

뇌졸중 환자의 손 고정장치 제어를 위한 다축 힘/모멘트센서 개발

김현민¹ · 윤정원² · 김갑순^{1,+}

Development of Multi-Axis Force/Moment Sensor for Stroke Patient's Hand Fixing System Control

H. M. Kim¹, J. W. Kim², and G. S Kim^{1,+}

Abstract

Stroke patients should exercise for the rehabilitation of their fingers, because they can't use their hand and fingers. Their hand and fingers are fixed on the hand fixing system for rehabilitation exercise of them. But the hands clenched the fist of stroke patients are difficult to fix on it. In order to fix the hands and fingers, their palms are pressed with pressing bars and are controlled by reference force. The fixing system must have a five-axis force/moment sensor to force control. In this paper, the five-axis force/moment sensor was developed for the hand fixing system of finger-rehabilitation exercising system. The structure of the five-axis force/moment sensor was modeled, and designed using finite element method(FEM). And it was fabricated with strain-gages, then, its characteristic test was carried out. As a result, the maximum interference error is less than 2.43 %.

Keywords : Five-Axis Force/Moment Sensor, Interference Error, Rated Output, Rehabilitation Robot, Finger Rehabilitation

1. 서 론

뇌졸중 환자는 뇌세포가 손상되어 명령체통의 장애로 인해 반신, 전신 혹은 신체의 일부에 마비증상이 발생되어 완전히 움직일 수 없든지 혹은 일부 밖에 움직일 수 없다[1]. 뇌졸중 환자의 손가락은 펴지거나 구부러지지 않고 근력이 매우 약하므로 정상적으로 사용할 수 없다. 손가락을 정상인과 같이 사용하기 위해서는 손가락 재활운동 등을 통해 정상적으로 회복시켜야 한다. 손가락 재활운동을 하기 위해서는 손 혹은 손가락이 움직이지 않고 손상되지 않도록 안전하게 고정시켜야 한다. 손을 고정시키는 가장 간단한 방법은 접착천(velcro)을 이용하여 손목과 손 바닥을 고정시키는 것이다. 이것은 중증 뇌졸중 환자의 손인 경우에는 손가락이 주먹을 쥐 상태로 유지되어 있어 거의 펴지지 않아 고정하기 매우 힘든 단점을 가지고 있다. 그러므로 뇌졸중 환자의 손 및 손가락을 안전하게 고정하기 위한 특별한 고정장치가 필요하다.

이 고정장치는 손과 손가락을 안전하게 일정한 힘으로 눌러 고정할 수 있어야 하고, 눌러 고정된 상태에서 손 및 손가락의 일부가 눌렸을 때에도 손과 손가락에 일정한 힘이 가해지도록 제어가 되어야

한다. 또한 손 및 손가락 고정장치는 주먹을 쥐고 있는 손과 손가락을 고정시키므로 손바닥 및 손가락 바닥이 아닌 손가락 뒤를 누를 수 있고 손가락을 고정시킬 때 누름기구의 이동 시 손가락에 걸릴 수 있다. 그러므로 고정장치는 손과 손바닥을 누르는 힘을 측정하고 제어를 할 수 있어야 하고, 손바닥이 아닌 손가락 뒤 누름, 이동 시 손가락 걸림 등에 의해 발생하는 힘 및 모멘트를 측정할 수 있는 여러 방향의 힘과 모멘트를 측정할 수 있는 다축 힘/모멘트센서[2-6]가 필요하다.

