



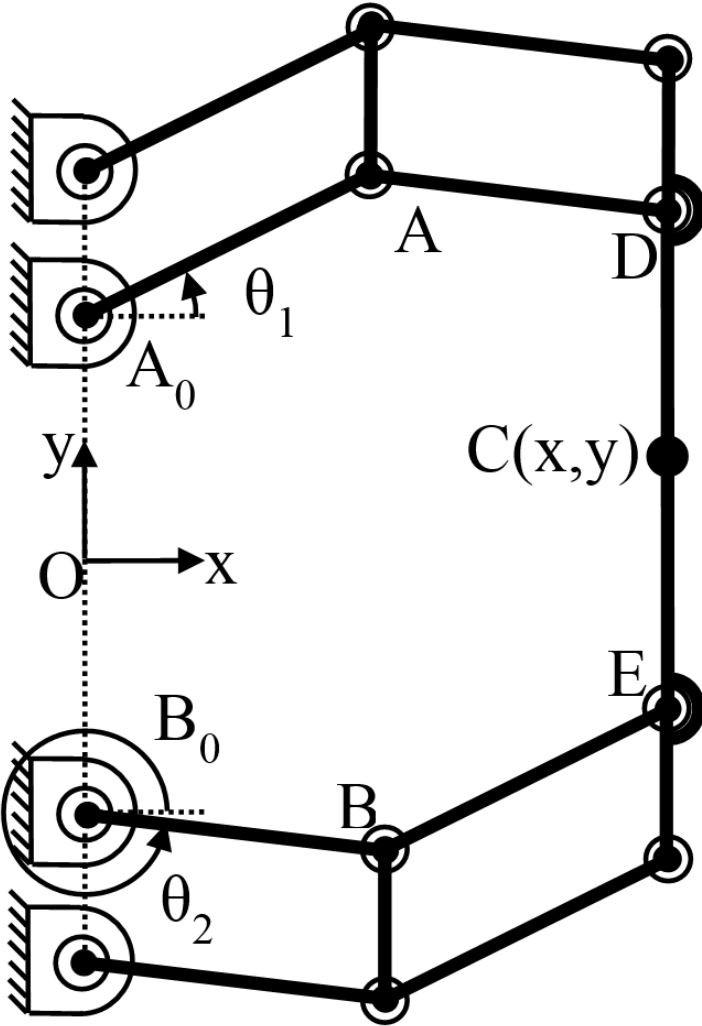
Kalibrasyon Çalışmaları

Doç. Dr. Gökhan Kiper

20-21 Kasım 2019

ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara

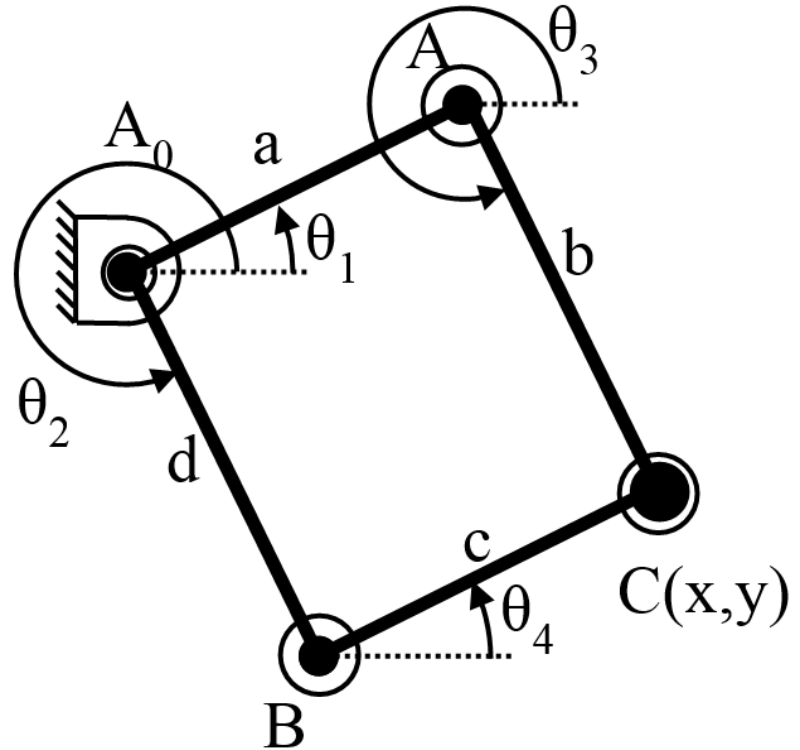
Kalibrasyon – Gizli Robot Kavramı



Gerçek model

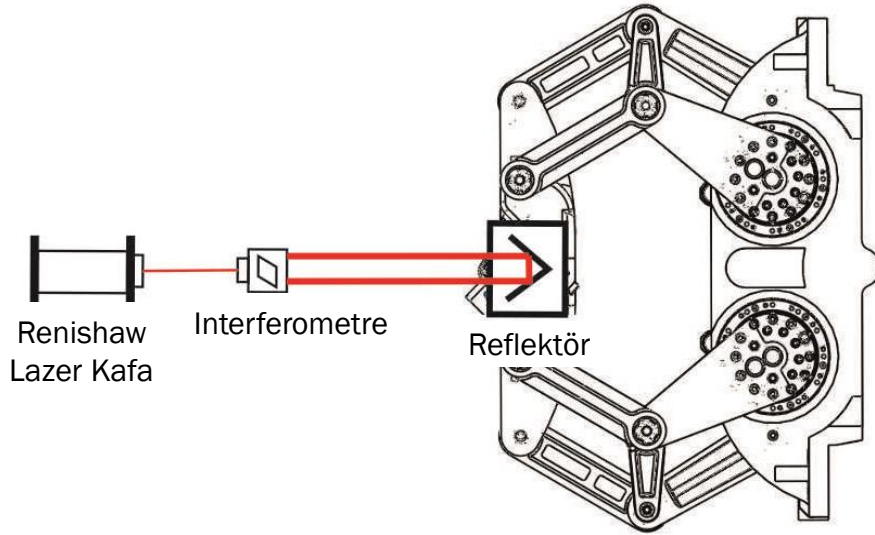
Kinematik denk sistem:

