

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАПРЕТНЫХ ЗОН НА ФОРМУ И ПОЛОЖЕНИЕ ОБЛАСТИ РАЗРЕШЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРА

Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Приведены результаты исследований, связанных с разработкой способа аналитического задания области разрешенных конфигураций в пространстве обобщенных координат. Все разрешенные конфигурации в пространстве обобщенных координат отображены геометрическим объектом. Данный объект задан аналитическим способом с помощью нескольких его ограничивающих кинематических поверхностей и теории множеств. Полученные зависимости позволяют задавать область разрешенных конфигураций, являющуюся базой знаний при интеллектуальном управлении движением механизма манипулятора в заранее известной внешней среде.

Ключевые слова: пространство обобщенных координат, область разрешенных конфигураций, кинематические поверхности, виртуальное моделирование движений роботов, запретные зоны.

Введение

С развитием технологий автоматизации в промышленности массово распространяется практика использования автономных мобильных роботов для выполнения различных задач [1–3]. Ведутся также работы, связанные с созданием автономных мобильных роботов, оснащенных интеллектуальными системами управления. Данные системы позволяют обеспечить целенаправленное поведение, приводящее в конечном итоге к выполнению основной двигательной задачи [4–9]. Использование интеллектуального управления позволяет обеспечить роботу автономное функционирование. Для обеспечения успешного функционирования автономных мобильных роботов в сложноорганизованных средах с наименьшим вмешательством человека необходимо совершенствовать способы анализа положения механизма робота в известной и неизвестной окружающей среде. В работах [10, 11] предложен алгоритм построения движения механизма манипулятора, основанный на анализе положения точек, задающих разрешенные и запрещенные конфигурации. Условимся в дальнейшем конфигурацию, которая удовлетворяет предельным значениям обобщенных координат и которая не пересекает запретные зоны, называть разрешенной. В противном случае конфигурацию называют запрещенной. Для сокращения времени анализа информации о положении механизма манипулятора мобильного робота в работах [12, 13] первоначально предлагается определять достаточное условие столкновений, которое соответствует условию непересечения траектории движения в пространстве обобщенных координат с границами области разрешенных конфигураций. Затем проверяется необходимое условие.

Постановка задачи

Области разрешенных конфигураций могут быть использованы как составная часть баз знаний интеллектуальных систем управления движением

роботов в организованных средах. Данные базы знаний характеризуют прошлый опыт, связанный с возможными положениями механизма манипулятора, при которых отсутствует его пересечение с запретными зонами. В работе [13] исследованы поверхности, ограничивающие область разрешенных конфигураций при наличии запретной зоны для манипулятора мобильного робота «Варан». Однако графическое представление области разрешенных конфигураций в пространстве обобщенных координат для различных положений запретных зон в данной работе подробно не исследовано. В указанной работе также приведен способ аналитического задания точек, принадлежащих исследуемой области разрешенных конфигураций, но данный способ не характеризуется достаточной точностью и универсальностью.

Теория

На рис. 1 представлены геометрические параметры, определяющие положение механизма манипулятора и положение запретной зоны.

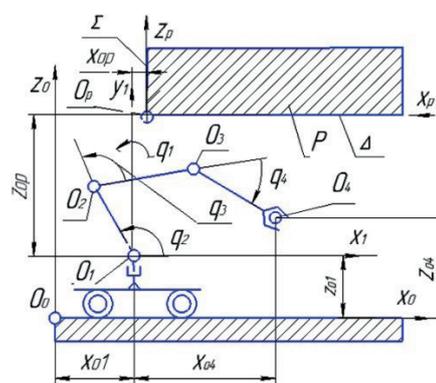


Рис. 1. Геометрические параметры, определяющие положение конфигураций и запретной зоны P
Fig. 1. Geometric parameters defining the positions configurations and the exclusion zone P

