

For citation:

Liutov A. G., Ryabov Y. V. Synthesis of the Technological Process for a Robotic Complex on the Basis of Knowledge, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 660–664.

DOI: 10.17587/mau.18.660-664

References

1. **Mitrofanov V. G., Kalachev O. N., Skhirtladze A. G.** CAD in engineering technology, Yaroslavl, Yaroslavl state technical University, 1995, 298 p. (in Russian).

2. **Sidorov A. A.** The Present and future of modeling of processes of processing of metals by pressure, *CAD and Graphics*, 2007, no. 10, pp. 78–79 (in Russian).

3. **Volnov I. N.** *Russian Foundryman*, 2007, no. 6, pp. 14–17 (in Russian).

4. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Polesin S. A.** *Vestnik USATU*, 2015, vol. 19, no. 3 (69), pp. 1–4 (in Russian).

5. **Liutov A. G., Ryabov Yu. V.** Model of complex automated process control engineering, *STIN*, 2016, no. 5, pp. 2–7.

6. **Ryabov S. U., Liutov A. G., Ryabov Yu. V., Vavilova A. V.** The Method of information exchange between software systems of automation of technological and production processes, *Software Products and Systems*, 2016, no. 4, pp. 113–117.

7. **W3C XML Schema Definition Language (XSD) 1.1 Part 1: Structures** W3C Recommendation 5 April 2012, available at: URL: <http://www.w3.org/TR/xmlschema11-1/>

УДК 62-529

DOI: 10.17587/mau.18.664-669

О. Н. Крахмалев, канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,

Д. И. Петрешин, д-р техн. наук, директор института, atsys@tu-bryansk.ru,

Г. Н. Крахмалев, аспирант, atsys@tu-bryansk.ru,

Брянский государственный технический университет

Математические модели систем управления для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов*

Рассмотрены математические модели систем управления промышленных роботов, позволяющие выполнить калибровку инструмента, закрепляемого на установочном фланце робота. Процедуры по калибровке выполняются при оснащении промышленного робота новым инструментом. Калибровка инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (TCP — Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в TCP. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента.

Ключевые слова: промышленные роботы, калибровка инструмента, математические модели, системы управления

Введение

Комплекс мероприятий по оснащению робота новым инструментом предусматривает выполнение процедуры калибровки этого инструмента перед его использованием в работе. Это необходимо для того, чтобы система управления промышленного робота могла правильно выполнять перемещение инструмента в рабочем пространстве робота. Для этого математические модели, описывающие преобразования координат в данной модели робота, должны быть дополнены математической моделью, сформированной для установленного инструмента. Математические модели, описывающие преобразования координат для инструмента, создаются системой управления автоматически при выполнении процедуры калибровки инструмента перед вводом нового инструмента в эксплуатацию. Созданные математические модели сохраняются в постоянной

памяти контроллера системы управления в библиотеке инструмента с указанием логического имени, присвоенного данному инструменту. В последующем при программировании движения промышленного робота в системе управления задается устанавливаемый на роботе инструмент путем присвоения специальному параметру логического имени выбранного инструмента.

Процедура калибровки инструмента выполняется в два этапа. Первый этап состоит в определении точки центра инструмента (TCP — Tool Center Point). Второй этап включает действия по определению ориентации прямоугольной системы координат, связываемой с инструментом, начало которой помещается в TCP. Данная статья посвящена исследованию второго завершающего этапа калибровки инструмента, а именно разработке математических моделей систем управления промышленных роботов, предназначенных для калибровки нового инструмента.

Промышленные роботы представляют собой многозвенные механические системы с последовательной структурой, звенья которых образуют друг с другом кинематические пары пятого класса и моделируются твердыми телами. Такие многозвен-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Брянского ГТУ в рамках внутреннего гранта № 135 за 2016 г., выделенного на разработку программно-математического обеспечения для моделирования и управления промышленными роботами и многокоординатными станками по программе развития научного направления "Мехатроника и робототехника".