$$(\theta_1, \theta_2) \Leftrightarrow (x, y)$$



Gizli robot modeli

Kalibrasyon



Gizli robot için
uzuv boyutlarını
tespit et

Kinematik
modelde uzuv
boyutlarını
güncelle

Küçük aralıklarda
çalışma
uzayından
ölçümler al

Hata matrisi
oluştur

Rastgele
noktalardan
ölçüm al

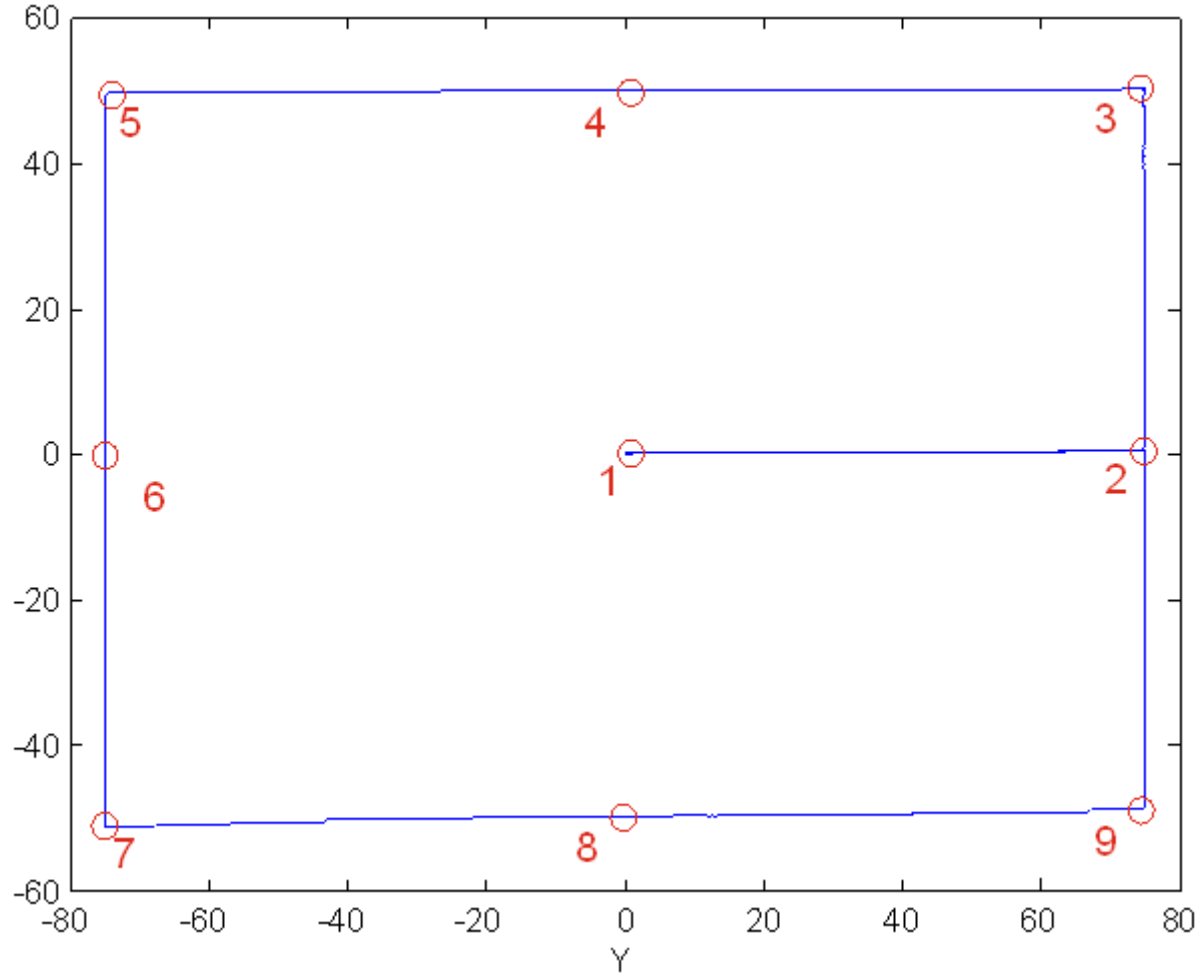
Konumlama ve
tekrarlanabilirlik
hassasiyeti
hesapla

Hedefler:

- Konumlama hassasiyeti $\leq 30 \mu\text{m}$
- Tekrarlanabilirlik $\leq 15 \mu\text{m}$

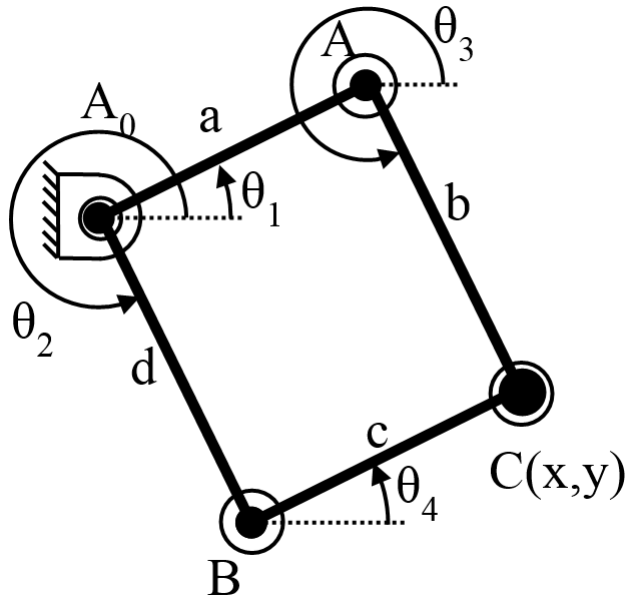
100 mm x 150 mm Çalışma Uzayında 9 Noktada Ölçüm

X-Y düzlemi



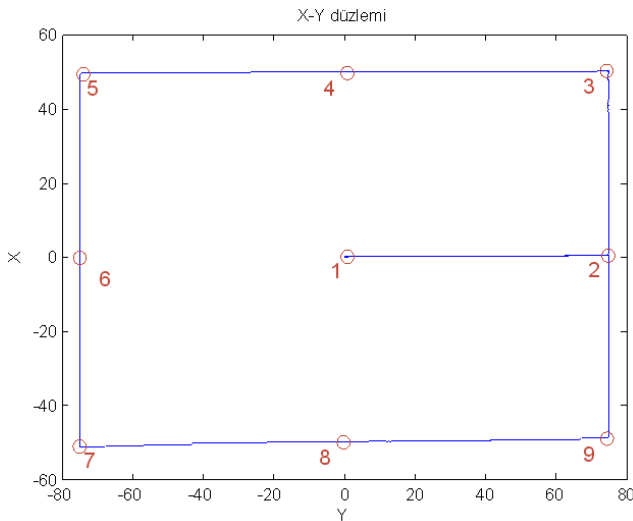
İstenen		Ölçülen	
x_i (mm)	y_i (mm)	x_i (mm)	y_i (mm)
212.132	0	212.132	0
212.132	75	212.55	74.95
262.132	75	262.32	74.85
262.132	0	262.03	0.04
262.132	-75	261.82	-74.87
212.132	-75	211.69	-74.96
162.132	-75	160.65	-75.18
162.132	0	162.22	-0.01
162.132	75	163.19	75.08

Model Parametrelerinin Tespiti



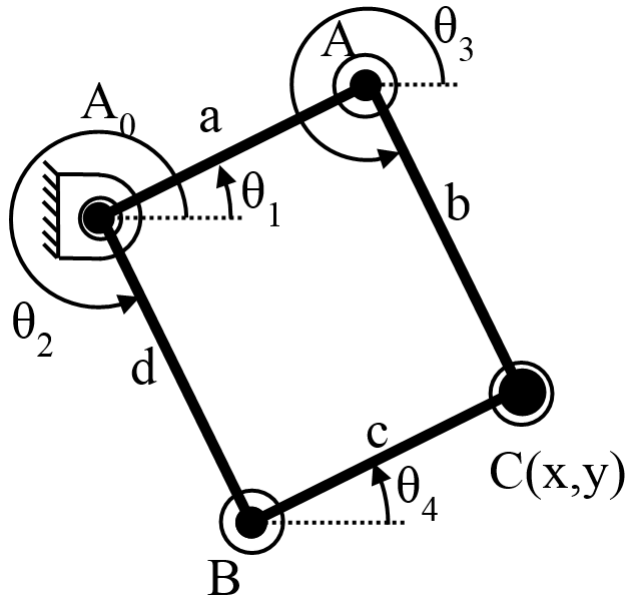
9 noktada hatalar hesaplanır:
 $(\delta_{x1}, \delta_{y1}), (\delta_{x2}, \delta_{y2}), \dots, (\delta_{x9}, \delta_{y9})$

i	Θ_1 (°)	Θ_2 (°)	İstenen		Ölçülen		Hata	
			x_i (mm)	y_i (mm)	x_i (mm)	y_i (mm)	δ_{xi} (μm)	δ_{yi} (μm)
1	45	-45	212.132	0	212.132	0	0	0
2	60.88	-21.94	212.132	75	212.55	74.95	418	-50
3	40.62	-8.69	262.132	75	262.32	74.85	188	-150
4	29.10	-29.10	262.132	0	262.03	0.04	-102	40
5	368.69	319.38	262.132	-75	261.82	-74.87	-312	130
6	381.94	299.12	212.132	-75	211.69	-74.96	-442	40
7	388.63	281.72	162.132	-75	160.65	-75.18	-1482	-180
8	57.29	-57.29	162.132	0	162.22	-0.01	88	-10
9	78.28	-28.63	162.132	75	163.19	75.08	1058	80



Maksimum hata 1482 μm !!!

