа предлагается использовать КС скелета краба. Крабы относятся к типу членистоногих, классу ракообразных. Они обладают плотной оболочкой тела, называемой кутикулой, которая служит им отличной защитой.

Различают два вида крабов обитающие в воде и наземные. Наличие кутикулы, а также удобная КС скелета, способствовало широкому их распространению. У крабов восемь ног и две клешни. Органы зрения имеют вид бусинок на стебельках. Это позволяет крабу устойчиво передвигаться, так как в любой момент времени возможна опора на четыре ноги. При этом, благодаря наличию двух клешней, он может эффективно взаимодействовать с окружающей средой.

Трехмерная модель Робота-краба, кинематическая схема которого соответствует скелету его биологического прототипа, представлена на рисунке 1.

Кинематическая схема ИМ Робота-краба, имеющая древовидную структуру, приведена на рисунке 2.

При выборе этой кинематической схемы ИМ Робота-краба использовался предложенный в работе [8] алгоритм, позволяющий восстановить КС животного по изображениям его скелета.

В статье [9] предложен эффективный метод построения уравнений кинематики и динамики ИМ шагающих роботов с древовидными КС, который основан на совместном использовании матриц (4x4), имеющих широкое применение в робототехнике и теории графов [10-12].

Исполнительный механизм робота представляется в виде древовидного направленного графа. Звенья ИМ являются вершинами графа, а соединяющие их сочленения - дугами.

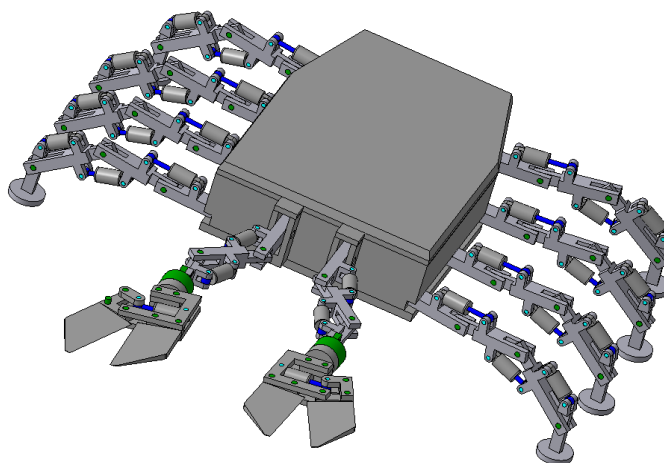


Рис. 1 - Трехмерная модель Робота-краба

За корень дерева (звено с номером «0») принимается окружающее пространство, в котором находится робот. Звенья ИМ робота нумеруются с 1-го и далее по возрастающим номерам, от корня дерева к его листьям без пропусков. При этом должно выполняться условие, что собственный номер звена меньше номера любого звена-потомка. Номер обобщенной координаты ИМ, как и номер соответствующего сочленения, тот же, как и у звена, присоединяемого этим сочленением к предыдущему звену.

Поскольку корпус шагающего робота не закреплен к неподвижному основанию, то общее число степеней его свободы равно $N+6$, где N - число степеней подвижности его ИМ.

Для «привязки» ИМ робота к абсолютной системе координат и описания его движения в пространстве, вводится фиктивная кинематическая цепь, соединяющая корпус робота с неподвижной в абсолютной системе фиктивной стойкой. Эта фиктивная цепь состоит из невесомых звеньев (0 - 5), (три поступательных и три вращательных неуправляемых кинематических пар 5-го класса) и характеризует положение и ориентацию корпуса робота в абсолютной системе координат.

Древовидную кинематическую структуру ИМ робота можно также представить с помощью матрицы достижимости D - квадратной матрицы, каждый элемент которой $d_{ji}=1$, если i -я вершина достижима из вершины j . Размерность матрицы D равна числу звеньев ИМ робота.

