지능형 로봇손을 위한 손가락 힘센서 개발

김갑순⁺

Development of Force Sensors for the Fingers of an Intelligent Robot's Hand

Gab-Soon Kim⁺

Abstract

This paper describes a design and manufacture of a two-axis force sensor and a single-axis force sensor for the fingers of an intelligent robot's hand. The robot's finger is composed of a two-axis force sensor, a first knuckle, a single-axis force sensor, a second knuckle, a spring, a motor of first knuckle, a motor of second knuckle, and so on. The two-axis force sensor attached to the first knuckle and the single-axis force sensor attached to the second knuckle were designed and manufactured, and the characteristics test of two sensors was carried out. As a test results, the interference error of the two-axis force sensor was less than 0.68%, the repeatability error of each sensor was less than 0.02%, and then the non-linearity was less than 0.03%. It is thought that the sensors can be used for the fingers of the intelligent robot's hand for rehabilitation exercise of finger patients.

Keywords: Force sensor, Robot's finger, Rated output, Interference error

1. 서 론

전 세계적으로 선천적으로 손 환자가 많을 뿐만 아니라 후천적으로 사고 및 병환으로 손 환자는 증가하는 추세이며, 특히 뇌졸중환자가 급속히 증가하는 추세이다. 환자의 손이 물건을 잡는 등 기능을 발휘하지 못할 경우에는 재활치료를 수행해야 한다. 재활치료는 전문재활치료사가 하루에 2회정도 각각 30분씩 실시하는 것이 보통이다. 현재의 전문재활치료사는 증가하는 환자를 충분히 감당하기 어려운 실정이다. 그러므로 치료사를 대신할 재활로봇이 개발되었다. 기개발한 상지 재활로봇[1-4]은 환자가 의자에 앉아 환자의 손과 팔을 고정시킨 후 손목, 팔꿈치, 어깨의 관절을 유연하게 하는 운동과 근육을 강화하게 하는 운동을 실시할 수 있다. 로봇이 직접 환자의 상지를 재활운동시켜 정상인과 같은 손의 기능을 회복하는 연구 이외에도 환자 스스로가 손가락을 움직이고 물건을 잡는 훈련을 통해 재활하는

연구를 활발히 진행하고 있다. 실제 재활병원에서는 건강한 손의 손가락의 움직이는 모습을 거울을 통해 보면서 혹은 정상인의 손가락 움직이는 모습을 촬영한 것을 컴퓨터 모니터를 보면서[5] 시각적인 효과로 인해 비정상적인 손가락을 스스로 움직이는 훈련을 한다. 이 방법은 컴퓨터 모니터로 사람의 손가락이 움직이는 것을 항상 보면서 훈련하기 때문에 환자가 실증을 느낄 수 있다. 훈련의 효과를 높이기 위해서는 전문치료사나 환자 보호자가 손가락의 움직이는 모습을 환자에게 항상 보여주고 있어야 한다. 그러나 이 방법은 전문치료사의 부족, 핵가족화로 상시 보호자의 부족 등으로 현실적으로 어렵다. 따라서 정상인이 손가락을 움직이고 물건을 잡는 것처럼 지능형 로봇손을 개발하여 환자의 훈련에 적용하는 방법이 있다.

이 지능형 로봇손은 사람의 손가락과 유사해야 하고, 손가락 마디가 개별적으로 유연하게 움직일 수 있을 뿐만 아니라 달걀, 공, 작은 상자 등과 같이 부드럽거나 단단한 물체를 안전하게 잡을 수 있어야 한다. 이와 같은 지능형 로봇손은 손가락에 힘센서가 부착되어 잡는 힘을 측정 및 제어하여 깨지거나 떨어뜨리지 않도록 안전하게 잡을 수 있어야 할 뿐만 아니라 물체를 잡는 순간 무게를 측정하여 잡는 힘을 결정해야 한다. 이를 위해서는 손가락의 첫째 마디는 2축 힘센서가 필요하고 둘째 마디는 단축 힘센서가 필요하다. 그러므로 지능형 로봇손을 개발하기 위해서는 손가락 크기에 맞는 크기와 용량이 적합한 힘센서가 필요하다. 그러나 현재 개발된 2축 힘센서 및 단축 힘센서[6-8]는 크기(80 mm×80 mm×40 mm 이상) 및 용량(500 N 이상) 등이 지능형 로봇손에는 적합하지 않고, 2축 힘센서의 경우에는

