

Lucrarea 4


Măsurarea efectorului final la roboții ER V+ și ER și ER VII

Scopul lucrării:


- măsurarea (calibrarea) efectorului final al roboților;
- măsurarea (calibrarea) piesei unei aplicații robotizate cu o sculă cunoscută;
- determinarea erorii de măsurare a piesei cu scula calibrată față de măsurarea piesei efectuată anterior.

Noțiuni teoretice:


Măsurarea (calibrarea) sculei




Ce avantaje se obțin prin măsurarea sculei?



Orientare




Direcție de prelucrare (strivire) a sculei

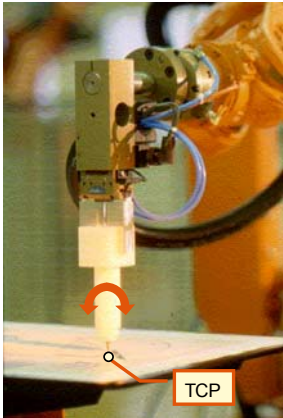


Viteză comandată pe traiectoria sculei

KUKARoboter GmbH, Hery Park 3000, D-86368 Gersthofen, Tel.: +49 (0) 8 21 45 33-1906, Fax: +49 (0) 8 21 45 33-2340, <http://www.kuka-roboter.de> 111.01.2004 | College IAC 1.2
© Copyright by KUKARoboter GmbH College

Exemplu de reorientare





TCP

- Scula poate fi orientată în orice punct din spațiu în jurul TCP-ului fără a modifica poziția vârfului sculei.

KUKARoboter GmbH, Hery Park 3000, D-86368 Gersthofen, Tel.: +49 (0) 8 21 45 33-1906, Fax: +49 (0) 8 21 45 33-2340, <http://www.kuka-roboter.de> 108.01.2004 | College IAC 1.2
© Copyright by KUKARoboter GmbH College

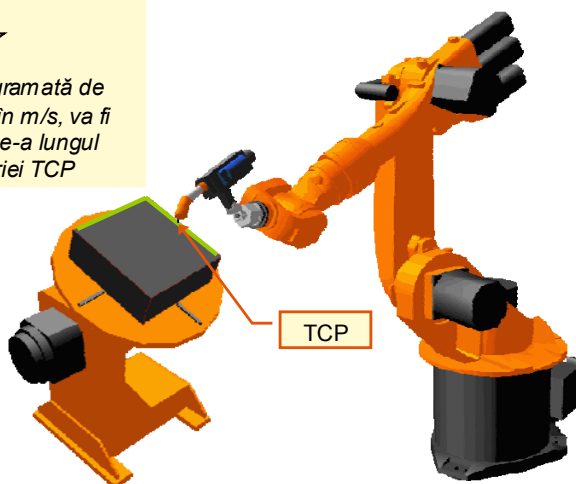
Conceptul de măsurare a sculei (viteză comandată pe traiectorie)



Funcționarea în program



Viteza programată de deplasare, în m/s, va fi realizată de-a lungul traiectoriei TCP

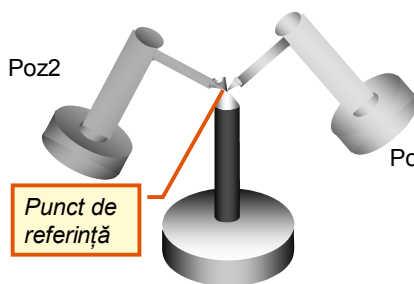


KUKARoboter GmbH, Hery Park 3000, D-86368 Gersthofen, Tel.: +49 (0) 8 21 45 33-1906, Fax: +49 (0) 8 21 45 33-2340, <http://www.kuka-roboter.de> 108.01.2004 | College IAC 1.1
© Copyright by KUKARoboter GmbH College

Metoda de lucru:

- Se aduce TCP-ul sculei în punctul de referință cu 2 orientări diferite ale sculei, ca în figura de mai jos.

Schema metodei de calibrare a sculei



- Deplasarea spre punctul de referință cu scula în 2 orientări diferite (Poz1 și Poz2).

