

스트레인게이지 응용 6축 힘-토크 센서의 신호처리와 성능

Signal Processing and Performance of a Six-Axis Force-Torque Sensor Using Strain Gauges

이 재 호, 강 철 구
(Jae-Ho Yi and Chul Goo Kang)

Abstract : The importance of sensing the force and torque with arbitrary direction and magnitude is becoming more crucial for robotic applications and manufacturing automations. Recently, several designs of a multi-axis force-torque sensor have been tried to sense this force and torque. This paper deals mainly with the signal processing of a six-axis force-torque sensor using cross-shaped elastic structures with circular holes. In this paper, we show the principle of sensing force and torque, the signal processing methodology and efficient methods of seeking strain gage positions in the sensor structure. The validity of the proposed method is shown via experiments.

Keywords : force-torque sensor, signal processing, strain gage, Wheatstone bridge

I. 서론

다축 힘-토크 센서는 로켓발사장치대의 제어에서부터 산업용로봇이나 작은 의료용 로봇의 힘제어에 이르기까지 그 필요성이 널리 인식되고 있다. 산업용 로봇의 힘제어, 특히 로봇 말단장치의 힘제어는 가공물 혹은 피조립물의 보호나 로봇자체의 보호를 위해 필수적이고, 로봇이 좀더 인간의 감각에 가까워 질 수 있도록 할 수 있다. 그런데 이러한 힘제어를 위해서는 힘을 측정할 수 있는 6축 힘/토크 센서가 필요하다. 보통 힘센서를 로봇 손목에 장착하는 방식을 많이 사용하고 있는데, 이 경우에 센서 자체의 동역학적 영향을 작게 받도록 하기 위하여, 센서의 정확성을 유지하는 범위 내에서 센서를 소형화하여야 한다. 현재, 정도와 가격 면에서 스트레인게이지를 이용한 6축 힘/토크 센서가 많은 관심의 대상이 되고 있다.

스트레인게이지를 이용한 6축 힘/토크 센서는 적당한 탄성 구조물에 스트레인게이지를 부착하여 탄성 구조물의 변형률을 측정하고, 이로부터 힘을 계산해낸다. 탄성구조물의 변형률은 작은 범위 내에서 가해진 힘에 비례한다고 볼 수 있다.

1990년대에 들어와서 힘/토크 센서의 체계적인 설계 방법들이 제시되었다.

Uchiyama et al.[1]은 컴플라이언스 행렬(compliance matrix)의 상태수(condition number)를 힘·토크 센서의 성능지수로 사용할 것을 제안하였고, Nakamura et al.[2]은 상태수 대신에 스트레인게이지 감도(strain gauge sensitivity), 힘감도(force sensitivity)와 최소강성도(minimum stiffness)를 성능지수로 사용할 것을 제안다. Bicchi[3]는 컴플라이언스 행렬의 상태수를 정방행렬이 아닌 경우로 확장하여 성능지수로 사용할 것을 제시하였다.

강철구[4]는 힘감지 시에 오차가 어떻게 전파되는지를 연구하였고, 김주용 등[5]은 원구멍이 있는 십자형 탄성체를 가진 힘/토크 센서에 대하여 연구하였다.

센서의 크기를 작게 하고, 좋은 성능을 얻기 위해서는 센서의 탄성 구조물뿐만 아니라 신호처리부가 중요하다. 상용화된 JR3 힘/토크 센서, ATI 힘/토크 센서들은 내부 구조물의 복잡성과 제조 공정의 어려움으로 인해 고가이나 본 논문에서 제안된 구조물과 신호처리 방법을 택하면 가공의 용이성과 제작시간의 단축으로 저가의 힘/토크 센서의 제작이 본래의 성능을 잃지 않고 가능하다.

본 논문에서는 스트레인게이지를 이용한 6축 힘-토크 센서에 대하여, 측정원리, 원구멍이 있는 십자형 탄성구조물 상의 스트레인게이지 취부 방법, 온도보상이 가능한 적절한 반브리지(half-bridge) 형태의 Wheatstone 브리지 구성 방법, 신호처리 부분을 제시하고, 실험을 통하여 제시된 방법을 검증하고자 한다.

II. 스트레인게이지를 이용한 힘/토크의 측정

스트레인게이지를 이용한 6축 힘/토크 센서의 힘/토크 감지 과정을 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

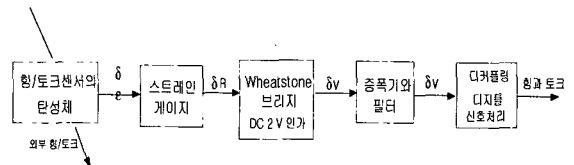


그림 1. 힘/토크 감지 과정.

