

УДК 621-192

М.И. МИХАЙЛОВ, д-р техн. наук; А.В. ХИХЛУХА

Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Республика Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ КООРДИНАТ РОБОТА ДЛЯ УСЛОВИЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Разработан проект робототехнического комплекса (РТК) для обработки деталей типа «корпус подшипника» на основе робота RA605. Приведена математическая модель решения прямой и обратной задач положения робота, позволившая рационально спланировать траекторию его движения.

Ключевые слова: робототехнические комплексы, робот, обобщенные координаты, математическое моделирование

Введение. Эффективным средством комплексной автоматизации производственных процессов в промышленности являются РТК [1–3].

Как известно, манипуляционные системы структурно представляют собой разомкнутые кинематические цепи [4]. Как правило, звенья моделируются абсолютно твердыми телами [5].

Уравнения кинематики описывают движения характерных точек манипуляционных систем относительно выбранных систем координат, при этом не рассматриваются усилия, вызывающие эти движения [6–9].

Для обеспечения обслуживания РТК необходимо решать обратную задачу кинематики. Существует несколько методов решения обратной задачи кинематики, к числу которых относятся методы обратных преобразований, винтовой алгебры, а также геометрический [10–12]. Программирование движений манипуляционной системы промышленного робота (offline-программирование) производится поэтапно.

На первом этапе программирования выполняется планирование траекторий движения рабочего органа промышленного робота [13–19]. Траектории движения определяются пространственно-временными (технологическими) задачами, формулируемыми, как правило, в прямоугольных (декартовых) координатах. Управление же промышленным роботом осуществляется в пространстве обобщенных координат, определяемых кинематической схемой манипуляционной системы.

На втором этапе определяются обобщенные координаты, обеспечивающие положение рабочего органа на заданной (программной) траектории [14, 20–22].

Для этого на траектории движения выделяют последовательность узловых точек, заданных в прямоугольных (декартовых) координатах, и, решая обратную задачу кинематики, определяют векторы обобщенных координат, соответствующих этим узловым точкам [11, 12]. Затем для вычисленных дискретных значений обобщенных координат методами интерполяции подбираются полиномы, позволяющие получать гладкие зависимости.

Приведенные этапы требуют для конкретных условий производственной среды определять обобщенные координаты выбранного робота.

Цель работы — разработка математической модели получения обобщенных координат робота для условий РТК.

Методика моделирования. Положение схвата задавалось с помощью шести величин. Три из них — это

координаты центра схвата, еще две — это направляющие косинусы одной из координатных осей схвата, и последняя — это один из направляющих косинусов другой координатной оси схвата. Этими шестью величинами были шесть наддиагональных элементов матрицы $[T_n]$.

Приравнивая шесть заданных величин соответствующим элементам матрицы $[T_n]$, получим систему шести уравнений (в общем случае трансцендентных), неизвестными в которых являются обобщенные координаты.

Задача состоит в отыскании значений m обобщенных координат по заданным m элементам матрицы $[T_n]$.

Значения q_i определялись методом последовательных приближений. В нулевом приближении задавались обобщенные координаты q_i^0 .

Зависимость матрицы $[T_n]$ от обобщенных координат принималась в виде отрезка степенного ряда Тейлора, ограниченного линейными членами, с центром разложения в токе q_i^{k-1}

$$[T_6] = [T_6^{(k-1)}] + \sum_{j=1}^6 [U_{6j}^{(k-1)}] (q_j^k - q_j^{(k-1)}), \quad (1)$$

где $[T_6^{(k-1)}]$ — матрица $[T_6]$, элементы которой выражены через приближенные значения обобщенных координат;

k — номер шага вычислений; $[U_{ij}] = \frac{d[T_i]}{dq_j}$ — матрица 4×4 .

Одному равенству (1) соответствуют 16 скалярных равенств (по числу элементов матрицы $[T_6]$).

