



# 인간의 촉각 메카니즘과 촉각센서

권 영 하

## 1. 머리말

어둠속에서 물건을 찾거나 물체의 형태를 구별할 때는 촉각을 이용하기 위해 손으로 더듬거나 문지르며, 상품의 질을 판단하기 위해서는 눈으로 인지하는 과정 이외에 손으로 만져보며 느끼는 질감을 사용한다. 이와 같이 촉감은 인간의 피부에 접촉되는 물체사이에서 나타나는 현상이다. 특히 의류는 인간을 감싸는 제품으로 섬유산업에서 질감은 반드시 연구되어야 하는 학문분야이다. 섬유산업과 더불어 촉감에 대한 연구는 시작되었으며 최근에는 로봇공학, 의공학, 심리학 분야에서 다양한 목적을 가지고 연구가 수행되고 있다. 촉각센서로 측정된 물리적, 역학적 현상들로부터 감성적인 인간의 표현과의 관계를 분석하여 촉감을 객관화시키는 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 기존의 단순 로봇으로부터 발달된 인체내부에 투입되는 초소형 팔과 손을 갖는 의료기구의 개발에 걸쳐 촉각센서는 응용되고 있으며 전자산업의 발달과 함께 대용량의 자료를 실시간 처리가 가능하게 되어 더욱 센서의 개발에 기틀을 마련하고 있다. 그러므로 촉각센서의 기본적인 원리를 이해하고 응용가능 범위에 대해서 설명할 것이다.

## 2. 인간의 촉각

인간이 외부로부터 신체에 주는 감각은 촉각, 시각, 청각, 후각, 미각의 5가지 감각을 통해서 느끼게 된다. 그 중에서 촉각은 다른 감각기관이 발달되기 이전의 가장 원시적인 감각기관으로 시작하여 인간의 중요한 감각으로 여겨지고 있

다. 피부자극에 의한 촉각을 감각기관으로부터 인간이 정신적으로 해석하여 느끼는 감정을 촉감이라고 생각할 수 있다. 손으로 물건을 쥐거나 문지를 때 손바닥과 물체표면 사이의 물리적인 현상에 의해 자극이 손바닥에 전달되어 뇌에서 반응하여 느끼는 기본적인 과정을 Figure 1에 나타내고 있다. 외수용기경로(exteroceptive pathways)와 내수용기경로(proprioceptive pathways)를 통해 자극이 뇌와 척추에 전달되어 느끼게 되고 이에 따른 운동반응이 운동경로(motor pathways)에 의해 근육에 전달되는 과정을 설명하고 있다. 인간의 피부로 안쪽에는 여러 가지 센서에 해당되는 기관들이 Figure 2와 같이 존재하여 외부로부터 힘, 진동, 압력, 온도 등을 감지하여 촉감을 느끼게 된다. 손바닥과 같이 털이 존재하지 않는 피부는 표피(epidermis), 진피(dermis), 피하조직(subcutaneous fat)으로 층을 이루고 있으며 내부에는 마이너스 소체(missner corpuscle), 촉반(merkel's disk), 파치니 소체(pacinian cor-

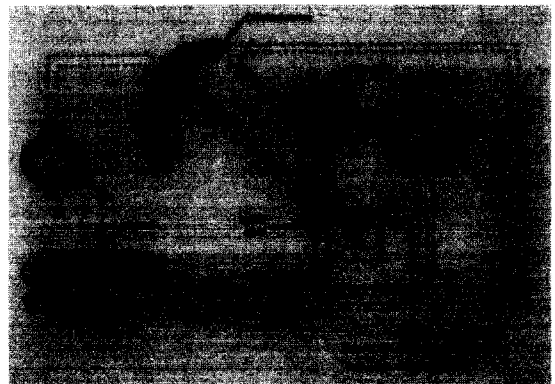


Figure 1. 인간의 손으로 물건을 잡고 느끼는 감각 경로.