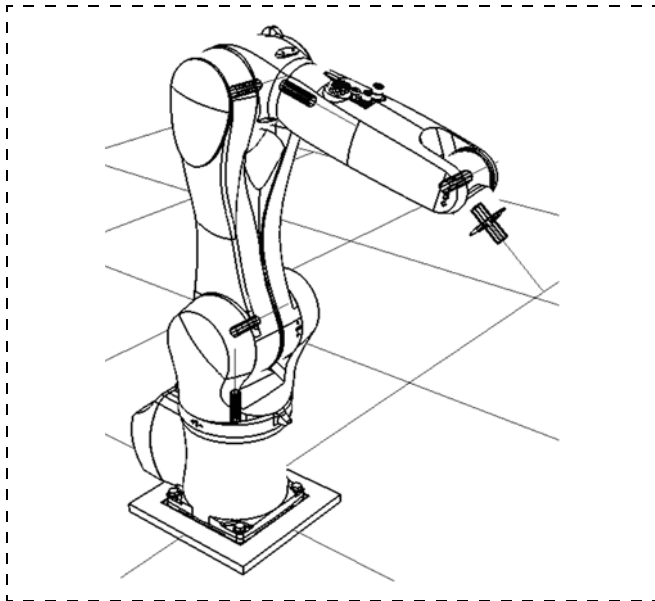


Рис. 1. Манипуляционная система промышленного робота KUKA KR6 AGILUS

ные механические системы называют манипуляционными системами. Пример манипуляционной системы промышленного робота KUKA KR6 AGILUS, имеющего шесть степеней подвижности, представлен на рис. 1, где изображены контуры звеньев робота и шарниры с указанием осей относительного вращения соединяемых ими звеньев. К последнему звену манипуляционной системы промышленного робота может быть жестко присоединен инструмент. Для этого в конструкции последнего звена предусматривается присоединительный фланец. На рис. 1 присоединительный фланец изображен в форме диска, внутри диска помещен шарнир, ось вращения которого перпендикулярна плоскости диска.

Системы координат

Для описания относительного движения звеньев манипуляционных систем используют математические модели, обеспечивающие преобразование координат между системами координат, связываемыми с каждым звеном, и системой координат, связываемой с неподвижным основанием. Существуют разные методы задания связанных со звеньями систем координат и построения математических моделей, обеспечивающих преобразования координат между ними, например, метод Денавита — Хартенберга [1—4] или метод двух связываемых с каждым звеном систем координат [5]. Не вникая в отличительные особенности предложенных методов, достаточно отметить, что оба эти метода сводятся к составлению матриц, обеспечивающих преобразования однородных координат вида

$$A_{0,k} = A_0, 1 A_{1,2} \dots A_{i-1,i} \dots A_{k-1,k} = \prod_{i=1}^k A_{i-1,i}, i, k = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где $A_{i-1,i}$, i — матрица размерности 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_i , связанной с i -м звеном, в систему S_{i-1} , связанную с $(i-1)$ -м звеном; $A_{0,k}$ — матрица размерности 4×4 , выполняющая преобразование однородных координат из системы S_k , связанной с k -м звеном, в систему S_0 , связанную с неподвижным основанием; n — число звеньев в манипуляционной системе робота.

Структура матрицы преобразования однородных координат $A_{0,k}$ имеет вид

$$A_{0,k} = \begin{bmatrix} 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ R_{0,k} & r_{0k}^{(0)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $R_{0,k}$ — матрица поворота, имеющая размерность 3×3 и содержащая косинусы углов между соответствующими осями систем координат S_0 и S_k ; $r_{0k}^{(0)} = (x_{0k}^{(0)} \ y_{0k}^{(0)} \ z_{0k}^{(0)})$ — радиус-вектор точки 0_k , являющейся началом системы S_k , проведенный из начала системы S_0 .

