스카라형 로보트의 파라미터 보정에 의한 궤적 계획에 관한 연구

◦ 최 연호* 한 상완** 길 진수** 홍석교*
*:아주대학교 제어계측공학과 **:아주대학교 전자 공학과

A study on the trajectory planning using compensation of parameter for the SCARA type ROBOT

◦ Yeon-Ho Choi*, Sang-Hwan Han ** Jin-Su Gil** Suk-Kyo Hong*
* Dept. of Control & Instrumentation Eng. AJOU University
** Dept. of Electronics Eng. AJOU University

Abstract

Robot's kinematic equation is not perfect. In this paper, a method for reducing the positioning error which comes from the imperfect robot kinematics is introduced. This method compensates the parameter of the kinematic equation using real positioning error.
And the trajectories using these compensated parameterare compared with uncompensated ones.

I 서론

산업용 로보트는 공장 자동화의 최종목표인 무인 자동화공장을 구성하기 위한 필수적인 요소이다. 현재 산업용 로보트는 아직도 기초적인 단계에 있고 사용되는 부분도 제한되어 있지만 공장자동화의 중요한 몫을 분명히 차지하고 있다. 오늘날 산업용 로보트가 사용되는 대표적인 산업분야로서는, 용접(welding), 자재취급(material-handling), 페인팅(painting), 조립(assembly)등을 들수있다. 이때 로보트가 주어지는 명령을 정확히 수행하기 위해서는 어느 정도의 정밀도가 필요하게 되는데 로보트의 정밀도는 일반적으로 반복정확도(repeatability)로 나타내고 있다. 실제 로보트의 제조과정이나 주위환경에 의해 생기는 파라미터의 오차를 보정해 줌으로서 정확한 로보트의 기구학적 모델을 구할수 있다. 실제 위치오차를 파라미터 오차들로 모델링 해줌으로서 기존의 기구학 방정식에 파라미터 오차의 영향을 나타내는 파라미터 오차항들을 추가시키는 방법이다. 이방법을 이용한 로보트의 궤적(joint space trajectory planning)에는 직교공간에서의 궤적계획(cartesian space trajectory planning)과 조인트공간에서의 궤적계획(joint space trajectory planning)이 있다. 조인트공간에서의 궤적계획은 궤적이 움직이는 동안에 제어된 변수들의 항으로 직접 계산되고 궤적계획이 거의 실시간으로 행해질수 있다는 장점은 있으나 장애물 회피가 보장되어야 하는 작업들에는 어려움이 있다. 직교공간에서의 궤적계획은 뛰어난 정밀도를 가진 직선 경로를 구현할수 있지만 모든 제어변수 알고리즘들은 항상 관절 좌표계를 기준으로 하기 때문에 직교공간에서의 궤적계획은 실제 시간내에 직교좌표계와 관절좌표계 사이의 변환을 필요로 한다. 많은 관절체로 이루어진 로보트를 직선으로 움직이게 하기 위해서 이미 많은 사람들이 연구를 하였는데, PAUL[1]이 두번의 회전과 두번의 병진을 이용하여 직선경로를 계획하였고, TAYLOR[2]는 회전동작을 표현하기위해 쿼터니온 방법을 개발하였다. LEE[3]는 부드러움과 토오크 제약조건을 동시에 만족하는 주어진 직선 경로상에 궤적 설정점을 정확하게 결정하기 위한 이산시간 궤적계획(DISCRETE TIME TRAJECTORY PLANNING)방법을 개발 하였다. 본 논문에서는 직각좌표 공간상에서 원하는 궤적을 실현하기 위하여 보상된 경로점과 보상되어지지않은 경로점에 의해 생성된 궤적을 비교하려고 한다.

