

화상정보를 이용한 로봇기구학의 오차 보정

The Compensation of Kinematic Differences of a Robot Using Image Information

°이영진*, 이민철**, 안철기*, 손권**, 이장명***

* 부산대학교 기계공학과 대학원 (Tel:510-3081; Fax:512-9835; E-mail: yjlee4@hyowon.pusan.ac.kr)

** 부산대학교 기계공학부 (Tel:510-2439; Fax:512-9835; E-mail: mclee@hyowon.pusan.ac.kr)

*** 부산대학교 전자공학과 (Tel:510-2378; Fax:515-5190; E-mail: jmlee@hyowon.pusan.ac.kr)

Abstract : The task environment of a robot is changing rapidly and task itself becomes complicated due to current industrial trends of multi-product and small lot size production. A convenient user-interfaced off-line programming(OLP) system is being developed in order to overcome the difficulty in teaching a robot task. Using the OLP system, operators can easily teach robot tasks off-line and verify feasibility of the task through simulation of a robot prior to the on-line execution. However, some task errors are inevitable by kinematic differences between the robot model in OLP and the actual robot.

Three calibration methods using image information are proposed to compensate the kinematic differences. These methods compose of a relative position vector method, three point compensation method, and base line compensation method. To compensate a kinematic differences the vision system with one monochrome camera is used in the calibration experiment.

Keywords : SCARA Robot, Off-Line Programming System, Digital Signal Processor, Vision System, Kinematic Difference

1. 서론

최근 다품종 소량 생산에 부응하여 로봇의 작업 공간이 빈번하게 변화되고 있는 추세로 이에 대응하기 위해 고속 고정도 조립을 위한 로봇 제어의 기능향상이 요구되고 있는 실정이다. 또한 교시 작업의 효율성을 제고하기 위한 연구가 일본, 미국 등지에서 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 이러한 교시 작업을 용이하게 하기 위해 가전제품, 자동차, 중공업 등의 생산현장에서 오프라인 프로그래밍(off-line programming)을 자체 개발하거나 또는 비싼 가격으로 도입하여 사용을 시도하고 있는 실정이다.

교시 작업을 효율적으로 수행하기 위해서는 오프라인 프로그래밍상에서 작업 경로 생성, 충돌 회피, 제어 성능 평가 등을 충분히 검토한 후 그 결과를 온라인 구동에 사용할 수 있도록 넘겨주어야 한다^[1]. 이때 제어 성능이 우수하더라도 로봇 자체의 기구학적 오차와 조립 오차로 인해 실제 환경상에서 로봇의 위치가 오프라인 프로그래밍에서의 경우와 차이가 나게 된다. 또한 주변 환경을 오프라인 프로그래밍상에서 설정하는 것도 용이하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 로봇 자체가 가지고 있는 오차를 보정할 수 있도록 기능을 부여해야 한다.

본 연구에서는 이러한 기구학적 오차를 카메라를 이용하여 구하고자 한다. 이 오차를 보정하여 오프라인 프로그래밍 상의 로봇의 위치와 실제 로봇의 위치를 일치시키고자 한다.

2. 카메라를 이용한 로봇의 기구학적 오차 보정

오프라인 프로그래밍에 의한 로봇작업의 교시는 프로그래밍상에서의 로봇과 주어진 작업환경의 기구학적 모델에 대해서 수행된다. 이때 오프라인으로 교시된 작업을 실제의 로봇에 적용하여 실행하면 제어성능이 아무리 우수해도 작업오차가 발생한다. 이 오차는 프로그래밍상의 로봇 기구학 모델과 실제 로봇과의 차이에서 기인되며, 이것이 교시작업시의 주된 오차가 된다. 이러한 교시오차를 줄이기 위해서 로봇의 기구학적 오차를 구하는

