

論文96-33B-2-2

## 3차원 접촉면의 인식 및 위치의 결정을 위한 광촉각센서와 역각센서의 다중센서시스템

### (Multisensor System Integrating Optical Tactile and F/T Sensors for Determination of Type and Position of 3D Contact Surface)

韓獻洙 \*

(Hernsoo Hahn)

#### 요 약

본 논문에서는 3차원 물체와 접촉하여 접촉면의 종류와 위치를 측정할 수 있는 손가락 형태의 다중센서 시스템을 개발한다. 다중센서 시스템은 손가락 끝에 위치하는 구형의 광촉각센서와 끝마디에 위치하는 역각센서로 구성된다. 광촉각센서는 구형의 광파매체에 광을 조사하고 접촉면에서 불규칙 반사가 발생하여 생성된 접촉부위의 영상이 CCD에 맺히도록 하는 구조를 갖는다. CCD에 얻어진 영상의 위치와 형태를 통해 접촉면의 종류와 위치를 측정한다. 또한 역각센서에서 얻어진 힘의 분포와 센서의 구조 방정식을 이용하여 측정면의 위치와 법선벡터를 계산할 수 있다. 각각의 센서에서 얻어진 위치 및 법선정보는 각 센서의 통계학적 특성을 나타내는 위치구와 법선원추를 이용한 지도도를 무게값으로 융합되어 측정부위의 위치와 법선벡터를 결정하게 된다. 개발된 센서는 센서원형을 구성하여 실험하였으며 위치 측정에서 0.8mm, 법선벡터 측정에서 1.31°의 평균오차를 갖는다. 이 센서는 자율성을 필요로 하는 지능형 로봇에 부착되어 물체의 인식과 분류, 안정적인 부품의 파지 등에 응용될 수 있다.

#### Abstract

This paper presents a finger-shaped multisensor system which can measure the type and position of a target surface by contact. The multi-sensor system consists of a sphere-shaped optical tactile sensor located at the finger tip and a force/torque sensor located at the joint of a finger. The optical tactile sensor determines the type and position of the target surface using the shape and position of the CCD image of the touching area generated by a contact between the sensor and the target surface. The force/torque sensor also determines the position and surface normal vector by applying the distribution of forces and torques at the contact point to the equations of finger shape. The measurements on the position and surface normal vector at a contact point obtained by two individual sensors are fused using a statistical method. The integrated sensor system has 0.8mm error in position measurement and 1.31° error in normal vector measurement. The developed sensor system has many applications, such as autonomous compliance control, automatic grasping and recognition, etc.

\* 正會員, 崇實大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Soongsil University)

※ 본 연구는 숭실대학교 교내 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었음.

接受日字: 1995年9月5日, 수정완료일: 1996年1月19日

#### I. 서 론

부품의 조립이나 분류와 같은 자동화 작업의 수행에 있어서 부품의 종류를 인식하고 위치를 결정하는 일은 작업의 정확성을 위해 반드시 필요한 과정이다. 부품의

종류와 위치의 결정은 전체 공정에 걸쳐있는 여러 과정에서 다양한 센서에 의해 이루어진다. Luo<sup>[11]</sup>는 인식작업이 이루어지는 과정을 물체와의 거리에 따라 원거리, 근거리, 접촉, 그리고 조작의 네가지 단계에서 구분하고 있다. 처음의 두 단계에서는 물체의 형태나 색깔과 같은 광역정보를 이용하고, 다음의 두 단계에서는 접촉물체의 위치나 압력분포등과 같은 지역정보를 이용한다.

실제로 개발된 많은 자동화 시스템들은 이와 같이 원거리 혹은 근거리에서 부품의 종류 및 위치를 결정하고 접촉 및 조작단계에서는 단순히 주어진 물체정보에 의존하여 작업을 진행하는 접근방법을 택하고 있다. 하지만, 이러한 방법은 부품의 위치에 대한 정보, 그리고 접촉면의 상태에 대한 가장 정확한 정보가 부품과의 접촉 및 조작 단계, 즉 파지 시에 얻을 수 있다는 점을 간과하고 있다. 이러한 점에 유의하여, 최근에는 물체와의 접촉이 발생하는 로봇의 손에 접촉면의 특성, 그리고 접촉점의 위치와 접촉점에서의 힘의 분포등을 측정하기 위한 지능형 센서들이 활발하게 연구, 개발되고 있다. 특히, 물체의 포즈에 대한 가장 정확한 정보는 물체를 직접 접촉 혹은 파지할 때 얻을 수 있다는 점과 파지 전에 아무리 정확한 위치 정보가 주어지더라도 파지 시에 오차가 발생한다는 점을 고려하여 로봇 손가락에 설치가 가능한 다목적용 센서의 개발이 최근 큰 관심을 끌고 있다. 예를 들면, Begie<sup>[12]</sup>는 구형의 광파전달매체를 이용하여 소형의 택타일 센서를 만들어 로봇의 손가락에 부착이 가능하도록 함으로써 물체의 형태와 위치를 파지를 위한 접촉 시에 결정할 수 있도록 하였다. Brock<sup>[13]</sup>는 손목에 설치된 역각센서를 이용하여 물체의 미끄럼 뿐 아니라 접촉부위의 표면수직벡터와 위치정보를 얻어냈다. Nakao<sup>[14]</sup>의 경우는 Begie의 센서가 미끄럼을 방지할 수 없다는 단점과 Brock의 센서가 복잡한 계산을 수반한다는 단점을 보완하기 위해 구형의 광파전달매체를 이용하면서도 접촉면의 표면수직벡터를 측정할 수 있는 측정방법을 제안했다. 하지만 Nakao의 택타일 센서도 접촉되는 면의 중심점에 관한 정보만을 이용하고 있어서 접촉면의 형태에 대한 측정은 불가능하다. 이와 함께 여러 종류의 센서를 이용하여 각각의 센서가 갖는 단점을 보완하기 위한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.<sup>[15,6]</sup>

