

УДК 681.5

Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-краба

А.К. Ковальчук

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию и созданию транспортных средств, использующих для своего перемещения принцип шагания. Возможность таких механизмов перемещаться при отсутствии сплошной колеи, по сильно пересеченной местности и в условиях завалов, а также их высокая проходимость, делает их применение более эффективным, по сравнению с гусеничными и колесными машинами, для выполнения специальных операций.

Исполнительные механизмы шагающих роботов имеют древовидную кинематическую структуру. Оптимальный выбор структуры таких механизмов и исследование их динамики является важной научно-технической задачей при их проектировании.

В статье рассмотрена кинематическая схема исполнительного механизма восьминогого шагающего робота, оснащенного двумя манипуляторами. В качестве биологического прототипа при выборе схемы использован скелет краба. Кинематика и динамика исполнительного механизма робота описана методом, основанным на совместном использовании матриц (4×4) , имеющих широкое применение в робототехнике и теории графов.

В системе MATLAB с помощью специально составленной программы моделирования исследована кинематика и динамика древовидного исполнительного механизма робота. Получены численные значения элементов матриц $A(q)$, $B(q, \dot{q})$, $C(q)$ и $H(q)$, входящих в уравнение динамики робота, а также значения моментов в степенях подвижности.

Предложенный в работе 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.

Choosing the Kinematic Structure and Dynamics Study of Tree-like Robot Crab Actuator

A.K. Kovalchuk

Currently, much attention is given to research and creation of vehicles that use the principle of walking for its moving. The ability of such mechanisms to



КОВАЛЬЧУК

Александр Кондратьевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KOVALCHUK

Alexander Kondratyevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

move in the absence of a solid track, across rugged terrain and under the rubble, as well as high passability, makes their use more efficient, compared to the tracked and wheeled vehicles, and to carry out special operations. Walking robots actuators have a tree-like kinematic structure. Optimal choice of such mechanisms structure and dynamics study are the important scientific and technical problem while designing. The article considers the kinematic scheme of the actuator eight-legged walking robot, equipped with two manipulators. The skeleton of a crab was used as biological prototype while choosing the kinematic scheme. The kinematics and dynamics of the robot actuator are described by a method based on the combined use of matrices (4 4) that have a wide application in robotics, and graph theory. Kinematics and dynamics of the tree-like robot actuator were investigated within MATLAB using a specially compiled simulation program. The proposed algorithm of tree-like kinematic structures choice of the robots actuators and dynamics study, as well as simulation program within MATLAB are the effective means to reduce the time of designing of robots advanced models.

Keywords: walking robot, tree-like actuator, robot dynamics equation.

При создании роботов, выполняющих работы в экстремальных условиях, ученые и конструкторы уделяют 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 и животных позволило фирме Boston Dynamics (США) при финансировании Агентства передовых исследовательских про-

ектов США (Defense Advanced Research Projects Agency-(DARPA) 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 также 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.

У краба восемь ног и две клешни, что позволяет ему 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, КС которого соответствует скелету его биологического прототипа, представлена на рис. 1.

Кинематическая схема ИМ робота-краба, имеющая древовидную структуру, приведена на рис. 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] описан эффективный метод построения уравнений кинематики и динамики

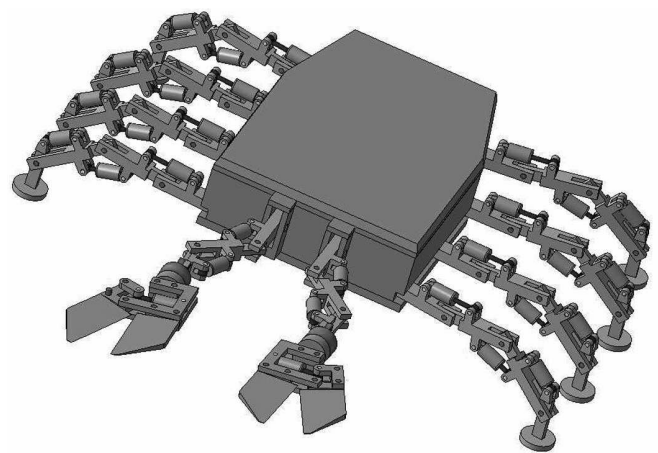


Рис. 1. Трехмерная модель робота-краба

ИМ шагающих роботов с древовидными КС, который основан на совместном использовании матриц (4×4), 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.