• Important: orientările corespunzătoare situațiilor diferite ale sculei trebuie să fie suficient de diferite una de cealaltă



Micșorați viteza de deplasare a sculei în zona punctului de referință pentru a diminua probabilitatea producerii strivirilor.

- Se notează valorile numerice afișate pe monitor, obținute prin comanda LISTPV POSITION, pentru Poz1 și Poz2.
- Se reia activitatea depusă în lucrarea 2 de măsurare a piesei, așa cum a fost ea explicată în documentație, de această dată cu stiftul măsurat fixat în dispozitivul de prehensiune.
- Se notează valorile numerice afișate pe monitor (și impulsurile traductoarelor de poziție ale axelor robotului!), obținute prin comanda LISTPV POSITION, pentru poziții ale robotului în punctele notate cu ${}^P O$, A (punct pe sensul pozitiv al axei ${}^P O^P X$ și în punctul 3 de pe piesă).

Temă pentru acasă

- Se realizează calculele problemei poziționale directe (după modelul matematic din Anexa lucrării 4), cu valorile obținute ca mai sus, pentru Poz1 și Poz2, în care se înlocuiește:

lung 4=194.1705 mm, în loc de lung4=145 mm, pentru robotul ER V+;

lung 4=264.2 mm, în loc de lung4=210 mm pentru robotul ER VII.

Această modificare a valorii numerice a lungimii elementului 4, notat cu lung4 se realizează din cauza deplasării TCP-ului robotului din dispozitivul de prehensiune, în vârful știftului.

- După realizarea calculelor lui x_{Poz1} , y_{Poz1} , z_{Poz1} și a lui x_{Poz2} , y_{Poz2} , z_{Poz2} , se calculează eroarea absolută a valorilor coordonatelor carteziene, adică:

$$\varepsilon_x = x_{Poz1} - x_{Poz2}$$

$$\varepsilon_y = y_{Poz1} - y_{Poz2}$$

$$\varepsilon_z = z_{Poz1} - z_{Poz2}$$

De remarcat că aceste erori ar trebuie să fie cât mai mici sau nule, pentru că x_{Poz1} , y_{Poz1} , z_{Poz1} și x_{Poz2} , y_{Poz2} , z_{Poz2} sunt coordonatele carteziene ale unor poziții ale robotului corespunzătoare aceluiași punct din spațiul de lucru (punctul de referință).

- Se realizează calculele problemei poziționale directe, cu valoarea lui lung4=194.1705mm (ER V+) și lung4=264.2 mm (ERVII) pentru pozițiile robotului în punctele ${}^P O$, A și 3. Se notează valorile coordonatelor carteziene ale poziției 3 cu ${}^R x'_3$, ${}^R y'_3$, ${}^R z'_3$.
- Se repetă calculele pentru determinarea matricii de trecere ${}^R T_P$, cu noile valori ale coordonatelor x, y, z ale lui ${}^P O$, A, obținute cu scula măsurată.
- Se repetă calculele pentru determinarea vectorului de poziție a punctului 3, în raport cu baza robotului, cu matricea de trecere nou determinată, adică $[{}^R x_3 \ {}^R y_3 \ {}^R z_3 \ 1]$.
- Se calculează erorile absolute dintre valorile obținute din problema pozițională directă cu cele obținute prin matricea de trecere, adică:

$$\varepsilon_x = {}^R x'_3 - {}^R x_3$$

$$\varepsilon_y = {}^R y'_3 - {}^R y_3$$

$$\varepsilon_z = {}^R z'_3 - {}^R z_3$$

De remarcat că aceste erori trebuie să fie mai mici decât erorile dintre coordonatele carteziene ale punctului 3, citit pe monitor și cele calculate cu matricea de trecere de la P la R, din lucrarea 2.

Anexă la lucrarea 4

Modelul matematic al problemei poziționale directe a unui robot

Se prezintă etapele și formulele de calcul ale problemei poziționale directe¹ pentru roboții ER V+ și ER VII.