Model Parametrelerinin Tespiti



Uzuv boyutları polinom yaklaştırımı ya da kareler toplamının en küçüğü yaklaştırımı ile hesaplanır.

Polinom yaklaştırımında $N = 9$ nokta arasından $n = 2$ «*hassasiyet noktası*»

seçilir. $\left(\frac{N!}{n!(N-n)!} = 36\right)$ olası seçim

$$|AC|^2 = (x_i - a \cdot \cos \theta_{1i})^2 + (y_i - a \cdot \sin \theta_{1i})^2 = b^2$$

$$\Rightarrow b^2 - a^2 + 2a(x_i \cos \theta_{1i} + y_i \sin \theta_{1i}) = x_i^2 + y_i^2$$

$$\sum_{j=1}^2 P_j f_j(\mathbf{x}_i) = F(\mathbf{x}_i) \Rightarrow \begin{aligned} (\mathbf{x}_i) &= (x_i, \theta_{1i}), P_1 = b^2 - a^2, f_1(\mathbf{x}_i) = 1, P_2 = a \\ f_2(\mathbf{x}_i) &= 2(x_i \cos \theta_{1i} + y_i \sin \theta_{1i}), F(\mathbf{x}_i) = x_i^2 + y_i^2 \end{aligned}$$

Model Parametrelerinin Tespiti

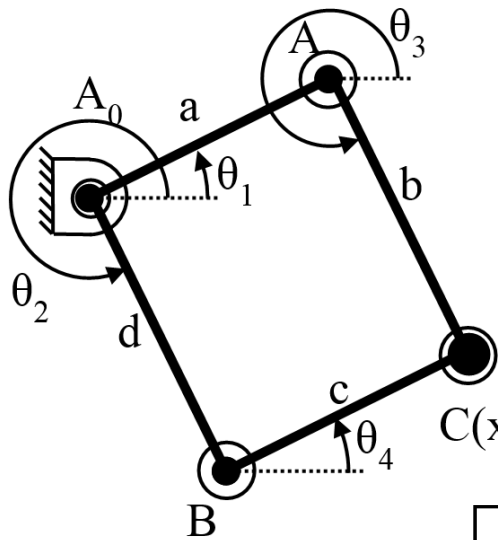
$$\begin{bmatrix} 1 & 2(x_1 \cos \theta_{11} + y_1 \sin \theta_{11}) \\ 1 & 2(x_2 \cos \theta_{12} + y_2 \sin \theta_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow P_1 = \frac{\begin{bmatrix} (x_2 \cos \theta_{12} + y_2 \sin \theta_{12})(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_1 \cos \theta_{11} + y_1 \sin \theta_{11})(x_2^2 + y_2^2) \end{bmatrix}}{(x_2 \cos \theta_{12} + y_2 \sin \theta_{12}) - (x_1 \cos \theta_{11} + y_1 \sin \theta_{11})}$$

$$P_2 = \frac{x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2}{2(x_2 \cos \theta_{12} + y_2 \sin \theta_{12}) - 2(x_1 \cos \theta_{11} + y_1 \sin \theta_{11})}$$

$$\Rightarrow a = P_2 ; b = \sqrt{P_1 + a^2}$$

Model Parametrelerinin Tespiti



$$|BC|^2 = (x_i - d \cdot \cos \theta_{2i})^2 + (y_i - d \cdot \sin \theta_{2i})^2 = c^2$$

$$\Rightarrow c^2 - d^2 + 2d(x_i \cos \theta_{1i} + y_i \sin \theta_{1i}) = x_i^2 + y_i^2$$

$$P'_1 = c^2 - d^2, f_1(\mathbf{x}_i) = 1, P'_2 = d$$

$$f'_2(\mathbf{x}_i) = 2(x_i \cos \theta_{2i} + y_i \sin \theta_{2i}), F(\mathbf{x}_i) = x_i^2 + y_i^2$$

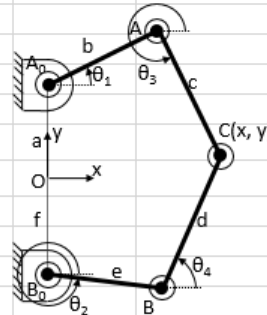
$$P'_1 = \frac{\begin{bmatrix} (x_2 \cos \theta_{22} + y_2 \sin \theta_{22})(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_1 \cos \theta_{21} + y_1 \sin \theta_{21})(x_2^2 + y_2^2) \end{bmatrix}}{(x_2 \cos \theta_{22} + y_2 \sin \theta_{22}) - (x_1 \cos \theta_{21} + y_1 \sin \theta_{21})}$$

$$P'_2 = \frac{x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2}{2(x_2 \cos \theta_{22} + y_2 \sin \theta_{22}) - 2(x_1 \cos \theta_{21} + y_1 \sin \theta_{21})}$$

$$\Rightarrow d = P'_2 ; c = \sqrt{P'_1 + d^2}$$

Model Parametrelerinin Tespiti

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R					
1				İstenen		Ölçülen		Radyan		Ölçülen - istenen		Hesaplanan		Hesaplanan-ölçülen				Hesaplanan-istenen					
2	Nokta	θ_1 (°)	θ_2 (°)	x	y	x	y	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	x	y	x	y	x hata	y hata	mutlak hata	x hata	y hata					
3	1	45	-45	212,132	0	212,132	0	0,785398163	-0,7854	0,00	0,00	212,1320344	0	0	0	0	0	0					
4	2	40,62187	-8,68859	262,132	75	262,32	74,84	0,708985302	-0,15164	50,19	74,84	262,0575018	74,95278956	-0,26701	0,113043	0,289955131	0,074533	0,04721					
5	3	29,09986	-29,0999	262,132	0	262,03	0,02	0,507888294	-0,50789	49,90	0,02	262,0608776	-0,017254147	0,029552	-0,03938	0,049237155	0,071157	0,017254					
6	4	368,6886	319,3781	262,132	-75	261,82	-74,88	6,43482977	5,5742	49,69	-74,88	262,0438101	-75,00064323	0,225677	-0,12516	0,258059905	0,088224	0,000643					
7	5	381,9384	299,1192	212,132	-75	212,57	-74,98	6,666082646	5,220614	0,44	-74,98	212,1124949	-74,99628365	-0,45633	-0,0187	0,456717339	0,019539	0,003716					
8	6	388,6298	281,721	162,132	-75	161,64	-75,18	6,782869527	4,916959	-50,49	-75,18	162,1867277	-75,01894851	0,547183	0,1608	0,570320708	0,054693	0,018949					
9	7	57,2864	-57,2864	162,132	0	162,22	0,01	0,99983622	-0,99984	-49,91	0,01	162,2227445	0,007870315	0	2,19E-14	6,09022E-14	0,09071	0,00787					
10	8	78,27899	-28,6298	162,132	75	163,19	75,09	1,36622615	-0,49968	-48,95	75,09	162,181887	75,029413	-1,00405	-0,0561	1,005612837	0,049853	0,029413					
11	9	60,88084	-21,9384	212,132	75	212,52	74,97	1,062571157	-0,3829	0,38	74,97	212,1145011	74,99060919	-0,40073	0,022992	0,401385318	0,017533	0,009391					
12	Seçilen noktalar:																						
13	1					212,132	0	0,785398163	-0,7854										RMS	1,363567739	0,181097	0,06257	
14	7					162,2227	0,00787	0,99983622	-0,99984											Ortalama	0,336809821	0,051805	0,014939
15																				Max. Hata		0,09071	
16	b, c lineer çözümü:																						
17																							
18		1	300	45000	P_1	30,63635	b	149,8978788															
19		1	175,3566	26316,22	P_2	149,8979	c	150,0000348															
20																							
21	d, e lineer çözümü:																						
22																							
23		1	300	45000	P_1	40,19069	e	149,866031															
24		1	175,3301	26316,22	P_2	149,866	d	150,0000598															



$$|OA_0| = a = 0$$

$$|A_0A| = b$$

$$|AC| = c$$

$$|BD| = d$$

$$|B_0B| = e$$

$$|OB_0| = f = 0$$

Bulunan a, b, c, d uzuv boyutları ile tekrar istenen (x, y) koordinatları hesaplanır. 9 nokta için hatalar hesaplanıp ortalama karekökü (RMS) bulunur. 1 ve 8 nolu noktalar minimum hatayı veriyor.

