

좌표변환을 이용한 토크센서의 상호간섭 보정 Crosstalk Calibration for a Torque Sensor Using Coordinate Transformation

*김영렬¹, 이상혁², #송재복³

*Y. L. Kim(kimloul@korea.ac.kr)¹, S. H. Lee(ideal100@korea.ac.kr)², #J.-B. Song(jbsong@korea.ac.kr)³

¹ 고려대학교 기계공학부, ² 고려대학교 기계공학부, ³ 고려대학교 기계공학부

Key words : Torque sensor, Calibration, Crosstalk

1. 서론

머니플레이터의 기능을 확장하고, 보다 안정적인 제어를 위해서는 머니플레이터의 각 조인트에 작용하는 토크를 측정하는 것이 중요하다. 그러나 여러 방향의 하중이 동시에 작용하는 머니플레이터의 관절에서는 상호간섭오차 때문에 토크센서의 성능이 저하된다. 따라서 토크센서에서 나타나는 상호간섭오차를 보정하게 되면 토크센서의 성능을 향상시킬 수 있고, 결과적으로 머니플레이터의 성능을 향상시키는 데 기여할 수 있다.

토크센서에서 상호간섭오차를 보정하는 방법은 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법이 있다. 본 논문에서는 좌표변환을 이용하여 소프트웨어적인 방법으로 토크센서에서 발생하는 상호간섭오차를 보정하는 방법을 제시한다. 먼저 2절에서는 토크센서에서 나타나는 상호간섭오차를 분석하고, 3절에서는 좌표변환을 이용해서 상호간섭오차를 보정하는 구체적인 방법을 제시한다.

2. 토크센서와 상호간섭오차

토크센서에서 원하는 토크성분을 측정할 때, 다른 힘/토크 성분이 토크센서의 센서출력에 영향을 미치게 된다. 이렇게 원하지 않는 힘/토크 성분에 의하여 센서출력에 영향을 끼치는 현상을 상호간섭(crosstalk)이라 한다. 상호간섭에 의하여 발생하는 오차는 힘/토크센서에서 가장 큰 오차의 원인이 된다. 이러한 상호간섭오차를 수식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = C_m \tau_m + C_e \tau_e \quad (1)$$

여기서, z 는 토크센서의 출력, τ_m 는 측정토크, τ_e 는 상호간섭을 일으키는 토크, C_m 과 C_e 는 각 토크성분의 센서출력에 대한 영향도를 나타내는 계수이다. 식 (1)에서 보듯이, 상호간섭을 일으키는 힘/토크 성분 때문에 센서출력 z 로부터 측정하고자 하는 측정토크 τ_m 를 정확히 구할 수 없다.

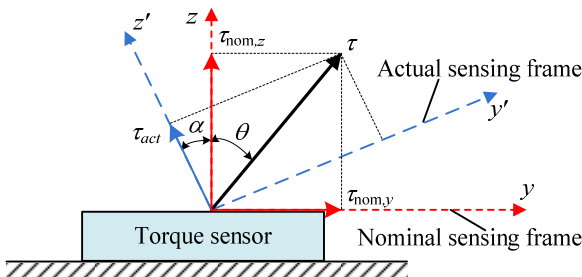


Fig.1 Torque sensor and sensing coordinate.

토크센서에서 상호간섭이 나타나는 실질적인 이유는 센서 감지부의 가공오차, 스트레인게이지의 부착오차, 포아송비에 의한 센서 감지부 변형량의 복잡한 거동 등이다. 그러나 측정좌표계 관점에서 보면, 상호간섭의 원인은 공칭 측정좌표계(Nominal sensing frame)가 실제 측정좌표계(Actual sensing frame)와 일치하지 않기 때문이다. 여기서 공칭 측정좌표계는 토크센서의 측정토크에 대한 좌표축으로 설정되어 있는 좌표계이며, 실제 측정좌표계는 상호간섭이 나타나지 않는 측정토크에 대한 좌표계이다. 이 측정좌표계의

차이에 의하여 발생하는 상호간섭 효과를 이해하기 위하여 단순화한 예를 들어 설명한다.

