

로봇의 기구학적 오차측정과 보상에 관한 연구

이종신*, 임성호*, 조희상*, 이의훈*

Calibration and Compensation for the Kinematic Error in Robot Manipulator

J.S. Lee*, S.H. Lim*, H.S. Cho*, E.H. Lee*

ABSTRACT

Abstract - This paper presents the method of calibrating and compensating for the kinematic errors in robot manipulators. A calibration model is developed to represent any geometric errors in the manipulator's structure. A calibration jig is used to find the values of these kinematic errors in the end-effector's position and a calibration algorithm is presented to compensate these errors. These kinematic errors are experimentally determined for a SSR-6 robot manipulator developed by Samsung Heavy Industry, Daeduk R & D Center. Through this experiment the maximum kinematic error is reduced from 10mm to 0.4mm.

Key Words : Robot manipulator(수직다관절로봇), Calibration(보상), Kinematic errors(기구학적 오차)

1. 서 론

일반적으로 로봇의 몸체는 그 성격상 각 부품의 공차, 길이오차, 조립후의 중심오차는 물론 마모로 인한 정밀도 변화와 위치오차 및 동적위치가 포함되며, 이로 인해 로봇 끝단의 실제 공간좌표계와 로봇 프로그램좌표계 사이에 오차가 발생하여 로봇의 절대위치 확보에 대한 신뢰성이 떨어지는 요인이 된다.

따라서 오프라인으로 교시를 행할 경우 정확한 교시 점을 얻기가 어렵고 한 로봇에 적용된 프로그램으로 동일한 모델의 다른 로봇을 구동시킬 경우 충분한 결과를 얻을 수 없게 되어 만일 작업내용이 바뀌거나 로봇이 대체되는 경우 다시 교시하여야 한다. 로봇의 위치를 교시하는 일은 시간을 소모할 뿐 아니라 생산 라인의 가동을 중지시킴으로서 손실을 발생시키게 된다.

절대위치에 관련되는 오차들중 기구학적 오차는 로봇의 기계적인 구조나 설계를 변경시키지 않고 소프

트웨어적인 방법으로 정확도를 향상시킬 수 있다.^[1] 일반적으로 두개의 연속된 링크의 좌표계간의 관계는 Denavit-Hartenberg^[2]에 의해 정의된 Homogeneous Transformation Matrix로 표현할 수 있다. 이 관계에서 사용되는 기구학적 변수는 4가지(θ, d, a, α)이며 로봇 매니플레이터 구조에서의 기구학적 오차는 이들 변수에 의한 오차라고 할 수 있다. Wu & Veitschegger^{[3][4]}는 Hayati^[5]가 제안한 수정된 기구학적 방정식을 이용하여 PUMA 560을 모델로 하였으며 위치측면에서 로봇의 정확도 향상에 관한 알고리즘의 타당성을 실험적 방법으로 검증 하였다.

본 논문에서는 6축 수직 다관절형인 SSR-6^[6] 로봇의 기구학적 모델링을 통해 D.H 링크 변수의 향으로 기구학적 오차를 표현하였으며 로봇의 End-Effector의 실제 공간좌표와 로봇 설계상의 좌표값과의 차이 및 기구학적 변수에 대한 위치의 변화량과의 관계를 정의한 식을 사용하여 기구학적 변수에 대한 오차를 구하였다. 실제 공간상의 좌표값은 지그를 제작하여 실험적으로 구하였으며 SSR-6 로봇에 보상된 관절 값을 입력함으로써 위치에 대한 정확도 향상을 검증 하였다.

* 삼성중공업 중앙연구소 CAE팀

2. 오차의 산출

작업공간내에서 로봇 매니퓰레이터의 위치정확도를 평가하기 위해서는 로봇을 모델링하는데 필요한 링크 파라미터들의 작은 변동률로서 서로 연속된 링크의 위치에 대한 이동량을 표현하는 것이 편리하다. (그림 참조) 두개의 연속된 관절이 평행할때 작은 변동률로서 표현되는 로봇의 모델을 타당하게 하기 위해서는 D.H Homogeneous Transformation에 $Rot(y, \beta_i)$ 항을 마지막에 곱해 주는 것이 필요하다. 이 항이 없으면 비록 링크의 길이가 정확하더라도 y축에 관한 링크의 회전량이 z축에 대한 이동량과 x축에 대한 거리의 변동량에 추가된다.^[9] 수정된 Homogeneous Transformation 행렬 A_i 는 다음의 형태로 나타낼 수 있다.