경상대학교 제어계측공학과(Department of Control & Instrumentation Engineering, ERI, Gyeongsang National University)
405-504, Gyeongsang National University, 501 Jinju-daero, Jinju 660-701, Korea

⁺Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr

(Received: Feb. 3, 2014, Revised: Mar. 10, 2014, Accepted: Mar. 13, 2014)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가격이 고가(1백만원)이므로 지능형 로봇손에 부착하기에는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 손가락환자의 재활훈련에 적합한 지능형 로봇손을 위한 손가락 힘센서를 설계 및 제작하였다. 첫 번째 마디에는 2축 힘센서가 부착되고, 두 번째 마디에는 단축 힘센서가 부착되며, 유한요소법(finite element method)을 이용하여 각각의 힘센서를 설계하였다. 그리고 스트레인게이지를 부착하여 2개의 힘센서를 제작하였고, 힘센서의 특성평가를 실시하였다.

2. 손가락 힘센서 개발

2.1 지능형 로봇손의 손가락의 구조

Fig. 1은 지능형 로봇손의 손가락을 나타내고 있고, 이것은 손가락의 첫째 마디, 2축 힘센서, 둘째 마디, 단축 힘센서, 스프링, 이동블록, 나사, 첫째 마디 구동모터, 둘째 마디 구동모터, 몸체 등으로 구성되었다. 첫째 마디에 부착되어 있는 2축 힘센서는 x와 y방향의 힘을 측정하는 Fx센서와 Fy센서로 구성된다. 지능형 로봇손이 엄지, 검지, 중지, 약지 등으로 구성되었을 때, Fx센서는 물체를 잡는 힘을 측정하고 그 결과를 이용하여 잡는 제어를 하는데 사용되고, Fy센서는 y방향의 힘을 측정하여 Fx센서에 의해 측정된 값과 합력 계산하여 물체의 무게를 계산하는데 사용된다.

손가락의 첫째 마디는 2축 힘센서와 손가락 바닥(물체와의 접촉부) 등으로 구성되었다. 첫째 마디를 구부릴 때는 우선 첫째 마디 구동모터가 회전하면 나사가 회전하게 되어 직선운동기구(rod)에 부착되어 있는 줄을 당기고, 이로 인해 관절축이 회전하게 되어 동작된다. 펴질 때는 구동모터를 반대로 회전시키면 줄이 느슨해지고, 뒤쪽의 스프링력에 의해 동작된다. 단축 힘센서는 손가락의 둘째 마디에 부착되고, 로봇손이 물체를 잡을 때 접촉되는 힘을 측정한다. 둘째 마디는 물체를 잡을 때는 둘째 마디 구동모터를 회전시키고, 이로 인해 나사가 회전되어 회전운동을 직선운동으로 변환되며, 나사에 부착된 이동블록이 마디를 밀므로서 동작된다. 그리고 펼 때는 잡을 때와 반대로 모터를 역회전하면 동작된다. 본 논문에서는 지능형 로봇손에서 손가락의 첫째 마디를 구성하는 2축 힘센서와 손가락의 둘째 마디를 구성

Fig. 1. Structure of finger of intelligent robot hand.

하는 단축 힘센서를 설계 및 제작한다.

2.2 손가락 힘센서의 구조

Fig. 2의 (a)는 손가락 첫째 마디에 부착되는 2축 힘센서의 구조를 나타내고 있고, 이것은 힘 Fx와 Fy를 동시에 측정할 수 있으며, 2개의 센서 감지부가 한 몸체에 구성되었다. 2축 힘센서의 감지부는 2개의 평행평판보(PPB1~2)가 수직과 수평으로 연결되었으며, PPB1 (Parallel Plate Beam)은 힘 Fx센서의 감지부, PPB2는 힘 Fy센서의 감지부이다. Fig. 2의 (b)는 손가락 둘째 마디에 부착되는 단축 힘센서의 구조를 나타내고 있고, 감지부는 PPB3이다. PPB1, PPB2, PPB3의 각 평판보(plate beam)의 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3, 폭 b1, b2, b3는 센서의 설계변수로 사용된다.