Date de intrare (parametrii dimensionali ai elementelor robotului și rapoartele de transmitere) pentru fiecare axă comandată a roboților sunt date în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Parametrii dimensionali și de calcul ai roboților ER V+ și ER VII

Notații în model	Semnificația notației	Valoare numerică pentru robotul ER V+	Valoare numerică pentru robotul ER VII
offx	Coordonata x a axei comandate 2 față de sistemul de referință atașat bazei robotului (R) (offset x)	16 mm	50 mm
offz	Coordonata z a axei comandate 2 față de sistemul de referință atașat bazei robotului (R) (offset z)	349 mm	358.5 mm
lung 2	Lungimea elementului cuplei cinematice ² 2	221 mm	300 mm
lung 3	Lungimea elementului cuplei cinematice 3	221 mm	250 mm
lung 4	Lungimea elementului cuplei cinematice 2	145 mm	210 mm
par 33	Parametru, al cărui valoare este numărul de impulsuri la traductorul de poziție al axei comandate 1 pentru o rotație cu +90°.	12770	23040
par 34	Parametru, al cărui valoare este numărul de impulsuri la traductorul de poziție al axei comandate 2 pentru o rotație cu +90°.	-10216	-23040
par 35	Parametru, al cărui valoare este numărul de impulsuri la traductorul de poziție al axei comandate 2 pentru o rotație cu +90°.	10216	23040
par 36	ER V: diferența dintre numărul de impulsuri ale traductoarelor de poziție 4 și 5 (enc4-enc5) pentru o rotație de +90° a axei 4 (Pitch)	5022	28800
	ER VII: parametrul, al cărui valoare este numărul de impulsuri la traductorul de poziție al axei comandate 4 (Pitch) pentru o rotație cu +90°.		

¹ Problema pozițională directă roboților: se dau variabilele de mișcare în axele comandate ale robotului (θ_i), parametrii dimensionali ai structurii mecanice a robotului (lungimi de elemente și offset-uri) și trebuie să se calculeze coordonatele carteziene ale punctului caracteristic al robotului (x_M, y_M, z_M).

² Denumirile de cuplă cinematică conducătoare și de axă comandată desemnează aceeași noțiune: subansamblul "i", aparținând sistemului mecanic al robotului, format din motor cu traductor de poziție, transmisie mecanică, carcasă și elemente de fixare cu celelalte elemente "i-1" și "i+1" ale robotului.
(i-1 poate fi elementul fix și i+1 poate fi efectorul final, pentru respectiv primul și ultimul element al dispozitivului de ghidare al robotului)

Notații în model	Semnificația notației	Valoare numerică pentru robotul ER V+	Valoare numerică pentru robotul ER VII
par 37	ER V: suma numărului de impulsuri ale traductoarelor de poziție 4 și 5 (enc4+enc5) pentru o rotație de +90° a axei 4 (Roll)	5022	9600
	ER VII: parametrul, al cărui valoare este numărul de impulsuri la traductorul de poziție al axei comandate 5 (Roll) pentru o rotație cu +90°.		
θ_{10}	Unghiul format între axa de simetrie a elementului 1 și paralela cu o dreaptă (dreaptă orizontală), conținută în planul Oxy a sistemului de referință (R), pentru poziția 0 ³ a robotului.	0°	-2,835°
θ_{20}	Unghiul format între axa de simetrie a elementului 2 și paralela cu o dreaptă (dreaptă orizontală), conținută în planul Oxy a sistemului de referință (R), pentru poziția 0 a robotului.	120,2555°	45,6°
θ_{30}	Unghiul format între axa de simetrie a elementului 2 și paralela cu o dreaptă (dreaptă orizontală), conținută în planul Oxy a sistemului de referință (R), pentru poziția 0 a robotului.	25,25271,	10,7°
θ_{40}	Unghiul format între axa de simetrie a elementului 2 și paralela cu o dreaptă (dreaptă orizontală), conținută în planul Oxy a sistemului de referință (R), pentru poziția 0 a robotului.	296.4°	7,5°

Etapele de calcul ale problemei poziționale directe a robotului ER V+ și ER VII

1. Transformarea numărului de impulsuri în grade sexazecimale (deg) de rotație în axele comandate ale robotului:

Exemplul 1:

Fie par 34=-23040 al robotului ER VII și numărul de impulsuri al axei 2, 2: -1653, imp2=-1653.

