소형화된 융합(촉각 및 힘)센서 시스템의 구현을 위한 힘벡터 측정 기법*

(Force-vector Measurement Technique for Implementation of a Miniaturized Sensor Fusion System)

윤여림, 한헌수

숭실대학교 공과대학 정보통신전자공학부

156-743 서울시 동작구 상도 5 동 1-1

(Tel&Fax: 02-810-0709 E-mail: hahn@logos.soongsil.ac.kr)

요약

로봇 손이 자율적으로 동작하는데 있어서 촉각 센서는 매우 중요한 역할을 한다. 지금까지 로봇 손가락을 위한 광촉각 센서 융합 시스템들이 제안된 바 있으나 대부분 복잡한 시스템 구조로 인한 물리적인 한계로 소형화가 어렵다는 점이 커다란 문제였다. 본 논문에서는 복잡한 구성의 힘/역각 센서를 대치할 수 있는 3 점 힘센서를 구성하여 힘벡터를 측정하는 기법을 제안한다. 이 센서는 힘/역각 센서보다 간단한 구성으로 경제적으로 제작할 수 있다는 장점이 있으며 소형화 할 수 있기 때문에 로봇 손을 정밀 작업등에 응용할 수 있게 할 것이다.

1. 서론

산업 자동화, 위험 지대의 원격 조작, 의용 기기등에 폭넓게 응용 가능한 로봇 손(Robot Hand)은 물체에 능동적으로 접촉하여 이를 다루는 장비이다. 접촉이 이루어지는 만큼 그 접촉에 대한 정보를 획득하고 해석을 하는 것은 로봇 손에 있어서 두가지의 큰 의미가 있다. 첫째, 적정한 크기와 방향의 힘을 인가하여 로봇 손이 효율적으로 대상 물체를 쥐고 이동 및 조작을 할 수 있도록 하는 제어의 관점에서이고, 둘째, 접촉하는 대상의 형태를 파악하는 물체 인식의 관점에서이다[4]. 이는 로봇 손에 있어서 접촉에 대한 정보를 취득하고 처리하는 촉각 센서가 무엇보다 중요하다는 것을 보여준다.

지금까지 다양한 방법으로 로봇 손가락의 형태를 가진 촉각 센서들이 제안되어 왔다. 광촉각 센서와 힘 센서로 구성된 광촉각 센서 융합 시스템이 그 중 하나의 방법으로 접촉하는 물체의 형태를 인식할 수 있다는 장점을 가진 시스템이다[1,2]. 그러나 기본적인 구조의 복잡성으로 인해 시스템의 크기가 클 수 밖에 없었다는 문제점이 남아 있었다. 특히 이 문제는 힘 센서로 쓰이는 6 축 힘/역각 센서(Force/Torque Sensor)의 크기에 기인한다. 범용 힘/역각 센서의 경우 직경이 10cm 안팎으로 일반적인 로봇 손가락의 직경이 2~3cm 라고 가정을 한다면 최소 5 배의 차이가 발생한다. 물론 현재 상용화 된 6 축 힘/역각 센서 중 최소 지름 2.5Cm 정도로 시장에 나와 있다고 하나 무엇보다 고가의 가격으로 경제성이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문은 광촉각 센서의 소형화에 장애가 되는 여러 문제점들 중, 힘/역각 센서의 소형화의 한계를 극복하는 방법을 제안 한다. 힘/역각 센서 사용 목적이 접촉 지점의 힘의 크기와 방향을 측정하는 것이므로 이를 대치할 수 있도록 스트레인 게이지를 이용한 3 점 힘 센서를 제작하고 이를 이용하여 접촉 지점의 힘의 크기와 방향을 측정하는 방법을 사용한다. 이는 힘/역각 센서가 갖고 있는 크기의 문제를 해결할 뿐 아니라 힘/역각 센서가 기본적으로 필요한 스트레인 게이지 개수를 대폭 줄여 시스템의 단순화를 이루고, 상대적으로 저렴한 가격으로 제작할 수 있다는 장점을 보여 갖는다.