Fig. 1의 예에서 토크센서에 토크 τ 가 작용하고 있으며, 토크센서로 z 축 방향의 토크를 측정하고자 한다. 문제를 단순화하기 위하여 2차원으로 토크만 작용한다고 가정한다. 이때 상호간섭이 없는 이상적인 토크센서라면, 측정토크에 해당하는 공칭 측정좌표계의 z 축 방향 토크인 $\tau_{nom,z}$ 만이 센서출력에 영향을 준다. 그러나 실제 토크센서에서는 상호간섭 효과가 나타나서 y 축 방향 토크인 $\tau_{nom,y}$ 도 센서출력에 영향을 주게 된다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z = C_1 \tau_{nom,z} + C_2 \tau_{nom,y} = \tau(C_1 \cos \theta + C_2 \sin \theta) \quad (2)$$

여기서, C_1, C_2 는 $\tau_{nom,z}$ 와 $\tau_{nom,y}$ 의 센서출력 z 에 대한 영향도를 나타내는 계수이다. 이때 C_1, C_2 를 $\alpha = \text{atan2}(-C_2, C_1)$, $\gamma = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$ 와 같이 변환하여 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$z = \gamma \tau \cos(\theta + \alpha) = \gamma \tau_{act} \quad (3)$$

여기서 τ_{act} 는 실제 측정좌표계에서 나타나는 측정토크, γ 는 τ_{act} 의 센서출력 z 에 대한 영향도를 나타내는 계수, α 는 공칭 측정좌표계와 실제 측정좌표계 사이의 회전각도를 나타낸다.

공칭 측정좌표계 상에서는 센서출력이 $\tau_{nom,z}$ 뿐만 아니라, $\tau_{nom,y}$ 에도 영향을 받는 상호간섭이 나타난다. 그런데 공칭 측정좌표계를 α 만큼 회전시키면 상호간섭이 나타나지 않는 실제 측정좌표계로 변환되어 센서출력이 τ_{act} 에만 영향을 받는 것을 확인할 수가 있다. 즉, 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭 효과는 실제 측정좌표계와의 위치차이에 의하여 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 이 관계를 이용하면, 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭오차를 측정하여 실제 측정좌표계를 찾아서 상호간섭오차를 보정할 수 있다.

3. 좌표변환을 통한 실제 측정좌표계 검출

토크센서에서 발생하는 상호간섭 오차를 보정하기 위해서는 실제 측정좌표계를 찾아야 한다. 이를 위해서 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭 효과로부터 실제 측정좌표계와 공칭 측정좌표계 사이의 관계를 구하여야 한다.

$$z = \gamma_i \tau_{z_i} \quad (4)$$

$$z = C_{f_{x_i}} f_{x_i} + C_{f_{y_i}} f_{y_i} + C_{f_{z_i}} f_{z_i} + C_{\tau_{x_i}} \tau_{x_i} + C_{\tau_{y_i}} \tau_{y_i} + C_{\tau_{z_i}} \tau_{z_i} \quad (5)$$

식 (4)는 실제 측정좌표계 $\{i\}$ 에서 센서출력 z 와 측정토크 τ_{z_i} 사이의 관계를 나타낸 식이고, 식 (5)는 공칭 측정좌표계 $\{i\}$ 에서 센서출력 z 와 센서에 작용하는 힘/토크 성분 사이의 관계를 나타낸 것이다. 식 (5)의 스케일 계수 $C_{f_{x_i}}, C_{f_{y_i}}, \dots, C_{\tau_{z_i}}$ 는 또한 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭을 나타낸다. 아래에서는 상호간섭을 나타내는 스케일 계수로부터 공칭 측정좌표계와 실제 측정좌표계의 위치관계를, 실제 측정좌표계에서 스케일 계수 γ_i 를 유도하는 과정을 나타낸다.

