

십자형 구조를 가진 6축 힘·토크센서의 설계

김도석* · 윤준호** · 이종원***

Design of a Six Axis Force-Torque Sensor with a Cross-Shaped Structure

Do-Seok Kim , Jun-Ho Yoon and Chong-Won Lee

Key Words : Force-torque sensor(힘, 토크 센서), FEM(유한요소법), cross-coupling error or interference error(상호 간섭 오차), strain gage(스트레인게이지)

Abstract

The necessity of six axis force-torque sensors have been increased in the field of automatic assembly, polishing and deburing using robotic manipulator recently. This paper presents a simple and compact elastic structure design of the six axis force-torque sensor with a cross-shaped structure and the expected deflection value was induced by theoretical method to design a six axis force-torque sensor and then this theoretical method was verified by comparing with the results using the Finite Element Method(FEM).

1. 서 론

최근 산업현장에서는 생산성 향상 및 공장 자동화 추세에 따라 조립(assembly), 연마(polishing), 디버링(deburing) 등과 같은 작업에까지 로봇의 적용 범위가 확대되어 가고 있다. 로봇에 의한 조립 작업에 있어서는 부품사이에 약간의 오차만 있어도 매우 큰 반력이 발생하여 조립을 불가능하게 하거나 로봇에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 또한, 현재 조립 공장에서 사용되고 있는 로봇은 위치제어 방식이 대부분이며, 3 차원 공간에서 임의의 방향으로 작용하는 힘과 토크의 위치 및 크기에 대한 정보를 얻어내는 것은 쉽지가 않다. 그러나 로봇의 다양한 기능이 요구되어짐에 따라, 위치 제어 뿐만 아니라 여러 방향의 힘과 토크를 정확하게 측정하여 이를 제어해야 할 필요성이 점차 증가되고 있다.

힘,토크 센서에는 로봇 매니플레이터와 작업의

종류에 따라서 여러 가지 형태가 있으나 이러한 센서들은 고도의 기술 집약적인 상품이므로 매우 고가이고, 모방이나 기술이전이 어려운 실정이다. 또한 구조적으로 복잡할 뿐만 아니라 제작과정에서도 가공상의 어려움 등의 문제점이 있어 새로운 형태의 센서 개발이 필요하다.

힘, 토크 센서에 대한 연구로 1980년대 초반부터 논문이 발표되기 시작하였다. 그 중 대표적인 것은 Stanford Univ.의 Scheinman 이 개발한 십자(cross web)형의 센서인데, 이는 직교하는 4개의 탄성보(elastic beam)를 이용하여 감지부를 구성하고 보의 강성저하를 줄이기 위하여 각 면에 일반 스트레인게이지 대신 게이지 상수가 큰 반도체 스트레인게이지를 사용하였으며, 링 모양 구조의 감지부 및 플라이포트(flyfoot)형 감지부 등을 고안하였다. Yabuki 는 병렬 평판 구조만을 이용하여 조립용 로봇 팔에 작용하는 힘과 토크를 측정할 수 있는 다축 로드셀을 개발하고, 좌표변환의 관계를 이용하여 이를 분석하였다. 주진원 등은 병렬 평판 구조보다 쌍안경식 구조를 가진 센서가 제작 및 강도 측면에서 보다 개선된 성능을 가진다는 사실에 착안하여 쌍안경식의 6축 로드셀을 개발

* 중앙대 대학원

** 여주대학

*** 중앙대

하였다. Bayo 와 Stubbe 는 프레임-트러스 구조의 축방향 변형을 이용하여 강성이 큰 6 축 힘 센서를 고안하고 이에 대한 최적 설계를 수행하였다.

본 연구는 십자형 구조를 가진 힘, 토크 센서의 설계를 위하여 변형을 계산하기 위한 이론식을 유도하고, FEM(유한요소법)을 이용 이론식이 타당함을 검증하였다.

2. 힘, 토크 센서의 설계

2.1 상호 간섭 오차

다축 힘, 토크 센서는 하나의 몸체에서 여러 방향의 힘과 토크를 동시에 측정하는 센서이다. 이러한 힘과 토크를 잘 감지하기 위해서는 한 방향의 힘(또는 토크)만이 가해질 때, 그 방향의 변형률을 측정하는 부분만 변형이 존재하고 다른 방향들의 힘을 측정하는 출력 값이 모두 0 이 되어야 하는데, 이 출력 값이 0 이 되지 않음으로써 생기는 오차를 상호 간섭 오차(cross-coupling error 또는 interference error)라 한다. 이와 같은 상호 간섭 오차는 다축 힘, 토크 센서의 정확도에 큰 영향을 미치므로 다축 힘, 토크 센서는 상호 간섭 오차가 작도록 설계되어야 한다.

2.2 감지부의 설계

본 연구에서 제안하는 힘, 토크 센서의 구조를 나타내는 기본 모델은 Fig.1 에서 보는 바와 같다.

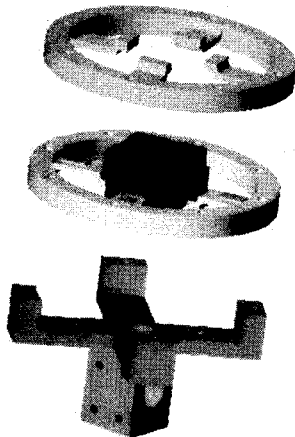


Fig. 1 Basic model of the force-torque sensor structure

센서의 구조는 크게 측정블록과 고정되어 있는 블록의 두 부분으로 나눌 수 있다. 측정블록에는 측정하고자 하는 로봇의 손목 축을 삽입할 수 있

도록 중심부분에 구멍을 성형하였고, 측정블록의 바깥면 4 면에 위치하는 전달블록은 측정블록과 연결되어 있는 베어링에 지지 되어 회전할 수 있도록 설계하였다. 측정블록과 전달블록의 바깥쪽에 위치한 고정블록은 십자(cross)형으로 구성되어 있는 상, 하 8 개의 측정 암(arm)을 통하여 전달블록과 밀착되어 연결된다. 그리고 각각의 측정 암에는 측정센서로 사용할 스트레인 게이지(strain gage)를 측정 암 안쪽에 한 개씩 부착하였다. 또한, 전달블록과 상, 하에서 밀착되어 측정 암과 접촉하는 부분은 힘이 전달되는 측정 암의 구부러진 면을 경사지게 설계함으로써 축방향 하중이 측정 암에 정확하게 전달될 수 있도록 하였다.

3. 힘, 토크 센서에 대한 이론적 해석

3.1 캔틸레버 보 구조를 가진 탄성요소의 해석

먼저 Fig. 2 과 같이 힘, 토크 센서의 좌표계를 정의하고 로봇의 축과 일치시킨다.

십자형 구조를 가진 센서를 구성하고 있는 탄성요소의 변형률을 해석하기 위하여 Fig. 1 에서 보인 센서의 탄성 요소인 측정 암을 Fig. 3 와 같은 캔틸레버 보 형태로 모델링 한다. 변형거동이 좀 더 잘 일어나도록 하기 위하여 사각형 모양의 캔틸레버 보에 홈을 성형하였다.

Fig 3 의 모델은 그림에서 보는 것처럼 두부분, 즉 부분 I 과 부분 II 로 나누어 해석할 수 있다. 이 탄성요소의 부분 II 에 힘(또는 토크)을 가할 때 부분 II 은 변형이 없고 모든 변형은 부분 I 에서 일어난다고 가정한다

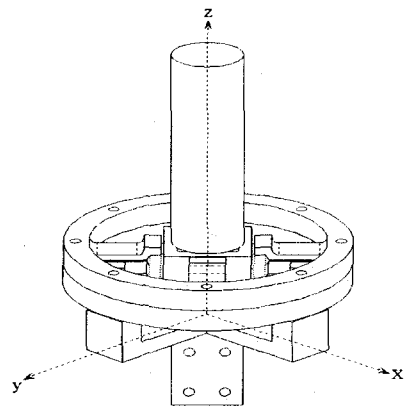


Fig. 2 The coordinate of the force-torque sensor and robot axis

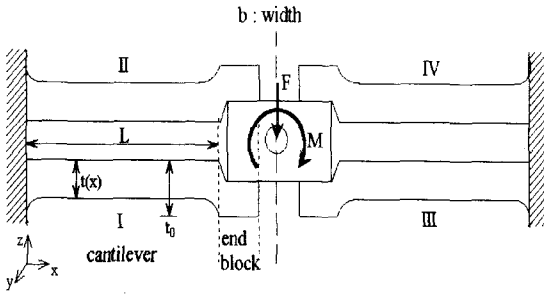


Fig. 3 Modeling of beam shape

이러한 구조는 병렬평관구조와는 달리 홈이 파여 있는 부분에서 두께가 일정하지 않기 때문에 힘과 변형률 해석이 더욱 복잡해진다. 하지만 기하학적인 요소들과 변형률과의 관계를 직접 알 수 있도록 보의 크기 설계를 위해서는 이론적인 관계식을 유도해야 할 필요가 있으며, 폭 방향에서의 변형률 변화가 없다고 가정하면 길이 방향의 힘과 변형률이 문제가 되므로 수치해석적인 적분의 도움을 받아 이론적인 해를 구하는 것이 가능하다.

Fig 3 에서와 같이 탄성요소의 부분 II 에 힘 F 와 모멘트 M 이 작용할 때, 캔틸레버 보 형태의 탄성 요소의 외부 표면에 발생하는 변형률은 다음과 같은 세 가지 경우로 나누어서 해석할 수 있다. 여기서, L 은 홈이 파여 있는 부분의 길이, t_0 는 탄성 요소의 두께, b 는 탄성 요소의 폭을 나타내며, $t(x)$ 는 x 위치에서 캔틸레버 보의 두께를 나타낸다.

3.2 힘 F 만이 작용할 때

Fig 3 에서 보인 캔틸레버 보 형태의 모델에 힘 F 만이 가해졌을 때 처짐 형상을 확대해서 나타내면 Fig 4 과 같다.

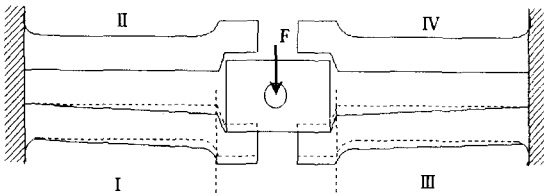


Fig. 4 Deformation due to force F

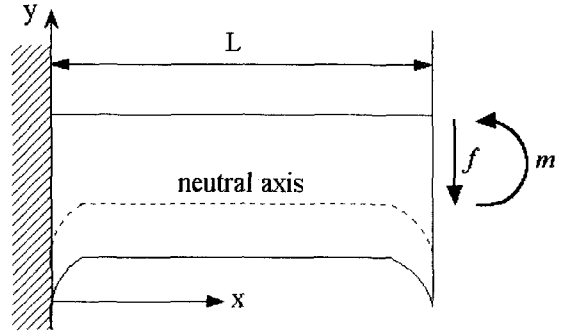


Fig. 5 Cantilever model for part I when F acts

Fig 4 의 캔틸레버 보의 부분 I 을 Fig. 5 와 같은 모델로 간주한다. Fig 5 에서 점선은 중립축을 나타낸다. 좌표계 xy 와 양의 모멘트를 Fig 3 과 같이 정의하고, 자유단에서의 힘과 모멘트를 f 와 m 이라고 두면, x 위치에서의 굽힘모멘트는 다음과 같이 주어진다.

$$M_1 = m - f(L - x)$$

이 시스템은 부정정계로서 힘의 평형 조건만으로는 f 와 m 을 구할 수 없으므로 수직 처짐(vertical deflection)을 고려하여야 한다. 이 외팔보에서 발생하는 변형이 매우 작다는 가정 하에서, 수직 처짐 곡선을 $v(x)$ 로 나타내면, Hooke의 법칙으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$v''(x) = \frac{M_1(x)}{EI(x)}$$

여기서, $v'(x) = dy(x)/dx$,

$v''(x) = d^2y(x)/dx^2$ 이고, E는 탄성계수(modulus of elasticity), I(x)는 2 차 모멘트(second moment of area)를 나타낸다. 위의 캔틸레버 보에 대해 단면 2 차 모멘트 I(x)는 다음과 같이 주어진다.

$$I(x) = \frac{bt^3(x)}{12}$$

단, $0 \leq x < r$, $t(x) = t_0 - \sqrt{3r^2 + 2xr - x^2}$

$r \leq x \leq (L - 2r)$, $t(x) = t_0 - r$

$(L - 2r) < x \leq L$, $t(x) = t_0 - \sqrt{r^2 - (x - (L - r))^2}$

경계조건은 모델의 대칭성과 중앙블록, 엔드블록의 변형이 없다는 가정으로부터,

$$y'(0) = 0, \quad y'(L) = 0$$

로 쓸 수 있다. 단면 2 차 모멘트가 x 의 함수이므로 해석적인 적분에 의해 $y'(x)$ 를 구하기가 쉽지 않다. 따라서, 수치해석적인 방법을 이용한다.

3.3 모멘트 M 만이 작용할 때

캔틸레버 보 형태의 모델에 모멘트 M 만이 작용할 경우에는 Fig. 6 와 같이 캔틸레버 보의 끝부분(부분 II)에서는 처짐이 일어나지 않고, 부분 II 에서만 처짐이 발생하게 된다. 부분 II 에 대한 캔틸레버 보를 해석하기 위하여 Fig. 7 와 같은 모델로 단순화 시킨다.

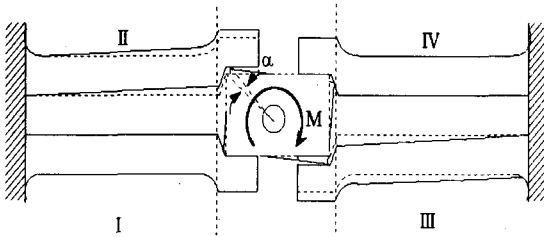


Fig. 6 Deformation due to moment M

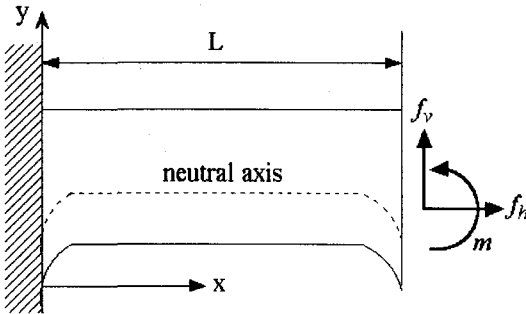


Fig. 7 Cantilever model for plate I when M acts

Fig. 7 의 오른쪽 끝을 자유단으로 보는 대신에 오른쪽 끝면의 도심에 수평력 f_H , 수직력 f_V , 모멘트 m 이 작용하는 것으로 생각할 수 있다. 그러면 외팔보의 각 단면에 작용하는 굽힘모멘트 $M_1(x)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_1(x) = m + f_V(L-x) + f_H \frac{t_0 - t(x)}{2}$$

여기서 캔틸레버의 두께 $t(x)$ 는 3.2 절의 식과 같다. 수직 방향의 처짐과 수평 방향의 신장량 (elongation)을 고려하여 이 부정정계의 f_H, f_V, m 을 구한다. f_H 로 인한 수직 처짐은 무시할 수 있다고 가정하면 수직 처짐은 $v(x)$ 에 대한 2 계 미분방정식으로 주어지고 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} v(0) &= v'(0) = 0, \\ v'(L) &= -\alpha, \\ v(L) &= \alpha d \end{aligned}$$

여기서 α 는 Fig. 6 에서와 같이 중앙블록의 미소 회전각을 나타낸다. $x=L$ 에서의 경계조건은 변형이 작다는 가정 하에서 기하학적인 적합조건으로부터 구해진다. f_H 에 의한 수평 방향의 신장량 δ 는

$$\delta = \frac{f_H}{Eb} \int_0^L \frac{dx}{t_0 - \sqrt{Lx - x^2}}$$

로 쓸 수 있고, 기하학적인 적합조건 $\delta = \alpha d$ 을 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\alpha = \frac{f_H B}{Ebt_0}$$

여기서 B 는 식 (10)의 적분 부분을 계산한 값이다. 중앙블록에 대한 자유물체도에서 모멘트 평형식을 적용하면

$$M = 4m + 4f_V d + 2f_H t_0$$

를 얻을 수 있다

3.2 절에서와 같이 $v(x) = (M/E)g(x)$ 로 치환하고, $f_V d = k_1 M$, $f_H t_0 = k_2 M$ 로 두면 위에서 유도된 식으로부터 $g(x)$ 에 대한 미분 방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

또한, 캔틸레버보 형태의 모델에 힘 F 와 모멘트 M 이 동시에 작용할 경우는 변형이 작다는 가정 하에서 중첩의 원리를 이용하여 구할 수 있다.

4. FEM에 의한 센서의 해석

설계된 모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 앞에서 이론적으로 유도한 식과 비교, 검토하였다. 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 힘 F_y 와 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 탄성변형의 변형 분포를 계산하였다. 해석은 평면응력상태로 가정하였고 사용한 유한요소는 절점 면체 선형요소 이고, 탄성요소의 재료는 높은 강성, 낮은 이력현상과 좋은 선형도를 이루기 위해 AI 6061로 가공하므로, 탄성계수는 69Gpa, 전단탄성계수는 26Gpa, 프아송비는 0.33으로 하였다.

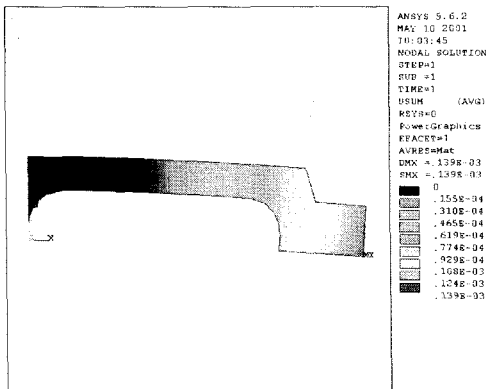


Fig. 8 Deformation result from ANSYS due to force and moment

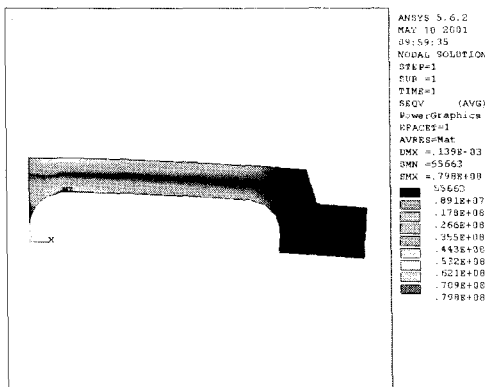


Fig. 9 Stress result from ANSYS due to force and moment

Fig 8 과 Fig 9 는 힘과 토크가 작용 했을 때의 변

형과 응력 분포를 보여주고 있다. 위에서도 알 수 있듯이 변형은 끝단에서 최대 0.139 E-03 마크 일 어났으며 이는 우리가 3 절에서 이론적으로 구한 변형값과 거의 일치한다.

최대응력은 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 좌측 아래 부분에서 최대 응력(0.793 E+ 08)이 발생하며 이는 그 부분에 응력이 집중됨을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서 설계한 십자형 힘 센서는 8 개의 측정암을 사용하여 측정하고자 하는 부분에 작용하는 힘을 정확하게 스트레인 게이지에 전달할고, 또한 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 이론식에 의한 측정암의 변형량을 계산 결과는 유한요소해석을 통해 분석한 결과와 같다는 것을 알 수 있었고, 이것으로 센서를 통하여 정확한 측정 결과를 얻을 수 있음을 알았다. 설계시 로봇에 삽입이 용이한 형태를 취한 십자형 힘센서는 실제 산업현장의 조립용 로봇 손목에 장착되어 정확한 계측을 통한 제어가 가능하도록 할 수 있어 높은 효용가치를 가질 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Shimano. B. and Roth B. 1977 "On Force Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators." IFAC Int. Symposium on Information-Control Problems in Manufacturing Technology. pp. 119~126.
- (2) Bejczy. A. K.. 1979. "Smart Sensors for Smart Hands." Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 67. pp. 275~304.
- (3) Klaffer. A. K.. 1989. "Chmielewski. T. A. and Negin. M.. Robotic Engineering;An Integrated Approach. Prentice Hall. Pp. 415~434.
- (4) 강대임, 김갑순, 정수연, 주진원. 1997. "실험계 획법을 이용한 쌍안경식 6 축 로드셀의 설계 및 상호간섭 오차 평가. " 대한기계학회논문집(A). 제 21 권, 제 11 호. Pp. 1921~1930.
- (5) Yoshikawa.T.and Miyazaki. T.. 1988. "Development of a Six-Axis Force Sensor." Proc. US-Japan Symposium in Flexible Automation. No. 1. pp. 531~538.
- (6) Yabuki. A.. 1990. "Six-Axis Force/Torque Sensor for Assembly Robots. "Fujitsu Scientific & Technical Journal. Vol. 26. No. 1. pp. 39~48.
- (7) Ch'Hayder. A. et al. 1991. United States Patent. Patent: No. 5,063,788. Nov. 12.
- (8) Bayo. E.. and Stubbe. J. R.. 1989. "Six-Axis Force Sensor Evaluation and a New Type of Optimal Frame Truss Design for Robotic Applications." J. of Robotic System. Vol. 6. No. 2. pp. 191~208.

- (9) 강철구, 한정훈. 1993. "선영화기법을 이용한 스텐더트 플랫폼 형태의 6 축힘-토크 센서에 대한 해석." 대한기계학회논문집(A). 제 21 권. 제 4 호. Pp. 961~967.
- (10) 강철구. 1998. "힘, 토크 센서의 힘 감지 오차에 대한 해석." 대한기계학회논문집(A). 제 22 권. 제 7 호. Pp. 1250~1257.
- (11) Svinin, M. M. and Uchiyama, M.. 1994. "Analytical models for Designing Force Sensors." Proc. IEEE. Int. Conf. On Robotics and Automation. Vol. 2. pp. 1178~1783.