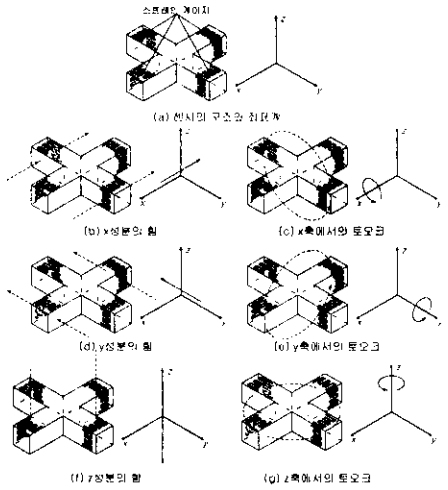

그림 1 일반적인 6 축 힘/역각 센서의 구조

2. 촉각 센서 융합 시스템의 소형화

2.1 소형화의 문제점

기존에 제안 되었던 시스템의 문제점은 시스템의 크기 외에도 시스템 구성의 복잡성에 기인한다. 이 복잡성 또한 시스템의 크기에 많은 영향을 미치게 되는 주요한 요인이다. 그런 의미에서 보았을 때, 촉각 영상을 취득하는데에 있어 무엇보다 중요한 것이 힘 벡터 센서인데, 이것으로 사용되어진 힘/역각 센서 역시 내부적으로 복잡한 구성을 가지고 있다. 이는 x,y,z 를 정규 직교 기저로 갖는 3 차원의 힘벡터와 각 축의 토오크를 측정하기 위해 기하학적인 형태(하나의 수평면과 그것과 직교하는 수평면이 하나 이상 존재)를 갖고 있는 강체 표면에 스트레인 게이지들이 배열, 부착 되는 센서 시스템이다. 결국 기존의 센서 시스템의 크기를 1/2 를 줄인다고 가정하면 스트레인 게이지를 배치 할 수 있는 면적은 1/4 로 줄어들 것이며, 1/5 을 줄인다면 1/25 나 표면적이 줄어들기 때문에 그것에 배치할 스트레인 게이지 역시 더욱 작아져야 하며 감도는 더욱 높아져야 할 것이다.

* 본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구지원사업 (과제번호: 961-0924-142-2)의 지원으로 이루어졌습니다.

2.2 힘벡터 센서의 문제 해결

그러나 위와 같은 문제는 광촉각 센서와 힘벡터 센서를 독립된 센서부로 분리 하지 않고 하나의 통합 시스템으로서의 소형화를 고려 해 보면 문제는 달라질 것이다. 광촉각 센서 융합 시스템은 기본적으로 광촉각 센서와 힘벡터 센서로 구성이 되어야 하므로 광촉각 센서 융합 시스템의 기하학적인 구조를 이용한다면 단순히 스트레인 게이지의 배치와 광촉각 센서에서의 일부 정보 만으로 힘벡터의 크기를 측정할 수 있을 것이라고 가정하였다.(단, 제한 조건은 스트레인 게이지의 부착으로 촉각 영상 취득이 방해받지 않아야 한다는 전제가 있어야 한다.)

결국, 하나의 수평면에 3 점 힘센서(스트레인 게이지)를 배치하고, 이것들의 측정 값과 광촉각 센서에서의 계측된 접촉점의 위치로 힘벡터를 측정하여, 궁극적으로는 힘/역각 센서의 복잡한 기하학적 구조를 없애고 스트레인 게이지의 개수를 대폭 감소한 센서 모델을 제시하고자 한다.