것이 우선적으로 선행되어야 하며, 구한 오차를 로봇의 기구학 모델을 보정하는데 이용하고자 한다. 이를 수행하기 위해 먼저 교시와 실제 로봇작업과의 오차를 유발하는 요인을 분석하고, 이를 보정해야 한다. 또한 로봇 자체의 기구학 모델의 오차를 어느 정도 보정한다고 하더라도 실제 생산라인의 조립공정에서는 공구의 장착 시와 조립대상의 설치 시에 오차가 수반되므로 이러한 오차를 보정하기 위해서는 조립대상의 위치 데이터를 오프라인 교시 시스템 또는 로봇 제어기에 피이드백해 줄 수 있는 센서의 사용이 필수적이다^{[2][3]}. 본 연구에서는 교시 오차를 줄이기 위해 일차적으로 스카라 로봇에 대한 기구학 오차의 요인을 분석하고, 이 오차를 보정하기 위한 기본적인 방법을 연구하였다. 본 연구에 사용된 화상 시스템은 삼성전자의 흑백 화상 처리 보드인 MVB02, 카메라는 동경전자의 CS8320, 렌즈는 AVENIR사의 75mm 줌렌즈 그리고 20mm 접사링을 각각 사용하였다.

2.1 로봇 모델과 실제 로봇 사이에서 발생하는 기구학적 오차

오프라인 교시의 정확성은 로봇 모델의 기구방정식에 나타나는 인자들의 정확도에 영향을 받는다. Denavit-Hartenberg 인자들을 계산하는데 동반하는 오차들은 역기구학 방정식을 통하여 관절각 값의 오차를 유발한다. 따라서 로봇의 반복성이 상당히 양호함에도 불구하고 정밀성은 떨어지게 된다.^[2] 본 연구에서 사용하는 스카라 로봇인 경우 가장 큰 오차요인은 그림 1에서와 같이 로봇의 원점복귀시에 발생하는 1과 2축의 각도 오차이다. 이것은 원점복귀 작업의 메카니즘과 로봇제작시의 조립오차 및 설치시 오차 등으로 인해 발생하는 오차로 로봇마다 동일하지 않고, 오프라인 프로그래밍의 로봇 기구학 모델과는 큰 차이가 있다. 그림 1은 이러한 오차를 보여준다. 그림 1에서 X와 Y축의 원점으로 표현된 기저(base)는 오프라인 프로그래밍 상에서의 로봇작업 교시의 기준좌표계가 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 원점 복귀 시에 실제 로봇과 오프라인 프로그래밍의 기구학 모델

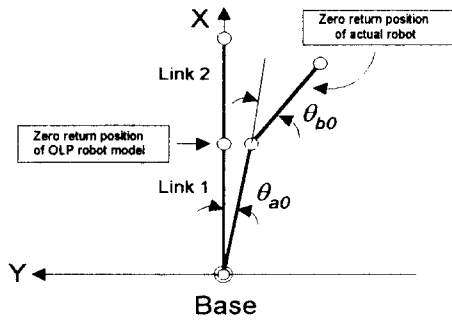


그림 1 원점복귀시 발생하는 기구학적 오차
Fig. 1. Kinematic error after zero returning

과의 1과 2축 링크의 각도 오차가 각각 θ_{a0} 와 θ_{b0} 로 나타난다. 따라서 오프라인 교시작업과 실제로봇의 1과 2축 링크는 각각 θ_{a0} 와 θ_{b0} 라는 오프셋 각(offset angle)만큼의 오차를 항상 가지게 된다. 이 오프셋 각들을 구하여 보정해 주면, 교시좌표와 실제 도달좌표와의 오차를 유발하는 가장 큰 원인을 제거할 수 있게 된다. 본 연구에서는 이 오프셋 각을 알기 위한 방법으로 상대 위치 벡터를 이용한 방법과 세 점 기준을 이용한 방법 및 기준선을 이용한 방법을 제시하고 그 타당성을 실험을 통해 비교 및 검토하였다.

2.2 상대 위치 벡터를 이용한 방법

상대 위치 벡터를 이용한 방법은 로봇의 원점복귀 작업 후에 1축만을 임의의 각도로 회전시켰을 때의 위치와 원점복귀 위치 사이의 상대 위치 벡터를 이용하여 1과 2축의 오프셋 각을 구하고자 하는 방법이다. 그림 2는 이 방법을 이용하여 1과 2축의 오프셋 각을 구하는 방법을 나타낸다. 여기서 점 P_0 는 원점복귀 시 4축 중심의 위치를 나타내고 점 P_1 은 원점복귀 작업 후 1축만을 임의의 각(α)만큼 회전시켰을 때 4축 중심의 위치를 나타낸다. 이때 4축의 중심 위치는 단말효과기에 설치한 카메라를 통해 임의의 두 점 P_0 와 P_1 의 좌표값을 구한 후 아래의 상대 벡터식(1)을 이용하여 1과 2축의 오프셋 각을 구한다.

