
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ (05.13.05)

УДК 531.1; 681.5.015.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-93-97

Анализ сингулярных конфигураций мобильного манипулятора KUKA youBot

О.М. Капустина

Рассмотрен мобильный манипулятор с открытым программным обеспечением KUKA youBot, предназначенный для исследовательских и образовательных целей. Сингулярные конфигурации данного аппарата в настоящее время не описаны.

KUKA youBot представляет собой управляемую платформу, на которой установлен пятиосный манипулятор со схватом. Платформа может перемещаться по горизонтальной плоскости с помощью четырех меканум колес. Положение робота в абсолютном пространстве определяется восемью обобщенными координатами. Известно, что обратная задача кинематики KUKA youBot допускает точное аналитическое решение.

Построена прямоугольная матрица Якоби отображения пространства обобщенных координат робота в пространство параметров локации его рабочего органа. С помощью элементарных операций матрица приведена к эквивалентному ступенчатому виду.

Анализ элементов ступенчатой матрицы показал, что независимо от расположений платформы, первого, четвертого и пятого звеньев руки KUKA youBot существует сингулярная конфигурация, в которой второе и третье звенья руки робота вытянуты вдоль вертикали. При этом ранг матрицы Якоби равен пяти (меньше полного ранга, равного шести). В указанной сингулярной конфигурации рабочий орган KUKA youBot не может совершать некоторые движения, характер которых описан в представленной работе.

Ключевые слова: сингулярные конфигурации, кинематически избыточный мобильный манипулятор, KUKA youBot, матрица Якоби.

Для цитирования: Капустина О.М. Анализ сингулярных конфигураций мобильного манипулятора KUKA youBot // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 93—97. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-93-97.

An Analysis of Singular Configurations of the KUKA youBot Mobile Manipulator

O.M. Kapustina

The article considers the KUKA youBot mobile manipulator with open software, which is intended for research and education purposes. Singular configurations of this apparatus have not been described in the literature as yet.

The KUKA youBot system is a controlled platform, on which a five-axis manipulator with a grip is mounted. The platform can be moved in the horizontal plane by means of four mecanum wheels. The robot position in the absolute space is determined by eight generalized coordinates. As is known, the KUKA youBot inverse kinematics problem allows its exact analytical solution to be obtained.

A rectangular Jacobi matrix for mapping the space of the robot generalized coordinates into the space of its end effector location parameters is constructed. The obtained Jacobi matrix is transformed to an equivalent echelon form by means of elementary operations.

An analysis of the echelon matrix entries carried out using analytical tools has shown that, whatever the locations of the KUKA youBot system's platform and the system arm first, fourth and fifth links, there is a singular configuration in which the robot's arm second and third links are stretched along the vertical line. In this case, the Jacobi matrix rank becomes equal to five (less than its full rank equal to six). When being in the above-mentioned singular configuration, the KUKA youBot system end effector cannot perform some of the movements the pattern of which is described in the presented paper.

Key words: singular configurations, kinematically redundant mobile manipulator, KUKA youBot, Jacobi matrix.

For citation: Kapustina O.M. An Analysis of Singular Configurations of the KUKA youBot Mobile Manipulator. MPEI Vestnik. 2019;1:93—97. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-93-97.

Проектировать, планировать движения и управлять роботами следует с учетом их сингулярных конфигураций, в которых становится меньше полного ранга матрицы Якоби отображения пространства обобщенных координат робота в пространство параметров локации его рабочего органа [1 — 4]. В окрестности сингулярной конфигурации для достижения конечных скоростей рабочего органа требуется сообщать теоретически неограниченные относительные скорости звеньев робота. При этом в самой сингулярной конфигурации механизм рабочий орган теряет способность совершать некоторые движения. Такие конфигурации должны быть найдены и исключены из планируемых в процессе управления.