5축 힘/모멘트센서는 손 및 손가락을 누르는 방향의 힘(z방향의 힘 F_z), 손목의 축 방향인 힘(y방향의 힘 F_y), 손목의 축과 직각 방향인 힘(x방향의 힘 F_x) 등 3개 방향의 힘과 x방향의 모멘트(M_x)와 z방향의 모멘트(M_z)를 각각 측정할 수 있어야 한다. 5축 힘/모멘트센서는 고정장치의 적합한 크기이어야 하고, 각 힘과 모멘트센서의 용량이 적당해야 하며, 가격이 저가이어야 한다. 그러나 현재 개발된 다축 힘/모멘트센서[2-6]는 1개의 가격이 약 수백만원 정도이고, 각 센서의 용량 및 크기가 손 고정장치에 적합하지 않기 때문에 개발이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 뇌졸중 환자의 손가락 재활운동을 위한 손 및 손가락을 안전하게 고정할 수 있는 고정장치의 핵심부품인 5축 힘/모멘트센서를 개발하였다. 이를 위해 5축 힘/모멘트센서를 모델링하였고, 유한요소법을 이용하여 설계하였으며, 스트레인지지를 이용하여 센서를 제작하였다. 그리고 제작된 5축 힘/모멘트센서의 특성실험을 실시하였다.

¹경상대학교 제어계측공학과(Department of Control & Instrumentation Engineering, ERI, Gyeongsang National University)

²경상대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)

⁺Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr

(Received : Jul. 26. 2011, Accepted : Sep. 15. 2011)

2. 손 고정장치의 힘과 모멘트 측정 원리

Fig. 1은 손 고정장치에 손 및 손가락을 눌러 고정할 때 5축 힘/모멘트센서에 가해지는 힘 F_x, F_y, F_z 와 모멘트 M_x, M_z 를 나타내고 있다. 손 고정장치는 손 지지대 위에 왼손 등이 접촉되도록 손을 올려 놓고 손 누름기구를 이용하여 손바닥 혹은 검지, 중지, 약지, 소지 등의 네 손가락을 눌러 고정한다. 이때 5축 힘/모멘트센서 중 힘 F_z 센서에 의해 측정되는 값이 손 및 손가락을 누르는 힘이 되고, 이 값을 기준으로 힘을 눌러 고정하는 제어를 한다. F_x 센서는 고정된 환자의 손이 좌우로 움직일 때 발생하는 힘을 측정하고, F_y 센서는 손이 전후로 움직일 때 발생하는 힘과 손 고정장치의 누름기구가 전후로 이동할 때 환자의 주먹 쥐어진 검지나 중지 손가락 혹은 약지와 소지 손가락이 걸렸을 때 발생하는 힘을 측정하며, F_z 는 손 및 손가락을 누를 때 발생하는 힘, 고정된 손이 위로 움직일 때 발생하는 힘, 주먹 쥐어진 검지나 중지 손가락 혹은 약지와 소지 손가락만을 눌렀을 때 발생하는 힘을 측정한다.

그리고 M_x 센서는 뇌졸중 환자의 주먹 쥐어진 검지나 중지 손가락 혹은 약지와 소지 손가락만을 눌렀을 때 발생하는 모멘트를 측정하고, M_z 센서는 손 고정장치의 누름기구가 전후로 이동할 때 뇌졸중 환자의 주먹 쥐어진 검지나 중지 손가락 혹은 약지와 소지 손가락이 걸렸을 때 발생하는 모멘트를 측정한다. 이와 같이 손 고정장치의 5축 힘/모멘트센서는 손 및 손가락을 안전하게 고정하는 핵심 부품으로 사용된다.

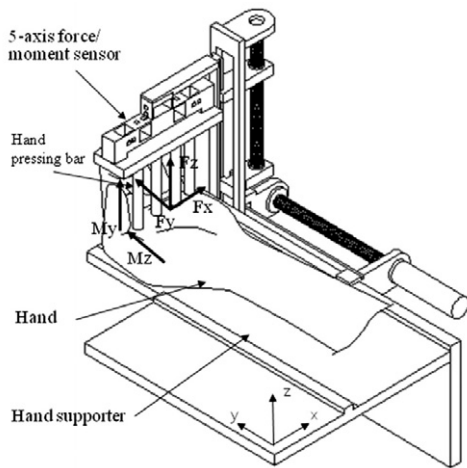


Fig. 1. Principle of the applied forces and moments to five-axis force/moment sensor in hand fixing system.

