

ТРАНСФОРМАЦИИ НА КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ НА ПРОМИШЛЕН РОБОТ MITSUBISHI MELFA - II ЧАСТ

Данаил Славов

Резюме: В Част II се провеждат експерименти с прилагане на разгледаната в Част I методика за пресмятане на трансформациите при промишлени роботи. Разглеждат се описания на координатни системи, заложен от производителя, и начини за задаване на потребителски работни пространства в използвания робот. Изследват се трансформациите в дву- и тримерното пространство. Реализирано е софтуерно приложение, нагледно изобразяващо преминаването между координатните системи. Предложена е процедура за намиране на грешки в позиционирането. Анализите потвърждават практическото значение на подхода за изучаване на трансформациите при този клас роботи и също така установяват наличие на грешки в позиционирането на използвания робот.

Ключови думи: промишлени роботи, Melfa RV-2F-Q, RT Toolbox, матрица на трансформация, работна координатна система

COORDINATE SYSTEM TRANSFORMATIONS IN MITSUBISHI MELFA INDUSTRIAL ROBOT - PART 2

Danail Slavov

Abstract: Part II of the paper describes several experiments conducted with the application of the methodology for calculating transformations in industrial robots which was considered in Part I. Descriptions of the factory set coordinate systems are included as well as methods for setting up custom workspaces in the robot used. 2D and 3D transformations are examined. A software application is implemented which demonstrates the transition between coordinate systems. A procedure for finding errors in robot positioning is proposed. Analyzes confirm the practical importance of the approach for studying transformations in this class of robots and also find errors in the positioning of the robot used.

Keywords: industrial robots, Melfa RV-2F-Q, RT Toolbox, transformation matrix, work coordinate system

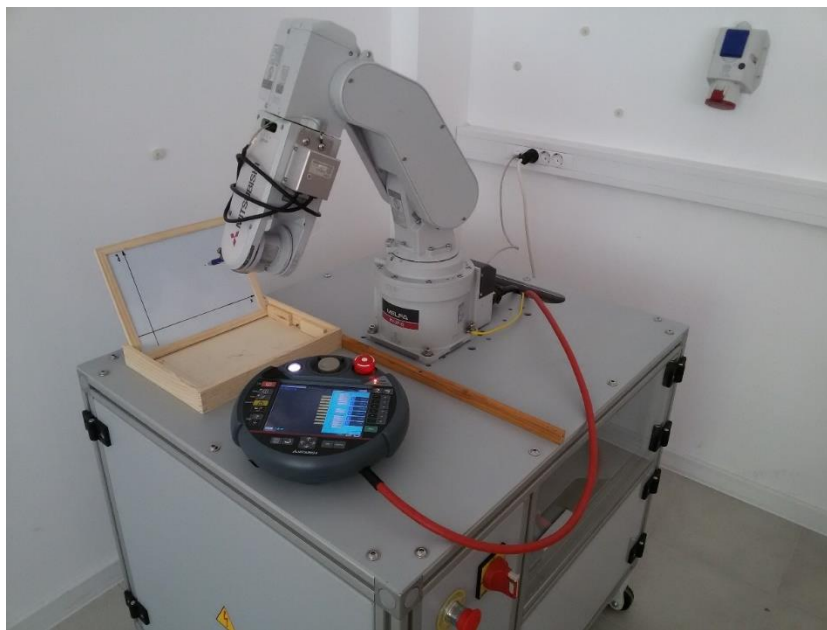
1. ВЪВЕДЕНИЕ

В Част I на едноименната статия се разглежда изчислителна методика за намиране на трансформацията между координатни системи в дву- и тримерното пространство. В това продължение описаният подход се прилага на практика

чрез провеждане на експерименти с използване на промишлен робот Mitsubishi Melfa. Съставят се няколко опитни постановки за снемане на данните, включително посредством съществуващите инструменти в използвания робот. За целите на изследването е създадено специално софтуерно приложение, което управлява робота при преместване и подреждане на предмети между различни работни пространства. Изчислените резултати се сравняват с данните от измерванията и се анализира съответствието между тях. Разглежда се приложимостта на методиката за практическо изучаване на движенията при този клас промишлени роботи, както и за установяване на неточности в тяхното позициониране.