본 논문에서는 센서의 모양을 손가락 형태로 하여

로봇의 손에 설치할 수 있고 특히 기존의 센서들이 갖지 못하는 접촉면의 종류 판별능력을 갖추고 접촉되는 힘의 측정이 가능한 다중센서시스템을 개발한다. 제안된 다중센서시스템은 광촉각(optical tactile)센서와 역각(force/torque)센서로 구성되며, 로봇의 손가락 끝에 설치할 수 있도록 설계한다. 구형의 광촉각센서시스템은 접촉지점의 위치와 접촉면의 윤곽선을 측정할 수 있다. 접촉면의 윤곽선은 센서의 형태와 함께 접촉면의 형태에 대한 정보를 제공하며 이를 이용하여 물체의 종류를 추정할 수 있게 한다. 또한 역각센서는 접촉시의 힘과 뒤틀림의 정도를 측정하여 접촉점의 위치와 표면의 법선을 측정할 수 있게 한다. 각각의 센서에서 얻어진 위치 및 법선 정보는 보다 정확한 계산을 위해 위치구와 법선원추를 이용하여 통계학적 방법으로 융합된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 광촉각센서 시스템과 역각센서 시스템의 구성과 측정 원리를 설명하고 있다. 광촉각센서는 일본의 기계공학연구소(MEL)<sup>[7]</sup>에서 개발된 센서에서 접촉면의 정보를 활용하기 위해 수광부를 CCD로 교체하여 확장된 측정범위를 갖도록 하였다. 역각센서의 측정원리는 Bicci<sup>[8]</sup>가 제안한 방법을 손가락 형태의 구조물에 응용하고 있다. 3장은 두 가지의 다른 센서로 구성된 다중센서시스템에 의해서 수집된 접촉점의 위치 및 법선 정보를 위치구와 법선원추를 이용하여 융합하는 알고리즘을 설명한다. 4장은 제작된 센서를 이용하여 실험을 통해 얻은 성능평가 결과를 보여주고 있다.

## II. 센서 시스템

### 1. 센서시스템의 구성

본 논문에서 제시하는 센서시스템은 그림 1에 보이는 것처럼 광촉각센서와 역각센서로 구성된다. 광촉각센서는 MEL 센서를 모델로하고 수광부를 개선하여 접촉면의 형태를 인식하는 기능을 갖도록 설계하였으며, 역각센서는 미국의 ATS사가 개발한 6축 역각센서를 이용하고 있다. 두 가지 종류의 센서는 손가락형태를 갖는다. 광촉각센서의 구형 광파매체가 손가락 끝에 위치하고 연결통에 의해 역각센서가 위치한 손가락 마디로 연결된다. 외부결선은 광촉각센서에 제공하는 광원과 CCD출력, 그리고 역각센서의 출력선이다. 측정면과의 접촉은 구형광파매체에서 발생하며 가해진

힘은 연결원통에 의해 역각센서에 전달된다. 로봇의 end-effector 혹은 손가락과의 결합은 역각센서에 구조물을 부착하여 가능하다.

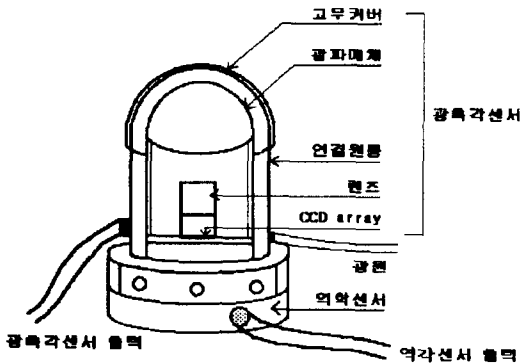


그림 1. 제안된 센서시스템의 구성도.  
Fig. 1. Configuration of the proposed sensor system.

2. 광촉각센서

광촉각센서는 그림 1에서와 같이 구의 형태인 광파매체, 광원, 고무커버, 2차원 CCD 배열 등으로 구성되어 있다. 고무커버와 광파매체의 표면사이는 일정한 거리가 유지되도록 하였으며 하나의 광원에서 제공되는 빛은 광섬유를 이용하여 광파매체에 조사된다. 광원이 광파매체에 고르게 빛을 전달하도록 광파매체의 주변에 등간격으로 광섬유를 배치하였다. 광파매체에 주입된 빛은 표면반사에 의해 외부로 투과되지 않고 매체 내에서 전달된다. 그러나 광파매체의 표면에 물체의 접촉이 생기면 접촉부위에서 난반사가 생겨나고 이로 인해 접촉부위의 반대 편은 밝게 된다. 이러한 원리를 이용하여 접촉으로 인해 생긴 영역의 영상을 구의 중심에 있는 집광렌즈를 통해 CCD 배열 위에 얻게 된다. 접촉부위의 3차원 좌표값은 삼각측량법에 의해, 그리고 접촉면의 형태는 영상의 외곽선 모양에 의해 결정된다.

접촉부위의 좌표값 결정

광촉각센서를 이용한 접촉부위의 위치의 결정은 센서의 구조를 이용한 삼각측량법에 의해 시행된다. 광파매체에 측정면과의 접촉이 발생하면 측정면의 영상의 중심값을 접촉점으로 간주하고 이에 대응하는 광파매체 상의 위치를 다음과 같이 결정한다.

그림 2에서 처럼 광파매체 상의 한점  $P=(X_p, Y_p, Z_p)$ 의 영상은 CCD 배열의 한점  $P'=(X_{p'}, Y_{p'})$ 에 일

대일 대응하게 된다.

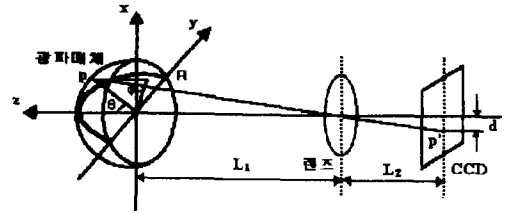


그림 2. 광촉각센서의 측정원리.  
Fig. 2. The measurement principles of the optical tactile sensor.

광촉각센서 좌표계의 원점을 CCD 배열의 중앙, 즉 렌즈의 중심축과 만나는 점으로 정하면 접촉점 P의 좌표는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \sin \theta \cos \phi \\ R \sin \theta \sin \phi \\ R \cos \theta + L_1 + L_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 좌표를 결정하는데 필요한  $\theta$ 와  $\phi$ 는 CCD 배열 상에서 측정된  $P'$ 의 좌표값과 센서의 기하학적인 구조에 의해 얻어진  $\alpha = \tan^{-1}d/L_2$ 와  $L = dL_1/L_2$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\phi = \text{atan}2 \frac{Y_{p'}}{X_{p'}} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{RL \tan^2 \alpha + \sqrt{R^2 L^2 \tan^4 \alpha - R^2 (\tan^2 \alpha + 1)(L^2 \tan^2 \alpha - R^2)}}{R^2 (1 + \tan^2 \alpha)} \quad (3)$$

인식되는 표면의 종류

광촉각센서에 접촉되는 표면의 종류는 CCD 배열에서 얻어진 영상의 형태에 의해 구분된다. 본 논문에서 제안하는 광촉각센서가 구분하는 표면은 자연2차표면, 즉 평면, 구, 원통, 그리고 원뿔로 정한다. 이러한 표면의 종류는 센서의 구조와 접촉면의 특성에 따라 1차적으로 점, 평면, 곡면으로 구분되며, 곡면인 경우 다음 단계에서 볼록 또는 오목 면으로 구분된다. 표 1은 광촉각센서가 접촉면의 종류를 구분하는 단계를 보이고 있다.