За корень дерева (звено с номером 0) принимается окружающее пространство, в котором находится робот. Звенья ИМ робота нумеруют с 1-го и далее по возрастанию, 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, что 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

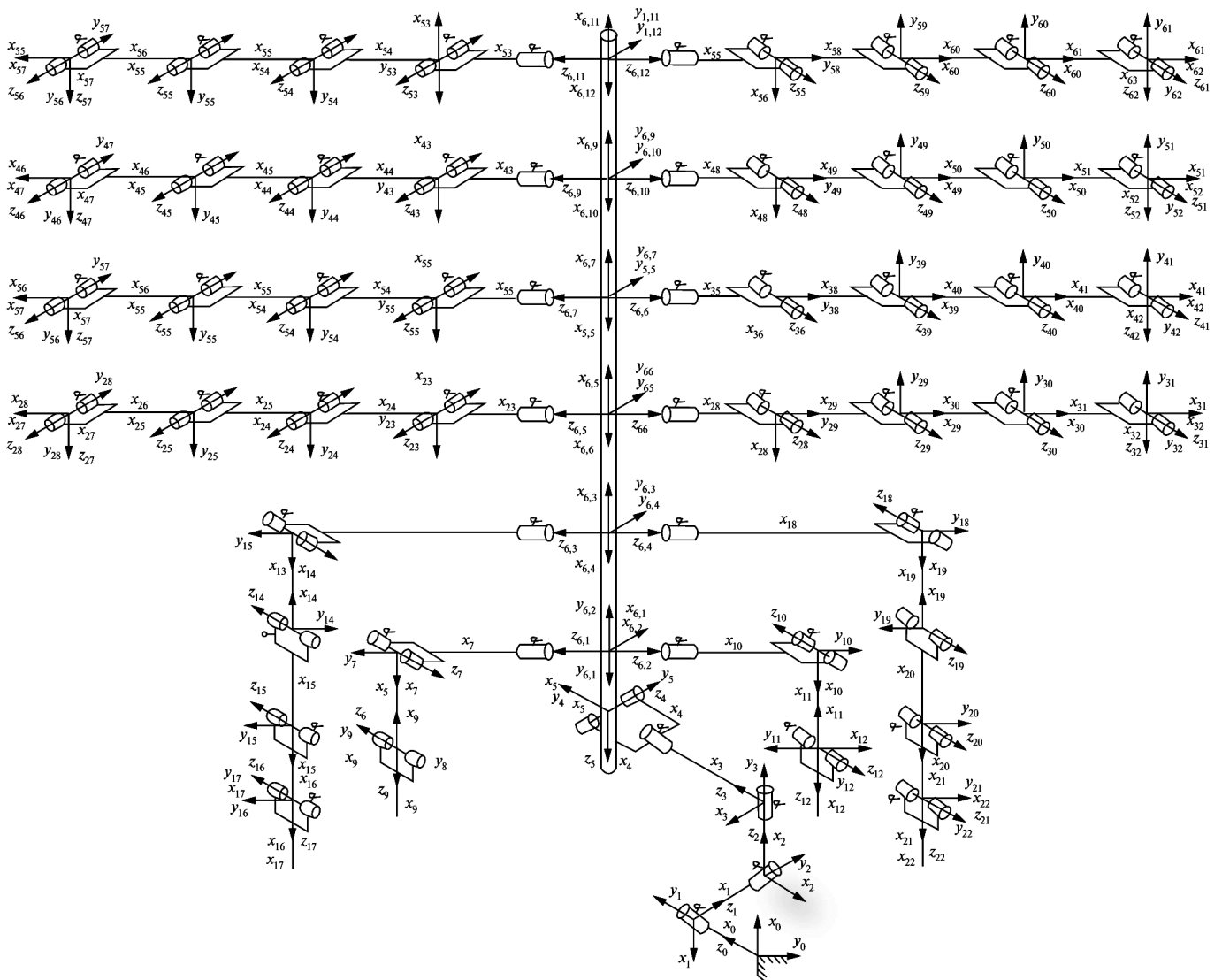


Рис. 2. Кинематическая схема ИМ робота-краба

в пространстве вводится фиктивная кинематическая цепь, соединяющая корпус робота с неподвижной в абсолютной системе фиктивной стойкой. Эта фиктивная цепь состоит из неведомых 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.

