

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ КРИВОЙ, ЗАДАЮЩЕЙ УГОЛ СЕРВИСА РУКИ АНДРОИДНОГО РОБОТА МЕТОДОМ СИНТЕЗА МАЛЫХ ДВИЖЕНИЙ

Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов

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

Излагается обобщённый метод определения телесного угла сервиса на основе синтеза движений по заданным направлениям оси схватоносителя при неподвижном центре захвата. В качестве примера определен телесный угол руки андроидного робота, образованный продольной осью схватоносителя. Сущность метода основана на исследовании множеств положений конфигураций, задающих крайние положения точек развертки сферы единичного радиуса, которая задаёт телесный угол сервиса. На основе этого определена сферическая кривая, задающая форму искомого телесного угла.

Ключевые слова: механизмы манипуляторов, угол сервиса, синтез движений механизмов, манипулятивность, робототехника, выходное звено.

Введение

При моделировании процессов перемещения объектов манипулирования с использованием роботов необходимо на начальных этапах выяснять двигательные возможности и собственные свойства исполнительных механизмов [1–4]. Двигательные возможности механизмов манипуляторов так же необходимо учитывать при интеллектуальном управлении движением робототехнических систем [5–8]. Одной из задач на этом этапе является определение угла сервиса. Решение данной задачи на виртуальном уровне возможно с помощью моделирования малых движений механизмов манипуляторов по вектору скоростей выходного звена с обеспечением заданного фиксированного положения центра выходного звена. Заметим, что обход запретных зон при моделировании движений возможен только при наличии двигательной избыточности. Эту избыточность определяют разностью $p = n - r$, где параметр n соответственно задает размерность вектора обобщенных скоростей Q механизма манипулятора (или число обобщенных координат), r — размерность вектора скоростей выходного звена V . В работе [9] приведен способ определения угла сервиса на основе использования векторного уравнения замкнутости эквивалентного механизма. Однако при сложной структуре кинематических цепей механизмов манипуляторов, заданных различных предельных значений обобщенных координат и двигательной избыточности, равной двум и более, использование указанного способа затруднено. В работе [10] предложен способ определения телесного угла на основе исследования линейной зависимости векторов V и Q [11, 12]. Однако синтез движений оси схватоносителя в различных направлениях при неподвижном центре захвата в указанной работе не исследовался, а определялись лишь отдельные положения оси схватоносителя, соответствующие допустимым значениям вектора обобщенных скоростей для заданной конфигурации. Изображения указанного угла серви-

са, полученного в работе [10], не в полной мере графически отражают двигательную избыточность и манипулятивность манипулятора в различных точках конфигурационного пространства с учётом заданных предельных значений обобщенных координат. В работе [13] предложен обобщенный способ определения угла сервиса с обеспечением синтеза движений оси схватоносителя по часовой и против часовой стрелки при неподвижном центре захвата для плоских механизмов манипуляторов. В данных работах исследовались плоские семизвенные механизмы манипуляторов, имеющие вращательные и поступательные кинематические пары. Однако в этих работах предложенный метод определения угла сервиса может быть использован только для плоских механизмов манипуляторов, имеющих различное число обобщенных координат и различную структуру кинематических цепей. В настоящей работе продолжены геометрические исследования, связанные с определением телесного угла сервиса для механизма руки андроидного робота с использованием синтеза движений оси схватоносителя по различным направлениям при неподвижном центре захвата.

Теория

Сущность предлагаемого метода основана на нахождении такой конфигурации, при которой угол сервиса в заданном секторе развёртки сферы единичного радиуса увеличивается [10]. Данная конфигурация находится реализацией дискретных значений векторов Q из области допустимых значений. Область допустимых значений вектора Q указанного механизма для различных конфигураций исследована в работах [14, 15]. Проведенные в работе исследования позволяют геометрическим методом оценить такие собственные свойства манипуляторов, как манипулятивность и маневренность для заданных предельных значений обобщенных координат.

Пусть задан пространственный семизвенный механизм руки андроидного робота AR600E (рис. 1а).