Se calculează cu regula de trei simplă gradele corespunzătoare celor 1653 impulsuri înregistrate:

³ Poziția 0 a robotului (comandată prin MOVE 0) este poziția robotului în care numărul de impulsuri ale traductoarelor de poziție din axele comandate ale robotului sunt 0. (prin comanda LISTPV POSITION se obține: 1: 0 2: 0 3: 0 4: 0 5: 0 și
X:1690 Y: 0 Z: 5043 P: -636 R:0 pentru robotul ER V+ și

1: 0 2: 0 3: 0 4: 0 5: 0 și
X:7128 Y: -353 Z: 6467 P: -78 R:-201 pentru robotul ER VII.

$$\Delta\theta_2 = \frac{\frac{(imp2)}{(\underline{par34})}}{90^\circ} = \frac{\frac{(-1653)}{(-23040)}}{90^\circ} = \frac{(-1653)}{(-256)} = 6.45703125^\circ$$

Exemplul 2:

Fie par 36= 5022 al robotului ER V+, numărul de impulsuri al axei 4 este, 4: -761, imp4=-761 și respectiv al axei 5 este 5: 661, imp5=661. Se calculează unghiul de rotație al axei 4 corespunzător numărului de impulsuri înregistrate de traductoarele de poziție 4 și 5:

$$\Delta\theta_4 = \frac{\frac{imp4 - imp5}{\underline{par36}}}{90^\circ} = \frac{\frac{-761 - 661}{5022}}{90^\circ} = \frac{-1422}{55,8} = 25,48^\circ.$$

Pentru axele comandate 1-4 ale roboților se calculează unghiurile de rotație corespunzătoare numărului de impulsuri înregistrate de traductoarele de poziție, adică se calculează $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$ și $\Delta\theta_4$.

2. Calculul unghiurilor dintre o paralelă la dreapta orizontală din planul Oxy al sistemului de referință atașat bazei robotului și axa de simetrie a fiecărui element 1-4.

Unghiul de calcul θ_i (i=1-4)	Robotul ER V+	Robotul ER VII
θ_1	$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta\theta_1$	$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta\theta_1$
θ_2	$\theta_2 = \theta_{20} + \Delta\theta_2$	$\theta_2 = \theta_{20} + \Delta\theta_2$
θ_3	$\theta_3 = \theta_{30} + \Delta\theta_3$	$\theta_3 = \theta_{30} + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_2$
θ_4	$\theta_4 = \theta_{40} + \Delta\theta_4$	$\theta_4 = \theta_{40} + \Delta\theta_4 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_2$

3. Calculul coordonatelor carteziene ale punctului caracteristic ale robotului M.

$$xyM = offx + lung2 \cdot \cos(\theta_2) + lung3 \cdot \cos(\theta_3) + lung4 \cdot \cos(\theta_4)$$

unde xyM este ipotenuza triunghiului dreptunghic, în care catetele triunghiului sunt x_M și y_M .

$$x_M = xyM \cdot \cos(\theta_1)$$

$$y_M = xyM \cdot \sin(\theta_1)$$

$$z_M = offz + lung2 \cdot \sin(\theta_2) + lung3 \cdot \sin(\theta_3) + lung4 \cdot \sin(\theta_4).$$

4. Exemplu numeric la ER V+

Fie o poziție a robotului, în care prin LISTPV POSITION, am obținut:

1: -10101 2: 1064 3: -1210 4: -618 5: 618
X: 522 Y: -1532 Z: 4666 P: -857 R: 0

1. Se calculează unghiurile $\Delta\theta_i$ (i=1-4), astfel:

$$\Delta\theta_1 = \frac{\frac{(imp1)}{(\underline{par33})}}{90} = \frac{\frac{(-10101)}{(12770)}}{90} = \frac{(-10101)}{(141.8889)} = -71.18950108^\circ$$

$$\Delta\theta_2 = \frac{\frac{(imp2)}{90}}{\frac{(par34)}{90}} = \frac{\frac{(1064)}{90}}{\frac{(-10216)}{90}} = \frac{(1064)}{(-113.511)} = -9.37354089^\circ$$

$$\Delta\theta_3 = \frac{\frac{(imp3)}{90}}{\frac{(par35)}{90}} = \frac{\frac{(-1210)}{90}}{\frac{(10216)}{90}} = \frac{(-1210)}{(113.511)} = -10.65600479^\circ$$

$$\Delta\theta_4 = \frac{\frac{imp4-imp5}{90^\circ}}{\frac{par36}{90^\circ}} = \frac{\frac{-618-618}{90^\circ}}{\frac{5022}{90^\circ}} = \frac{-1236}{55,8} = -22.15053763^\circ$$

2. Se determină prin calcul unghiurile de calcul θ_i ($i=1-4$).

$$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta\theta_1 = 0 - 71.18950108 = -71.18950108^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_{20} + \Delta\theta_2 = 120.2555 - 9.37354089 = 110.8819^\circ$$

$$\theta_3 = \theta_{30} + \Delta\theta_3 = 25.25271 - 10.65600479 = 14.59671^\circ$$

$$\theta_4 = \theta_{40} + \Delta\theta_4 = 296.4 - 22.15053763 = 274.2495^\circ$$

3. Calculul coordonatelor carteziene ale punctului M

$$\begin{aligned} xyM &= offx + lung2 \cdot \cos(\theta_2) + lung3 \cdot \cos(\theta_3) + lung4 \cdot \cos(\theta_4) = \\ &= 16 + 221 \cdot \cos(110.8819) + 221 \cdot \cos(14.59671) + 145 \cdot \cos(274.2495) = \\ &= 16 + 221 \cdot (-0.35644343) + 221 \cdot 0.967723648 + 145 \cdot 0.074099229 = 161.8373 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_M &= xyM \cdot \cos(\theta_1) = 161.8373 \cdot \cos(-71.1895) = 161.8373 \cdot 0.322439154 = 52.18269 \\ y_M &= xyM \cdot \sin(\theta_1) = 161.8373 \cdot \sin(-71.1895) = 161.8373 \cdot (-0.94659019) = -153.194 \\ z_M &= offz + lung2 \cdot \sin(\theta_2) + lung3 \cdot \sin(\theta_3) + lung4 \cdot \sin(\theta_4) = \\ &= 16 + 221 \cdot \sin(110.8819) + 221 \cdot \sin(14.59671) + 145 \cdot \sin(274.2495) = \\ &= 16 + 221 \cdot 0.934316904 + 221 \cdot 0.252013773 + 145 \cdot (-0.99725087) = 466.5777 \end{aligned}$$

În concluzie:

$$x_M = 52.18269$$

$$y_M = -153.194$$

$z_M = 466.5777$ valori obținute prin calcul. Rotunjind la zecimi de mm valorile obținute prin calcul, avem: $x_M = 52.2$; $y_M = -153.2$; $z_M = 466.6$.

Din controlerul robotului s-a obținut:

$$x_M = 52.2$$

$$y_M = -153.2$$

$$z_M = 466.6$$

Controlerul robotului calculează valorile numerice ale coordonatelor carteziene ale punctului M în zecimi de mm, ceea ce coincide perfect cu valorile numerice calculate.