Fig. 1. Force/torque sensing process.

이때 변형률은 Hooke의 법칙을 만족시키는 탄성영역에서 일어난다고 가정하면 힘/토크와 변형률의 관계는 다음과 같은 선형적인 관계를 갖는다.

$$\hat{\epsilon} = \hat{C} \hat{f} \quad (1)$$

접수일자 : 2000. 5. 29., 수정완료 : 2000. 11. 21.

이재호 : 대한검사기술 부설연구소(djacho@orgio.net)

강철구 : 건국대학교 기계공학과(cgkang@konkuk.ac.kr)

※ 본 연구는 한국학술진흥재단의 1998년 과학기술기초 중점 연구 지원사업(과제번호: 1998-018- E00106)에 의하여 연구되었습니다.

여기서 $\hat{\epsilon}$ 은 측정된 $m \times 1$ 변형률 벡터이고, \hat{f} 은 센서의 중심에 작용하는 측정된 $n \times 1$ 힘·토크 벡터(또는 힘 벡터)로서, 6축 힘/토크 센서의 경우에는 세 방향의 힘과 세 방향의 모멘트로 구성되어 있다. \hat{C} 은 컴플라이언스 (compliance) 행렬 또는 보정행렬 (calibration matrix) 로 불려지는 측정된 $m \times n$ 행렬이다. 벡터 \hat{f} 에는 힘과 모멘트가 함께 포함되어 있어서, 사용하는 단위에 따라 \hat{C} 행렬의 성질이 변할 수 있다. 이러한 불편함을 없애기 위하여, 벡터 \hat{f} 과 $\hat{\epsilon}$ 을 정방행렬 N_f 와 N_ϵ 로 다음과 같이 정규화한다.

$$\hat{f} = N_f f, N_f = \text{diag}\{f_{1M}, f_{2M}, \dots, f_{nM}\} \quad (2)$$

$$\hat{\epsilon} = N_\epsilon \epsilon, N_\epsilon = \text{diag}\{\epsilon_{1M}, \epsilon_{2M}, \dots, \epsilon_{mM}\} \quad (3)$$

그러면 정규화된 변형률과 외력 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\epsilon = C f \quad (4)$$

여기서 C 는 정규화된 컴플라이언스 행렬로서 다음과 같이 주어진다.

$$C = N_\epsilon^{-1} \hat{C} N_f \quad (5)$$

이 컴플라이언스 행렬을 안다면 측정된 변형률로부터 원하는 힘과 토크는 정규방정식(normal equation)을 이용하여 다음과 같이 구할 수가 있다. 자세한 유도과정은 참고 문헌 [5]를 참고하기 바란다.

$$f = C^+ \epsilon \quad (6)$$

여기서 $C^+ = (C^T C)^{-1} C^T$ 로서 좌의사역행렬(left pseudo-inverse)이라고 한다. 이 C^+ 는 특이치분해로부터 정의되는 Moore-Penrose 역행렬의 특수한 형태이다.

III. 6축 힘-토크 센서의 탄성 구조물

스트레인게이지를 이용한 6축 힘-토크 센서는 어떤 탄성구조물의 변형률을 측정함으로써 힘/토크를 알아낸다. 이상적인 탄성구조물은 x, y, z 축 중의 한 방향으로 힘 또는 토크가 주어질 때, 각각 한 곳에서만 변형률이 일어나서, 축간의 커플링이 없는 것이다. 하지만 그러한 구조물은 불가능하거나, 근사적으로 가능하다 할지라도 가공이 까다롭거나 구조적으로 응력집중 같은 취약한 부분을 가지게 된다.

따라서 구조적으로 디커플링된 탄성구조물을 설계하는 대신에 커플링이 크지 않도록(즉, 컴플라이언스행렬의 상태수가 아주 커지지 않도록) 탄성구조물을 설계한 뒤 컴플라이언스 행렬과 고속 디지털 연산을 통하여 디커플된 힘과 토크를 얻을 수 있다. 이러한 논리에서 제작된 그림 2와 같은 원구멍이 있는 십자형 탄성 구조물을 본 논문에서 사용한다. 이 구조는 단면적의 급격한 변화가 없으므로 균열이 발생할 가능성이 적으며 변형률의 변화가 완만하여 안정성이 우수하다. 또한 병렬평판구조의 가공에서는 방전가공이나 와이어커팅을 이용해야 하는 반면 원구멍 구

조는 이에 비해 가공이 쉬운 잇점이 있다.