Так как известны положения и расположения деталей в рабочей зоне РТК, то соответствующие им равенства образуют систему уравнений:

$$\begin{aligned} (t_6)_{12} &= (t_6)_{12}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{12}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}); \\ (t_6)_{13} &= (t_6)_{13}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{13}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}); \\ (t_6)_{14} &= (t_6)_{14}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{14}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}); \\ (t_6)_{23} &= (t_6)_{23}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{23}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}); \\ (t_6)_{24} &= (t_6)_{24}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{24}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}); \\ (t_6)_{34} &= (t_6)_{34}^{(k-1)} + \sum_{j=1}^6 (u_{6j})_{34}^{(k-1)} (q_j^k - q_j^{(k-1)}). \end{aligned} \quad (2)$$

Для учета особенностей расположения оборудования в РТК необходимо определить расположение отдельных звеньев робота. Для этого использовалась система:

$$(t_i)_{\text{вн}} = (t_i)^{(k-1)} + \sum_{j=1}^i (u_{ij})_{\text{вн}}^{(k-1)} \{q_j^k - q_j^{(k-1)}\}.$$

Результаты и их анализ. Для условий ОАО «Гомсельмаш» при обработке корпусов подшипников разработан РТК на базе робота RA605 и станков 16ГС32СУ и 2С132ПМФ2 (рисунок 1).

Для формирования матрицы $[T_n]$ использовалась структурная схема робота (рисунок 2).

Геометрические параметры робота приведены в таблице 1.

Для робота RA605 параметры соответствуют: $q_{31} := 228$;

$$q_{12} := 147; q_{32} := 147; q_{42} := \frac{90\pi}{180}; q_{13} := 340; q_{14} := 98;$$

$$q_{24} := 40; q_{54} := \frac{90\pi}{180}; q_{35} := 240; q_{55} := \frac{90\pi}{180}; q_{16} := 86,5;$$

$$q_{56} := \frac{90\pi}{180}; q_{37} := 205.$$

Таблица 1 — Геометрические параметры робота

№ сочленений	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
0.1	0	0	q_{31}	0	0	q_{61}
1.2	q_{12}	0	q_{32}	q_{42}	0	q_{62}
2.3	q_{13}	0	0	0	0	q_{63}
3.4	q_{14}	q_{24}	0	0	q_{54}	q_{64}
4.5	0	0	q_{35}	0	q_{55}	q_{65}
5.6	q_{16}	0	0	0	q_{56}	q_{66}
6.7	0	0	q_{37}	0	0	0

Примечание: q_i — обобщенные координаты

Уравнения положения центра схвата робота имеют вид:

$$[A_{0,7}] := [A_{0,1}(q_1)] \cdot [A_{1,2}(q_2)] \cdot [A_{2,3}(q_3)] \cdot [A_{3,4}(q_4)] \times$$