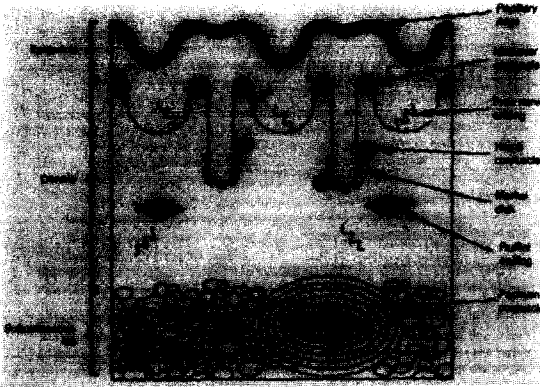


Figure 2. 촉각관련 신경의 분포를 나타내는 손끝의 단면도.

puscle), 루피니 소체(ruffini corpuscle) 등의 센서가 자유신경종말(free nerve ending)에 연결되어 외부적인 자극을 감지하고 있다. 외부적인 자극은 대부분 역학적인 성질을 갖는 진동, 압력, 힘, 온도 등으로 Table 1과 Table 2에 범위와 자극의 내용에 대해서 요약되어 있다. 감지 가능한 힘의 크기는 수 mN으로 대단히 작은 크기의 값을 측정하는 능력을 인간이 보유하고 있음을 알 수 있다. 특히 손을 움직일 때 느끼는 촉감은 압력과 더불어 움직이는 힘(진동)이 중요한 감지 요소가 된다. 더욱이 털(hair) 또는 동물에서의 더듬이가 나와있는 피부에서는 지극히 미소한 힘의 변화도 느끼게 된다. 이와 같은 여러 가지 역학적인 자극과 온도의 변화와 더불어 눈으로 보

Table 1. 외부자극에 따른 각 소체들의 반응종류와 범위

Nerve ending	Receptive field (mm)	Vibration response (Hz)	Stimulus
Meissner	3~4	8~64	Texture, normal force
Merkel	3~4	2~32	Shape, edges, texture
Pacinian	10	64~400	Vibration
Ruffini	-	1~16	Lateral skin stretch

Table 2. 온도자극에 따른 각 소체들의 반응종류와 범위

Nerve ending	Temperature range (°C)	Stimulus
Kraus	18-40	Cold
Ruffini	40+	Warm(normal body temp. 37 °C)

고 느끼며 과거의 경험과 문화적, 사회적 요소가 결합된 감정 즉, 질감을 창출하게 한다.

### 3. 촉각 센서

촉각센서(tactile sensor)는 외부의 물리적인 자극을 접촉에 의해 측정하는 기구와 주변 장치를 말한다. 센서에 의해 나타나는 신호는 컴퓨터 시스템과 데이터수집 및 처리장치를 이용하여 정리가 된다. 촉각센서는 피부아래에서 외부자극을 느끼는 감각소체에 해당되며 1980년대부터 개발되기 시작하였다. 촉각센서에서 제공되는 데이터로부터 다음과 같은 촉감과 관계되는 인식을 인간을 대신하여 수행할 수 있다.

- ① 단순 접촉: 센서와의 단순 접촉여부
- ② 힘의 측정: 접촉되는 힘의 정량적인 크기와 방향(normal force, shear force, torque), 힘의 분포
- ③ 3차원 형상: 접촉되는 물체의 정량적인 3차원 형상
- ④ 미끄러짐: 미끄러지는 방향과 마찰력
- ⑤ 온도: 접촉면의 열전도성과 절대온도
- ⑥ 진동: 진폭과 진동수, 가속도

촉각센서는 이와 같은 측정 가능한 물리적인 성질들 중에서 1 또는 수 개의 성질을 동시에 측정할 수 있도록 설계되어진다. 측정된 값들을 처리하여 인간이 느끼는 촉각 또는 질감으로 변환시키는 해석이 필요하다. 인간의 감각소체의 기능을 대신할 수 있는 촉각센서로서 위의 여러 측정 가능한 물리적인 성질들을 인식하기 위해서는 다음과 같은 조건을 갖추어야 된다.

- ① 센서의 간격이 1~2 mm 이내로서 손끝의 넓이에 10×20점 정도 array 형태로 설치되어야 된다. 인간의 손끝에는 10×15개의 접촉감지점이 존재한다.
- ② 하나의 센서가 감지하는 힘의 크기는 0.5~10 g, 이내로서 1/1000의 감응도를 가져야 한다.
- ③ 하중이력과 반복도가 좋고 안정성이 있어야 된다.
- ④ 신호의 수집속도는 1 kHz의 동적인 측정이 되어야 속도의 변화에 따르는 촉감의 재현이 가

능하다.