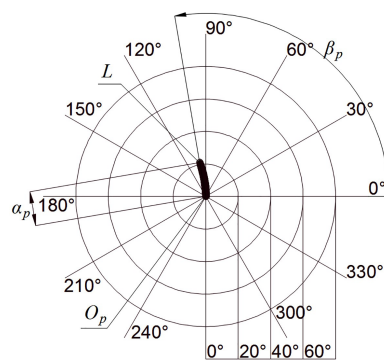
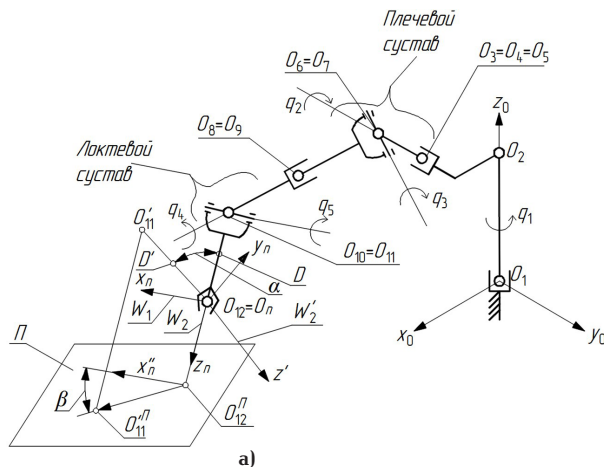


Рис. 1. Определение параметров, задающих положение точки L на развёртке сферы:

а) кинематическая схема механизма руки андроида и положение углов α и β в инерциальной системе координат;

б) положение точки L на развёртке сферы

Fig. 1. Determination of the parameters defining the position of the point L on the development of the sphere:

a) the kinematic scheme of the arm's mechanism of the android robot and the position of the angles α and β in the inertial coordinate system;

b) position of the point L on the development of the sphere

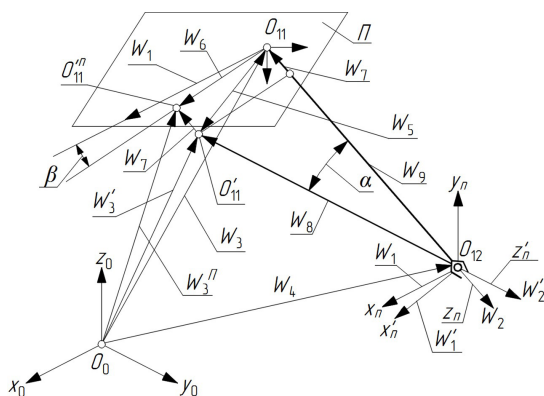


Рис. 2. Определение углов α и β в инерциальной системе координат O_0 , задающих положение точки L на развёртке сферы

Fig. 2. The determination of the angles α and β in the inertial coordinate system O_0 defining the position of the point L on the development of the sphere

На рисунке показано положение системы координат $O_n x_n y_n z_n$, связанной с характерной точкой кисти руки, движение которой осуществляется по заданной траектории.

Точка $O_{12} = O_n$ на рисунке определяет центр выходного звена, который не должен отклоняться от заданной точки траектории на заданную величину δ , называемую точностью позиционирования. При проведении исследований значение параметра принято $\delta = 1$ мм.

Реализация векторов Q , из области допустимых значений [10] обеспечивает новое положение кинематической цепи и оси схватоносителя. Под реализацией понимается новое положение кинематической цепи, определяемое значениями обобщённых координат, которые получают путём сложения обобщённых координат старой конфигурации и рассчитанных значений компонент вектора Q по уравнениям (при принятом допущении $\Delta q \approx \dot{q}_i$):

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1 + \dot{q}_1, \\ &\dots, \\ q_i &= q_i + \dot{q}_i, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{q}_i$ — компоненты вектора Q .

С целью графического представления телесного угла U для пространственного шестизвённого механизма руки (рис. 1а) изобразим условную развёртку поверхности сферы Φ единичного радиуса. Между точками этой условной развёртки и точками сферы Φ существует взаимно однозначное соответствие. Любая точка D поверхности сферы Φ радиуса $O_n D$ задаёт единственную точку L на этой развёртке, определяемую полярными координатами α_p и β_p (рис. 1б). Отрезок $O_n D$ при этом равен единице (рис. 1). Развёртка, как видно из рис. 1б, имеет форму круга. В этом случае совокупность близлежащих крайних точек L будет определять основную развёртку некоторого участка поверхности сферы Φ с центром в точке O_p .

Множеству отдельных положений оси $O_n z_n$ схватоносителя (рис. 1) при реализации значений вектора Q и $\delta = 1$ мм будут соответствовать положения точки L на развёртке сферы единичного радиуса, принадлежащие различным секторам развёртки. Зададим сектор развёртки углами β_p^{max} и β_p^{min} . В данном секторе угол β_p изменяется в интервале $\beta_p^{min} \leq \beta_p \leq \beta_p^{max}$.