Sonuç: $a = 149.868$ mm, $b = c = 150.000$ mm, $d = 149.890$ mm

9 noktadaki azami hata: 93 μ m

Model Parametrelerinin Tespiti

Kareler toplamının en küçüğü yaklaştırımı yaklaştırımında
N = 9 nokta arasından n = 3~9 «*tasarım noktası*» seçilir.

$$\left(\frac{N!}{n!(N-n)!} \text{ olası seçim} \right)$$

$$\sum_{j=1}^2 P_j f_j(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i) = \underbrace{(b^2 - a^2)}_{P_1} \underbrace{1}_{f_1} + a \underbrace{2(x_i \cos \theta_{1i} + y_i \sin \theta_{1i})}_{f_2} - \underbrace{(x_i^2 + y_i^2)}_F = \delta_i$$

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^2 P_j f_j(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i) \right]^2$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial P_1} = \sum_{i=1}^n \left[P_1 f_1(\mathbf{x}_i) + P_2 f_2(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i) \right] f_1(\mathbf{x}_i) = 0$$

\Rightarrow

$$\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial P_2} = \sum_{i=1}^n \left[P_1 f_1(\mathbf{x}_i) + P_2 f_2(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i) \right] f_2(\mathbf{x}_i) = 0$$

Model Parametrelerinin Tespiti

$$\left\{ \sum_{i=1}^n [f_1^2(\mathbf{x}_i)] \right\} P_1 + \left\{ \sum_{i=1}^n [f_1(\mathbf{x}_i)f_2(\mathbf{x}_i)] \right\} P_2 = \sum_{i=1}^n [f_1(\mathbf{x}_i)F(\mathbf{x}_i)]$$

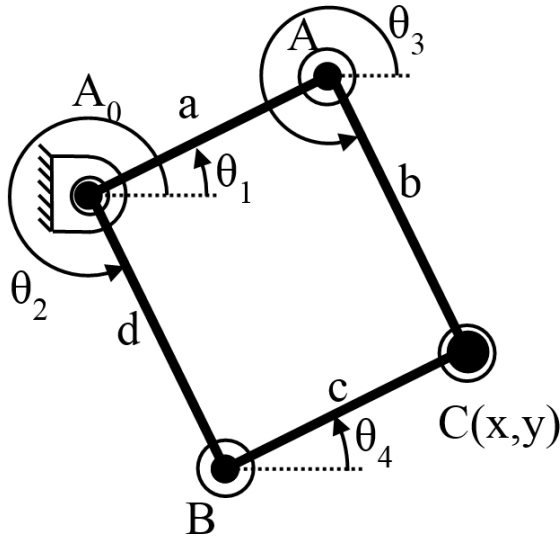
$$\left\{ \sum_{i=1}^n [f_1(\mathbf{x}_i)f_2(\mathbf{x}_i)] \right\} P_1 + \left\{ \sum_{i=1}^n [f_2^2(\mathbf{x}_i)] \right\} P_2 = \sum_{i=1}^n [f_2(\mathbf{x}_i)F(\mathbf{x}_i)]$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \Sigma f_1^2 & \Sigma f_1 f_2 \\ \Sigma f_1 f_2 & \Sigma f_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma f_1 F \\ \Sigma f_2 F \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow P_1 = \frac{(\Sigma f_1 F)(\Sigma f_2^2) - (\Sigma f_2 F)(\Sigma f_1 f_2)}{(\Sigma f_1^2)(\Sigma f_2^2) - (\Sigma f_1 f_2)^2} ; P_2 = \frac{(\Sigma f_2 F)(\Sigma f_1^2) - (\Sigma f_1 F)(\Sigma f_1 f_2)}{(\Sigma f_1^2)(\Sigma f_2^2) - (\Sigma f_1 f_2)^2}$$

$$\Rightarrow a = P_2 ; b = \sqrt{P_1 + a^2}$$

Model Parametrelerinin Tespiti



İkinci bacak için

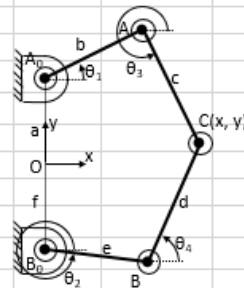
$$\underbrace{(c^2 - d^2)}_{P'_1} \frac{1}{f_1} + a \frac{2(x_i \cos \theta_{2i} + y_i \sin \theta_{2i})}{P'_2} - \underbrace{(x_i^2 + y_i^2)}_F = \delta_i$$

$$P'_1 = \frac{(\sum f_1 F)(\sum f_2'^2) - (\sum f_2' F)(\sum f_1 f_2')}{(\sum f_1^2)(\sum f_2'^2) - (\sum f_1 f_2')^2} ; P'_2 = \frac{(\sum f_2' F)(\sum f_1^2) - (\sum f_1 F)(\sum f_1 f_2')}{(\sum f_1^2)(\sum f_2'^2) - (\sum f_1 f_2')^2}$$