Для произвольной точки M , выбранной на k -м звене, матрицы преобразования однородных координат (1) позволяют получить простую форму выражения, реализующего эти преобразования [1—6]:

$$r_M^{(0)} = A_{0,k} r_M^{(k)}, \quad (3)$$

где $r_M^{(0)} = [x_M^{(0)} \ y_M^{(0)} \ z_M^{(0)} \ 1]^T$ — расширенный радиус-вектор точки M в неподвижной системе S_0 , $r_M^{(k)} = [x_M^{(k)} \ y_M^{(k)} \ z_M^{(k)} \ 1]^T$ — расширенный радиус-вектор точки M в связанной системе S_k .

В системах управления промышленных роботов неподвижную систему координат S_0 именуют

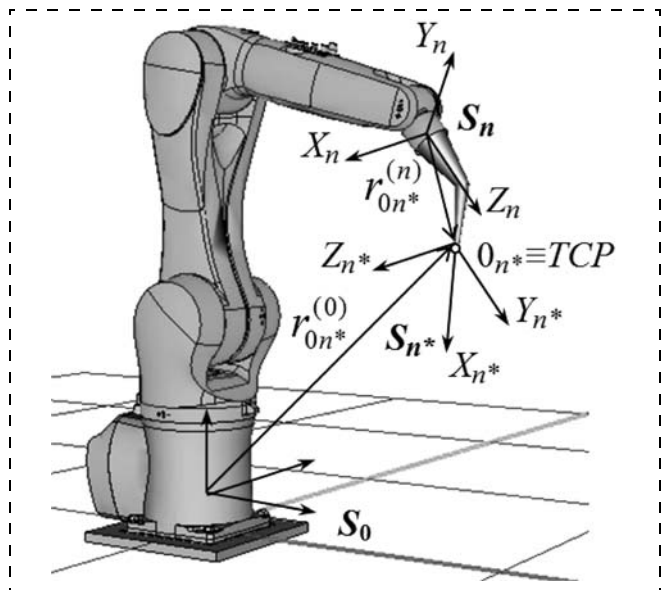


Рис. 2. Системы координат $S_0 \equiv \text{WORLD}$, $S_n \equiv \text{FLANGE}$, $S_n^* \equiv \text{TOOL}$ и точка $0_n^* \equiv \text{TCP}$

WORLD и называют мировой системой координат. Начало системы координат S_n , связанной с конечным звеном, помещают в центр установочного фланца, а ось Z_n этой системы координат направляют перпендикулярно плоскости фланца вдоль оси его вращения. Систему координат S_n именуют *FLANGE*. Точку центра инструмента обозначают 0_{n*} и именуют *TCP*. Система координат $S_{n*} \equiv TOOL$ с началом в точке $0_{n*} \equiv TCP$ связывается с инструментом, присоединяемым к фланцу (рис. 2).

Методы калибровки ориентации инструмента

При калибровке ориентации инструмента должна быть сформирована математическая модель, отражающая ориентацию системы координат *TOOL* по отношению к системе координат *FLANGE*. Сформированная математическая модель дополнит существующую в системе управления математическую модель, отражающую ориентацию системы координат *FLANGE* по отношению к системе координат *WORLD*.

На практике применяют несколько методов калибровки ориентации нового инструмента, основывающихся на данных предварительной калибровки его *TCP*.

Метод параллельных осей

Оси системы координат $S_{n*} \equiv TOOL$ направляются параллельно осям системы координат $S_0 \equiv WORLD$, при этом продольную ось инструмента X_{n*} направляют противоположно вертикальной оси Z_0 , а оси Y_{n*} и Z_{n*} — по направлениям, совпадающим с осями Y_0 и X_0 соответственно.