5. Exemplu numeric la ER VII.

Fie o poziție a robotului, în care prin LISTPV POSITION, am obținut:

1: 4126	2: 3017	3: -1492	4: -1577	5: 569
X: 7297	Y: 1741	Z: 4411	P: -147	R: -148

4. Se calculează unghiurile $\Delta\theta_i$ ($i=1-4$), astfel:

$$\Delta\theta_1 = \frac{\frac{(imp1)}{90}}{\frac{(par33)}{90}} = \frac{\frac{(4126)}{90}}{\frac{(23040)}{90}} = \frac{(4126)}{(256)} = 16.1171875^\circ$$

$$\Delta\theta_2 = \frac{\frac{(imp2)}{90}}{\frac{(par34)}{90}} = \frac{\frac{(3017)}{90}}{\frac{(-23040)}{90}} = \frac{(3017)}{(-256)} = -11.78515625^\circ$$

$$\Delta\theta_3 = \frac{\frac{(imp3)}{90}}{\frac{(par35)}{90}} = \frac{\frac{(-1492)}{90}}{\frac{(23040)}{90}} = \frac{(-1492)}{(256)} = -5.828125^\circ$$

$$\Delta\theta_4 = \frac{\frac{imp4}{90^\circ}}{\frac{par36}{90^\circ}} = \frac{\frac{-1577}{90^\circ}}{\frac{28800}{90^\circ}} = \frac{-1577}{320} = -4.928125^\circ$$

5. Se determină prin calcul unghiurile de calcul θ_i ($i=1-4$).

$$\theta_1 = \theta_{10} + \Delta\theta_1 = -2.835 + 16.1171875 = 13.2821875^\circ$$

$$\theta_2 = \theta_{20} + \Delta\theta_2 = 45.6 - 11.78515625 = 33.81484375^\circ$$

$$\theta_3 = \theta_{30} + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_2 = 10.7 - 5.828125 - 11.78515625 = -6.91328125^\circ$$

$$\theta_4 = \theta_{40} + \Delta\theta_4 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_2 = 7.5 - 4.928125 - 5.828125 - 11.78515625 = -15.04140625^\circ$$

6. Calculul coordonatelor carteziene ale punctului M

$$\begin{aligned} xyM &= offx + lung2 \cdot \cos(\theta_2) + lung3 \cdot \cos(\theta_3) + lung4 \cdot \cos(\theta_4) = \\ &= 50 + 300 \cdot \cos(33.81484375^\circ) + 250 \cdot \cos(-6.91328125^\circ) + 210 \cdot \cos(-15.04140625^\circ) = \\ &= 50 + 300 \cdot (0.830840321) + 250 \cdot 0.992729467 + 210 \cdot 0.965738532 = 750.2396 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_M &= xyM \cdot \cos(\theta_1) = 750.2396 \cdot \cos(13.2821875^\circ) = 750.2396 \cdot 0.973250345 = 729.7561 \\ y_M &= xyM \cdot \sin(\theta_1) = 750.2396 \cdot \sin(13.2821875^\circ) = 750.2396 \cdot (0.229747178) = 174.1134 \\ z_M &= offz + lung2 \cdot \sin(\theta_2) + lung3 \cdot \sin(\theta_3) + lung4 \cdot \sin(\theta_4) = \\ &= 50 + 300 \cdot \sin(33.81484375^\circ) + 250 \cdot \sin(-6.91328125^\circ) + 210 \cdot \sin(-15.04140625^\circ) = \\ &= 50 + 300 \cdot 0.556510882 + 221 \cdot (-0.12036696) + 145 \cdot (-0.25951703) = 440.8629 \end{aligned}$$

În concluzie:

$$x_M=729.7561$$

$$y_M=174.1134$$

$$z_M=440.8629, \text{ valori obținute prin calcul.}$$

Valorile numerice rotunjite la zecimi de mm sunt:

$$x_M=729.8$$

$$y_M=174.1$$

$$z_M=440.9$$

Din controlerul robotului s-a obținut:

$$x_M=729.7$$

$$y_M=174.1$$

$$z_M=441.1.$$

Comparând valorile calculate cu cele afișate ale controlerului robotului se obțin erori:

$$\varepsilon_x=729.8-729.7=0.1; \quad \varepsilon_y=174.1-174.1=0; \quad \varepsilon_z=440.9-441.1= -0.2, \text{ valori acceptabile din}$$

punctul de vedere al preciziei de calcul.