그림 2에서 1축을 임의의 각(α)만큼 회전시켰을 때의 4축의 중심의 위치값은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \vec{P}_0 &= L_1 e^{j\theta_{a0}} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b0})} \\ \vec{P}_1 &= L_1 e^{j(\theta_{a0} + \alpha)} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b0} + \alpha)} \\ \vec{P}_2 &= L_1 e^{j(\theta_{a0} - \alpha)} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b0} - \alpha)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 L_1, L_2 는 각각 로봇의 1과 2축 링크의 길이이며 θ_{a0} 와 θ_{b0} 는 각각 1과 2축 링크의 오프셋 각을 나타낸다. 이때 두 점 P_1 과 P_0 를 잇는 선분을 벡터성분으로 기준좌표계 상에서 표시하면 다음 식과 같다.

$$\vec{P}_1 - \vec{P}_0 = A + jB \quad (2)$$

여기서 A와 B는 기준좌표계 상에서 그림 2에 표시된 두 점 P_1 과 P_0 의 좌표값을 통해 구한 값이다.

식 (1)을 이용하여 두 점 P_1 과 P_0 를 잇는 선분을 벡터성분으로 나타내면 다음식과 같다.

$$\vec{P}_1 - \vec{P}_0 = e^{j\theta_{a0}}(e^{j\alpha} - 1)(L_1 + L_2 e^{j\theta_{b0}}) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 1과 2축 오프셋 각은 다음식과 같이 구해진다

$$\theta_{b0} = \cos^{-1} \left[\left\{ \frac{A^2 + B^2}{(\cos \alpha - 1)^2 + \sin^2 \alpha} - (L_1^2 + L_2^2) \right\} / 2L_1 L_2 \right]$$

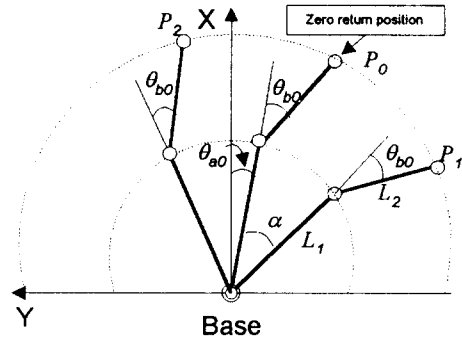


그림 2 상대위치 벡터를 이용한 1과 2축의 오프셋 각 계산
Fig. 2 Offset angles at joint 1 and 2 by relative position vector method

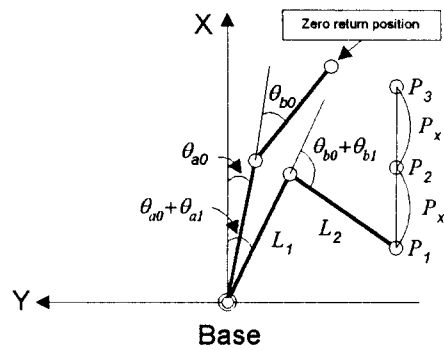


그림 3 세 점 기준보상법에 의한 오프셋 값 계산
Fig. 3. Offset angles at joint 1 and 2 by three point compensation method

$$\begin{aligned} \theta_{a0} &= \theta_{A+jB} - \theta_1 - \theta_2 \\ \theta_1 &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha - 1} \right\} \\ \theta_2 &= \tan^{-1} \left\{ \frac{L_2 \sin \theta_{b0}}{L_1 + L_2 \cos \theta_{b0}} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 θ_{A+jB} 는 선분 $\vec{P}_1 \vec{P}_0$ 의 벡터성분에서의 기준좌표계에서 본 위상각을 의미한다.

