

광촉각 센서와 힘/역학센서의 퍼지융합을 통한 접촉면의 인식

Recognition of Contact Surfaces Using Optical Tactile and F/T Sensors Integrated by Fuzzy Fusion Algorithm.

°고 동환, 한 현수

송실대학교 전자공학과(Tel: 02-820-0709; Fax: 02-821-7653; E-mail: hahn@logos.soongsil.ac.kr)

Abstract This paper proposes a surface recognition algorithm which determines the types of contact surfaces by fusing the information collected by the multisensor system, consisted of the optical tactile and force/torque sensors. Since the image shape measured by the optical tactile sensor system, which is used for determining the surface type, varies depending on the forces provided at the measuring moment, the force information measured by the f/t sensor takes an important role. In this paper, an image contour is represented by the long and short axes and they are fuzzified individually by the membership function formulated by observing the variation of the lengths of the long and short axes depending on the provided force. The fuzzified values of the long and short axes are fused using the average Minkowski's distance. Compared to the case where only the contour information is used, the proposed algorithm has shown about 14% of enhancement in the recognition ratio. Especially, when imposing the optimal force determined by the experiments, the recognition ratio has been measured over 91%.

Keywords Fuzzy, Fusion, Minkowski distance, Mutisensor system

1. 서론

다중센서시스템을 장착한 로봇의 손으로 물체를 인식하는 기술은 로봇의 연구분야 중하나이다. 여러 형태의 데이터를 갖는 다중센서시스템은 단일센서에서 획득하기 어렵고 이용할 수 없는 정보를 보다 의미 있는 정보로 만들어 줄 수 있다.

본 연구실에서 개발한 다중센서시스템은 광촉각센서와 힘/역학센서를 이용하여 개발된 것으로 광촉각센서는 접촉시 접촉면에서의 영상을 얻는데 사용되고, 힘/역학센서는 접촉면에 가해지는 힘의 크기를 얻는데 사용된다. 이와 같은 다중센서시스템으로부터 얻은 영상의 해석은, 측정된 영상에 eigen-vector해석을 통하여 장단축의 길이를 구하고 이 장단축의 비로써 물체의 면의 형태를 구분하는 방법이 일반적이다[1]. 또한 eigen-vector해석을 통해 얻어진 영상의 장단축의 비를 광촉각센서와 광촉각센서의 표면에 둘러싸인 고무커버와의 거리 관계로부터 얻어지는 임계치값과 비교함으로써 다양한 면의 형태를 구분하기도 했다[7]. 그러나 장단축의 길이와 임계치값은 접촉면의 크기와 면적에 따라 변하며, 접촉면의 크기와 면적은 힘의 크기에 따라 변한다. 특히 약한 힘에 의해 접촉면이 측정되는 경우에 접촉면의 면적은 더욱 작아져서 면들간의 장단축의 길이를 구별하기가 어려워지며, 또한 동일한 힘을 가한 경우라 하더라도 센서의 특성, 접촉한 위치 등에 따라서 장단축의 길이가 변하기 때문에, 단순히 장단축의 비나, 장단축과 임계치값의 비교로만 접촉면의 형태를 결정하는 방법은 물체 인식에 있어서 여러 가지 오류를 범할 수 있다. 특히 논문[7]에서 제시하고 있는 방법은 임계치의 결정 방법이 불분명하고, 보다 정확한 접촉면의 인식을 위하여 영상이 뚜렷이 잡힐 수 있는 일정한 크기 이상의 힘을 가해야만 하는 제약 사항이 있었다. 이에 따라 본 논문에서는 힘의 크기에 따른 접촉면의 크기 변화에 크게 영향을 받지 않고 물체의 표면의 종류와 특성을 결정할 수 있는 퍼지융합알고리즘을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 자연2차물체를 구성하는 면의 분류 방법 및 힘의 크기에 따른 영상의 특징 변화에 대하여 설명하고 있다. 3장에서는 2장에서 내용물 기반으로 퍼지함수를 생성하고 각 모델면의 멤버십값들을 융합하는 과정을 보여준다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 이용한 실험을 통해 얻은 성능 평가의 결과를 보여주고 있다.