Данному условию параллельности осей систем координат S_0 и S_{n*} соответствует следующий вид матрицы поворота:

$$R_{0, n*} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Связь относительной ориентации осей систем координат S_0 , S_n и S_{n*} может быть описана уравнением

$$R_{0, n*} = R_{0, n} R_{n, n*}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получаем искомое выражение

$$R_{n, n*} = R_{0, n}^{-1} R_{0, n*}. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой математическую модель, позволяющую определить ориентацию системы координат $S_{n*} \equiv TOOL$ относительно системы координат $S_n \equiv FLANGE$ по методу параллельных осей.

Метод калибровки ориентации инструмента по трем точкам

Использование данного метода предполагает, что предварительно выполнена калибровка точки

центра инструмента (*TCP*), которую принимают за начало системы координат *TOOL*, связываемой с калибруемым инструментом.

Калибруемый инструмент закрепляется на установочном фланце робота. В системе управления выбираются сохраненные при калибровке положение *TCP*, логическое имя инструмента и выполняются действия, реализующие данный метод.

Последовательность действий:

1. *TCP* калибруемого инструмента подводится к закреплению в рабочем пространстве робота заостренному наконечнику. Сохраняются данные о положении робота.

2. *TCP* перемещается в положительном направлении вдоль продольной оси инструмента X_{n*} и фиксируется. Сохраняются данные о новом положении инструмента.

3. Калибруемый инструмент перемещается так, чтобы вершина заостренного наконечника оказалась в плоскости $X_{n*}Y_{n*}$ в той части, которая соответствует положительному направлению оси Y_{n*} . Вычисляются и сохраняются данные об ориентации инструмента.

Математическая модель, отражающая ориентацию системы координат *TOOL* по отношению к системе координат *FLANGE*, может быть получена на основе выражения (3).

В соответствии с приведенной последовательностью действий, реализующей данный метод калибровки, при подводе *TCP* калибруемого инструмента к заостренному наконечнику для каждого шага этой последовательности будем выполнять следующие шаги.

• Шаг 1.

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(n)}, \quad (7)$$

где $r_{\Delta}^{(0)}$ — радиус-вектор вершины заостренного наконечника, закрепленного в рабочем пространстве робота; $r_{0n*}^{(n)} = [x_{0n*}^{(n)} \ y_{0n*}^{(n)} \ z_{0n*}^{(n)} \ 1]^T$ — радиус-вектор, содержащий координаты *TCP* калибруемого инструмента в системе координат $S_n \equiv FLANGE$.

• Шаг 2.

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(2)}A_{0, n} A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)}, \quad (8)$$

$$r_{\Delta x}^{(n*)} = [\Delta_1 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (9)$$

где Δ_1 — произвольное перемещение *TCP* в положительном направлении по оси X_{n*} , $\Delta_1 < 0$ (рис. 3).

Приравняв выражения (7) и (8), получим уравнение

$${}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(n)} = {}^{(2)}A_{0, n} A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)}. \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (10) к виду

$$A_{n, n*} r_{\Delta x}^{(n*)} = {}^{(2)}A_{0, n}^{-1} {}^{(1)}A_{0, n} r_{0n*}^{(0)} = V^{(1)}, \quad (11)$$

где $V^{(1)} = [v_x^{(1)} \ v_y^{(1)} \ v_z^{(1)} \ 1]^T$ — вектор промежуточных вычислений.

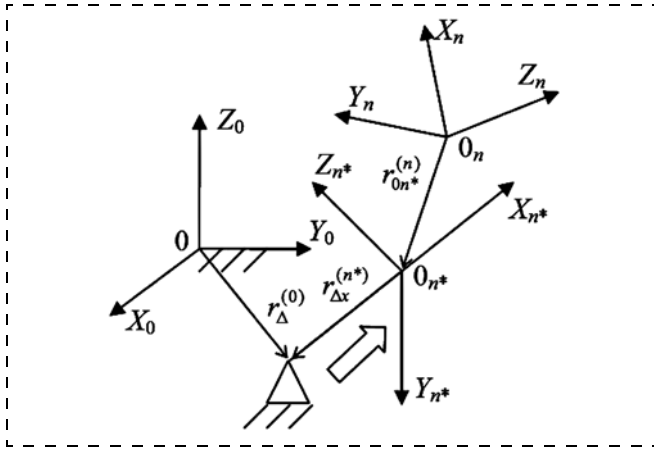


Рис. 3. Перемещение инструмента вдоль оси X_{n^*}

Аналогично (2) структура матрицы преобразования однородных координат A_{n,n^*} имеет вид