원구멍이 있는 십자형 탄성 구조물의 표면 변형률을 알아보기 위하여, 재료의 기계적 성질을 바탕으로 상용 프로그램인 P3/PATRAN을 이용하여 힘과 모멘트가 가해졌을 때의 변형률을 구하였다. 그 중에서 y 방향으로 -100 N씩의 힘(즉, $F_y = -200$ N)을 가했을 때, P3/PATRAN의 결과를 확대하여 그리면 그림 3과 같다. 이 결과에 기초하여 표면 변형률이 최대가 되는 지점을 스트레인게이지의 취부 위치로 잡는다.

힘-토크 센서의 탄성구조물을 설계하고, 스트레인게이지를 탄성구조물 상에 배치할 때, 변형률 오차 뿐 아니라 컴플라이언스행렬의 오차가 힘감지 오차에 미치는 영향(오차 전파)이 작도록 주의를 기울여야 한다. 한 가지 방법으로서 컴플라이언스행렬이 대각행렬에 가깝도록 변형률 측정위치를 잡아주면 된다. 즉 컴플라이언스행렬의 대각요소와 그 주위의 값들이 크고, 대각 요소에서 먼 값들의 크기가 작아지도록 구조물을 설계하고 스트레인게이지를 배치하면 오차 전파가 작아진다는 견지에서 유리하다.

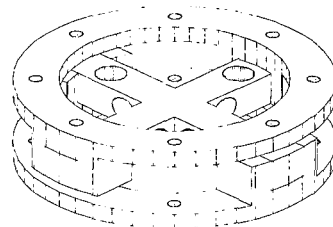


그림 2. 원구멍이 있는 십자형 탄성구조물.
Fig. 2. Cross-shaped elastic structure with circular holes.

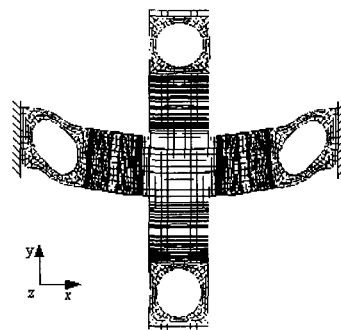


그림 3. y 방향으로 힘이 가해졌을 때 십자형 탄성 구조물의 변형.
Fig. 3. Deformation of the cross-shaped elastic structure under y directional force.

IV. 6축 힘/토크 센서의 신호처리

1. 증폭과 노이즈제거

십자보의 원구멍 부분에 발생하는 표면 변형률은 스트레인게이지의 미소 저항변화로 바뀌고, 이 미소 저항변화는 Wheatstone 브리지를 통하여 미소 전압변화로 감지된다. 이 작은 전압변화를 연산증폭기 회로를 이용하여 증폭한 뒤, 신호에 포함된 노이즈를 제거하기 위하여 저주파

통과필터를 통과시킨다. 본 논문에서는 신호 통과 대역에서 평탄 특성을 유지하면서 회로를 단순화하기 위하여 다음 그림 4와 같은 Sallen-Key Topology의 2차 Butterworth 저주파통과필터를 사용한다. 이 저주파통과필터는 연산증폭기를 사용하여 구현하였다. 그리고 일반적으로 사용되는 기계시스템의 대역폭과 제어용 샘플링 시간을 고려하여 차단주파수를 102 Hz로 선정하였다.

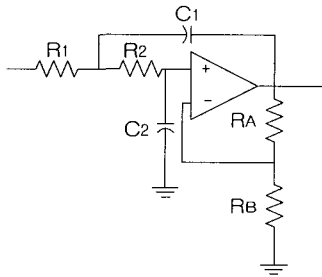


그림 4. 2차 Butterworth 저주파통과필터.
Fig. 4. 2nd-order Butterworth low-pass filter.

이 저주파통과필터의 전달함수 $H(s)$ 는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{1/(R_1 R_2 C_1 C_2)}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (7)$$

본 논문에서 사용한 2차 Butterworth 저주파통과필터의 각 소자값은 $R_1 = R_2 = 110 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.02 \mu\text{F}$,

$C_2 = 0.01 \mu\text{F}$ 이고, $R_A = R_B = 0$ 이다. 이 회로의 Bode 선도를 Dynamic Signal Analyzer를 이용하여 그리면 그림 5와 같다.