Робот KUKA youBot — мобильный манипулятор с открытым программным обеспечением, предназначенный для проведения исследований и образовательных целей [5]. В научной литературе сингулярные конфигурации KUKA youBot не описаны. В ряде работ подобные проблемы изучались численно и аналитически для других моделей роботов [6 — 9].

KUKA youBot является кинематически избыточным механизмом, обратная задача кинематики которого допускает точное аналитическое решение [10 — 12].

Проведен анализ свойств прямоугольной матрицы Якоби KUKA youBot, определены условия понижения

ее ранга и даны их геометрическая и механическая интерпретации.

KUKA youBot — перемещающаяся по горизонтальной плоскости управляемая платформа с четырьмя меканум колесами всенаправленного движения, на которой установлен пятиосный манипулятор со схватом (рис. 1).

Манипулятор состоит из пяти последовательно соединенных звеньев, связанных соединениями вращательного типа с платформой и между собой. Звено 1 — твердое тело, вращающееся вокруг вертикальной оси C_1Z_1 , точка C_1 принадлежит основанию платформы, звенья 2 — 4 — стержни, вращающиеся вокруг горизонтальных осей, проходящих через точки $C_2 — C_4$. Звено 5 — твердое тело, ладонь (отрезок $C_5C'_5$ оси C_5z) вращается вокруг оси C_5z , направленной вдоль звена 4. Со звеном 5 в точке C'_5 соединен схват манипулятора в виде двух пальцев, поступательно перемещающихся относительно звена 5, точка E на оси C_5z — крайняя точка схвата при сомкнутых пальцах. Платформа — твердое тело с горизонтальным верхним основанием. Звенья 1 — 4 и ось вращения звена 5 расположены в одной вертикальной плоскости.

Введем системы координат: $OXYZ$ — неподвижная, абсолютная, ось OZ вертикальна, плоскость OXY совпадает с плоскостью верхнего основания платформы;