2.3 소형화 광촉각 센서 융합 시스템의 구성

소형화 광촉각 센서 융합 시스템은 기존의 광촉각 센서 융합 시스템과 크게 다르지 않다. 이전 것과 마찬가지로 광촉각 센서부(아직은 광촉각 센서부에 대한 자세한 구성은 완성이 안 된 상태로 향후 보완할 예정으로 있으나, 접촉 위치 측정을 위해 시각 센서인 소형화 CCD 카메라가 배치되어 있다.)와 힘벡터 센서부로 구성되어 있다. 그러나 힘벡터 센서부는 기존의 힘/역각 센서와는 달리 동

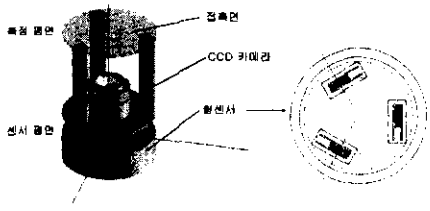

그림 2 소형화 센서 시스템의 구성

일한 평면상에 원점을 기준으로 같은 거리에 있는 스트레인 게이지를 120 도의 간격으로 3 개만 배치한 단순한 구조를 갖는다. 또한 힘은 다른 부분으로의 손실이 없이 오직 이 세점에만 작용할 수 있도록 접촉심이 힘벡터 센서부를 지지하고 있다.

2.4 소형화 광촉각 센서 융합 시스템의 좌표계

소형화 광촉각 시스템에서 좌표계의 구성은 다음과 같다. 힘벡터 센서, 즉 3 점 힘센서가 위치한 평면을 기준으로 원점을 잡는다. 원점을 중심으로 단위거리 1 만큼 떨어져 있는 힘센서(스트레인 게이지)를 120 도의 간격으로 배치를 하면 각 센서의 위치 벡터는 다음과 같다.

$$\vec{r}_1=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix},\ \vec{r}_2=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}\\\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix},\ \vec{r}_3=\begin{bmatrix}-\frac{1}{2}\\-\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix},\ \vec{r}=\begin{bmatrix}\vec{r}_1^{\,t}\\\vec{r}_2^{\,t}\\\vec{r}_3^{\,t}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0\\-\frac{1}{2}&\frac{\sqrt{3}}{2}\\-\frac{1}{2}&-\frac{1}{2}\end{bmatrix}\quad(1)$$

각 스트레인 게이지에서 측정한 힘 측정값은 R_1, R_2, R_3 이고, 힘측정벡터는 $\vec{R}=\begin{bmatrix}R_1 & R_2 & R_3\end{bmatrix}$ 로 표현한다. 그리고 이 x,y 평면에서 z 축으로 거리 L 만큼 떨어져 있는 곳에 접촉면이 존재한다고 가정하면, 센서 좌표축을 중심으로 접촉점은 위치벡터 $\vec{p}$ 라고 표현 할 수 있고, $\vec{p}$ 는 x,y 평

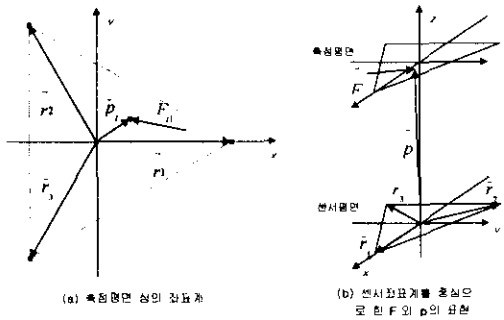

그림 3 센서 시스템의 좌표계

면에서의 접선 성분 $\vec{p}_t$ 와 z 방향으로의 수직 성분인 p_n 을 분리할 수 있다. 따라서 p_n 은 접촉점과 상관없이 항상 상수이며 접촉면과 센서면과의 거리가 된다. 여기에서 첨자 t 는 x,y 평면에서의 접선(tangential)성분을, n 는 x,y 평면과 수직하고, z 축과 평행인 수직(normal)성분을 의미한다. 그리고 접촉점 $\vec{p}$ 에 가해지는 힘은 힘벡터 $\vec{F}$ 로 표기 한다. 가해진 힘 $\vec{F}$ 는 각 스트레인 게이지에 전달되어 R_1, R_2, R_3 로 분배된다.

