



УДК 621.757

Махмутов М.М. – кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: maratmax@yandex.ru

Сахапов Р.Л. – доктор технических наук, профессор

E-mail: rustem@sakhapov.ru

Земдиханов М.М. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: mr.minsur@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Прямая и обратная задача кинематической точности строительных роботов

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы кинематической точности манипуляционных промышленных роботов. Получены зависимости, связывающие суммарную погрешность позиционирования робота через погрешности координат, параметры программируемого манипулятора и его положение в рабочей зоне.

Для заданного положения захватного устройства робота рассчитаны обобщенные координаты, но эти значения обычно находятся путем решения обратных задач о положениях манипулятора. Поставлена и решена прямая и обратная задача кинематической точности манипуляционных роботов.

Ключевые слова: кинематическая точность, погрешность позиционирования, линейная и угловая ошибка программирования, прямая и обратная задачи кинематической точности.

Введение

Реализация заданных положений схвата с необходимой точностью имеет важное значение при работе манипулятора.

Точность позиционирования манипулятора оценивается его погрешностью позиционирования, отклонением фактического положения выходного звена исполнительного механизма от установившегося значения.

Погрешность позиционирования оценивается в линейных и угловых величинах [1, 2].

Точность позиционирования промышленных роботов является его важнейшей и комплексной характеристикой, от которой непосредственно зависит выполнение заданной технологической операции.

Погрешность позиционирования робота зависит от многих факторов: от точности обработки системой управления [3, 4], управляемых, обобщенных координат исполнительного механизма, от точности обработки деталей конструкции, от деформации звеньев основного и передаточного механизмов и других факторов.

В различных условиях функционирования робота наиболее важную роль могут играть различные факторы. Ниже рассмотрим одну из важнейших составляющих – кинематическую точность робота.

Основная часть

Кинематическая точность робота – эта погрешность положения выходного звена исполнительного механизма робота, возникающего за счет ошибок обработки приводами и системы управления программных значений обобщенных управляемых координат.

Для большинства промышленных роботов средней грузоподъемности от 10 до 50 кг эти ошибки являются основными, влияющими на основную погрешность позиционирования [4, 5].

Под программируемыми значениями обобщенных координат будем понимать их значения, найденные для заданного положения захватного устройства робота, но эти значения обычно определяются путем решения обратных задач о положениях манипулятора [6, 7].

Действительные значения обобщенных координат манипулятора отличаются от программных на величину Δq_i ($i=1, \dots, n$), где n – число степеней свободы системы, поэтому действительное положение схвата будет отличаться от заданного.

Для определения линейных ошибок с захватным устройством свяжем систему координат Ox и z и ее заданное программное положение $O_n x_n y_n z_n$ будет отличаться от действительного положения $O_d x_d y_d z_d$ (рис. 1).

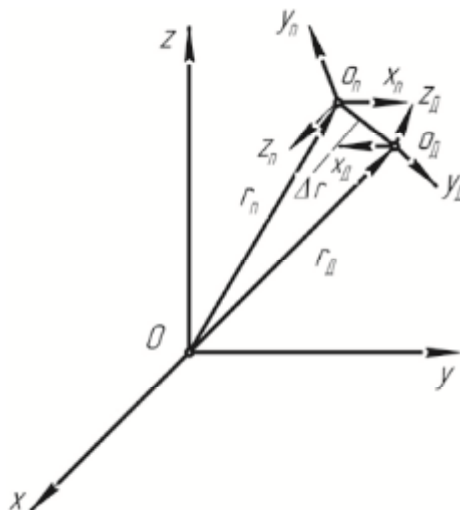


Рис. 1. К расчету ошибки позиционирования робота

Величину $\Delta \vec{r} = \vec{r}_n - \vec{r}_d$ будем называть линейной ошибкой манипулятора, а угол на который следует повернуть систему $O_n x_n y_n z_n$, чтобы сделать ее оси параллельными соответствующим осям системы $O_d x_d y_d z_d$, называется угловой ошибкой робота. Эйлера-Даламбер [3] на основе теоремы доказал возможность поворота.