2. ИЗПОЛЗВАНИ КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАНОВКА

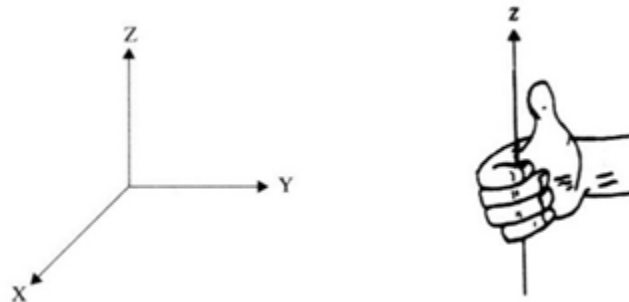
За провеждане на изследванията се използва промишлен робот Mitsubishi Melfa, модел RV-2F-Q, с който катедрата разполага в новоизградената лаборатория „Роботика и автоматика“. Той се състои от сериен манипулатор с антропоморфна структура (т.нар. „роботизирана ръка“), контролер CR750-Q, пулт за дистанционно управление и допълнително приспособена работна маса (фиг.1).



Фиг.1. Робот Mitsubishi Melfa RV-2F-Q – манипулаторът е закрепен върху работна маса, в която е поместен контролерът.

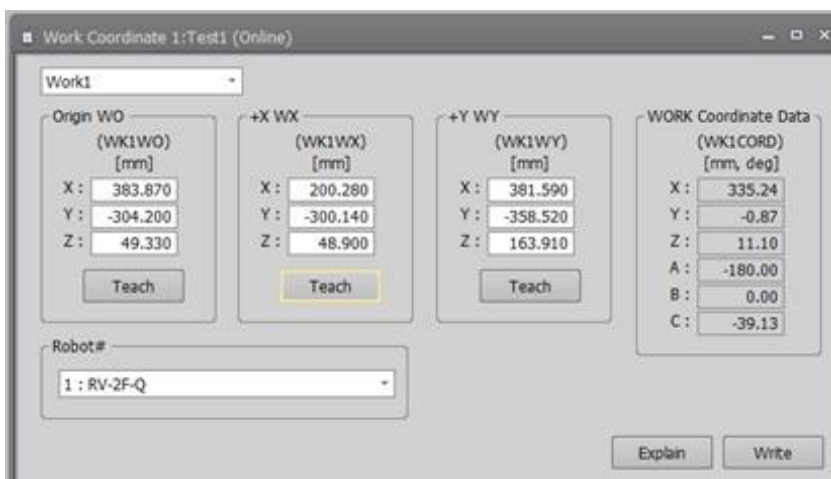
Манипулаторът има 6 степени на свобода и товароносимост 2 kg [1]. Вътрешните координатни системи включват основната координата („Base 0“), координатата на инструмента („Tool“) и евентуално една или повече потребителски координатни системи. Взаимното разположение на осите при всяка от тези системи се подчинява на правилото на дясната ръка (фиг.2). Основната координатна система се определя от положението на монтажния фланец на робота. Началото ѝ представлява проекция на оста на въртене на първата става в равнината, определена от основата на робота. [2]. Когато към крайния фланец (т.нар. „механичен интерфейс“) на робота не е прикрепен инструмент, по подразбиране координатната система „Tool“ започва от центъра на фланеца, оста z е насочена

от него навън, а осите x и y са перпендикулярни на нея и помежду си. Във възприетата от Mitsubishi терминология е прието центърът на тази система да се нарича „контролна точка“. Когато има инструмент, напр. хващач или заваръчна горелка, трябва да се определи изместването на контролната точка. Най-добре е това да се съобрази със специфичното приложение, като например в случая с хващач точката може да е средата на разстоянието между палците му. При евентуална смяна на инструмента е необходимо само да се промени отместването на контролната точка и отново не се налага цялостно препрограмиране. Често в практиката се използват инструменти, които са ротационно симетрични, така че е достатъчно да се зададе отместване само по z .