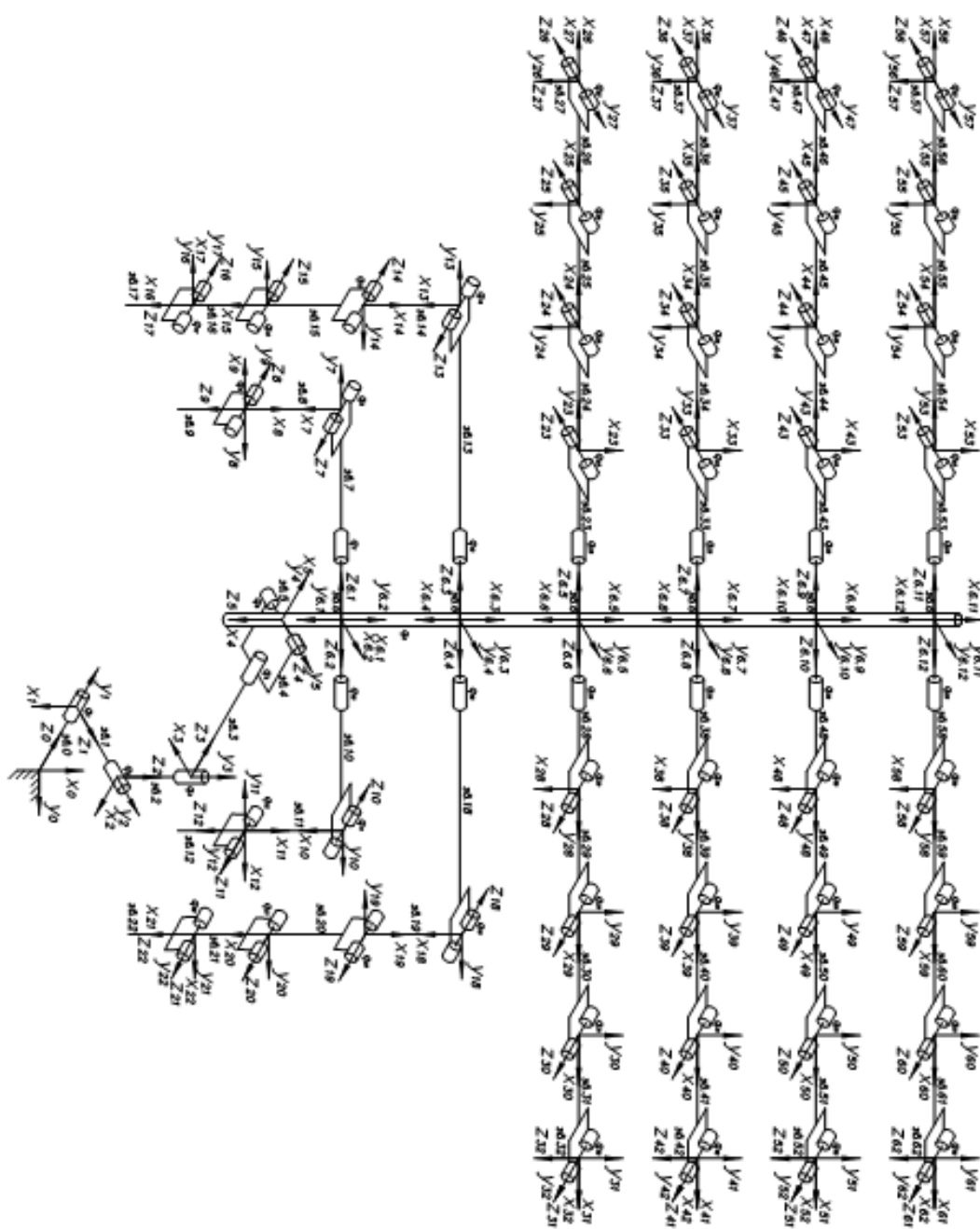


Рис. 2 - Кинематическая схема ИМ Робота-краба

Согласно определению достижимости диагональные элементы матрицы $d_{ji}=1$.