2. 힘의 크기를 고려한 면의 분류

2.1 자연2차물체를 구성하는 면의 분류

자연2차물체를 구성하는 면으로는 평면, 원통면, 구면 등이 있다. 광촉각센서로부터 얻은 이러한 모든 면들의 영상은 타원의 형태를 가지고 있다. 이러한 사실을 바탕으로 본 논문에서는, 영상의 장단축의 비를 이용하여 면의 형태를 구분하였다. 장축과 단축의 길이와 방향은 eigen-vector해석에 의해 계산된다.

접촉면의 2차원 영상의 데이터의 배열을 Q_{ij} 라하고 그것을 다음과 같이 표현한다.

$$Q_{ij} = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_p, y_p)\} \subseteq R^2 \quad (2-1)$$

이 영상데이터 Q_{ij} 의 Normalized Scatter Matrix A 는 아래와 같다.

$$A = \frac{1}{\sum_i (x_i - m_x)^2 + (y_i - m_y)^2} \times \begin{bmatrix} \sum_i (x_i - m_x)^2 & \sum_i (x_i - m_x)(y_i - m_y) \\ \sum_i (x_i - m_x)(y_i - m_y) & \sum_i (y_i - m_y)^2 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

여기에서, $m_x = \sum_{i=1}^n x_i/n$ 이고 $m_y = \sum_{i=1}^n y_i/n$ 이다.

일반적으로 광측각 센서에 의해 얻어지는 자연 2차면의 2차원 영상은 타원의 형태를 가지고 있으므로, A 의 특성함수는 다음과 같은 2차다항식으로 표현될 수 있다.

$$\lambda^2 - \lambda + \det A = 0 \quad (2-3)$$

여기에서, λ 는 A 의 eigenvalue이다. 식 (2-3)은 식 (2-4)와 같이 2개의 해를 가지고 있다. α_M 은 얻어진 영상의 장축을 생성하는 해이고, α_m 은 단축을 생성하는 해이다.

$$\alpha_M = \frac{1 + D_X}{2}, \alpha_m = \frac{1 - D_X}{2} \quad (2-4)$$

여기에서, $D_X = \sqrt{1 - 4\det A}$ 이다.

α_M, α_m 의 값을 기반으로 하여 면의 형태를 분류하면 다음과 같다.

- 평면 : 장축과 단축의 길이의 비가 거의 1:1이 되는 원의 형태가 되며, 원통면, 구면보다는 작은 항상 동일한 곡률을 가지는 면이다.
- 원통면 : 장축이 단축보다 긴 타원의 형태가 되며 단축의 길이는 원통면이 가진 곡률에 따라 변한다.
- 구면 : 장축과 단축의 길이의 비가 거의 1:1이 되는 원의 형태가 되며, 장단축의 길이는 구의 곡률에 따라 변한다.

그러나 α_M, α_m 을 기반으로 한 위의 분류방법은 접촉점에 가해지는 힘의 크기가 일정하지 않을 때에는 물체의 면을 구분하기가 어려워진다. 또한 동일한 면이 반복적으로 측정된다 하더라도, 이에 따라 얻어지는 영상은 가해지는 힘의 크기에 따라 변한다. 다음은 그러한 예를 보여준다.

- 예(1) : 원통의 곡률과 구의 곡률이 같아지는 경우 측정되는 원통면의 단축과 구면의 장단축은 비슷한 길이가 된다.
- 예(2) : 물체의 특성상 평면과 원통면의 장축은 거의 같은 길이가 된다.
- 예(3) : 평면과 구면의 모두 장단축의 길이는 거의 1:1 정도 되는 원의 형태가 된다.

2.2 힘의 크기에 따른 영상의 변화

가해진 힘의 크기에 따라 변하는 영상의 장단축의 비에서 야기되는 애매함을 제거하기 위해서, 가해진 힘의 크기에 따른 영상의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

그림 1과 2는 평면의 경우 장단축의 길이가 힘의 크기에 따라 변화하는 그림이다. 이 그림은 실제 실험데이터를 기반으로 한 장단축의 길이를 2차다항식으로 근사화시킨 예이다. 점으로 나타나는 부분은 실제 측정된 데이터이며, 실선은 이것을 근사화한 2차다항식 그래프이다. 그림 1과 2를 살펴보면, 같은 힘의 크기에 해당하는 장단축의 길이는 거의 비슷함을 알 수 있으며, 처음에는 장단축의 길이가 급격하게 변화하다가 어느 정도 이상의 힘이 가해지면 그 차이가 감소하며, 특정한 값 이상부터는 장단축의 길이의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 측정 가능한 최소의 힘의 크기부터 포화상태를 이루어 장