⑤ 표면은 가능한 지문이 있는 약간 거친 인간의 피부와 비슷해야 된다.

⑥ 촉감센서에서 감지되는 수직힘(normal force), 압력(pressure), 전단힘(shear force)이 주로 힘의 분포, 접촉면적, 굴곡의 정도, 마찰계수 등을 측정 분석하여 촉감을 인식하는 해석을 해야한다.

#### 4. 센서의 원리 및 응용

촉감센서의 원리는 기본적으로 미소 힘을 측정하는 개념을 가지며 손끝과 같이 압력에 따른 형태의 변화와 힘의 분포 및 움직일 때 나타나는 진동을 종합적으로 감지하여야 된다.

##### 4.1. 공기압을 이용한 센서(pneumatic sensor)

컴퓨터의 키보드를 손끝으로 누를 때 촉감의 차이를 느낄 수 있으며 이때, 누르는 힘에 대한 저항힘의 크기는 미소한 차이에도 불구하고 촉감을 달리하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 힘의 측정은 Figure 3에서와 같이 압축된 공기를 돔 형태의 금속판에 넣어 반지름의 변화로 미소 힘이 측정되는 원리를 설명하고 있다.

##### 4.2. 압전체를 이용한 센서(piezoelectric sensor)

힘을 가하면 전하가 발생하는 성질을 압전성

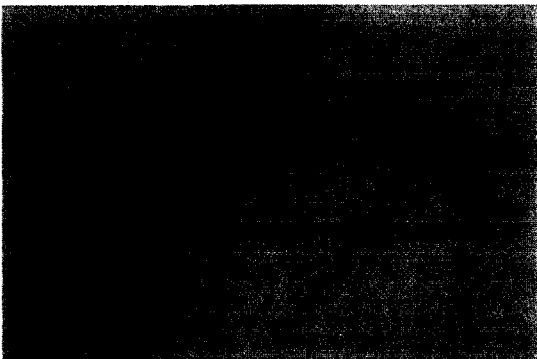


Figure 3. 금속판 돔 형태의 공기압을 이용한 촉감 센서.

이라 하며 이와 같은 성질을 이용한 힘센서는 여러 분야에서 응용되고 있다. 특히 동적인 힘(dynamic force)과 미소 힘의 변화측정에 효과적으로 사용되고 있다. 손끝이 움직일 때에는 진동이 발생되어 Table 2와 같이 동적인 힘의 측정이 필요하게 된다. 그러므로 압전체는 촉감센서에 많이 응용되고 있다. 압전성 고분자의 개발은 다양한 형태로 많은 접촉점을 가지는 촉감센서 array의 구성을 가능하게 하였다. Figure 4는 PVF2(polyvinylidene fluoride) 필름형태의 압전성 고분자를 이용한 센서로서 5×7개의 접촉점을 가지고 있으며 동적인 힘의 크기 및 분포에 응용이 가능하도록 설계되어졌다.

##### 4.3. 광학을 이용한 센서(optical sensor)

빛의 굴절각의 변화를 측정하여 접촉되는 힘의 크기 및 방향을 계산하는 방법이 기본적인 원리가 된다. Figure 5와 같이 반사되는 표면을 갖는 고무가 임의의 표면에 눌러계 되면 변형되어 빛의 반사각이 변화되며, Figure 6은 고무를 이용

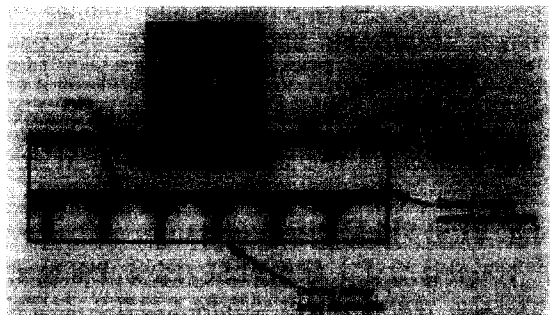


Figure 4. PVF-2 압전체를 이용한 촉감센서 array.

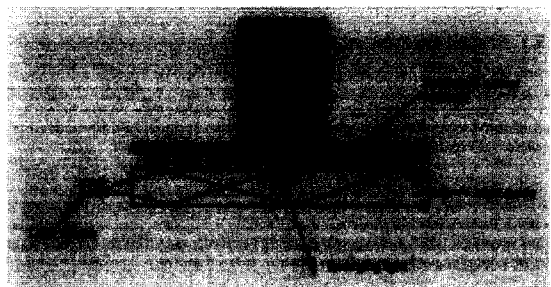


Figure 5. 빛의 반사각 측정을 응용한 촉감센서.