2.3 세 점 기준을 이용한 방법

스카라 로봇의 단말 효과기(end-effector)를 회전시키는 4축의 중심을 기준좌표계상에서 좌표값이 알려진 세개의 점에 위치시켰을 때, 로봇체어기에서 출력되는 각 점에 대한 관찰각을 이용하여 오프셋 각을 기하학적 공식을 이용해 도출하고자 한다.^[3] 그림 3에서와 같이 일직선상에 등간격으로 교시된 3점을 각각 P_1, P_2, P_3 , 그 간격을 P_x 라 할 때 다음과 같이 구할 수 있다. P_1, P_2, P_3 은 등간격(x방향으로 P_x , Y방향으로 0)으로 교시된 점이다. 따라서 $P_x, \theta_{a1}, \theta_{b1}, \theta_{a2}, \theta_{b2}, \theta_{a3}, \theta_{b3}$ 값을 알 수 있고 기구학 방정식을 풀면 1과 2축 오프셋 각(θ_{a0}, θ_{b0})을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{P}_1 &= L_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1})} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1} + \theta_{b0} + \theta_{b1})} \\ \vec{P}_2 &= L_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2})} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2} + \theta_{b0} + \theta_{b2})} \\ \vec{P}_3 &= L_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3})} + L_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3} + \theta_{b0} + \theta_{b3})} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\vec{P}_3 - \vec{P}_2 = \vec{P}_2 - \vec{P}_1$ 의 관계로부터 다음식이 구해진다.

$$\begin{aligned} L_1(e^{j\theta_{a3}} - 2e^{j\theta_{a2}} + e^{j\theta_{a1}}) &= L_2[-e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b0})} + 2e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b1})} - e^{j(\theta_{a0} + \theta_{b2})}]e^{j\theta_{b0}} \\ L_1 K_1 e^{j\theta_{a1}} &= L_2 K_2 e^{j\theta_{b1}} e^{j\theta_{b0}} \end{aligned} \quad (6)$$

단.
$$K_1 = (e^{j\theta_a} - 2e^{j\theta_a} + e^{j\theta_a})/e^{j\theta_1}$$

$$K_2 = (-e^{j\theta_a + \theta_m} + 2e^{j\theta_a + \theta_m} - e^{j\theta_a + \theta_m})/e^{j\theta_2}$$

식(7)에서 위상각의 관계에 의해 다음식이 구해진다.

$$\theta_{10} = \theta_1 - \theta_2 \quad (8)$$

다음으로 $\vec{P_2} - \vec{P_1} = \vec{P_x}$ 의 관계로부터

$$P_x = e^{j\omega} [L_1(e^{j\theta_a} - e^{j\theta_1}) + L_2(e^{j(\theta_a + \theta_m + \theta_m)} - e^{j(\theta_a + \theta_m + \theta_m)})] \quad (9)$$

$$P_x = e^{j\omega} L_1 [K_3 e^{j\theta_3} + (L_2/L_1) K_4 e^{j\theta_1}] \quad (10)$$

$$(P_x/L_1)e^{-j\theta_a} = K_3 e^{j\theta_3} + (K_1/K_2) K_4 e^{j\theta_1} = K_5 e^{j\theta_1}$$

단.
$$K_3 = (e^{j\theta_a} - e^{j\theta_1})/e^{j\theta_3}$$

$$K_4 = (e^{j(\theta_a + \theta_m + \theta_m)} - e^{j(\theta_a + \theta_m + \theta_m)})/e^{j\theta_1}$$

식(10)에 의해 다음식이 구해진다.

$$\theta_{a0} = -\theta_5 \quad (11)$$

그러므로 식(8)과 식(11)의 결과식으로부터 1과 2축의 오프셋 각을 구할 수 있다.

2.4 기준선을 이용한 방법

단말효과기의 중심위치에 부착한 카메라를 통해 기준좌표계상에 그은 기준선을 검출하였을 때의 로봇의 각도 좌표값을 구하고 이를 이용하여 1과 2축의 오프셋 각을 검출하고자 한다. 먼저 그림 4와 같이 θ_{b^*} 를 구하기 위하여 로봇을 구동시켜 원점복귀 작업 후 1축은 고정시키고 2축만을 시계방향과 반시계방향으로 각각 회전시키면서 단말효과기에 부착한 카메라로 로봇의 4축 중심이 기준선에 왔을 때의 각도 좌표값을 구한다. 구한 각도 좌표값을 식(12)를 이용하면 θ_{b^*} 가 구해지며 이것은 1과 2축 오프셋 각을 더한 값이다.