$$A_{n,n^*}^{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ R_{n,n^*} & r_{0n^*}^{(n)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$R_{n,n^*} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где R_{n,n^*} — матрица поворота, имеющая размерность 3×3 и содержащая косинусы углов между соответствующими осями систем координат S_n и S_{n^*} .

С учетом выражений (12) и (13) матричное уравнение (11) может быть представлено системой линейных уравнений

$$\begin{cases} \Delta_1 c_{11} = v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_1 c_{21} = v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_1 c_{31} = v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)}. \end{cases} \quad (14)$$

Неизвестными, подлежащими определению, являются коэффициенты c_{11} , c_{21} и c_{31} , представляющие косинусы углов между осями X_n и X_{n^*} , Y_n и X_{n^*} , Z_n и X_{n^*} соответственно. Для их определения систему трех уравнений (14) необходимо дополнить четвертым нелинейным уравнением, отражающим свойство базисных векторов

$$c_{11}^2 + c_{21}^2 + c_{31}^2 = 1. \quad (15)$$

Из системы уравнений (14) будем иметь

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}, \quad c_{21} = \frac{v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}, \\ c_{31} &= \frac{v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя выражения (16) в уравнения (15) и учитывая, что $\Delta_1 < 0$, получим

$$\Delta_1 = -\sqrt{(v_x^{(1)} - x_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_y^{(1)} - y_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_z^{(1)} - z_{0n^*}^{(n)})^2}. \quad (17)$$

Шаг 3.

При выполнении третьего шага калибровки ориентации инструмента по трем точкам возможны два варианта действий и, соответственно этому, две математические модели, описывающие эти варианты.

Вариант 1. Вершина заостренного наконечника помещается в плоскость $X_{n^*}Y_{n^*}$ и фиксируется на положительной части оси Y_{n^*} . Для данного случая могут быть составлены следующие уравнения:

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(3)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)}; \quad (18)$$

$$r_{\Delta y}^{(n^*)} = [0 \ \Delta_2 \ 0 \ 1]^T, \quad (19)$$

где Δ_2 — расстояние ТСП от вершины заостренного наконечника по оси Y_{n^*} , $\Delta_2 > 0$.

Приравняв выражения (7) и (18), получим уравнение

$${}^{(1)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)} = {}^{(3)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)}. \quad (20)$$

Преобразуем уравнение (20) к виду

$$A_{n,n^*} r_{\Delta y}^{(n^*)} = {}^{(3)}A_{0,n}^{-1} {}^{(1)}A_{0,n} r_{0n^*}^{(n)} = V^{(2)}, \quad (21)$$

где $V^{(2)} = [v_x^{(2)} \ v_y^{(2)} \ v_z^{(2)} \ 1]^T$ — вектор промежуточных вычислений.

Основываясь на аналогии с шагом 2, можно получить систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta_2 c_{12} = v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_2 c_{22} = v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_2 c_{32} = v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)}; \\ c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2 = 1. \end{cases} \quad (22)$$

Из системы уравнений (22) можно выразить

$$\Delta_2 = -\sqrt{(v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)})^2 + (v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)})^2}; \quad (23)$$

$$c_{12} = \frac{v_x^{(2)} - x_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2}, \quad c_{22} = \frac{v_y^{(2)} - y_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2},$$

$$c_{32} = \frac{v_z^{(2)} - z_{0n^*}^{(n)}}{\Delta_2}. \quad (24)$$

Коэффициенты c_{12} , c_{22} и c_{32} представляют косинусы углов между осями X_n и Y_{n^*} , Y_n и Y_{n^*} , Z_n и Y_{n^*} соответственно.