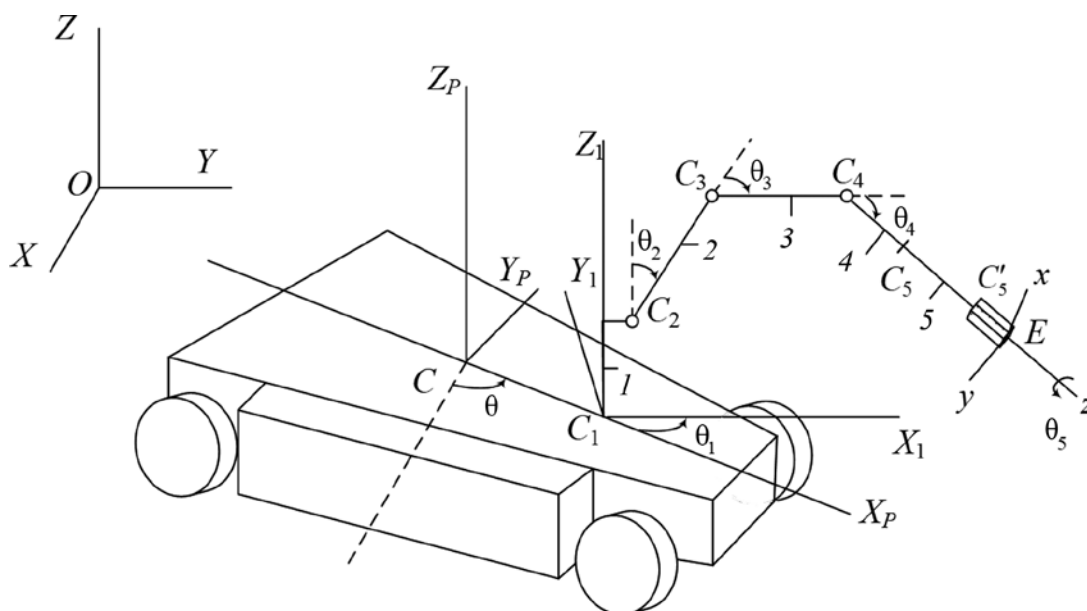


Рис. 1. Схема мобильного манипулятора KUKA youBot

$CX_pY_pZ_p$ — жестко связана с платформой, C — точка верхнего основания платформы, ось CZ_p вертикальна; $Eхуz$ — жестко связана со схватом, вращается вокруг оси C_5z ; $C_1X_1Y_1Z_1$ — вращается вокруг вертикальной оси C_1Z_1 вместе со звеном 1, C_1X_1 направлена от оси C_1Z_1 к проекции точки C_2 на плоскость OXY .

Пусть h — расстояние между точками C и C_1 ; a_1 — расстояние между точкой C_1 и проекцией точки C_2 на горизонтальную плоскость; d_1 — расстояние между точкой C_1 и проекцией точки C_2 на ось C_1Z_1 ,

$$a_2 = \overline{C_2C_3}, a_3 = \overline{C_3C_4}, a_4 = \overline{C_4C_5}, a_5 = \overline{C_5C'_5}, a_6 = \overline{C'_5E}$$

Положение платформы и руки определим обобщенными координатами: $X_C, Y_C, \theta, \theta_p, i = 1...5, X_C, Y_C$ — координаты точки C относительно осей OX, OY ; θ — угол между осями OX и $CX_p, 0 \leq \theta < 2\pi$; θ_1 — угол между осями CX_p и C_1X_1 ; θ_2 — угол от оси C_1Z_1 до $\overline{C_2C_3}$; θ_3 — угол от $\overline{C_2C_3}$ до $\overline{C_3C_4}$; θ_4 — угол от $\overline{C_3C_4}$ до $\overline{C_4C_5}$; θ_5 — угол поворота звена 5 вокруг C_5z .

В плоскостях $OXY, C_1X_1Z_1, Eхуz$ за положительное направление отсчета углов возьмем направление против часовой стрелки, если смотреть от концов осей OZ, C_1Y_1, C_5z , соответственно.

Согласно [5] должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} -169^\circ \leq \theta_1 \leq 169^\circ; \quad -65^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ; \\ -151^\circ \leq \theta_3 \leq 146^\circ; \quad -102,5^\circ \leq \theta_4 \leq 102,5^\circ; \quad (1) \\ -167,5^\circ \leq \theta_5 \leq 167,5^\circ. \end{aligned}$$

Положение схвата относительно системы координат $OXYZ$ определим параметрами локации схвата, за которые примем координаты X_E, Y_E, Z_E точки E и углы Эйлера $\psi; \theta_E; \varphi; 0 \leq \psi < 2\pi; 0 \leq \theta_E \leq \pi; 0 \leq \varphi < 2\pi$ [13], задающие ориентацию базиса системы.

Обобщенные координаты робота связаны с параметрами локации соотношениями:

$$\begin{aligned} X_E &= X_C + h \cos \theta + \cos(\theta + \theta_1) \times \\ &\times [a_1 + a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)]; \\ Y_E &= Y_C + h \sin \theta + \sin(\theta + \theta_1) \times \\ &\times [a_1 + a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)]; \\ Z_E &= d_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + \\ &+ c \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\psi = \theta + \theta_1 \pm \frac{\pi}{2};$$

$$\theta_E = \pm(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$\varphi = \theta_5 \pm \frac{\pi}{2};$$

$$c = a_4 + a_5 + a_6.$$

Для получения числовых значений углов Эйлера на указанных интервалах следует добавить к их значениям, вычисляемым по (2), слагаемые $2k\pi$ (k — целое число).

Введем векторы обобщенных координат робота

$$\mathbf{Q} = (X_C, Y_C, \theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)^T$$

и параметров локации схвата

$$\mathbf{X} = (X_E, Y_E, Z_E, \psi, \theta_E, \varphi)^T,$$

T — знак транспонирования.