2.3 유한요소법을 이용한 힘센서 설계 및 분석

2축 힘센서와 단축 힘센서의 설계변수는 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중, 평행평판보PPB1~3을 구성하는 평판보들의 크기인 폭 b1, b2, b3, 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3이다. 센서의 설계과정은 설계변수 중 몸체의 크기, 각 센서의 정격축력, 정격하중 등을 결정하여 유한요소법에 적용하여 평판보들의 크기인 폭 b1, b2, b3, 두께 t1, t2, t3, 길이 l1, l2, l3를 결정하는 것이다. 각 센서는 4개의 스트레인게이지로 휘스톤브리지(bridge)를 구성한다. 정격변형률은 정격 힘이 가해질 때 휘스톤브리지에서 출력되는 총 변형률을 의미하고 이것의 값은 다음과 같은 식으로부터 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{T1} - \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C2} \quad (1)$$

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 정격힘을 가했을 때 입력전압과 출력전압의 비로 나타내며, 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

Fig. 2. Structure of three-axis force sensor; (a) Two-axis force sensor and (b) single-axis force sensor.

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

여기서 E_i 는 휘스톤브리지의 입력전압, E_o 는 휘스톤브리지의 출력전압, K 는 스트레인게이지의 상수(약 2.03), ε 는 식(2)로부터 얻은 총 변형률이다.

2축 힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력은 약 0.5 mV/V, 정격힘은 힘 Fx센서와 Fy 센서가 각각 200 N, 스트레인게이지의 부착위치가 길이 방향으로 1 mm, 폭 방향으로 1/2, 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률은 약 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 결정하였다. 그리고 센서의 크기는 부착되는 스트레인게이지의 크기 (3 mm×5.2 mm)를 고려하여 평판보의 길이를 8 mm, 전체의 크기는 가로, 세로, 높이가 43.5 mm×14 mm×15.5 mm이다. 단축 힘센서를 설계하기 위한 설계변수의 정격출력, 정격힘, 스트레인게이지의 부착위치, 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률은 모두 2축 힘센서와 동일하다. 센서의 전체의 크기는 가로, 세로, 높이가 18 mm×11 mm×10 mm이다.

Fig. 3. Deformed shape of the sensing element of two-axis force sensor under each rated force; (a) Mesh shape, (b) applied force Fx, and (c) applied force Fy.

Fig. 4. Deformed shape of the sensing element of single-axis force sensor under rated force; (a) Mesh shape and (b) applied force F.

2축 힘센서와 단축 힘센서의 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 3등분하였다.

Fig. 3의 (a)는 2축 힘센서의 유한요소해석을 위한 격자(mesh) 모습, (b)는 정격힘 Fx가 가해졌을 때 변형된 모습을, (c)는 정격힘 Fy가 가해졌을 때 변형된 모습을 각각 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)는 단축 힘센서의 유한요소해석을 위한 격자(mesh) 모습, (b)는 정격힘 F가 가해졌을 때 변형된 모습을 나타내고 있다. 모두 센서의 구조를 모델링할 때 예상했던 모습으로 변형되었다.

유한요소법을 이용하여 2축 힘센서와 단축 힘센서를 설계한 결과, 2축 힘센서 감지부의 크기는 평판보의 길이 l1과 l2가 각각 8 mm, 폭 b1과 b2가 각각 14 mm와 9 mm, 두께 t1과 t2가 0.7 mm과 1 mm로 결정되었다. 그리고 단축 힘센서 감지부의 크기는 평판보의 길이 l3가 8 mm, 폭 b3가 10 mm, 두께 t3가 0.9 mm로 결정되었다.

Fig. 5의 (a)는 Fx센서 감지부의 변형률분포의 그래프, (b)는 Fy센서 감지부의 변형률분포의 그래프를 각각 나타내고 있다.