Согласно определению достижимости диагональные элементы матрицы $d_{ji} = 1$. При нумерации звеньев ИМ в соответствии с изложенными выше правилами, получаемая матрица достижимости D имеет вид нижней треугольной матрицей.

Таким образом, как матрица достижимости D , так и древовидный граф, представляющий кинематическую структуру робота-краба (рис. 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:

$$A(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - C(\mathbf{q})\mathbf{f}_b^0 - H(\mathbf{q})\mathbf{n}_b^0 = \boldsymbol{\tau}, \quad (1)$$

где \mathbf{q} — вектор обобщенных координат ИМ; $\boldsymbol{\tau}$ — вектор-столбец моментов, развиваемых приводами робота; \mathbf{f}_b^0 , \mathbf{n}_b^0 — блочные матрицы внешних сил и моментов, приложенных к звеньям со стороны окружающей среды; $A(\mathbf{q})$ — матрица инерционных коэффициентов системы; $B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ — матрица коэффициентов, зависящая от обобщенных координат и их производных; $C(\mathbf{q})$ — матрица коэффициентов при внешних силах, действующих на ИМ; $H(\mathbf{q})$ — матрица коэффициентов при моментах, приложенных к звеньям механизма.

Уравнение (1) моделировалось с помощью специально разработанной программы в среде MATLAB, состоящей из набора процедур, за-

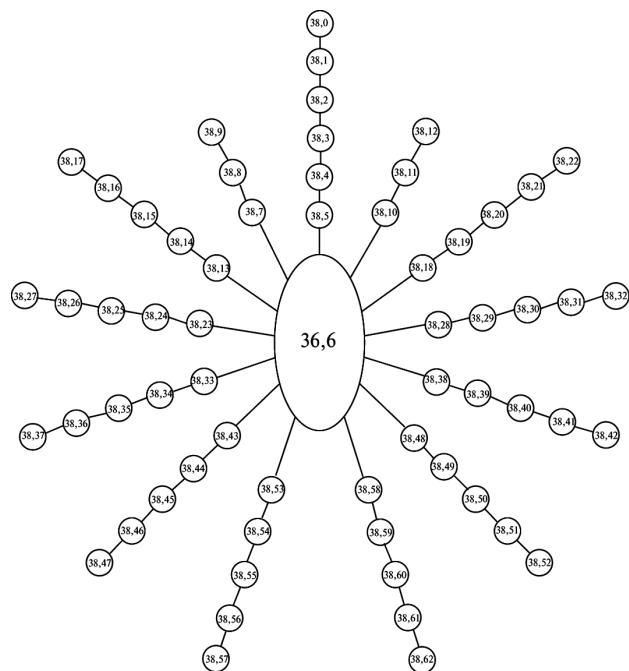


Рис. 3. Древовидный граф, представляющий кинематическую структуру ИМ робота-краба

писанных 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, в котором 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:

- $d_i[M]$, $a_i[M]$, $\alpha_i[\text{град}]$ — параметры Денавита — Хартенберга [11], получаемые при построении КС робота-краба, представленные в таблице;

- параметры звеньев ИМ робота: масса, моменты инерции, координаты центров масс звеньев, получаемые по результатам 3D-моделирования конструкции робота или его технической документации. При моделировании были приняты следующие допущения: масса каждого звена ИМ равна 1 кг, массы фиктивных звеньев равны нулю. Моменты инерции звеньев, принимаемых за однородные стержни, определяются относительно осей, которые проходят через центры масс этих звеньев и параллельны осям основных связанных систем

координат. Значения этих моментов принимаются равными единице;

• матрица достижимости D для КС робота-краба имеет вид (62×62). Процедура вычисления элементов этой матрицы в работе [13] автоматизирована.