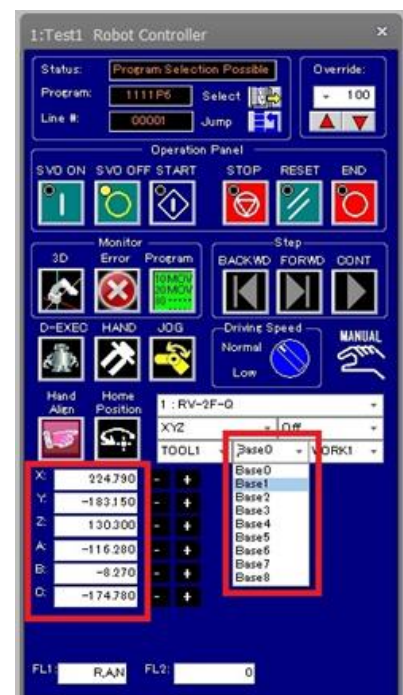


Фиг.2. Правило на дясната ръка: палецът сочи положителната посока на z , а завъртането на останалите пръсти е от x към y [3].

За целите на конкретно приложение на робота е удобно да се създадат работни пространства, които се описват с изцяло персонализирани координатни системи (в серията Melfa се именуват като „Base N“, където $N \in [1, 8]$). По този начин непосредствено може да се програмира придвижването и положението на инструмента по отношение на всяка от зададените потребителски (работни) системи.



Фиг.3. Задаване на работна координатна система в прозореца „Work coordinate“ на RT Toolbox 3.



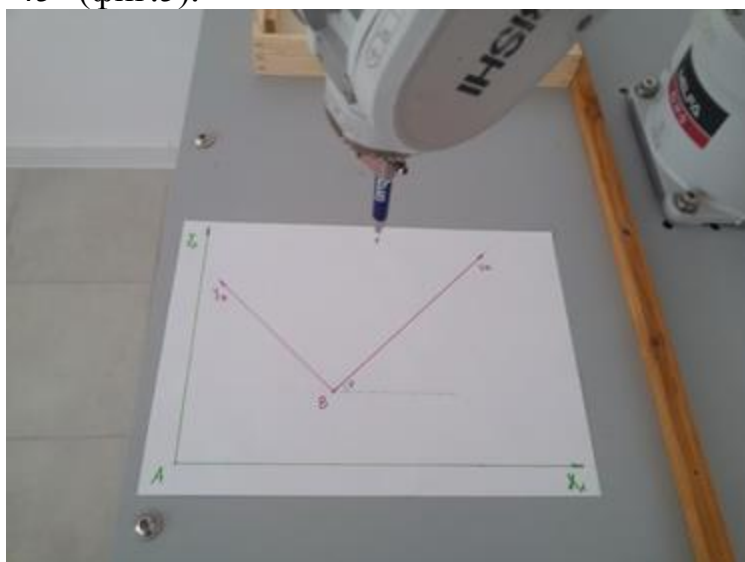
Фиг.4. Контролен панел и избор на координатна система.

При използвания робот може да се задават работни системи в софтуера RT Toolbox (фиг.3), като се посочат координатите на центъра и по една точка съответно от оста x и y . [4] Направлението на z се определя от свойствата на Декартовата координатна система и правилото на дясната ръка.

За постигане на по-голяма прецизност е необходимо инструментът да е с достатъчно тесен връх (в случая е използвана химикалка) и контролната точка максимално добре да съвпада с него. След това се снима описанието на няколко точки във всяка координатна система. Контролната точка се привежда в желаното местоположение и последователно се отчитат координатите в двете работни пространства - чрез смяна на параметъра „Base 0“, ..., „Base 8“ в контролния панел (фиг.4).

3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРАНСФОРМАЦИЯТА В ДВУМЕРНОТО ПРОСТРАНСТВО

За първия експеримент се съставят две координатни системи в равнина, като между тях има отместване около 100 mm по оста x и 50 mm по y , както и ротация под ъгъл $\theta \approx 45^\circ$ (фиг.5).



