

인간형 로봇의 발 모듈 개발을 위한 분석적 방법의 6 축 힘 / 모멘트 센서 설계

Design of a Six-Axis Force/Moment Sensor using Analytical Method for Humanoid Robot Foot Module

원조¹, 임동환², 라로평², 한창수^{3,✉}
Chao Yuan¹, Dong Hwan Lim², Lu Ping Luo², and Chang Soo Han^{3,✉}

¹ 한양대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Hanyang University)

² 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang University)

³ 한양대학교 로봇공학과 (Department of Robot Engineering, Hanyang University)

✉ Corresponding author: cshan@hanyang.ac.kr, Tel: +82-31-400-5247

Manuscript received: 2014.12.12. / Revised: 2015.3.5. / Accepted: 2015.3.12.

The forces and moments exerted on humanoid robot foot are important information for controlling or monitoring the robot. Multi-axis force/moment sensor can be installed under humanoid robot foot to measure forces and moments. The sensor should have large stiffness to support the robot weight and small size not to disturb the motion of the robot. In this paper, we designed a 6-axis force/moment sensor which has good accuracy, large measuring range, and new compact structure. In addition, the proposed sensor is evaluated using analytical method and FEM(Finite Elements Method) method. Finally, it turned out that it has good performance.

KEYWORDS: Six-Axis force/Moment sensor (6 축 힘/모멘트 센서), Analytical method (분석적 방법), Foot sensor (발 센서), Humanoid robot (휴머노이드 로봇), Structural isotropy (구조 등방성)

1. 서론

인간형 로봇의 연구에서 보행을 위해 균형은 모든 다른 기능들보다 우선시 되는 연구이다. 이를 위해 로봇에 다양한 센서를 개발 하여 사용하고 있다. 그 중 대표적으로 다축 힘/모멘트 센서는 균형과 안정성을 유지시키기 위해 로봇의 발과 지면간에 반발력을 측정하는데 사용되고 지난 수십 년 동안 인간형 로봇 또는 보행 로봇 개발에 다양한 센서가 개발되었다.¹⁻⁷

힘/모멘트 센서를 개발하는 방법에는 크게 수치적 방법과 분석적 방법으로 나눌 수 있다. 먼저 수치적인 방법으로 진행한 Aiguo Song⁸는 손목형에 적합한 3자유도의 힘과 1자유도의 모멘트 측정이 가능한 힘/모멘트 센서를 설계하였다. 센서의 간섭을 분석하기 위해 FEM 방법을 사용하였으며 센서의 특징을 분석하기 위하여 캘리브레이션 실험을 진행하였다. Gab-Soon Kim^{9,10}는 로봇 핸드용 손목 센서와 인간형 로봇의 발에 사용하기 위한 6축 힘/모멘트 센서를 FEM방법과 하중실험을 통해 특성

을 분석하여 설계하였다. Qiaokang Liang¹¹은 크로스 빔에 기초하여 힘/모멘트를 측정하기 위한 E 타입에 새로운 장치를 제안하였고 FEM과 실험을 통해 설계하였다. Sarmad Shams¹²는 로봇을 위한 소형과 경량화 토크센서 개발을 FEM 방법으로 진행하였으며 개발된 센서는 실험으로 평가하였다.

앞서 언급한 논문의 연구자들은 힘/모멘트의 센서를 설계 및 평가 하기 위해 수치적 방법을 이용하고 센서의 성능을 분석하기 위해 실험을 진행하였다. 하지만 수치적 방법인 유한요소방법은 센서의 3D모델을 분석하기 위해 분석 시간이 오래 걸리고 원하는 결과를 위해 변수를 조금씩 변경하면서 재분석하여 연구를 다시 진행해야 되는 단점을 갖고 있다. 또한 수치적 방법의 경우 센서의 본질적인 특성을 분석할 수 없다는 단점을 갖고 있다. 그러나 분석적 방법은 설계 단계에서 센서를 모델링을 하여 센서의 구조 특성을 이해하면서 설계 할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 최적에 설계 변수를 찾는 데 용이 하는 장점을 갖고 있다. 이에 M.M. Svini and M.Uchiyama은 분석적 모델을 통해 힘/모멘트 센서를 개발하였다.^{13,14}

본 논문에서는 인간형 로봇의 발 개발에 적합한 힘/모멘트 센서를 설계하기 위해 크로스 빔 형태의 새로운 소형 센서 설계를 제안한다. 센서의 설계와 평가는 분석적 방법을 사용하여 진행하였다. 센서는 볼트로 연결되는 두 파트로 구성되어 센서의 감도를 향상 시킬 수 있도록 힘 성분을 분리하였다. 전체 구조는 장치에 설치되기 쉽도록 반경은 작고 얇다. 다축 힘/모멘트 센서의 정확한 구성을 위해 적용된 힘과 대응하는 응력과 변형률 간의 관계를 포함하는 모델을 확립하였다.

2. 힘/모멘트 센서의 구조

2.1 설계 센서의 구조

설계한 6축 힘/모멘트 센서는 Fig. 1과 같다.