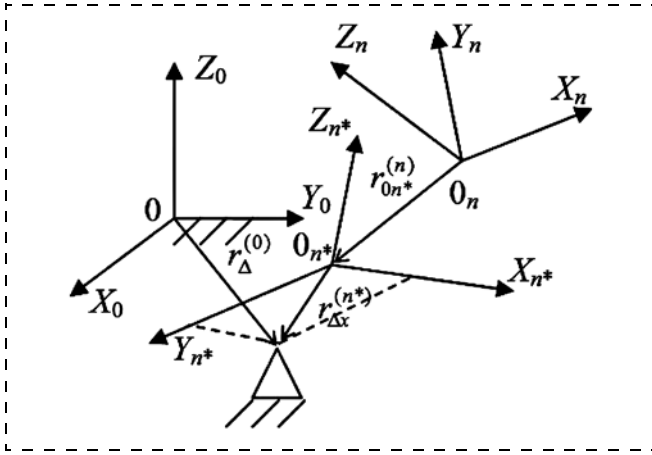


Рис. 4. Перемещение инструмента в плоскости $X_{n^*}Y_{n^*}$

Вариант 2. Вершина заостренного наконечника помещается в плоскость $X_{n^*}Y_{n^*}$ и фиксируется на ее полуплоскости, соответствующей положительной части оси Y_{n^*} (рис. 4). Для данного случая могут быть составлены следующие уравнения:

$$r_{\Delta}^{(0)} = {}^{(4)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)}; \quad (25)$$

$$r_{\Delta xy}^{(n^*)} = [\Delta_3 \ \Delta_4 \ 0 \ 1]^T, \quad (26)$$

где Δ_3 и Δ_4 — координаты заостренного наконечника по осям X_{n^*} и Y_{n^*} соответственно; $\Delta_3 > 0$, $\Delta_4 > 0$.

Приравняв выражения (7) и (25), получим

$${}^{(1)}A_{0,n} r_{0,n^*}^{(n)} = {}^{(4)}A_{0,n} A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)}. \quad (27)$$

Преобразуем уравнение (27) к виду

$$A_{n,n^*} r_{\Delta xy}^{(n^*)} = {}^{(4)}A_{0,n}^{-1(1)} A_{0,n} r_{0,n^*}^{(0)} = V^{(3)}, \quad (28)$$

где $V^{(3)} = [v_x^{(3)} \ v_y^{(3)} \ v_z^{(3)} \ 1]^T$ — вектор промежуточных вычислений.

Система уравнений для данного случая будет иметь вид

$$\begin{cases} \Delta_3 c_{11} + \Delta_4 c_{12} = v_x^{(3)} - x_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_3 c_{21} + \Delta_4 c_{22} = v_y^{(3)} - y_{0n^*}^{(n)}; \\ \Delta_3 c_{31} + \Delta_4 c_{32} = v_z^{(3)} - z_{0n^*}^{(n)}; \\ c_{11}c_{12} + c_{21}c_{22} + c_{31}c_{32} = 0; \\ c_{12}^2 + c_{22}^2 + c_{32}^2 = 1. \end{cases} \quad (29)$$

Система уравнений (29) дополнена уравнением, отражающим ортогональность осей X_{n^*} и Y_{n^*} .

Дополнительно к обоим вариантам выполнения шага 3 калибровки ориентации инструмента необходимо добавить систему уравнений, позволяю-

щую определить коэффициенты c_{13} , c_{23} и c_{33} , представляющие косинусы углов между осями X_n и Z_{n^*} , Y_n и Z_{n^*} , Z_n и Z_{n^*} соответственно:

$$\begin{cases} c_{11}c_{13} + c_{21}c_{23} + c_{31}c_{33} = 0; \\ c_{12}c_{13} + c_{22}c_{23} + c_{32}c_{33} = 0; \\ c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2 = 1. \end{cases} \quad (30)$$

Представленные уравнения составляют математическую модель для метода калибровки ориентации инструмента промышленных роботов по трем точкам.