Длины звеньев механизма манипулятора для рассматриваемого примера приняты равными следующим значениям: $O_1O_2 = 900$ мм, $O_2O_3 = 700$ мм и $O_3O_4 = 500$ мм. Предельные значения обобщенных координат заданы неравенствами $q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}$, где q_i^{\min} , q_i^{\max} — нижние и верхние предельные значения обобщенных координат. Значения q_i^{\min} и q_i^{\max} соответственно приняты равными $q_i^{\min}(0^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$ и $q_i^{\max}(120^\circ, 120^\circ, 120^\circ)$. При фиксированных значениях обобщенной координаты q_2 и $q_1 = 0$ в пространстве обобщенных координат Lq совокупность точек $B_i(q_2, q_3, q_4)$, задающих разрешенные конфигурации, будут задавать некоторые сечения области Λ в различных параллельных плоскостях [12, 13]. Эти параллельные плоскости принято располагать на расстоянии $\Delta q_i = 10^\circ$. При исследовании области разрешенных конфигураций шаг изменения обобщенных координат (шаг сетки) принят равным десяти градусам. В табл. 1 представлены указанные сечения области разрешенных конфигураций при наличии и отсутствии запретной зоны. В качестве запретной зоны выступает горизонтальная плоскость уровня. Положение запретной зоны аналогично функционированию мобильного робота в туннеле. На основе сечений (табл. 1) на рис. 2 построены области разрешенных конфигураций для различных положений запретной зоны.

На рис. 3 представлено сечение области Λ , определяющей разрешенные конфигурации при $q_2 = 0$. Совокупность разрешенных конфигураций при отсутствии запретной зоны P изображены на рис. 3б. Параметр N_{kol} на рис. 3б определяет количество разрешенных конфигураций при задании $\Delta q_i = 10^\circ$. Для задания наружного контура сечений, изображенных в табл. 1, использованы несколько фрагментов граничных линий, в качестве которых выступают шесть отрезков прямых l_1-l_6 и два фрагмента эллипсов l_7 и l_8 (рис. 4). В табл. 1 положения указанных эллипсов представлены для различных сечений

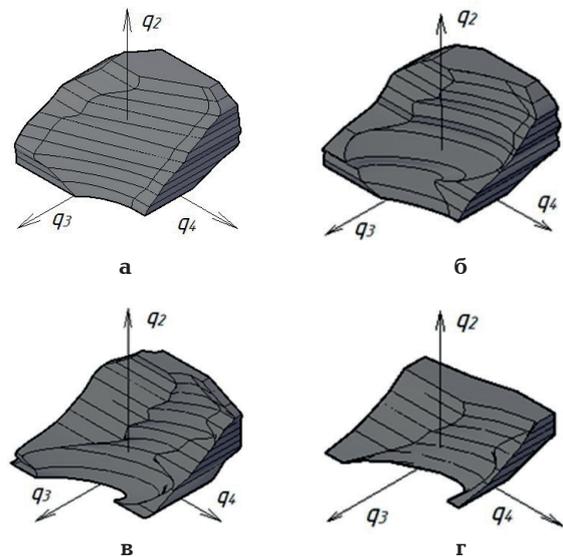


Рис. 2. Изображение области разрешенных конфигураций Λ : а — при отсутствии запретной зоны P ; б — $z_{op} = 1400$ мм; в — $z_{op} = 1000$ мм; г — $z_{op} = 800$ мм
 Fig. 2. Picture of the allowed configurations area Λ : а — in the absence of a restricted area P ; б — $z_{op} = 1400$ мм; в — $z_{op} = 1000$ мм; г — $z_{op} = 800$ мм

области разрешенных конфигураций. Среди различных кривых второго порядка эллипс наилучшим образом соприкасается на определенном месте контура с крайними точками сечения области Λ .

В связи с этим данная кривая (эллипс) выбрана в качестве одного из фрагментов, задающих контур различных сечений.