센서는 Fig. 1과 같이 두 개의 파트로 구성된다. 상부파트의 크로스 빔은 수평축에 모멘트 (M_x , M_y)와 수직축의 힘 (F_z)을 감지하기 위해 사용되며, 하부파트의 크로스 빔은 수직 축에 모멘트 (M_z)와 수평축의 힘 (F_x , F_y)을 감지하는데 사용된다. 상부파트와 하부파트는 중앙 플랫폼에 볼트를 통해 연결되며 상부의 중앙 플랫폼에서는 상부파트에서 하부파트로 모멘트를 전달하기 위한 수직으로 구성된 빔이 있다.

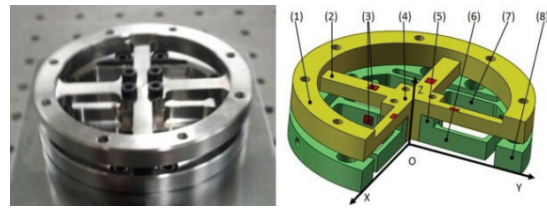


Fig. 1 Model of the six-axis force/moment sensor (1) Upper loop (2) Upper beam (3) Strain gage (4) Upper center block (5) Lower center block (6) Lower beam (7) Compliant beam (8) Lower loop

Table 1 Dimensions of the beams (mm)

	Length	Height	Width
Upper beam	15	2	5
Lower beam	11	4	2
Compliant beam	22	4	1

F_x , F_y , M_z 가 센서에 인가될 때, 하부파트는 상부파트를 지지하고 힘과 모멘트는 상부의 빔을 통과하여 하부의 빔으로 전달되며 이때 변형은 주로 하부의 빔에서 발생된다. M_x , M_y , F_z 가 센서에 인가될 때, 상부의 중심 파트의 지지 역할로 변형은 대개 상부의 빔에 발생된다.

빔의 치수는 표 1과 같으며 탄성체의 재료 특성은 스테인리스 17-4 PH H900 스틸을 사용하였다.

2.2 센서의 정격 힘과 모멘트

설계된 센서의 정격 힘과 모멘트는 다음과 같이 설계되었다.

$$F_x = F_y = 400 \text{ N}, F_z = 1000 \text{ N},$$

$$M_x = M_y = 20 \text{ Nm}, M_z = 10 \text{ Nm}$$

첫째, 로봇의 무게는 500N으로 선정하고 로봇 무게의 측정을 위해 $F_{xub,y} = 500\text{N} \times 2(\text{security rate}) = 1000\text{N}$ 으로 가정하였다.

둘째, 횡 방향으로 인가되는 힘 F_x 와 F_y 는 $F_x = F_y = 1000 \text{ N} \times 20\%$ (maximum horizontal ground reaction force) $\times 2$ (security rate) = 400 N 결정하였다.

셋째, 횡 방향 축에 대해 인가되는 모멘트는 $M_x = M_z = 1000 \text{ N} \times 10 \text{ mm}$ (maximum beam length) $\times 2$ (security rate) = 20 Nm 결정하였다. 마지막으로 수직 축에 대해 인가되는 모멘트 M_z 는 $M_z = 400 \text{ N} \times 10 \text{ mm}$ (maximum beam length) $\times 2.5$ (security rate) = 10 Nm 결정하였다.

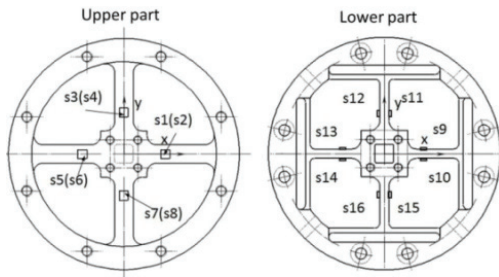


Fig. 2 Strain gages distribution on the elastic body

2.3 스트레인 게이지의 부착

센서에 힘/모멘트를 측정하기 위해 센서에 스트레인 게이지를 부착 해야 한다. Fig. 2는 탄성체에 스트레인 게이지가 부착된 배치를 보여준다. 그림에서 $s_i (i=1-n)$ 는 i 번째 스트레인 게이지를 의미한다. 탄성체의 상부와 하부에는 각각 8개의 스트레인 게이지가 있다.

3. 응력과 변형을 분석

용도에 따라 힘/모멘트 센서는 정적 및 동적 목적에 따라 분류 될 수 있다. 본 연구의 경우 센서에 인가되는 힘과 모멘트는 변화가 일어나지만 변화 하는 속도가 매우 작기 때문에 정적으로 간주하여 해석을 진행한다. 센서의 성능 분석을 위해 기준 좌표는 Fig. 1과 같이 하부 파트에 고정시킨다. 원점은 하부파트의 바닥면이 중심이다. X축은 빔의 길이 방향이고 Y축은 그 빔에 직교하는 길이 방향이다.

3.1 탄성체의 힘/모멘트 분포

외력에 의해 가해지는 힘/모멘트와 변형률의 관계를 알기 위해 각 빔에 힘과 모멘트의 분포를 결정해야 한다. 먼저 각각 빔의 x축과 y축은 B_x 와 B_y 로 정의한다.

a) F_x 또는 F_z 가 인가 될 때

평형상태(equilibrium)로부터 다음 식을 갖는다.

$$\begin{aligned} 2(F_{xubx} + F_{xuby}) - 2(F_{xlbx} + F_{xlby}) &= 0 \\ 2(F_{xubx} + F_{xuby}) &= 2(F_{xlbx} + F_{xlby}) = F_x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 F_{xubx} 와 F_{xuby} 는 각각 상부에 B_x 및 B_y 의 외측 말단에 가해진 x방향의 힘이다. F_{xlbx} 와 F_{xlby} 는 각각 하부에 B_x 및 B_y 의 외측 말단에 가해진 x방향의 힘이다. 이 경우 센서의 상부 B_x 의 강성

은 B_y 보다 매우 크다. 따라서 대부분의 힘은 B_x 에 지지된다.

따라서 다음 식을 가정할 수 있다.

$$F_{xubx} = \frac{F_x}{2}, \quad F_{xuby} = 0. \quad (2)$$

센서의 하부에서 빔의 강성은 B_y 보다 매우 작기 때문에 대부분의 힘은 B_y 에 지지 된다.

따라서 다음 식을 가정할 수 있다.

$$F_{xlbx} = 0, \quad F_{xlby} = \frac{F_x}{2}. \quad (3)$$

센서에 F_y 가 인가될 경우 앞에서와 동일한 분석 방법을 사용할 수 있다.

b) F_z 가 인가 될 때

평형상태로부터 다음 식을 갖는다.

$$\begin{aligned} 4F_{zu} - 4F_{zl} &= 0 \\ 4F_{zu} &= 4F_{zl} = F_z \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 F_{zu} 와 F_{zl} 는 각각 하부와 상부에 B_x 및 B_y 의 외측 말단에 인가한 z방향의 힘이다. 센서 구조의 대칭성으로부터 다음 식을 갖는다.

$$F_{zu} = \frac{F_z}{4}, \quad F_{zl} = \frac{F_z}{4}. \quad (5)$$

c) M_x 또는 M_y 가 인가될 때

평형상태로부터 다음 식을 갖는다.

$$\begin{aligned} 2(F_{zubx} \cdot l_u + T_{ubx}) - 2(F_{zlbx} \cdot l_l + T_{lbx}) &= 0 \\ 2(F_{zubx} \cdot l_u + T_{ubx}) &= 2(F_{zlbx} \cdot l_l + T_{lbx}) = M_x \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 F_{zubx} 와 F_{zlbx} 는 각각 하부파트와 상부파트에 B_y 의 외측 말단에 인가한 z방향의 힘이다. T_{ubx} 와 T_{lbx} 는 각각 하부파트와 상부파트에 B_x 의 외측 말단에 인가한 x축을 중심으로 한 모멘트이다.

이 경우 센서의 상부 B_y 의 강성은 B_x 보다 매우 크다. 왜냐하면 B_x 는 x축을 중심으로 작은 각도로 회전할 수 있다. 따라서 모멘트의 대부분은 B_y 에 지지되며 다음 식을 가정한다.

$$T_{ubx} = 0, \quad F_{zubx} = \frac{M_x}{2l_u}. \quad (7)$$

센서의 하부는 상부와 비슷하므로 다음 식을 가정한다.

$$T_{l_{bx}} = 0, \quad F_{z_{lby}} = \frac{M_x}{2l_l} \quad (8)$$

센서에 F_y 가 인가될 경우는 인가될 경우는 앞에서와 동일한 분석 방법을 사용할 수 있다.

d) M_z 에 인가될 때
평형상태로부터 다음 식을 갖는다.

$$\begin{aligned} 2(F_{x_{uby}} \cdot l_u + F_{y_{ubx}} \cdot l_u) - 2(F_{x_{lby}} \cdot l_l + F_{y_{lbx}} \cdot l_l) &= 0 \\ 2(F_{x_{uby}} \cdot l_u + F_{y_{ubx}} \cdot l_u) &= 2(F_{x_{lby}} \cdot l_l + F_{y_{lbx}} \cdot l_l) = M_z \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $F_{y_{ubx}}$ 와 $F_{y_{lbx}}$ 는 각각 하부와 상부에 B_x 의 외측 말단에 인가한 y방향의 힘이다. 센서 구조의 대칭성으로부터 다음 식을 갖는다.

$$F_{x_{uby}} = F_{y_{ubx}} = \frac{M_z}{4l_u}, \quad F_{x_{lby}} = F_{y_{lbx}} = \frac{M_z}{4l_l} \quad (10)$$

3.2 탄성체의 응력

i^{th} 의 스트레인 게이지의 위치를 p_i 로 정의한 다면 상이한 하중 조건하에서 모든 측정 위치의 응력을 계산 할 수 있다.

3.2.1 센서에 힘 F_x 가 인가될 경우

a) p_1, p_2, p_5, p_6 에서 응력 :

$$\sigma_x = \pm \frac{F_{x_{ubx}}}{h_u b_u} \quad (11)$$

여기서 h_u 와 b_u 는 각각 상부 빔의 세로와 가로 길이이다.

b) p_3, p_4, p_7, p_8 에서 응력 :

$$\tau_{yx} = \pm \frac{F_{x_{uby}} \cdot b_u^2}{2I_{u1} \cdot 4} \quad (12)$$

여기서 $I_{u1} = \frac{1}{12} h_u b_u^3$ 는 중심 축의 관성 모멘트 이다.

c) $p_9, p_{10}, p_{13}, p_{14}$ 에서 응력 :

$$\sigma_x = \pm \frac{F_{x_{lby}}}{h_l b_l} \quad (13)$$

여기서 h_l 와 b_l 는 각각 하부 빔의 세로와 가로의 길이이다.

d) $p_{11}, p_{12}, p_{15}, p_{16}$ 에서 응력 :

$$\sigma_y = \pm \frac{F_{x_{lby}}(l_l - |y|) \cdot b_l}{I_{l1} \cdot 2} \quad (14)$$

여기서 $I_{l1} = \frac{1}{12} h_l b_l^3$ 는 중심 축의 관성 모멘트 이다. 탄성체의 대칭성으로 F_y 에 대한 계산은 동일한 방법을 사용할 수 있다.

3.2.2 센서에 힘 F_z 가 인가될 경우

a) p_1, p_2, p_5, p_6 에서 응력 :

$$\sigma_x = \pm \frac{F_{z_{lu}}(l_u - |x|) \cdot h_u}{I_{u2} \cdot 2} \quad (15)$$

여기서 $I_{u2} = \frac{1}{12} b_u h_u^3$ 는 중심 축의 관성 모멘트 이다.

b) p_3, p_4, p_7, p_8 에서 응력 :

$$\sigma_y = \pm \frac{F_{z_{lu}}(l_u - |y|) \cdot h_u}{I_{u2} \cdot 2} \quad (16)$$

c) $p_9, p_{10}, p_{13}, p_{14}$ 에서 응력 :

$$\tau_{xz} = \pm \frac{F_{z_{lu}} \cdot h_l^2}{2I_{l2} \cdot 4} \quad (17)$$

여기서 $I_{l2} = \frac{1}{12} b_l h_l^3$ 는 중심 축의 관성 모멘트 이다.

d) $p_{11}, p_{12}, p_{15}, p_{16}$ 에서 응력 :

$$\tau_{xy} = \pm \frac{F_{z_{lu}} \cdot h_l^2}{2I_{l2} \cdot 4} \quad (18)$$

3.2.3 센서에 힘 M_x 가 인가될 경우

a) p_1, p_2, p_5, p_6 에서 응력 :

$$\tau_{xy} = \frac{T_{l_{bx}}}{W_{lu}} \quad (19)$$

여기서 $W_{lu} = \alpha h_u^2 b_u (b_u > h_u)$ 이고 α 는 b_u / h_u 에 따른 일정한 값 이다.

b) p_3, p_4, p_7, p_8 에서 응력 :

$$\sigma_x = \pm \frac{F_{z_{lby}}(l_u - |y|) \cdot h_u}{I_{u2} \cdot 2} \quad (20)$$

c) $p_9, p_{10}, p_{13}, p_{14}$ 에서 응력 :

$$\tau_{yz} = \frac{T_{l_{bx}}}{W_{ll}} \quad (21)$$

여기서 $W_{ll} = \alpha b_l^2 h_l (h_l > b_l)$ 이고 α 는 h_l / b_l 에 따른 일정한 값 이다.

Table 2 Strain at each measuring point

10^{-6}	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
p_1	$\epsilon_x = 0.213F_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = -1.754F_z$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = 233.8M_y$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_2	$\epsilon_x = 0.213F_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = 1.754F_z$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = -233.8M_y$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_3	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_y = 0.213F_y$	$\epsilon_y = -1.754F_z$	$\epsilon_y = -233.8M_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_4	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_y = 0.213F_y$	$\epsilon_y = 1.754F_z$	$\epsilon_y = 233.8M_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_5	$\epsilon_x = -0.213F_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = -1.754F_z$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = -233.8M_y$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_6	$\epsilon_x = -0.213F_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = 1.754F_z$	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_x = 233.8M_y$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_7	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_y = -0.213F_y$	$\epsilon_y = -1.754F_z$	$\epsilon_y = 233.8M_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_8	$\gamma_{xy} = 0$	$\epsilon_y = -0.213F_y$	$\epsilon_y = 1.754F_z$	$\epsilon_y = -233.8M_x$	$\gamma_{xy} = 0$	$\gamma_{xy} = 27.04M_z$
p_9	$\epsilon_x = 0$	$\epsilon_x = 6.696F_y$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{xz} = 0$	$\gamma_{xz} = 110.6M_y$	$\epsilon_x = 304M_z$
p_{10}	$\epsilon_x = 0$	$\epsilon_x = -6.696F_y$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{xz} = 0$	$\gamma_{xz} = 110.6M_y$	$\epsilon_x = -304M_z$
p_{11}	$\epsilon_y = 6.696F_x$	$\epsilon_y = 0$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{yz} = 110.6M_x$	$\gamma_{yz} = 0$	$\epsilon_x = -304M_z$
p_{12}	$\epsilon_y = -6.696F_x$	$\epsilon_y = 0$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{yz} = 110.6M_x$	$\gamma_{yz} = 0$	$\epsilon_x = 304M_z$
p_{13}	$\epsilon_x = 0$	$\epsilon_x = 6.696F_y$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{xz} = 0$	$\gamma_{xz} = 110.6M_y$	$\epsilon_x = -304M_z$
p_{14}	$\epsilon_x = 0$	$\epsilon_x = -6.696F_y$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{xz} = 0$	$\gamma_{xz} = 110.6M_y$	$\epsilon_x = 304M_z$
p_{15}	$\epsilon_y = 6.696F_x$	$\epsilon_y = 0$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{yz} = 110.6M_x$	$\gamma_{yz} = 0$	$\epsilon_x = 304M_z$
p_{16}	$\epsilon_y = -6.696F_x$	$\epsilon_y = 0$	$\gamma_{xz} = 0.608F_z$	$\gamma_{yz} = 110.6M_x$	$\gamma_{yz} = 0$	$\epsilon_y = -304M_z$

d) $p_{11}, p_{12}, p_{15}, p_{16}$ 에서 응력 :

$$\tau_{yz} = \pm \frac{F_{zby} \cdot h_l^2}{2I_{I_2} \cdot 4} \quad (22)$$

탄성체의 대칭성으로 M_y 에 대한 계산은 동일한 방법을 사용할 수 있다.

3.2.4 센서에 힘 M_z 가 인가될 경우

a) p_1, p_2, p_5, p_6 에서 응력 :

$$\tau_{yx} = \pm \frac{F_{ybx} \cdot b_u^2}{2I_{u1} \cdot 4} \quad (23)$$

b) p_3, p_4, p_7, p_8 에서 응력 :

$$\tau_{xy} = \pm \frac{F_{xby} \cdot b_u^2}{2I_{u1} \cdot 4} \quad (24)$$

c) $p_9, p_{10}, p_{13}, p_{14}$ 에서 응력 :

$$\sigma_x = \pm \frac{F_{ybx}(l_i - |x|) \cdot b_l}{I_{I_1} \cdot 2} \quad (25)$$

d) $p_{11}, p_{12}, p_{15}, p_{16}$ 에서 응력 :

$$\sigma_y = \pm \frac{F_{zby}(l_i - |y|) \cdot b_l}{I_{I_1} \cdot 2} \quad (26)$$

3.3 각 측정 위치에서의 변형률

다음 식은 응력과 변형률 사이의 관계이다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \gamma = \frac{\tau}{G} \quad (27)$$

여기서 E는 영률(Young's modulus)이고 G는 전단탄성계수(Shear modulus)이다. 3.2절과 센서의 구조의 대칭성의 관계를 사용하여 표 1의 값 $x_1 = x_9 = 0.004mm$ 로부터 표 2번과 같이 각각의 측정 위치의 변형률을 구할 수 있다.

측정 위치에 대한 응력은 모든 힘과 모멘트 구성 요소에 의해 유도된다. 따라서 스트레인 게이지를 부착 위치에 결합된 응력을 고려해야 한다. 설계에서 단일 격자 게이지를 사용했다. 그러므로 일반 변형률을 고려한다. 표 2로부터 다음과 같이 각각의 측정 위치에서 수직 변형률(normal strain)의 통합 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= (0.213F_x - 1.754F_z + 233.8M_y) \times 10^{-6} \\ \epsilon_2 &= (0.213F_x + 1.754F_z - 233.8M_y) \times 10^{-6} \\ \epsilon_3 &= (0.213F_y - 1.754F_z - 233.8M_x) \times 10^{-6} \\ \epsilon_4 &= (0.213F_y + 1.754F_z + 233.8M_x) \times 10^{-6} \\ \epsilon_5 &= (-0.213F_x - 1.754F_z - 233.8M_y) \times 10^{-6} \\ \epsilon_6 &= (-0.213F_x + 1.754F_z + 233.8M_y) \times 10^{-6} \\ \epsilon_7 &= (-0.213F_y - 1.754F_z + 233.8M_x) \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_8 &= (-0.213F_y + 1.754F_z - 233.8M_x) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_9 &= (6.696F_y + 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{10} &= (-6.696F_y - 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{11} &= (6.696F_x - 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{12} &= (-6.696F_x + 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{13} &= (6.696F_y - 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{14} &= (-6.696F_y + 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{15} &= (6.696F_x + 304M_z) \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{16} &= (-6.696F_x - 304M_z) \times 10^{-6} \end{aligned}$$

4. 평가

4.1 센서구조의 등방성(isotropy)

센서에 적용된 힘과 모멘트는 탄성 요소에 미리 정해진 지점에서 스트레인 게이지를 통해 평가된다. 힘 센서가 재료의 탄성 영역 내에서 유지할 경우, 내부 변형 및 외부 힘/모멘트 사이에 선형 관계에 있을 것이다.

$$\varepsilon = C_s F \tag{29}$$

여기서 $\varepsilon \in R^n$ n은 측정된 변형률로 구성된 벡터이다. $C_s \in R^{n \times 6}$ 은 변형률 컴플라이언스(compliance) 행렬이다. F는 센서에 인가된 힘/모멘트를 포함한 일반화 힘 벡터이다. 설계 단계에서 센서를 평가할 때, 정규화된 변형계수 행렬로 연산하는 것이 편리하다.

$$\overline{C}_s = N_{\varepsilon s}^{-1} C_s N_{f_s} \tag{30}$$

식(30)에서의 \overline{C}_s 행렬은 최대 변형률에 대하여 C_s 을 정규화함으로 구해진다.

$$N_{\varepsilon s} = \text{dia}\{\varepsilon_{1m}, \varepsilon_{nm}, \dots, \varepsilon_{nm}\} \tag{31}$$

식(31)에 $N_{\varepsilon s}$ 은 탄성소재의 선형변형 변위로 정의된다.

$$N_{f_s} = \text{diag}\{F_{xm}, F_{ym}, F_{zm}, M_{xm}, M_{ym}, M_{zm}\} \tag{32}$$

그리고 식(32)의 N_{f_s} 는 최대/정격 하중의 힘과 모멘트이다. 식(33)과 같이 \overline{C}_s 의 조건수(condition number)에 의해 센서의 등방성 구조를 평가할 수 있다.

$$\text{Con}(\overline{C}_s) = \sigma_{\max}(\overline{C}_s) / \sigma_{\min}(\overline{C}_s) \tag{33}$$

여기서 σ_{\max} 와 σ_{\min} 은 \overline{C}_s 의 가장 크고 작은 특이값이다. 이상적인 경우 $\text{Con}(\overline{C}_s) = 1$ 이다.

표 2의 값과 식(28)으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1m} &= \dots = \varepsilon_{8m} \\ &= (0.213F_{xm} + 1.754F_{zm} + 304M_{ym}) \times 10^{-6} \\ &= 7919.2 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_{9m} &= \dots = \varepsilon_{16m} \\ &= (6.696F_{xm} + 304M_{zm}) \times 10^{-6} \\ &= 5718.4 \times 10^{-6} \end{aligned} \tag{34}$$

그리고 식(28)과 식(29)로부터 C_s 을 구하고 식(30)으로부터 \overline{C}_s 행렬을 구할 수 있다.

$$\overline{C}_s = \begin{bmatrix} 108 & 0 & -2215 & 0 & 5905 & 0 \\ 108 & 0 & 2215 & 0 & -5905 & 0 \\ 0 & 108 & -2215 & -5905 & 0 & 0 \\ 0 & 108 & 2215 & 5905 & 0 & 0 \\ -108 & 0 & -2215 & 0 & -5905 & 0 \\ -108 & 0 & 2215 & 0 & 5905 & 0 \\ 0 & -108 & -2215 & 5905 & 0 & 0 \\ 0 & -108 & 2215 & -5905 & 0 & 0 \\ 0 & 4684 & 0 & 0 & 0 & 5316 \\ 0 & -4684 & 0 & 0 & 0 & -5316 \\ 4684 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5316 \\ -4684 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5316 \\ 0 & 4684 & 0 & 0 & 0 & -5316 \\ 0 & -4684 & 0 & 0 & 0 & 5316 \\ 4684 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5316 \\ -4684 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5316 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \tag{35}$$

그러므로

$$\text{Con}(\overline{C}_s) = \sigma_{\max}(\overline{C}_s) / \sigma_{\min}(\overline{C}_s) = 2.484 \tag{36}$$

본 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 소프트웨어 ANSYS를 사용하여 FEM 분석을 진행하였다. FEM 분석에 의해 나온 변형률 컴플라이언스 행렬을 다

음과 같다.

$$\overline{C}_s' = \begin{bmatrix} 0 & 7 & 2940 & 1 & 7049 & 2 \\ -1 & 7 & -2910 & 1 & -7049 & 2 \\ 6 & 0 & 2920 & -7071 & 0 & 2 \\ 7 & 0 & -2910 & 7079 & 1 & 2 \\ 1 & 7 & 2914 & 1 & -7075 & 2 \\ 1 & 7 & -2911 & 1 & 7078 & 2 \\ 6 & 1 & 2943 & 7048 & 1 & 2 \\ 7 & 1 & -2861 & -7128 & 1 & 2 \\ -13 & 3447 & 1365 & 92 & 338 & 4694 \\ -18 & -3197 & 1259 & 79 & 358 & -5089 \\ 3212 & -13 & 1260 & 359 & 73 & -5082 \\ -3543 & -19 & 1341 & 379 & 90 & 4628 \\ 18 & 3219 & 1264 & 74 & 356 & -5069 \\ 19 & -2399 & 1587 & 88 & 460 & 5447 \\ 3457 & 16 & 1360 & 385 & 81 & 4700 \\ -3293 & 13 & 1246 & 355 & 74 & -5021 \end{bmatrix} \times 10^{-4} \quad (37)$$

\overline{C}_s' 의 조건수는 2.2979로 분석적 방법을 이용한 값과 매우 유사함을 알 수 있다. 두 방법의 결과값은 1에 가깝게 나오므로 센서는 다소 좋은 등방성 구조를 갖는 센서를 의미한다.

4.2 센서의 민감도와 간섭 오차

오차를 줄이기 위한 스트레인 게이지의 식은 다음과 같다.

$$S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{Fx} \\ \varepsilon_{Fy} \\ \varepsilon_{Fz} \\ \varepsilon_{Mx} \\ \varepsilon_{My} \\ \varepsilon_{Mz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\varepsilon_{12} + \varepsilon_{15} \\ -\varepsilon_{10} + \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_6 - \varepsilon_7 \\ \varepsilon_4 - \varepsilon_8 \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_5 \\ \varepsilon_9 - \varepsilon_{11} + \varepsilon_{14} - \varepsilon_{16} \end{bmatrix} \quad (38)$$

그때, 다음과 같은 식을 갖는다.

$$S = CF = C[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T \quad (39)$$

여기서 C는 센서의 컴플라이언스 행렬이고 S는 변형률 벡터이다. 식(28)에 따라 다음과 같이 행렬 C를 계산할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} 13.392 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.392 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.426 & 0 & 467.6 & 0 & 0 \\ 0.426 & 0 & 0 & 0 & 467.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1216 \end{bmatrix} \quad (40)$$

FEM 해석 결과에 따라 컴플라이언스 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$C' = \begin{bmatrix} 11.487 & 0.0574 & 0.0017 & 0.0096 & -0.3304 & -0.105 \\ 0.064 & 11.3 & -0.0065 & -0.1796 & -0.0228 & 0.135 \\ -0.0177 & 0.021 & 7.298 & -0.2975 & -0.097 & -0.014 \\ -0.0001 & -0.0018 & 0.0002 & 446.9 & 0.0068 & -0.0063 \\ -0.0004 & -0.0005 & 0.0031 & 0.016 & 446.3 & 0.0006 \\ 0.2239 & 2.243 & -0.0042 & -19.815 & 20.291 & 1324.5 \end{bmatrix} \quad (41)$$

다음 같이 각 축 힘 / 모멘트 측정을 위해, 캘리브레이션 매트릭스를 도입하고 다른 다섯 개의 축 간섭으로 인한 최대 오차(크로스 감도)가 계산이 된다.¹⁵

$$\begin{aligned} e_r(F_x) &= \frac{|C_{12}| + |C_{13}| + |C_{14}| + |C_{15}| + |C_{16}|}{|C_{11}|} \\ e_r(F_y) &= \frac{|C_{21}| + |C_{23}| + |C_{24}| + |C_{25}| + |C_{26}|}{|C_{22}|} \\ e_r(F_z) &= \frac{|C_{31}| + |C_{32}| + |C_{34}| + |C_{35}| + |C_{36}|}{|C_{33}|} \\ e_r(M_x) &= \frac{|C_{41}| + |C_{42}| + |C_{43}| + |C_{45}| + |C_{46}|}{|C_{44}|} \\ e_r(M_y) &= \frac{|C_{51}| + |C_{52}| + |C_{53}| + |C_{54}| + |C_{56}|}{|C_{55}|} \\ e_r(M_z) &= \frac{|C_{61}| + |C_{62}| + |C_{63}| + |C_{64}| + |C_{65}|}{|C_{66}|} \end{aligned} \quad (42)$$

여기서 C_{mm} 는 m-행과 n-열인 컴플라이언스 행렬의 성분이다.

표 3과 같이, 다른 힘의 구성요소 대한 센서의 민감도 및 간섭오차는 분석적 방법 및 FEM 방법으로 부터 컴플라이언스 행렬을 구할 수 있다.

표 3에서와 같이 민감도 부분에서 분석적 방법과 FEM 방법 결과는 유사한 결과를 보인다. 그리

Table 3 Sensitivities and interference errors from analytical method and FEM method

Method	Sensitivity ($\mu\epsilon/N$)		Maximum interference error ($\mu\epsilon/N$)	
	Analytical	FEM	Analytical	FEM
F_x	13.392	11.487	0	0.044
F_y	13.392	11.3	0	0.036
F_z	7.016	7.298	0	0.061
M_x	467.6	446.9	0.911e-3	3.4e-5
M_y	467.6	446.9	0.911e-3	4.6e-5
M_z	1216	1324.5	0	0.032

고 간섭 오차 부분에서 확인되는 두 방법 사이에 오차는 분석적 방법에서 전단 응력(shear stress) 영향을 무시하였기 때문에 생기는 결과이다. 하지만 본 연구에서 제안한 응용분야에서는 그 영향력을 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적합한 센서를 설계하였다.

5. 결론

본 연구에서는 인간형 발 개발에 필요한 소형이며 넓은 측정 범위를 갖는 6축 힘/모멘트 센서를 설계하였다. 센서의 메커니즘은 크로스 빔 형태인 새로운 메커니즘을 제시하였다. 센서의 설계 방식은 분석적 방법을 사용하여 센서의 본질적 특성을 이해하면서 설계를 진행하였다. 그 결과 센서의 두께는 12mm이며 센서의 반경은 매우 작은 센서로 설계하였다.

본 센서는 직렬 구성요소가 잘 분리 되어 민감도 영향을 주지 않고 F_x, F_y, M_z 또는 M_x, M_y, F_z 의 민감도를 독립적으로 조정하여 설계 할 수 있었다. 분석적 결과로 설계된 센서의 등방성, 감도, 간섭오차를 평가하기 위해 분석적 방법과 FEM방법을 사용하여 비교 분석하였다. 설계된 센서는 FEM과 비교한 결과 좋은 등방성을 가지며, 응용분야에 적합한 민감도와 간섭오차를 갖는 센서로 평가되었다. 결론적으로 분석적 설계 방법을 이용한 센서는 제안한 응용분야에서 편리한 방식으로 볼 수 있다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업핵심기술개발사업의 연구결과로

수행되었음 (No. 10041827, 고속 실시간 제어를 위한 20KHz급 제어주기 및 이식성을 가지는 유연구조의 개방형 소프트웨어 로봇 제어기 기술개발).

REFERENCE

- Sardain, P. and Bessonnet, G., "Gait Analysis of a Human Walker Wearing Robot Feet as Shoes," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2285-2292, 2001.
- Nishiwaki, K., Murakami, Y., Kagami, S., Kuniyoshi, Y., Inaba, M., et al., "A Six-Axis Force Sensor with Parallel Support Mechanism to Measure the Ground Reaction Force of Humanoid Robot," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2277-2282, 2002.
- Morris, S. J. and Paradiso, J. A., "Shoe-Integrated Sensor System for Wireless Gait Analysis and Real-Time Feedback," Proc. of the 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference, Vol. 3, pp. 2468-2469, 2002.
- Yuan, C., Wang, W., Han, C., and Choi, H., "A Three Degree of Freedom Force/Torque Sensor to Measure Foot Forces," Proc. of the 12th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2028-2032, 2012.
- Shams, S., Kim, D. S., Choi, Y. S., and Han, C. S., "A Novel 3-DOF Optical Force Sensor for Wearable Robotic Arm," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 12, No. 4, pp. 623-628, 2011.
- Kim, I.-M., Kim, H.-S., and Song, J.-B., "Design of Joint Torque Sensor with Reduced Torque Ripple for a Robot Manipulator," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 10, pp. 1773-1779, 2012.
- Lee, S.-H., Kim, Y.-L., and Song, J.-B., "Torque Sensor Calibration using Virtual Load for a Manipulator," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 11, No. 2, pp. 219-225, 2010.
- Song, A., Wu, J., Qin, G., and Huang, W., "A Novel Self-Decoupled Four Degree-of-Freedom Wrist Force/Torque Sensor," Measurement, Vol. 40, No. 9, pp. 883-891, 2007.
- Kim, G.-S., "Design of a Six-Axis Wrist Force/Moment Sensor using FEM and Its Fabrication

- for an Intelligent Robot,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, No. 1, pp. 27-34, 2007.
10. Kim, G.-S., Shin, H.-J., and Yoon, J., “Development of 6-axis force/moment sensor for a Humanoid Robot’s Intelligent Foot,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 141, No. 2, pp. 276-281, 2008.
 11. Liang, Q., Zhang, D., Song, Q., Ge, Y., Cao, H., et al., “Design and Fabrication of a Six-Dimensional Wrist Force/Torque Sensor based on E-Type Membranes Compared to Cross Beams,” *Measurement*, Vol. 43, No. 10, pp. 1702-1719, 2010.
 12. Shams, S., Lee, J. Y., and Han, C., “Compact and Lightweight Optical Torque Sensor for Robots with Increased Range,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 173, No. 1, pp. 81-89, 2012.
 13. Svinin, M. M. and Uchiyama, M., “Analytical models for Designing Force Sensors,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1778-1783, 1994.
 14. Svinin, M. M. and Uchiyama, M., “Optimal Geometric Structures of force/torque sensors,” *The International journal of Robotics Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 560-573, 1995.
 15. Yuan, C., Luo, L.-P., Shin, K.-S., and Han, C.-S., “Design and Analysis of a 6-DOF Force/Torque Sensor for Human Gait Analysis,” *Proc. of the 13th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1788-1793, 2013.