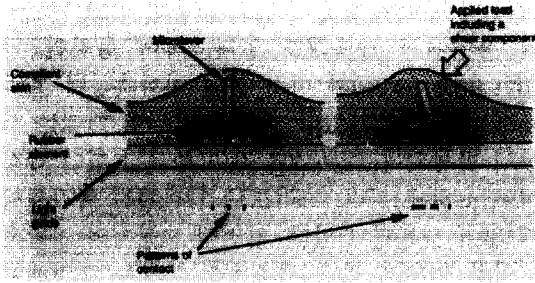


Figure 6. 전단력의 측정이 가능한 광학 촉감센서.

하여 다양한 형태의 표면을 피부와 같은 재료와 전단힘을 받아 변형을 일으킬 수 있는 레버를 설계하여 접촉면을 변화시키는 방법을 이용한 것이다. 이 방법은 힘의 분포를 측정하기 보다는 물건을 잡고 움직일 때 나타나는 힘의 변화 및 미끄러지는 전단힘을 빠르게 인식하는데 유용한 센서이다. Figure 7은 탄성체를 U자 형태로 구부린 상태에서 힘을 가하여 변형되는 정도를 측정하여 힘의 크기로 환산하는 방법이다. 발광부에서 일정한 양의 빛이 방출되고 탄성체의 처짐에 따른 빛의 손실을 측정 미소 힘의 크기를 환산하는 원리이다. 크기가 4 mm×6 mm×3 mm로서 비교적 크지만 낮은 하중이력과 좋은 반복성과 선형성을 유지하므로 미소 힘의 측정에 유용하게 사용된다. 특히 로봇이 작고 예민한 물건을 집을 움직이는 경우에 응용되어 사용되고 있다.

4.4. VLSI 기술을 이용한 센서

전자산업 발달과 함께 VLSI 기술을 응용한 촉각센서의 개발이 미국의 Stanford 대학을 중심으로 연구되고 있다. Figure 8은 300 μm×300 μm 크기를 갖는 미소 힘 측정센서의 현미경 사진이

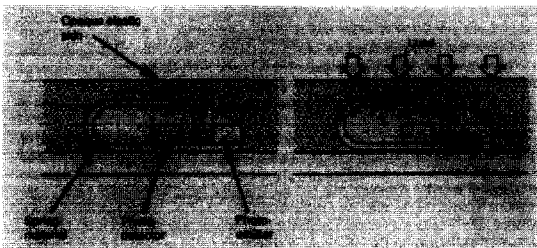


Figure 7. 금속 탄성체와 광학을 이용한 촉감센서.

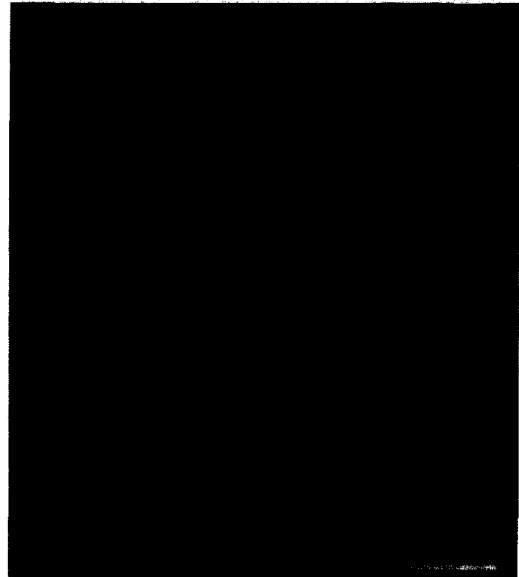


Figure 8. VLSI 기술을 응용한 촉감센서의 현미경 사진.