Параметр Денавита — Харгенберга	Θ , рад	d , м	a , м	α , 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	$-\pi/2+q_9$	0	0	$\pi/2$
10	$-\pi/2+q_{10}$	0,015	0	$\pi/2$
11	$\pi+q_{11}$	0	-0,01	$\pi/2$
12	$-\pi/2+q_{12}$	0	0	$\pi/2$
13	$\pi+q_{13}$	0,02	0	$\pi/2$
14	$\pi+q_{14}$	0	-0,015	$\pi/2$
15	$\pi+q_{15}$	0	0,015	0
16	$0+q_{16}$	0	0,02	0
17	$\pi/2+q_{17}$	0	0	$\pi/2$
18	$0+q_{18}$	0,02	0	$\pi/2$
19	$\pi+q_{19}$	0	-0,015	$\pi/2$
20	$\pi+q_{20}$	0	0,015	0
21	$0+q_{21}$	0	0,02	0
22	$\pi/2+q_{22}$	0	0	$\pi/2$
23	$0+q_{23}$	0,015	0	$\pi/2$

Параметр Денавита — Харгенберга	Θ , рад	d , м	a , м	α , рад
24	$\pi/2+q_{24}$	0	0,06	0
25	$0+q_{25}$	0	0,04	0
26	$0+q_{26}$	0	0,04	0
27	$0+q_{27}$	0	0	$-\pi/2$
28	$0+q_{28}$	0,015	0	$\pi/2$
29	$\pi/2+q_{29}$	0	0,06	0
30	$0+q_{30}$	0	0,04	0
31	$0+q_{31}$	0	0,04	0
32	$0+q_{32}$	0	0	$\pi/2$
33	$0+q_{33}$	0,015	0	$\pi/2$
34	$\pi/2+q_{34}$	0	0,06	0
35	$0+q_{35}$	0	0,04	0
36	$0+q_{36}$	0	0,04	0
37	$0+q_{37}$	0	0	$-\pi/2$
38	$0+q_{38}$	0,015	0	$\pi/2$
39	$\pi/2+q_{39}$	0	0,06	0
40	$0+q_{40}$	0	0,04	0
41	$0+q_{41}$	0	0,04	0
42	$0+q_{42}$	0	0	$\pi/2$
43	$0+q_{43}$	0,015	0	$\pi/2$
44	$\pi/2+q_{44}$	0	0,06	0
45	$0+q_{45}$	0	0,04	0
46	$0+q_{46}$	0	0,04	0
47	$0+q_{47}$	0	0	$-\pi/2$
48	$0+q_{48}$	0,015	0	$\pi/2$
49	$\pi/2+q_{49}$	0	0,06	0
50	$0+q_{50}$	0	0,04	0
51	$0+q_{51}$	0	0,04	0
52	$0+q_{52}$	0	0	$\pi/2$
53	$0+q_{53}$	0,015	0	$\pi/2$
54	$\pi/2+q_{54}$	0	0,06	0
55	$0+q_{55}$	0	0,04	0
56	$0+q_{56}$	0	0,04	0
57	$0+q_{57}$	0	0	$-\pi/2$
58	$0+q_{58}$	0,015	0	$\pi/2$
59	$\pi/2+q_{59}$	0	0,06	0
60	$0+q_{60}$	0	0,04	0
61	$0+q_{61}$	0	0,04	0
62	$0+q_{62}$	0	0	$\pi/2$

В результате моделирования ИМ робота-краба с помощью программы [13] получены

значения элементов матриц $A(\mathbf{q})$ (62×62), $B(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ (62×1), $C(\mathbf{q})$ (62×62), $H(\mathbf{q})$ (62×62), входящих в уравнение (1), а также значения вектора-столбца $\boldsymbol{\tau}$ (62×1) — моментов, развиваемых приводами робота, представлены ниже:

Элемент матрицы	τ , Н·м
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	-0,171675
8	-4,20482E-17
9	-0,024525
10	0,171675
11	4,20482E-17
12	0,024525
13	-9,3195
14	-2,28262E-15
15	-6,597225
16	-4,0221
17	-0,7848
18	9,3195
19	3,4239E-15
20	6,597225
21	4,0221
22	0,7848
23	1,040507629
24	-1,27425E-16
25	5,09702E-17
26	5,09702E-17
27	5,01721E-33
28	-1,040507629
29	-7,19766E-16
30	-6,18372E-18
31	1,13954E-16
32	1,20138E-17