Точка L на развёртке сферы определяется параметрами α_p и β_p . Параметр α_p на этой развёртке задаёт расстояние от центра круга O_p до точки L развёртки и определяется углом, образованным между начальным положением продольной оси схватоносителя z_n и осью схватоносителя z'_n , полученной реализацией вектора Q (рис. 1а). Единичные направляющие векторы этих осей определяют векторы W_2 и W'_2 (рис. 2). Угол задаёт направление при нахождении точки L на условной развёртке с помощью полярных координат (рис. 1б). Этот угол определяется углом β между проекцией вектора W_6 оси схватоносителя на плоскость $\Pi \perp O_n z_n$ и вектором W_1 , задающим направление оси x_n (рис. 1а и рис. 2) $W_1 \subset \Pi$. Вектор W_6 находится проекцией вектора W_5 на плоскость Π . При этом вектор $W_5 = W_3 - W'_3$. Для нахождения точки O'_{11} (рис. 2) используется вектор $W_3'' = W_3' + W_7$. При этом вектор W_7 является проекцией вектора W_5 по направлению вектора W_9 .

Положение вектора W_7 определяется точками O'_{11} и O''_{11} и векторами W_8 и W_9 , где $W_8 = W_4 - W'_3$, $W_9 = W_4 - W_3$. Точка O'_{11} является проекцией точ-

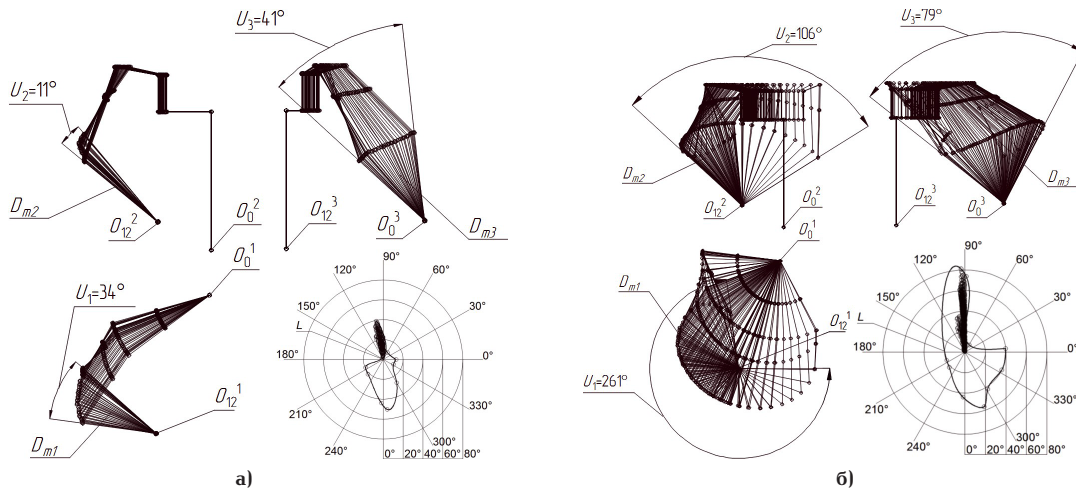


Рис. 3. Проекция угла α и положение точки L на развёртке сферы при синтезе движения в одном из секторов развёртки для конфигурации $q_i = (25^\circ, 20^\circ, -65^\circ, 25^\circ, -65^\circ)$ при:
 а) $-75^\circ \leq q_i \leq 75^\circ$; б) $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$

Fig. 3. Projections of the angle α and the position of the point L on the development of the sphere during the synthesis of motion in one of the sectors for the configuration $q_i = (25^\circ, 20^\circ, -65^\circ, 25^\circ, -65^\circ)$ at:
 а) $-75^\circ \leq q_i \leq 75^\circ$; б) $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$