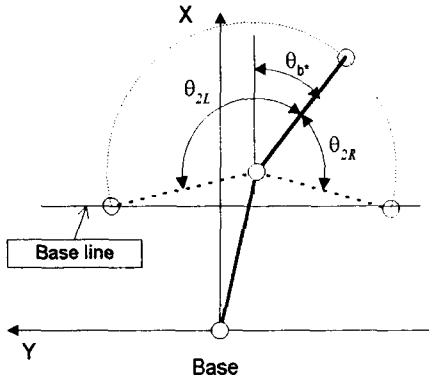


그림 4 기준선을 이용하여 θ_{b^*} 계산

Fig. 4. θ_{b^*} by base line compensation method

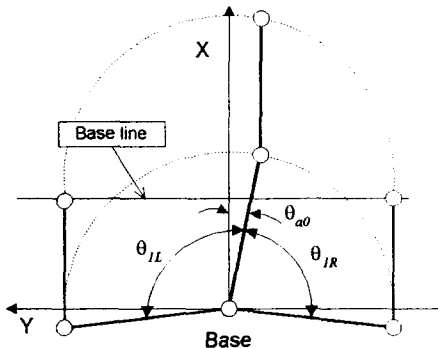


그림 5 기준선을 이용한 1축 오프셋 각 계산

Fig. 5. Offset angle at joint 1 by base line compensation method

$$\theta_{b^*} = \frac{|\theta_{2L}| + |\theta_{2R}|}{2} - |\theta_{2R}| \quad (12)$$

다음으로 1축 오프셋 각을 구하기 위하여 2축을 식(12)를 이용하여 구한 θ_{b^*} 만큼 보상한 뒤 1축만을 회전시켜 로봇의 4축 중심이 기준선에 닿았을 때의 각도 좌표값을 구한다. 이것을 식(13)을 이용하여 1축의 오프셋 각을 구할 수 있다.

$$\theta_{a0} = \frac{|\theta_{1L}| + |\theta_{1R}|}{2} - |\theta_{1R}| \quad (13)$$

식(12)에서 구한 θ_{b^*} 와 식(13)에서 구한 θ_{a0} 의 차를 구하면 2축의 오프셋 각을 구할 수 있다.

$$\theta_{10} = \theta_{b^*} - \theta_{a0} \quad (14)$$

3. 오차 보정 실험

3.1 시뮬레이션

그림 6과 7은 스카라 로봇이 1과 2축 오프셋 각을 가질 때 제각 추종을 기구학적으로 시뮬레이션한 것이다. 로봇을 임의의 직선 궤적으로 가게 했을 때 각 샘플링 간격마다 직교좌표계상의 궤적을 역기구학으로 풀어서 나온 관절각에 임의의 오프셋 각을 더한 것을 다시 순기구학으로 풀면 임의의 오프셋 각을 가지는 로봇의 궤적이 나온다. 그림 6은 2축의 오프셋 각을 -5° 로 주었을 때 스카라 로봇의 4축 중심의 궤적을 표시한 것으로 원형 표시는 오프셋 각이 없을 때의 궤적을 나타내고 십자가 표시는 오프셋 각이 있을 때의 궤적을 각각 나타낸다. 그림 7은 1과 2축 오프셋 각이 각각 -5° 일때의 궤적을 나타낸다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 오프셋 각이 없는 오프라인 프로그래밍상의 궤적과 오프셋 각을 가지는 실제 로봇의 궤적이 일치하지 않으며, 직선궤적이 휘어진 곡선 궤적으로 바뀌어짐을 볼 수 있다.