II 파라미터 보정

기구학 방정식 및 역기구학 방정식이 불안전 하기 때문에 기구학 방정식이 로보트의 정확한 모델이 아니거나 링크 파라미터에 오차가 발생하는 경우 구해지는 역기구학 방정식은 불완전하게되며, 로보트는 위치오차가 생기게된다. 위치정밀도 개선을 위해서는 로보트의 기구학및역기구학의 조정이 필요하다. 이를 위하여 로보트의 기구학 모델을 정확히 만들어 주어야 한다. 로보트의 링크좌표 시스템에서 평행인 두축 Z_{i-1}와 Z_i가 약간 어긋난 경우 그림1에서와 같이 Z_i축은 Y_i축에 대해 β_i만큼 회전시키는 것으로 표시 할수 있다. 본 논문에서 사용된 SCARA 로보트는 모든 Z축들이 평행이므로 이 오차는 실제의 위치결정에 있어 큰오차의 요인으로 작용할 수 있다.

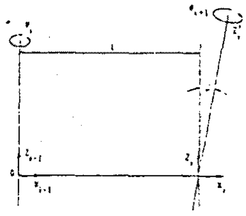


그림 1. 링크 좌표 시스템

그러므로 D-H표기법은 다음과 같이된다.

$$A_i = ROT(Z_{i-1},\theta_i)TRANS(a_i,0,d_i)ROT(X_i,\alpha_i)ROT(Y_i,\beta_i)$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i C\beta_i - S\theta_i S\alpha_i S\beta_i & -S\theta_i C\alpha_i & C\theta_i S\beta_i + S\theta_i S\alpha_i C\beta_i & a_i C\theta_i \\ C\theta_i C\beta_i + C\theta_i S\alpha_i S\beta_i & C\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\beta_i - C\theta_i S\alpha_i C\beta_i & a_i S\theta_i \\ -C\alpha_i S\beta_i & S\alpha_i & C\alpha_i C\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

이를 이용하면 기구학 방정식은 $A_0^n = A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 \text{---} A_{n-1}^n$로 표시된다. 조인트 변위 θ와 링크 파라미터 α, β, a, d에 약간의 오차가 있어도 이를 이용하여 해석된 로보트의 기구학 방정식으로는 정확한 로보트 손의 위치(end point)를 구할수 없다. 조인트 변위값에 대하여 계산된 위치와 실제 로보트가 움직인 위치사이의 위치 오차는 조인트 변위오차($\Delta\theta$)와 링크 파라미터 오차($\Delta\alpha$ $\Delta\beta$ Δa Δd)들로 모델링 될수 있다. 식(3-1)의 파라미터들의 오차를 포함하게 되면

$$A^c = ROT(Z_{i-1},\theta_i+\Delta\theta_i)TRANS(a_i+\Delta a_i,0,d_i+\Delta d_i)ROT(X_i,\alpha_i+\Delta\alpha_i)ROT(Y_i,\beta_i+\Delta\beta_i) \quad (3.2)$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_X \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_Y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_{11} : $C(\theta_i+\Delta\theta_i)C(\beta_i+\Delta\beta_i)-S(\theta_i+\Delta\theta_i)S(\alpha_i+\Delta\alpha_i)S(\beta_i+\Delta\beta_i)$

R_{12} : $-S(\theta_i+\Delta\theta_i)C(\theta_i+\Delta\theta_i)C(\theta_i+\Delta\theta_i)$

R_{13} : $C(\theta_i+\Delta\theta_i)S(\beta_i+\Delta\beta_i)+S(\theta_i+\Delta\theta_i)S(\alpha_i+\Delta\alpha_i)C(\beta_i+\Delta\beta_i)$