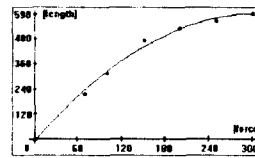


그림 1. 힘의 크기에 따른 평면의 장축의 변화
Fig. 1. Variation of the long axis depending on the magnitude of the force, in a plane case

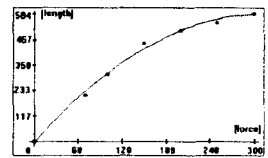


그림 2. 힘의 크기에 따른 평면의 단축의 변화
Fig. 2. Variation of the short axis depending on the magnitude of the force, in a plane case

단축의 길이가 더 이상 변하지 않는 힘의 크기까지의 데이터를 바탕으로 하여 장단축의 길이 각각을 2차다항식으로 근사화시켰다. 식 (2-5)와 (2-6)은 평면의 경우 힘의 크기에 따라 변화하는 장단축 길이를 2차다항식으로 근사화 시킨 예이다.

· 평면의 경우 (l 은 장축, s 는 단축) :

$$l = -7.60187538 + 3.915353927 * f - 0.006374717 * f^2 \quad (2-5)$$

$$s = -9.22721106 + 3.897743647 * f - 0.006441392 * f^2 \quad (2-6)$$

센서에 가해진 힘의 크기를 식 (2-5)와 (2-6)에 대입함으로써 얻는 각 모델면의 장단축의 길이는 3절에서 소개되는 퍼지함수의 결정에 이용된다.

3. 퍼지함수와 퍼지 데이터융합

앞 절에서 언급한바와 같이 접촉면의 형태를 결정하는데 있어서, 장단축의 길이는 매우 중요한 측정단위로 이용된다. 그러나 이 장단축의 길이는 가해진 힘의 크기에 따라 매우 유동적이며, 또한 동일한 힘의 크기로 같은 물체면을 반복 측정한다 하더라도 접촉점의 위치 등 여러 요인에 의해 동일한 물체면의 장단축의 길이가 각각 다르게 측정될 수 있다. 따라서 우리는 장단축의 길이를 이용하여 물체의 면의 형태를 구분하는 방법 뿐 아니라 퍼지융합알고리즘을 제안하여 이러한 문제점들을 해결하고자 한다.

3.1. Fuzzification



그림 3. 장축의 퍼지함수
Fig. 3. Fuzzy membership function of the long axis

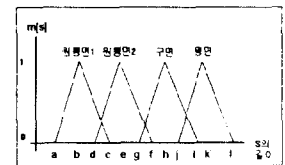


그림 4. 단축의 퍼지함수
Fig. 4. Fuzzy membership function of the short axis

그림 3과 4는 측정된 힘의 크기에 따라 생성된 각 모델면들의 퍼지함수이다. 평면에 해당하는 퍼지함수의 기울기 및 l, s 축의 계수들은 식 (2-5)와 (2-6)을 이용하여 결정되며, 따라서 그래프의 위치 및 모양은 가해진 힘의 크기에 따라 변한다. 나머지 경우에 대해서도 같은 방법으로 퍼지함수를 생성한다. 가해진 힘을 f 라하고 이때 측정된 장단축의 길이를 l_f, s_f 라 할 때, l_f, s_f 는 이미 결정된 각 모델면들의 퍼지함수와 비교를 통해 각 모델면에 대한 장단축의 멤버십값들을 할당받는다. 위의 퍼지함수의 한

삼각형에 대한 식의 예는 식 (3-1)과 같으며, 이 식에 측정된 장단축의 길이 l_f, s_f 를 대입함으로써 각 물체면의 장단축의 길이에 대한 멤버십값을 구할 수 있다. 아래의 식은 구면의 장축에 대한 퍼지함수를 식으로 표현한 예이다.

