

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서 개발

김갑순*(경상대 제어계측공학과), 이상호(경상대 대학원 제어계측공학과)

Development of a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger

G. S. Kim*(Contr. & Ins. Eng. Dept. GSNU), S. H. Lee(Contr. & Ins. Eng. Dept. GSNU)

ABSTRACT

This paper describes the development of a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger, which measures forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously. In order to safely grasp an unknown object using the robot's gripper, and accurately perceive the position of it in the gripper, it should measure the force in the gripping direction, the force in the gravity direction and the moments each direction, and perform the control using the measured forces and moments. Thus, the robot's gripper should be composed of 6-axis force/moment sensor that can measure forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously. In this paper, the small 6-axis force/moment sensor for measuring forces F_x , F_y , F_z , and moments M_x , M_y , M_z simultaneously was newly modeled using several parallel-plate beams, designed, and fabricated. The characteristic test of made sensor was performed, and the result shows that interference errors of the developed sensor are less than 3%. Thus, the developed small 6-axis force/moment sensor may be used for robot's gripper.

Key Words : 6-axis force/moment sensor(6 축 힘/모멘트센서), Parallel-plate beam(병렬평판보), Rated strain(정격변형률), Interference error(상호간섭오차)

1. 서론

인공지능 로봇에 부착되는 그리퍼(gripper)를 인간의 손과 비슷하게 제작하기 위한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. Ceccarelli, M., et al.[1]은 물체를 잡는 방향의 힘을 측정할 수 있는 단축 힘센서를 이용하여 로봇의 손가락을 제작하였고, 위치 및 힘제어로서 물체를 잡았다. Castro, D., et al.[2]은 단축 힘센서를 이용하여 조오 그리퍼(Jaw gripper)를 제작하여 물체를 잡았다.

이와 같은 그리퍼는 힘 F_x (x 방향의 힘), F_y , F_z 과 모멘트 M_x (x 방향의 모멘트), M_y , M_z 를 동시에 측정할 수 없기 때문에 미지의 물체를 떨어트리거나 파손되지 않도록 정확하게 잡을 수 없을 뿐만 아니라 미지의 물체가 손가락의 어느 위치에 있는지 정확하게 알 수 없다. 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 이용하여 정확한 힘/모멘트를 측정하기 위해서는 센서의 상호간섭오차(interference error)가 작아야 한다.[3]

본 논문에서는 로봇의 그리퍼를 구성하기 위한

힘 F_x , F_y , F_z 과 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 동시에 감지할 수 있는 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 개발하였다. 이를 위해 병렬평판보(PPB : parallel-plate beam)를 이용하여 감지부를 새롭게 모델링하였고, 보들의 변형률을 계산하는 식을 유도하였으며, 유도된 식들을 이용하여 감지부의 크기를 설계하였다. 그리고 스트레인게이지를 부착하여 센서를 제작하였고, 제작된 센서의 특성평가를 실시하였다.

2. 센서설계

2.1 모델링

Fig. 1 은 힘 F_x , F_y , F_z 와 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 동시에 감지할 수 있는 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 모델링을 나타내고 있다. 6 개의 PPB 들중 PPB 1 은 힘 F_x 와 모멘트 M_z , PPB 2 는 F_y , PPB 3 과 PPB 4 는 힘 F_z 와 모멘트 M_y , PPB 5 와 PPB 6 은 모멘트 M_x 를 감지하는 병렬평판보이다. PPB 1 과 PPB 2 는 폭 b_1 , 두께 t_1 , 길이 l_1 인 평판보 2 개로 각각 구성되었고, PPB 3, PPB 4, PPB 5, PPB 6

은 폭 b_2 , 두께 t_2 , 길이 l_2 인 평판보 2 개로 각각 구성되었다.

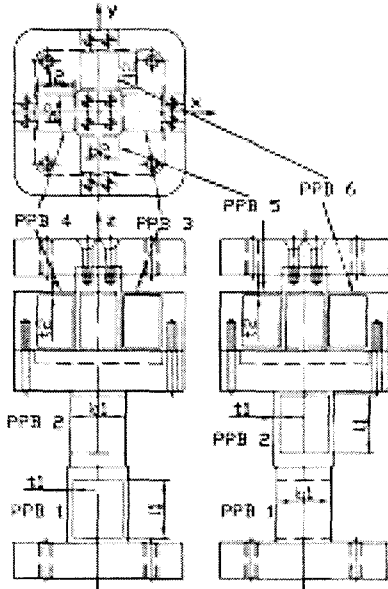


Fig. 1 Model of a small 6-axis force/moment sensor for robot's finger

2.2 센서의 이론해석

2.2.1 힘 F_x 혹은 F_y 가 가해졌을 때

Fig. 2 는 PPB 1 의 블록 O_2 중앙에 힘 F_x 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1 의 블록 끝 O_2 중앙에 힘 F_x 가 가해졌을 때 평판보 1 에 가해지는 힘과 모멘트, 즉 힘 F_x 에 의해 발생하는 x 방향의 힘 F_{fx} , 힘 F_x 에 의해 발생하는 y 방향의 모멘트 M_{fy} , 힘 F_x 에 의해 발생하는 z 방향의 힘 F_{fz} 를 구하고, 블록에서 x 방향의 힘 평형조건 $\sum F_x = 0$ 과 블록의 O 점에서 모멘트 평형조건 $\sum M_o = 0$ 식을 각각 구하며, 이들 식들을 이용하여 블록의 회전각 ϕ 와 수직처짐 v 를 구한다. 평판보 임의의 점 z 에서 모멘트 M_z 를 유도한다.

굽힘변형률식 $\epsilon = M_z / EZ_{2p}$ 과 인장변형률식과 압축변형률식 $\epsilon = F / AE$ 을 중첩시켜 평판보의 윗면 변형률 ϵ_{fx-l} 과 아래면 변형률 ϵ_{fx-l} 을 유도하면 식 (1-a), (1-b)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{fx-l} &= \frac{6t_1z}{l_1^3} \left(v + \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi \right) \\ &- \frac{6t_1}{l_1^2} \left(\frac{v}{2} + \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi \right) + \frac{d_2\phi}{l_1} \end{aligned} \quad (1-a)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{fx-l} &= -\frac{6t_1z}{l_1^3} \left(v + \left(d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \phi \right) \\ &+ \frac{6t_1}{l_1^2} \left(\frac{v}{2} + \left(\frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi \right) - \frac{d_2\phi}{l_1} \end{aligned} \quad (1-b)$$

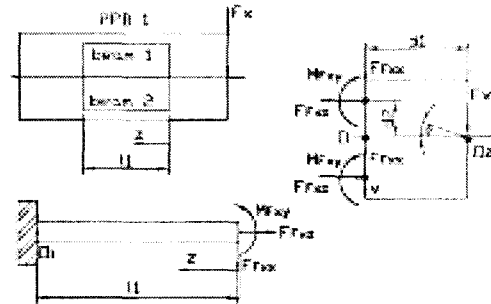


Fig. 2 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor under the force F_x

2.2.2 힘 F_z 가 가해졌을 때

Fig. 3 는 PPB 3 과 PPB 4 의 중앙에 힘 F_z 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. 평판보 3 의 $x=0$ 지점에서 힘 F_z 에 의해 발생하는 z 방향의 힘 F_{fz} 를 구하고, 고정단 O_3 점에서의 모멘트 평형조건 $\sum M_{o3} = 0$ 를 이용하여 힘 F_z 에 의해 발생하는 y 방향의 모멘트 M_{fy} 를 구하여 이들 힘과 모멘트를 이용하여 임의의 점 x 에서의 모멘트 M_x 를 구한다. 평판보의 윗면 변형률 ϵ_{fz-l} 과 아래면 변형률 ϵ_{fz-l} 을 계산하는 식은 변형률식 $\epsilon = M_x / EZ_{2p}$ 에 구한 M_x 식을 대입하여 유도할 수 있으며, 유도한 식은 식 (2-a)와 (2-b)와 같다.

$$\epsilon_{fz-l} = \frac{F_z}{4EZ_{2p}} \left(x - \frac{l_2}{2} \right) \quad (2-a)$$

$$\epsilon_{fz-l} = \frac{F_z}{4EZ_{2p}} \left(\frac{l_2}{2} - x \right) \quad (2-b)$$

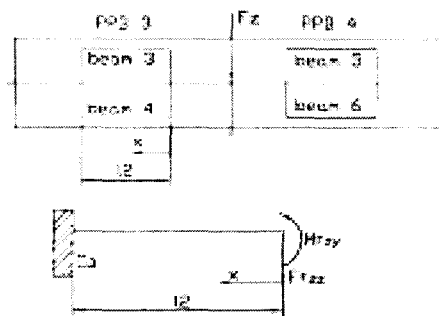


Fig. 3 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor under the forces F_z

2.2.3 모멘트 $M_x=M_y$ 가 가해졌을 때

Fig. 4는 PPB 3과 PPB 4의 중앙에 모멘트 M_y 가 가해졌을 때 각각의 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. 평판보 3의 끝점인 $x=0$ 에서 수직처짐 v 와 회전각 θ 를 이용하여 모멘트 M_y 에 의해 발생하는 x 방향의 힘 $F_{M_{yx}}$, 모멘트 M_y 에 의해 발생하는 y 방향의 힘 $F_{M_{xy}}$, 모멘트 M_y 에 의해 발생하는 y 방향의 모멘트 M_{My} 를 구하고, 이들을 블록의 중심 P 점에서의 모멘트 평형 조건 $\sum M_p = 0$ 을 이용하여 식을 유도하여 대입하면 블록의 중심점 P의 회전각 θ 를 구한다.

굽힘변형률식 $\epsilon = M/EZ_{2P}$ 과 인장변형률식과 압축변형률식 $\epsilon = F/A_2E$ 을 중첩시켜 평판보의 위면과 아랫면에서의 변형률식을 유도하면 식 (3-a), (3-b)와 같다.

$$\epsilon_{My-U} = \left[\frac{6h}{l_2^3} \left(\frac{d_3 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{3} - (d_3 + \frac{l_2}{2})x \right) + \frac{d_4}{l_2} \right] \theta \quad (3-a)$$

$$\epsilon_{My-L} = - \left[\frac{6h}{l_2^3} \left(\frac{d_3 l_2}{2} + \frac{l_2^2}{3} - (d_3 + \frac{l_2}{2})x \right) + \frac{d_4}{l_2} \right] \theta \quad (3-b)$$

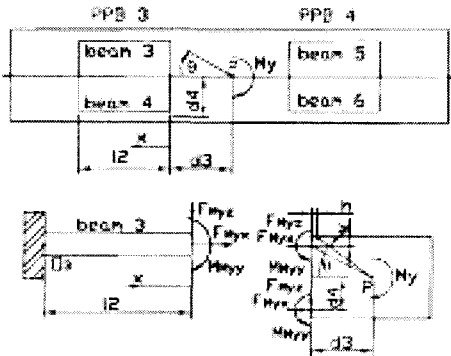


Fig. 4 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor under the moments M_y

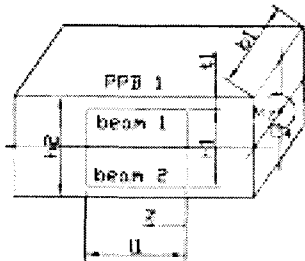


Fig. 5 Free body diagram of plate beams for a small 6-axis force/moment sensor under the moments M_z

2.2.4 모멘트 M_z 가 가해졌을 때

Fig. 5는 PPB 1의 블록 O_4 중앙에 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 각 평판보의 변형률을 해석하기 위한 개략도를 나타내고 있다. PPB 1의 블록 끝 O_4 중앙에 모멘트 M_z 가 가해졌을 때 평판보 1과 2에서 발생하는 전단변형률은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{6M_z}{b(h_2^2 - h_1^2)G} \quad (4)$$

2.3 감지부의 설계

센서의 용량은 각각의 힘센서 F_x, F_y, F_z 가 모두 20 N 이고 각각의 모멘트센서 M_x, M_y, M_z 가 1 Nm, 정격변형률은 모두 $1000 \mu m/m$ 정도, 스트레인게이지의 부착위치는 스트레인게이지의 크기 $3 \times 4 \text{ mm}^2$ 를 고려하여 보의 길이 방향으로서는 모두 보의 양끝 지점으로부터 1.5 mm 떨어진 지점이고, 보의 폭 방향으로서는 보의 길이 방향의 중심선상으로 결정하였다. 결정된 수치들을 변형률식 (1-a), (1-b), (2-a), (2-b), (3-a), (3-b), (4)에 대입하여 계산한 결과, 보의 폭 b_1 은 12 mm, b_2 는 8 mm, 보의 길이 l_1 은 13 mm, l_2 는 8 mm, 보의 높이 t_1 은 1.2 mm, t_2 는 0.73 mm 이었다. 감지부의 재질은 소용량의 힘/모멘트 센서의 감지부로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351 이다.

3. 변형률해석 및 센서제작

이론해석결과를 토대로 로봇 손가락용 소형 6축 힘/모멘트센서를 제작하기 위한 스트레인게이지 부착위치를 결정하였다. 힘 F_x 센서는 S1~S4, F_y 센서는 S5~S8, F_z 센서는 S9~S12, M_x 센서는 S13~S16, M_y 센서는 S17~S20, M_z 센서는 S21~S24로 선정하였다. 센서는 완전결선회로(휘스톤브리지회로)를 구성하여 제작된다. 각 힘/모멘트센서의 정격변형률과 상호간섭오차는 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률을 식 (5)에 의해 계산될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \quad (5)$$

여기서 ϵ 은 완전결선회로로부터 계산된 변형률, ϵ_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T_1 의 변형률, ϵ_{T2} 는 인장 스트레인게이지 T_2 의 변형률, ϵ_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C_1 의 변형률, ϵ_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C_2 의 변형률이다.

식 (5)을 이용하여 계산한 이론해석에 의한 정격변형률은 F_x 센서, F_y 센서, F_z 센서, M_x 센서, M_y 센서는 모두 $1002 \mu m/m$ 이었고, M_z 센서는 1004이었으며, 모든 센서의 상호간섭오차는 모두 0이었다.

각 센서의 정격출력은 $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ 근처로 매우 정확하게 설계되었으며, 모든 센서의 상호간섭오차가 0 인 것은 완전결선회로의 결선을 고려하여 스트레인게이지의 부착위치를 결정하였으며, 게이지의 부착을 게이지의 중심선과 평판보의 중심선이 일치하도록 하였기 때문이다.

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서는 Fig. 6 에 나타난 스트레인게이지의 부착위치에 순간접착제(M-bond 200)를 이용하여 스트레인게이지(N2A-13-T001N-350)를 부착하였으며, Fig. 6 에 나타난 완전결선회로를 구성하여 제작하였다. 이 센서의 크기는 길이가 85 mm, 폭과 높이가 모두 35 mm 이다.

4. 결과 및 고찰

로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 특성 실험은 특성실험장치를 이용하여 힘 F_x, F_y, F_z 를 각각 20 N, 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 각각 1 Nm 를 센서에 가하여 각각 3 회씩 실시하였으며, 그 값들을 평균하였다.

이론식에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한 결과, 4.4 % ~ 9.7 %의 오차를 보였다. 이와 같이 오차가 발생된 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 볼 때, 본 논문에서 유도한 식 (1-a), (1-b), (2-a), (2-b), (3-a), (3-b), (4)는 고안한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 설계를 위한 정격변형률을 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1 은 정격출력 및 상호간섭오차를 나타내고 있다. 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 최대상호간섭오차는 4.23 %이다. 이와 같이 상호간섭오차가 발생하는 것은 센서의 가공오차와 스트레인게이지의 부착오차 때문인 것으로 생각된다. Fig. 6 은 본 논문에서 개발한 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서의 사진을 나타내고 있다.

Table 1 Interference errors in characteristic test

Sensor F/M	Rated strain ($\mu\text{m}/\text{m}$) and Interference error (%)					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
$F_x=50 \text{ N}$	0.5576	-1.02	0.78	-0.68	4.10	-0.56
$F_y=50 \text{ N}$	-0.05	0.5307	0.50	3.35	0.79	0.26
$F_z=50 \text{ N}$	-1.27	-0.77	0.5401	2.25	-4.23	0.13
$M_x=5 \text{ Nm}$	-0.13	-2.05	0.41	0.4587	0.35	-0.02
$M_y=5 \text{ Nm}$	2.04	-0.49	-1.13	0.57	0.4596	0.32
$M_z=5 \text{ Nm}$	0.25	-0.58	-0.09	-0.75	2.21	0.4652

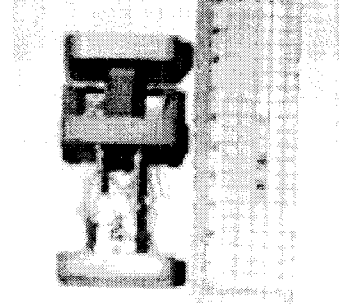


Fig. 6 Fabricated small 6-axis force/moment sensor for robot's finger

4. 결론

본 논문에서는 로봇의 그리퍼를 구성하기 위한 힘 F_x, F_y, F_z 과 모멘트 M_x, M_y, M_z 를 동시에 감지할 수 있는 로봇 손가락용 소형 6 축 힘/모멘트센서를 개발하였다.

개발한 센서는 이론식에 의한 정격출력을 기준으로 실험에 의한 정격출력을 비교한 최대오차가 9.7 %이하이었으므로 본 논문에서 유도한 식 (1-a), (1-b), (2-a), (2-b), (3-a), (3-b), (4)는 센서의 설계를 위한 정격변형률 계산하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각되며, 최대상호간섭오차도 4.23 %이하로 우수하게 평가되어 개발한 센서는 미지물체를 안전하게 잡을 수 있는 로봇의 그리퍼로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2002 학년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D00108).

참고문헌

1. Ceccarelli, M., et al., "Grasp Forces in Two-finger: Modeling and Measuring," Proceedings of 5th International Workshop on Robotics in Alpe Adria-Danube Region, pp.321~326, 1996.
2. Castro, D., et al. "Tactile Force Control Feedback in Parallel Jaw Gripper," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, V. 3, pp.884~888, 1997.
3. Kim, G. S., et al., "Design and fabrication of a three-component force/moment sensor using plate-beam," Meas. Sci. Technol., Vol.10, pp. 295 ~ 301, 1999.