Фиг.5. Опитна постановка за изследване на трансформацията в двумерното пространство.

Съгласно приложената методика в Част I на едноименната статия, описанието на дадена т. P в системата A може да се получи, като матрицата ${}^A T_B$ се умножи отдясно с вектора, описващ местоположението на точката в системата B :

$${}^A \vec{p} = {}^A T_B {}^B \vec{p} \quad (1)$$

Ако вместо вектори, описващи по една точка, се използват матрици с вектор-колони, (1) може да се представи в следния вид:

$${}^A P = {}^A T_B {}^B P \Rightarrow {}^A T_B = {}^A P ({}^B P)^{-1} \quad (2)$$

Т.е. за намиране на матрицата на трансформация от A към B трябва да се изчисли инверсната матрица на ${}^B P$ и да се умножи отдясно на ${}^A P$. Това изисква подходящо описание във всяка от двете равнини. Тъй като ${}^A T_B$ в хомогенен вид трябва да има размерност 3×3 , такава трябва да е и размерността на матриците, съставени от вектор-колони, които на свой ред описват местоположенията на

снетите точки. Тези матрици също ще бъдат в хомогенен вид, което означава, че последният ред на всяка от тях ще е съставен от елементи със стойност 1. Следователно за построяването им е необходимо да се използват координатите на три точки:

$${}^i P = \begin{bmatrix} {}^i P_{0_x} & {}^i P_{1_x} & {}^i P_{2_x} \\ {}^i P_{0_y} & {}^i P_{1_y} & {}^i P_{2_y} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

където i е означението на координатната система – A или B .

В табл.1 са представени снетите данни за три точки ($P0$ и $P1$ и $P2$), описани във всяка от двете системи – A и B .

Табл. 1.

точка	ос	координатна система A	координатна система B
$P0$	x	25.55	-0.31
	y	123.55	104.66
$P1$	x	224.86	53.08
	y	-0.08	-123.72
$P2$	x	72.75	7.4
	y	87.31	45.65

След като тези координати се заместят в (3), за ${}^A P$ и ${}^B P$ се получава:

$${}^A P = \begin{bmatrix} 25.55 & 224.86 & 72.75 \\ 123.55 & -0.08 & 87.31 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^B P = \begin{bmatrix} -0.31 & 53.08 & 7.4 \\ 104.66 & -123.72 & 45.65 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрицата ${}^A T_B$ се изчислява по (2):

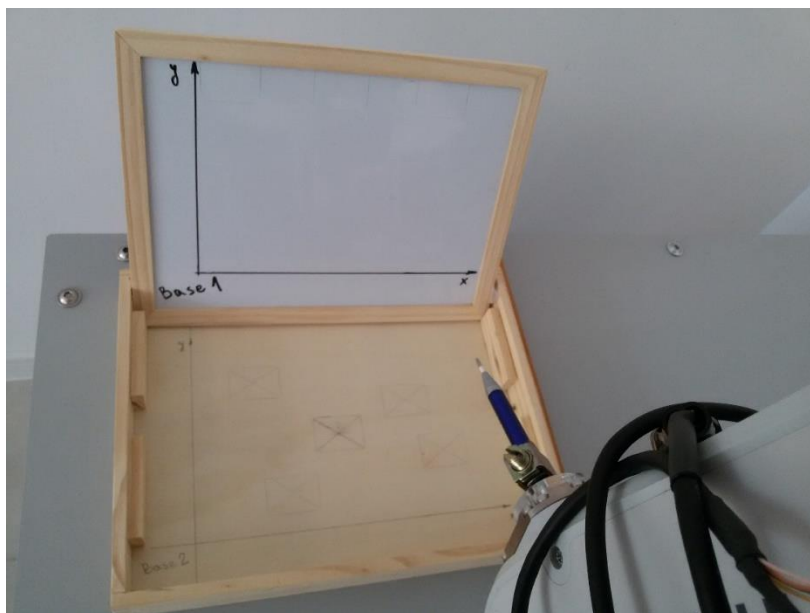
$${}^A T_B = \begin{bmatrix} 25.55 & 224.86 & 72.75 \\ 123.55 & -0.08 & 87.31 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.121872 & 0.03287 & -2.40235 \\ 0.042461 & 0.005548 & -0.56747 \\ -0.16433 & -0.03842 & 3.969824 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.706428 & -0.70757 & 99.8228 \\ 0.705952 & 0.70637 & 49.84017 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