Заключение

В настоящей статье рассмотрены математические модели для калибровки ориентации инструмента промышленных роботов, соответствующие методам, наиболее распространенным в практике эксплуатации промышленных роботов. Полученные математические модели могут быть использованы в системах управления промышленных роботов. Близкие по данной теме вопросы рассмотрены в работах [7–12].

Список литературы

1. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники. М.: Мир, 1990. 527 с.
3. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. М.: Наука, 1989. 368 с.
4. Козлов В. В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В., Юрвич Е. И. Динамика управления роботами. М.: Наука, 1984. 336 с.
5. Крахмалев О. Н. Точность управляемого движения промышленных роботов и многокоординатных станков. Брянск: БГТУ, 2015. 236 с.
6. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Расчет и конструирование мехатронных модулей. М.: Изд. МГТУ "СТАНКИН", 2012. 422 с.
7. Зеленский А. А., Подураев Ю. В., Бондарь Д. В. Способ повышения точности интерполяции сложного контура для мехатронных модулей и промышленных роботов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 9. С. 44–48.
8. Крахмалев О. Н., Блейшмидт Л. И. Определение динамической точности манипуляционных систем роботов с упругими шарнирами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 29–36.
9. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И. Коррекция интегральных отклонений движения исполнительных механизмов промышленных роботов и многокоординатных станков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 7. С. 491–496.
10. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Федонин О. Н. Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 28–35.
11. Крахмалев О. Н., Петрешин Д. И., Федонин О. Н. Обеспечение точности многокоординатных станков и промышленных роботов методом коррекции геометрических отклонений // СТИН. 2016. № 11. С. 7–11.
12. Илюхин Ю. В., Подураев Ю. В. Повышение точности мехатронных приводов технологических роботов // СТИН. 2015. № 9. С. 30–37.

Mathematical Models of the Control Systems for Calibration of the Tools' Orientation for the Industrial Robots

O. N. Krakhmalev, olegkr64@mail.ru✉, **D. I. Petreshin**, atsys@tu-bryansk.ru,
G. N. Krakhmalev, genakr73@mail.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation

Corresponding author: **Krakhmalev Oleg N.**, Ph. D., Associate Professor,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation,
e-mail: olegkr64@mail.ru

Received on December 12, 2016

Accepted on June 26, 2017

Mathematical models of the industrial robots' control systems allow us to calibrate the instruments fixed on the installation of the robot flange. Calibration procedures are carried out when a new industrial robot tool is introduced. Instrument calibration is performed in two stages. The first phase is determination of the tool center point (TCP — Tool Center Point). The second stage includes the act of determination of the orientation of the Cartesian coordinate system, connected with the tool, which is placed at TCP. This article is devoted to the study of the second phase of the final calibration of the instrument. The mathematical models, which describe the transformation of the coordinates for the tool control system, are created automatically, when the instrument calibration procedures begins before introduction of a new instrument into operation. The mathematical models are stored in the permanent memory of the controller in the tool library. This paper introduces a mathematical model for calibration of the tool orientation of the industrial robots, the most common matching methods in practice of operation of the industrial robots. The obtained mathematical model can be used in the control systems of the industrial robots. The resulting mathematical model performs mapping of the TOOL coordinate system in relation to the WORLD coordinate system. The TOOL coordinate system is associated with the tool. The center of the TOOL coordinate system coincides with TCP. The coordinate system of the WORLD is connected with the stationary base of an industrial robot. The BASE coordinate system is connected with the manipulation object. In addition, the position of the BASE coordinate system must be calibrated.