3. 5축 힘/모멘트센서 설계 및 제작

3.1 5축 힘/모멘트센서의 구조

Fig. 2는 5축 힘/모멘트센서의 구조를 나타내고 있고, 힘 F_x, F_y, F_z 과 모멘트 M_x, M_z 를 감지할 수 있는 5개의 센서의 감지부를

한 몸체에 포함되도록 하였다. 상부에 힘/모멘트 전달블록(FTB)이 위치해 있고 하부좌측 고정블록(FB1)과 하부우측 고정블록(FB2)가 위치해 있으며, 5개의 평행평판보(PPB : parallel plate beam)가 5개 센서의 감지부로 사용된다. 구성은 PPB5의 한쪽 끝은 힘/모멘트 전달블록, 다른 쪽 끝은 중앙이동블록에 각각 연결되고, PPB3의 한쪽 끝은 중앙 이동블록, 다른 쪽 끝은 좌측 이동블록에 각각 연결되며, PPB1의 한쪽 끝은 좌측 이동블록, 다른 쪽 끝은 하부좌측 고정블록에 각각 연결된다. PPB4의 한쪽 끝은 중앙 이동블록, 다른 쪽 끝은 우측 이동블록에 각각 연결되며, PPB2의 한쪽 끝은 우측 이동블록, 다른 쪽 끝은 하부우측 고정블록에 각각 연결된다.

힘 F_x 센서의 감지부는 PPB1과 PPB2, 힘 F_y 센서의 감지부는 PPB5, 힘 F_z 센서의 감지부는 PPB3과 PPB4, 모멘트 M_x 센서의 감지부는 PPB3과 PPB4, 모멘트 M_z 센서의 감지부는 PPB1과 PPB2이다. 평행평판보 PPB1과 PPB2의 보(beam1~4)의 크기는 두께 (t_1), 길이(l_1), 폭(b_1)이고, PPB3과 PPB4의 보(beam5~8)의 크기는 두께(t_2), 길이(l_2), 폭(b_2)이며, PPB5의 보(beam9~10)의 크기는 두께(t_3), 길이(l_3), 폭(b_3)이다. 이들 크기는 센서의 설계변수로 사용된다.

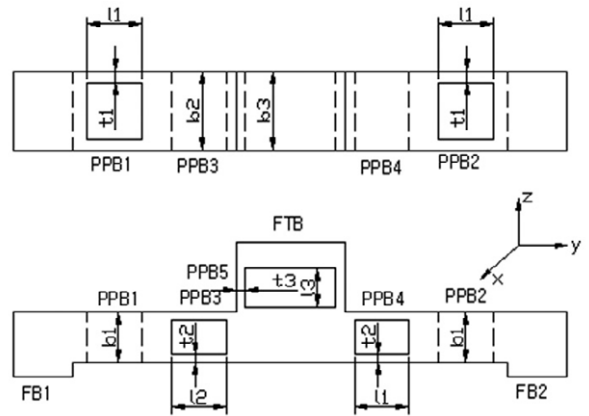


Fig. 2. Structure of five-axis force/moment sensor.

3.2 유한요소해석을 이용한 센서설계 및 분석

5축 힘/모멘트센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중, 평행평판보 PPB1과 PPB2를 구성하는 보들의 크기는 폭 b_1 , 두께 t_1 , 길이 l_1 , 평행평판보 PPB3과 PPB4를 구성하는 보들의 크기는 폭 b_2 , 두께 t_2 , 길이 l_2 , 평행평판보 PPB5를 구성하는 보들의 크기는 폭 b_3 , 두께 t_3 , 길이 l_3 , 센서의 설계를 위한 변수는 평판보의 폭 b_1, b_2, b_3 , 두께 t_1, t_2, t_3 , 길이 l_1, l_2, l_3 이다.