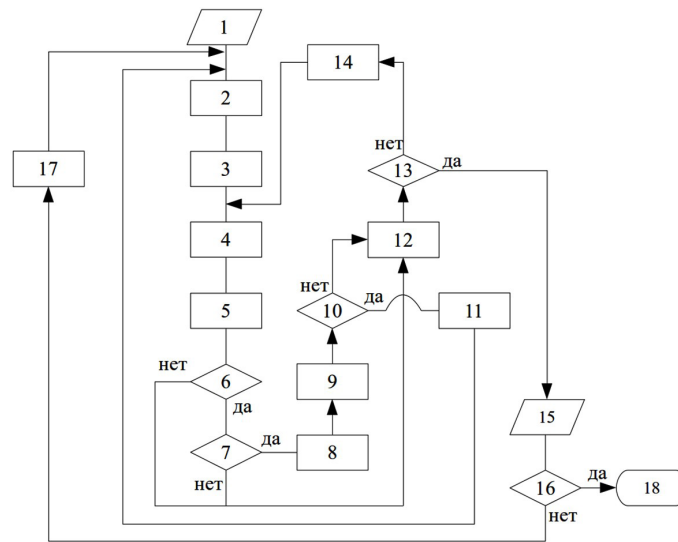


Рис. 4. Схема алгоритма вычисления положения крайних точек L , определяющих сферическую кривую l_p на развёртке сферы
 Fig. 4. The scheme of the algorithm for calculating the position of the extreme points L defining the spherical curve l_p on the development of the sphere

ки O'_{11} на плоскость Π . Оси z_n и x_n принадлежат системе координат, связанной с выходным звеном первоначально заданной конфигурации (рис. 1а). Косинусы углов α и β вычисляются скалярными произведениями векторов (рис. 2):

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{W_2 \cdot W'_2}{|W_2| \cdot |W'_2|}; \\ \cos \beta &= \frac{W_1 \cdot W_6}{|W_1| \cdot |W_6|}. \end{aligned} \quad (2)$$

Построим совокупность конфигураций и положений оси схватоносителя, для которых значение угла α будет увеличиваться. При этом движение оси схватоносителя будет происходить в заданном секторе развёртки. Следующая конфигурация строится, если значение угла α будет больше значения угла, рассчитанного на предыдущей итерации. Заметим, что при проведении исследований принимает-

ся допущение $O_{12} \approx O'_{12}$. Точки O'_{11} и O'_{12} определяют реализацией мгновенного состояния механизма руки. Начальное положение конфигурации руки антропного робота, определяющей положение точки O_{12}' зададим значениями обобщенных координат $q_i(25^\circ, 20^\circ, -65^\circ, 25^\circ, -65^\circ)$. На каждом шаге расчетов определяют максимальное значение угла α^{max} из значений α и α' , где α и α' — значение угла соответственно на k -ой и $k+1$ итерации.

$$(\max \alpha, \alpha') \rightarrow \alpha^{max}. \quad (3)$$

После определения конфигурации $k+1$, которая удовлетворяет условиям:

$$\begin{aligned} \alpha_p^{k+1} &> \alpha_p^{max}; \\ \beta_p^{min} &> \beta > \beta_p^{max}, \end{aligned} \quad (4)$$

находят следующую конфигурацию $k+2$ с сохранением списка обобщенных координат $q_{ip} = q_i$.

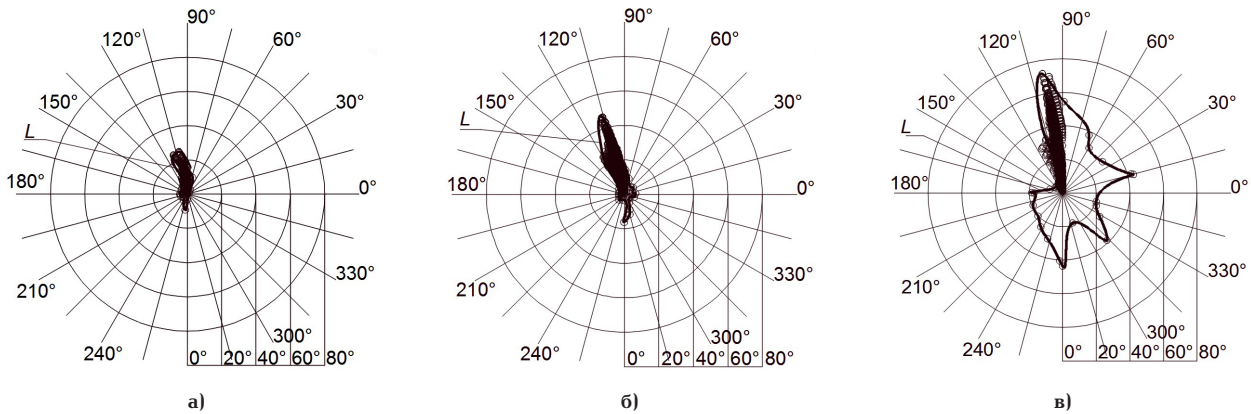


Рис. 5. Положение сферической кривой L_p на развёртке сферы при $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$ для конфигураций:
 а) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 60^\circ, 10^\circ)$; б) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 35^\circ, 35^\circ)$; в) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 60^\circ)$;
 Fig. 5. The position of the spherical curve L_p on the development of the sphere at $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$ for configurations:
 а) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 60^\circ, 10^\circ)$; б) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 35^\circ, 35^\circ)$; в) $q_i = (25^\circ, 20^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 60^\circ)$