P_X : $(a_i+\Delta a_i)C(\theta_i+\Delta\theta_i)$

R_{21} : $S(\theta_i+\Delta\theta_i)C(\beta_i+\Delta\beta_i)+C(\theta_i+\Delta\theta_i)S(\alpha_i+\Delta\alpha_i)S(\beta_i+\Delta\beta_i)$
R_{22} : $C(\theta_i+\Delta\theta_i)C(\alpha_i+\Delta\alpha_i)$
R_{23} : $C(\theta_i+\Delta\theta_i)S(\alpha_i+\Delta\alpha_i)C(\beta_i+\Delta\beta_i)$
P_Y : $(a_i+\Delta a_i)S(\theta_i+\Delta\theta_i)$
R_{31} : $-C(\alpha_i+\Delta\alpha_i)S(\beta_i+\Delta\beta_i)$
R_{32}: $S(\alpha_i+\Delta\alpha_i)$
R_{33}: $C(\alpha_i+\Delta\alpha_i)C(\beta_i+\Delta\beta_i)$
P_Z: $d_i+\Delta d_i$
가되며 수정되어지는 기구학 방정식은 $Ac={}^0Ac_1{}^1Ac_2{}^2Ac_3{}^3\ Ac_4{}^4$ $---Ac_{n-1}{}^n$로 표시할 수 있다. 링크 파라미터의 미소오차에 대해 $\sin(\Delta\theta)=0, \cos(\Delta\theta)=1$로 놓고 2차 이상의 미소 오차항은 무시하기로 한다. A^c행렬의 위치 벡터를 $\overline{P}c = (Px^c, Py^c, Pz^c)^T$라 하고 A행렬의 위치벡터를 $\overline{P} = (Px, Py, Pz)^T$라 하면 위치 오차 벡터 dP는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dP=\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Px^C \\ Py^C \\ Pz^C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

위치 오차벡터 $\overline{dP}$는 주어지는 조인트 변위값에 대한 위치벡터를 측정한 값과 기구학 방정식에 의해 계산되는 위치 벡터 값의 차로 구해진다. 파라미터 오차벡터 X 를 식(3.4)와 같이 정의 하면 위치오차벡터는 식(3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{X} = (\Delta\theta, \Delta\alpha_1, \Delta\beta_1, \Delta a_1, \Delta\theta_2, \Delta\alpha_2, \Delta\beta_2, \Delta a_2, \Delta\beta_3) \quad (3.4)$$
$$dP = M\ X \quad (3.5)$$

식(3.5)에서 M은 3*N행렬로서 위치 오차벡터와 파라미터 오차벡터의 관계를 나타내는 식으로 구성되며 N은 파라미터 오차의 갯수를 나타낸다. SCARA로보트의 X-Y평면상의 위치 정밀도 개선을 위해 식(3.3)을 적용하게되면 식(3.5)는 다음과 같다.

$$\overline{dP} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} -a_2(S\theta_1C\theta_2+C\theta_1S\theta_2)-a_1S\theta_1 & -d_3C\theta_1 & d_3C\theta_1 & C\theta_1 & -a_2(S\theta_1C\theta_2+C\theta_1S\theta_2) \\ a_2(C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2)+a_1C\theta_1 & -d_3C\theta_1 & d_3S\theta_1 & S\theta_1 & a_2(C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2) \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} d_3(S\theta_1C\theta_2+S\theta_1S\theta_2) & d_3(C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2) & C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2 & C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2 \\ -d_3(C\theta_1C\theta_2-S\theta_1S\theta_2) & d_3(S\theta_1C\theta_2+C\theta_1S\theta_2) & S\theta_1C\theta_2+C\theta_1S\theta_2 & S\theta_1C\theta_2+C\theta_1S\theta_2\,0 \end{matrix}$$

$$\overline{X}=[\Delta\theta_1\ \Delta\alpha_1\ \Delta\beta_1\ \Delta a_1\ \Delta\theta_2\ \Delta\alpha_2\ \Delta\beta_2\ \Delta a_2\ \Delta\beta_3]^T \quad (3.6)$$

윗식에서 Δd에 대한 항은 2차 이상이므로 $\overline{X}$ 벡터에서 제외됨을 알 수 있다. 한점에 대한 측정으로 $\Delta x, \Delta y$ 에대한 2개의 식을 얻을 수 있으므로 윗식에서와 같이 9개의 파라미터 오차를 구하기 위해서는 5개이상의 점에 대한 측정이 필요하다. 이렇게 구해진 파라미터 오차항들을 기구학 방정식에 추가시킴으로써 수정된 기구학 방정식을 얻을 수 있으며 이를 다시 반복계산함으로써 더욱 정확한 기구학 방정식을 얻을 수 있다이번에는 보정된 기구학 방정식을 이용하여 역기구학 방정식의 해를 구하는 방법을 생각해 보자. 이를 위하여 주어지는 목표점에 대한 조인트 변위값을 보정되지 않은 기구학 방정식으로부터 구하고 구해진 조인트 변위값을 수정된 기구학 방정식에 대입하여 실제 로보트가 이동하게 되는 정확한 위치를 계산한다. 계산되어진 위치와 목표점사이의 위치오차 $\Delta x, \Delta y$를 계산하고 이를 이용하여 그림2에서와같이 보정된 목표점을 구한다. 여기서 $\Delta x=P^r{}_x-P_x, \Delta y=P^r{}_y-P_y$으로 구해지며 보정되는 목표점은 $P^c{}_x=P_x-\Delta x, P^c{}_y=P_y-\Delta y$로 구해진다. 이렇게 보정된 목표점에 대한 조인트 변위값을 보정전의 기구학 방정식으로 부터 구함으로써 보정된 조인트 변위값을 구할 수 있다.