각 센서는 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지를 구성한다. 정격변형률은 정격하중이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\epsilon = \epsilon_{T1} - \epsilon_{C1} + \epsilon_{T2} - \epsilon_{C2} \quad (1)$$

여기서, ε 은 휘스톤브리지의 총 변형률, ε_{T1} 은 인장 스트레인게이지 T1의 변형률, ε_{C1} 은 압축 스트레인게이지 C1의 변형률, ε_{T2} 은 인장 스트레인게이지 T2의 변형률, ε_{C2} 은 압축 스트레인게이지 C2의 변형률이다. 정격출력은 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1}{4} k \varepsilon \quad (2)$$

여기서, E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K는 스트레인게이지의 상수(약 2.03), ε 은 식(1)로부터 얻은 총 변형률이다.

5축 힘/모멘트센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5mV/V, 정격하중은 힘 Fx, Fy, Fz센서가 150N, 모멘트 Mx센서가 4Nm, Mz센서가 2Nm이고, 센서의 크기가 112 mm 16 mm 27 mm, 스트레인게이지의 부착위치가 길이 방향으로는 1.5mm, 폭 방향으로는 1/2, 스트레인게이지의 부착위치에서의 변형률은 약 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 각 힘센서와 모멘트센서의 정격용량은 힘은 손바닥을 눌러서 손상이 되지 않을 정도의 힘(150 N)으로 결정하였고, Mx모멘트센서는 40 mm 지점에서 100 N이 가해진다고 가정하였으며, Mz 모멘트센서는 40 mm 지점에 50 N의 힘이 가해진다고 가정하여 결정하였다.

5축 힘/모멘트센서의 각 감지부의 크기를 결정하기 위해 ANSYS 소프트웨어를 이용하였다. 유한요소해석을 위해 소프트웨어에 입력한 재료상수는 제작할 센서의 재질이 알루미늄이므로 종탄성계수가 70 GPa, 프와송의비가 0.3이며, 8절점 6면체 블록을 선택하였다. 격자(mesh) 크기는 해석하고자 하는 평행평판보를 길이방향으로는 0.5 mm, 두께방향으로는 4등분, 폭방향으로는 8등분하였다. Fig. 3은 5축 힘/모멘트센서를 유한요소법으로 해석하기 위해 격자를 나누는 모습을 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)는 힘 Fx, (b)는 힘 Fy, (c)는 힘 Fz, (d)는 모멘트 Mx, (e)는 모멘트 Mz가 각각 가해졌을 때의 센서 감지부의 변형된 모습을 나타내고 있으며, 모두 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다. 유한요소법을 이용하여 5축 힘/모멘트센서를 설계한 결과, 센서의 크기는 평판보의 길이 l1과 l2가 각각 11 mm, l3가 8 mm, 폭 b1, b2, b3은 모두 16 mm, 두께 t1이 2.3 mm, t2가 1.5 mm, t3가 1.9 mm이었다.

유한요소해석 결과를 토대로 5축 힘/모멘트센서의 각 센서의 스트레인게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 Fig. 5에 나타내고 있다. 스트레인게이지의 부착위치는 Fx센서가 S1~S4, Fy센서가 S5~S8, Fz센서가 S9~S12, Mx센서가 S13~S16, Mz센서가 S17~S20이다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 길이방향으로는 1.5 mm이고, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0 %이고, 최대의 정격출력이 발생되는 지점으로 결정되었다.

Table 1은 유한요소법을 이용하여 5축 힘/모멘트센서의 각 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률들과 식 (1)에 의해 계산된 정격 변형률들을 나타내고 있다. 모든 센서의 정격변형률은 설계변수로

결정한 정격변형률 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 내외이었고, 최대오차는 6.4 %이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1 mm 단위로 나타내었기 때문이다.

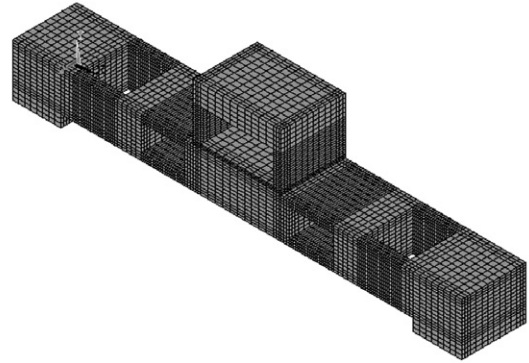


Fig. 3. Mesh shape for FEM analysis.