Соотношения (2) определяют отображение

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{Q})$$

пространства обобщенных координат робота в пространство параметров локации схвата. Матрица Якоби данного отображения имеет вид:

$$\mathbf{J} = \left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{Q}} \right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} & j_{17} & 0 \\ 0 & 1 & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} & j_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j_{35} & j_{36} & j_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & b & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$j_{13} = -h \sin \theta - \sin(\theta + \theta_1)l;$$

$$j_{14} = -\sin(\theta + \theta_1)l;$$

$$j_{15} = \cos(\theta + \theta_1) \times$$

$$\times [a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)];$$

$$j_{16} = \cos(\theta + \theta_1) [a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)];$$

$$j_{17} = c \cos(\theta + \theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$j_{23} = h \cos \theta + \cos(\theta + \theta_1)l;$$

$$j_{24} = \cos(\theta + \theta_1)l;$$

$$j_{25} = \sin(\theta + \theta_1) \times$$

$$\times [a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)];$$

$$j_{26} = \sin(\theta + \theta_1) [a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + c \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)];$$

$$j_{27} = c \sin(\theta + \theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$j_{35} = -a_2 \sin \theta_2 - a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$j_{36} = -a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$j_{37} = -c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4);$$

$$b = \pm 1;$$

$$l = a_1 + a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + c \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4).$$

Поменяв местами третью и четвертую строки, а затем в полученной матрице поменяв местами четвертую и пятую строки, приведем \mathbf{J} к виду

$$\mathbf{J}' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} & j_{17} & 0 \\ 0 & 1 & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} & j_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b & b & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j_{35} & j_{36} & j_{37} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При условии $j_{35} = 0$ матрица \mathbf{J}' носит ступенчатый характер:

$$J'' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & j_{13} & j_{14} & j_{15} & j_{16} & j_{17} & 0 \\ 0 & 1 & j_{23} & j_{24} & j_{25} & j_{26} & j_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & b & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_2 \sin \theta_2 & a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Если $j_{35} \neq 0$, то J' приводится к J'' вычитанием из пятой строки четвертой строки, умноженной на j_{35}/b .

Ступенчатая матрица J'' и эквивалентная ей J имеют полный ранг, равный шести, во всех конфигурациях робота за исключением случая понижения ранга до пяти при условии обращения в ноль всех элементов пятой строки J'' :

$$\begin{cases} a_2 \sin \theta_2 = 0; \\ a_2 \sin \theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

На множестве (1) система уравнений (3) имеет единственное решение

$$\theta_2 = \theta_3 = 0. \quad (4)$$

Условия (4) определяют сингулярные конфигурации КУКА youBot, в которых звенья 2, 3 робота расположены вертикально при произвольном расположении платформы и звеньев 1, 4, 5 (рис. 2).

Исходя из рис. 1, получим:

$$\begin{aligned} Z_{C_3} &= d_1 + a_2 \cos \theta_2; \\ Z_{C_4} &= d_1 + a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3). \end{aligned} \quad (5)$$

Найдем из (2), (5), дифференцируя по времени,

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{C_3} &= -a_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2; \\ \dot{Z}_{C_4} &= -a_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - a_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3); \\ \dot{Z}_E &= -a_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - a_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) - \\ &\quad - c(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4). \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) при условии (4) и с учетом (2) получим:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{C_3} &= \dot{Z}_{C_4} = 0; \\ \dot{Z}_E &= \mp c \dot{\theta}_E \sin \theta_4. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что в сингулярной конфигурации шарниры C_3, C_4 не могут перемещаться по вертикали. Если $\theta_4 \neq 0$, то $\dot{Z}_E = 0 \Leftrightarrow \dot{\theta}_E = 0$, т. е. относительно системы координат $C_1 X_1 Y_1 Z_1$ неосуществимы движения, в которых:

- ось Ez перемещается поступательно параллельно вертикали (в этом движении было бы $\dot{\theta}_E = 0; \dot{Z}_E \neq 0$);
- схват вращается вокруг неподвижной относительно $C_1 X_1 Y_1 Z_1$ горизонтальной параллельной $C_1 Y_1$ оси, проходящей через точку E (в этом случае $\dot{Z}_E = 0; \dot{\theta}_E \neq 0$).