Анализ положения указанных восьми линий в различных параллельных плоскостях сечений области Λ пространства Lq (построенных с шагом 10° см. табл. 1) позволил определить, что совокупность

Таблица 1. Сечения области Λ разрешенных конфигураций манипулятора
 Table 1. Cross-sections of the area Λ of authorized manipulator configurations

Сечения области Λ	
Препятствие отсутствует	
$z_{op} = 120$ мм	

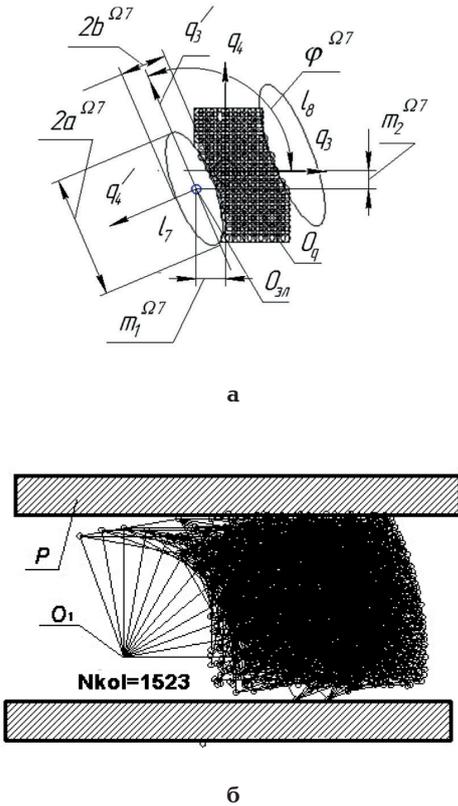


Рис. 3. Определение разрешенных конфигураций при отсутствии и наличии запретной зоны, заданной в виде горизонтальной плоскости уровня: а — сечение области Λ при $q_2 = 0^\circ$, б — множество разрешенных конфигураций при $z_{op} = 1000$ мм
 Fig. 3. Determination of allowed configurations in the absence and presence of a forbidden zone given in the form of a horizontal plane level: а — section of the region Λ for $q_2 = 0^\circ$, б — set of allowed configurations for $z_{op} = 1000$ mm

данных линии принадлежит шести линейчатым поверхностям и двум кинематическим поверхностям, образующими которых являются эллипсы (рис. 2). Данные поверхности в пространстве Lq ограничивают область Λ . Образующими линейчатых поверхностей являются прямые $I_1 - I_6$. Образующими двух эллиптических кинематических поверхностей являются эллипсы I_7 и I_8 , центры которых смещаются вдоль заданной некоторой кривой l (см. рис. 2 и рис. 4).

С целью аналитического задания области Λ определим неравенства, задающие точки, принадлежащие отдельным областям $\Omega_1 - \Omega_8$. Области $\Omega_1 - \Omega_6$ задают полуплоскости сечений, определяемые прямыми $I_1 - I_6$ и неравенствами:

$$\sum_{l=2}^4 d_{l1}^{\Omega 1} q_l \geq b_1^{\Omega 1}, \dots, \sum_{l=2}^4 \frac{\Omega m}{lm} q_l \geq b_m^{\Omega 1}, \quad (1)$$

где m — число прямых ограничивающих сечения области Λ (для рассматриваемого примера $m = 6$), $k = 2$ — параметр определяет размерность плоскостей сечений области разрешенных конфигураций при $q_1 = 0$ и $q_2 = \text{const}$;

$$d_{k1}^{\Omega 1}, d_{k2}^{\Omega 1}, \dots, d_{1,m}^{\Omega 1}, b_1^{\Omega 1}, b_2^{\Omega 1}, \dots, b_m^{\Omega m}$$