접촉면의 분류

광촉각센서의 외부는 구의 형태를 갖기 때문에 접촉면이 오목한 경우를 제외하고는 반드시 한 점 상에서 접촉이 발생하고 CCD에 맺히는 영상도 하나의 점이어야 한다. 하지만 그림 3에서 보는 바와 같이 센서의

광파매체를 반지름이 R인 유연한 고무커버가 감싸고 있고, 접촉이 일어날 경우 반지름 r의 견고한 광파매체에까지 변형을 일으키며 눌리게 되어 광파매체에는 그림3에서 볼수 있듯이 접촉면이 형성되게 된다. 따라서 접촉면이 점인 경우는 작은 원의 접촉면을, 평면의 경우는 오목과 볼록 면의 경계가 되는 크기의 원형 접촉면을, 자연2차표면의 경우는 타원형의 접촉면을 광파매체에 형성한다.

표 1. 접촉면의 단계별 구분.  
Table 1. Hierarchical classification of contact surface.

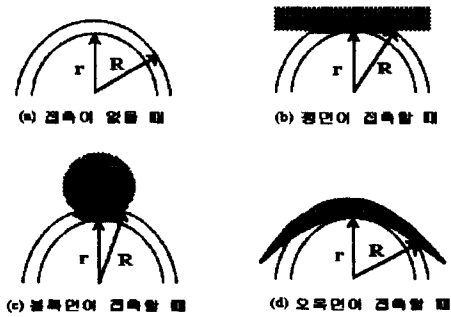
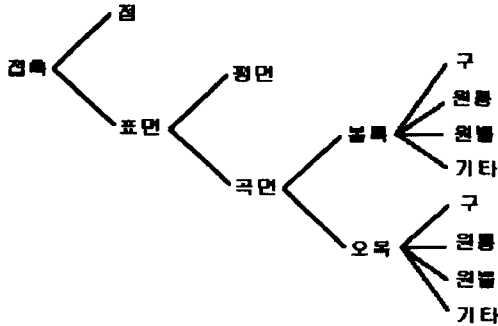


그림 3. 접촉면의 종류에 따른 고무커버의 변형.  
Fig. 3. Change of rubber cover shape depending on the types of contact surfaces.

제 1단계의 분류(점, 평면, 곡면의 분류)를 위해서는 두개의 기준이 필요하다. 먼저 평면과 비평면의 구분이 되는 접촉면의 크기는 센서의 구조를 이용하여 결정한다. 그림 3에서 보는바와 같이 평면인 경우, 접촉면의 크기는 반경이  $th1 = \sqrt{R^2 - r^2}$  인 원이 된다. 따라서 접촉면의 형태가 원이면서 반지름이  $th1$ 이면 접촉면은 평면으로 분류되고 원이면서 반지름이 일정

한 크기( $th2$ ) 이하이면 점으로 분류한다.  $th2$ 는 실험적으로  $th1$ 의 1/2정도로 결정된다. 또한, 원의 반경이  $th1$ 과  $th2$  사이이면 접촉면은 볼록한 구의 형태이고,  $th1$ 보다 큰 경우는 오목한 구의 형태로 구분한다. 접촉면의 형태가 원이 아닌 경우, 자연2차표면에 속하는 접촉면들은 타원 혹은 삼각형의 형태를 갖는다. 타원은 원통 혹은 모서리로, 삼각형은 원뿔로 구분된다.

타원의 영상이 얻어지면 볼록과 오목의 형태를 구분하기 위해 장축의 길이(long)와 단축의 길이(short)를 구한다.  $th1$ 과  $th2$ , 그리고 long와 short를 이용한 접촉면의 구분방법이 표 2에 정리되어 있다. 접촉면의 영상에서 장, 단축의 길이는 영상의 경계선 정보를 이용하여 구한다. 이를 위해 CCD 배열에서 얻어지는 영상을 일정한 문턱치를 이용하여 이치화한 후, 경계좌표 값으로부터 고유값(eigen value)과 고유벡터(eigen vector)을 구한다. 고유벡터에서 큰 고유값에 해당하는 벡터는 장축방향을, 작은 고유벡터값에 해당하는 벡터는 단축방향을 나타내며 이로 부터 장축 및 단축의 길이를 계산한다. 임계값( $th1$ 과  $th2$ )을 이용하여 접촉면을 구분하는 분류방법이 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 임계값( $th1$ 과  $th2$ )을 이용한 접촉면의 구분방법 (&는 논리곱).

Table 2. Classification of contact surfaces using two threshold values.

조 건	접촉면의 종류
$(long < th2) \ \& \ (short < th2)$	점
$(long > th2) \ \& \ (short > th1)$	볼록 구형면
$(long = th1) \ \& \ (th2 < short < th1)$	볼록 원통면
$triangular \ \& \ (long = th1) \ \& \ (short < th1)$	볼록 원뿔면
$(long = th1) \ \& \ (short = th1)$	평 면
$(long > th1) \ \& \ (short > th1) \ \& \ (long = short)$	오목 구형면
$(long = th1) \ \& \ (short > th1)$	오목 원통면
$triangular \ \& \ (long = th1) \ \& \ (short > th1)$	오목 원뿔면

3. 역각센서

역각센서는 손가락의 조인트에 위치한다. 손가락은 그림 4와 같이 광축각센서를 구성하는 반경 R인 반구와 길이가 Q이고 반지름이 R인 원통으로 되어 있다. 물체와의 접촉은 반구 모양의 손가락 끝에서 일어난다

고 가정한다. 역각센서는 뒤틀림 힘을 측정하여 가해진 힘의 크기와 방향을 결정한다. 그림 4는 센서에 물체가 접촉한 경우 센서표면의 한 점  $c$ 에 가해진 힘  $p$ 로 인해 발생한 토크  $q$ 와 이를 역각센서가 측정하는 측정 힘  $f$ 와 토크  $m$ 과의 관계를 보여준다. 구면에 접촉한 힘과 토크는 원통형의 몸체를 통해 역각센서에 전달된다.