$$A_i = Rot(z_{i-1}, \theta_i) Trans(0, 0, d_i) Trans(a_i, 0, 0) Rot(x_i, \alpha_i) Rot(y_i, \beta_i) \dots (1)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} C\theta_i C\beta_i - S\theta_i S\alpha_i S\beta_i & -S\theta_i C\alpha_i & C\theta_i S\beta_i + S\theta_i S\alpha_i C\beta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i C\beta_i + C\theta_i S\alpha_i S\beta_i & C\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\beta_i - C\theta_i S\alpha_i C\beta_i & a_i S\theta_i \\ -C\alpha_i S\beta_i & S\alpha_i & C\alpha_i C\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (2)$$

로봇 End-Effector의 위치오차는 4개의 기구학적 오차의 선형함수로 표현할수 있으므로 (2)식에서 주어진 수정된 기구학적 행렬을 이용하여 위치오차를 5개의 기구학적 오차의 선형함수로 나타낸다.

$$P_{error} = [P\theta] \Delta\theta + [Pd] \Delta d + [Pa] \Delta a + [P\alpha] \Delta\alpha + [P\beta] \Delta\beta \dots (3)$$

여기서, $[P\theta]$, $[Pd]$, $[Pa]$, $[P\alpha]$, $[P\beta]$ 는 기구학적 오차 변수에 대한 End-Effector 위치의 부분도함수이고, $\Delta\theta$, Δa , $\Delta\beta$ 는 기구학적변수의 오차를 나타내고 있다.

따라서 링크변수의 오차는 실측에 의해 구해진 End-Effector의 공간좌표값과 로봇의 모델링시 구해지는 설계상의 링크변수를 이용하여 계산된 좌표값의 차이로 얻어질수 있다.

3. 기구학적 오차의 결정

식(3)은 다음과 같은 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$[Pos_Parm][deltaParm] = [deltaPos] \dots (4)$$

여기서, $[Pos_Parm]$ = 3*30 행렬의 기구학적 오차 변수에 대한 로봇 End-effector 위치의 부분 도함수
 $[deltaParm]$ = 30*1 행렬의 기구학적 링크 변수의 오차
 $[deltaPos]$ = 30*1 행렬의 위치 오차

이식을 풀어쓰면

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_6} & \frac{\partial x}{\partial d_1} & \frac{\partial x}{\partial d_6} & \frac{\partial x}{\partial a_1} & \frac{\partial x}{\partial a_6} & \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial x}{\partial \alpha_6} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_6} & \frac{\partial y}{\partial d_1} & \frac{\partial y}{\partial d_6} & \frac{\partial y}{\partial a_1} & \frac{\partial y}{\partial a_6} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_6} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_6} & \frac{\partial z}{\partial d_1} & \frac{\partial z}{\partial d_6} & \frac{\partial z}{\partial a_1} & \frac{\partial z}{\partial a_6} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_1 \\ \vdots \\ \Delta\theta_6 \\ \Delta d_1 \\ \vdots \\ \Delta d_6 \\ \Delta a_1 \\ \vdots \\ \Delta a_6 \\ \Delta\alpha_1 \\ \vdots \\ \Delta\alpha_6 \\ \Delta\beta_1 \\ \vdots \\ \Delta\beta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \dots (5)$$

으로 나타낼수 있고, 식(4)에 대한 Normal Equation은

$$[Pos_Parm]^T [Pos_Parm] [deltaParm] = [Pos_Parm]^T [deltaPos] \dots (6)$$

여기서 $[Pos_Parm]$ 의 Column이 선형 독립이라면 30*1 행렬의 링크변수의 오차는 최소자승법으로 풀수 있다. 계산된 링크 변수의 오차를 $[Pos_Parm]$ 행렬에 대입하여 기구학적 오차 변수를 다시 계산한다. 반복 계산후에는 $[deltaPos]$ 의 요소들은 모두 0에 가깝게 되며 $[Pos_Parm]$ 행렬은 새로운 기구학적 변수값으로 대체된다. 기구학적 오차를 계산하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 설계상의 변수에 의해 계산된 관절값 ($\theta_1 - \theta_6$)과 바라는 실제 공간상의 좌표값 (x, y, z)을 입력한다.
- 2) 실제 좌표값과 1)에서 주어진 관절값에 의한 형식상 좌표값과의 차이를 구한다.

- 3) 각 링크 변수($\theta_1-\theta_6, d_1-d_6, a_1-a_6, \alpha_1-\alpha_6$) 및 β_i 에 대한 OT6 변환 행렬식에 의해 구해지는 x, y, z 의 부분 도함수 값을 구한다. 이 값들을 [Pos_Parm]행렬의 각 요소로 한다
- 4) [Pos_Parm]^T[Pos_Parm] 행렬에 대해 [deltaParm]을 구한다.
- 5) 구해진 기구학적 오차들을 설계상의 변수들에 더하고 [Pos_Parm] 행렬을 구한다.
- 6) 형식상의 좌표값과 실제 좌표값과의 차이가 바라는 오차 범위내에 들때 까지 2)번부터 반복한다.