$$\Rightarrow d = P'_2 ; c = \sqrt{P'_1 + d^2}$$

Model Parametrelerinin Tespiti

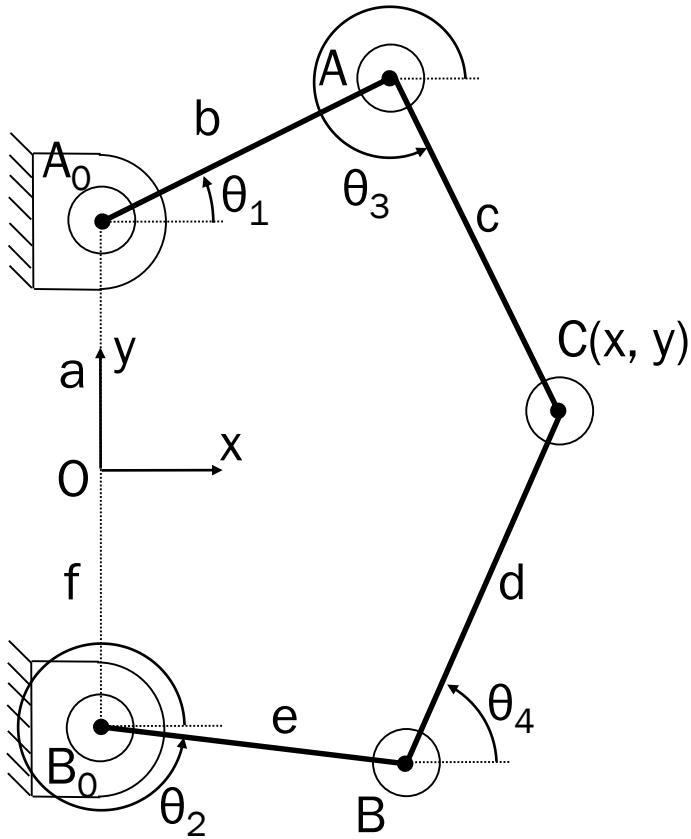
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1				İstenen		Ölçülen		Radyan		Ölçülen - istenen		Hesaplanan		Hesaplanan-ölçülen		Hesaplanan-istenen			
2	Nokta	θ_1 (°)	θ_2 (°)	x	y	x	y	θ_1 (rad)	θ_2 (rad)	x	y	x	y	x hata	y hata	mutlak hata	x hata	y hata	
3	1	45	-45	212,13203	0	212,1320344	0	0,785398163	-0,7854	0,00	0,00	212,1636	-0,009521771	0,031612	-0,00952	0,033014606	0,031612	0,009522	1
4	2	40,62187	-8,68859	262,13203	75	262,32	74,84	0,708985302	-0,15164	50,19	74,84	262,1838	74,90844757	-0,14075	0,068701	0,156619632	0,051732	0,091552	1
5	3	29,09986	-29,0999	262,13203	0	262,03	0,02	0,507888294	-0,50789	49,90	0,02	262,1576	-0,073544968	0,126266	-0,09567	0,158418788	0,025557	0,073545	1
6	4	368,6886	319,3781	262,13203	-75	261,82	-74,88	6,43482977	5,5742	49,69	-74,88	262,1275	-75,10505976	0,309379	-0,22958	0,385253643	0,004522	0,10506	
7	5	381,9384	299,1192	212,13203	-75	212,57	-74,98	6,666082646	5,220614	0,44	-74,98	212,1533	-75,02934784	-0,41556	-0,05177	0,418773621	0,021233	0,029348	
8	6	388,6298	281,721	162,13203	-75	161,64	-75,18	6,782869527	4,916959	-50,49	-75,18	162,171	-75,00526345	0,531417	0,174485	0,559329457	0,038928	0,005263	
9	7	57,2864	-57,2864	162,13203	0	162,22	0,01	0,99983622	-0,99984	-49,91	0,01	162,1734	0,019229716	-0,04935	0,011359	0,050639171	0,041361	0,01923	1
10	8	78,27899	-28,6298	162,13203	75	163,19	75,09	1,36622615	-0,49968	-48,95	75,09	162,1613	75,02625881	-1,02468	-0,05925	1,026395533	0,029216	0,026259	
11	9	60,88084	-21,9384	212,13203	75	212,52	74,97	1,062571157	-0,3829	0,38	74,97	212,167	74,99051967	-0,34823	0,022902	0,348984539	0,034961	0,00948	
12																			
13		b, c için:					d, e için:												
14		f_1	f_2	f_2^2	F	Ff_2	f_1	f_2	f_2^2	F	Ff_2								
15		1	300	90000	45000	13500000	1	300	90000	45000	13500000								
16		1	495,6715	245690,28	74415,14	36885466,47	1	496,0169805	246032,8	74415,14	36911172,1								
17		1	457,9336	209703,14	68660,42	31441908,3	1	457,8905062	209663,7	68660,42	31438952,7								
18		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
21		1	175,3566	30749,938	26316,22	4614722,7	1	175,3301133	30740,65	26316,22	4614025,64								
22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
24																			
25		b, c lineer çözümü:																	
26		4	1428,962	214391,77	P_1	-7,80759703	b	150,055109											
27		1428,962	576143,4	86442097	P_2	150,055109	c	150,029091											
28																			
29		d, e lineer çözümü:																	
30		4	1429,238	214391,77	P_1	21,21639932	e	149,9449129											
31		1429,238	576437,2	86464150	P_2	149,9449129	d	150,0156436											
32																			
33																			
34																			



$ OA_0 = a = 0$	RMS	1,365723129	0,100508	0,164186
$ A_0A = b$	Ortalama	0,348603221	0,031014	0,041029
$ AC = c$	Max. Hata		0,10506	
$ BD = d$				
$ B_0B = e$				
$ OB_0 = f = 0$				

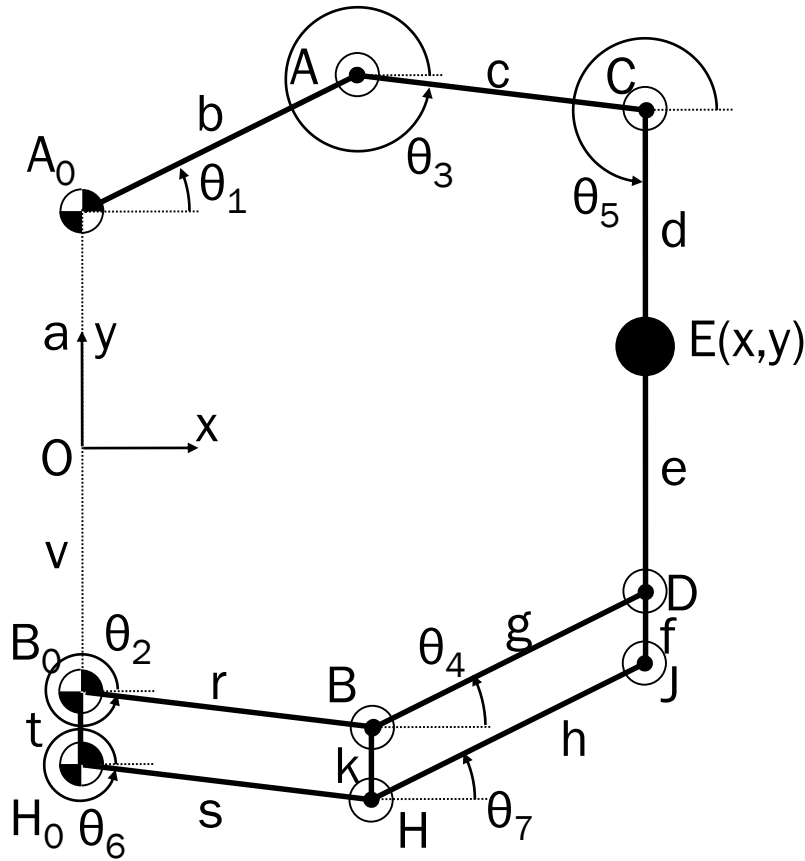
Bulunan a, b, c, d uzuv boyutları ile tekrar istenen (x, y) koordinatları hesaplanır. 9 nokta için mutlak hata ($\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$) hesaplanıp maksimumu bulunur. Polinom yaklaşımı daha iyi sonuç vermektedir.

Model Parametrelerinin Tespiti



Ayrıca yandaki 6 uzuv boyutu (a, b, c, d, e, f) olan model için de polinom ve en küçük kareler toplamı yaklaşımları denenmiş, 4 uzuv boyutlu çözümden daha az hatalı bir çözüm elde edilememiştir.