$$m_{ss}^i(l_f) = \begin{cases} \frac{1}{(b-a)}(l_f - a) + 1 & (a < l_f \leq b) \\ \frac{-1}{(c-a)}(l_f - a) + 1 & (b < l_f < c) \end{cases} \quad (3-1)$$

여기에서, $m_{ss}^i(l_f)$ 는 측정된 장축의 길이(l_f)가 구면의 장축에 포함되는 정도를 나타내는 멤버십값을 나타내고, $m_{ss}^i(s_f)$ 는 측정된 단축의 길이(s_f)가 구면의 단축에 포함되는 정도를 나타내는 멤버십값을 나타낸다. 같은 방법으로, 각 모델면에 대한 퍼지함수와 멤버십값들도 위와 같은 방법으로 정의한다. 측정된 영상은 각 모델면 별로 2개씩의 멤버십값을 가지며 멤버십벡터를 다음과 같이 표현한다.

$$\theta_i = [m_{ss}^i(l_f), m_{ss}^i(s_f)] \quad (3-2)$$

여기에서 $i = ps, ss, cs1, cs2$.

3.2 퍼지데이터융합

각 모델면들에 대한 접촉면의 장단축의 멤버십값들을 각 모델면로 하나의 출력값으로 나타내기 위해 다음과 같은 방법으로 퍼지데이터를 융합한다. 멤버십값들 중 가장 혼돈스러운 값은 0.5이므로, 아래의 식을 만족하면 모델면 a 에 대해서 m_a^i 는 m_a' 보다 확실한 정보를 주는 멤버십값으로 해석된다.

$$|m_a^i - e| > |m_a' - e| \text{ for } \forall i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3-3)$$

여기에서 e 는 0.5 이고 n 은 모델을 결정하는 특징의 수이다. 그리고 최대퍼지값과 $m_a^1, m_a^2, \dots, m_a^n$ 값들과의 편차는 Minkowski Distance를 계산함으로써 얻어진다.

$$d = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_a^i - e)^a \right]^{1/a} \quad (3-4)$$

여기에서, a 는 홀수로 된 정규화 상수이며, 이 값은 각 멤버십값(m_a^i)에 관계된 확실성의 정도를 표현한다. 전체적인 멤버십값은 최대퍼지값과 멤버십값들의 편차의 합으로 표현된다.

$$m_a = e + d = e + \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_a^i - e)^a \right]^{1/a} \quad (3-5)$$

a 가 홀수이기 때문에 $(m_a^i - e)^a$ 가 음수가 되면 m_a^i 가 e 보다 작은 값이 되므로 전체 식에 의미가 없는 값이 되고, 양수가 되는 경우에는 전체 식에 의미가 있는 값으로 해석된다. 식 (3-5)에 a 가 미치는 영향은 다음과 같다.

- $a=1$ 인 경우, m_a 는 일반적인 산술적 평균과 같다.
- $a \geq 3$ 인 경우, m_a^i 가 아주 애매한 값을 갖는 경우에, 이 값은 전체 식 m_a 에 덜 영향을 주는 값이 되게 한다.

• $a \rightarrow \infty$ 인 경우, a 는 $(m_a^1, m_a^2, \dots, m_a^n)$ 값들 중 최대값으로 대체될 수 있다.

센서에 의해 얻어진 영상은 2개의 특징을 가지고 있기 때문에 $n=2$ 이고, 실험에 의해 $a=3$ 으로 결정하였다. 따라서 식 (3-5)를 본 논문의 경우로 일반화시키면 아래와 같다.

$$m_a = e + \left[\frac{(m_a^i(l_f) - e)^3 + (m_a^i(s_f) - e)^3}{2} \right]^{1/3} \quad (3-6)$$

$(a = \text{cylinder1, cylinder2, plane, sphere})$

식 (3-6)을 통해 융합된 값 m_a 는 각 모델면에 대한 신뢰도를 의미하며, 최종적으로는 가장 큰 신뢰도를 가지는 모델면의 형태를 측정된 접촉면의 형태로 결정한다.