Значения $\beta_p^{\min}$ и $\beta_p^{\max}$ определяют сектор развёртки поверхности сферы. На рис. 3а указанный сектор задают соответственно значения $\beta_p^{\min} = 90^\circ$ и $\beta_p^{\max} = 120^\circ$. При этом за исходно заданную конфигурацию принимается конфигурация $k+1$, для которой выполняется условие (4).

Задание различных значений углов $\beta_p^{\min}$ и $\beta_p^{\max}$ позволяет последовательно выполнять синтез движений оси схватоносителя при нахождении точки O_{12} внутри сферы радиуса 1 мм в заданных секторах развёртки.

Алгоритм вычисления положений точек L на развёртке сферы представлен на рис. 4.

Обозначения, принятые на схеме: 1 — ввод значений $q_i (q_1, q_2, \dots, q_5)$, $q_i^{\max}$, $q_i^{\min}$, $\alpha_p^{\max} = 0$, V , $\beta_p^{\min}$, $\beta_p^{\max}$, $\delta_{\min} = 1$ мм, $q_{ip} = q_i$; 2 — $q_i = q_{ip}$; 3 — вычисление матриц $M_0 k$, определяющих положение звеньев и значений векторов $W_1 - W_4$; 4 — расчёт матриц $M_0 k$, векторов W'_1, W'_2, W'_3 и $W_5 - W_9$ и реализации вектора Q ; 5 — вычисление погрешностей линеаризации δ_p ; 6 — $\delta_p < \delta$; 7 — $q_i^{\min} < q_i^{\max}$; 8 — вычисление α и β ; 9 — определение $\alpha^{\max}$ (3); 10 — $\alpha > \alpha^{\max}$, $\beta_p^{\min} > \beta > \beta_p^{\max}$; 11 — $q_{ip} = q_i$; 12 — изменение параметров k_i , задающих значение вектора Q при наличии двигательной избыточности [10, 14] $k_i = k_i + 1$; 13 — $k_i > k_i^{\max}$ [14]; 14 — расчёт вектора Q ; 15 — вывод координат последней точки L , принадлежащей сферической кривой L_p и сектору β_p , где $\beta_p^{\min} \leq \beta < \beta_p^{\max}$ (рис. 3); 16 — $\beta_p^{\max} > 360^\circ$; 17 — задание следующего сектора развёртки $\beta_p^{\min}$ и $\beta_p^{\max}$; 18 — конец.

Результаты экспериментов

На рис. 3а представлены результаты исследований, связанных с определением проекций угла α , образованного между крайними положениями оси схватоносителя, на трех плоскостях проекций и на условной развёртке сферы Φ . При данном синтезе движений оси схватоносителя точка L развёртки смещается в области заданного сектора развёртки. Предельные значения обобщённых координат заданы в интервале $-75^\circ \leq q_i \leq 75^\circ$. На рис. 3б данный угол соответственно построен для интервала $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$. Углы U_1 , U_2 и U_3 на (рис. 3а, б) определяют проекции угла α . На рис. 3 отображена линейчатая поверхность D_m с помощью её горизонтальной, фронтальной и профильной проекций D_{m1} , D_{m2} и D_{m3} . Линейчатая

поверхность D_m образована движением оси схватоносителя (заданной отрезком $O_{12}O_{11}$ (рис. 1)) при неподвижном центре захвата O_{12} . Данная точка при синтезе движений не выходит за пределы окружности $\delta = 1$ мм. Линейчатая поверхность в полной мере характеризует маневренность манипулятора. Изображения проекций D_{m1} , D_{m2} и D_{m3} области D_m дают лишь некоторое геометрическое представление об указанной маневренности манипулятора в заданном секторе развёртки сферы при заданных значениях $q_i^{\max}$ и $q_i^{\min}$.

На рис. 3а, б отражено движение оси схватоносителя при заданной точности позиционирования $\delta = 1$ мм и модуле вектора $|V(V_x, V_y, V_z)| - 1$ мм/т. Вектор V при этом параллелен оси x неподвижной системы координат. На рис. 3а, б показаны положения точки L в заданном секторе. Крайние точки данной траектории задают положение сферической кривой L_p . Площадь замкнутого контура заданного этой кривой определяет телесный угол сервиса руки андроидного робота.