Произвольной точки захватного устройства с радиус-вектором определится:

$$\vec{r} = \vec{r}(q_i), i=1, \dots, n, \quad (1)$$

где n – число степеней подвижности манипулятора.

Продифференцировав последнее выражение, получим:

$$d\vec{r} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \vec{r}}{\partial q_i} dq_i. \quad (2)$$

Решая дифференциалы, найдем линейную ошибку:

$$\Delta \vec{r} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \vec{r}}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (3)$$

где q_i – ошибки обобщенных координат.

Координаты вектора $\vec{r}$ в неподвижной системе координат можно определить путем использования умножения координат точки схвата в системе координат, связанной со схватом на матрицы, определяющие относительное положение звеньев, следующим образом:

$$\|\vec{r}\| = M_1, M_2, \dots, M_n, \|\vec{r}_n\|, \quad (4)$$

где $\|\vec{r}\|$ – столбец координат вектора $\vec{r}$ в неподвижной системе координат, $\|\vec{r}_n\|$ – столбец координат точки схвата в системе координат, связанного со схватом M_i ($i = 1, \dots, n$) – матрицы перехода четвертого порядка от звена i и звена i_1 .

При большом числе степеней свободы выражение для координат вектора $\vec{r}$ оказываются весьма громоздкими. Кроме того, для получения выражения линейной ошибки эти выражения необходимо дифференцировать, что весьма трудоемко. Далее по формуле определим линейную ошибку не содержащую операцию дифференцирования. Считая векторы относительных угловых скоростей скользящими, запишем выражение вектора линейной скорости точки схвата в виде:

$$\vec{v} = \sum_j \vec{\omega}_j \cdot \vec{r}_{jn} + \sum_i \vec{v}_i, \quad (5)$$

где j – номер вращательной пары; i – номер поступательной пары.

Но

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_j &= \dot{\beta}_j \cdot \bar{e}_j, \\ \bar{v}_i &= \dot{s}_i \cdot \bar{e}_i,\end{aligned}\quad (6)$$

где e_j, e_i – орты соответственно вращательных и поступательных пар, ϕ_j, s_i – углы поворотов и перемещения в поступательных парах соответственно, определяемые по формулам: $\dot{\beta}_j = \frac{d\phi_j}{dt}$; $\dot{s}_i = \frac{ds_i}{dt}$.

Тогда на основе (4) получим:

$$d\bar{r} = \sum_j d\phi_j \cdot \bar{e}_j \cdot \bar{r}_j + \sum_i ds_i \cdot \bar{e}_i, \quad (7)$$

или в конечной форме выражение для линейной ошибки манипулятора:

$$\Delta\bar{r} = \sum_j \Delta\phi_j \cdot \bar{e}_j \cdot \bar{r}_j + \sum_i \Delta s_i \cdot \bar{e}_i, \quad (8)$$

где $\Delta\phi_j, \Delta s_i$ – ошибки соответственно во вращательных и поступательных парах.

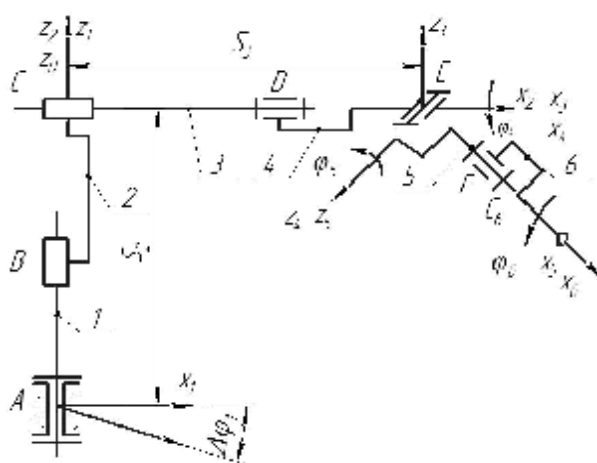


Рис. 2. Схема компоновки манипулятора

В частности погрешность положения выходного звена модульного робота РПМ-25, показанного на рис. 2 может быть представлена в виде:

$\Delta\bar{r}_6 = \Delta\bar{\varphi}_6 \cdot (\bar{e}_1 \cdot \bar{r}_{16}) + \Delta s_2 \cdot \bar{e}_2 + \Delta s_3 \cdot \bar{e}_3 + \Delta\bar{\varphi}_4 \cdot (\bar{e}_4 \cdot \bar{r}_{46}) + \Delta\varphi_5 \cdot (\bar{e}_5 \cdot \bar{r}_{56}) + \Delta\varphi_6 \cdot (\bar{e}_6 \cdot \bar{r}_6)$,
где $\bar{r}_{46}, \bar{r}_{56}, \bar{r}_6$ – радиус-векторы, определяющие положение точки схвата, относительно центров пар D, E и F соответственно.

Считая угол поворота малым, погрешность угла поворота запишем:

$$\Delta\bar{\varphi} = \sum_j \Delta\bar{q}_j = \sum_j \Delta q_j \cdot \bar{e}_j, \quad (9)$$

где Δq_j – ошибка обобщенной координаты во вращательной кинематической пары, $\bar{e}_j$ – орт оси шарнира j.

Так как векторы Δq_j и $\bar{e}_j$ заданы, то последнюю формулу запишем в виде:

$$\Delta\bar{\varphi} = \sum_j \prod L_j \cdot \Delta q_j \cdot \bar{e}_j, \quad (10)$$

где L_j – матрица перехода третьего порядка от системы номера j к системе j-1.

Возможность выполнения роботом заданной технологической операции определяется соотношением ошибки позиционирования задаваемой операцией и ошибок позиционирования реализуемой работы.

Практически важной является задача распределения ошибки позиционирования обычно задаваемой выполняемой технологической операцией на допустимые ошибки обработки приводами и системы управления.

В случае модульных промышленных роботов речь идет о назначении допустимых ошибок позиционирования модулей. Эта задача является достаточно неопределенной, так как заданную точность позиционирования робота можно обеспечить, устанавливая по-разному предельные ошибки модулей.

Одно из решений может быть построено на основе принципа равного влияния ошибок модулей на ошибку позиционирования схвата.

Пусть величина предельной абсолютной погрешности робота задана, тогда:

$$\Delta r \leq \sum_{j=1}^n \left| \frac{\partial r}{\partial q_j} \right| \cdot |\Delta q_j|. \quad (11)$$

Все слагаемые суммарной погрешности позиционирования от ошибок модулей должны равняться.

Тогда

$$\left| \frac{\partial r}{\partial q_1} \right| \cdot \Delta q_1 = \left| \frac{\partial r}{\partial q_2} \right| \cdot \Delta q_2 = \left| \frac{\partial r}{\partial q_3} \right| \cdot \Delta q_3 = \left| \frac{\partial r}{\partial q_n} \right| \cdot \Delta q_n = \frac{\Delta r}{n}, \quad (12)$$

где $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_n$ – ошибки обобщенных координат, $\bar{r}$ – радиус-вектор произвольной точки захватного устройства.

Откуда:

$$\Delta q_i = \frac{\Delta r}{n \cdot \left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial q_n} \right|}, (i = 1, \dots, n). \quad (13)$$

Последняя формула позволяет назначить требование по точности на обработку приводами значений обобщенных координат.

Заключение

Возможность выполнения роботом заданной технологической операции определяется соотношением ошибки позиционирования задаваемой операцией и ошибкой позиционирования реализуемой работы.

Для расчета позиционирования модульных промышленных роботов нужно правильно назначить допустимые ошибки позиционирования модулей. Данная задача является достаточно неопределенной, так как установленные по-разному предельные ошибки модулей меняют заданную точность позиционирования.

