

비접촉식 트래커를 이용한 6R로봇의 효과적 툴 캘리브레이션 연구 A Study on Effective Tool Calibration Method of 6R Robot with Optical Tracker

*#김진대¹, 조지승¹, 박철휴¹, 이 인태²

*#J. D. Kim(jdkim@dmi.re.kr)¹, C. S. Cho¹, C.H.Park¹, I.T.Lee²

¹ 대구기계부품연구원 메카트로닉스부품산업화센터, ² (주)유진엠에스 기술연구소

Key words : Tool Calibration, Optical Tracker, Coordinate Transformation, ISO 9283, Robot Performance Evaluation System

1. 서론

반도체, 기계, 자동차 산업의 발전과 더불어 다양한 종류의 조립 자동화나 핸들링로봇, 용접로봇 및 검사 자동화 로봇시스템 등 6R다관절 로봇의 수요가 꾸준히 성장해 오고있다. 각 용도에 맞는 작업을 위해서 로봇의 끝단(End Effector)에 작업특성에 맞는 로봇 툴(Tool)을 장착하게 된다. 하지만 로봇메이커에서 제공되는 로봇의 기구학식은 초기 제작된 로봇의 끝단까지만으로 TCP 0으로 정의 되어 있어 새로운 작업툴을 부착할 경우 TCP를 재 정의해야만 한다. 일반적으로 연장된 툴은 초기 설계 데이터가 없는 경우도 있고, 설계 사양이 있더라도 툴의 가공 및 부착상의 오차로 인하여 TCP 0으로부터 위치 및 방향이 모두 변화되는 성분을 갖는다. ISO 9283에서 규정하는 각 특성을 평가 위한 비접촉식 3차원측정 장치로 Laser-Tracker, Opto-Tracker 등 고성능의 로봇 시험평가 장치들이 출시되고 있지만 각 측정시스템은 고유의 좌표계를 사용함으로 인하여 사용자의 입장에서 로봇의 동작특성을 측정시스템 기준으로 평가할 수밖에 없는 실정이다. 본 연구에서는 Opto-Tracker를 이용하여 위와같은 상대좌표값에 기준한 성능평가를 로봇기준 좌표계에서의 성능평가시스템으로 전환시킬수 있는 방법을 제시하였으며, 또한 이를 이용한 효과적인 로봇 TCP 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 이론적 검증을 위해서 Matlab으로 시뮬레이션하였고, 3차원 비접촉 측정 장비인 Opto-Tracker를 이용하여 6R-Kuka로봇 시스템을 대상으로 경로 특성을 측정하여 측정 데이터를 분석하고 결과를 도출하였다.

2. 로봇기준 좌표계방식의 성능평가 및 툴보정

ISO 9283에 근거한 다관절 로봇의 시험성능평가를 위하여 Opto-Tracker를 많이 사용하고 있다. 상기한 바와같이 이들 측정장비의 판단 기준은 Opto-Tracker에 설치된 좌표계를 중심으로 모든 좌표값이 얻어지므로 실제 로봇 공간에서의 위치정밀도(Accuracy), 반복정도(Repeatability), 속도(Velocity)등을 평가하기에는 어려움이 따른다.

로봇과 Opto-Tracker 좌표계간의 변환(Transformation) 관계를 규명함으로써 로봇기준좌표계 방식의 성능평가시스템을 구축할 수 있으며 이를 이용한 6R 로봇 툴의 효과적인 캘리브레이션 방법을 해결하여야 한다.