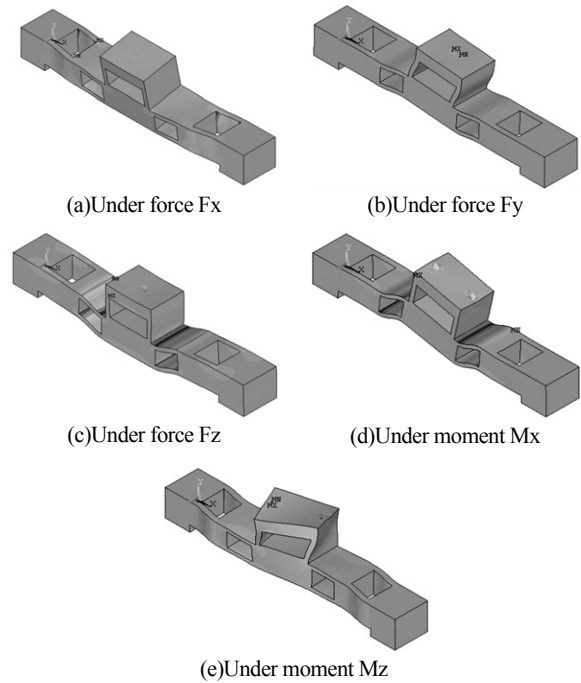


Fig. 4. Deformed shape under forces and moments.

Table 1. Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of each sensor of five-axis force/moment sensor

Sensor	Strain($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	T1	C1	T2	C2	ε
Fx	300	-219	219	-300	1038
Fy	266	-266	266	-266	1064
Fz	263	-263	263	-263	1052
Mx	262	-262	262	-262	1048
Mz	262	-262	262	-262	1048

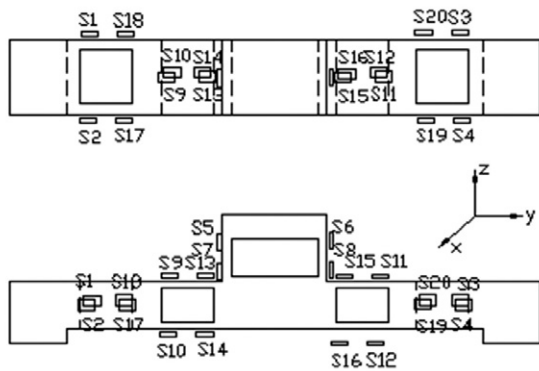


Fig. 5. Attachment locations of strain gages on each sensing element of five-axis force/moment sensor.

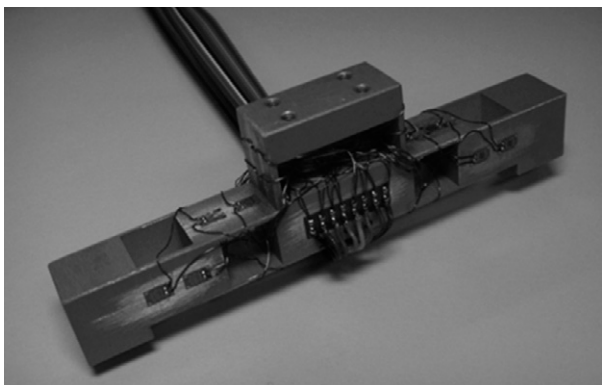


Fig. 6. Manufactured five-axis force/moment sensor.

3.3 5축 힘/모멘트센서 제작 및 특성실험

5축 힘/모멘트센서는 Fig. 5에 나타낸 각 센서의 게이지부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3 mm 5.2 mm)를 순간접촉제(M-200)를 이용하여 부착하고 휘스톤브리지[2-6]를 구성하여 제작하였으며, Fig. 6은 제작된 5축 힘/모멘트센서의 사진을 보이고 있다.