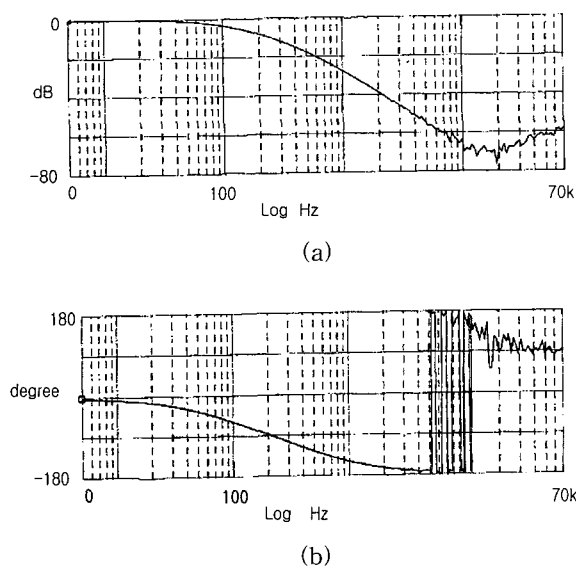


그림 5. 2차 Butterworth 필터의 Bode 선도.
(a) 크기 Bode 선도, (b) 위상 Bode 선도.
Fig. 5. Bode plot of the 2nd-order Butterworth filter.
(a) Magnitude Bode plot, (b) Phase Bode plot.

2. 온도보상, 감도 및 상호간섭을 고려한 Wheatstone 브리지의 게이지 배치방법

스트레인게이지는 온도 변화에 따라 힘/토크가 가해지지 않은 상태인데도 작은 출력을 생성하고 드리프팅을 유발한다. 이 때문에 적절한 온도보상을 위한 브리지 구성이 필요하다. 사용된 Wheatstone 브리지의 배선도는 다음 그림 6과 같다.

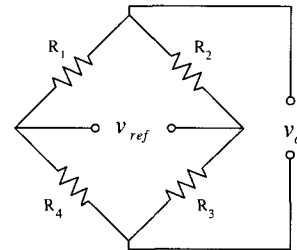


그림 6. Wheatstone 브리지의 배선도.
Fig. 6. Wiring diagram of Wheatstone bridge.

Wheatstone 브리지의 미소 저항변화 δR_1 , δR_2 , δR_3 , δR_4 에 의한 출력전압 변화량 δv_o 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta v_o = \left[\frac{(R_2 \delta R_1 - R_1 \delta R_2)}{(R_1 + R_2)^2} - \frac{(R_3 \delta R_4 - R_4 \delta R_3)}{(R_3 + R_4)^2} \right] v_{ref} \quad (8)$$

4개의 동일한 스트레인게이지로 하나의 전브리지(full bridge)를 구성하면 온도변화의 영향을 보상할 수 있으나, 본 연구에서는 2개의 동일한 스트레인게이지 R_1 , R_2 와 2개의 동일한 저항 R_3 , R_4 로써 반브리지(half-bridge)의 Wheatstone 브리지를 구성하여, 온도보상을 달성함으로써 스트레인게이지의 숫자를 줄이고 비용을 절감한다. 스트레인게이지의 저항은 120Ω 이며, 더미 저항은 정밀도 2%를 갖는 같은 값, 120Ω 을 사용하였다.

탄성변형이 일어나지 않은 상태에서 온도변화에 의하여 저항변화가 발생하였다면, (8)의 4개의 δR_i 는 온도변화에 의한 저항변화량으로 간주할 수 있고, 2개씩 같아질 것이다. 따라서 온도변화에 따른 출력 전압의 변화량은 0으로 둘 수 있다. 그리고 탄성변형과 온도변화에 의하여 저항변화가 발생하였다면, (8)의 분자의 각 항을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_3 \delta R_4 - R_4 \delta R_3 = 0 \quad (9)$$

$$R_2 \delta R_1 - R_1 \delta R_2 = R_2 (\delta R_{1e} + \delta R_{1t}) - R_1 (\delta R_{2e} + \delta R_{2t}) \quad (10)$$

(10)에서 하첨자 t 는 온도변화에 의한 저항변화를, 하첨자 e 는 탄성변형에 의한 저항변화를 의미한다. (10)에서 $\delta R_{1t} = \delta R_{2t}$ 이므로 $R_2 \delta R_{1t} - R_1 \delta R_{2t} = 0$ 이다. 따라서 온도변화에 따른 저항변화의 영향을 제거할 수 있음을 알 수 있다.