다. CMOS(complimentary metal-oxide-silicon) 제조 공법을 이용하여 silicon 자체가 감지부 역할을 하고 있으며 수직응력 뿐만 아니라 전단응력을 동시에 측정할 수 있는 구조를 가지고 있다. Figure 9는 구조 및 전기적인 구성의 개략도로서 4개의 감지부 탄성체에서 발생하는 전압의 변화를 측정하여 힘의 크기로 환산하는 방법이다. 측정된 감응도는 수직방향으로 51 mV/kPa<sup>-1</sup>이며 전단방향으로는 12 mV/kPa<sup>-1</sup>이며 64×64 array

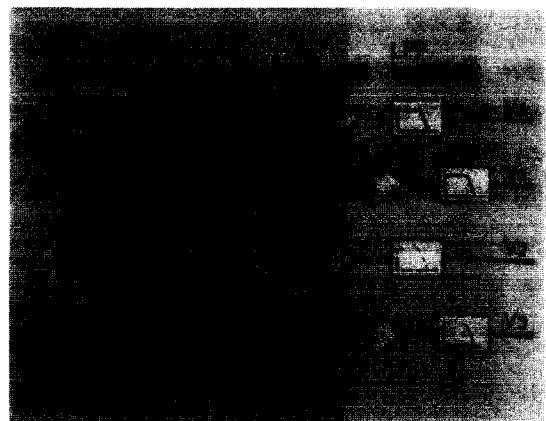
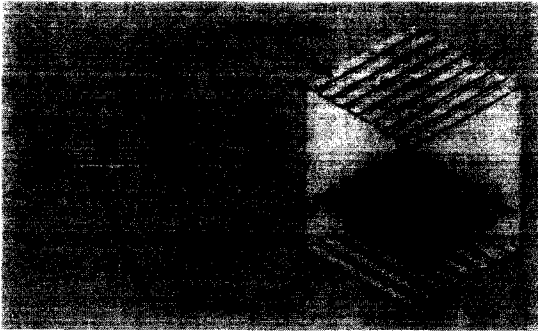


Figure 9. 4개의 탄성체로 구성된 촉감센서의 구조 및 전기적 개략도.



**Figure 10.** 전기용량 측정방법을 이용한 촉감센서 array.

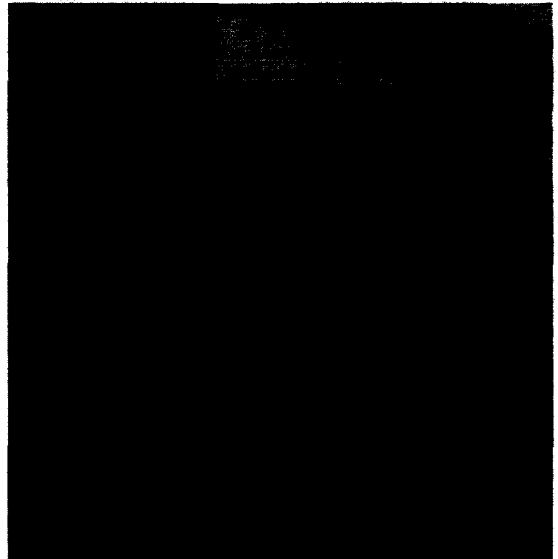
센서의 제작이 가능하므로 접촉되는 각 점의 힘의 크기와 방향을 종합적으로 측정하는 힘센서로서 촉감을 측정하는 고정밀 감지부로 응용될 것이다.

**4.5. 기타 방법**

힘을 측정하는 대부분의 방법이 촉감센서의 원리로서 응용이 가능하다. 가장 일반적으로 많이 응용되는 스트레인 게이지 방법은 작은 힘의 크기를 측정하는 로드셀의 제작에 사용되며 로봇의 팔에 장착되어 여러 방향의 힘을 동시에 측정하는데 응용된다. 그 외에도 Figure 10과 같이 두 개의 구리띠 사이에 고무를 넣어 두판사이에서 발생하는 전기용량을 측정하여 접촉압력의 분포를 측정하는 촉감센서가 있다. 한편 CCD 카메라를 사용하여 접촉면의 모양을 영상처리 방법으로 분석함으로써 미소변형에 따른 힘의 크기와 방향을 측정하는 촉감센서의 개발에도 응용되고 있다.