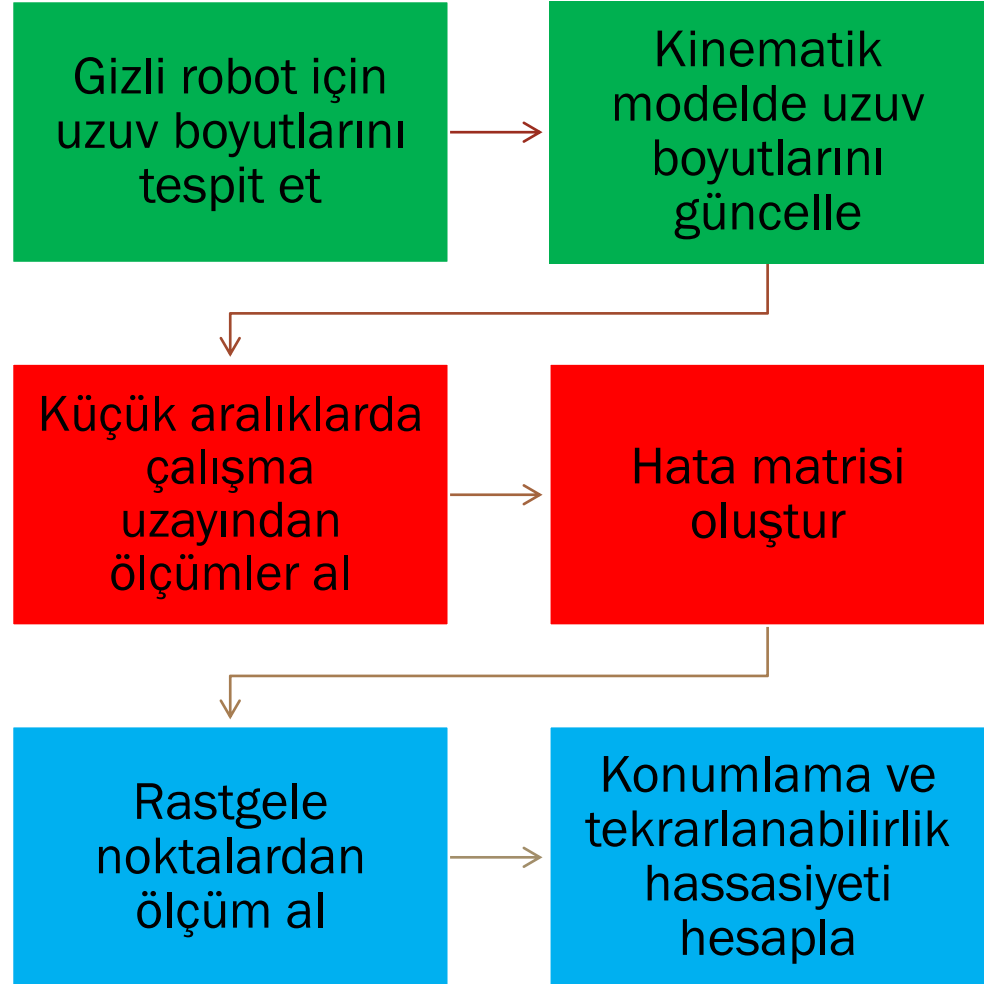
Model Parametrelerinin Tespiti



Ayrıca yandaki 12 uzuv boyutu olan ($t = f$) model için de formülasyon çıkarılmıştır. 12 bilinmeyenli 12 denklem takımı elde edilir. Denklemler sayısal metotlarla çözülebilir ancak pratik değildir.

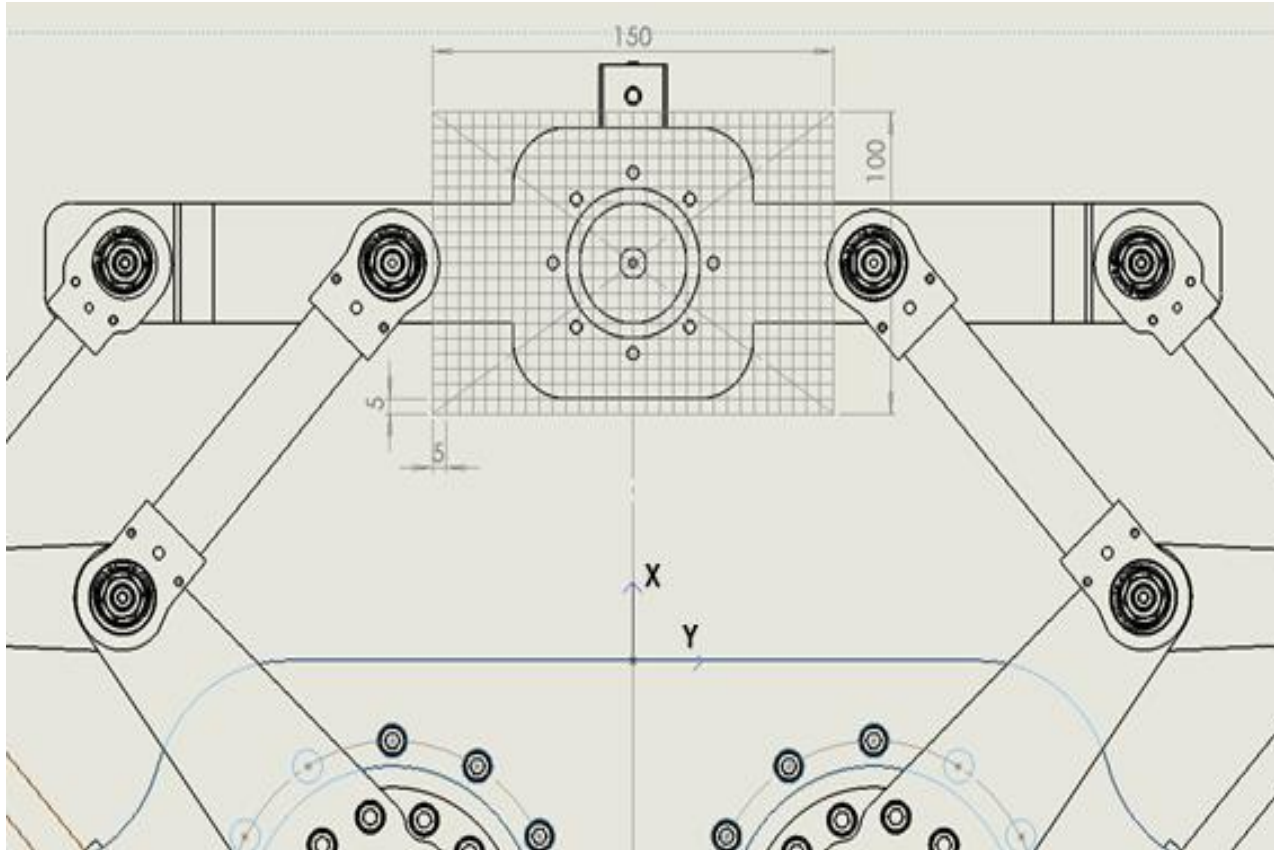
Kalibrasyonda 2. aşama

Denetim sistemindeki düz/ters kinematik formülasyonu yeni uzuv boyutları ile ($a = 149.868$ mm, $b = c = 150.000$ mm, $d = 149.890$ mm) güncellenip interferometre ile tekrar 9 noktada tekrar ölçüm yapıldığında azami hata yaklaşık $700 \mu\text{m}$ bulundu.



Kalibrasyonda 2. aşama

100 mm x 150 mm çalışma uzayında 5 mm'de bir ölçüm alınarak 31x21 hata matrisi elde edilir.



Kalibrasyonda 2. aşama

Hata giderme prosedürü:

- 1) Çalışma alanı boyunca x ekseninde $i = 1, \dots, m$ ve y ekseninde $j = 1, \dots, n$ noktaya bölünerek $m \times n$ adet nokta seçilir.
- 2) Bu noktalarda ölçülen değerlerden model ile tahmin edilen değerler çıkarılarak $\left[\left\{ \delta_{xi} \right\}_1^m, \left\{ \delta_{yi} \right\}_1^m \right]$ hata matrisleri oluşturulur.
- 3) Seçilen noktaların haricindeki noktalarda hatalar hata matrisinde en yakın dört noktadan bilineer interpolasyon ile bulunur.
- 4) Bir noktanın hatası (δ_x, δ_y) verildiğinde motor açılarındaki hata giderme değerleri $(\delta_{\theta_1}, \delta_{\theta_2})$ kinematik modelin Jakobi matrisi kullanılarak bulunur.
- 5) θ_1 ve θ_2 motor açıları $\theta_1 - \delta_{\theta_1}$ ve $\theta_2 - \delta_{\theta_2}$ şeklinde güncellenir.