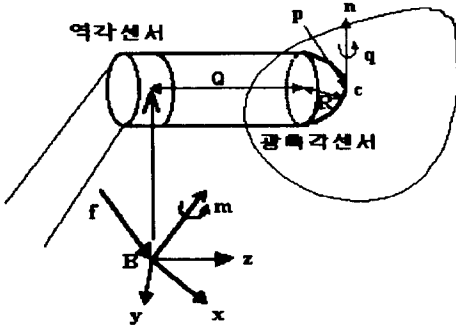


그림 4. 센서표면에 물체접촉이 발생한 경우, 가해진 힘과 측정된 힘과의 관계 구성도.

Fig. 4. The relation between the provided force/torque and measured force/torque.

센서표면 상의 한 점  $c$ 에 힘  $p$ 가 가해지면  $c$ 에서의 수직벡터  $n$ 을 중심으로 토크  $q$ 가 발생한다. 이를 역각센서 좌표계에서 측정하면 힘은 같은 단위벡터를 갖게 되나 토크의 경우는 좌표계의 원점에서 접촉점까지의 길이에 의한 모멘트가 첨가되어 각각 다음의 식에 의해 표현된다.

$$f = p \tag{4}$$

$$m = q + c \times p \tag{5}$$

접촉점  $c$ 에서의 힘  $p$ 와 토크  $q$ 를 표현하기 위해 접촉점 좌표계를 설정한다. 접촉점 좌표계의  $y$ 축은  $c$ 에서의 접촉평면에서 안쪽으로 향하는 수직벡터로 정하면  $p$ 는  $(p_c, 0, p_c)$ 가 되고  $q$ 는  $(0, 0, q_c)$ 로 표현할 수 있다. 여기에서 각 벡터의 원소는 다음과 같은 값을 갖는다.

$$p_{cx} = p^T n \tag{6}$$

$$p_{cz} = \sqrt{p^T(1-nn^T)p} \tag{7}$$

$$q_{cz} = q^T n \tag{8}$$

위의 식에서 사용한 접촉점에서의 면법선벡터는 센서표면방정식의 미분에 접촉점을 대입하여 구할 수 있다. 일반적인 자연2차표면과 표면 상의 임의의 점에서 면법선벡터 값은 다음의 식에 의해 결정된다.

$$S(\mathbf{r}) = \mathbf{r}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{r} - R^2 = 0 \tag{9}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla S(\mathbf{r})}{\|\nabla S(\mathbf{r})\|} = \frac{\mathbf{A}^2 \mathbf{c}}{\|\mathbf{A}^2 \mathbf{c}\|} \propto q = k \mathbf{A}^2 \mathbf{c} \tag{10}$$

여기에서  $\mathbf{r}$ 은 센서좌표계를 기준으로 한 3차원 공간에서의 접촉점을 표시하고 있으며,  $A$ 는 편의를 위해 쓰인 값이다. 또한,  $\nabla$ 은 그레디언트 연산자이며  $k$ 는 다음과 같은 값을 갖는 상수이다.

$$k = \frac{-\text{sign}(f^T m)}{\sqrt{2R}} \sqrt{\sigma' + \sqrt{\sigma'^2 + 4R^2(f^T m)^2}} \tag{11}$$

여기에서  $\sigma' = \|\mathbf{m}\|^2 - R^2\|\mathbf{A}\|^2$ ,  $m = k\mathbf{A}^2\mathbf{r} + c \times f$ 이다. 그리고, 접촉 구역  $S$ 의 중심  $c$ 는 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$c = \frac{1}{k(k^2 + \|\mathbf{A}\|^2)} [k^2 m + k f \times m + (f^T m) f] \tag{12}$$

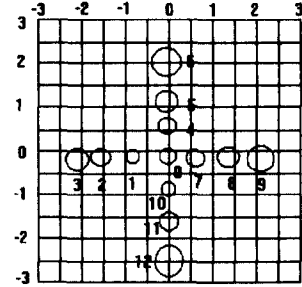
일단 접촉면의 중심이 결정되면 중심에서의 면법선 벡터는 반경  $R$ 인 구의  $c$ 에 대한 법선 벡터를 계산하여 결정할 수 있다. 위에서 사용한 역각센서를 이용한 접촉위치를 결정하는 알고리즘의 예는 [2,8]에 소개되어 있다.

### III. 자료융합을 통한 측정값의 보정

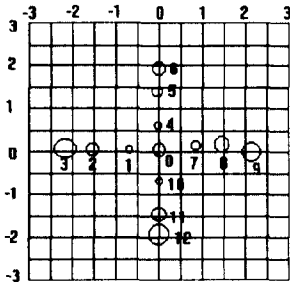
II장에서 소개된 두 개의 센서는 각각 접촉점의 위치와 접촉점에서의 법선벡터를 측정한다. 광촉각센서의 경우, 접촉점의 위치는 접촉부위 영상의 무게중심으로 결정하고 있고 접촉면의 법선벡터는 이점에서의 표면 식의 미분으로 결정하고 있다. 역각센서의 경우, 접촉점의 위치는 압력분포에 의해 결정되고, 접촉점에서의 법선벡터는 센서의 외형 방정식을 결정된 측정점 상에서 미분함으로써 결정한다. 이러한 결정방법은 접촉하는 물체부위가 점이 아니라 면이라는 특성을 고려할 때 적절한 방법이지만, 접촉하는 면의 위치를 결정하는 데는 근본적으로 오차를 수반할 수 밖에 없다. 이러한 측정오차를 최소화 하기 위해, 본 논문에서는 각 센서에 의해 개별적으로 측정된 위치 및 법선벡터 값을 위치구와 법선원뿔을 이용하여 융합하고자 한다.