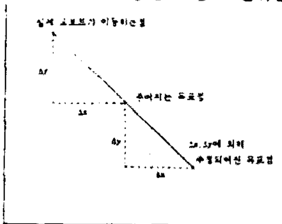


그림 2. 보정된 기구학 방정식을 이용한 목표점의 보정

III. 파라미터 보상을 이용한 궤적 계획및 방법

본 논문에서는 주어진 허용 오차 내에서 근사화된 직선운동을위한 경로점들을 그림3처럼 Taylor의 BDM(Bounded Deviation Method) [2] [7] 알고리즘을 이용하여 결정하였다. 경로점들중 (knot point)들 중 모든점을 보상하기는 곤란하였기 때문에 허용오차 0.2mm인 경우 그림2와 같은 방법으로 8점을 보상하였으며, 허용오차 0.1mm인 경우 12점을 보상하였으며, 허용오차 0.05mm인 경우에는 20점을 보상하여 보상한 경우의 궤적과 보상하지 않은 경우의 궤적을 로보트로 하여금 직접 그리게 해서 비교 하였다.

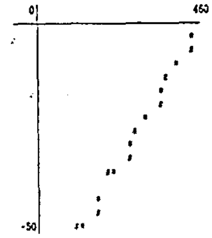


그림 3. 궤적의 보상점(#)과 가야할점(*)

본 논문에서는 파라미터 보정을 위하여 그림4에 표시한 점들을 이용하였다. 그리고 실제 엔코더 펄스를 읽은 궤적도 그려보았다. 편의상 모든 궤적의 출발점은 (X,Y)좌표가 (460,0)[mm]이 되도록 하였다.

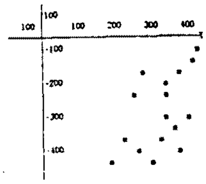


그림 4. 작업영역 내에서의 위치 및 파라미터 보정을 위한 측정점

* 파라미터 보정에 의한 위치 정밀도 개선 결과

앞에서 제시한 방법을 확인하기 위해 본 논문에서는 Rhino SCARA 로보트를 사용하였으며 이에 대한 링크 좌표 시스템과 동작범위는 그림1에 나타내었다.
이 미소 파라미터 값들을 구하기 위해서 이용한 점들은 표1와 표3에 나타내었고 구한 미소 파라미터 값들은 표4과 표6에 나타내었다. 표2과 표4에서 구한 미소파라미터들의 평균값을 표5에 나타내었다.

표 1. 위치 정밀도 개선결과

POSITION		보정전			보정후		
X	Y	ΔX	ΔY	ΔR	ΔX_C	ΔY_C	ΔR_C
320.3	-320.3	-1.1	0.3	1.11	0.5	-0.2	0.51
351.0	-294.6	-1.2	0.8	1.45	-0.4	0.3	0.44
384.6	-245	0.9	1.2	1.25	0.8	-0.4	0.87
291.2	-347.0	1.5	0.9	1.52	-1.1	-0.4	1.12
457.5	-63.0	1.2	0.2	1.22	0.8	0.5	0.83

$\Delta R=\sqrt{(\Delta X^2+\Delta Y^2)}$, $\Delta R^C=\sqrt{(\Delta X_C{}^2+\Delta Y_C{}^2)}$