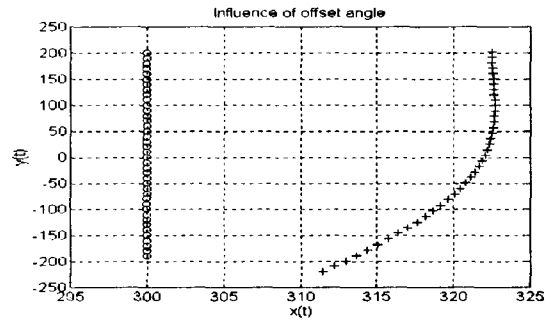


그림 6 2축 오프셋 각을 -5° 주었을 경우의 궤적
Fig. 6. Trajectory due to offset of -5° at joint 2

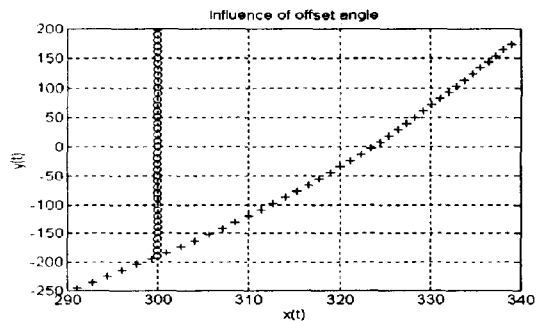


그림 7 1축 오프셋 각 -5° , 2축 -5° 주었을 경우의 궤적
Fig. 7. Trajectory due to offset of -5° at joint 1 and 2, respectively

3.2 상대위치 벡터를 이용한 오차 보정

상대 위치벡터를 이용한 방법에 의하여 기구학적 오차를 보정하기 위해서 먼저 2축은 고정시킨 뒤, 1축만 임의의 각도로 회전시킨다. 이때의 좌표값과 원점복귀시의 좌표값을 단말 효과기에 부착된 카메라를 통하여 기준좌표계에서 직접 측정하여 구한다. 구한 좌표값과 식 (4)를 이용하여 오프셋 각 θ_{ω} , θ_{ω} 를 구하면 표 1과 같다.

표 1 상대 위치벡터법에서 구해진 기구학 오차

Table 1. Kinematic errors calculated by relative position vector method

Parameter	Mean	Max.	Min.	Standard Deviation	OLP Robot Model
θ_{ω} [°]	-6.49	-7.57	-5.89	0.299	0
θ_{ω} [°]	-6.23	-7.30	-5.93	0.286	0

3.3 세 점 기준을 이용한 오차 보정

세 점 기준을 이용하는 방법을 사용하여 로봇의 1과 2축을 움직인 후, 그림 3과 같이 표시된 세 점을 카메라를 이용하여 검출하였을 때의 각도 좌표값을 각각 구한다. 구한 각도 좌표값을 식(8)과 식(11)을 이용하여 오프셋 각 θ_{ω} , θ_{ω} 를 구하면 표 2와 같다.

표 2 세 점 기준보상법에서 구해진 기구학 오차

Table 2. Kinematic errors calculated by three point compensation method

Parameter	Mean	Max.	Min.	Standard Deviation	OLP Robot Model
θ_{ω} [°]	-4.86	-4.91	-4.83	0.0096	0
θ_{ω} [°]	-3.76	-3.81	-3.74	0.0098	0

3.4 기준선을 이용한 오차 보정

단말효과기의 중심위치에 부착한 카메라를 이용하여 로봇의 4축 중심 위치가 기준좌표계에 그은 기준선을 검출하였을 때 로봇의 각도 좌표값을 구한다. 구한 각도 좌표값을 식(13)과 식(14)를 이용하여 오프셋 각 θ_{ω} , θ_{ω} 를 구하면 표 3과 같다.

표 3 기준선을 이용한 방법을 통해 구한 기구학 오차

Table 3. Kinematic errors calculated by base line method

Parameter	Mean	Max.	Min.	Standard Deviation	OLP Robot Model
θ_{ω} [°]	-2.83	-2.84	-2.81	0.0025	0
θ_{ω} [°]	-5.64	-5.66	-5.63	0.0021	0