위의 같은 반브리지로 Wheatstone 브리지를 구성할 경우에 표면변형률과 출력전압의 변화량 사이의 관계는 (8)

과 스트레인게이지 특성으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\delta v_o = \frac{S_s}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (11)$$

여기서 ϵ_1, ϵ_2 는 1, 2 위치에서의 표면변형률을 의미하고, S_s 는 스트레인게이지의 상수로서, 본 연구에서 사용하고 있는 제품의 값은 2.07이다.

원구멍이 있는 십자보에 대하여 Wheatstone 브리지의 구성방법은 그림 7과 같다.

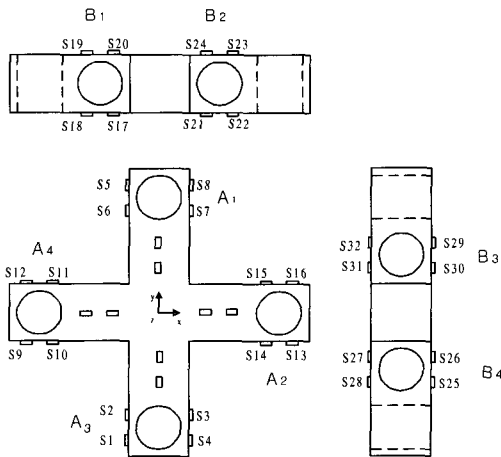


그림 7. 십자보에서 스트레인게이지의 부착위치.
Fig. 7. Mounting positions of strain gauges.

그림 7에서 $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2, B_3, B_4$ 는 8개의 구멍의 위치를 표시하고, s_1, \dots, s_{32} 는 스트레인게이지의 부착위치를 나타낸다.

x, y, z 축 방향의 힘 f_x, f_y, f_z 와 모멘트 M_x, M_y, M_z 가 주어졌을 때 변형이 크게 일어나는 구멍들의 집합을 벤다이어그램으로 표시하면 그림 8과 같다.

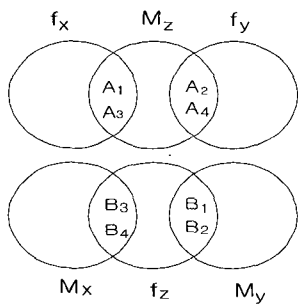


그림 8. 각 힘에 대한 변형이 큰 구멍들의 집합.
Fig. 8. Holes collection with large deformations for each force/torque.

이 그림으로부터 힘/토크의 측정시 상호간섭의 영향을 알 수 있다. 즉 이 십자보에서 f_x 와 M_z, f_y 와 M_z, M_x 와 f_z, f_z 와 M_y 가 서로 겹쳐져 있다. 이 외에도 모든 방향의 힘과 토크는 원치 않는 부분에서의 약간의 변형으로 인

하여 약간씩의 상호간섭을 일으킨다.

힘이나 모멘트가 작용 할 경우에 변형이 크게 일어나는 스트레인게이지의 집합을 다음과 같이 두자.

$f_{x\text{인장}}$: 양의 x 방향으로 힘이 가해질 경우 인장변형이 크게 일어나는 스트레인게이지의 집합.

$f_{x\text{압축}}$: 양의 x 방향으로 힘이 가해질 경우 압축변형이 크게 일어나는 스트레인게이지의 집합.

$M_{z\text{인장}}$: 양의 z 방향으로 모멘트가 가해질 경우 인장변형이 크게 일어나는 스트레인게이지의 집합.

$M_{z\text{압축}}$: 양의 z 방향으로 모멘트가 가해질 경우 압축변형이 크게 일어나는 스트레인게이지의 집합.

y 방향과 z 방향의 힘에 의한 인장과 압축 스트레인게이지의 집합, 그리고 x 방향과 y 방향의 모멘트에 의한 인장과 압축 스트레인게이지의 집합도 같은 방법으로 정의한다. 반브리지의 Wheatstone 브리지에서 효과적인 스트레인게이지 부착위치의 선정을 다음과 같은 방법으로 수행한다.

f_x 를 위한 Wheatstone 브리지에 사용될 스트레인게이지 R_1 과 R_2 의 부착위치는 다음과 같이 선정된다. $f_{x\text{인장}} \cap M_{z\text{인장}} = \{s_8\}$ 이므로, s_8 을 Wheatstone 브리지의 R_1 에 위치시킨다. 여기서 $f_{x\text{인장}} \cap M_{z\text{인장}}$ 은 양의 f_x 가 가해졌을 때 인장이 일어나고 또 양의 M_z 가 가해졌을 때 인장이 일어나는 스트레인게이지의 위치를 의미한다. 그리고 $f_{x\text{압축}} \cap M_{z\text{인장}} = \{s_1\}$ 이므로 s_1 을 Wheatstone 브리지의 R_2 에 위치시킨다. 여기서 $f_{x\text{압축}} \cap M_{z\text{인장}}$ 은 양의 f_x 가 가해졌을 때 압축이 일어나고 양의 M_z 가 가해졌을 때 인장이 일어나는 스트레인게이지의 위치를 의미한다.