**5. 응용 예**

촉감센서의 개발은 Figure 11과 같이 로봇의 손이 물건을 잡을 때 가해지는 힘의 크기와 방향을 측정하기 위해서 시작되었다. 최근에는 전자산업의 발달과 계측장치의 고도화와 더불어 측정범위도 0.1 g 이내의 미소 힘까지 가능해지고 동적인 측정이 가능하며 능동적인 시스템이 구축되어 응용범위도 다양하게 확대되고 있다. 의



**Figure 11.** 촉감센서의 응용 예로 유리전구를 집고있는 로봇 사진.

학분야에서는 인체 내부에 작은 크기의 촉감센서를 투입시켜 만져지는 형태를 파악하는 진단기구의 개발이 실용단계에 있다. 한편, 감성공학 분야에서는 인간의 촉감을 구현하기 위한 노력도 계속되고 있다. 손끝이 물체의 표면을 문지를 때의 현상을 촉감센서가 미소 힘을 측정하여 분석함으로써 인간이 느끼는 감정을 예측하는 시스템을 구축하는 분야이다. 피부에 접촉되며 일어나는 현상을 미소 힘의 크기와 방향, 진동, 압력, 온도 등의 여러 가지 물리적, 역학적 특성으로 구분할 수 있다. 이와 같은 물리적, 역학적 특성을 촉감센서로 측정하고 인간의 감성적인 표현과 인체의 생리적인 현상과의 상관관계 분석은 의식주의 모든 신체 접촉과 관계되는 산업제품의 설계에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

**6. 최근 연구 동향**

인간의 촉감 시스템을 이해하기 위해 촉감감지기관과 여기에서 얻어진 정보의 경로에 관한 연구는 의학과 생리학 분야에서 계속되고 있다. 더욱이 외부 자극에 대한 정보를 뇌에서 인지하고 언어로 표현하는 연구도 심리학, 생리심리학,

의학, 섬유공학, 기계공학 등 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 외부자극에 대한 인식은 상황, 위치, 자극정도에 따라 임계자극도 다양하게 나타나므로 연구에는 많은 어려움이 따르고 있다.

촉감 측정분야는 인간의 손과 팔을 대신하고 기능성 로봇산업에 빠르게 응용되고 있다. 특히 속도, 가속도, 위치, 방향, 힘의 크기 등을 측정하여 손, 관절, 손끝 등 움직임 전체로 촉감을 거의 인간과 같이 느끼는 Haptic에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전자 정보산업의 발달과 함께 고성능 기기가 개발된 vision sensing과 결합되어 재료나 물체의 경도, 열전도, 형태, 질감 등을 측정하고 인식하는 로봇이 개발되어 의학, 기계공학, 전자산업 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

## 7. 맺는말

촉각의 개념을 이해하고 원리를 파악하여 센서를 개발하고 응용하는 연구는 여러 첨단분야에서 계속되고 있다. 특히 연구의 범위가 넓기 때문에 다양한 분야의 종합적이고 체계적인 분위기에서만 연구 가능한 분야라고 생각된다. 최근 국내에서 감성공학의 연구가 활발하게 진행되어 촉감에 대한 관심도 상당히 증대되어지고 있다. 지금까지 미소 힘 센서의 개발은 힘 측정의 원리를 응용한 범위 이내에서 이루어졌으나

최근 한국표준과학연구원을 중심으로 촉감의 객관적인 평가를 위한 연구가 진행되고 있다. 촉감 센서의 개발과 응용은 산업의 발달과 인간생활의 풍요로움과 더불어 수요가 계속 증대될 것으로 판단된다. 관련분야의 다양화와 산업제품의 직접적인 생산과 관련되지 않은 분야이므로 국가적인 차원에서 지속적인 투자가 이루어지면 기반기술로서 산업전반에 영향을 줄 수 있는 연구개발 과제라고 판단된다.

## 참고문헌

1. R. A. Russel, "Robot Tactile Sensing", Prentice Hall, 1990.
2. B. J. Kane, M. R. Cutkosky, and G. T. A. Kovacs, "CMOS-compatible Taction Stress Sensor for Use in High-resolution Tactile Imaging", Sensors and Actuator A54, pp.511-516, 1996.
3. R. S. Fearing, G. Moy, and E. Tan, "Some Basic Issues in Teletaction", International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico, April, 1997.
4. D. Pawluk, Ph. D. Thesis, Harvard University, U.S.A., 1997.
5. H. R. Nicholls, "Advanced Tactile Sensing for Robotics", World Scientific, 1992.
6. J. S. Son, Ph. D. Thesis, Harvard University, U.S.A., 1996.