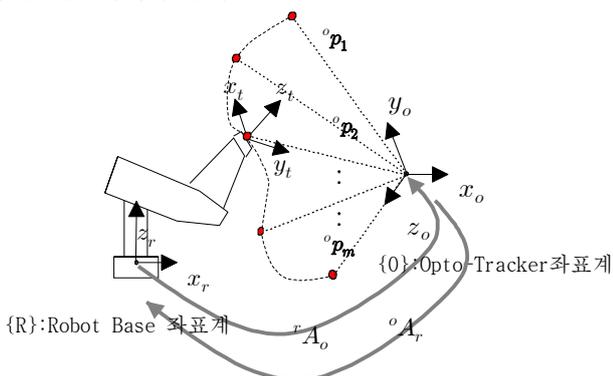


Fig. 1 Transformation between Robot and Opto-Tracker

Fig. 1에서와 같이 로봇기준좌표계에 대해서 여러 번 로봇을 움직이면서 Opto-Tracker좌표계상에서 점들(${}^o p_1 \dots {}^o p_m$)로 측정할 수 있고 이들 점 데이터들을 이용하여 두 좌표계간의 변환을 구한다. 로봇자체의 측정점(${}^r p_1 \dots {}^r p_m$)들이 충분한 정밀도를 가진다면, ${}^o p = {}^o R_r \cdot {}^r p + {}^o p_r$ 의 관계식은 성립되고, 여기에서 ${}^r p$ 는 로봇 조인트 및 링크 변수에 대한 함수로 주어진다. 즉, 주어진 ${}^o p_i$ 와 ${}^r p_i$ 로부터 ${}^o R_r$ 와 ${}^o p_r$ 를 추정하는 것이다. 베이스 프레임상의 좌표 값들을 ${}^2 p$ 로 두고 물체 좌표계 원점을 ${}^o p_r$ 로, 그들에 대한 물체 좌표계 상의 값을 ${}^1 p_i, i=1,2,\dots,m$, 로 두면 다음의 식(1)이 된다.

$${}^o R_r \cdot {}^1 p = {}^2 p - t \tag{1}$$

로봇 베이스 보정에서는 먼저 회전 성분을 구하면 병진 성분은 간단히 구하여 질 수 있다. 물체의 공간 회전은 단위 4원수와 그에 대한 공역(Conjugate) 4원수의 곱으로 표현 가능하다. 즉, 회전 성분에 대해 단위 4원수, $q = \sin(\theta/2)$, $q = \cos(\theta/2)$ 를 곱하면 ${}^o R_r \cdot {}^1 p = q \cdot {}^1 p \cdot q^*$ 로 쓸수 있다. 이를 식(1)에 적용하면 식(2)가 유도된다.

$$(q \cdot {}^1 p \cdot q^*) \cdot ({}^2 p - t) = (q \cdot ({}^2 p - t) \cdot q^*) - q \times ({}^2 p - t) \tag{2}$$

식(2)에서 스칼라(Scalar) 성분, $({}^1 p - ({}^2 p - t)) \cdot q = 0$ 이 되므로 벡터 부분에 대하여 정리하면 $\tan(\theta/2)({}^2 p - t + {}^1 p) \times q = {}^1 p - {}^2 p + t$ 가 되며 벡터 외적을 반대칭 행렬 $\Omega(\cdot)$ 의 곱으로 표현 하면 식(3)이 된다.

$$\Omega({}^2 p + {}^1 p) \tan(\theta/2) q - \Omega(t) \tan(\theta/2) q - t = ({}^1 p - {}^2 p) \tag{3}$$

여기에서 회전 부분만 정리하면 $\Omega({}^2 p + {}^1 p) \tan(\theta/2) q = ({}^1 p - {}^2 p)$ 가 되고 회전 전의 벡터와 회전 후의 벡터는 같은 도심(Centroid)를 가져야 하므로 식(4)가 유도된다.

$$\Omega(a_i + b_i) \tan(\theta/2) q = a_i - b_i \tag{4}$$

여기서, $a_i = {}^1 p_i - {}^1 p_{i+1}$, $b_i = {}^2 p_i - {}^2 p_{i+1}$

식(4)의 회전각도 θ 와 회전축 $q = [s_x, s_y, s_z]$ 은 식(5)의 상관 행렬로부터 구할 수 있다.

$$L = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{12} + k_{33} & k_{32} - k_{23} & k_{13} - k_{31} & k_{21} - k_{12} \\ k_{32} - k_{23} & k_{11} - k_{22} - k_{33} & k_{12} + k_{21} & k_{31} - k_{13} \\ k_{13} - k_{31} & k_{12} + k_{21} & -k_{11} + k_{22} - k_{33} & k_{23} + k_{32} \\ k_{21} - k_{12} & k_{31} + k_{13} & k_{23} + k_{32} & -k_{11} - k_{22} + k_{33} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, $k = \sum_{i=1}^{m-1} w_i \cdot a_i \cdot b_i^T$, w_i : weight

회전행렬 ${}^o R_r$ 에 해당하는 단위 회전량은 식(5)의 가장 큰 양의 고유치에 해당하는 고유 벡터 $\lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]$ 가 된다. 이로부터 구하는 회전각과 회전축은 식(6)과 같다.