2.5 3 점 힘센서에 작용하는 힘의 모델링

2.5.1 순수한 힘의 수직 성분

접촉점 $\vec{p}$ 에 작용하는 힘의 수직 성분 F_n 이 힘센서의 수직성분 측정값 $\vec{R}_n$ 에 작용 하는 것은 다음과 같이 모델링 할 수 있다. 힘의 배분에 의해[8] $\vec{r}_1$ 에 위치하는 센서의 수직 성분 측정값 R_{n1} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_{n1}}{F_n}=\frac{\left(\vec{p}_t-\frac{\vec{r}_2+\vec{r}_3}{2}\right)\cdot\vec{r}_1}{\left(\vec{r}_1-\frac{\vec{r}_2+\vec{r}_3}{2}\right)\cdot\vec{r}_1}=\frac{2\vec{p}_t\cdot\vec{r}+1}{3}\quad(2)$$

R_{n2} 와 R_{n3} 도 마찬가지로 정리 할 수 있으므로, $\vec{R}_n$ 을 다음과 같이 일반화 할 수 있다.

$$\vec{R}_n=\begin{bmatrix}R_{n1}\\R_{n2}\\R_{n3}\end{bmatrix}=\frac{2F_n}{3}\vec{r}\cdot\vec{p}_t+F_n\quad(3)$$

2.5.2 순수한 힘의 접선 성분

3 점 힘센서가 위치한 x,y 평면은 고정체로 이동을 할 수 없으므로 힘의 접선 성분 $\vec{F}_t$ 에 의해 원점을 중심으로 각 센서에 힘의 모멘트 성분이 나타나게 된다. 힘의 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{p}\times\vec{F}_t\quad(4)$$

각 센서에 작용하는 힘의 모멘트는 위치벡터 $\vec{p}$ 와 수직하는 성분인 $\vec{F}_t\cos\theta$ 인데, 이것과 각 센서가 측정하는 힘의 크기 비율은 다음과 같다.

$$\frac{R_{t1}}{\vec{r}_1\cdot\vec{F}_t\cos\theta}=\frac{\|\vec{p}\|}{\|\vec{r}_1\|}=\|\vec{p}\|\quad(5)$$

$\cos\theta$는 $\frac{p_n}{\|\vec{p}\|}$이므로 다시 정리를 하고 일반화를 하면 다음과 같다.

$$\vec{R}_t = \begin{bmatrix} R_{t1} \\ R_{t2} \\ R_{t3} \end{bmatrix} = p_n \vec{r} \cdot \vec{F}_t \tag{6}$$

2.5.3 힘의 수직 성분에 의한 모멘트 성분

$\vec{p}_n$가 원점에 있는 경우를 제외하면 힘의 수직 성분에 의해 힘의 모멘트 효과가 나타난다는 것을 알 수 있다. 이 성분을 측정하는 각 센서의 값을 $\vec{R}_m$으로 놓으며, 이 값은 힘의 접선 성분에 의한 값과 유사하게 됨을 알 수 있다.

$$\frac{R_{m1}}{\vec{r}_1 \cdot \vec{p}_t F_n \sin\theta} = \frac{\|\vec{p}\|}{\|\vec{r}_1\|} = \|\vec{p}\| \tag{7}$$

한편, $\sin\theta$는 $\frac{\|\vec{p}_t\|}{\|\vec{p}\|}$이므로,

$$\vec{R}_m = \begin{bmatrix} R_{m1} \\ R_{m2} \\ R_{m3} \end{bmatrix} = \|\vec{p}_t\| F_n \vec{r} \cdot \vec{p}_t \tag{8}$$

결국, 각 센서는 힘의 수직 성분, 수직 성분에 의한 모멘트, 힘의 접선 성분에 의한 값을 얻게 된다.

$$\vec{R} = \vec{R}_n + \vec{R}_m + \vec{R}_t \tag{9}$$

3. 3점 힘센서와 시각 센서를 이용한 접촉점의 힘 벡터 측정

광촉각 센서가 위치 벡터 $\vec{p}$를 측정하였다고 가정을 하면 3점 힘센서에서 측정한 힘의 측정 벡터 $\vec{R}$을 바탕으로 접촉점에서의 힘의 방향과 크기, 즉 힘벡터 $\vec{F}$를 계산해 낼 수 있다.