4. 실험결과

본 논문에서, 우리는 광축각센서와 힘/역학센서의 결합으로 구성된 다중센서시스템을 구현하였으며[7], 그 구성도는 그림 5와 같다. 광축각 센서는 MEL 센서[5]를 모델로 하고 수광부를 개선하여 접촉면의 형태를 인식하는 기능을 갖도록 설계하였으며, 힘/역학센서는 미국의 ATS사가 개발한 6축 힘/역학센서를 이용하고 있다. 측정면과의 접촉은 구형광과매체에서 발생하며, 가해진 힘은 연결원통에 의해 역학센서에 전달된다. 광축각센서는 구형의 광과매체에 광원을 투과시키고, 접촉면에서 불규칙 반사가 발생하여 생성된 접촉 부위의 영상이 CCD에 맺히도록 하는 구조를 가진다. CCD에 얻어진 접촉면의 영상의 형태를 분석하여 접촉면의 종류를 파악하게 된다. 또한 힘/역학센서를 이용하여 접촉면에 가해진 힘의 크기를 얻을 수 있다.

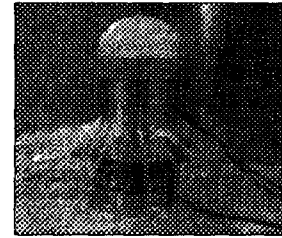


그림 5. 제작된 실험용 세트
Fig. 5. The prototype of the multisensor system

본 논문에서는 힘의 크기에 따라 얻어진 각 측정면의 장단축 길이를 2차다항식으로 근사화 하였으며, 측정될 때 알 수 있는 힘의 크기를 2차 다항식에 대입하여 모델면 각각에 대한 퍼지함수를 생성하였다. 이 퍼지함수에 측정된 접촉면의 장단축의 길이를 적용하여 접촉면의 장단축 길이 각각에 대해서 모든 모델면의 장단축 길이의 멤버십값들을 구한다. 이 멤버십값들은 융합알고리즘에 의해 융합되며, 융합된 값들 중 제일 큰 신뢰도를 가지는 모델면을 측정된 측정면의 대응 모델면으로 결정한다. 그림 6의 물체는 실험에 사용한 4종류의 모델 물체이며, 원기둥의 경우 곡률이 다른 2가지 물체를 사용하여 같은 원통면의 형태라 하더라도 원기둥이 가지는 곡률에 따라 인식률이 다르게 나타나는 것을 보이려한다. 그림 7은 힘의 크기에 따라 변화하는 측정면들의 예이다.

5. 결론 및 앞으로의 과제



그림 6. 실험에 사용된 물체의 종류
Fig. 6. Model objects used in experiments

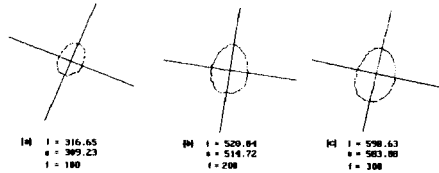


그림 7. 힘의 크기에 따라 변하는 평면 영상의 변화 예
Fig. 7. Variation of image shape depending on the magnitude of the imposed force, for a plane case.

본 논문에서 제시한 알고리즘의 성능평가를 위해서, 두 가지 경우에 대해서 실험을 했다. 첫 번째 경우는 힘의 크기에 따라 얻어진 장단축의 비만 가지고 물체의 면을 인식한 경우이고, 두 번째 경우는 본 논문에서 제시한 퍼지융합알고리즘을 이용하여 물체의 면을 인식한 경우이다. 아래의 표는 위의 내용을 바탕으로 하여 실험한 결과이다. 표 1은 면의 형태에 따른 두 알고리즘의 인식률을 나타낸 것이고, 표 2는 힘의 크기에 따른 두 알고리즘의 인식률을 나타낸 것이다.

표 2. 면의 형태에 따른 인식률(곡률: 원기둥1>원기둥2)
Table 1: The Ratio of Recognition(ROR) for each Type of Surfaces(TOS)(curvature: cyl1>cyl2) <unit : %>

| 면의 종류 인식률 | 원기둥1 의 면 | 원기둥2 의 면 | 평면 | 구면 | 전체 인식률 |
|--------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------|
| 인식률(1) | 71.67 | 67.50 | 68.33 | 69.16 | 69.17 |
| 인식률(2) | 85.83 | 80.83 | 85.00 | 80.00 | 82.91 |