4. 오차측정실험

SSR-6 로봇의 로봇의 기구학적 오차 $\Delta\theta_1-\Delta\theta_6, \Delta d_1-\Delta d_6, \Delta a_1-\Delta a_6, \Delta\alpha_1-\Delta\alpha_6, \Delta\beta_1-\Delta\beta_6$ 를 구하기 위해서는 공간상의 실제 좌표를 알수있는 지그가 필요하다. 실측용으로 제작된 지그는 [3], [4]에서 제시한 위치 측정용 지그의 개념을 이용하였다. (3)식을 전개하기 위해서는 공간 좌표계에 대한 로봇의 끝단점의 위치를 정확히 알아야만 한다.

4-1. 공간좌표 측정장치

측정장치의 주요구성을 살펴보면 Calibration Tool, Base, Table, Pin등으로 구성되어 있다. 그림1에 로봇과 측정용 지그의 이용방식이 나타나 있다.

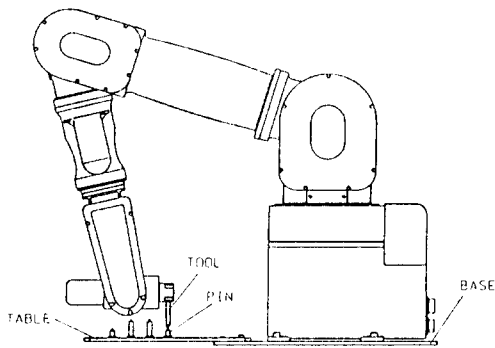
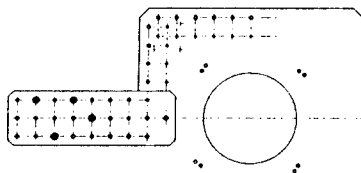


그림1. 로봇과 측정용 지그의 이용방식



여기서 측정장치의 조합을 살펴보면 로봇핸드의 선단부(6축)에 위치정밀도 $\pm 0.03\text{mm}$ 와 선단부 등글기 0.5mm의 축침을 가진 공간좌표를 알고있는 Calibration Tool을 장착시키며, Calibrayion Table과 조합 가능한 좌표점을 가진 Calibration Base위에 로봇을 설치하고 로봇의 절대좌표를 확보하기 위하여 로봇과 Calibration Base를 평행핀을 사용하여 고정시킨다. 또한 측정하고자 하는 방향의 Calibration Base 위에 Cabibration Table을 조합하고 평행핀을 삽입하여 위치정밀도를 확보한다.

마지막으로 Calibration Table위에 가공되어 있는 구멍에 위치정밀도 $\pm 0.01\text{mm}$ 와 선단부 등글기 1mm의 축침을 가진 Calibration Pin을 삽입하여 측정하고자 하는 위치의 절대좌표값을 확보함으로써 측정장치의 준비를 완료한다.

4-2. 결 과

그림2는 SSR-6의 외형 및 좌표계를 보여주며 표1은 프로그램상 설정된 링크변수를 나타낸다.

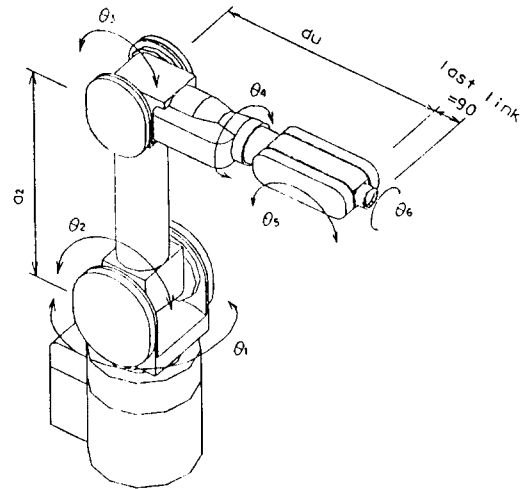


그림2. SSR-6 로봇

표1. SSR-6 로봇의 Link Parameter

구분	θ	α	d	a	β
1	θ_1	-90	0	0	0
2	θ_2+90	0	0	a_2	0
3	θ_3	-90	0	0	0
4	θ_4	90	d_4	0	0
5	θ_5	-90	0	0	0
6	θ_6	0	0	0	0

표2는 Calibration을 시행한 후의 기구학적 오차를 나타내고 있다.

오차의 측정은 로봇의 주된 작업공간내에서 실시하였으며, 가능한 한 많은 점을 교시하여 타당한 기구학적 오차를 산출하는 것이 바람직하다.