3.1 힘의 수직 성분 검출

정리 1. 구해진 측정 벡터 $\vec{R}$의 원소 R_1, R_2, R_3는 다음의 관계식을 만족한다.

$$R_1 + R_2 + R_3 = \sum_{i=1}^{3} R_{ni} + \sum_{i=1}^{3} R_{mj} + \sum_{i=1}^{3} R_{tj} = F_n \tag{10}$$

식 (20)는 다음의 보조 정리를 통해 증명이 가능하다.

보조 정리 1. 수직으로 인가 되는 힘 F_n에 의한 측정 벡터 $\vec{R}_n$의 각 원소의 합은 F_n이다.

증명.

식 (3) 에 의해 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} &= \left(\frac{2\vec{p}_t \cdot \vec{r}_1 + 1}{3} + \frac{2\vec{p}_t \cdot \vec{r}_2 + 1}{3} + \frac{2\vec{p}_t \cdot \vec{r}_3 + 1}{3} \right) F_n \\ &= \left(\frac{2\vec{p}_t \cdot (\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3)}{3} + 1 \right) F_n = F_n \end{aligned} \tag{11}$$

보조 정리 2. 접선 방향으로 인가 되는 힘벡터 $\vec{F}_t$에 의한 측정 벡터 $\vec{R}_t$의 각 원소의 합은 0 이다.

증명.

식 (6)에 의해 다음과 같이 식을 전개할 수 있다.

$$R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} = p_n (\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3) \cdot \vec{F}_t = 0 \tag{12}$$

보조 정리 3. 수직 성분에 의한 힘 F_n에 의한 모멘트 성분인 F_m에 의한 측정 벡터 $\vec{R}_m$의 각 원소의 합은 0 이다.

증명.

정리 2 의 증명과 마찬가지로 식 (8)을 이용해 다음을 전개한다.

$$R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} = \|\vec{p}_t\| F_n (\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3) \cdot \vec{p}_t = 0 \tag{13}$$

결국 정리 1,2,3 에 의해 식 (10)이 성립이 된다.

따라서 측정 벡터 $\vec{R}$의 원소의 합을 식 (3)에 대입을 하면 벡터 $\vec{R}_n$을 구할 수 있다.

$$\vec{R}_n = \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2} \\ R_{n3} \end{bmatrix} = \frac{2\sum_{i=1}^{3} R_i}{3} \vec{r} \cdot \vec{p}_t + \sum_{i=1}^{3} R_i \tag{14}$$

3.2 힘의 수직 성분에 의한 모멘트 성분 검출

$\vec{R}_m$도 마찬가지로 식 (8)에 대입함으로 구할 수 있다.

$$\vec{R}_m = \begin{bmatrix} R_{m1} \\ R_{m2} \\ R_{m3} \end{bmatrix} = \|\vec{p}_t\| \sum_{i=1}^{3} R_i \vec{r} \cdot \vec{p}_t \tag{15}$$

3.3 힘의 접선 성분 검출

힘의 접선 성분에 의한 측정 벡터 $\vec{R}_t$는 이미 앞서 구한 $\vec{R}_n, \vec{R}_m$에 의해 구할 수 있다.

$$\vec{R}_t = \vec{R} - (\vec{R}_n + \vec{R}_m) \tag{16}$$

그러나 $\vec{F}_t$를 구하기 위해서는 궁극적으로 식 (6)의 역행렬을 구해야 한다. 따라서 벡터 $\vec{r}$ 성분의 3 열에 1 을 넣은 후 의사 역행렬(psuedo inverse matrix)를 구하면 $\vec{F}_t$를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{p_n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \vec{R}_t \tag{17}$$