За верифициране на показаната изчислителна методика се провежда сравнение между стойностите на елементите в получената матрица и стойностите, заложи при съставянето на опитната постановка. На практика, постановката е реализирана с точност до 1 mm, така че е уместно елементите в матрицата да се закръглят до целочислени стойности. Сравнението показва, че резултатът от изчисленията съответства на действителната трансляция (100 mm по x и 50 mm по y) и ротация ($\cos^{-1}(0.706) \approx 45^\circ$).

4. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРАНСФОРМАЦИИ В ТРИМЕРНОТО ПРОСТРАНСТВО

Постановката на тази задача представлява конструкция от две неподвижно свързани една към друга плоскости. Всяка от тях определя равнина, която служи за основа на работно пространство - наименувани в контролера на робота като „Base 1“ и „Base 2“ (фиг.6). Реализирано е софтуерно приложение, чрез което роботът премества твърди предмети от едно работно пространство в друго (фиг.7). Хващачът последователно взема наредените един върху друг предмети

(кубчета с прикрепени към тях магнити) от първата плоскост, премества ги в пространството и ги поставя върху втората плоскост един до друг. След това процесът продължава в обратен ред.



Фиг.6. Опитна постановка за изследване на трансформации в тримерното пространство.

Движението се извършва в тримерното пространство, като на различни етапи от приложението предметите може да бъдат отместени един спрямо друг по всяка от трите оси.



Фиг.7. Преместване на предмети между различни работни области.

За този експеримент са снети координатите на 6 точки, описани в 3 системи: „Base 0“ (основната отправна система на робота), „Base 1“ и „Base 2“ (табл.2). Тъй като се разглеждат тримерни координати, в хомогенен вид матрицата на трансформация 1T_2 (т.е. от „Base 1“ към „Base 2“), както и матриците, съставени от вектор-колони, ще бъдат с размерност 4 x 4, което налага да се използва описанието на 4 точки (P_0, P_1, P_2 и P_3) от тези в табл. 2 . В (3) се добавя още един ред за оста z:

$${}^iP = \begin{bmatrix} {}^iP_{0x} & {}^iP_{1x} & {}^iP_{2x} & {}^iP_{3x} \\ {}^iP_{0y} & {}^iP_{1y} & {}^iP_{2y} & {}^iP_{3y} \\ {}^iP_{0z} & {}^iP_{1z} & {}^iP_{2z} & {}^iP_{3z} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Табл.2.

точка	ос	Base 0	Base 1	Base 2
P_0	x	383.9	-0.03	4.44
	y	-304.07	-0.15	181.66
	z	49.22	0.07	43.23
P_1	x	212.03	171.88	176.32
	y	-300.31	-0.12	179.83
	z	48.84	0.03	43.28
P_2	x	381.67	0.72	4.93
	y	-359.27	128.07	236.57
	z	164.94	-0.23	159.1
P_3	x	349.13	34.29	38.84
	y	-311.09	116.07	188.71
	z	174.09	46.59	168.17
P_4	x	251.38	143.35	142.55
	y	182.75	-246.5	-303.49
	z	5.73	418.64	-1.35
P_5	x	414.49	-29.93	-25.76
	y	-275.75	-32.86	153.06
	z	26.84	16.64	20.67

Тук i е номерът на координатната система в записа „Base i “, т. е. 0, 1 или 2.