3.5 오차보정에 대한 검증 및 고찰

구성된 로봇제어시스템에서 사용된 스카라 로봇의 기구학적 오차를 구하기 위하여 상대 위치벡터를 이용한 방법과 세 점 기준을 이용한 방법 그리고 기준선을 이용한 방법을 적용하였다. 세 가지 방법에 대해 각각 10회씩의 실험을 수행한 결과에서 상대 위치벡터를 이용한 방법은 1과 2축 오프셋 각이 -6.49° , -6.23° , 세 점 기준을 이용한 방법은 -4.86° , -3.76° 그리고 기준선을 이용한 방법은 -2.83° , -5.64° 로 각각 나왔고 표준편차는 상대 위치벡터를 이용한 방법이 0.299, 0.286, 세 점 기준을 이용한 방법이 0.0096, 0.0098, 그리고 기준선을 이용한 방법이 0.0025, 0.0021 로 각각 나왔다. 이러한 세 가지 방법으로 구한 기구학적 오차를 오프라인 프로그래밍에서 보정한 뒤 이를 검증하기 위하여 그림 8과 같이 2축만을 $+90^\circ$, 0° , -90° 로 회전시키며 단말효과기 끝에 부착한 펜으로 정반위에 표시한다. 여기서 점 A, B, C는 2축만을 $+90^\circ$, 0° , -90° 있을 때 단

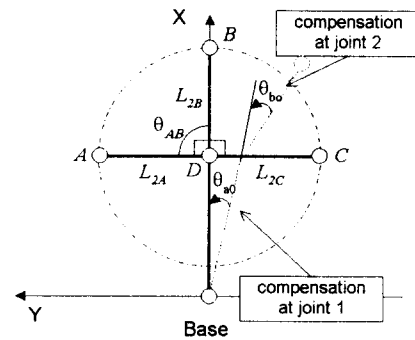


그림 8 기구학적 오차 보정에 대한 검증
Fig. 8. The verification of the compensation of kinematic differences

표 4 기구학적 오차 보정 방법에 대한 검증 결과

Fig. 4. The result of the verification for compensation of kinematic differences

기구학적 오차 보상 방법	θ_{AB}
각도에 의한 방법	91.31°
세 점 기준을 이용한 방법	90.14°
기준선을 이용하는 방법	90.05°

말효과기에 부착된 펜으로 표시한 점이다. 그리고 점 D는 점 B에서 기준좌표계의 X축과 평행하게 그었을 때 선분 AC와 만나는 점이다. 세 가지 방법으로 구한 기구학적 오차는 정반위에 있는 기준 좌표계를 기준으로 구한 것이 때문에 선분 AC는 기준 좌표계의 Y축과 평행을 이루어야 하며 선분 BD는 X축과 평행해야 된다. 따라서 선분 AC와 선분 BD는 수직으로 만나야 한다. 표 4는 세 가지 기구학적 보정법에 대하여 선분 AC와 선분 BD가 이루는 각도를 각각 나타낸다.

4. 결론

스카라 로봇의 기구학적 오차를 구하는 세 가지 방법 중에서 기준선을 이용한 방법이 1과 2축 오프셋 각의 표준편차가 각각 0.0025° , 0.0021° 로 가장 작았고 표 4에서 나타난 검증 결과에서도 각도 오차가 0.05° 로 가장 작았다. 이를 토대로 로봇의 기구학적 오차를 구하는 세 가지 방법 중 기준선을 이용한 방법이 편리하고 가장 신뢰할 수 있는 방법이라고 판단된다.

향후 연구과제로는 화상정보와 위치센서를 혼용하여 오프셋 각 이외의 조립 오차나 설치 오차 등을 보정해 주는 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

[1] K.Son, M.C.Lee, J.M.Lee, S.H.Han, M.H.Lee, and S.K.Kim, "Real-Time Evaluation of an Off-Line Programming System for SCARA Robot" Proc. of the 2nd ASCC, pp. 1-89~92, 1997
 [2] 김완수, 조형식, 김성권, "조립라인에 있어서 부품의 조립오차 분포특성을 고려한 로봇의 재교시", '95 한국자동제어학술회의, pp 761~764, 1995.
 [3] 구영모, 신기범, 김성권, "로봇용용 시스템을 위한 비전용용", '94 한국자동제어학술회의, 1994, pp. 1126~1130.
 [4] 안철기, 이민철, 손권, 이장명, 김성권, "오프라인 교시작업을 위한 통합 로봇제어시스템의 구현", '96한국자동제어학술회의, pp. 503~506, 1996.