이렇게 구성된 Wheatstone 브리지는 (11)로부터 f_x 의 감도를 증폭시키고 M_z 는 상쇄시키는 것을 알 수 있으며 온도보상 역시 이루어짐을 알 수 있다.

또 M_z 를 위한 Wheatstone 브리지의 경우는 $M_{z\text{인장}} \cap f_{x\text{인장}} = \{s_6\}$ 로부터 s_6 를 Wheatstone 브리지의 R_1 에 위치시키고, $M_{z\text{압축}} \cap f_{x\text{인장}} = \{s_2\}$ 로부터 s_2 를 Wheatstone 브리지의 R_2 에 위치시킨다. 그러면 M_z 의 감도를 증폭시키고 f_x 는 상쇄시키는 것을 알 수 있으며 온도보상 역시 이루어짐을 알 수 있다. 결국 이 두 브리지는 각각 f_x, M_z 에 민감한 Wheatstone 브리지가 된다.

f_y 를 검출하는 Wheatstone 브리지의 스트레인게이지 R_1 과 R_2 는 s_{13}, s_{12} 에 두고, f_z 를 위한 스트레인게이지는 s_{32}, s_{25} 에 두고, M_x 를 위한 스트레인게이지는 s_{29}, s_{25} 에 두며, M_y 위한 스트레인게이지는 s_{21}, s_{17} 에 두도록 결정한다.

V. 실험 결과

1. 힘 감지 실험 결과

위에서 설계한 센서 구조물을 머시닝센터에서 가공하고, 유한요소해석 결과에 따라 스트레인게이지를 취부한 후, 일렉트로닉스를 직접 설계하고 제작하였다. IV절에서 제안한 방법으로 스트레인게이지를 부착하였을 때, 아날로그 신호의 상호간섭 효과를 알아보기 위하여 각 방향으로 힘과 모멘트를 가하면서 실험을 수행하였다.

실험장치의 모습은 그림 9와 같다. 그림 9에서 1은 모니터, 2는 컴퓨터 본체로 12 bit A/D 보드가 설치되어있으며, 3은 디지털 오실로스코프, 4는 성능시험대, 5는 연산증폭기로 구성된 아날로그 신호 처리기이다. 그림 9의 5에서 신호증폭과 오프셋 조정, 그리고 저주파 필터링이 이루어진다.

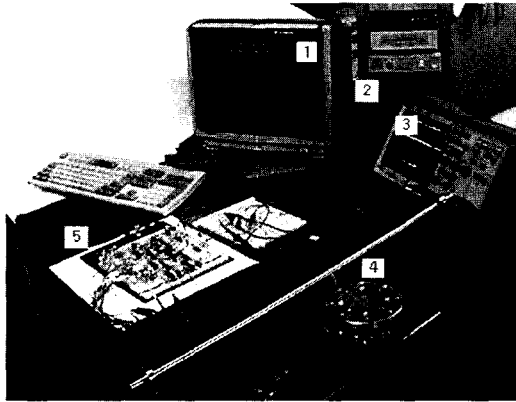


그림 9. 힘-토크 센서 실험장치.

Fig. 9. Experimental set-up for force/torque measurements.

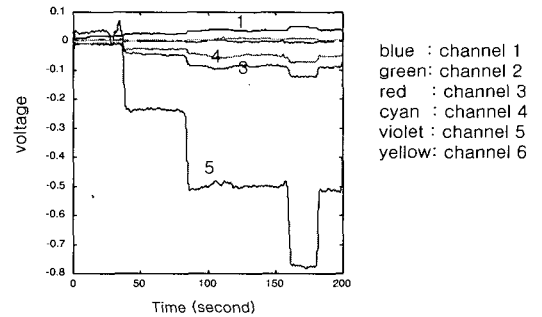
이 실험에서 x, y, z의 세 방향으로 힘과 모멘트를 각각 가하되, 힘은 2 kg중씩 증가시키고, 모멘트는 1 N·cm씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험결과 중 한 가지를 그림 10에 도시하였다. 그림 10(a)는 x 방향으로 힘이 가해졌을 때, 6 채널에서 나오는 전압신호이다. 이 신호는 아날로그 전압신호를 빠른 12 bit 분해능의 A/D 변환 성능을 갖는 Data Acquisition 보드를 사용하여 디지털 데이터로 읽어 들인 것이다. 이 실험으로부터 힘과 모멘트가 아날로그 신호처리를 통해 일차적으로 상호간섭이 분해되어 나타남을 알 수 있다. 이 실험결과에 존재하는 축간의 상호간섭 효과는 컴플라이언스 행렬을 이용하여 제거할 수 있다.