4. 실험 및 결과

4.1 센서의 구성

구현된 소형화 힘센서는 그림 18 에서 보는 바와 같다. 센서 몸체는 알루미늄으로 선반 가공 되었으며 부착된 힘센서는 Tokyo Sokki Kenkyjo 의 FLA-2-11 스트레인 게이지를 사용하였다. 접촉면의 반지름은 최소 4.25mm 최대 8.5mm 로 이후 보여지게 될 실험 결과에서 원점에서의 최대거리를 1 로 normalize 를 하였다. 또한 센서 평면에서 접촉 평면까지의 단위 거리는 8 로 실제 거리는 68mm 이다. 센서 시스템의 컨트롤러로는 원칩 마이크로 컨트롤러 8051 호환 계열인 ATMEL 의 AT89C51 을 사용하였으며 AD 컨버터로 BurBrown 의 12 비트 ADC574A 를 사용하여 RS232 통신을 통해 추 컴퓨터인 Pentium PC 에 데이터를 전송하여 처리한다. 한편 센서 취득부는 각 채널당 OP27 두개와 하나의 741OP 앰프로 차동 증폭하나 스트레인 게

그림 4 제작된 실제 시스템

이지에 대한 잡음과 열에 대한 보상 회로는 따로 장착되어 있지 않았다.

4.2 각 힘 성분을 고려한 힘 측정값과 오차 해석

성능 평가를 위한 실험은 두 부분으로 실행이 되었다. 첫째는 원점에서 시작하여 0.5 단위 거리(0.425mm)의 간격으로 순수한 수직 성분의 힘을 가하여 실제 힘과 측정된 값의 오차를 구하였으며, 둘째로 1N 에서 10N 까지의 힘을 1N 씩 증가시켜 접선 성분의 힘만을 가하여 측정된 힘 벡터 값의 오차를 구하였다.

그림 5(a)는 힘의 수직 성분의 측정 오차율을 나타낸 그래프이다. 접촉점의 위치가 원점에서 멀어질수록 오차가 점차 증가됨을 알 수 있는데 이는 수직 성분에 대한 힘의 모멘트 효과에 의한 오차가 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. 실험적으로 원점에서 거리당 최대 5%의 오차를 보인다고 가정을 하면 오차는 15 의 기울기를 갖게 되고, 예측 오차 범위 내외에서 오차가 발생함을 알 수 있다. 실제로 개개의 힘 센서는 잡음 및 온도 보상에 대한 회로가 부가 되지 않은 상황에서 약 5%에서 최대 10%이내의 오차를 보였다. 실험에서는 1N, 2N, 4N, 8N 에 대한 각각의 오차율은 4.26%, 4.83%, 3.24%, 2.77%이고 전체 평균 3.78% 이다.

그림 5(b)는 힘의 접선 성분의 힘의 크기에 따른 측정 오차값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 사실은 힘이 증가 할수록 오차값은 점점 커진다는 것이다. 왜냐하면 센서가 위치한 차원은 실제 측정할 수 있는 차원이 아니며 모멘트 효과에 의해 측정된 값을 계산에 의해 구한 결과이기 때문에 인가된 힘이 커질수록 오차는 점차 커지기 때문이라고 판단된다. 앞서 수직 성분에 대한 오차와 마찬가지로 접선 성분에 대한 힘의 오차는 수직 성분값의 오차로 나타나게 된다. 따라서 전체 오차는 수직성분에 대한 오차인 z의 오차가 대부분의 비율을 나타내게 된다. 이와 비교하기 위해 예측 오차 범위를 설정 하였다. 실험적으로 힘의 크기당 $1-\exp(\|\vec{F}\|/3)$ 의 기울기로 오차가 발생한다고 가정을 하면 3N~9N 범위에서 근사한 결과을 얻을 수 있다. 이 실험에서 1N~10N 까지의 전체 평균 측정 오차율은 10.70%이다.

전반적으로 원점에서 거리가 0.5 이내, 수직에서 45 도 이내의 방향에서 4~8N 의 범위의 힘을 측정하였을 때 최적의 결과를 보여주었는데 이때의 오차율은 3%이내였다.