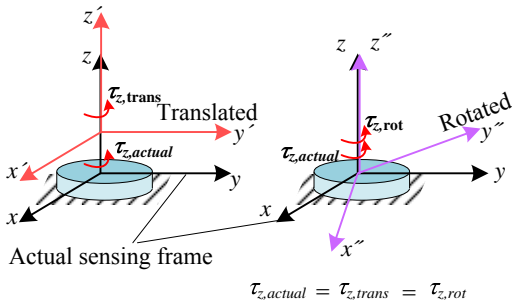


Fig. 2 Sensed torque of actual, translated, and rotated sensing frame.

일반적으로 두 좌표계 사이의 위치관계를 나타내기 위해서는 6개의 변수가 필요하다. 그러나 Fig. 2에서 나타나듯이 실제 측정좌표계는 z축 방향의 병진 및 회전이동에 대해서는 독립적이다. 그러므로 실제 측정좌표계와 공칭 측정좌표계의 위치관계를 나타내기 위해서는 Fig. 3과 같이 z축 방향의 병진 및 회전 이동을 제외한 4개의 변수만 있으면 된다.

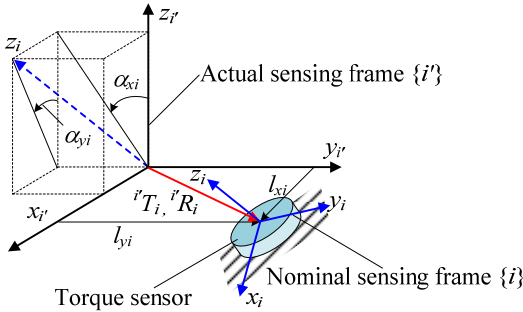


Fig. 3 Geometric relationship between actual and nominal sensing frames.

Fig. 3에서 l_x, l_y 는 실제 측정좌표계에서 공칭 측정좌표계로의 병진이동 거리를 나타내며, α_x, α_y 는 실제 측정좌표계 z_i 에 대한 공칭 측정좌표계 z_i' 의 x_i' 및 y_i' 축에 대한 회전각을 각각 나타낸다. 따라서 실제 측정좌표계 $\{i\}$ 에 대한 공칭 측정좌표계 $\{i'\}$ 의 동차행렬 ${}^i T_{i'}$ 과 회전행렬 ${}^i R_i$ 는 다음과 같다.

$${}^i T_i = \text{Trans}(l_{xi}, l_{yi}, 0) \cdot \text{Rot}(y, \alpha_{yi}) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_{xi}) \quad (6)$$

$${}^i R_i = \text{Rot}(y, \alpha_{yi}) \text{Rot}(x, \alpha_{xi}) \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha_{yi} & \sin \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} & \cos \alpha_{xi} \sin \alpha_{yi} \\ 0 & \cos \alpha_{xi} & -\sin \alpha_{xi} \\ -\sin \alpha_{yi} & \sin \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} & \cos \alpha_{xi} \cos \alpha_{yi} \end{bmatrix}$$

위에서 주어진 동차행렬과 회전행렬을 이용하여 실제 측정좌표계에서의 측정토크 τ_{zi} 를 공칭 측정좌표계에 작용하는 힘/토크 성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{z_i'} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^i R_i \cdot \begin{bmatrix} \tau_{x_i} \\ \tau_{y_i} \\ \tau_{z_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{y_i} & l_{x_i} & 0 \end{bmatrix} \cdot {}^i R_i \cdot \begin{bmatrix} f_{x_i} \\ f_{y_i} \\ f_{z_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에 나타난 실제 측정좌표계에서의 측정토크와 공칭 측정좌표계에서의 힘/토크 성분의 관계를 이용하여 식 (4)과 (5)의 계수를 비교하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$[C_{\tau_{xi}} \ C_{\tau_{yi}} \ C_{\tau_{zi}}] = \gamma_{i'} [0 \ 0 \ 1] \cdot R_i \quad (9)$$

$$[C_{f_{xi}} \ C_{f_{yi}} \ C_{f_{zi}}] = \gamma_{i'} [-l_{y_i} \ l_{x_i} \ 0] \cdot R_i \quad (10)$$

식 (9)과 (10)을 정리하여 실제 측정좌표계에서 스케일 변수 γ_i 와 실제 측정좌표계와 공칭 측정좌표계 사이의 위

치관계를 나타내는 변수 $l_x, l_y, \alpha_x, \alpha_y$ 를 공칭 측정좌표계에서 상호간섭을 나타내는 스케일 계수 $C_{f_{xi}}, C_{f_{yi}}, \dots, C_{\tau_{zi}}$ 로 표현하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\gamma_{i'} = \sqrt{C_{\tau_{xi}}^2 + C_{\tau_{yi}}^2 + C_{\tau_{zi}}^2} \quad (11)$$

$$\alpha_{x_i} = \text{atan2}(C_{\tau_{xi}}, C_{\tau_{zi}}) \quad (12)$$

$$\alpha_{y_i} = \text{atan2}(-C_{\tau_{xi}}, \sqrt{C_{\tau_{yi}}^2 + C_{\tau_{zi}}^2}) \quad (13)$$

$$l_{x_i} = \frac{1}{\gamma_{i'}} (C_{f_{yi}} \cos \alpha_{x_i} - C_{f_{zi}} \sin \alpha_{x_i}) \quad (14)$$

$$l_{y_i} = -\frac{1}{\gamma_{i'}} (C_{f_{xi}} \cos \alpha_{y_i} + C_{f_{yi}} \sin \alpha_{x_i} \cos \alpha_{y_i} + C_{f_{zi}} \cos \alpha_{x_i} \sin \alpha_{y_i}) \quad (15)$$

식 (11)은 실제 측정좌표계에서의 스케일 계수를 구하는 식이고, 식 (12)-(15)는 실제 측정좌표계의 위치를 구하는 식이다. 이 식을 사용하여 토크센서에서 나타나는 센서출력을 실제 측정좌표계에서의 측정토크로 변환하면 상호간섭오차가 제거된 토크를 측정할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 토크센서에서 상호간섭이 나타나는 이유를 공칭 측정좌표계와 실제 측정좌표계의 위치 차이로 해석하였다. 이에 따라 토크센서에서 나타나는 상호간섭오차를 보정하기 위해서, 실제 측정좌표계의 위치와 스케일 계수를 구하여 상호간섭오차를 보정하는 방법을 제안하였다. 상호간섭 보정알고리즘을 나타내기 위하여, 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭오차가 실제 측정좌표계에서 보정되는 과정을 단순화한 예시를 들어 보였고, 실제 토크센서에 적용하기 위하여 3차원 공간상에서 공칭 측정좌표계에서 나타나는 상호간섭오차로부터 실제 센싱축의 위치와 스케일 계수를 구하는 식을 유도하였다.

향후 연구에서는 실제 토크센서에 상호간섭 보정방법을 적용하여 상호간섭오차 측정실험을 수행할 것이다. 궁극적으로는 머니플레이터에 장착된 토크센서에 제안한 상호간섭 보정방법을 적용하여, 머니플레이터의 외력측정 성능을 향상시키는 것을 목표로 하고 있다.

후기

본 연구는 지식경제부 퍼스널 로봇용 안전 매니플레이터 개발 과제 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. D. Vischer, O. Khatib, "Design and Development of High-Performance Torque-Controlled Joints," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 4, August 1995, pp. 537-544.
2. F. Aghili, M. Buehler, J. M. Hollerbach, "Design of a Hollow Hexaform Torque Sensor for Robot Joints," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, No. 12, December 2001, pp. 967-976.
3. S.-H. Lee, J.-J. Park, J.-B. Song, "Torque sensor calibration using virtual load for a manipulator," *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2499-2454, 2007.