Kalibrasyonda 2. aşama

Bilineer interpolasyon:

$Q_{11}(x_1, y_1)$, $Q_{12}(x_1, y_2)$, $Q_{21}(x_2, y_1)$, $Q_{22}(x_2, y_2)$

noktalarında $\delta_{11} = \delta(x_1, y_1)$, $\delta_{12} = \delta(x_1, y_2)$,

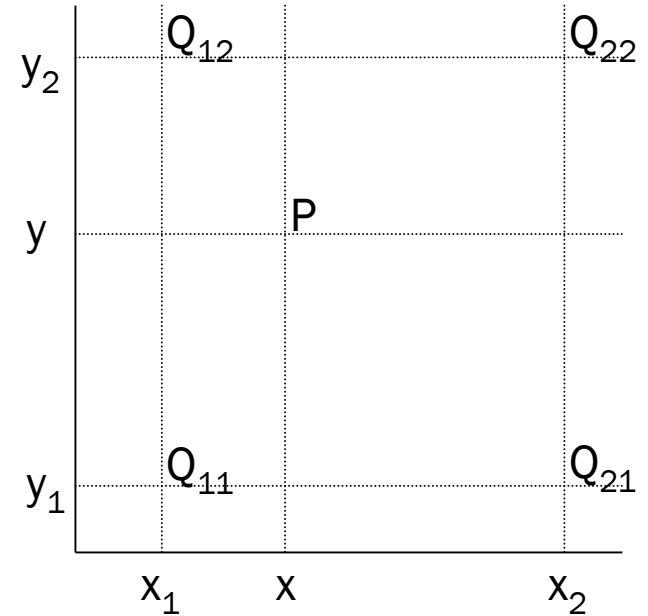
$\delta_{21} = \delta(x_2, y_1)$, $\delta_{22} = \delta(x_2, y_2)$ (x ya da y) hata

değerleri için P(x,y) noktasındaki hata $\delta(x,y)$:

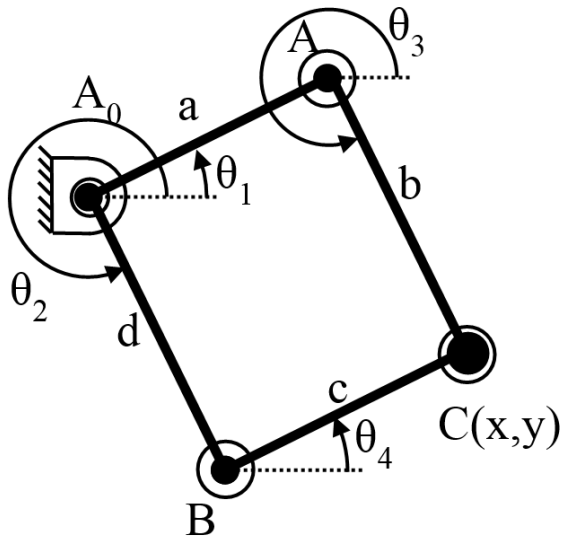
$$\delta(x,y) = \frac{\left\{ \begin{array}{l} (x_2 - x)(y_2 - y)\delta_{11} + (x_2 - x)(y - y_1)\delta_{12} \\ + (x - x_1)(y_2 - y)\delta_{21} + (x - x_1)(y - y_1)\delta_{22} \end{array} \right\}}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}$$

$$y = y_1 \Rightarrow \delta(x,y) = \frac{(x_2 - x)\delta_{11} + (x - x_1)\delta_{21}}{x_2 - x_1}$$

$$x = x_1 \Rightarrow \delta(x,y) = \frac{(y_2 - y)\delta_{11} + (y - y_1)\delta_{12}}{y_2 - y_1}$$



Kalibrasyonda 2. aşama



Jakobi matrisinden:

$$\delta_{\theta_1} = -\frac{c\theta_3\delta_x + s\theta_3\delta_y}{as(\theta_1 - \theta_3)}, \quad \delta_{\theta_2} = -\frac{c\theta_4\delta_x + s\theta_4\delta_y}{ds(\theta_2 - \theta_4)}$$

$$|AB| = s = \sqrt{(ac\theta_1 - dc\theta_2)^2 + (as\theta_1 - ds\theta_2)^2}$$

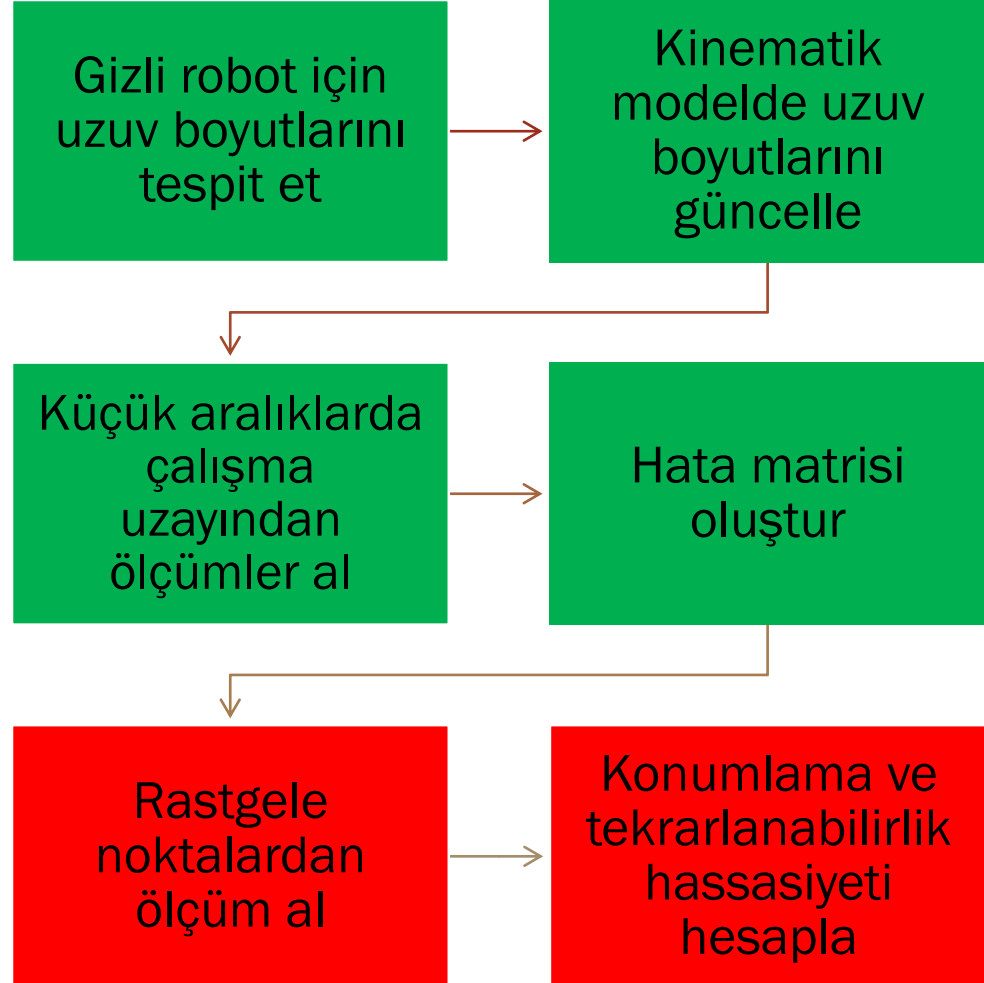
$$\theta_3 = \text{atan2}[dc\theta_2 - ac\theta_1, ds\theta_2 - as\theta_1] + \cos^{-1}\left(\frac{b^2 + s^2 - c^2}{2bs}\right)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}[ac\theta_1 - dc\theta_2, as\theta_1 - ds\theta_2] - \cos^{-1}\left(\frac{c^2 + s^2 - b^2}{2cs}\right)$$

Kalibrasyonda 3. aşama

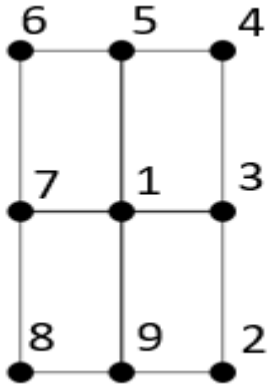
Yeni uzuv boyutları ile ve bileneer interpolasyon ile VDI standartlarına göre ölçüm alındığında azami konumlama hassasiyeti: $\pm 37 \mu\text{m}/\text{m}$ (hedef $\pm 30 \mu\text{m}/\text{m}$ idi), tekrarlanabilirlik: $\pm 26 \mu\text{m}/\text{m}$ (hedef $\pm 15 \mu\text{m}/\text{m}$ idi) bulundu.