컴플라이언스 행렬은 알려진 각 힘 또는 모멘트에 대한 각 채널의 신호로부터 구해진다. 그러면 임의의 방향과 크기의 힘이 센서에 주어질 경우, 각 채널의 신호값을 이 6×6 컴플라이언스 행렬을 통과시킴으로써 디커플링된 힘을 얻을 수 있다. 본 연구에서 최대 힘과 최대 표면변형률로 정규화한 컴플라이언스 행렬은 다음과 같다.

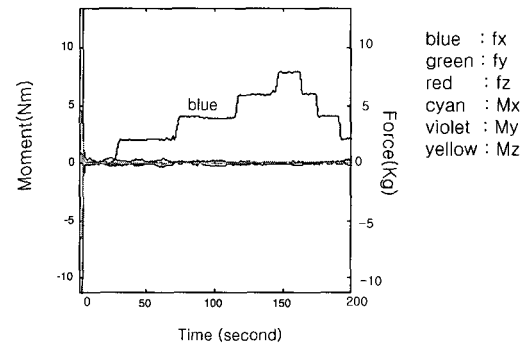
$$C = \begin{bmatrix} 0.180 & -0.094 & -0.496 & 0.266 & 1.626 & 0.014 \\ -0.026 & -0.116 & 0.000 & -0.234 & 0.113 & -1.843 \\ -0.150 & 0.000 & 1.000 & 0.138 & -1.079 & 0.010 \\ -0.133 & -1.127 & -0.148 & 0.367 & -0.488 & -1.041 \\ -0.257 & 0.019 & 0.000 & 0.013 & 0.115 & 0.126 \\ 0.010 & 0.202 & 0.048 & -0.482 & 0.033 & -0.001 \end{bmatrix}$$

그림 10(b)는 위의 실험을 다시 수행하면서 이 컴플라이언스 행렬을 통과시킨 후 얻어진 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 컴플라이언스 행렬을 통과시킴으로써 축간의 상호간섭효과를 제거할 수 있다. 즉 6개의 채널에서 나오

는 신호들에 이 행렬을 곱해줌으로써 주어진 힘을 감지할 수 있게 된다.



(a)



(b)

그림 10. x 방향으로 힘이 가해졌을 때 힘감지 실험결과.

(a) 컴플라이언스행렬을 통과시키기 전, (b) 컴플라이언스행렬을 통과시킨 후.

Fig. 10. Experimental results for x directional force.

(a) Output before acting compliance matrix, (b) Output after acting compliance matrix.

2. 센서의 성능평가

센서의 성능을 평가하기 위하여 비선형성(non-linearity), 히스테리시스(hysteresis), 상호간섭(coupling) 등을 실험으로 조사한다. 비선형성은 이상적인 센서의 경우와 비교했을 때 얼마나 선형적인가를 나타내는 지표이고, 히스테리시스는 힘/모멘트를 점진적으로 증가시켰다가 다시 같은 양만큼 감소시키면서 이전의 경로와의 차이가 얼마인지를 나타내는 것이며, 상호간섭은 한 방향으로 힘을 가했을 때 다른 방향에서 힘이 얼마나 감지되는가를 나타내는 지표이다. 실험결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1에서 Change는 힘/모멘트를 가했다가 제거했을 때 가하기 전의 출력과 가했다가 제거한 후의 출력의 차를 말하며, Drift는 힘/모멘트를 가한 상태에서 시간이 지남에 따라(실험시간은 30분) 출력의 변화가 얼마인지를 알아보는 지표이다. Zero drift는 힘/모멘트가 가해지지 않은 경우의 드리프트 출력을 의미한다.

제작된 힘/토크 센서의 정격힘은 200 N, 정격모멘트는 5 N·m 이다.

표 1. 6축 힘-토크 센서의 성능평가 결과.