$$\times [A_{4,5}(q_5)] \cdot [A_{5,6}(q_6)] \cdot [A_{6,7}], \quad (3)$$

где

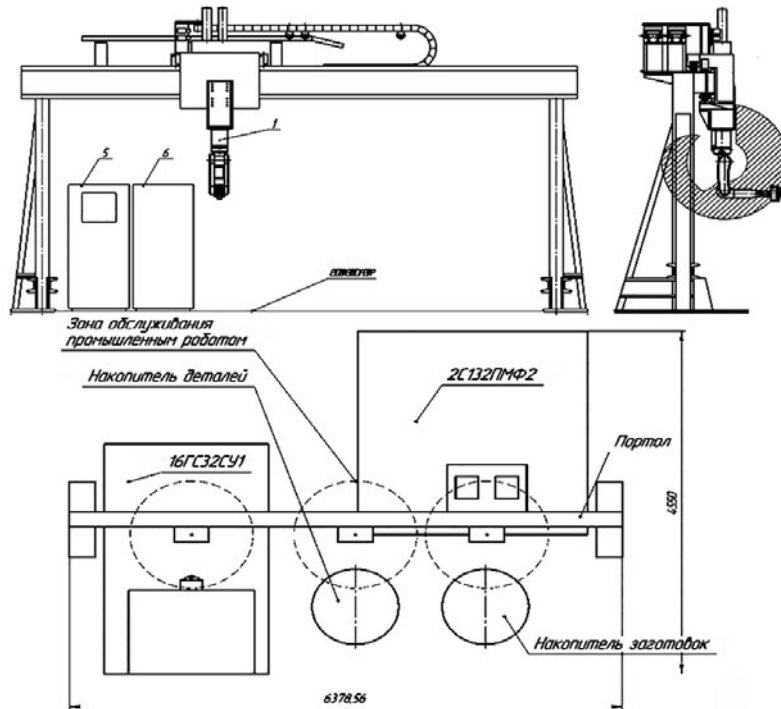


Рисунок 1 — Планировка РТК

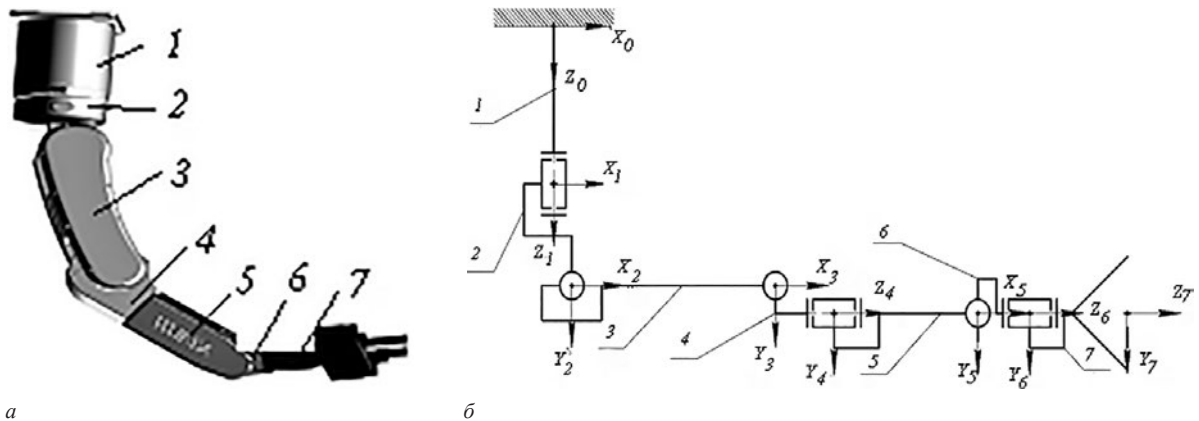


Рисунок 2 — Расчетная схема: а — 3D-модель робота; б — структурная схема робота

$$(a_{07})_{14} = -1 \cdot \sin(q_3) \cdot (\sin(q_2) \cdot (291,5 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_5) + 338 \cdot \cos(q_1)) + 30 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2)) + \sin(q_5) \cdot 291,5 \times \sin(q_1) \cdot \sin(q_4) - 291,5 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_3) + 291,5 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_2) + 291,5 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_5) + 338 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) + 340 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) + 30 \cdot \cos(q_1) - 40 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_3) \cdot \sin(q_2)); \quad (4)$$

$$(a_{07})_{2,4} = -1 \cdot \sin(q_3) \cdot (\sin(q_1) \cdot \sin(q_2) \cdot (291,5 \cdot \cos(q_5) + 338) + 40 \cdot \cos(q_2) \cdot \sin(q_1)) + \sin(q_1) \cdot (291,5 \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) \times \cos(q_5) + 338 \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) + 340 \cdot \cos(q_2) + 30) - \sin(q_5) \cdot 291,5 \cdot \cos(q_1) \cdot \sin(q_4) + 291,5 \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_1) \times \sin(q_3) + 291,5 \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2) + 40 \cdot \cos(q_3) \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2); \quad (5)$$

$$(a_{07})_{3,4} = \sin(q_2) \cdot (291,5 \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_5) + 338 \cdot \cos(q_3) + 340) + \sin(q_3) \cdot 291,5 \cdot \cos(q_2) \times \cos(q_5) + 338 \cdot \cos(q_2) - 40 \cdot \sin(q_2) + \sin(q_5) \cdot 291,5 \times \cos(q_2) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_4) - 291,5 \cdot \cos(q_4) \times \sin(q_2) \cdot \sin(q_3) + 40 \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) + 375; \quad (6)$$

$$(a_{07})_{1,2} = \sin(q_6) \cdot (\sin(q_4) \cdot \cos(q_2) \cdot \sin(q_3) + \cos(q_1) \times \cos(q_2) \cdot \sin(q_2)) + \cos(q_4) \cdot \sin(q_1) + \sin(q_5) \times (\cos(q_1) \cdot \cos(q_6) \cdot \sin(q_2) \cdot \sin(q_3) - 1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \times \cos(q_3) \cdot \cos(q_6)) + \cos(q_5) \cdot \cos(q_6) \times \sin(q_1) \cdot \sin(q_4) - 1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_4) \cdot \cos(q_5) \times \cos(q_6) \cdot \sin(q_2); \quad (7)$$