При нумерации звеньев ИМ в соответствии с изложенными выше правилами, матрица достижимости D получается нижней треугольной матрицей.

Таким образом, как матрица достижимости D , так и древовидный граф, представляющий кинематическую структуру робота-краба (Рисунок 3), отражают взаимное расположение и достижимость звеньев его ИМ.

Воспользуемся изложенной в работе [9] методикой и запишем уравнение динамики ИМ робота относительно обобщенных координат в следующем блочно-матричном виде:

$$A(q) \cdot \ddot{q} + B(q, \dot{q}) - C(q) \cdot f_B^0 - H(q) \cdot n_B^0 = \tau, \quad (1)$$

где q - вектор обобщенных координат ИМ;

τ - вектор-столбец моментов, развиваемых приводами робота;

f_B^0, n_B^0 - блочные матрицы внешних сил и моментов, приложенных к звеньям со стороны окружающей среды;

$A(q)$ -матрица инерционных коэффициентов системы;

$B(q, \dot{q})$ - матрица коэффициентов, зависящая от обобщенных координат и их производных;

$C(q)$ - матрица коэффициентов при внешних силах, действующих на ИМ;

$H(q)$ - матрица коэффициентов при моментах, приложенных к звеньям механизма.

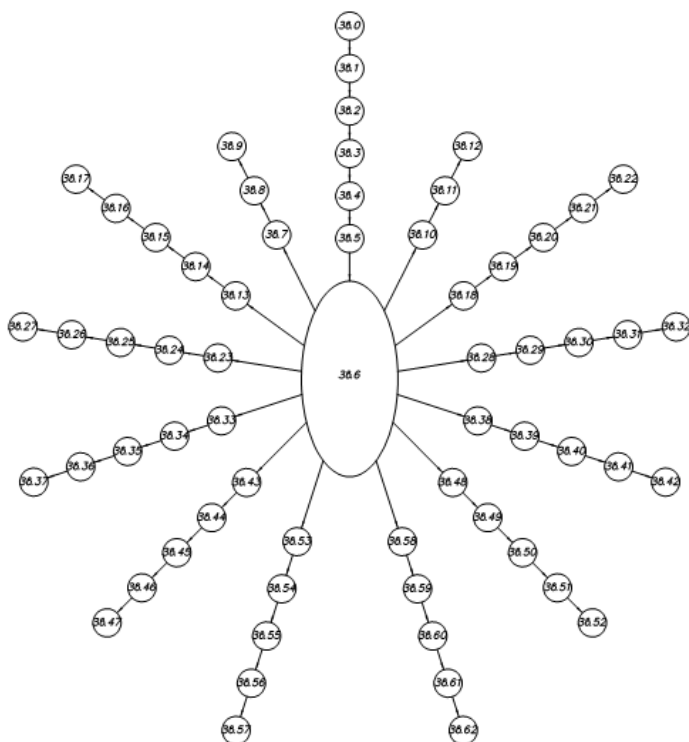


Рис. 3 – Древовидный граф, представляющий кинематическую структуру исполнительного механизма Робота-краба

Моделирование уравнения (1) проводилось с помощью специально разработанной программы в среде MATLAB, состоящей из набора процедур, записанных в виде m-файлов [13]. Достоинством этой программы является то, что она применима для исследования ИМ роботов с произвольной древовидной КС.

Особенность конкретной КС отражается в содержании пускового файла, где хранится информация о параметрах Денавита-Хартенберга, массах, моментах инерции, координатах центров масс ИМ, приложенных внешних силах и моментах.