측정오차의 특성

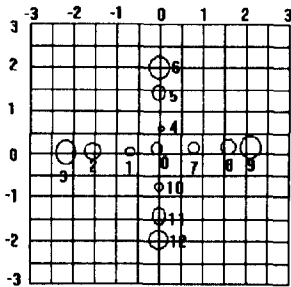
광촉각센서로 접촉위치 및 접촉점에서의 법선벡터를 구하는 경우, 그림 5a와 그림 5b에서 원의 크기로 표시된 것과 같이, 측정값에 포함된 오차의 크기는 렌즈의 중심축으로부터 멀어질수록 증가하고 있다. 이러한 현상은 렌즈의 왜곡에 의해 발생하며, 영상의 무게중심을 계산하는 과정에서 발생하고 있다. 역각센서의 경우, 접촉점에서의 수직벡터값은 표면방정식의 미분에 접촉점을 대입하여 결정하기 때문에 이에 포함되는 오차는 접촉점에 포함된 오차에 의해 결정된다. 실험적으로 얻어진 역각센서의 접촉점 위치와 법선벡터에 포함된 오차의 크기가 그림 5c와 그림 5d에 원으로 표시되어 있다.



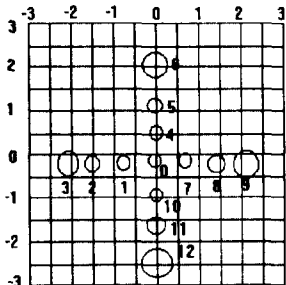
(d) 측정법선벡터에 포함되는 오차의 크기



(a) 측정위치에 포함되는 오차의 크기



(b) 측정법선벡터에 포함되는 오차의 크기



(c) 측정위치에 포함되는 오차의 크기

그림 5. 접촉위치에 따른 광촉각센서와 역각센서의 측정오차의 크기: (a)와 (b)는 광촉각센서의 경우이고, (c)와 (d)는 역각센서의 경우이다. 행과 열의 숫자는 cm단위이고 (b)와 (d)에서 원의 크기는 1mm가 1°를 나타낸다.

Fig. 5. The size of measurement errors depending on the position of contact: (a) and (b) represent the errors of the position and surface normal vector measured by optical tactile sensor, respectively; (c) and (d) represent the errors of the position and surface normal vector measured by force/torque sensor, respectively.

그림 5에 표시된 측정값에 포함된 오차는 다음과 같이 수학적인 방법으로 모델링된다. 식에서  $P$ 와  $N$ 은 각각 원래의 위치 및 법선을,  $\bar{P}$ 와  $\bar{N}$ 는 측정된 위치와 법선벡터를 나타내고, 첨자  $o$ 와  $f$ 는 각각 광촉각센서와 역각센서를 나타낸다.

$$\bar{P}_o = P + e_1(P) \tag{13}$$

$$\bar{N}_o = N + e_2(\bar{P}_o) \tag{14}$$

$$\bar{P}_f = P + e_3(F, T) \tag{15}$$

$$\bar{N}_f = N + e_4(\bar{P}_f) \tag{16}$$

여기에서  $i=1, \dots, 4$ 는 측정값에 포함된 오차로써  $e_1$ 은 접촉점의 위치에 대한 함수가 되고  $e_2$ 는 측정된 접촉점의 위치벡터의 함수가 된다. 또한  $e_3$ 는 역각센서의 측정오차에 대한 함수로 표현되고,  $e_4$ 는 측정된 접촉위치에 대한 함수가 된다. 실험적인 측정결과에 따라 각 오차  $e_i, i=1, \dots, 4$ 는 가우시안 분포로 근사화하여 각각의 변위로 그 크기를 표현할 수 있다.

위치구와 법선원추

위치 측정의 경우, 측정된 위치  $\bar{P}$ 는 광촉각센서의

표면 위의 한 점이되고 실제 접촉위치는 그림 5에 주어진  $\bar{P}$ 를 중심으로 반지름이 오차의 표준편차( $\sigma$ )의 3배, 즉  $3\sigma(\bar{P})$ 인 위치구의 내부에 존재한다. 위치구 내의 한점이 실제 접촉위치일 가능성은  $\bar{P}$ 로부터의 거리에 따라 달라진다는 것을 식 (13)에서 알 수 있다. 같은 방법으로, 식 (14)에서 주어진  $\bar{N}$ 에 대해 실제 면법선벡터는 원추의 각이 측정오차  $\alpha(P)$ 의 표준편차에 비례하는 원뿔의 내부에 존재한다. 따라서, 센서계에서 위치추정을 기초로 하여 실제 접촉위치를 찾고자 할 때 그 가능성이 있는 위치의 둘레는 위치구로 표현될 수 있고, 면법선벡터의 추정 원점의 둘레는 법선원추로 표현될 수 있다. 위치구의 반경과 법선원추의 각도는 손가락에서의 접촉 위치에 따라 다양하게 나타난다. 위치구와 법선원추에서 가능 오차의 크기는 구의 중심과 원추의 축에서는 매우 작으나 구의 반경과 원추의 각도가 커짐에 따라 약간씩 증가한다. 그림 6은 센서가 측정면과 접촉이 발생했을 때의 위치구와 법선원추를 묘사하고 있다. 한번의 접촉이 발생하면 광촉각센서와 역각센서 각각에 의해 두 쌍의 위치구와 법선원추가 얻어진다.

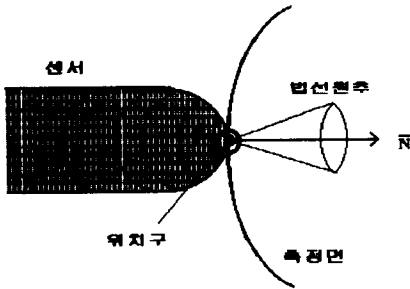


그림 6. 센서표면에 접촉이 발생한 경우 측정값에 의해 정의되는 위치구와 법선원추.

Fig. 6. Position sphere and surface normal cone whose sizes are determined by the position of measurement.

위치구와 법선원추를 이용한 데이터 융합

위치구는 식 (13)으로부터 유추할 수 있듯이 위치 측정값  $\bar{P}$ 가 주어지면 실제위치  $P$ 는  $\bar{P}$ 를 중심으로 반지름이  $3\sigma(\bar{P})$ 인 구 내에 존재함을 의미한다. 또한, 확률  $\text{Prob}(P = \bar{P})$ 값이 가장 크며  $\text{Prob}(P = \bar{P} + 3\sigma(\bar{P}))$ 값은 거의 0이 됨을 센서측정값의 통계를 이용한 실험으로도 확인할 수 있었다. 이와 같은 위치구의

특성을 이용하면 측정면에 접촉이 발생하여 두개의 센서가 제공하는 두 개의 위치구는 다음과 같이 3가지의 경우를 갖게 된다.