표 2. 파라미터 오차 결과

i	$\Delta\theta_i$	$\Delta\beta_i$	$\Delta\alpha_i$	Δa_i
1	-0.0043	0.0051	-0.0023	1.872
2	-0.0061	0.0042	0.0073	1.213
3	0	0.0031	0	0

표 3. 위치 정밀도 개선결과

POSITION		보정전			보정후		
X	Y	ΔX	ΔY	ΔR	ΔXc	ΔYc	ΔRc
404.5	-210.6	1.1	0.5	1.22	-0.1	0.4	0.41
378.8	-241.3	-1.2	0.8	1.54	-0.6	0.4	0.62
340.4	-285.6	1.6	1.1	1.73	-0.9	-0.6	0.93
361.8	-277.6	1.3	0.7	1.48	0.8	0.2	0.84
320.3	-320.3	-1.1	0.3	1.11	0.5	-0.2	0.51

$\Delta R=\sqrt{\Delta X^2+\Delta Y^2}$, $\Delta R^c=\sqrt{\Delta X_c^2+\Delta Y_c^2}$

표 4. 파라미터 오차결과

i	$\Delta\theta_i$(rad)	$\Delta\beta_i$(rad)	$\Delta\alpha_i$(rad)	Δa_i(mm)
1	-0.0075	0.0068	-0.0017	1.536
2	-0.0039	0.0027	0.0047	0.891
3	0	0.0043	0	0

표 5. 파라미터 오차 평균결과

i	$\Delta\theta_i$(rad)	$\Delta\beta_i$(rad)	$\Delta\alpha_i$(rad)	Δa_i(mm)
1	-0.0059	0.00595	-0.002	1.704
2	-0.005	0.00345	0.006	1.052
3	0	0.0037	0	0

보정되어진 기구학 방정식의 위치벡터는 다음과 같이 나타난다.

$$P_x^c=(-a_2S\theta_{12}-a_1S\theta_1)\Delta\theta_1+(d_3S\theta_1)\Delta\alpha_1+(d_3C\theta_1')\Delta\beta_1+(C\theta_1)\Delta a_1+(-a_1S\theta_{12})\Delta\theta_2+(d_3S\theta_{12})\Delta\alpha_2+(d_3C\theta_{12})\Delta\beta_2+(C\theta_{12})\Delta a_2+(C\theta_{12})\Delta\beta_3+a_2S\theta_1S\theta_2-a_2C\theta_1C\theta_2-a_1C\theta_1$$

$$P_y^c=(a_2C\theta_{12}+a_1C\theta_1)\Delta\theta_1+(-d_3C\theta_1)\Delta\alpha_1+(d_3S\theta_1)\Delta\beta_1+(S\theta_1)\Delta a_1+(a_2C\theta_{12})\Delta\theta_2+(-d_3C\theta_{12})\Delta\alpha_2+(d_3S\theta_{12})\Delta\beta 2+(S\theta_{12})\Delta a_2+(S\theta_{12})\Delta\beta_3-a_1S\theta_1-a_2S\theta_1C\theta_2-a_2C\theta_1S\theta_2$$

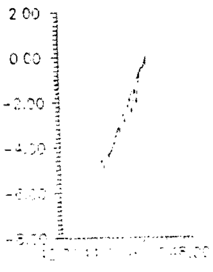


그림 6. 허용오차(0.2)

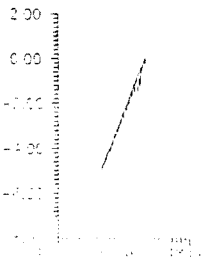
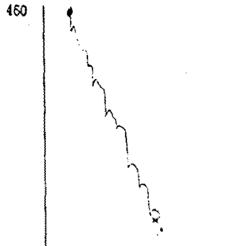


그림 7. 허용오차(0.1)



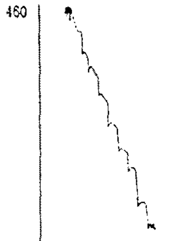
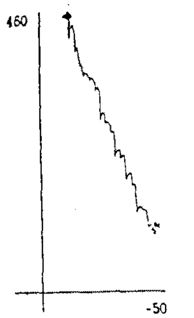