(a)

(b)

Fig. 5. Strain distribution on each beam of two-axis force sensor under each rated force; (a) Two beams under rated force Fx and (b) two beams under rated force Fy.

Fig. 6. Strain distribution on each beam of single-axis force sensor under rated force.

Fig. 7. Attachment locations of strain gages on each sensing element of force sensors; (a) Two-axis force sensor and (b) Single-axis force sensor.

각 그래프에서 변형률분포가 2개인 것은 각각의 평행평판보가 2개의 평판보로 구성되었기 때문이고, 변형률이 양과 음의 값으로 나타난 것은 각 정격힘이 가해졌을 때 각 보의 외표면이 서로 반대방향이므로 인장과 압축을 받기 때문이다. Fx센서와 Fy센서의 변형률분포에서 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 각각 보의 약 4.2 mm 지점과 4.5 mm 지점이고 이 지점을 기준으로 좌측과 우측의 변형률의 크기가 다른 것은 각각의 평행평판보가 외팔보 형태로 힘이 가해지기 때문이다. 그리고 각 변형률분포에서 좌측과 우측의 끝의 변형률이 감소한 것은 유한요소 프로그램의 끝효과 오차 때문이다.

Fig. 6은 단축 힘센서 감지부의 변형률분포의 그래프를 나타내고 있고, 변형률이 0 $\mu\text{m}/\text{m}$ 인 지점은 각각 보의 약 4.5 mm 지점이다.

유한요소해석 결과를 토대로 2축 힘센서와 단축 힘센서의 각 센서의 스트레인게이지 부착위치를 결정하였으며, 그것을 Fig. 7에 나타내고 있다. 2축 힘센서의 Fx센서의 스트레인게이지의 부착위치는 S1~S4, Fy센서의 그것은 S5~S8이고, 단축 힘센서의 그것은 S9~S12이다. 스트레인게이지의 정확한 부착위치는 길이방향으로는 1 mm이고, 폭방향으로는 중심선상이다. 이 위치는 각 센서의 정격하중에서 상호간섭오차가 0%이고, 최대의 정격출력이 발생하는 지점으로 결정되었다.

Table 1. Strains from FEM analysis at each attachment location of strain-gages of force sensors

Sensor	Strain ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	T_1	C_1	T_2	C_2	ε
Fx	250	-229	229	-250	958
Fy	294	-229	229	-294	1022
F	272	-206	206	-272	956

(a)

(b)

Fig. 8. Manufactured force sensors; (a) Two-axis force sensor and (b) single-axis force sensor.

Table 1은 유한요소법을 이용하여 2축 힘센서와 단축 힘센서의 각 스트레인게이지 부착위치에서의 변형률들과 식 (1)에 의해 계산된 정격변형률들을 나타내고 있으며, Fx센서와 Fy센서는 2축 힘센서의 x방향과 y방향의 힘센서이고, F센서는 단축 힘센서를 나타낸다. 모든 센서의 정격변형률은 설계변수로 결정한 정격변형률 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 내외이었고, 최대오차는 각각 4.2, 2.2, 4.4% 이내이었다. 이와 같은 오차는 설계시 가공의 가능성을 고려하여 감지부의 두께를 0.1 mm단위로 나타내었기 때문이다. 단위를 0.01 mm 단위로 설계하면 매우 근접한 변형률을 얻을 수 있으나 2축 힘센서와 단축 힘센서의 구조가 평행평판보로 구성되었으므로 0.01 mm 단위의 가공이 어렵기 때문이다.

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 9. Experimental setup for the characteristic test of force sensors; (a) Experimental setup, (b) applied x direction rated force (two-axis force sensor), (c) applied y direction rated force (two-axis force sensor), and (d) applied rated force (single-axis force sensor).