5. 결론 및 향후 과제

소형화 광축각 센서 융합 시스템의 첫 단계로 힘벡터 센서의 소형화를 구현하였다. 이는 복잡한 구성을 갖고 있는 힘/역각 센서가 취득 해 왔던 힘 벡터를 3 점 힘센서를 이용하여 측정하였다. 비록 오차율이 각각 거리와 힘의 크기에 커지는 양상을 보이지만 이는 잡음과 열 보상에 대한 회로와 보다 정밀한 센서 시스템의 틀(frame)의 설계로 최소화 할 수 있을 것이다. 이러한 단점을 극복한다면, 기존의 힘/역각 센서와 비교해 보았을 때 구성면으로 단순하고 간결하므로 센서의 제작이 쉬우며 경제적이라는 장점이 있으며 보다 더 소형화 할 수 있는 가능성이 엿 보인다. 게다가 이미 내장하고 있는 시각 센서인 카메라를 이용 했다는 점이 센서 정보 융합이라는 점에서 보다 의의가 크다고 할 수 있다.

그러나 아직도 소형화에 대한 숙제가 남아 있다. 광축각 센서의 소형화에 의한 영상 인식 알고리즘이 그것이다. 측정 가능한 영상 범위가 축소가 되므로 물체 인식이 보다 더 어려워질 전망이다. 이 점 외에도 광축각 센서의 조명을 위한 부분등에 좀 더 관심을 갖고 노력을 기울인다면 물체 인식을 위한 로봇 손가락 시스템의 구현은 좀 더 현실로 다가올 것이라고 기대한다.

참고 문헌

[1] 한헌수, "3 차원 접촉면의 인식 및 위치의 결정을 위한 광축각 센서와 역학 센서의 다중 센서 시스템", 대한전자공학회 논문지-A, 제 33-A 권 2 호, pp 10~19, 1996 년 2 월.

[2] Dong-Hwan Ko and Hernsoo Hahn, "Recognition of Contact Surface Using Optical Tactile and F/T Sensors Integrated by Fuzzy Fusion Algorithm", Proc. 5th IEEE Int. Workshop on Robot and Human Comm., pp352~357, 1996.

[3] H. Maekawa, K. Tanie, K. Komoriya and M. Kaneko, "Development of a Finger Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch", Proc. IEEE. Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1328~1334,1992.

[4] D. Johnson, P.Zhang, J. Hollerbach, S.Jacobsen, "A Full Tactile Sensing Suite for Dextrous Robot Hands and Use in Contact Force Control", Proc. IEEE. Int. Conf. Robotics and Automation, 1996.

[5] Y. Yamada, M.R. Cutkosky, "Tactile Sensor with 3-Axis Force and Vibration Sensing Fuctions and Its Application to Detect Rotational Slip", Proc. IEEE. Int. Conf. Robotics and Automation, 1994.

[6] M. Kaneko, "A New Design of Six-Axis Force Sensors", Proc. IEEE. Int. Conf. Robotics and Automation, 1993.

[7] M.M. Svinin, M. Uchiyama, "Optical Geometric Structures of Force/Torque Sensors", Int. J. Robotics Research, vol. 14, no.6, 1995.

[8] C.W. deSilva, "Control Sensors and Actuators", Prentice-Hall, pp 199~205, 1989.

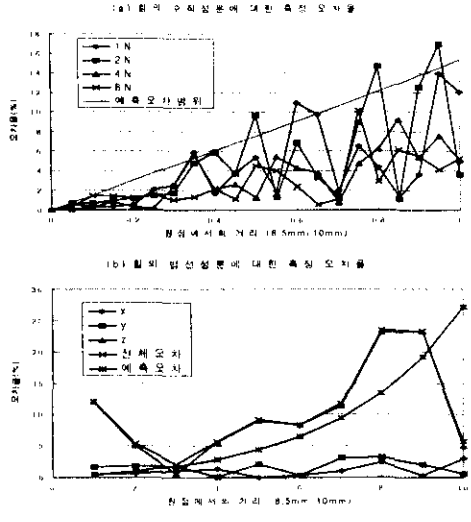

그림 5 실험 결과