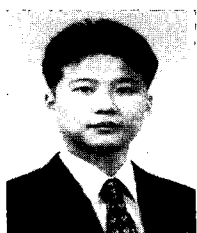
Table 1. Performance evaluation for the proposed 6-axis force/torque transducer.

성능지수 힘과 모멘트	Nonlinearity	Hysteresis	Coupling	Change	Drift	Zero drift
f_x	1.2 %	1 %	2.5 % with f_y	1.2 %	1.2 %	1.3 %
f_y	1.3 %	1.3 %	1.7 % with M_x	1.6 %	2 %	1.5 %
f_z	0.4 %	0.6 %	2.6 % with M_z	1.5 %	2.3 %	2.4 %
M_x	1.2 %	2 %	6 % with M_y	1.5 %	1.7 %	1 %
M_y	1.5 %	1.3 %	1.2 % with f_y	1.7 %	2 %	0.7 %
M_z	0.7 %	1.5 %	3.2 % with f_z	1.3 %	1.7 %	0.9 %

실험결과를 향상시킬 수 있는 방안은 다음의 네 가지 정도로 생각된다. 첫째는 브레드보드가 아닌 기판에 아날로그 회로를 구성하여 외란의 영향을 줄이는 것이고, 두 번째는 성능시험대를 정교하게 제작하여 사용함으로써 실험오차를 줄이는 것이며, 세 번째는 센서구조물을 개선하여 컴플라이언스행렬을 개선하는 것이다. 마지막으로 Wheatstone 브리지에 반도체 스트레인지지와 고정도의 저항을 사용하고, 더 개선된 영점 조정회로를 추가하면 성능이 향상될 수 있을 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 원구멍을 가진 십자형 탄성체를 이용한 6축 힘/토크 센서의 신호처리 방법과 스트레인지지의 취부방법을 제안하고, 실험을 통하여 이 방법의 타당성을 보였다. 본 논문의 결과를 구체적으로 기술하면 다음과 같다.



이재호

1974년 9월 7일생. 1997년 건국대학교 기계공학과 졸업. 2000년 건국대학교 공과대학 기계공학과 대학원 석사(제어 및 동역학전공). 2000년 ~ 현재 대한검사기술 부설연구소 연구원. 관심분야는 6축 힘/토크 센서의 신호처리,

지능제어 시스템.

1) 부하를 가했다가 제거했을 때의 신호안정성은 1.6% 이내, 드리프트는 2.3% 이내, 비선형성은 1.5% 이내, 축간의 상호간섭은 6% 이내, 무부하 드리프트는 2.4% 이내였다.

2) 각 축의 Wheatstone 브리지에서 2개의 스트레인지지를 사용하여 힘감지 성능을 향상시키고, 온도변화의 영향을 보상하였다.

3) 축간의 상호간섭을 줄이면서 효과적으로 스트레인지지 부착위치를 찾는 방법을 제시하였다.

4) 구조적 및 회로적으로 해결되지 않는 상호간섭 효과가 컴플라이언스 행렬을 통과하여 원하는 힘과 모멘트로 분리되어 나오는 것을 실험적으로 보였다.

끝으로, 노이즈에 더 안정한 신호처리회로를 구성하고, 기계적으로 가공정도를 향상시키고, 고정도의 부품을 사용함으로써 더 향상된 성능의 6축 힘/토크 센서가 될 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] M., Uchiyama, Y. Nakamura, and K. Hakomori, "Evaluation of the robot force sensor structure using singular value decomposition," *Advanced Robotics (Int. J. of the Robotics Society of Japan)*, vol. 5, no. 1, pp. 39-52, 1991
- [2] Y., Nakamura, T., Yoshikawa, and I., Futamata, "Design and signal processing of six-axis force sensor," *Proc. 4th International Symposium of Robotics Research*, no. 1, pp. 75-81. 1988.
- [3] A., Bicchi, "A criterion for optimal design of multi-axis force sensors," *J. of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 10, no. 4, 1992.
- [4] 강철구, "힘토크 센서의 힘감지 오차에 대한 해석," *대한기계학회 논문집*, 22권 7호, pp. 1250-1257, 1998.
- [5] 김주용, 강철구, "원구멍이 있는 십자형 탄성체를 가진 6축 힘토크 센서의 변형률 해석," *한국정밀공학회지*, 16권 2호, pp. 5-14, 1999.



강철구

1959년 1월 15일생. 1981년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1989년 University of California, Berkeley 기계공학과(Ph. D). 1990년 ~ 현재 건국대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 운동제어, 힘제어, 힘센싱, 제어이론, 지능기계, 고속전철, 운동시뮬레이터 등.