제작한 5축 힘/모멘트센서의 특성실험은 Fig. 7의 (a) 다축 힘/모멘트센서 교정기[7]를 이용하였고, 이교정기는 힘 F_x , F_y , F_z 를 모두 2000N, 모멘트 M_x , M_y , M_z 를 모두 500Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며, 110-4의 상대확장불확도를 가지고 있다. Fig. 7의 (b)는 힘 F_x 를 가하기 위해 5축 힘/모멘트센서를 교정기에 고정된 모습의 사진, (c)는 힘 F_y 를 가하기 위해 고정된 모습의 사진, (d)는 힘 F_z 를 가하기 위해 고정된 모습의 사진, (e)는 모멘트 M_x 를 가하기 위해 고정된 모습의 사진, (f)는 모멘트 M_z 를 가하기 위해 고정된 모습의 사진을 나타내고 있다.

5축 힘/모멘트센서는 정격하중인 $F_x=F_y=F_z=150N$ 과 모멘트 $M_x=4 Nm$, $M_z=2 Nm$ 를 가하고 정격출력을 측정하였다. 실험은 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

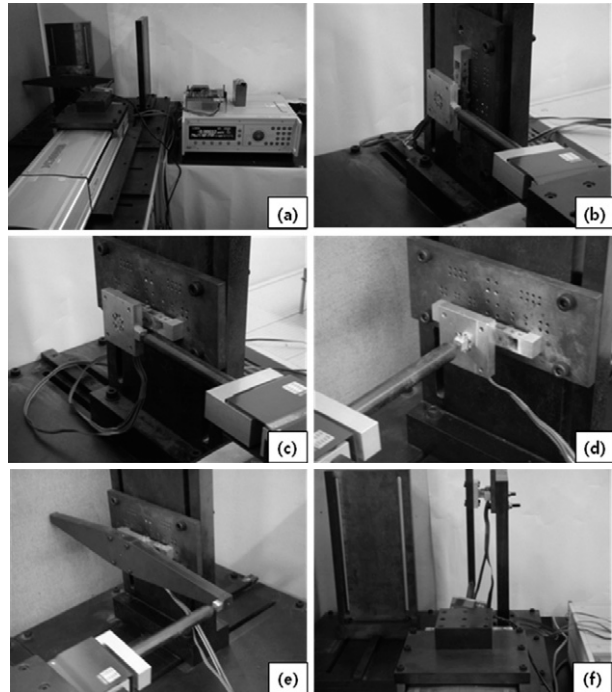


Fig. 7. Photograph of characteristic test of five-axis force/moment sensor using the calibration system of multi-axis force/moment sensor.

Table 2는 5축 힘/모멘트센서의 유한요소 해석결과와 특성실험 결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 이론해석결과와 정격출력은 Table 1의 정격변형률 을 식 (2)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. 유한요소 해석결과를 기준으로 실험결과와 오차는 최대 6.23% 이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각된다. Table 3은 5축 힘/모멘트센서의 각 센서의 상호간섭오차를 나타내고 있다. 5축 힘/모멘트센서의 최대 상호간섭오차는 2.53%이다. 제작된 5축 힘/모멘트센서의 상호간섭오차가 기 개발된 다축 힘/모멘트센서의 그것과 비슷하고, 가격이 일백만원 이하로 매우 저렴하며, 크기가 112 mm, 16 mm, 27 mm이므로 손가락 재활로봇에 부착하기 적합하다.

Table 2. Rated output from FEM analysis and characteristic test of each sensor of five-axis force/moment sensor

Sensor	Rated output(mV/V)		
	FEM	Exp.	Error(%)
F_x	0.5267	0.4939	6.23
F_y	0.5399	0.5258	2.61
F_z	0.5338	0.5319	0.36
M_x	0.5318	0.5547	-4.31
M_z	0.5318	0.5142	3.31

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

Sensor	Interference error(%)				
	Fx	Fy	Fz	Mx	Mz
Fx=150 N	-	0.58	0.37	0.37	2.53
Fy=150 N	0.27	-	0.09	1.16	0.15
Fz=150 N	0.35	0.72	-	0.87	0.51
Mx=4 Nm	0.09	0.69	0.54	-	0.74
Mz=2 Nm	0.75	0.21	0.29	0.62	-