SSR-6의 경우 PUMA 로봇처럼 형상이 비교적 복잡하지 않으므로 오차측정방법상 유리하다.

구분	$\Delta\theta$	$\Delta\alpha$	Δd	Δa	$\Delta\beta$
1	-0.004699	-0.009125	0.278984	-1.001016	0.002962
2	0.004181	0.005079	-0.052270	0.620783	0.009515
3	-0.004648	-0.002167	1.510122	0.243161	0.003335
4	0.000001	-0.068579	2.337548	-2.109419	-0.00446
5	0.023381	0.021474	1.288038	-1.257816	0.029482
6	-0.047381	0.019550	0.445588	1.558683	-0.004885

표2. Calibration 후 기구학적 오차

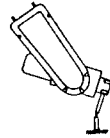
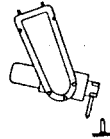
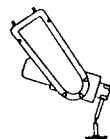
개 략 도	내 용
① 	기구학적 오차를 얻기 위하여 요구되는 위치로 아암을 교시함
② 	요구되는 위치로 이동. 그러나 보상이 요구되는 위치로 이동할 수 없음
③ 	기구학적 오차를 이용하여 요구되는 위치로 보상함

그림3. 관절값 계산과정

5. 오차보상

기구학적 오차가 결정되면 로봇이 원하는 정확도 범위내에 들기 위해서는 이러한 오차들을 보상해 주어야 한다. 방법상으로 기구학적 오차를 이용하여 기구학 방정식의 변수들을 수정하여 해를 구하는 것이 아니라 가고자 하는 위치를 기구학적 오차들을 고려하여 수정한 후에 실제적인 구동 관절값을 구하는 것이다.

5-1 오차보상방법

로봇 제어기에 입력시켜야 하는 관절값은 다음과 같은 과정에 의해 구해질수 있다.

- 1) 실제지령위치에 대한 설계변수에 기초한 형식적인 관절값을 구한다.
- 2) 1)에서 구한 역기구학적 해를 이용하여 4절에서 구한 기구학적 오차 중에서 관절값들에 대한 오차를 제외한 나머지 고정변수를 고려하여 수정된 위치를 구한다.
- 3) 수정된 위치와 실제 지령위치와의 차이 좌표값을 구한다.

로봇이 이동해야 할 관절값은 실제 지령위치에서 차이 좌표값을 뺀 값으로 나타낸다.

- 4) 3)에서 구한 로봇이 이동해야 할 좌표값에 대한 역기구학적 해를 구한다.
 - 5) 실제로 로봇을 구동할때 필요한 관절 data는 4)에서의 각각의 관절값에서 관절값에 대한 기구학적 오차를 뺀 값으로 구해질수 있다.
- 그림3은 위의 과정에 대한 개념도이다.

6. 결 론

본 논문에서 실험적으로 오차보상하는 방법이 적용되었으며, 특수하게 제작된 지그에 대한 기준점의 위치를 측정함으로써 보상을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기구학적 오차측정과 그 보상에 관한 방법의 타당성을 규명하였다.
2. 기구학적인 오차를 보상하기전 최대위치오차는 10mm 로 나타났으나, 위치보상을 통하여 0.4mm 로 감소시킬 수 있었다.
3. 향후 Off-Line Teaching 을 위한 보다 정밀한 오차보상기법 개발에 활용할 수 있는 계기가 되었다.

참고 문헌

1. R. P. Paul, Robot Manipulators : Mathematics, Programming and Control Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
2. Zvi S. Roth, Benjamin W. Mooring & Bahram Ravani, "An Overview of Robot Calibration," in IEEE Journal of Robotics and automation, Vol. RA-3, No. 5, Oct 1987.

3. W.K.Veitschegger & Chi-Haur Wu, "Robot Calibration and Compensation," in IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 6, Dec. 1988.
4. W.K.Veitschegger, "Robot Kinematic Error analysis, Modelling, Calibration & Compensation," Ph.D Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL, June 1987.
5. S.A.Hayati, "Robot Arm Geometric Link Calibration," in Proc. 22nd IEEE Conf. on Decision and Control, pp.1477-1483, Dec.1983
6. 이종신의 3인, "6축 수직다관절 로봇의 최적화 설계", 대한기계학회 추계학술논문 발표대회 논문집, 1994
7. Gilbert Strang, Linear Algebra and Its Application, 2nd Edition, Academic Press
8. P.G.Ranky 7 C.Y.Ho, robot modeling:Control and applications with Software. IFS Ltd, UK, 1985
9. W.K.Veitschegger & Chi-Haur Wu, "Robot accuracy Analysis Based on kinematics." in IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol RA-2, No.3, Sep 1986, pg171-pg179