VDI standardı: VDI/DGQ 3441 - Statistical Testing of the Operational and Positional Accuracy of Machine Tools; Basis



Yeni Mekanizmada Kalibrasyon

Ölçüm alınan 9 nokta:

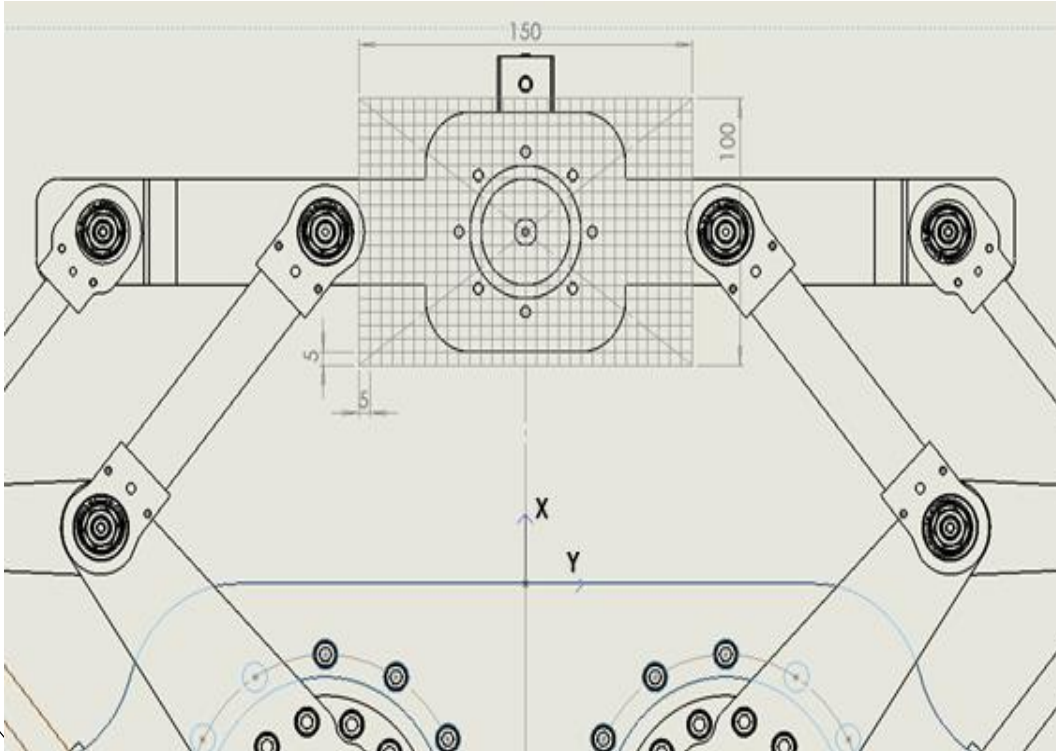


i	İstenen		Ölçülen		Ölçülen	
	x_i	y_i	x_i	y_i	θ_1 (°)	θ_2 (°)
1	222.132	0	222.182	0.049	42.231	-42.231
2	272.132	75	272.098	74.774	35.201	-4.384
3	272.132	0	272.088	-0.064	24.891	-24.891
4	272.132	-75	272.092	-74.762	364.384	324.799
5	222.132	-75	222.208	-74.878	379.945	302.742
6	172.132	-75	172.398	-74.928	387.710	285.203
7	172.132	0	172.271	0.094	54.986	-54.986
8	172.132	75	172.298	74.986	74.797	-27.710
9	222.132	75	222.204	74.974	57.258	-19.945

1 ve 3 noktaları kullanılarak polinom yaklaşıımı ile gizli robot uzuv boyutları belirlendi. Kalibrasyon sonucunda 282 μm \rightarrow 198 μm

Yeni Mekanizmada Kalibrasyon

5 mm aralıkla
ölçüm



Interpolation

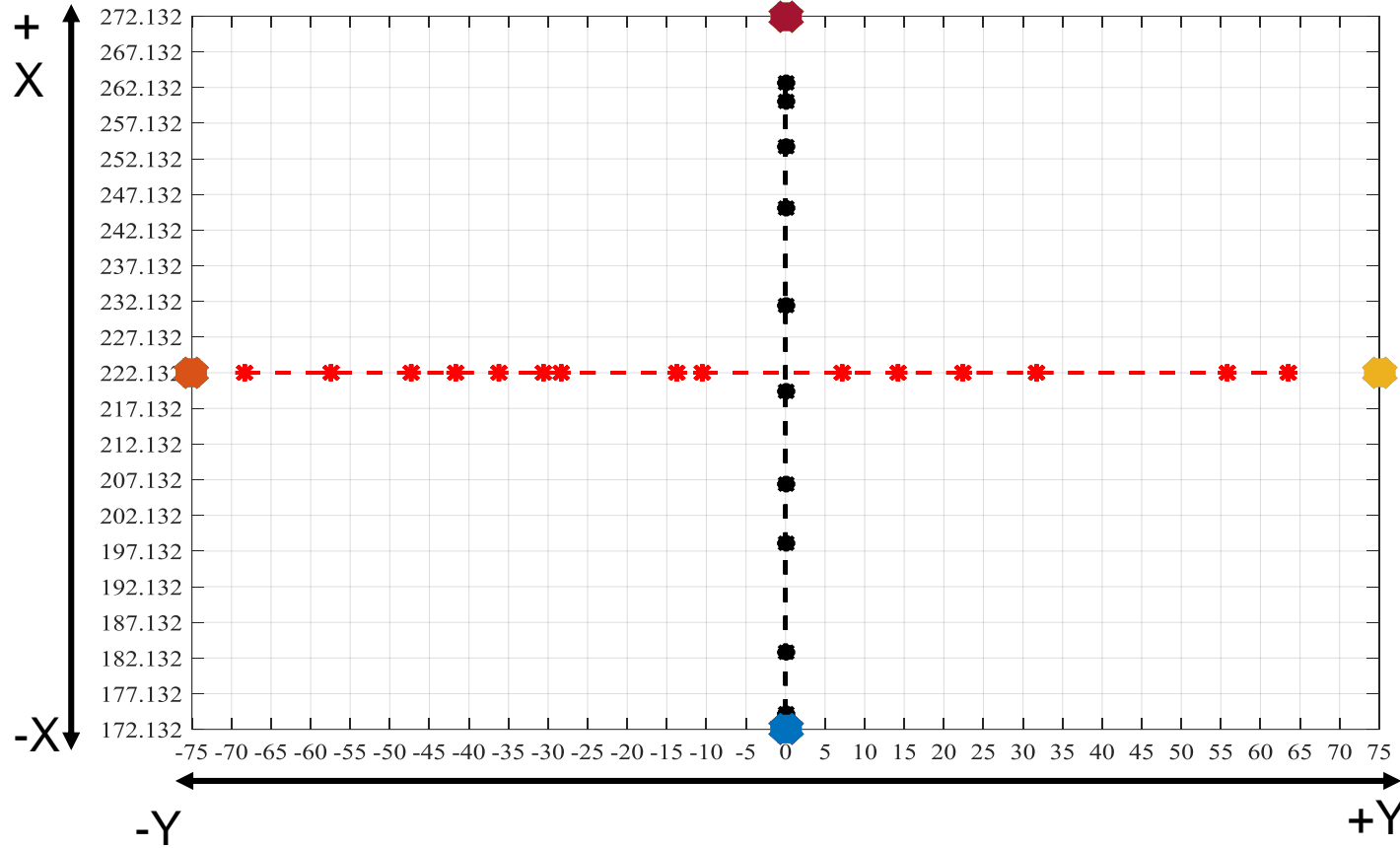
31x21 hata düzeltme matrisi

Motor girdi
açılarının
güncellenmesi

Rastgele
noktalardan
ölçüm

VDI 3441 Standardına göre

Yeni Mekanizmada Kalibrasyon



	x'te max. Konumlama hassasiyeti	y'de max. Konumlama hassasiyeti
Kalibrasyonsuz	180 mm (Nokta 1 +/-)	117 mm (Nokta 1 +)
Kalibrasyonlu	76 mm (Nokta 8 -)	72 mm (Nokta 12 -)