— коэффициенты уравнений прямых $I_1 - I_6$, определяемые функциями в виде полиномов третьей степени от переменной q_2 :

$$\begin{aligned} d_{k1}^{\Omega 1} &= d_{13}^{\Omega 1} q_2^3 + d_{12}^{\Omega 1} q_2^2 + d_{11}^{\Omega 1} q_2 + d_{10}^{\Omega 1}; \\ d_{k2}^{\Omega 1} &= d_{23}^{\Omega 1} q_2^3 + d_{22}^{\Omega 1} q_2^2 + d_{21}^{\Omega 1} q_2 + d_{20}^{\Omega 1}; \\ d_{k1}^{\Omega 2} &= d_{13}^{\Omega 2} q_2^3 + d_{12}^{\Omega 2} q_2^2 + d_{11}^{\Omega 2} q_2 + d_{10}^{\Omega 2}; \\ &\dots \\ b_1^{\Omega 1} &= b_{13}^{\Omega 1} q_2^3 + b_{12}^{\Omega 1} q_2^2 + b_{11}^{\Omega 1} q_2 + b_{10}^{\Omega 1}; \\ &\dots \\ b_6^{\Omega 6} &= b_{63}^{\Omega 6} q_2^3 + b_{62}^{\Omega 6} q_2^2 + b_{61}^{\Omega 6} q_2 + b_{60}^{\Omega 6}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $d_{13}^{\Omega 1}, d_{12}^{\Omega 1}, \dots, b_{13}^{\Omega 1}, b_{12}^{\Omega 1}, \dots, b_6^{\Omega 6}$ определяют коэффициенты полиномов (2), используемых при задании областей Ω_{1-6} .

Значения данных коэффициентов получены экспериментальным путем на основе получения множества сечений при различных параметрах z_{op} и q_2 .

Неравенства, определяющие точки, располагающиеся снаружи областей Ω_7 и Ω_8 , заданных эллипсами $I_7 - I_8$, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} &\frac{(q_3 \sin \varphi^{\Omega 7} + q_4 \cos \varphi^{\Omega 7} + (m_{33}^{\Omega 7} q_2^3 + m_{32}^{\Omega 7} q_2^2 + m_{31}^{\Omega 7} q_2 + m_{30}^{\Omega 7}))^2}{(a_3^{\Omega 7} q_2^3 + a_2^{\Omega 7} q_2^2 + a_1^{\Omega 7} q_2 + a_0^{\Omega 7})^2} + \\ &+ \frac{(q_3 \cos \varphi^{\Omega 7} + q_4 \sin \varphi^{\Omega 7} + (m_{43}^{\Omega 7} q_2^3 + m_{42}^{\Omega 7} q_2^2 + m_{41}^{\Omega 7} q_2 + m_{40}^{\Omega 7}))^2}{(b_3^{\Omega 7} q_2^3 + b_2^{\Omega 7} q_2^2 + b_1^{\Omega 7} q_2 + b_0^{\Omega 7})^2} - 1 \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\frac{(q_3 \sin \varphi^{\Omega 8} + q_4 \cos \varphi^{\Omega 8} + (m_{33}^{\Omega 8} q_2^3 + m_{32}^{\Omega 8} q_2^2 + m_{31}^{\Omega 8} q_2 + m_{30}^{\Omega 8}))^2}{(a_3^{\Omega 8} q_2^3 + a_2^{\Omega 8} q_2^2 + a_1^{\Omega 8} q_2 + a_0^{\Omega 8})^2} + \\ &+ \frac{(q_3 \cos \varphi^{\Omega 8} + q_4 \sin \varphi^{\Omega 8} + (m_{43}^{\Omega 8} q_2^3 + m_{42}^{\Omega 8} q_2^2 + m_{41}^{\Omega 8} q_2 + m_{40}^{\Omega 8}))^2}{(b_3^{\Omega 8} q_2^3 + b_2^{\Omega 8} q_2^2 + b_1^{\Omega 8} q_2 + b_0^{\Omega 8})^2} - 1 \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где $m_{33}^{\Omega 7}, m_{32}^{\Omega 7}, \dots, m_{43}^{\Omega 7}, m_{42}^{\Omega 7}, \dots$ — коэффициенты полиномов, задающих координаты $m_1^{\Omega 7}, m_2^{\Omega 7}$ точки O_{3n} , являющейся началом системы координат, связанной с эллипсом; $a_3^{\Omega 7}, a_2^{\Omega 7}, \dots, b_3^{\Omega 7}, b_2^{\Omega 7}, \dots$ — коэффициенты полиномов, задающих соответственно большую и малую полуоси $a^{\Omega 7}, b^{\Omega 7}$ эллипса, определяющие форму фрагмента контура сечения эллипса I_7 , задающего область Ω_7 (см. рис. 3а и табл. 1). Параметр $\varphi^{\Omega 7}$ задает угол наклона большой полуоси эллипса I_7 (оси q_3' к оси q_3 (рис. 3а)). Неравенства (3, 4) получают на основе использования преобразования координат, задающих переход от системы $O_{3n} q_3' q_4'$ (связанной с эллипсом) к системе $O_q q_3 q_4$. Центр эллипса смещается по заданной кривой d_1 в пространстве Lq , если происходит непрерывное изменение обобщенной координаты q_2 .