$$(a_{07})_{1,3} = \sin(q_5) \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_4) - 1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \times \cos(q_4) \cdot \sin(q_3) + 1 \cdot \cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_2) + (\cos(q_1) \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_5) - 1 \cdot \cos(q_1) \times \cos(q_5) \cdot \sin(q_2) \cdot \sin(q_3); \quad (8)$$

$$(a_{07})_{2,3} = \sin(q_5) - 1 \cdot \cos(q_1) \cdot \sin(q_4) - 1 \cdot \cos(q_2) \cdot \cos(q_4) \times \sin(q_1) \cdot \sin(q_3) + 1 \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_4) \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2) + \cos(q_2) \cdot \cos(q_3) \cdot \cos(q_5) \cdot \sin(q_1) - 1 \cdot \cos(q_5) \cdot \sin(q_1) \cdot \sin(q_2). \quad (9)$$

Численные значения обобщенных координат для заданных положений схвата и его расположений в рабочей зоне РТК определяли по выражениям (3)–(9).

Для этого продефинировали матрицу (3) по обобщенным координатам:

$$[U_{1,1}] := \left(\frac{d}{dq_1} [A_{0,1}(q_1)] \right) \cdot [A_{0,1}(q_1)] \cdot [A_{1,2}(q_2)] \cdot [A_{2,3}(q_3)] \times [A_{3,4}(q_4)] \cdot [A_{4,5}(q_5)] \cdot [A_{5,6}(q_6)] \cdot [A_{6,7}].$$

$$[U_{2,1}] := \left(\frac{d}{dq_2} [A_{1,2}(q_2)] \right) \cdot [A_{0,1}(q_1)] \cdot [A_{1,2}(q_2)] \cdot [A_{2,3}(q_3)] \times [A_{3,4}(q_4)] \cdot [A_{4,5}(q_5)] \cdot [A_{5,6}(q_6)] \cdot [A_{6,7}];$$

$$[U_{3,1}] := \left(\frac{d}{dq_3} A_{2,3}(q_3) \right) \cdot A_{0,1}(q_1) \cdot A_{1,2}(q_2) \cdot A_{2,3}(q_3) \times A_{3,4}(q_4) \cdot A_{4,5}(q_5) \cdot A_{5,6}(q_6) \cdot A_{6,7n};$$

$$[U_{4,1}] := \left(\frac{d}{dq_4} A_{3,4}(q_4) \right) \cdot A_{0,1}(q_1) \cdot A_{1,2}(q_2) \cdot A_{2,3}(q_3) \times A_{3,4}(q_4) \cdot A_{4,5}(q_5) \cdot A_{5,6}(q_6) \cdot A_{6,7n};$$

$$[U_{5,1}] := \left(\frac{d}{dq_5} A_{4,5}(q_5) \right) \cdot A_{0,1}(q_1) \cdot A_{1,2}(q_2) \cdot A_{2,3}(q_3) \times A_{3,4}(q_4) \cdot A_{4,5}(q_5) \cdot A_{5,6}(q_6) \cdot A_{6,7n};$$

$$[U_{6,1}] := \left(\frac{d}{dq_6} A_{5,6}(q_6) \right) \cdot A_{0,1}(q_1) \cdot A_{1,2}(q_2) \cdot A_{2,3}(q_3) \times A_{3,4}(q_4) \cdot A_{4,5}(q_5) \cdot A_{5,6}(q_6) \cdot A_{6,7n}.$$

Затем составлялась система уравнений.