- 경우 1: 두 위치구의 교집합 내에  $\bar{P}_o$ 와  $\bar{P}_f$  모두 존재하지 않는 경우
- 경우 2: 두 위치구의 교집합 내에  $\bar{P}_o$  혹은  $\bar{P}_f$  하나만 존재하는 경우
- 경우 3: 두 위치구의 교집합 내에  $\bar{P}_o$ 와  $\bar{P}_f$  모두 존재하는 경우

경우 1은  $\bar{P}_o$ 와  $\bar{P}_f$ 가 서로의 측정값을 전혀 지지하지 않는 경우로 위치구의 반지름을 무계값으로 이용하여 평균값을 취하고 경우 2는 하나의 측정값이 다른 하나에 의해 지지를 받으나 반대의 경우는 성립하지 않는 경우로 지지를 받는 쪽의 측정값에 신뢰도를 둔다. 마지막의 경우 3은 두 개의 측정값이 서로를 지지하는 경우로 가장 바람직한 결과를 얻을 수 있다. 경우 2와 3은 두 개의 측정값을 지지도 값을 이용하여 융합한다. 하나의 측정값  $\bar{P}_j$ 가 다른 측정값  $\bar{P}_i$ 로부터 받는 지지도 ( $S$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{j,i} = \frac{3\sigma_i - |\bar{P}_i - \bar{P}_j|}{3\sigma_i} \tag{17}$$

위의 3가지 경우들을 고려하여 위치의 보정값  $\hat{P}$ 를 구하는 융합 알고리즘은 다음과 같다.

- i)  $i = o, j = f$ ;
- ii) if  $\sigma_i > \sigma_o$ , then  $i = f, j = o$ ;
- iii) in case  $|\bar{P}_o - \bar{P}_f| > 3\sigma_i$ 

$$\hat{P} = \frac{\sigma_f^2 \bar{P}_o + \sigma_o^2 \bar{P}_f}{\sigma_o^2 + \sigma_f^2}$$
- iv) in case  $3\sigma_{j+i} < |\bar{P}_o - \bar{P}_f| < 3\sigma_i$ 

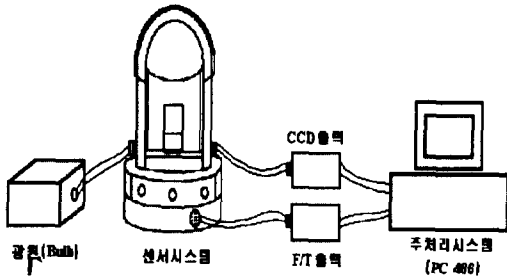
$$\hat{P} = \frac{\bar{P}_j + S_{j,i}^2 \bar{P}_i}{1 + S_{j,i}^2}$$
- v) in case  $|\bar{P}_o - \bar{P}_f| < 3\sigma_{j+i}$

$$\hat{P} = \frac{S_{o,i}^2 \bar{P}_o + S_{f,o}^2 \bar{P}_f}{S_{o,i}^2 + S_{f,o}^2}$$

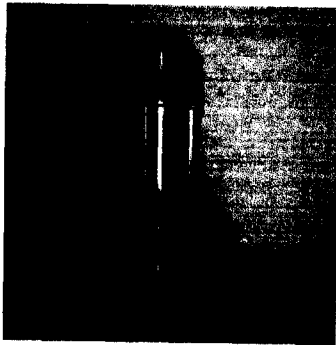
법선원추의 경우도 위치구와 같이 3가지의 경우로 분리된다. 따라서 법선의 보정값  $\hat{N}$ 은  $\hat{P}$ 를 구하는 알고리즘에서 측정위치 사이의 거리를 비교하는 대신 측정법선 사이의 각도를 표준편차에 의해 결정되는 임계값에 비교하여 얻는다.

IV. 실험 및 평가

본 논문에서 제안한 손가락 모양의 다중센서 시스템은 반구형의 광파매체와 원통형 몸체, 그리고 몸체 내부에 설치된 직경 CCD 카메라와 ATS사에서 제작한 6축의 역각센서를 이용하여 그림 1에서 설명한대로 제작되었다. 반구형 광파매체의 반지름은 3cm, 원통의 길이는 8.7cm, 역각센서의 높이는 3cm로 총길이는 14.7cm이다. 제작한 센서의 성능을 평가하기 위하여 그림 7a와 같이 실험세트를 구성하였다.



(a) 실험세트



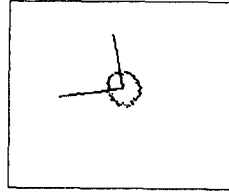
(b) 제작된 실험용센서

그림 7. 손가락 모양 다중센서시스템의 실험장치도.  
Fig. 7. The experimental set-up of the finger-shaped multi-sensor system.

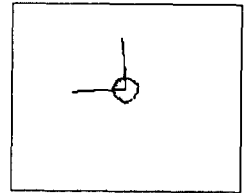
광촉각센서와 역각센서의 출력은 모두 전처리기를 통하여 주처리기(PC486)에 연결되고 측정된 결과는 주처리기의 모니터에 출력된다. 그림 7b는 실험을 위해 제작한 센서시스템의 원형이다.

제작된 센서의 성능을 실험하기 위해 반구 상의 어느 위치든지 정확한 좌표값을 확인할 수 있도록 반구형의 접촉기구를 이용하였다. 실험은 먼저 광촉각센서만을 이용하여 센서의 접촉면 분별능력을 확인하였고

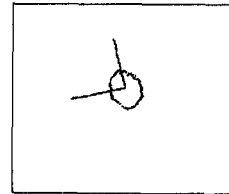
다음으로 광촉각센서와 역각센서를 개별적으로 이용할 경우의 접촉위치와 표면법선벡터를 구한 후 이들을 융합한 결과를 비교하는 방법을 이용하여 진행하였다.



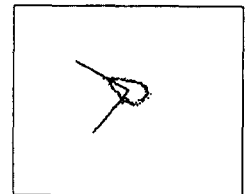
(a) 평면: (279:263)



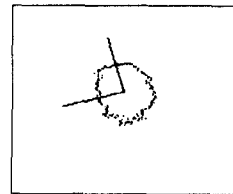
(b) 블록구: (148:140)



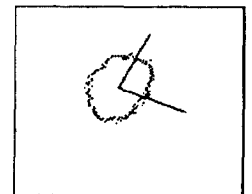
(c) 블록원통: (264:187)



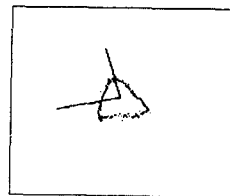
(d) 블록원추: (264:142)



(e) 오목구: (564:504)



(f) 오목원통: (578:328)



(g) 오목원추: (459:355)

그림 8. 광촉각센서에 의한 접촉면의 분류: ()안은 장축과 단축의 길이비를 나타낸다.