Положение кривой d_1 определено экспериментальным путем на основе исследования множества сечений области Λ . Данная кривая d_1 определяется функциями $m_1^{\Omega 7} = f_1(q_2)$ и $m_2^{\Omega 7} = f_2(q_2)$, заданными в виде кубических сплайнов. Параметры $m_{33}^{\Omega 8}, m_{32}^{\Omega 8} \dots, b_2^{\Omega 8}, b_1^{\Omega 8}, b_0^{\Omega 8}$ определяют соответственно коэффициенты полиномов, используемых при задании кривой d_2 и полуосей эллипсов области Ω_8 .

На основе анализа сечений предложено задавать область Λ на основе использования операции пересечения и объединения областей Ω_{1-8} [14]. Последовательность логики формирования области Λ представлена на рис. 4.

Для вычисления пересечения областей Ω_1 и Ω_2 (рис. 4а, г) используют операцию конъюнкции, которую определяют следующим выражением [14]:

$$Y_2 = X_1 \wedge X_2 = X_1 + X_2 - \sqrt{X_1^2 + X_2^2} \quad (5)$$

где X_1 и X_2 — непрерывные переменные R -функции (2). Объединению двух множеств (рис. 4ж), изображенных на рис. 4в и рис. 4д, соответствует дизъюнкция, которая задается с помощью выражения [14]:

$$Y_1 = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2 + \sqrt{X_1^2 + X_2^2}. \quad (6)$$

Для вычисления области, заданной на рис. 4б, подставляют вначале два неравенства (1) в уравнение (5) и получают пересечение двух полуплоскостей, образующих область $\Omega_1 \cap \Omega_2$. Затем полученное неравенство области $\Omega_1 \cap \Omega_2$ и третье неравенство (1) подставляют вновь в уравнение (5) и получают уравнение области $\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}$. При этом получают

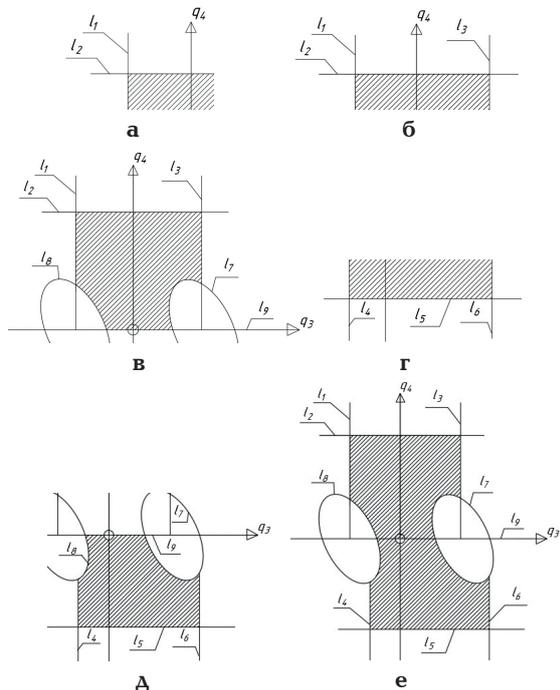


Рис. 4. Логика формирования областей сечений, задающих разрешенные конфигурации при фиксированном значении параметра q_2 :