$$\theta = 2\cos^{-1}(\lambda_0), \quad s_x = \lambda_1 \sin^{-1}(\theta/2) \tag{6}$$

$$s_y = \lambda_2 \sin^{-1}(\theta/2), \quad s_z = \lambda_3 \sin^{-1}(\theta/2)$$

${}^o R_r$ 가 구하여지면 이를 이용하여 병진 파라미터는 식(7)로 구할 수 있다.

$$t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i ({}^r p - {}^o R_r \cdot {}^o p) \tag{7}$$

여기서, w_i : weight

이렇게 로봇의 움직임만을 이용하여 로봇과 Opto-Tracker간의 좌표계 변환이 구해지게 되면 이를 이용하여 ISO 9283에

근거한 다관절로봇의 성능평가를 로봇좌표계 중심으로 구현할 수있게 된다. 또한 Fig. 2와 같이 TCP0에 새로운 로봇 작업툴을 설치한 경우에도 효과적인 캘리브레이션을 수행할 수 있다.

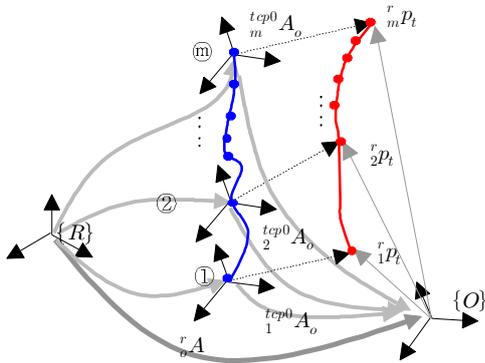


Fig. 2 Effective Tool Calibration with Opto-Tracker

Fig. 2에서 m개의 로봇움직임(${}^{tcp0}A_o \sim {}^{tcpm}A_o$)은 로봇에서 직접 언어낼 수 있는 벡터이고 새로운 작업툴을 장착한 경우에 해당하는 (${}^rP_t \sim {}^r_mP_t$)의 좌표값은 Opto-Tracker로서 측정이 가능하다. 앞의 과정에서 oA_r 이 구해졌으므로 이를 동일한 기준좌표계값인 로봇좌표계 값으로 변환가능하고 이들의 상관관계로부터 새로운 툴의 $R(r_{11} \sim r_{33})$, $T(tn_x, tn_y, tn_z)$ 벡터를 식(8)로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} tcp0_x \\ tcp0_y \\ tcp0_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{nx} \\ t_{ny} \\ t_{nz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서 ($tcp0_x, tcp0_y, tcp0_z$)은 각 움직임에 대하여 로봇좌표계에서 읽은 TCP0의 위치값을 의미하여 (tn_x, tn_y, tn_z)는 그때의 툴끝단점을 Opto-Tracker로서 측정하여 로봇기준좌표계로 변환한 값을 의미한다. 이로서 복수의 m개 측정점을 이용하여 최소사승법을 적용하여 새로운 툴의 캘리브레이션을 효과적으로 수행할 수 있게 된다.

3. 장비구성 및 실험 결과

다음의 Fig. 3은 본 연구에서 구성한 6DOF Kuka-16 로봇의 성능평가를 위해 구축한 테스트베드 구성을 보이고 있다.

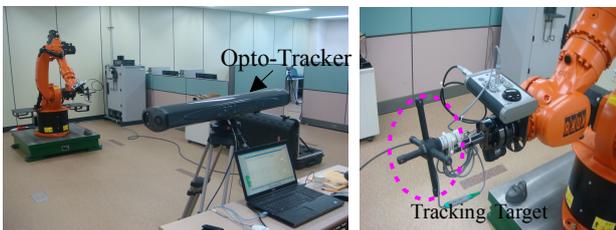


Fig. 3 Base and Tool Calibration Setup

로봇기준좌표계 방식의 성능평가와 효과적 툴보정을 위해 사용된 Opto-tracker는 Fig. 3과 같이 로봇끝단에 장착된 Tracking Target을 인식하는 장치로 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of Opto-Tracker

| Items | Specification |
|----------------------------|----------------|
| 측정 가능 거리 | 1.5m ~ 6.0m 이상 |
| Target 측정 방식 | LED 위치 측정 |
| Target Resolution(at 2.5m) | 2 μ m 이하 |
| 거리 측정 Resolution | 2 μ m 이하 |
| 거리 오차율 정도 | 60 μ m 이하 |

로봇 기준좌표계 방식의 성능평가를 구현하기 위해서 5번의 로봇 움직임 ${}^rP_1, \dots, {}^rP_5$ 을 수행하고 Opto-Tracker로 각각의 경우에 대하여 측정점을 획득한 결과는 Table 2와 같고 이를 바탕으로 구한 oA_r 과 툴 캘리브레이션 ${}^{tcp0}A_t$ 는 다음과 같았다.