그림 8. 보상전 허용오차(0.2) 그림 9. 보상후 허용오차(0.2)



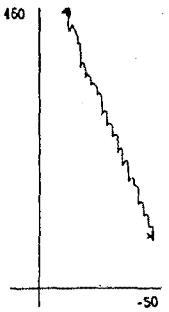


그림 10. 보상전 허용오차(0.1) 그림 11. 보상후 허용오차(0.1)

본 논문에서는 SCARA 로보트 전용 제어기 대신에 IBM PC/AT와 인터페이스된 제어기를 제작하여 실험을 하였다. PC는 매 샘플링 시간마다 위치와 속도를 계산하고, 그 위치와 속도를 PI제어기로 보내어 모터를 제어한다. 모터의 엔코더에서 나오는 펄스를 카운터 회로로 입력하려 모터의 회전각도를 계산하였고, 모터의 회전 방향 판별 회로와 체배 회로, 그리고 간단한 리미트 스위치 검출 회로도 제작하였다. 또한 8253 PIT를 사용하여 PWM신호를 발생하여 모터의 속더 제어를 하였으며 모터 드라이브 회로도 제작하였다. Rhino SCARA로보트에 장착된 모터에는 1회전에 120개의 엔코더 펄스를 출력하는 인크리멘탈 엔코더와 축1모터의 기어비 192/1, 축2모터의 기어비 98.75/1인 기어 박스가 각각 부착 되어있다. 또한 모터와 실제 로보트의 축을 연결해주는 체인에의해 회전량이 1/4로 줄어들므로 모터에서 실제 로보트의 회전축에 전달되는 회전량의 최종 감쇄비는 축1니 768/1, 축2가 395/1이된다. 그러므로 각회전축의 분해능은 북1이 0.006°, 축2가 0.0115°가 된다. 반복정확도(repeatibility)는 평균 0.5mm였다.

VI. 결론

본 논문에서는 SCARA로보트의 위치 정밀도 개선을 위하여 기구학 방정식을 보정하는 방법을 이용하였다. 이방법은 로보트에 나타나는 위치오차만을 측정함으로써, 링크 파라미터의 오차를 계산하고 개선된 조인트 변위값을 구할 수 있다. 실험 결과 오차는 0.5mm정도로 줄일 수 있었으며 반복정확도가 최대1mm인것과 측정오차를 감안한다면 이 결과치는 만족스러운 것이라 할 수 있다. 이론상의 정밀도 개선과 실제 결과치는 약간의 오차가 있었는데도 이의 주요한 원인으로 측정상의 오차와 기구학 방정식 모델의 불완전함을 생각 할 수 있다. 그러므로 정밀한 측정장비로 더 정확한 측정이 가능하고 오차 파라미터가 포함된 기구학 방정식 모델을 구해준다면 실제 이론치에 가까운 정밀도 향상을 보일 수 있다.

[참고 문헌]

[1] Paul. R. C. 1979, "Manipulator Cartesian Path Control." IEEE Trans. Sys. Man cyber, Vol Smc-9

[2] R. H. Taylor, "Planning and Execution of Straight line Manipulator Trajectories" IBMI, Res Develp, Vol, 23.

[3] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, "Robotics Control, Sensing, Vision, and Intelligence.", McGraw-Hill Book company, 1988.

[4] Y. H. Chang and T. I. Lee and C. H. lih, "On-line cartesian path trajectory planning for Robot manipulator.", IEEE INT. Conf on Robotics.

[5] Ralph. H. Cartesia and Richard. P. Paul. "An on-line dynamic trajectory Generator.", INT, J. Robotics Research, 3, p68-72, 1984.

[6] Chi Haur Wu "Design of Robot Accuracy compensator after calibration IEEE Robotics and Automation conf 1987.

[7] John. F. jarvic "Cartesian of Theodolities.", IEEE Robotic automation conf 1986.

[8] Chia Hsiang Meng "statistical measure and characterization of Robot Errors" IEEE Robotics and Automation 1985

[9] Louis. J. Evertt "A study of kinematic Model for forward calibration of manipulator", IEEE Robotics and Automation, Vol 2, p59-63, 1986