Исходными данными для расчета компонентов уравнения (1) являются:

- параметры Денавита-Хартенберга [11], получаемые при построении КС «Робота-краба» и представленные в таблице 1;
- параметры звеньев ИМ робота: массы, моменты инерции, координаты центров масс звеньев, получаемые по результатам 3D-моделирования конструкции робота или его технической документации. При моделировании были сделаны следующие допущения: массы каждого звена ИМ равны 1 кг, массы фиктивных звеньев равны «нулю». Моменты инерции звеньев, принимаемых за однородные стержни, определяются относительно осей, которые проходят через центры массы этих звеньев и параллельны осям основных связанных систем координат и принимаются равными единице;
- матрица достижимости D -(62x62) для КС «Робота-краба». Процедура вычисления элементов этой матрицы в [13] автоматизирована.

Таблица 1

	Θ_i [рад]	d_i [м]	a_i [м]	α_i [рад]
1	$\pi+q_1$	0	0	$\pi/2$
2	$-\pi/2+$ q_2	0	0	$\pi/2$
3	$-\pi/2+$ q_3	0	0	$\pi/2$
4	$-\pi/2+$ q_4	0	0	$\pi/2$
5	$-\pi/2+$ q_5	0	0	$\pi/2$
6.1	$0+q_6$	0	0	$\pi/2$
6.2	0	0	0	π
6.3	$-\pi/2$	0	0.02	0
6.4	$\pi/2$	0	-0.02	π
6.5	$-\pi/2$	0	0.04	0
6.6	$\pi/2$	0	-0.04	π
6.7	$-\pi/2$	0	0.055	0
6.8	$\pi/2$	0	- 0.055	π
6.9	$-\pi/2$	0	0.07	0
6.10	$\pi/2$	0	-0.07	π
6.11	$-\pi/2$	0	0.085	0
6.12	$\pi/2$	0	- 0.085	π
7	$\pi/2+$ q_7	0.015	0	$\pi/2$
8	$\pi+q_8$	0	-0.01	$\pi/2$
9	$-\pi/2+$	0	0	$\pi/2$

	q9			
10	$-\pi/2+$ q10	0.015	0	$\pi/2$
11	$\pi+q11$	0	-0.01	$\pi/2$
12	$-\pi/2+$ q12	0	0	$\pi/2$
13	$\pi+q13$	0.02	0	$\pi/2$
14	$\pi+q14$	0	- 0.015	$\pi/2$
15	$\pi+q15$	0	0.015	0
16	0+ q16	0	0.02	0
17	$\pi/2+$ q17	0	0	$\pi/2$
18	0+ q18	0.02	0	$\pi/2$
19	$\pi+q19$	0	- 0.015	$\pi/2$
20	$\pi+q20$	0	0.015	0
21	0+ q21	0	0.02	0
22	$\pi/2+$ q22	0	0	$\pi/2$
23	0+ q23	0.015	0	$\pi/2$
24	$\pi/2+$ q24	0	0.06	0
25	0+ q25	0	0.04	0
26	0+ q26	0	0.04	0
27	0+ q27	0	0	$-\pi/2$
28	0+ q28	0.015	0	$\pi/2$
29	$\pi/2+$ q29	0	0.06	0
30	0+ q30	0	0.04	0
31	0+ q31	0	0.04	0
32	0+ q32	0	0	$\pi/2$
33	0+ q33	0.015	0	$\pi/2$
34	$\pi/2+$ q34	0	0.06	0
35	0+ q35	0	0.04	0
36	0+ q36	0	0.04	0
37	0+ q37	0	0	$-\pi/2$
38	0+ q38	0.015	0	$\pi/2$
39	$\pi/2+$ q39	0	0.06	0
40	0+ q40	0	0.04	0
41	0+ q41	0	0.04	0