Table 2. Rated output from FEM analysis and characteristic test of each sensor of force sensors

Sensor	Rated output (mV / V)		
	FEM	Exp.	Error(%)
Fx	0.48618	0.49859	1.99
Fy	0.51866	0.52638	1.49
F	0.48517	0.49546	1.03

Table 3. Repeatability error and non-linearity error of force sensors

Error (%)	Two-axis force sensor		Single-axis force sensor
	Fx sensor	Fy sensor	F sensor
Repeatability	0.02	0.02	0.02
Non-linearity	0.03	0.03	0.02

2.4 힘센서 제작 및 특성실험

축 힘센서와 단축 힘센서는 Fig. 7에 나타낸 각 센서의 게이지 부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3×5.2 mm)를 부착하고 휘스톤브리지[6-8]를 구성하여 제작하였으며, Fig. 8의 (a)는 제작된 2축 힘센서, (b)는 단축 힘센서의 사진을 나타내고 있다.

Fig. 9는 제작한 3축 힘센서를 특성실험을 위한 실험장치 및 장면을 나타내고 있다. Fig. 9의 (a)는 다축 힘센서 교정기[10]에 2축 힘센서를 고정된 실험장치를 나타내고 있고, 이 다축 힘(모멘트)센서 교정기는 힘 Fx, Fy, Fz를 모두 2000 N, 모멘트 Mx, My, Mz를 모두 500 Nm를 연속적으로 발생시킬 수 있으며, 1×10^{-4} 의 상대확장불확도를 가지고 있으며, 측정은 고성능측정장치 (DMP40)이다. 그리고 Fig. 9의 (b)는 2축 힘센서에 x방향의 정격힘 200 N을 가하는 모습, (c)는 2축 힘센서에 y방향의 정격힘 200 N을 가하는 모습, (d)는 단축 힘센서에 정격힘 200 N을 가하는 모습을 각각 나타내고 있다. 2축 힘센서와 단축 힘센서는 정격힘이 각각 200 N이므로 이들 힘을 가하고 정격출력을 측정하였고, 총 세 번을 실시하여 평균값을 각 센서의 정격출력으로 결정하였다.

Table 2는 2축 힘센서와 단축 힘센서의 유한요소해석과 실험 결과의 정격출력 및 오차를 나타내고 있다. 유한요소해석 결과의 정격출력은 Table 1의 정격변형률을 식 (2)에 적용하여 계산된 것이고, 실험에 의한 정격출력은 본 논문에서 특성실험한 결과를 나타내고 있다. Fx센서와 Fy센서는 2축 힘센서의 각 센서이고 F센서는 단축 힘센서를 의미한다. 유한요소해석 결과를 기준으로 유한요소해석 결과의 오차는 2축 힘센서의 Fx센서와 Fy센서는 각각 1.99%와 1.49%이었다. 그리고 단축 힘센서의 오차는 1.03%이었다. 이들 오차는 스트레인게이지의 부착오차, 감지부의 가공오차, 유한요소 소프트웨어의 고유오차 등으로 생각

된다. 2축 힘센서의 상호간섭오차를 나타내기 위한 특성실험을 실시하였다. Fig. 9의 (b)에 나타낸 것과 같이 2축 힘센서를 고정하고 다축힘센서 교정기를 이용하여 Fx센서의 정격힘 200 N을 가한 후 고성능측정기를 이용하여 Fx센서의 정격출력과 Fy센서의 상호간섭오차를 측정하였다. 그리고 Fig. 9의 (c)에 나타낸 것과 같이 고정한 후 위에서와 같은 과정을 거쳐 Fx센서의 상호간섭오차를 측정하였다. 2축 힘센서의 최대 상호간섭오차는 0.68%이었다.

2축 힘센서와 단축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차를 계산하기 위해 각 센서에 힘 20 N부터 20 N 단위로 200 N까지 증가순과 감소순으로 가하였고, 이때 출력되는 값을 측정하였다. Table 3은 2축 힘센서와 단축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차를 나타낸 것이고, Fx센서와 Fy센서는 2축 힘센서의 각 센서이고 F센서는 단축 힘센서를 의미한다. 2축 힘센서의 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 각각 0.02%와 0.03% 이내이었다. 그리고 단축 힘센서의 최대 재현도오차와 최대 비직선성오차는 각각 0.02% 이내이었다. 제작한 2축 힘센서와 단축 힘센서의 특성실험결과와 상호간섭오차, 재현성오차, 비직선성오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘센서[6-8]의 상호간섭오차와 비슷한 수준이었다. 개발한 2축 힘센서와 단축 힘센서는 크기, 용량, 등에서 개발하고자 하는 지능형 로봇손의 손가락센서로 적합하다고 판단된다.