а — $\Omega_1 \cap \Omega_2$, б — $\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}$, в — $((\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}) \cap \Omega_{14}) \cap \Omega_{15}$, г — $\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}$, д — $((\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}) \cap \Omega_{17}) \cap \Omega_{18}$, ж — $((\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}) \cap \Omega_{14}) \cap \Omega_{15} \cup ((\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}) \cap \Omega_{17}) \cap \Omega_{18} \cap \Omega_{19}$.

Fig. 4. The logic of forming sections that define allowed configurations for a fixed value of the parameter q_2 :

а — $\Omega_1 \cap \Omega_2$, б — $\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}$, в — $((\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}) \cap \Omega_{14}) \cap \Omega_{15}$, д — $\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}$, е — $((\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}) \cap \Omega_{17}) \cap \Omega_{18}$, ж — $((\Omega_{11} \cap \Omega_{12} \cap \Omega_{13}) \cap \Omega_{14}) \cap \Omega_{15} \cup ((\Omega_{14} \cap \Omega_{15} \cap \Omega_{16}) \cap \Omega_{17}) \cap \Omega_{18} \cap \Omega_{19}$.

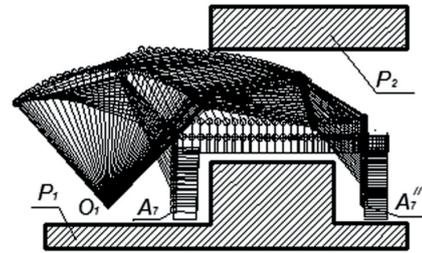


Рис. 5. Результаты виртуального моделирования движения механизма манипулятора мобильного робота
Fig. 5. Results of virtual simulation of movement of the manipulator mechanism of the mobile robot

пересечение трех областей. Аналогичным образом получают уравнения других фрагментов сечений области Λ , заданных на рис. 4. В конечном итоге с помощью пересечения и объединения областей (1), (3) и (4) получают неравенство, задающее область Λ .

Результаты экспериментов

В работе по результатам теоретических исследований выполнено решение тестовой задачи, связанной с перемещением центра ВЗ из точки A_7 в точку A_7'' при наличии запретных зон P_1 и P_2 (см. рис. 5). Для данного перемещения необходимо центр ВЗ вначале перевести вверх на некоторую высоту. Далее сместить по соответствующей горизонтальной траектории и опустить вниз до совмещения с целевой точкой A_7'' . Положение горизонтальной траектории определяется на основе использования области разрешенных конфигураций. Результаты виртуального моделирования движения механизма манипулятора мобильного робота приведены на рис. 5.

Обсуждение экспериментов

Разработанный способ аналитического задания области разрешенных конфигураций является более универсальным и более точно определяет положения конфигураций, удовлетворяющих предельным значениям обобщенных координат, не пересекающих запретные зоны. Новый способ задания области разрешенных конфигураций позволяет сократить время, необходимое для анализа информации о положении механизма манипулятора и запретных зон при виртуальном моделировании движений.

Выводы и заключение

Аналитические зависимости могут быть использованы в базах знаний, используемых при интеллектуальном управлении движением механизмов манипуляторов автономно функционирующих мобильных роботов в заранее известных сложноорганизованных средах.

Список источников

- Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. [и др.]. Интеллектуальные робототехнические системы: принципы построения и примеры реализации. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 11. С. 14–23.
- Ющенко А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18.