42	0+ q42	0	0	$\pi/2$
43	0+ q43	0.015	0	$\pi/2$
44	$\pi/2+$ q44	0	0.06	0
45	0+ q45	0	0.04	0
46	0+ q46	0	0.04	0
47	0+ q47	0	0	$-\pi/2$
48	0+ q48	0.015	0	$\pi/2$
49	$\pi/2+$ q49	0	0.06	0
50	0+ q50	0	0.04	0
51	0+ q51	0	0.04	0
52	0+ q52	0	0	$\pi/2$
53	0+ q53	0.015	0	$\pi/2$
54	$\pi/2+$ 54	0	0.06	0
55	0+ q55	0	0.04	0
56	0+ q56	0	0.04	0
57	0+ q57	0	0	$-\pi/2$
58	0+ q58	0.015	0	$\pi/2$
59	$\pi/2+$ q59	0	0.06	0
60	0+ q60	0	0.04	0
61	0+ q61	0	0.04	0
62	0+ q62	0	0	$\pi/2$

В результате моделирования ИМ Робота-краба с помощью программы [13] получены значения элементов матриц $A(q)$ $-(62 \times 62)$, $B(q, \dot{q})$ $-(62 \times 1)$, $C(q)$ $-(62 \times 62)$, $H(q)$ $-(62 \times 62)$, входящих в уравнение (1), а также значения вектора-столбца τ $-(62 \times 1)$ - моментов, развиваемых приводами робота, представленных в таблице 2.

Таблица 2

τ [Н.м]
0
0
0
0
0
0

-0,171675
-4,20482E-17
-0,024525
0,171675
4,20482E-17
0,024525
-9,3195
-2,28262E-15
-6,597225
-4,0221
-0,7848
9,3195
3,4239E-15
6,597225
4,0221
0,7848
1,040507629
-1,27425E-16
5,09702E-17
5,09702E-17
5,01721E-33
-1,040507629
-7,19766E-16
-6,18372E-18
1,13954E-16
1,20138E-17
1,040507629
-1,27425E-16
5,09702E-17
5,09702E-17
5,01721E-33
-1,040507629
-7,19766E-16
-6,18372E-18
1,13954E-16
1,20138E-17
1,040507629
-1,27425E-16
5,09702E-17
5,09702E-17
5,01721E-33
-1,040507629
-7,19766E-16
-6,18372E-18
1,13954E-16
1,20138E-17
1,040507629
-1,27425E-16
5,09702E-17
5,09702E-17
5,01721E-33
-1,040507629
-7,19766E-16
-6,18372E-18
1,13954E-16
1,20138E-17

Выводы

Предложенный в работе алгоритм выбора древовидных кинематических структур ИМ роботов и исследования их динамики, а также программа моделирования в системе MATLAB являются эффективным средством, позволяющим сократить сроки проектирования перспективных образцов шагающих роботов.

Список литературы

1. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 541 с.
2. Белецкий В.В. Двухногая ходьба. М.: Наука, 1984. 287 с.
3. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двухногих шагающих роботов. Теория и алгоритмы / Под ред. А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 160 с.
4. Ковальчук А.К., Ахметова Ф.Х., Водолажский В.В. Обзор моделей двухногих шагающих роботов / Под ред. А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 92 с.
5. Ковальчук А.К., Ахметова Ф.Х., Водолажский В.В. Роботы-футболисты. Проблемы создания и управления / Под ред. А.К. Ковальчука. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 108 с.
6. Лапшин В.В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 200 с.
7. Военные роботы Boston Dynamics <http://ru.wikipedia.org/wiki/BigDog>. (Дата обращения 15.04.2013).
8. Pupkov K.A., Kovalchuk A.K., Kulakov D.B. Usage of Biological Prototypes for Kinematical Scheme Construction of Modern Robots // Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. 3–5 June 2009, Moscow. P. 1829–1834.
9. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Блочнo-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2008. № 12. С. 5—21.
10. Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С. Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978. 416 с.
11. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 480 с.
12. Алексеева А.А., Таланов В.А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. М.: Изд-во Бином, 2006. 319 с.
13. Программа моделирования древовидных исполнительных механизмов шагающих роботов / А.К. Ковальчук, Л.А. Каргинов, Д.Б. Кулаков и др. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2012610398. 10.01.2012.