4. 결 론

본 논문에서는 뇌졸중 환자의 손가락 재활운동을 위한 손 및 손가락을 안전하게 고정할 수 있는 고정장치의 5축 힘/모멘트센서를 개발하였다. 제작한 5축 힘/모멘트센서 의 최대 상호간섭오차가 2.32 %임을 확인하였고, 이것은 이미 판매하고 있는 5축 힘/모멘트센서의 그것과 비슷한 수준[2-6]이다. 따라서 본 논문에서 개발한 5축 힘/모멘트센서는 뇌졸중 환자의 손가락 재활운동을 위한 손 및 손가락을 안전하게 고정할 수 있는 고정장치에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 추후 논문은 본 논문에서 개발한 5축 힘/모멘트센서를 핵심 부품으로 하는 뇌졸중 환자의 손가락 재활운동을 위한 손 및 손가락을 안전하게 고정할 수 있는 고정장치를 개발하고, 이것을 뇌졸중 환자의 손가락 재활운동에 활용하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임(No. 2009-0087281)

REFERENCES

- [1] P. Prashun, G. Hadley, C. Gatzidis, and I. Swain, "Investigating the trend of virtual reality-based stroke rehabilitation systems", *Information Visualisation (IV), 2010 14th International Conference*, pp. 641-647, 2010.
- [2] J.H. Kim, D.I. Kang, H.H. Shin, and Y.K. Park, "Design and analysis of a column type multi-component force/moment sensor", *Measurement: J. Int. Meas. Confederation*, vol. 33, pp. 213-219, 2003.
- [3] K. Nagai, Y. Ito, M. Yazaki, K. Higuchi, and S. Abe, "Development of a small six-component force/torque sensor based on the double-cross structure", *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 22, no. 3, pp. 361-369, 2004.
- [4] H.M. Kim, H.S. Shin, J.W. Yoon, and G.S. Kim, "Development of two-finger force measuring system to measure two-finger gripping force and its characteristic evaluation)", *JSST*, vol. 20, no. 3, pp.25-29, 2011.
- [5] ATI Industrial Automation, *Multi-axis force/torque sensor*, ATI Industrial Automation, pp. 4-45, 2005.
- [6] BL Autotec, *BL sensor, multi-axis force/torque sensor (BL-FTS-E020)*, BL Autotec, pp. 5-50, 2003.
- [7] G.S. Kim and J.W. Yoon, "Development of calibration system for multi-axis force/moment sensor and its uncertainty evaluation", *KSPE*, vol. 24, no. 10, pp. 91-98, 2007.



김 현 민(H. M. Kim)

- 2008년 국립경상대학교 제어계측공학과 (공학사).
- 2010년 국립경상대학교 제어계측공학과 (공학석사).
- 2010년 3월 ~현재 국립경상대학교 제어계측공학과(박사과정)
- 주관심분야 : 지능형 서비스 로봇, 자동화시스템, 지능형시스템.



윤 정 원(J. W. Kim)

- 2005년 광주과학기술원 기전공학과(공학 박사).
- 2001년~2002년 Rutgers University 방문 연구원.
- 2010년~2011년 미국립보건원(NIH) Visiting Fellow.
- 2005년~현재 경상대학교 기계항공공학부 조교수.
- 주관심분야 : 재활로봇, 햅틱 및 이동인터페이스.



김 갑 순(G. S Kim)

- 1999년 8월 한양대학교 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1990년 2월 ~ 2000년 2월 한국표준과학연구원 선임연구원
- 2003년 7월 ~ 2004년 7월 일본쭈꾸바대학교 인공지능로봇연구실 교환교수
- 2000년 3월 ~ 현재 경상대학교 제어계측공학과 교수
- 주관심분야 : 다축 힘/모멘트센서 및 응용, 인간형 및 서비스 로봇, 이동로봇 지능제어, 자동이동선박 제어