$$a_x := [A_{07}]_{1,4} + [U_{1,1}]_{1,4} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{1,4} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{1,4} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{1,4} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{1,4} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{1,4} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}); \quad (10)$$

$$a_y := [A_{07}]_{2,4} + [U_{1,1}]_{2,4} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{2,4} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{2,4} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{2,4} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{2,4} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{2,4} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}); \quad (11)$$

$$a_z := [A_{07}]_{3,4} + [U_{1,1}]_{3,4} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{3,4} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{3,4} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{3,4} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{3,4} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{3,4} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}). \quad (12)$$

$$a_\alpha := [A_{07}]_{1,2} + [U_{1,1}]_{1,2} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{1,2} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{1,2} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{1,2} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{1,2} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{1,2} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}); \quad (13)$$

$$a_\beta := [A_{07}]_{1,3} + [U_{1,1}]_{1,3} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{1,3} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{1,3} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{1,3} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{1,3} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{1,3} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}); \quad (14)$$

$$a_\gamma := [A_{07}]_{2,3} + [U_{1,1}]_{2,3} \cdot (q_1^k - q_1^{(k-1)}) + [U_{2,1}]_{2,3} \cdot (q_2^k - q_2^{(k-1)}) + [U_{3,1}]_{2,3} \cdot (q_3^k - q_3^{(k-1)}) + [U_{4,1}]_{2,3} \cdot (q_4^k - q_4^{(k-1)}) + [U_{5,1}]_{2,3} \cdot (q_5^k - q_5^{(k-1)}) + [U_{6,1}]_{2,3} \cdot (q_6^k - q_6^{(k-1)}). \quad (15)$$

Далее задавались параметры первого цикла расчетов:

$$q_i = \left(70 \frac{\pi}{180}; 15 \frac{\pi}{180}; 20 \frac{\pi}{180}; 0 \frac{\pi}{180}; 60 \frac{\pi}{180}; 0 \frac{\pi}{180} \right).$$

Таблица 2 — Значения обобщенных координат робота для РТК

Номер позиции схвата	Обобщенные координаты, град					
	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
поз.0	0	0	-20,94	0	0	0
поз. 1	90	11,38	19,56	0	59,06	0
поз. 2	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
поз. 3	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
поз. 4	90	113,573	-45,249	0	-68,324	0
поз. 5	90	115,521	-43,643	0	-71,878	0
поз. 6	-65,547	63,064	-64,13	0	91,066	0
поз. 7	-65,547	62,709	-58,304	0	85,595	0
поз. 8	0	97,724	-38,153	0	-59,571	0
поз. 9	-65,547	97,724	-38,153	0	-59,571	0
поз. 10	-65,547	83,503	-24,307	0	-59,196	0
поз. 11	-65,547	101,655	-64,661	0	-36,994	0
поз. 12	90	11,38	19,56	0	59,06	0
поз. 13	90	26,011	-3,556	0	67,545	0
поз. 14	90	73,793	-13,234	90	-90	90
поз. 15	81,149	71,03	-8,201	90	-81,149	90
поз. 16	75,293	95,085	-39,357	90	-75,292	90
поз. 17	-136,343	100,149	-119,594	0	109,445	0
поз. 18	-136,343	101,365	-103,238	0	91,873	0
поз. 19	-61,074	73,851	-10,122	90	-118,926	0
поз. 20	-70, 731	80,798	-21,205	90	-109,269	0
поз. 21	-70,731	98,358	-60,036	90	-109,269	0

Подставив параметры первого цикла в уравнения (10)–(15), получили численные значения обобщенных координат робота:

$$q_i = (90,017; 11,618; 19,312; 0,043; 59,137; 0,043).$$

Проверка полученных обобщенных координат q_i осуществлялась путем подстановки их в уравнение прямой задачи (3):

$$A_{0,7} = \begin{bmatrix} -1 & 0,001 & 0,001 & 0 & 632,069 \\ -0,001 & -1 & -0,001 & 943,011 & 1 \\ 0,001 & -0,001 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Все расчеты выполнялись в программе Mathcad Prime 6.0.

Затем цикл расчетов повторяется. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Выводы. Приведенные математические модели позволяют определять обобщенные координаты робота и производить оценку точности положения и расположения его схвата.

Список литературы

1. Асфаль, Р. Роботы и автоматизация производства / Р. Асфаль; пер. с англ. М.Ю. Евстигнеева [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 446 с.
2. Афонин, В.Л. Интеллектуальные робототехнические системы: учеб. пособие / В.Л. Афонин, В.А. Макушкин. — М.: Интернет-ун-т информ. технологий, 2009. — 199 с.
3. Белоусов, И.Р. Некоторые новые эффективные методы управления роботами через сеть Интернет / И.Р. Белоусов // Докл. НАН Беларуси. — 2002. — № 2(383). — С. 198–201.

4. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. — М.: Наука, 1975. — 640 с.
5. Виттенбург, И.С. Динамика систем твердых тел / И.С. Виттенбург; пер. с англ. В.Н. Рубановского [и др.]. — М.: Мир, 1980. — 292 с.
6. Воробьев, Е.И. Анализ кинематики пространственных исполнительных механизмов манипуляторов методом матриц / Е.И. Воробьев // Механика машин. — 1970. — Вып. 53. — С. 8–16.
7. Игнатъев, М.Б. Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М.Б. Игнатъев, Ф.М. Кулаков, А.М. Покровский. — Л.: Машиностроение, 1972. — 247 с.
8. Корендясев, А.И. Определение числа степеней свободы исполнительного органа промышленного робота / А.И. Корендясев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес // Машиноведение. — 1984. — № 6. — С. 44–53.
9. Овакимов, А.Г. Кинематическое исследование пространственной цепи управляющего механизма манипулятора / А.Г. Овакимов // Изв. вузов СССР. Машиностроение. — 1971. — № 4. — С. 58–62.
10. Воробьев, Е.И. Механика промышленных роботов: учеб. пособие для вузов; в 3-х кн. / Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. — М.: Высш.шк., 1988. — Кн. 1. Кинематика и динамика. — 304 с.
11. Крахмалев, О.Н. Методика анализа влияния сил инерции на динамику манипуляционных роботов / О.Н. Крахмалев // Теория механизмов и машин. — 2012. — № 2(20), Т. 10. — С. 41–53.
12. Тывес, Л.И. К задаче динамической развязки движений манипулятора по обобщенным координатам / Л.И. Тывес // Машиноведение. — 1985. — № 2. — С. 17.
13. Булгаков, А.Г. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление / А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2012. — 485 с.
14. Верещагин, А.Ф. Планирование траектории исполнительного органа манипуляционного робота / А.Ф. Верещагин, В.Л. Генерозов // Изв. АН СССР. Технич. кибернетика. — 1978. — № 9. — С. 76–87.

15. Вертю, Ж. Телеуправление роботами с помощью ЭВМ / Ж. Вертю, Ф. Куафе; пер. с фр. В.Б. Тарасова. — М.: Мир, 1989. — 198 с.
16. Воробьев Е.И. Синтез механизмов по заданному движению твердого тела в пространстве / Е.И. Воробьев // *Механика машин*. — 1978. — Вып. 54. — С. 25–33.
17. Механика миниатюрных роботов / В.Г. Градецкий [и др.]. — М.: Наука, 2010. — 265 с.
18. Медведев, В.П. Синтез оптимального управления приводами манипулятора / В.П. Медведев // *Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: тр. 12 междунар. научн.-техн. семинара, Алушта, сент. 2003 г.* — М.: МЭП, 2003. — С. 133.
19. Овакимов, А.Г. Аналоги скоростей и ускорений пространственных механизмов с несколькими степенями свободы / А.Г. Овакимов // *Изв. вузов СССР. Машиностроение*. — 1969. — № 6. — С. 51–58.
20. Гречановский, Е.Н. Метод планирования движения манипулятора при наличии препятствий / Е.Н. Гречановский, И.Ш. Пинскер // *Модели. Алгоритмы. Принятие решения*. — М.: Наука, 1979. — С. 100–142.
21. Малышев, В.А. Представление среды, планирование, построение и стабилизация программных движений роботов / В.А. Малышев, А.В. Тимофеев // *II Всесоюзная межвуз. конф. «Робототехнические системы»: тез. докл.* — Киев, 1980. — Кн. 1. — С. 138–142.
22. Пол, Р. Моделирование. планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора / Р. Пол; пер. с англ. А.Ф. Верещагина, В.Л. Генерозова. — М.: Наука, 1976. — 103 с.

Mikhaylov M.I., Khikhlukha A.V.

Obtaining generalized robot coordinates for the conditions of a robotic system

A project of a robotic system has been developed for processing parts of the “bearing housing” type based on the RA605 robot. A mathematical model is given for solving direct and inverse problems of the robot position, which makes it possible to rationally plan the trajectory of its movement.

Поступила в редакцию 05.10.2021.