Список библиографических ссылок

1. Козырев Ю.П., Воробьев Е.И. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа. – М.: Изд-во Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Изд-во Физматгиз, 1963. – 660 с.
3. Козырев Ю.П. Промышленные роботы: справочник. – М.: Изд-во Машиностроение, 1983. – 376 с.
4. Лурье А.И. Аналитическая механика: справочник. – М.: Изд-во Физматгиз, 1961. – 824 с.
5. Махмутов М.М. Определение передаточной и переходной функций ходовой системы агрегата // Техника и оборудование для села, 2013, № 5. – С. 21-23.
6. Махмутов М.М. Оптимизация параметров конусности стойки устройства противоскольжения // Тракторы и сельхозмашины, 2013, № 6. – С. 31-33.
7. Махмутов М.М., Сахапов Р.Л., Обзор исследований по взаимодействию снежного покрова с различными рабочими органами коммунальных машин // Известия Самарского научного центра РАН, 2016, том 18, № 1. – С. 432-434.
8. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Теория функционирования механической энергии в строительных машинах // Механизация строительства, т. 77, 2016, № 8. – С. 17-21.
9. Габдуллин Т.Р., Загретдинов Р.В. Повышение производительности систем управления дорожно-строительной техникой при использовании систем глобального спутникового позиционирования // Известия КГАСУ, 2014, № 4 (26). – С. 397-402.
10. Габдуллин Т.Р. Разработка лесопильного узла к одноковшовому экскаватору // Механизация строительства, 2015, № 8 (854). – С. 6-8.

Makhmutov M.M. – candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: maratmax@yandex.ru

Sakhapov R.L. – doctor of technical sciences, professor,

E-mail: rustem@sakhapov.ru

Zemdikhanov M.M. – candidate of technical sciences, assistant professor

E-mail: mr.minsur@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Direct and inverse problem of kinematic accuracy of industrial robots

Resume

In the article was reviewed the questions of kinematic accuracy of manipulating industrial robots. Received dependences of linking the overall error positioning of the robot through an inaccuracy, parameters programmable manipulator and its position in the working area. Stated and solved the direct and inverse problem of kinematic accuracy manipulation robots.

The error of the robot positioning depends on many factors: the accuracy of the processing management system, controlled, generalized coordinates of the actuator, the accuracy of processing the details of construction, the deformation of the main units and gear mechanisms and other factors.

In various robot operating conditions the most important role can play a variety of factors. Below is a look at one of the major components – a kinematic robot accuracy.

Under the programmable values of the generalized coordinates will understand the value found for a given position of a gripper device of a robot, but these values are usually determined by solving the inverse problems about the provisions of the manipulator. Set and solved the direct and inverse kinematic precision manipulator robots.

Keywords: kinematic accuracy, accuracy linear and angular of position programming error, direct and inverse kinematic accuracy.

Reference list

1. Kozyrev Y.P., Vorobyev E.I. Industrial robots aggregate-modular. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 240 p.
2. Demidovich B.P., Maron I.A. Foundations of computational mathematics. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 660 p.
3. Kozyrev Y.P. Industrial robots. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 376 p.
4. Lurie A.I. Analytical mechanics. – M.: Fizmatgiz, 1961. – 824 p.
5. Makhmutov M.M. Determination of the transfer and transition functions running system potato unit // *Technica i oborudovanie dlya sela*, 2013, № 5. – P. 21-23.
6. Makhmutov M.M. Optimization of parameters of taper of the strut device chains // *Tractori i chelhozmachiny*, 2013, № 6. – P. 31-33.
7. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. A review of studies of the interaction of snow cover with various working bodies utility vehicles // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo chentra RAN*, 2016, vol. 18, № 1. – P. 432-434.
8. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. Theory of the functioning of the mechanical energy in construction machinery // *Mechanizasiya stroitelstva*, 2016, vol. 77, № 8. – P. 17-21.
9. Gabdullin T.R., Zagretidinov R.V. Improving the performance of control systems for road construction equipment with global positioning satellite // *Izvestiya KGASU*, 2014, № 4 (26). – P. 397-402.
10. Gabdullin T.R. the Development of the sawmill site to a shovel excavator // *Mechanizasiya stroitelstva*, 2015, № 8 (854). – P. 6-8.