За да се намери матрицата на трансформация от „Base 1“ към „Base 2“, съгласно (2), трябва 1P да се умножи отлясно с инверсната матрица на 2P . След като в (4) се заместят експериментално сметените координати на точките, за 1P и 2P се получава:

$${}^1P = \begin{bmatrix} -0.03 & 171.88 & 0.72 & 34.29 \\ -0.15 & -0.12 & 128.07 & 116.07 \\ 0.07 & 0.03 & -0.23 & 46.59 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^2P = \begin{bmatrix} 4.44 & 176.32 & 4.93 & 38.84 \\ 181.66 & 179.83 & 236.57 & 188.71 \\ 43.23 & 43.28 & 159.1 & 168.17 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрицата 1T_2 отново може да се намери по (2):

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} -0.03 & 171.88 & 0.72 & 34.29 \\ -0.15 & -0.12 & 128.07 & 116.07 \\ 0.07 & 0.03 & -0.23 & 46.59 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.005873 & -0.00531 & -0.00609 & 2.254664 \\ 0.005859 & 0.003805 & -0.00183 & -0.63819 \\ 0.000222 & 0.020817 & -0.00124 & -3.72925 \\ -0.000208 & -0.01931 & 0.009151 & 3.112772 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1.00025 & 0.007071 & -0.00111 & -5.70777 \\ 0.00444 & 0.425381 & 0.904981 & -116.567 \\ -0.00999 & -0.90459 & 0.426132 & 146.0204 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ако стойностите на елементите в 1T_2 се закръглят до втория знак след десетичния разделител, матрицата добива вида на общото описание за ротация около една ос (формула 14 в Част I), по което може да се заключи, че координатната

система „Base 2“ е завъртяна спрямо „Base 1“ около оста x под ъгъл приблизително 65° и е отместена на приблизително 40 mm по x , 189 mm по y и 168 mm по z .

По (1) се пресмятат какви би трябвало да са координатите на точки $P4$ и $P5$ съгласно изведеното по-горе описание на трансформацията. Също така се намира грешката между изчислените и измерените стойности по следната формула:

$$e = \frac{p_c - p_a}{p_c} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

където p_c – изчислена, а p_a – измерена координата.

В табл.3 са представени получените резултати за изчислените, измерените координати и грешката за двете точки.

Табл. 3.

Изчислени, измерени координати и грешка за точките $P4$ и $P5$

точка	ос	изчислени координати, mm	измерени координати, mm	грешка, %
$P4$	x	134.7333108	134.35	0.284
	y	-246.254515	-246.5	-0.100
	z	418.5553726	418.64	-0.020
$P5$	x	-30.41478616	-29.93	1.594
	y	-32.86637642	-32.86	0.019
	z	16.62935966	16.64	-0.064

Макар стойностите да са много близки, наблюдава се известно несъответствие между изчислените и измерените координати, като то е най-силно за описанията по оста x .

5. ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА СЪСТАВНА ТРАНСФОРМАЦИЯ

Привеждането на пространственото описание в хомогенен вид позволява по-ефективно изчисляване последователно на няколко трансформации. Това се налага например при дейности, свързани с решаване на правата и обратната задача на кинематиката, при което е необходимо да се намерят трансформациите последователно на всички звена на робота. Резултатът отново би бил полезен в обучителния процес и конкретно провеждането на лабораторни упражнения, тъй като може да послужи като основа за реализиране на управление на роботизирани системи, при които такова поначало липсва.

За да се провери тази методика, изчислява се трансформацията от „Base 0“ към „Base 1“ чрез умножаване на трансформациите съответно от „Base 0“ към „Base 2“ и от „Base 2“ към „Base 1“:

$${}^0T_1 = {}^0T_2 {}^2T_1 \quad (6)$$

Чрез обръщане на вече намерената 1T_2 се получава 2T_1 , а 0T_2 се изчислява по геоописания начин:

$${}^0T_2 = {}^0P ({}^2P)^{-1} \quad (7)$$

Резултатите са следните:

$$\begin{aligned}
{}^2T_1 = ({}^1T_2)^{-1} &= \begin{bmatrix} 0.999827 & -0.00201 & 0.00687 & 4.469205 \\ -0.01093 & 0.426194 & -0.90514 & 181.787 \\ 0.000232 & 0.904675 & 0.425423 & 43.33594 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0T_2 &= \begin{bmatrix} -1.000317 & -0.02904 & -0.00125 & 393.6708 \\ 0.01129 & -0.99927 & -0.00289 & -122.467 \\ -0.002547 & -0.00341 & 1.000331 & 6.605915 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0T_1 = {}^0T_2 \cdot {}^2T_1 &= \begin{bmatrix} -0.999828 & -0.0115 & 0.01888 & 383.8666 \\ 0.02221 & -0.42853 & 0.90333 & -304.197 \\ -0.002277 & 0.903527 & 0.42863 & 49.32542 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Стойностите показват, че трансформацията от координатна система „Base 0“ към „Base 1“ съгласно общия алгебричен вид на хомогенната трансформация (формула 10 в Част I) е приблизително 384 mm по оста x , -304 mm по y и 49 mm по z . Съгласно формалното описание на ротацията около една ос (формули 13 и 14 в Част I) оста x_1 е завъртяна на 180° спрямо x_0 , т.е. двете оси са успоредни, но с противоположна посока. Ъгълът между y_0 и y_1 (и съответно между z_0 и z_1) е 64° . След измерване се установява, че изчислените стойности съответстват на действителното местоположение на елементите в опитната постановка – масата на робота спрямо допълнително прикрепените плоскости.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата част на статията са приложени на практика описаните методи от Част I при използване на индустриален робот Melfa RV-2F-Q.

От начертани две координатни системи в двумерното пространство се снемат необходимите точки за изчисляване на трансформацията между тях и се установява точността на получените резултати. При подобна постановка се намира матрицата на трансформацията между две системи в тримерното пространство и се анализира съответствието на изчислените параметри с практически заложените. И при двата експеримента се установява, че разглежданата методика представлява точен аналитичен инструмент за намиране на трансформация, който с успех може да се прилага в лабораторни упражнения по дисциплини в сферата на роботиката.

Опитно е изследвано, че представената и в двете части методика за пресмятане на трансформацията като произведение на няколко други трансформации е коректна и е удачно да се използва в практически образователни занятия.

Когато обаче експерименталният подход използва по-прецизно измерване чрез фабрично заложените в робота процедури (което изключва възможността за човешка грешка), се откриват известни несъответствия между изчислените и измерените стойности. Установяват се грешки между показваните от контролера координати на две точки и получените съгласно матрицата координати на същите точки. Възможно е това да се дължи на износване на конструктивните

елементи в манипулатора, разтягане на синхронизиращите ремъци и др. Забелязва се, че грешката е по-силно изразена за описанието по оста x , от което може да се предположи и наличие на неточности в изчислителните алгоритми на робота. Всичко това несъмнено представлява интерес за бъдещи изследвания. Процедурата за намиране на грешки в позиционирането може да се използва за съставяне на показатели за износоустойчивостта и за необходимостта от профилактична поддръжка или преждевременна подмяна на конструктивни елементи при този тип промишлени работи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mitsubishi Electric, RV-2F-Q Series Standard Specifications Manual
- [2] Wang, Wei & Yu, Guoyu & Xu, Min & Walker, David. (2014). Coordinate transformation of an industrial robot and its application in deterministic optical polishing. *Optical Engineering*. 53. 055102. 10.1117/1.OE.53.5.055102.
- [3] Arjuna Senanayake, 2D and 3D Coordinate Systems. Graphs, <https://image.slidesharecdn.com/lecture2-1-graphsi-linear-120910035134-phpapp02/95/fundamentals-of-2d-and-3d-graphs-16-728.jpg?cb=1347249208>
- [4] Mitsubishi Electric, CR750/CR751 Series Controller Instruction Manual. Detailed explanations of functions and operations

Автор: Данаил Славов, ас. инж., катедра „Автоматизация на електрозадвижванията“, Факултет Автоматика, Технически Университет-София, E-mail address: d.slavov@tu-sofia.bg

Постъпила на 07.10.2019 г.

Рецензент: доц. д-р Владимир Христов