33	1,040507629
34	-1,27425E-16
35	5,09702E-17
36	5,09702E-17
37	5,01721E-33
38	-1,040507629
39	-7,19766E-16
40	-6,18372E-18
41	1,13954E-16
42	1,20138E-17
43	1,040507629
44	-1,27425E-16
45	5,09702E-17
46	5,09702E-17
47	5,01721E-33
48	-1,040507629
49	-7,19766E-16
50	-6,18372E-18
51	1,13954E-16
52	1,20138E-17
53	1,040507629
54	-1,27425E-16
55	5,09702E-17
56	5,09702E-17
57	5,01721E-33
58	-1,040507629
59	-7,19766E-16
60	-6,18372E-18
61	1,13954E-16
62	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.

Литература

1. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 541 с.
2. Белецкий В.В. Двуногая ходьба. М.: Наука, 1984. 287 с.
3. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Управление исполнительными системами двуногих 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 двуногих 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. Рупков К.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.В. 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. Блоч-но-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.

References

1. Vukobratovich M. *Shagaiushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy* [Walking robots and anthropomorphic mechanisms]. Moscow, Mir publ., 1976. 541 p.
2. Beletskii V.V. *Dvunogaia khod'ba* [Biped walking]. Moscow, Nauka publ., 1984. 287 p.
3. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. *Upravlenie ispolnitel'nymi sistemami dvunogikh shagaiushchikh robotov. Teoriia*

i algoritmy [Management of executive systems of two-legged robots. Theory and Algorithms]. Moscow, MGOU publ., 2007. 160 p.

4. Koval'chuk A.K., Akhmetova F.Kh., Vodolazhskii V.V. *Obzor modelei dvunogikh shagaiushchikh robotov* [Overview of models of two-legged walking robots]. Moscow, MGOU publ., 2007. 92 p.

5. Koval'chuk A.K., Akhmetova F.Kh., Vodolazhskii V.V. *Roboty-futbolisty. Problemy sozdaniia i upravleniia* [Robot footballers. The problems of building and managing]. Moscow, MGOU publ., 2007. 108 p.

6. Lapshin V.V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagaiushchikh mashin* [Mechanics and Motion Control walking machines]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman, 2012. 200 p.

7. *Voennye roboty Boston Dynamics* [Military Robots Boston Dynamics]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/BigDog>. (Accessed 15 April 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, pp. 1829–1834.

9. Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Blochno-matrichnye uravneniia dvizheniia ispolnitel'nykh mekhanizmov robotov s drevovidnoi kinematicheskoi strukturoi [Block-matrix equations of motion of the actuators of robots with kinematic tree structure]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2008, no. 12, pp. 5–21.

10. Medvedev V.S., Leskov A.G., Iushchenko A.S. *Sistemy upravleniia manipuliatsionnykh robotov* [Robotic manipulator control system]. Moscow, Nauka publ., 1978. 416 p.

11. Zenkevich S.L., Iushchenko A.S. *Osnovy upravleniia manipuliatsionnymi robotami* [Management Basics manipulative robots]. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2004. 480 p.

12. Alekseeva A.A., Talanov V.A. *Grafy i algoritmy. Struktury dannykh. Modeli vychislenii* [Graphs and algorithms. Data Structures. Computing model]. Moscow, Binom publ., 2006. 319 p.

13. Koval'chuk A.K., Karginov L.A., Kulakov D.B. *Programma modelirovaniia drevovidnykh ispolnitel'nykh mekhanizmov shagaiushchikh robotov* [The simulator tree actuators walking robots]. *Svidetel'stvo o registratsii programm dlia EVM № 2012610398* [The certificate of registration of computer programs no. 2012610398]. 10.01.2012.

Статья поступила в редакцию 20.04.2013

Информация об авторе

КОВАЛЬЧУК Александр Кондратьевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Россия, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexkov2012@rambler.ru).

Information about the author

KOVALCHUK Alexander Kondratyevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Hydromechanics, Hydraulic Machines and Hydro-pneumoautomation» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: alexkov2012@rambler.ru).