Keywords: industrial robots, instrument calibration, mathematical models, control systems

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Bryansk State Technical University within the framework of the internal grant No. 135 for 2016, allocated for the development of the software for modeling and control of the industrial robots and multi-axis machines for development of the Mechatronics and Robotics scientific direction.

For citation:

Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Krakhmalev G. N. Mathematical Models of the Control Systems for Calibration of the Tools' Orientation for the Industrial Robots, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 664–669.

DOI: 10.17587/mau.18.664-669

References

1. **Fu K., Gonsales R., Li K.** *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).
2. **Shahinpoor M.** *Kurs robototekhniki* (Robotics course), Moscow, Mir, 1990, 527 p. (in Russian).
3. **Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N., Gradetskiy V. G.** *Manipulyatsionnyye roboty: dinamika, upravleniye, optimizatsiya* (Manipulation robots: dynamics, management, optimization), Moscow, Nauka, 1989, 368 p. (in Russian).
4. **Kozlov V. V., Makarychev V. P., Timofeyev A. V., Yurevich Ye. I.** *Dinamika upravleniya robotami* (Dynamics of robot control), Moscow, Nauka, 1984, 336 p. (in Russian).
5. **Krakhmalev O. N.** *Tochnost' upravlyayemogo dvizheniya promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov: monografiya* (The precision controlled movement of industrial robots and multi-axis machines), Bryansk, Publishing house of BGTU, 2015, 236 p. (in Russian).
6. **Yegorov O. D., Podurayev Yu. V.** *Raschet i konstruirovaniye mekhatronnykh moduley* (Calculation and construction of mechatronic

modules), Moscow, Publishing house of MGTU "STANKIN", 2012, 422 p. (in Russian).

7. **Zelenskiy A. A., Podurayev Yu. V., Bondar' D. V.** *Sposob povysheniya tochnosti interpolatsii slozhnogo kontura dlya mekhatronnykh moduley i promyshlennykh robotov* (A way to improve the accuracy of interpolation of a complex contour for mechatronic modules and industrial robots), *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 9, pp. 44–48. (in Russian).

8. **Krakhmalev O. N., Bleishmidt L. I.** *Opreделение динамической точности манипуляционно-транспортных систем роботов с упругими шарнирами* (Determination of Dynamic Accuracy of Manipulation Systems of Robots with Elastic Hinges), *Problemy Mashinostroyeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no. 1, pp. 29–36 (in Russian).

9. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I.** *Korrektziya integral'nykh otkloneniy dvizheniya ispolnitel'nykh mekhanizmov promyshlennykh robotov i mnogokoordinatnykh stankov* (Correction of the integral of deviations of movement of actuators of industrial robots and multi-axis machines), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 491–496 (in Russian).

10. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Fedonin O. N.** *Matematicheskoe obespechenie sistem upravleniya promyshlennymi robotami i mnogokoordinatnymi stankami dlya korrektsii vliyaniya na ikh dvizhenie geometricheskikh otkloneniy* (Software of control systems for industrial robots and multi-axis machines for the correction effect on the movement of geometric deviations), *Problemy Mashinostroyeniya i Avtomatizatsii*, 2016, no. 3, pp. 28–35 (in Russian).

11. **Krakhmalev O. N., Petreshin D. I., Fedonin O. N.** *Obespechenie tochnosti mnogokoordinatnykh stankov i promyshlennykh robotov metodom korrektsii geometricheskikh otkloneniy* (Ensuring the accuracy of multi-axis machine tools, and industrial robots by the correction of geometric deviations), *STIN*, 2016, no. 11, pp. 7–11. (in Russian).

12. **Ilyukhin Yu. V., Podurayev Yu. V.** *Povysheniye tochnosti mekhatronnykh privodov tekhnologicheskikh robotov* (Increase the accuracy of mechatronic drives of technological robots), *STIN*, 2015, no. 9, pp. 30–37 (in Russian).