На рис. 5 показано положение сферической кривой для трех конфигураций, заданных значениями обобщённых координат $q_i (25^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 60^\circ, 10^\circ)$, $q_i (25^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 35^\circ, 35^\circ)$ и $q_i (25^\circ, 20^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 60^\circ)$. Предельные значения обобщённых координат приняты $-120^\circ \leq q_i \leq 120^\circ$.

Основные результаты и выводы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Форма и положение сферической кривой L_p в значительной степени зависят от положения кинематической цепи манипулятора.

2. При вычислении вектора Q , следует использовать максимальные значения параметров $k_i^{\max}$ [14]. При этом значительно сокращается время расчетов при нахождении сферической кривой.

Предлагаемый алгоритм вычисления проекций телесного угла сервиса и сферической кривой позволяет с определенным допущением определять указанный угол. Данный алгоритм характеризуется обобщенной универсальностью и может быть использован для манипуляторов, имеющих произвольную структуру кинематических цепей, произвольную степень двигательной избыточности и заданные различные предельные значения обобщённых координат. Разработанный метод изме-

нения ориентации ВЗ может быть использован в интеллектуальных системах управления роботов с целью смены положения конфигурации по отношению к заданным запретным зонам.

Список источников

1. Lopatin P. Investigation of a target reachability by a manipulator in an unknown environment // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2016 August 7–10. Harbin, China. 2016. P. 37–42.
2. Егоров А. С., Лопатин П. К. Использование алгоритма полиномиальной аппроксимации в задаче управления манипулятором в среде с неизвестными препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3. С. 24–29.
3. Карташев В. А., Богуславский А. А., Карташев В. В. [и др.]. Задачи управления манипуляционным роботом для обеспечения безопасности перемещений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 1. С. 24–28.
4. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Крахмалев Г. Н. Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 10. С. 664–668. DOI: 10.17587/mau.18.664-669.
5. Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И. [и др.]. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 10, № 8. С. 545–555. DOI: 10.17587/mau.16.545-555.
6. Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Повышение адаптивных свойств автономных роботов на базе интеллектуальных технологий // Экстремальная робототехника. 2015. № 1 (1). С. 59–67.
7. Юсупов Р. М., Тимофеев А. В. Интеллектуализация процессов управления и навигации робототехнических систем // Экстремальная робототехника. 2014. Т. 1, № 1. С. 16–21.
8. Mitchell S. Fuzzy logic decision making for autonomous robotic applications // IEEE 6th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST). Paris, 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICAWSST.2014.6981843.
9. Лебедев П. А. Аналитический метод определения коэффициента сервиса манипулятора // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 5. С. 93–98.
10. Притыкин Ф. Н. Графическое представление телесного угла и окружающего пространства руки при реализации мгновенных состояний манипуляторов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 3. С. 93–101.

11. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985. 344 с.

12. Корендяев А. И., Саламандра Б. П., Тывес П. Н. Определение числа степеней свободы исполнительного органа промышленного робота // Машиноведение. 1985. № 6. С. 44–53.

13. Pritykin F., Gordeev O. Defining a service angle for planar mechanisms of manipulators based on the instantaneous states analysis // MEACS2015. IOP Conf. Series Materials Science and Engineering. 2016. № 124. P. 1–7. DOI:10.1088/1757-899X/124/1/012025.

14. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Исследование размеров и формы области в многомерном пространстве обобщенных скоростей, задающей допустимые мгновенные состояния механизма андроида робота // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 29–34.

15. Pritykin F. N., Nebritov V. I. Studying tolerance range of generalized velocities vector under android motion synthesis // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016, Nov. 15–17, 2016. 7819064. DOI:10.1109/Dynamics.2016.7819064.

ПРИТЫКИН Федор Николаевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР».

SPIN-код: 7628-8023

ORCID: 0000-0001-8081-6840

AuthorID (SCOPUS): 6507269253

Адрес для переписки: pritykin@mail.ru

НЕБРИТОВ Валерий Иванович, аспирант кафедры «Инженерная геометрия и САПР».

SPIN-код: 8196-1026

AuthorID (SCOPUS): 57193406556

Адрес для переписки: vnebritov@gmail.com

Для цитирования

Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Определение сферической кривой, задающей угол сервиса руки андроида робота методом синтеза малых движений // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 3. С. 71–76. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-71-76.

Статья поступила в редакцию 27.06.2018 г.

© Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов