

## 인간형 로봇을 위한 6축 힘/모멘트센서 개발

김갑순<sup>†</sup> · 신희준

### Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot

Gab-Soon Kim<sup>†</sup> and Hyi-Jun Shin

#### Abstract

This paper describes the development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot. In order to walk on uneven terrain safely, the robot's foot should perceive the applied forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  and moments  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  to itself, and be controlled by the foot using the forces and moments. Also, in order to grasp unknown object safely, the robot's hand should perceive the weight of the object using the mounted 6-axis force/moment sensor to its wrist, and be controlled by the hand using the forces and moments. Therefore, 6-axis force/moment sensor should be necessary for a humanoid robot's hand and foot.

In this paper, 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot was developed using many PPBs (parallel plate-beams). The structure of the sensor was newly modeled, and the sensing element of the sensor was designed using theoretical analysis. Then, 6-axis force/moment sensor was fabricated by attaching strain-gages on the sensing elements, and the characteristic test of the developed sensor was carried out. The rated outputs from theoretical analysis agree well with the results from the experiments.

**Key Words :** 6-axis force/moment sensor, interference error, rated output, rated load, humanoid robot.

#### 1. 서 론

인간은 인간을 대신하여 일을 할 수 있는 인간과 비슷한 로봇(humanoid robot)을 만들기를 원하고 있다. 인간형 로봇이 인간과 비슷한 기능을 갖기 위해서는 인간이 가지고 있는 여러 가지의 기능을 가지고 있어야 한다. 이 많은 기능 중에서, 미지물체를 안전하게 잡고<sup>[1-3]</sup> 밀거나 당기는 정도를 감지하는 것과 안전하게 걷는<sup>[4-6]</sup> 기능도 매우 중요하다. 미지물체를 안전하게 잡기 위해서는 물체의 무게를 측정하고 무게에 따라 잡는 힘을 결정하며, 그 잡는 힘을 제어하여야 한다. 이때 물체의 무게는 인간형 로봇의 손목에서 3개 방향의 힘( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )을 측정하고, 이 값들을 이용하여 계산되어야 한다. 그리고 물체를 밀거나 당기는 정도를 감지하는 것은 3개 방향의 힘( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )과 3개 방향의 모멘트( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )를 감지하여 계산할 수 있다. 따라서

미지물체를 안전하게 잡고 밀거나 당기는 정도를 감지하기 위해서는 인간형 로봇에 힘  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 와 모멘트  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ 를 동시에 감지할 수 있는 6축 힘/모멘트 센서가 부착되어야 한다. 인간형 로봇이 불규칙한 지면에서 안전하게 걷기 위해서는 로봇의 발에 가해지는 힘과 모멘트들을 감지하여 몸체의 무게중심이 몸의 중심부근에 올 수 있도록 제어해야 한다. 그러기 위해서는 인간형 로봇의 발목에 힘  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 와 모멘트  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ 를 동시에 감지할 수 있는 6축 힘/모멘트센서가 부착되어야 한다. 인간형 로봇의 손목과 발목에 부착하기 위한 6축 힘/모멘트센서는 센서의 크기가 로봇에 부착하기 적당해야 하며, 상호간섭오차<sup>[7,8]</sup>가 작아야 한다. 지금까지 개발한 다축 힘/모멘트센서<sup>[7-9]</sup>는 로봇의 발목에 부착하기에 적합하지 않은 크기를 가지고 있을 뿐만 아니라 정격용량이 맞지 않아 인간형 로봇의 발에는 사용할 수 없다. 따라서 인간형 로봇의 발을 위해 새로운 구조를 가진 6축 힘/모멘트센서의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 인간형 로봇의 손목과 발목에 부착할 수 있는 새로운 구조의 6축 힘/모멘트센서(정격하중:  $F_x$

경상대학교 제어계측공학과, ERI (Gyeongsang National University)

<sup>†</sup>Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr

(Received : March 7, 2007, Accepted : May 8, 2007)

센서=Fy 센서=Fz 센서=200 N, Mx 센서=My 센서=Mz 센서=5 Nm, 정적출력: 모든 센서 0.5 mV/V)를 개발하였다. 이 센서를 개발하기 위하여, 여러 개의 평행평판보를 이용하여 새로운 구조를 모델링하였고, 이론해석식을 유도하였으며, 이식을 이용하여 센서를 설계하였다. 그리고 스트레인이게이지를 부착하여 6축 힘/모멘트센서를 제작하였으며, 개발된 6축 힘/모멘트센서의 특성실험을 실시하였다.

## 2. 6축 힘/모멘트센서의 이론식

### 2.1. 감지부의 구조

본 연구에서는 인간형 로봇의 손목과 발목을 위한 6축 힘/모멘트센서를 제작하기 위하여 새로운 구조를 모델링하였다. Fig. 1은 6축 힘/모멘트센서의 감지부 구조를 나타내고 있다. 이 센서는 힘/모멘트 전달블록(force/moment transmitting block), 고정블록 F1~4(fixing block F1~4), 이동블록 M1~4(moving block M1~4), 평행평판보 PPB1~16(parallel plate-beam PPB1~16)으로 구성된다. 센서의 구조는 중앙의 힘/모멘트 전달블록을 중심으로 십자형으로 수평과 수직으로 연결된 평행평판보(PPB1~4, PPB13~16)가 형성되며, 그 끝에는 수직인 평행평판보(PPB5~12) 각각 두개가 일직선으로 연결된 이동블록(M1~4)과 연결되어 있다. 그리고 평행평판보(PPB5~12)의 끝은 4개의 고정블록(F1~4)과 조합되어 한 몸체로 형성된다. 힘과 모멘트들을 감지하는

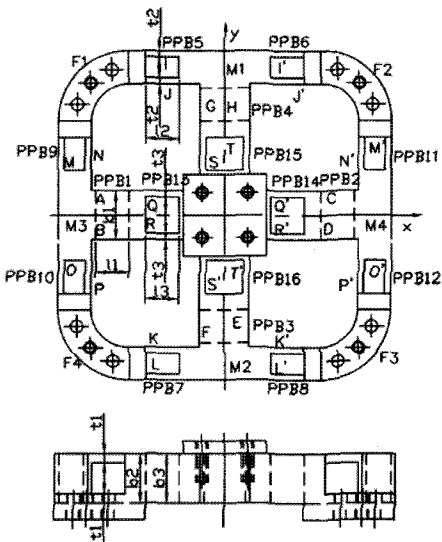


그림 1. 6축 힘/모멘트센서의 구조

Fig. 1. Structure of sensing element for 6-axis force/moment sensor.

감지부는 평행평판보(PPB1~4, PPB13~16)이고, PPB1과 PPB2는 모멘트 My, PPB3과 PPB4는 힘 Fz와 모멘트 Mx, PPB13과 PPB14는 힘 Fy와 모멘트 Mz, PPB15와 PPB16은 힘Fx를 각각 감지한다. 평행평판보 PPB1~4를 구성하는 보들의 크기는 폭b<sub>1</sub>, 두께t<sub>1</sub>, 길이l<sub>1</sub>이고, 평행평판보 PPB5~12를 구성하는 보들의 크기는 폭b<sub>2</sub>, 두께t<sub>2</sub>, 길이l<sub>2</sub>이며, 평행평판보 PPB13~16를 구성하는 보들의 크기는 폭b<sub>3</sub>, 두께t<sub>3</sub>, 길이l<sub>3</sub>이다. 센서의 설계를 위한 변수는 평행평판보의 폭b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, 두께t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub>, 길이l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub>, l<sub>3</sub>와 각 평행평판보를 구성하는 두보 사이의 거리이고, 이 변수들의 크기를 결정하기 위해 각 보들의 변형률식을 유도해야 한다.

### 2.2. 이론식

#### 2.2.1. 힘Fy(Fx)가 가해졌을 때

Fig. 2는 힘 Fy가 가해질 때 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 이론해석식은 모델링한 구조가 좌우 및 상하 대칭형이므로 힘 Fy를 감지하는 평행평판보들의 변형률 이론식을 유도하고, 그 식을 힘 Fx를 감지하는 평행평판보들의 변형률 이론식에도 적용한다. 힘 Fy를 힘/모멘트 전달블록에 가하면, 힘/모멘

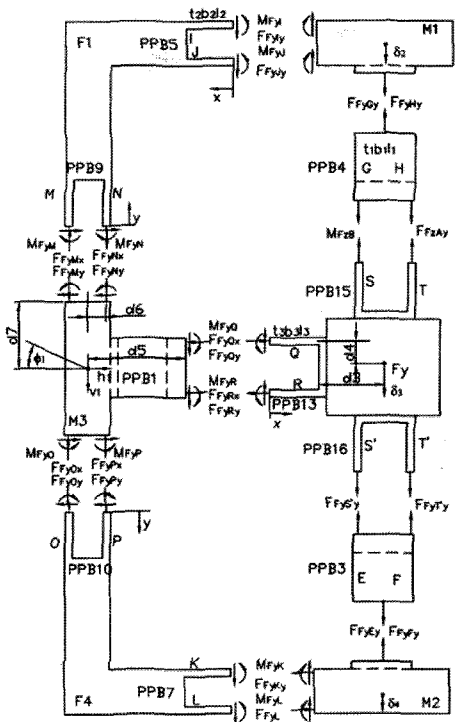


그림 2. 힘 Fy(Fx)가 가해질때의 감지부의 형상도

Fig. 2. Free body diagram of the PPBs under force Fy (or Fx).

트 전달블록, 이동블록 M1과 M2는 각각  $\delta_3$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_4$ 의 수직처짐이 발생하고, 이동블록 M3는 회전각  $\phi_1$ , 수직 및 수평처짐  $u_1$ 이 각각 발생한다.

힘/모멘트 전달블록과 이동블록 M3의 힘과 모멘트 평형조건식  $\Sigma F_x=0$ ,  $\Sigma F_y=0$ ,  $\Sigma M=0$ 에 의해 각각 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다<sup>7-9)</sup>.

$$4F_{FySy} + 4F_{FyQy} = Fy \quad (1)$$

$$-F_{FyMx} - F_{FyNx} + F_{FyOx} + F_{FyPx} + F_{FyRx} - F_{FyQx} = 0 \quad (2)$$

$$F_{FyNy} + F_{FyPy} - F_{FyMy} - F_{FyOy} - F_{FyQy} - F_{FyRy} = 0 \quad (3)$$

$$M_{FyM} + M_{FyN} + M_{FyO} + M_{FyP} - M_{FyQ} - M_{FyR} + d_7(F_{FyMx} + F_{FyNx}) + d_7(F_{FyOx} + F_{FyPx}) + d_5(F_{FyQx} + F_{FyRx}) + d_6(F_{FyMy} + F_{FyNy}) + d_6(F_{FyOy} + F_{FyPy}) + d_4(F_{FyQx} + F_{FyRx}) = 0 \quad (4)$$

위의 식 (1)~(4)에 각각의 평판보에 가해지는 힘들과 모멘트들을 구하여 대입하여 정리하면 식 (5)~(7)을 얻을 수 있다.

$$k_{11}\delta_3 + k_{12}u_1 + k_{13}\phi_1 = Fy/4 \quad (5)$$

$$k_{14}\delta_3 + k_{15}u_1 + k_{16}\phi_1 = 0 \quad (6)$$

$$k_{17}\delta_3 + k_{18}u_1 + k_{19}\phi_1 = 0 \quad (7)$$

식 (5)~(7)의 상수  $k_{11}$ ~ $k_{19}$ 들은 다음과 같다.

$$k_{11} = \frac{1}{\left(\frac{l_3}{A_2E} + \frac{l_1}{A_1E} + \frac{l_2^2}{24EI_2}\right)} + \frac{12EI_3}{l_3^3}, k_{12} = -\frac{12EI_3}{l_3^2}$$

$$k_{14} = -\frac{12EI_3}{l_3^2}, k_{15} = \frac{4A_2E}{l_2} + \frac{12EI_3}{l_3^2}, k_{16} = \frac{12EI_3}{l_3^2}\left(d_5 + \frac{l_3}{2}\right)$$

$$k_{17} = \frac{12EI_3}{l_3^2}\left(d_5 + \frac{l_3}{2}\right), k_{18} = \frac{12EI_3}{l_3^2}\left(d_5 + \frac{l_3}{2}\right)$$

$$k_{19} = \frac{48EI_2}{l_2^3}\left(d_7^2 + d_7l_2 + \frac{l_2^2}{3}\right) + \frac{24EI_2}{l_3^3}\left(d_5^2 + d_5l_3 + \frac{l_3^2}{3}\right) + \frac{4A_2Ed_6^2}{l_2} + \frac{2A_3Ed_4^2}{l_3}$$

위의 식 (5)~(7)을 연립하여 풀면, 힘전달블록의 처짐  $\delta_3$ , 이동블록의 회전각  $\phi_1$ , 이동블록의 수직처짐  $u_1$ 를 구하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\delta_3 = \frac{k_{15}u_1 - k_{16}\phi_1}{k_{14}} \quad (8)$$

$$\frac{k_{14}(Fy/4)}{(k_{13}k_{14} - k_{11}k_{16})(k_{15}k_{17} - k_{14}k_{18}) - (k_{16}k_{17} - k_{14}k_{19})(k_{12}k_{14} - k_{11}k_{13})} \quad (9)$$

$$u_1 = \frac{(k_{16}k_{17} - k_{14}k_{19})}{(k_{15}k_{17} - k_{14}k_{18})} \phi_1 \quad (10)$$

힘Fy를 감지하기 위한 스트레인게이지를 부착하는 평행평판보 Q와 R의 윗면과 아랫면의 변형률을 해석하는 식은 굽힘 변형률식과 인장 혹은 압축 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{FyQ} = -\varepsilon_{FyR} = \frac{12I_3}{z_3I_3^2} \left[ \left( \delta_3 - u_1 - \left( d_5 + \frac{l_3}{2} \right) \phi_1 \right) x - \left( \frac{\delta_3}{2} - \frac{u_1}{2} - \left( \frac{d_5}{2} + \frac{l_3}{3} \right) \phi_1 \right) l_3 \right] - \frac{d_4}{l_3} \phi_1 \quad (11)$$

여기서, E는 센서감지부의 종탄성계수,  $z_3 = b_3t_3^3$ 는 극관성 모멘트,  $I_2 = b_2t_2^3/12$ 는 평행평판보 PPB5~12를 구성하는 보들의 단면 2차모멘트,  $\delta_2$ 는 이동블록 M1의 수직처짐,  $A_1 = t_1b_1$ 는 평행평판보 PPB1~4를 구성하는 보들의 단면적,  $A_3 = t_3b_3$ 는 평행평판보 PPB13~16를 구성하는 보들의 단면적,  $I = b_3t_3^3/12$ 는 평행평판보 PPB13~16를 구성하는 보들의 단면 2차모멘트,  $u_1$ 은 이동블록 M3의 수직처짐,  $d_5$ 는 이동블록 M3와 평행평판보 PPB13 사이의 거리,  $\phi_1$ 은 이동블록 M3의 회전각,  $h_1$ 은 이동블록 M3의 수평처짐,  $d_4$ 는 힘/모멘트 전달블록의 중심점으로부터 보Q의 두께  $t_3$ 의 중심선까지의 거리,  $A_2 = t_2b_2$ 는 평행평판보 PPB5~12를 구성하는 보들의 단면적,  $d_6$ 은 이동블록 M3와 보N의 두께  $t_2$ 의 중심선까지의 거리,  $d_7$ 은 이동블록 M3의 높이 방향으로 1/2크기이다.

### 2.2.2. 힘 Fz가 가해졌을 때

Fig. 3은 힘 Fz/4가 가해질 때 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 힘 Fz/4를 힘/모멘트 전달블록에 가하면, 힘/모멘트 전달블록의 수직처짐  $\delta_3$ 가 발생하고, 이동블록 M3는 회전각  $\phi_3$ , 수직 및 수평처짐  $u_3$ 이 각각 발생한다.

힘/모멘트 전달블록과 이동블록 M3의 힘과 모멘트 평형조건식  $\Sigma F_x=0$ ,  $\Sigma F_z=0$ ,  $\Sigma M=0$ 에 의해 각각 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$F_{FzAz} = F_{FzBz} = \frac{Fz}{8} \quad (12)$$

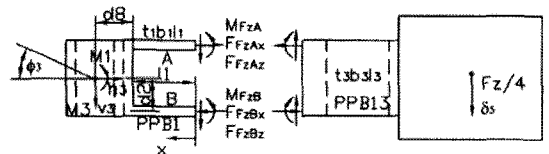


그림 3. 힘 Fz/4가 가해질때의 감지부의 형상도  
Fig. 3. Free body diagram of the PPBs under force Fz/4.

$$F_{FzAx} - F_{FzBx} = 0 \tag{13}$$

$$2d_2 F_{FzAx} + 2d_8 F_{FzAz} + 2M_{FzA} - M_1 = 0 \tag{14}$$

위의 식 (12)~(14)에 각각의 평판보에 가해지는 힘들과 모멘트들을 구하여 대입하여 정리하면 식 (15)~(17)을 얻을 수 있다.

$$k_{31}\delta_4 + k_{32}v_3 + k_{33}\phi_3 = 0 \tag{15}$$

$$k_{34}\delta_4 + k_{35}v_3 + k_{36}\phi_3 = F_z/8 \tag{16}$$

$$k_{37}\delta_4 + k_{38}v_3 + k_{39}\phi_3 = 0 \tag{17}$$

식 (15)~(17)의 상수  $k_{31} \sim k_{39}$ 들은 다음과 같다.

$$k_{31} = \frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} + \frac{12EI_1}{l_1^2}, \quad k_{32} = \frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} + \frac{12EI_1}{l_1^2},$$

$$k_{33} = \frac{2A_1 E d_2 d_8}{l_1} - \frac{24I_1 d_8}{l_1^2} \left( d_8 + \frac{l_1}{2} \right) - \frac{24I_1 d_8}{l_1^2} \left( \frac{d_8}{2} + \frac{l_1}{3} \right) - \frac{2GI_{p2}}{l_2}$$

$$k_{34} = \frac{12EI_1}{l_1^2}, \quad k_{35} = -\frac{12EI_1}{l_1^2}, \quad k_{36} = -\frac{24I_1 d_8}{l_1^2} \left( d_8 + \frac{l_1}{2} \right)$$

$$k_{37} = \frac{12EI_1}{l_1^2}, \quad k_{38} = -\frac{12EI_1}{l_1^2} - \frac{4Et_2 b_2^3}{l_2^2}, \quad k_{39} = -\frac{24EI_1}{l_1^2} \left( d_8 + \frac{l_1}{2} \right)$$

위의 식 (15)~(17)을 연립하여 풀면, 힘전달블록의 처짐  $\delta_4$ , 이동블록의 회전각  $\phi_3$ , 이동블록의 수직처짐  $v_3$ 를 구하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\delta_4 = \frac{(F_z/8)k_{33}k_{313}}{k_{310}k_{313} - k_{312}k_{311}} \tag{18}$$

$$v_3 = -\frac{k_{312}}{k_{313}} \delta_4 \tag{19}$$

$$\phi_3 = \frac{k_{31}}{k_{33}} \delta_4 - \frac{k_{32}}{k_{33}} v_3 \tag{20}$$

여기서,  $k_{310} = k_{34}k_{33} - k_{31}k_{36}$ ,  $k_{311} = k_{35}k_{33} - k_{32}k_{36}$ ,  $k_{312} = k_{31}k_{39} - k_{37}k_{33}$ ,  $k_{313} = k_{32}k_{39} - k_{38}k_{33}$ 이다.

힘  $F_z$ 를 감지하기 위한 스트레인게이지를 부착하는 평행평판보 A와 B의 윗면과 아랫면의 변형률을 해석하는 식은 굽힘 변형률식과 인장 혹은 압축 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\epsilon_{FzA} = -\epsilon_{FzB} = \frac{12I_1}{Z_p l_1^2} \left[ \left( \delta_4 - v_3 - \left( d_8 + \frac{l_1}{2} \right) \phi_3 \right) x - \left( \frac{\delta_4}{2} - \frac{v_3}{2} - \left( \frac{d_8}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \phi_3 \right) l_1 \right] \frac{d_3}{l_1} \phi_3 \tag{21}$$

여기서,  $z_1 = b_1 l_1^3/6$ 는 극관성 모멘트,  $I = b_1 l_1^3/12$ 은 평행평판보 PPB1~4를 구성하는 보들의 단면 2차모멘트,  $d_8$ 는 이동블록 M3의 중심선으로부터 평행평판보

PPB1의 보들의 좌측 끝단까지의 거리,  $d_2$ 는 이동블록 M3의 중심선으로부터 보B의 두께  $t_1$ 의 중심선까지의 거리이고,  $M_1 = 2GI_{p2}\phi/l_2^2$ 은 평행평판보 9와 10에 의한 모멘트,  $I_{p2} = (2t_2 b_2^3/12 + b_2[(2d_6 + t_2)^3 - (2d_6 + t_2)^3]/12)$ 는 평행평판보 9와 10의 극단면 2차 모멘트이다.

2.2.3. 모멘트  $My(Mx)$ 가 가해졌을 때

Fig. 4는 모멘트  $My/2$ 가 가해질 때 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 모멘트  $My/2$ 를 힘/모멘트 전달블록에 가하면, 힘/모멘트 전달블록의 회전각  $\theta_4$ 가 발생하고, 이동블록 M3는 회전각  $\phi_4$ , 수직처짐  $v_4$ 가 각각 발생한다.

힘/모멘트 전달블록과 이동블록 M3의 힘과 모멘트 평형조건식  $\Sigma F_z = 0$ ,  $\Sigma M = 0$ 에 의해 각각 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$-2d_8 F_{MyAz} + 2M_{MyA} + 2d_2 M_{MyAx} - M_2 = 0 \tag{22}$$

$$2M_{MyAx} + 2d_1 F_{MyAz} + 2d_1 F_{MyAx} + M_3 = My/2 \tag{23}$$

$$2F_{MyAz} = \frac{4Et_2 b_2^3 v_4}{l_2^2} \tag{24}$$

식 (22)~(24)에 각각의 평판보에 가해지는 힘과 모멘트식들을 구하여 대입하면 다음과 같이 된다.

$$k_{41}\theta_4 + k_{42}v_4 + k_{43}\phi_4 = 0 \tag{25}$$

$$k_{44}\theta_4 + k_{45}v_4 + k_{46}\phi_4 = My/2 \tag{26}$$

$$k_{47}\theta_4 + k_{42}v_4 + k_{49}\phi_4 = 0 \tag{27}$$

식 (25)~(27)의 상수  $k_{41} \sim k_{49}$ 들은 다음과 같다.

$$k_{41} = \frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} \left( d_1 + \frac{l_1}{2} \right) + \frac{24EI_1}{l_1^2} \left( \frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) + \frac{1A_1 E d_2^2}{l_1},$$

$$k_{42} = \frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} - \frac{24EI_1}{l_1^2},$$

$$k_{43} = -\frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} + \frac{24EI_1 d_8}{l_1^2} + \frac{2A_1 E t_2^2}{l_1} - \frac{2GI_{p2}}{l_2}$$

$$k_{44} = \frac{24EI_1}{l_1^2} \left( \frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) + \frac{24EI_1 d_1}{l_1^2} \left( d_1 + \frac{l_1}{2} \right) + \frac{2A_1 E d_2^2}{l_1} - \frac{2G}{\left( \frac{l_1}{I_{p31}} + \frac{l_3}{I_{p33}} \right)}$$

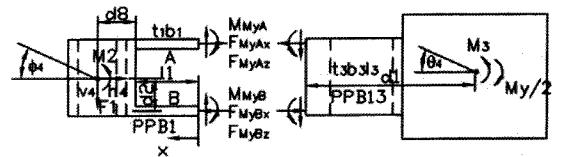


그림 4. 모멘트  $My/2(Mx/2)$ 가 가해질때의 감지부의 형상도  
Fig. 4. Free body diagram of PPBs under moment  $My/2$  (or  $Mx/2$ ).

$$k_{45} = \frac{24EI_1d_1}{l_1^3} - \frac{24EI_1}{l_1^2}, k_{46} = -\frac{24EI_1d_8d_1}{l_1^3} + \frac{24EI_1d_8}{l_1^2} - \frac{2A_1Ed_1^2}{l_1}$$

$$k_{47} = \frac{24EI_1}{l_1^3} \left( d_1 + \frac{l_1}{2} \right), k_{48} = -\frac{24EI_1}{l_1^3} - \frac{4Et_2b_2^3}{l_2^3}, k_{49} = \frac{24EI_1d_8}{l_1^3}$$

여기서,  $k_{410}=k_{44}k_{43}-k_{41}k_{46}$ ,  $k_{411}=k_{45}k_{43}-k_{42}k_{46}$ ,  $k_{412}=k_{41}k_{49}-k_{47}k_{43}$ ,  $k_{413}=k_{42}k_{49}-k_{48}k_{43}$ 이다.

위의 식 (25)~(27)를 연립하여 풀면, 힘전달블록의 회전각  $\theta_4$ , 이동블록의 회전각  $\phi_4$ , 이동블록의 수직처짐  $u_4$ 를 구하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\theta_4 = \frac{(My/2)k_{43}k_{413}}{k_{410}k_{413}-k_{412}k_{411}} \quad (28)$$

$$u_4 = \frac{k_{412}}{k_{413}} \theta_4 \quad (29)$$

$$\phi_4 = -\frac{k_{47}}{k_{49}} \theta_4 - \frac{k_{48}}{k_{49}} u_4 \quad (30)$$

모멘트 My를 감지하기 위한 스트레인게이지를 부착하는 평행평판보 A와 B의 윗면과 아랫면의 변형률을 해석하는 식은 굽힘 변형률식과 인장 혹은 압축 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\varepsilon_{MyA} = -\varepsilon_{MyB} = \frac{12I_1}{z_{p1}l_1^3} \left[ \left( \left( d_1 + \frac{l_1}{2} \right) \theta_4 - u_4 + d_8 \phi_3 \right) x - \left( \left( \frac{d_1}{2} + \frac{l_1}{3} \right) \theta_4 - \frac{u_4}{2} + \frac{d_8}{2} \phi_3 \right) l_1 \right] - \frac{d_2}{l_1} (\theta_4 - \phi_4) \quad (31)$$

여기서,  $d_1$ 은 힘전달블록의 수직중심선에서 평행평판

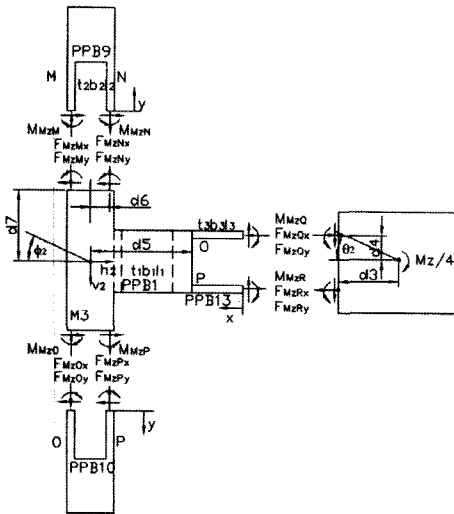


그림 5. 모멘트 Mz/4가 가해질때의 감지부의 형상도  
Fig. 5. Free body diagram of the PPBs under moment Mz/4.

보 PPB13의 끝지점까지의 거리,  $M_2 = (dGI_{p2\phi}/l_2^2)$ 는 평행평판보 9와 10에 의한 모멘트,  $I_{p2} = 2t_2b_2^3/12 + b_2[(2d_6+t_2)^3 - (2d_6-t_2)^3]$ 는 평행평판보 9와 10의 극단면 2차 모멘트,  $M_3 = 2G\theta_4(l_1/I_{p31} + l_3/I_{p33})$ 는 평행평판보 3, 4, 15, 16에 의한 모멘트,  $I_{p31} = 2t_1b_1^3/12 + b_1[(2d_2+t_1)^3 - (2d_2-t_1)^3]/12$ 와  $I_{p33} = 2t_3b_3^3/12 + b_3[(2d_4+t_3)^3 - (2d_4-t_3)^3]/12$ 는 평행평판보 3, 4와 15, 16의 극단면 2차 모멘트이다.

2.2.4. 모멘트Mz가 가해졌을 때

Fig. 5는 모멘트 Mz/4가 가해질 때 평행평판보에 작용되는 힘과 모멘트를 나타내고 있다. 모멘트Mz/4를 힘/모멘트 전달블록에 가하면, 힘/모멘트 전달블록의 회전각  $\theta_2$ 가 발생하고, 이동블록 M3는 회전각  $\phi_2$ , 수직처짐  $u_2$ 가 각각 발생한다.

힘/모멘트 전달블록과 이동블록 M3의 힘과 모멘트 평형조건식  $\Sigma Fx=0, \Sigma Fy=0, \Sigma M=0$ 에 의해 각각 다음과 같은 식들을 유도할 수 있다.

$$-F_{MzMx} - F_{Mzmx} + F_{MzPx} + F_{MzQx} - F_{MzRx} = 0 \quad (32)$$

$$2d_4F_{MzQx} + 2d_3F_{MzQy} + 2M_{MzQ} = Mz/4 \quad (33)$$

$$2F_{MzNy} - F_{MzMy} + 2F_{MzOy} = 0 \quad (34)$$

$$4M_{MyN} - 2M_{MzQ} + 4d_7F_{MzMx} + 2d_6(F_{MzNy} + F_{MzNy}) + 2d_5F_{MzQy} - 2d_4F_{MzQx} = 0 \quad (35)$$

위의 식 (32)~(35)에 각각의 평판보에 가해지는 힘과 모멘트 식들을 구하여 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$k_{21}\theta_2 + k_{22}u_2 + k_{23}\phi_2 = Mz/4 \quad (36)$$

$$k_{24}\theta_2 + k_{25}u_2 + k_{26}\phi_2 = 0 \quad (37)$$

$$k_{27}\theta_2 + k_{28}u_2 + k_{29}\phi_2 = 0 \quad (38)$$

식 (36)~(38)의 상수  $k_{21} \sim k_{29}$ 들은 다음과 같다.

$$k_{21} = \frac{24EI_3d_8}{l_3^3} \left( d_3 + \frac{l_3}{2} \right) + \frac{24EI_3}{l_3^3} \left( \frac{d_3}{2} + \frac{l_3}{3} \right) + \frac{2A_3Ed_3^2}{l_3}$$

$$k_{22} = -\frac{24EI_3d_3}{l_3^3} - \frac{24EI_3}{l_3^3}$$

$$k_{23} = -\frac{24EI_3d_3d_5}{l_3^3} + \frac{24EI_3d_5}{l_3^3} + \frac{2A_3Ed_3^2}{l_3}$$

$$k_{24} = \frac{24EI_3}{l_3^3} \left( d_3 + \frac{l_3}{2} \right), k_{25} = -\frac{24EI_3}{l_3^3} - \frac{4A_2E}{l_2}$$

$$k_{26} = \frac{24EI_3d_5}{l_3^3}, k_{27} = \frac{24EI_3d_5}{l_3^3} \left( d_3 + \frac{l_3}{2} \right) - \frac{24EI_3}{l_3^3} \left( \frac{d_3}{2} + \frac{l_3}{2} \right),$$

$$k_{28} = -\frac{24EI_3d_3}{l_3^3} - \frac{12EI_3}{l_3^3}$$

$$k_{29} = \frac{48EI_2d_7}{l_2^3} \left( d_7 + \frac{l_2}{2} \right) + \frac{48EI_2}{l_2^3} \left( \frac{d_7}{2} + \frac{l_2}{3} \right) - \frac{12EI_3d_5}{l_3^3} + \frac{4A_2Ed_5}{l_2} + \frac{24EI_3d_5^2}{l_3^3} + \frac{4A_3Ed_4}{l_3}$$

여기서,  $k_{210}=k_{21}k_{26}-k_{24}k_{23}$ ,  $k_{211}=k_{22}k_{26}-k_{25}k_{23}$ ,  $k_{212}=k_{27}k_{29}-k_{27}k_{26}$ ,  $k_{213}=k_{25}k_{29}-k_{28}k_{26}$ 이다.

위의 식 (36)~(38)를 연립하여 풀면, 힘전달블록의 회전각  $\theta_2$ , 이동블록 M3의 회전각  $\phi_2$ , 이동블록의 수직치침  $u_2$ 를 구하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\theta_2 = \frac{(Mz/4)k_{26}k_{213}}{k_{210}k_{213}-k_{212}k_{211}} \quad (39)$$

$$u_2 = \frac{k_{212}}{k_{213}} \theta_2 \quad (40)$$

$$\phi_2 = -\frac{k_{27}}{k_{29}} \theta_2 - \frac{k_{28}}{k_{29}} u_2 \quad (41)$$

모멘트  $Mz$ 를 감지하기 위한 스트레인게이지를 부착하는 평행평판보 Q와 R의 윗면과 아랫면의 변형률을 해석하는 식은 굽힘 변형률식과 인장 혹은 압축 변형률식을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{MzQ} = -\varepsilon_{MzR} = & \frac{12I_3}{z_{p3}l_3^3} \left[ \left( \left( d_3 + \frac{l_3}{2} \right) \theta_2 - u_2 + d_5 \phi_2 \right) x \right. \\ & \left. - \left( \left( \frac{d_3}{2} + \frac{l_3}{3} \right) \theta_2 - \frac{u_2}{2} + \frac{d_5}{2} \phi_2 \right) l_3 \right] - \frac{d_4}{l_3} (\theta_2 - \phi_2) \end{aligned} \quad (42)$$

여기서,  $d_6$ 은 이동블록 M3의 수직중심선부터 보N의 두께  $t_2$ 의 중심선까지의 거리,  $d_7$ 은 이동블록 M3의 수직방향으로 1/2크기,  $d_3$ 은 힘/모멘트 전달블록의 1/2 크기,  $d_4$ 는 힘/모멘트 전달블록의 수평중심선에서 보Q의 두께  $t_3$ 의 중심선까지의 거리,  $d_5$ 는 이동블록 M3의 수직중심선부터 평행평판보 PPB1 끝점까지의 거리이다.

### 3. 6축 힘/모멘트센서의 설계

본 논문에서 모델링된 6축 힘/모멘트센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격출력, 정격하중, 평행평판보 PPB1~4를 구성하는 보들의 크기는 폭 $b_1$ , 두께 $t_1$ , 길이 $l_1$ , 평행평판보 PPB5~12를 구성하는 보들의 크기는 폭 $b_2$ , 두께 $t_2$ , 길이 $l_2$ , 평행평판보 PPB13~16를 구성하는 보들의 크기는 폭 $b_3$ , 두께 $t_2$ , 길이 $l_3$ , 센서의 설계를 위한 변수는 평행평판보의 폭 $b_1, b_2, b_3$ , 두께 $t_1, t_2, t_3$ , 길이 $l_1, l_2, l_3$ 이며,  $d_1$ 은 힘전달블록의 수직중심선에서 평행평판보 PPB1의 우측 끝 지점까지의 거리,  $d_2$ 는 이동블록 M3의 중심선으로부터 보B의 두께 $t_1$ 의 중심

선까지의 거리,  $d_3$ 은 힘/모멘트 전달블록 중심으로부터 PPB13의 우측 끝 지점까지의 거리,  $d_4$ 는 힘/모멘트 전달블록의 중심점으로부터 보Q의 두께 $t_3$ 의 중심선까지의 거리,  $d_5$ 는 이동블록 M3와 평행평판보 PPB13 사이의 거리,  $d_6$ 은 이동블록 M3와 보N의 두께 $t_2$ 의 중심선까지의 거리,  $d_7$ 은 이동블록 M3의 높이방향으로 1/2크기,  $d_8$ 은 이동블록 M3의 중심선으로부터 평행평판보 PPB1의 보들의 좌측 끝단까지의 거리이다.

각 센서는 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격변형률은 정격하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다<sup>17-9)</sup>.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (43)$$

여기서,  $\varepsilon$ 은 휘스톤브리지의 총 변형률,  $\varepsilon_{T1}$ 은 인장 스트레인게이지  $T_1$ 의 변형률,  $\varepsilon_{C1}$ 은 압축 스트레인게이지  $C_1$ 의 변형률,  $\varepsilon_{T2}$ 은 인장 스트레인게이지  $T_2$ 의 변형률,  $\varepsilon_{C2}$ 은 압축 스트레인게이지  $C_2$ 의 변형률이다.

정격출력은 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다<sup>17-9)</sup>.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} K \varepsilon \quad (44)$$

여기서,  $E_i$ 는 휘스톤브리지의 입력전압,  $E_o$ 는 휘스톤브리지의 출력전압,  $K$ 는 스트레인게이지의 상수(약 2.03),  $\varepsilon$ 는 식 (43)으로부터 얻은 총 변형률이다.

6축 힘/모멘트센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 6축 힘/모멘트센서의 정격하중은 힘  $F_x, F_y, F_z$ 센서가 모두 200 N, 모멘트  $M_x, M_y, M_z$ 센서가 모두 5 Nm이고, 센서의 사각형상의 크기와 높이가 각각 80 mm×80 mm, 19 mm, 힘/모멘트 전달블록의 사각크기가 20 mm, 스트레인게이지의 부착위치 길이 방향으로는 1 mm, 폭 방향으로는 1/2, 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률은 약 250  $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 그리고 센서의  $d_1=23$  mm,  $d_2=5.5$  mm,  $d_3=11$  mm,  $d_4=5.35$  mm,  $d_5=17$  mm,  $d_6=3.5$  mm,  $d_7=11$  mm,  $d_8=5$  mm이다. 6축 힘/모멘트센서의 각 감지부는 식 (11), (21), (31), (42)에 결정된 설계변수들을 입력하여 감지부의 크기를 결정하였다. 센서의 크기는 평행평판의 길이 $l_1, l_2, l_3$ 를 모두 8 mm, 폭 $b_1, b_2, b_3$ 을 모두 12 mm로 결정하였고, 두께 $t_1, t_2, t_3$ 는 각각 1.3 mm, 1.0 mm, 1.3 mm이었다.

### 4. 이론해석결과 및 고찰

Fig. 6은 6축 힘/모멘트센서의 스트레인게이지 부착

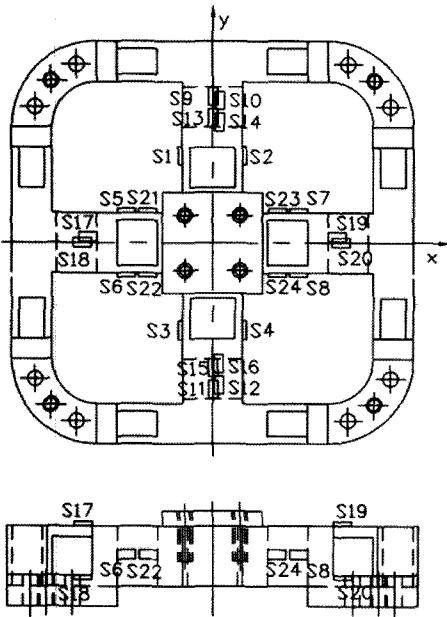


그림 6. 각 센서의 스트레인게이지 부착위치  
Fig. 6. Attachment location of strain-gages for each sensor.

위치를 나타내고 있다. Fx센서의 부착위치는 S1~S4, Fy센서는 S5~S8, Fz센서는 S9~S12, Mx센서는 S13~S16, My센서는 S17~S20, Mz센서는 S21~S24이다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 길이방향으로는 힘/모멘트 전달블록으로부터 3 mm 혹은 5 mm이고, 폭 방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0%이고, 최대의 정격출력이 발생하는 지점으로 결정되었다.

Table 1은 이론해석식을 이용하여 각 센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 식 (43)에 의해 계산된 정격

표 1. 6축 힘/모멘트센서의 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률

Table 1. Strains in the attachment location of strain-gages for each sensor of 6-axis force/moment sensor

Sensor	Strain $\mu\text{m}/\text{m}$				
	$T_1$	$C_1$	$T_2$	$C_2$	$\epsilon$
Fx	258	-258	258	-258	1032
Fy	258	-258	258	-258	1032
Fz	247	-247	247	-247	988
Mx	262	-262	262	-262	1048
My	262	-262	262	-262	1048
Mz	266	-266	266	-266	1064

변형률들을 나타내고 있다. 모든 센서들의 변형률은 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  이상이었으며, 오차는 11.2% 이하이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1 mm 단위로 나타내었기 때문이다. 단위를 0.01 mm 단위로 설계하면 매우 근접한 변형률을 얻을 수 있으나 본 연구에서 모델링한 6축 힘/모멘트센서 구조의 복잡성 때문에 0.01 mm 단위로 가공할 수 없기 때문이다.

### 5. 센서제작 및 특성실험결과와 고찰

6축 힘/모멘트센서는 각 센서 감지부의 스트레인게이지 부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 37.2 mm)를 부착하고 휘스톤브리지<sup>[5-11]</sup>를 구성하여 제작하였으며, 제작된 6축 힘/모멘트센서의 사진을 Fig. 7에 각각 보이고 있다. Fig. 8은 제작한 6축 힘/모멘트센서의 특성실험을 위한 실험장치를 나타내고 있으며, 사용된 다축 힘/모멘트센서 교정기<sup>[10]</sup>는

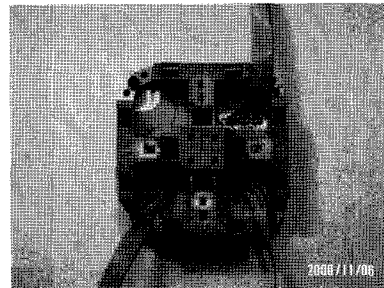


그림 7. 제작된 6축 힘/모멘트센서의 사진  
Fig. 7. Photograph of developed 6-axis force/moment sensor.

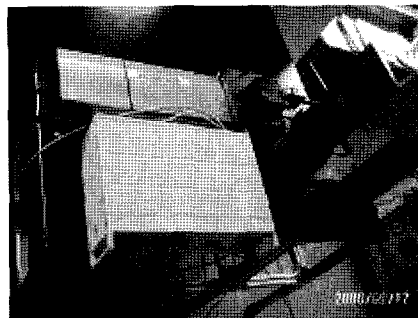


그림 8. 개발된 6축 힘/모멘트센서의 실험장치  
Fig. 8. Experimental set up for developed 6-axis force/moment sensor.

표 2. 6축 힘/모멘트센서의 이론해석 및 특성실험의 정격 출력

Table 2. Rated output theory analysis and characteristic test of each sensor of 6-axis force/moment sensor

Sensor	Rated output (mV/V)		
	Theory	Exp.	Error (%)
Fx	0.513	0.498	-4.9
Fy	0.513	0.501	-6.7
Fz	0.542	0.520	6.0
Mx	0.535	0.519	-1.9
My	0.535	0.496	-4.0
Mz	0.564	0.524	-0.6

힘 Fx, Fy, Fz를 모두 2000 N, 모멘트 Mx, My, Mz를 모두 500 Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며,  $1 \times 10^{-4}$ 의 상대확장불확도를 가지고 있다. 6축 힘/모멘트센서에 정격하중  $F_x=F_y=F_z=200$  N과 모멘트  $M_x=M_y=M_z=5$  Nm를 가하고 정격출력을 측정하였다. 실험은 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

Table 2는 6축 힘/모멘트센서의 이론해석과 실험 결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 이론해석 결과의 정격출력은 Table 1의 정격변형률  $\epsilon$ 을 식 (44)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력(mV/V)은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. 이론해석결과를 기준으로 실험 결과의 오차는 7.3%이었다. 그러므로 이론해석식을 이용하여 본 연구에서 모델링한 6축 힘/모멘트센서를 설계할 수 있을 것으로 판단된다. Table 3은 6축 힘/모멘트센서의 각 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 상호간섭오차는 Fx센서가 2.61%, Fy센서가 1.86%, Fz센서가 0.69%, Mx센서가 2.66%, My센서가 2.51%, Mz센서가 2.09%이었다. 따라서 개발한 6축 힘/모멘트센서의 최대 상호간섭오차는 2.66%이다. 상호간섭오차는 센서의 가공오차, 스

표 3. 6축 힘/모멘트센서의 상호간섭오차

Table 3. Interference error of each sensor of 6-axis force/moment sensor

Sensor F/M	Interference error (%)					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Fx=200N	-	0.84	0.43	0.49	-2.51	2.09
Fy=200N	0.09	-	0.36	2.66	0.61	-0.36
Fz=200N	1.01	0.31	-	-1.14	1.27	0.57
Mx=5Nm	-0.16	1.86	-0.29	-	-0.23	-0.93
My=5Nm	1.26	-0.66	0.45	0.38	-	0.87
Mz=5Nm	-2.61	1.91	0.69	0.89	0.71	-

트레인게이지의 부착오차, 이론해석오차 등에 의한 것으로 생각된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 인간형 로봇의 손목과 발목을 위한 6축 힘/모멘트센서를 개발하였다. 제작한 6축 힘/모멘트센서의 최대 상호간섭오차가 유도한 변형률식에 의해 0%이고, 특성실험결과와 상호간섭오차가 2.66%이므로 유도한 이론식(11), (21), (31), (42)는 모델링한 6축 힘/모멘트센서의 감지부를 설계하는데 사용될 수 있음을 확인하였다. 개발한 센서는 최대 상호간섭오차가 선진국에서 이미 판매하고 있는 산업용 6축 힘/모멘트센서<sup>[11]</sup>의 그것과 비슷한 수준이고, 크기가 80 mm × 80 mm, 높이가 19 mm이므로 인간형 로봇의 손목과 발목에 부착하여 사용하기가 적합한 것으로 사료된다. 추후 연구에서는 개발한 6축 힘/모멘트센서를 인간형 로봇의 손목과 발목에 적용할 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10468-0).

## 참고 문헌

- [1] J. A. Domnguez-Lpez, R. I. Damper, R. M. Crowder, and C. J. Harris, "Adaptive neurofuzzy control of a robotic gripper with on-line machine learning", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, Issues 2-3, pp. 93-110, 2004.
- [2] J. Zhang, and B. Rssler, "Self-valuing learning and generalization with application invisually guided grasping of complex objects", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 47, Issues 2-3, pp. 117-127, 2004.
- [3] J. J. Steil, F. Rthling, R. Haschke, and H. Ritter, "Situated robot learning for multi-modal instruction and imitation of grasping", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 47, Issues 2-3, pp. 129-141, 2004.
- [4] H. Hirukawa, F. Kanehiro, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, Y. Kawai, F. Tomita, S. Hirai, K. Tanie, and T. Isozumi, "Humanoid robotics platforms developed in HRP", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 165-175, 2004.



- [5] S. Kagami, M. Mochimaru, Y. Ehara, N. Miyata, K. Nishiwaki, T. Kanade, and H. Inoue, "Measurement and comparison of humanoid H7 walking with human being", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, no. 4, pp.177-187, 2004.
- [6] Y. Ogura, S. Ando, H. O. Lim and A. Takaniishi, "Sensory-based walking motion instruction for biped humanoid robot", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 223-230, 2004.
- [7] G. S. Kim and H. D. Lee, "Development of a six-axis force/moment sensor and its control system for an intelligent robot's gripper", *Measurement Science and Technology*, vol. 14, pp. 1265-1274, 2003.
- [8] G. S. Kim and J. J. Park, "Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot's gripper", *Sensors and Actuators A*, vol. 118, pp. 127-134, 2005.
- [9] 김갑순, "로봇의 지능형 손을 위한 3축 손가락 힘센서 개발", *센서학회지*, 제15권, 제6호, pp. 411-416, 2006.
- [10] G. S. Kim., H. J. Shin, and H. M. Kim, "Development of multi-axis force/moment sensor calibration system and its uncertainty evaluation", *The Korean Society of Mechanical Engineers Proceedings*, pp. 1025-1030, 2006.
- [11] ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, "Multi-axis force/torque sensor", *ATI INDUSTRIAL AUTOMATION*, pp. 4-45. 2005.



김 갑 순

- 1990년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (자동화시스템전공)(학공석사)
- 1999년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (자동화시스템전공)(학공박사)
- 1990년 2월~2000년 2월 한국표준과학연구원 선임연구원
- 1996년 독일연방물리청 객원연구원
- 2003년 7월~2004년 7월 일본쓰쿠바대학교 지능로봇연구실 교환교수
- 2000년 3월~현재 경상대학교 제어계측공학과 부교수
- 주관심분야 : 로봇용 다축힘/모멘트센서, 지능로봇, 지능시스템



신 희 준

- 2006년 경상대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업(공학사)
- 2006년~현재 경상대학교 공과대학 제어계측공학과 석사과정재학
- 주관심분야 : 지능로봇, 로봇용 다축힘/모멘트센서