3. Григорьев С. Н., Андреев А. Г., Ивановский С. П. Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 31–34.
4. Tsukamoto H. K., Takubo T., Ohara K. [et al.]. Virtual impedance model for obstacle avoidance in a limb mechanism robot // IEEE International Conference on Information and Automation, Jun. 20–23. China, Harbin. 2010. P. 729–734.
5. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. A model-based manipulation system with skill-based execution // IEEE Trans. Rob. and Autom., 1992. Vol. 8, № 5. P. 535–544.
6. You B., Zou Y., Xiao W., Wang J. Telerobot control system based on dual-virtual model and virtual force // International forum on Strategic Technology (IFOST 2010). 2010. P. 246–250.
7. Смирнов А. В., Беззубцев А. Ю. Автоматическое передвижение роботизированного подвижного технического средства с построением схемы исследуемого помещения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 6, т. 17. С. 395–400.
8. Щербаков В. С., Корьгов М. С. Результаты сравнительного анализа алгоритмов планирования траектории движения объекта с учетом его угловых координат в трехмерном пространстве с препятствиями // Вестник СибАДИ. 2011. Вып. 1 (19). С. 68–75.
9. Mitchell S. Fuzzy logic decision making for autonomous robotic applications // Awareness Science and Technology (iCAST 2014). IEEE 6th International Conference on. 2014. P. 1–6.
10. Лопатин П. К. Компьютерная имитация управления манипуляционными роботами в неизвестной среде на основе точного и упрощенного алгоритмов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 8. С. 7–14.
11. Lopatin P. Investigation of a Target Reachability by a Manipulator in an Unknown Environment // International Conference on Mechatronics and Automation. 2016. August 7–10, Harbin, China. P. 37–42.
12. Притыкин Ф. Н., Нефедов Д. И. Вычисление траектории движения механизма манипулятора в пространстве обобщенных координат при наличии запретных зон в рабочем пространстве // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1, т. 4. С. 178–182.
13. Притыкин Ф. Н., Нефедов Д. И. Исследование поверхностей, задающих границы области разрешенных конфигураций механизма мобильного манипулятора при наличии запретных зон // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 6, т. 17. С. 404–413.
14. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. Киев: Наукова Думка, 1982. 252 с.

ПРИТЫКИН Федор Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР».
Адрес для переписки: pritykin@mail.ru
НЕФЕДОВ Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры «Инженерная геометрия и САПР».
Адрес для переписки: 3demon@bk.ru

Для цитирования

Притыкин Ф. Н., Нефедов Д. И. Исследование влияния положения запретной зоны на форму и положение области разрешенных конфигураций манипулятора // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 1. С. 19–24.

Статья поступила в редакцию 20.06.2017 г.
© Ф. Н. Притыкин, Д. И. Нефедов

INVESTIGATION OF EXCLUSION ZONE EFFECT ON SHAPE AND POSITION OF REGION OF ALLOWED MANIPULATOR CONFIGURATIONS

F. N. Pritykin, D. I. Nefedov

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The results of investigations related to the development of technologies for the analytical designation of allowed configurations in the space of generalized coordinates are presented. All allowed configurations in the space of generalized coordinates are represented by a geometric object. This object is defined analytically using set of its bounding kinematic surfaces and set theory. The dependencies obtained allow us to define the region of allowed configurations being the knowledge base for the intelligent control of the motion of the mechanism in space.

Keywords: the space of generalized coordinates, area of allowed configurations, kinematic surfaces, virtual simulation of robot motions, restricted areas.