Если $\theta_4 = 0$, то $\dot{Z}_E = 0$. В таком случае невозможны движения, в которых точка E перемещается по вертикали.

Найденные сингулярные конфигурации КУКА youBot и отмеченные нереализуемые виды движения схвата должны быть учтены при планировании движений и управлении данным роботом.

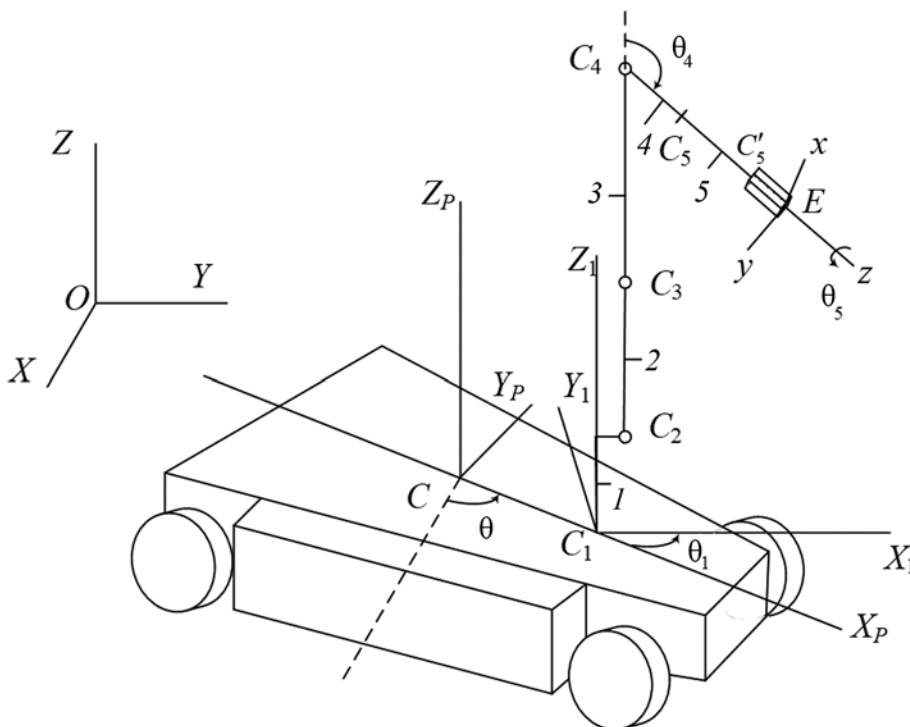


Рис. 2. Схема сингулярной конфигурации КУКА youBot

Литература

References

1. **Yoshikawa T.** Manipulability of Robotic Mechanisms // Intern. J. Robotics Research. 1985. V. 4. No. 2. Pp. 3—9.
2. **Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.** Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
3. **Springer Handbook of Robotics** / ed. by B. Siciliano, O. Khatib. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
4. **Крейг Д.Дж.** Введение в робототехнику: механика и управление. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013.
5. **KUKA youBot store** [Официальный сайт] <http://www.youbot-store.com/> (дата обращения 30.11.2017).
6. **Karger A.** Singularity Analysis of Serial Robot-manipulators // Trans. ASME J. Mechanical Design. 1996. V. 118. Pp. 520—525.
7. **Gogu G.** Families of 6R Orthogonal Robotic Manipulators with Only Isolated and Pseudoisolated Singularities // Mechanism and Machine Theory. 2002. V. 37. No. 11. Pp. 1347—1375.
8. **Hayes M.J.D., Husty M.L.** Singular Configurations of Wrist-partitioned 6R Serial Robots: a Geometric Perspective for Users // Trans. Canadian Soc. Mechanical Eng. 2002. V. 26. No. 1. Pp. 41—55.
9. **De Luca A., Oriolo G., Giordano P.R.** Kinematic Modeling and Redundancy Resolution for Nonholonomic Mobile Manipulators // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. 2006. Pp. 1867—1873.
10. **Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C.** Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot // Proc. VII German Conf. Robotics. 2012. Pp. 1—6.
11. **Brandstötter M., Angerer A., Hofbauer M.** An Analytical Solution of the Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist // Proc. Austrian Robotics Workshop. 2014. Pp. 7—11.
12. **Капустина О.М.** Описание множества точных решений обратной задачи кинематики робота KUKA youBot с помощью обобщенных координат его платформы // Естественные и технические науки. 2016. № 12. С. 176—180.
13. **Александров П.С.** Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1979.

1. **Yoshikawa T.** Manipulability of Robotic Mechanisms. Intern. J. Robotics Research. 1985;4;2:3—9.