표 3. 힘의 크기 따른 인식률
Table 2: The Ratio of Recognition(ROR) depending on the Magnitude of Imposed Force(MOIF) <unit : %>

| 면의 종류 인식률 | 70 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 전체 인식률 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 인식률(1) | 57.50 | 62.50 | 70.00 | 82.50 | 73.75 | 68.75 | 69.17 |
| 인식률(2) | 70.00 | 76.25 | 85.00 | 91.25 | 90.00 | 83.75 | 82.91 |

위의 결과에서 알 수 있듯이 단순히 장단축의 비만 가지고 물체의 면을 인식한 경우보다 장단축의 길이를 이용해 각 모델면들의 퍼지함수를 생성하고, 이 퍼지함수와 비교를 통해 물체의 면을 인식한 퍼지융합알고리즘의 경우가 인식률에 있어서 약 14%정도의 향상이 있음을 알 수 있다. 표 1과 2를 살펴볼 때 물체의 면을 가장 잘 구별할 수 있는 최적화된 힘의 크기는 200정도임을 알 수 있으며, 모델 물체 중에서는 원기둥1의 면이 가장 좋은 인식률을 갖는다.

본 논문에서는 다중센서시스템을 이용하여 접촉 시에 물체의 접촉면의 형태를 결정할 수 있는 퍼지융합알고리즘을 제안했다. 단순히 접촉면의 장단축의 비만 이용하여 물체의 면을 인식하는 경우, 면들의 특성상 인식에 혼돈을 일으킬 수 있으며 이에 따라 정확하게 물체의 면을 인식하기가 어려워진다. 따라서 측정된 면의 장단축의 비 뿐만 아니라 물체가 측정될 때의 힘의 크기를 파악하고 퍼지융합알고리즘을 적용함으로써 접촉시 접촉면을 결정하는데 보다 효과적인 인식률을 보이게 되었다. 퍼지융합알고리즘을 이용하여 물체의 면을 인식했을 경우 전체인식률은 82% 이상이며, 특히 물체의 면들이 잘 구별되어지는 최적화된 힘의 크기가 가해지는 경우에는 91%이상의 인식률을 보이고 있다. 또한 장단축의 비만으로 물체의 면을 인식했을 경우보다 인식률 면에서 약 14%정도 인식률의 향상을 보여주고 있다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 다중손가락을 가진 로봇의 손을 이용하여 3차원 물체를 인식하는데 적용될 수 있다.

앞으로의 연구과제로는 본 연구실에서 개발한 센서시스템을 소형화하는 작업으로 첫째 CCD와 소형렌즈를 이용하여 시각센서의 크기를 소형화해야 하고, 힘/역학센서도 소형센서를 제작해야 한다. 또한 광원을 소형센서에 주사하는 방법, 센서들의 출력을 얻기 위해 배선을 최소화하는 작업등이 필요하며 이에 따른 알고리즘도 개선되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] IAN M. ANDERSON and JAMES C.BEZDEK, "Curvature and Tangential Deflection of Distance Arcs: A Theory Based on the Commutator of Scatter Matrix Pairs and Its Application to Vertex Detection in Planar Shape Data", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-6, NO 1. pp. 27-40, Jan, 1984.
- [2] M.A.bdulghafour and M.A.Abidi, "Fuzzy Logic Based Data Integration : Theory and Applications", *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on MFI*, pp.151-160, 1994.
- [3] Dennis M. Buede, "Examination of Fuzzy Subsethood Theorem for data Fusion", *Proceeding of the 1994 IEEE International Conference on MFI*, pp. 430-434, Oct, 1994.
- [4] Martial Hebert, Katsushi Ikeuchi, Herve Delingette, "A Spherical Representation for Recognition of Free-Form Surface", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 7, pp. 681-690, July, 1995.
- [5] Hitoshi Maekawa et. al "Development of a finger-shaped tactile and its evaluation by active touch", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1328-1334, 1992.
- [6] Jean Ponce and Bernard Faverjon, "On Computing Three-Finger Force-Closure Grasps of Polygonal Objects", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.11, pp.868-881, 1995.
- [7] 한현수와 1인, "광촉각센서와 역학센서의 다중센서시스템을 이용한 3차원접촉면의 인식 및 위치의 결정", 한국자동제어학술회의논문집, 제1권 pp. 148-152, 1995