References

1. Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V. [et al.]. Intellektual'nyye robototekhnicheskiye sistemy: printsipy postroyeniya i primery realizatsii. Chast' 1 [Intelligent robotic systems: principles of construction and examples of implementation. Part 1] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2004. No. 11. P. 14–23. (In Russ.).
2. Yushchenko A. S. Intellektual'noye planirovaniye v deyatel'nosti robotov [Intellectual planning in the activity of robots] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2005. No. 3. P. 5–18. (In Russ.).
3. Grigor'yev S. N., Andreyev A. G., Ivanovskiy S. P. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya promyshlennoy robototekhniki [The current state and prospects for the development of industrial robotics] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2013. No. 1. P. 31–34. (In Russ.).
4. Tsukamoto H. K., Takubo T., Ohara K. [et al.]. Virtual impedance model for obstacle avoidance in a limb mechanism robot // *IEEE International Conference on Information and Automation*, Jun. 20–23. China, Harbin. 2010. P. 729–734. (In Engl.).
5. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. A model-based manipulation system with skill-based execution // *IEEE Trans. Rob. and Autom.*, 1992. Vol. 8, no. 5. P. 535–544. (In Engl.).
6. You B., Zou Y., Xiao W., Wang J. Telerobot control system based on dual-virtual model and virtual force // *International forum on Strategic Technology (IFOST 2010)*. 2010. P. 246–250. (In Engl.).
7. Smirnov A. V., Bezzubtsev A. Yu. Avtomaticheskoye peredvizheniye robotizirovannogo podvizhnogo tekhnicheskogo sredstva s postroyeniym skhemy issleduyemogo pomeshcheniya [Automatic movement of the robotized mobile technical means with the construction of the scheme of the room under examination] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2016. No. 6, vol. 17. P. 395–400. (In Russ.).
8. Shcherbakov V. S., Korytov M. S. Rezul'taty sravnitel'nogo analiza algoritmov planirovaniya trayektorii dvizheniya ob'yekta s uchetom ego uglovyykh koordinat v trekhmernom prostranstve s prep'yatstviyami [Results of a comparative analysis of the algorithms for planning the trajectory of an object with allowance for its angular coordinates in a three-dimensional space with obstacles] // *Vestnik SibADI. Vestnik SibADI*. 2011. Issue 1 (19). P. 68–75. (In Russ.).
9. Mitchell S. Fuzzy logic decision making for autonomous robotic applications // *Awareness Science and Technology (iCAST 2014)*. IEEE 6th International Conference on. 2014. P. 1–6. (In Engl.).
10. Lopatin P. K. Komp'yuternaya imitatsiya upravleniya manipulyatsionnymi robotami v neizvestnoy srede na osnove tochnogo i uproshchennogo algoritmov [Computer simulation of manipulation robots control in an unknown medium on the basis of exact and simplified algorithms] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2006. No. 8. P. 7–14. (In Russ.).
11. Lopatin P. Investigation of a Target Reachability by a Manipulator in an Unknown Environment // *International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016. August 7–10, Harbin, China. P. 37–42. (In Engl.).
12. Pritykin F. N., Nefedov D. I. Vychislenie traektorii dvizheniya mekhanizma manipulyatora v prostranstve obobshchennykh koordinat pri nalichii zapretnykh zon v rabochem prostranstve [Calculation of trajectories depending on the presence of forbidden zones in the workspace] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016. No. 1, vol. 4. P. 178–182. (In Russ.).
13. Pritykin F. N., Nefedov D. I. Issledovanie poverkhnostey, zadayushchikh granitsy oblasti razreshennykh konfiguratsiy mekhanizma mobil'nogo manipulyatora pri nalichii zapretnykh zon [Study of the surfaces defining the area boundaries of the allowable configurations of the mobile manipulator mechanism with the available forbidden zones] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. Mechatronics, Automation, Management*. 2016. No. 6. Vol. 17. P. 407–413. DOI: 10.17587/mau.17.407-413. (In Russ.).
14. Rvachev V. L. Teoriya R-funktsiy i nekotoryye eye prilozheniya [Theory of R-functions and some of its applications]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1982. 252 p. (In Russ.).

PRITYKIN Fedor Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Engineering Geometry and CAD Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
Address for correspondence: pritykin@mail.ru
NEFEDOV Dmitriy Igorevich, Post-graduate Student of the Engineering Geometry and CAD Department, OmSTU, Omsk.
Address for correspondence: 3demon@bk.ru

For citations

Pritykin F. N., Nefedov D. I. Investigation of exclusion zone effect on shape and position of region of allowed manipulator configurations // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2017. Vol. 1, no. 1. P. 19–24.

Received 20 June 2017.
© F. N. Pritykin, D. I. Nefedov