Table 2 Measurement data sets

| Robot Coordinate (mm) | | | Opto-Tracker Coordinate TCP 0(mm) | | | Opto-Tracker Coordinate Tool(mm) | | |
|-----------------------|--------|---------|-----------------------------------|----------|-----------|----------------------------------|----------|-----------|
| x | y | z | x | y | z | x | y | z |
| 728.47 | 677.68 | 1051.71 | -51.708 | 1232.941 | -917.408 | -50.669 | 1241.116 | -928.901 |
| 792.35 | 695.69 | 1114.41 | -114.406 | 1229.729 | -851.120 | -111.006 | 1239.262 | -860.997 |
| 1091.65 | 444.13 | 1079.60 | -79.601 | 896.118 | -647.228 | -73.752 | 900.112 | -659.468 |
| 1023.62 | 216.96 | 1345.48 | -345.479 | 702.322 | -783.898 | -337.879 | 713.718 | -787.416 |
| 841.23 | -77.27 | 1055.14 | -55.135 | 481.266 | -1050.294 | -64.694 | 490.671 | -1054.785 |

$${}^oA_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.0 & 1000.02 \\ -0.317 & 0.948 & 0 & 821.749 \\ 0.948 & 0.317 & 0 & -1823.392 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^{tcp0}A_t = \begin{bmatrix} 0.87 & -0.46 & 0.12 & 10.001 \\ 0.42 & 0.87 & 0.26 & 10.010 \\ -0.23 & -0.17 & 0.96 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 4는 위에서 구한 oA_r 을 이용하여 시작점에서 시작하여 임의의 경로모션 후 원위치로 돌아오는 로봇움직임에 대하여 Opto-Tracker로 측정한 결과를 로봇기준 좌표계에서 관측한 결과 값들의 오차를 나타내는데 x,y,z축 모두 $\pm 0.03mm$ 이내임을 확인할 수 있다.

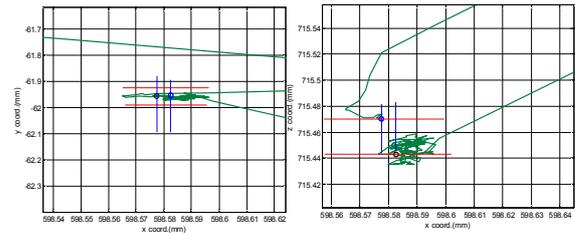


Fig. 4 Robot Base Error Result

4. 결론

본 연구에서는 비접촉식 측정장치인 Opto-Tracker를 사용하여 로봇좌표계 중심의 성능평가시스템을 개발하고 이를 활용하여 6R 로봇의 효과적인 툴 캘리브레이션방법을 제시하였고 다관절 Kuka-16로봇의 공간경로 측정을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 로봇절대좌표계 방식의 성능평가시스템을 개발함으로써 성능데이터의 비교와 검증은 쉽게 수행할 수 있게 되었다.
2. 공간상에서의 로봇모션만으로도 툴의 캘리브레이션을 효과적으로 할 수 있는 방법을 제안하였다.
3. 제시된 방법들을 바탕으로 향후 여러 가지 종류의 로봇에 적용하여 ISO 9283성능평가를 수행하고자 한다.

후기

본 연구는 2009년 차세대선도산업 기술연구개발사업의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Kim, J. D 외 2, "Virtual Space Calibration for Laser Vision Sensor Using Circular Jig," Journal of KSPE, Vol. 20, No. 12, pp. 73-79, 2003.
2. ISO 9283, "Manipulating industrial robots-Performance criteria and related test method", 1998.
3. 김미경외 4. "레이저 트래커 이용한 로봇성능평가시스템 개발", 한국 정밀 공학회 2005 춘계학술대회논문집, p1001~p1002.