Fig. 8. Classification of contact surfaces based on the shape of CCD image: numbers in ( ) show the lengths of long and short axes.

광접촉센서를 이용하여 접촉면의 종류를 판별하는 예가 그림 8에 설명된다. 접촉면의 CCD 영상을 분석하여 고유벡터의 장, 단축의 비에 의해 평면과 곡면이 가려지고 또한 블록면과 오목면이 가려진다. 광학촉



로부터 60° 이내에 접촉하는 면의 경우는 완벽한 구분이 가능하였고 60°를 벗어나는 경우는 영상의 왜곡에 의해 판별능력이 현저히 감소하는 현상을 보였다.

다중센서시스템을 이용한 위치 및 법선벡터의 측정 결과는 표3에 정리되어 있다. 실험은 X축과 Y축상에

위치한 13개의 접촉점에 대해 각각의 센서를 이용하여 얻은 측정값과 센서융합을 통하여 결정한 측정값과의 차이를 비교하여 개선된 정확도를 수치적으로 비교하는 방법으로 진행하였다. 표 3의 실험 결과에서 알 수 있듯이 광촉각센서의 위치측정오차의 평균과 표준

표 3. 각각의 센서를 이용한 측정결과와 센서융합방식을 이용한 측정결과의 비교: \* [ ]안은 평균오차값  
Table 3. Comparison of measurements obtained by individual sensors and by data fusion.

번 호	실제위치		광촉각센서		역각센서		Fusion1	
	위 치	법 선	위 치	법 선	위 치	법 선	위 치	법 선
0	0.00	0.00	(0.06, 0.12, 3.00)	(0.02, 0.04, 1.00)	(-0.07, -0.14, 3.00)	(-0.02, -0.05, 1.00)	(0.01, 0.01, 3.00)	(0.00, 0.00, 1.00)
	0.00	0.00	[-0.06, -0.12, 0.00]	[-0.02, -0.04, 0.00]	[0.07, 0.14, 0.00]	[0.02, 0.05, 0.00]	[0.01, 0.01, -0.004]	[0.00, 0.00, 0.00]
	3.00	1.00						
1	-0.78	-0.26	(-0.72, 0.06, 2.91)	(-0.24, 0.02, 0.97)	(-0.86, -0.15, 2.87)	(-0.26, -0.05, 0.96)	(-0.76, 0.03, 2.90)	(-0.25, 0.01, 0.97)
	0.00	0.00	[-0.06, -0.06, -0.01]	[-0.02, -0.02, -0.00]	[0.09, 0.15, 0.03]	[0.00, 0.05, 0.01]	[0.01, 0.03, 0.01]	[0.00, -0.01, 0.00]
	2.90	0.97						
2	-1.50	-0.5	(-1.56, 0.03, 2.56)	(-0.52, 0.01, 0.85)	(-1.58, -0.15, 2.54)	(-0.53, -0.05, 0.86)	(-1.57, 0.02, 2.55)	(-0.52, 0.01, 0.85)
	0.00	0.00	[0.06, -0.030, 0.04]	[0.02, -0.01, 0.04]	[0.08, 0.15, 0.06]	[0.03, 0.05, 0.03]	[-0.07, 0.02, -0.04]	[0.02, -0.01, 0.03]
	2.60	0.89						
3	-2.12	-0.70	(-2.21, -0.02, 2.03)	(-0.74, -0.01, 0.74)	(-2.27, -0.15, 1.96)	(-0.76, -0.05, 0.65)	(-2.22, -0.02, 2.02)	(-0.74, -0.01, 0.67)
	0.00	0.00	[0.08, 0.02, 0.09]	[0.03, 0.01, 0.04]	[0.15, 0.15, 0.16]	[0.05, 0.05, 0.06]	[-0.10, -0.02, -0.11]	[0.03, 0.01, 0.03]
	2.12	0.70						
4	0.00	0.00	(0.03, 0.71, 2.91)	(0.00, 0.24, 0.97)	(-0.07, 0.64, 2.93)	(-0.02, 0.22, -0.98)	(0.01, 0.69, 2.92)	(0.00, 0.23, 0.97)
	0.78	0.26	[-0.03, 0.07, -0.017]	[0.00, -0.02, 0.00]	[0.07, 0.14, -0.03]	[0.02, 0.04, -0.01]	[0.01, -0.08, 0.02]	[0.00, 0.03, -0.01]
	2.90	0.97						
5	0.00	0.00	(-0.06, 1.44, 2.63)	(-0.02, 0.48, 0.88)	(-0.08, 1.29, 2.71)	(-0.03, 0.43, 0.90)	(-0.06, 1.42, 2.64)	(-0.02, 0.47, 0.88)
	1.50	0.50	[0.06, 0.06, -0.03]	[-0.02, -0.02, -0.01]	[0.08, 0.21, -0.11]	[0.03, 0.07, -0.02]	[-0.06, -0.08, 0.04]	[0.02, 0.03, 0.01]
	2.60	0.89						
6	0.00	0.00	(-0.06, 2.03, 2.21)	(-0.02, 0.68, 0.74)	(-0.08, 2.05, 2.19)	(-0.03, 0.68, 0.73)	(-0.07, 2.04, 2.19)	(-0.02, 0.68, 0.73)
	2.12	0.70	[0.06, 0.09, -0.09]	[-0.02, -0.03, 0.03]	[0.08, 0.07, -0.07]	[0.03, 0.03, -0.03]	[-0.07, -0.08, 0.07]	[0.02, 0.03, -0.02]
	2.12	0.70						
7	0.78	0.26	(0.85, 0.20, 2.87)	(0.22, 0.07, 0.96)	(0.68, -0.14, 2.92)	(0.23, -0.05, 0.97)	(0.79, -0.03, 2.92)	(0.26, -0.01, 0.97)
	0.00	0.00	[-0.07, -0.20, 0.13]	[-0.02, -0.87, 0.01]	[0.09, 0.14, -0.02]	[0.02, 0.05, -0.01]	[0.01, -0.03, 0.02]	[0.00, 0.01, 0.00]
	2.90	0.97						
8	1.50	0.50	(1.52, 0.19, 2.57)	(0.51, 0.06, 0.86)	(1.33, -0.14, 2.68)	(0.44, -0.05, 0.90)	(1.52, -0.02, 2.58)	(0.51, -0.01, 0.86)
	0.00	0.00	[-0.02, -0.19, 0.026]	[-0.01, -0.06, 0.03]	[0.17, 0.14, -0.09]	[0.06, 0.05, -0.01]	[0.02, -0.02, -0.02]	[-0.01, 0.01, 0.02]
	2.60	0.89						
9	2.12	0.70	(2.19, 0.03, 2.05)	(0.73, 0.01, 0.68)	(2.18, -0.14, 2.06)	(0.73, -0.05, 0.68)	(2.19, 0.02, 2.06)	(0.73, 0.01, 0.68)
	0.00	0.00	[-0.07, -0.03, 0.07]	[0.02, 0.01, -0.03]	[-0.06, 0.14, 0.06]	[-0.02, 0.05, 0.02]	[0.07, 0.02, -0.07]	[-0.01, -0.01, 0.02]
	2.12	0.70						
10	0.00	0.00	(0.01, -0.69, 2.92)	(0.00, -0.23, 0.97)	(-0.07, -0.89, 2.86)	(-0.02, -0.30, 0.95)	(0.01, -0.76, 2.91)	(0.00, -0.25, 0.97)
	-0.78	-0.26	[-0.01, -0.08, -0.02]	[0.00, -0.03, 0.00]	[0.07, 0.12, 0.04]	[0.02, 0.04, 0.011]	[0.01, 0.02, -0.08]	[0.00, -0.01, 0.00]
	2.90	0.97						
11	0.00	0.00	(-0.01, -1.43, 2.64)	(0.00, -0.48, 0.88)	(-0.07, -1.67, 2.48)	(-0.02, -0.53, 0.83)	(-0.01, -1.47, 2.62)	(0.00, -0.49, 0.87)
	-1.50	-0.50	[0.01, -0.07, -0.04]	[0.00, 0.02, 0.01]	[0.07, 0.17, 0.12]	[0.02, 0.03, 0.06]	[-0.01, 0.03, 0.02]	[0.00, -0.01, 0.01]
	2.60	0.89						
12	0.00	0.00	(0.03, -1.99, 2.24)	(0.01, -0.66, 0.74)	(-0.07, -2.34, 1.85)	(-0.03, -0.79, 0.62)	(0.01, -2.08, 2.18)	(0.00, -0.69, 0.72)
	-2.12	-0.70	[-0.03, -0.13, -0.12]	[0.01, 0.05, 0.04]	[0.07, 0.22, 0.27]	[0.03, 0.08, 0.09]	[0.01, 0.04, 0.06]	[0.00, -0.02, -0.02]
	2.12	0.70						