2. **Zenkevich S.L., Yushchenko A.S.** Osnovy Upravleniya Manipulyatsionnymi Robotami. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2004. (in Russian).
3. **Springer Handbook of Robotics** / ed. by B. Siciliano, O. Khatib. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
4. **Kreyg D.Dzh.** Vvedenie v Robototekhniku: Mekhanika i Upravlenie. Moskva, Izhevsk: Institut Komp'yuternyh Issledovaniy, 2013. (in Russian).
5. **KUKA youBot store** [Ofits. Sayt] <http://www.youbot-store.com/> (Data Obrashcheniya 30.11.2017).
6. **Karger A.** Singularity Analysis of Serial Robot-manipulators. Trans. ASME J. Mechanical Design. 1996;118:520—525.
7. **Gogu G.** Families of 6R Orthogonal Robotic Manipulators with Only Isolated and Pseudoisolated Singularities. Mechanism and Machine Theory. 2002;37; 11:1347—1375.
8. **Hayes M.J.D., Husty M.L.** Singular Configurations of Wrist-partitioned 6R Serial Robots: a Geometric Perspective for Users. Trans. Canadian Soc. Mechanical Eng. 2002;26;1:41—55.
9. **De Luca A., Oriolo G., Giordano P.R.** Kinematic Modeling and Redundancy Resolution for Nonholonomic Mobile Manipulators. Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. 2006:1867—1873.
10. **Sharma S., Kraetzschmar G., Scheurer C.** Unified Closed Form Inverse Kinematics for the KUKA youBot. Proc. VII German Conf. Robotics. 2012:1—6.
11. **Brandstötter M., Angerer A., Hofbauer M.** An Analytical Solution of the Inverse Kinematics Problem of Industrial Serial Manipulators with an Ortho-parallel Basis and a Spherical Wrist. Proc. Austrian Robotics Workshop. 2014:7—11.
12. **Kapustina O.M.** Opisanie Mnozhestva Tochnyh Resheniy Obratnoy Zadachi Kinematiki Robota KUKA youBot s Pomoshch'yu Obobshchennyh Koordinat Ego Platformy. Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki. 2016;12: 176—180. (in Russian).
13. **Aleksandrov P.S.** Kurs Analiticheskoy Geometrii i Lineynoy Algebry. M.: Nauka, 1979. (in Russian).

Сведения об авторе:

Капустина Ольга Михайловна — кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ», e-mail: KapustinaOM@mpei.ru

Information about author:

Kapustina Olga M. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines Dept., NRU MPEI, e-mail: KapustinaOM@mpei.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ (проект № 16-01-00429)

The work is executed at support: RFBR (grants No. 16-01-00429)

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the author declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 30.11.2017

The article received to the editor: 30.11.2017