2.5 제작된 힘센서를 이용한 지능형 로봇손의 손가락

Fig. 10은 본 논문에서 개발한 2축 힘센서와 단축 힘센서를 이용하여 제작한 지능형 로봇손의 손가락을 나타내고 있다. 손가락의 첫째 마디에 부착되어 있는 2축 힘센서는 사람의 손과 같이 엄지, 검지, 중지, 약지 등으로 구성되었을 때 물체무게를 측정하는 데 사용할 뿐만 아니라 깨지거나 떨어지지 않도록 잡는 힘을 제어하는데 사용된다. 그리고 둘째 마디에 부착되어 있

Fig. 10. Manufactured intelligent robot's hand using two force sensors.

는 단축 힘센서는 물체와 접촉되는 힘을 측정하여 깨지지 않도록 제어하는데 사용된다. 추후에 이 손가락을 여러 개 제작하여 지능형 로봇손을 개발하는 연구를 수행할 예정이다.

3. 결 론

본 논문에서는 손가락환자의 재활훈련에 적합한 지능형 로봇손을 위한 손가락 힘센서를 설계 및 제작하였다. 제작한 2축 힘센서의 최대 상호간섭오차가 특성실험결과 0.68% 이내이었고, 2축 힘센서와 단축 힘센서의 재현도오차와 비직선성오차가 각각 0.02%와 0.03% 이내이었음을 확인하였다. 개발한 2축 힘센서와 단축 힘센서의 최대 상호간섭오차, 재현도오차, 비직선성오차가 이미 판매하고 있는 다축 힘센서와 단축 힘센서[6-8]의 그것과 비슷한 수준이므로 손가락환자의 재활훈련용 지능형 로봇손의 손가락의 첫째 마디와 둘째 마디에 부착하기에 적합할 것으로 판단된다. 추후연구로는 제작한 2축 힘센서와 단축 힘센서를 이용하여 지능형 로봇손을 설계 및 제작하고 손가락환자에게 적용하는 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A2A10041417)

REFERENCES

- [1] P. R. Culmer, A. E. Jackson, S. Makower, R. Richardson, J. A. Cozens, M. C. Levesley, and B. B. Bhakta, "A control strategy for upper limb robotic rehabilitation with a dual robot system", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 4, pp. 575-585, 2010.
- [2] L. Pan, A. Song, G. Xu, H. Li, H. Zeng, and B. Xu, "Safety supervisory strategy for an upper-limb rehabilitation robot based on impedance control", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 1-12, 2013.
- [3] S. Liu, Y. Xie, S. Jiang, and J. Meng, "Interactive control for the arm rehabilitation robot", *Intelligent Systems and Applications, ISA 2009, International Workshop on*, pp. 1-4, 2009.
- [4] Y. Ren, H. S. Park, and L. Q. Zhang, "Developing a whole-arm exoskeleton robot with hand opening and closing mechanism for upper limb stroke rehabilitation", *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, pp. 761-765, 2009.
- [5] L. Y. Joo, T. S. Yin, D. Xu, E. Thia, P. F. Chia, C. W. K. Kuah, and K. K. He, "A feasibility study using interactive commercial off-the-shelf computer gaming in upper limb

- rehabilitation in patients after stroke”, *Journal of Rehabilitation Medicine*, vol. 42, No. 5, pp. 437-441, 2010.
- [6] 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.
- [7] G. S. Kim, “Design of a three-axis force sensor for wrist bending-exercise rehabilitation robot”, *J. Sensor Sci. & Tech.*, vol. 22, no. 2, pp.118-123, 2013.
- [8] ATI Industrial Automation, *Multi-Axis Force/Torque Sensor*, Industrial Automation, pp. 4-45, 2005.
- [9] G. S. Kim and J. W. Yoon, “Development of calibration system for multi-Axis force/moment sensor and its uncertainty Evaluation”, *Korean Society of Precision Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 91-98, 2007.