편차는 (0.47,0.90,0.51)mm와 (0.04,0.31,0.02)mm이고 법선측정오차의 평균과 표준편차는 (0.016, 0.07,0.02)mm와 (0.01,0.04,0.02)mm이다. 또한, 역각센서의 위치측정오차의 평균과 표준편차는 (0.88, 1.44,0.75)mm와 (0.36,0.36,0.50)mm이고 법선측정 오차의 평균과 표준편차는 (0.27,0.49,0.23) mm와 (0.17,0.18,0.18)mm이다. 이러한 개별 센서의 측정 오차는 위치구와 법선원추를 이용한 융합알고리즘을 적용하면 위치측정과 법선측정의 평균오차는 각각 (0.35,0.36,0.48)mm와 (0.09,0.15,0.12)mm로 개선된다. 데이터융합을 통해 개선된 비율은 각각의 센서를 이용하여 측정한 결과에 비해, 위치측정의 경우는 50%, 법선측정의 경우는 45%정도이다.

## V. 결 론

다양한 물체를 효과적으로 조작하기 위해서 여러 종류의 센서가 로봇의 손에 부착되어 이용되고 있다. 본 논문에서는 물체와 실제적으로 접촉이 발생하는 로봇 손가락에 필수적으로 부착되어 각각 다른 목적으로 사용되는 접촉센서와 역각센서를 융합하여 접촉부위의 위치와 법선벡터를 구하는 융합센서 시스템을 개발하였다. 이를 위해 특별히 광촉각센서를 개발하였으며, 개발된 센서는 측정원리가 간단하여 구현이 쉽고 손가락의 크기에 맞도록 제작이 가능하다. 제안된 융합 센서 시스템은 확실적인 방법으로 각각의 센서에서 얻어진 측정결과를 융합하고 있으며 각각의 센서를 이용할 때에 비해 위치의 경우 50%, 법선측정의 경우 45%정도의 오차를 줄일 수 있었다. 제안된 센서시스템은 지역적인 자율성이 필요한 지능형 로봇에 부착되어 다양한 자동화 시스템에 응용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

[1] Ren C. Luo, Min-Hsiung Lin, and Ral-

ph S. Scherp. 'Dynamic multisensor data fusion system for intelligence robots' IEEE Journal. of Robotics and Automation, 4(4), pp. 386-395, Aug 1988.

- [2] S. Begie, 'Planar and Finger-shaped Optical Tactile Sensors for Robotic Applications', IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 5, pp. 472-484, 1988.
- [3] D. Brock and S. Chiu, 'Environment Perception of an Articulated Robot Hand Using Contact Sensors', Proc. of the 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 89-96, 1989.
- [4] N. Nakao et. al., 'A Finger Shaped Tactile Sensor Using an Optical Waveguide', Proc. of IECON 1990 16th Annual Conf., pp. 300-305, 1990.
- [5] S. A. Stansfield, 'A Rototic Perceptual System Utilizing Passive Vision and Active Touch', The Int. Journal of Robotics Research, Vol.7, No.6, pp. 138-161, Dec. 1988.
- [6] M. A. Abidi and R. C. Gonzalez, 'The Use of Multisensor Data for Robotic Applications', IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.6, NO.2, pp. 159-177, April 1990.
- [7] Hitoshi Maekawa et. al, 'Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and its Evaluation by Active Touch', Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1327-1334, 1992.
- [8] Antonio Bicchi, 'Intrinsic Contact Sensing for Soft Fingers', Proc. of the 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 968-973, 1990.