

분포형 유연 촉각센서 시스템의 개발

유기호*, 윤명종**, 정구영**, 권대규*, 이성철*

Development of a Distributed Flexible Tactile Sensor System

Kee-Ho Yu*, Myoung-Jong Yoon**, Gu-Young Jeong**, Tae-Gyu Kwon*, Seong-Cheol Lee*

ABSTRACT

This research is the development of a distributed tactile sensor using PVDF film for the detection of the contact state. The prototype of the tactile sensor with 8×8 taxels was fabricated using PVDF film and flexible circuitry. In the fabrication procedure, the electrode and the common electrode patterns are attached to the both side of the $28 \mu\text{m}$ thickness PVDF film. The sensor is covered with polyester film for insulation. The signals of a contact pressure to the tactile sensor are sensed and processed in the DSP system in which the signals are digitalized and filtered. And the signals are integrated for taking the force profile. The processed signals of the output of the sensor are visualized to take the shape and force distribution of the contact object in personal computer. The usefulness of the sensor system is verified through the sensing examples.

Key Words : Distributed flexible tactile sensor(분포형 유연 촉각센서), Service robot(서비스 로봇), PVDF film(압전 고분자필름), Flexible printed circuitry(연성회로기판), Signal processing(신호처리), Detection of contact state(접촉상태의 검출)

1. 서론

최근 전통적인 산업용 로봇으로부터 가사보조, 의료, 재활 등과 같이 개인용 또는 서비스용 로봇의 가능성에 대한 기대가 커지고 있다. 이와 같은 비 산업용 로봇의 경우, 충돌안전성의 확보는 물론이고 외부대상물과의 접촉에 의한 촉각정보의 검출 기능이 필수적으로 요구된다. 이를 위해서는 인간을 포함한 외부의 장애물 및 작업대상과의 접촉위치 및 형상, 압력분포 등을 실시간에 감지할 수 있는 분포형 유연 촉각센서 및 신호처리시스템의 개발이 필수 불가결하다. 분포형 유연 촉각센서는 이

외에도 의족 등의 재활용 의료기구의 개발, 치아교정의 확인, 스포츠 용품의 개발 및 스포츠 동력학의 해석 등 폭넓은 분야에 그 응용이 기대되고 있다.

현재까지 압전 및 압전저항소자, 광학, 탄소섬유, Capacitive 물질, 초음파 등의 다양한 재료 및 구조를 이용한 촉각센서에 관한 연구가 수행되어 왔으나^[1-9], 주로 로봇의 손가락 및 핸드부가 대부분이다. 또한, 매니플레이터를 포함하여 로봇 전체에 촉각을 분포시킨 연구는, 근접센서를 로봇 암에 분포시킨 경우^[10]나 회전을 고려한 관절부용의 접촉센서를 고안한 경우^[11] 정도로 범용적인 인공피부

2001년 8월 20일 접수

* 전북대학교 기계항공시스템공학부(자동차신기술연구소)

** 전북대학교 대학원 메카트로닉스공학과

에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

위와 같은 인공 촉각피부는 촉각센서에 요구되는 기본적인 특성 이외에도 다양한 형태의 로봇에 피복하기 위해서는 충분한 유연성을 가지고 있어야 하며, 촉각검출요소의 형상이나 크기를 응용형태에 따라 다양하게 변경하여 실험실 수준에서도 용이하게 제작할 수 있는 구조를 가질 필요가 있다. 그동안 필자들은, 열거한 요구사항을 만족하는 재료로서 고분자 압전필름(PVDF film)이 적합함을 확인하고 소수의 검출요소를 가지는 촉각 센서를 시험제작하여 양호한 출력특성을 확인하였다^[12-14].

본 연구에서는 실제적인 응용을 고려하여 촉각 검출요소의 수를 64(8× 8)개로 늘리고 병진운동기구를 이용하여 출력특성을 정량적으로 평가하는 한편, 신호처리 시스템과 융합하여 센서의 출력을 가시화 하였다. 이하, 센서의 제작 방법 및 구조, 출력 특성, 신호처리 알고리즘, 접촉상태 검출 실험결과를 소개하여, 본 연구에서 개발한 촉각센서가 인공 촉각피부의 구성에 적합한 구조를 가지고 있음을 보인다.

2. PVDF필름과 센서의 구조

2.1 PVDF 필름

PVDF필름은 가해진 하중의 변화량에 따라 전압을 발생시키는 얇은 박막의 필름으로 유연하고 가벼우며 넓은 면적과 임의의 형상에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. PVDF의 출력특성은 전하 모드, 전압모드에 따라 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$D = \frac{Q}{A} = d_{3n}X_n \quad (n=1,2, \text{ 또는 } 3) \quad (1)$$

$$V_o = g_{3n}X_n t \quad (n=1,2, \text{ 또는 } 3)$$

식 (1)에서 D 는 전하밀도, Q 는 전하, A 는 전극면적, d, g 는 작용한 압축력[인장력]의 축방향에 대한 압전상수, X_n 은 작용한 압축력, V_o 는 PVDF의 출력전압, t 는 필름의 두께이다. n 은 전극이 필름 표면의 위와 아래 면에만 적용되므로 축의 수치분류를 나타낸 Fig.1에서 필름의 두께에 해당하는 3의 방향이다.

2.2 센서의 구조

본 연구에서 제작한 촉각센서의 사진을 Fig. 2

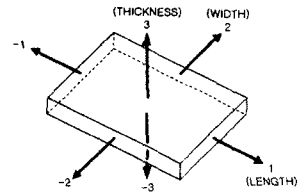


Fig. 1 Numerical classification of axes

Table 1 Parameters of PVDF

Parameter	Value	Unit
Thickness t	28	μm
Piezo Strain Constant	d_{31} 23 d_{33} -33	$(10^{-12})C/N$
Piezo Stress Constant	g_{31} 216 g_{33} -330	$(10^{-3})Vm/N$
Capacitance C	380	pF/cm^2

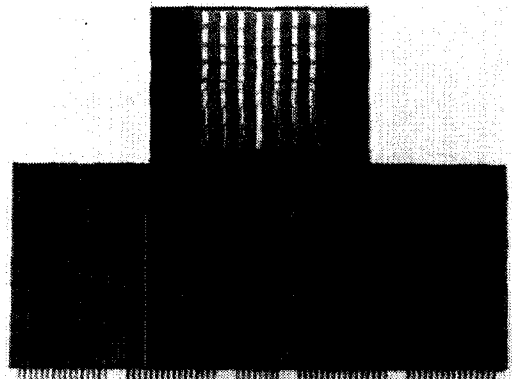


Fig. 2 Photograph of the tactile sensor using PVDF

에 나타내었다. PVDF 필름의 한쪽 면에 공통전극, 다른 한쪽 면에 8× 8의 전극을 부착하여 64개의 촉각검출요소(taxel)를 가지도록 설계하였으며, 각각의 촉각검출요소가 외부의 접촉압력에 상응하는 전압을 발생하도록 하였다. 이하, 구체적인 제작방법과 구조를 소개한다.

Fig. 3은 FPC 기법을 이용해 제작된 촉각센서의 구조를 나타내고 있다. FPC란 Flexible Printed Circuit의 약자로 흔히 연성회로기판이라고 불리우며 FW(Flexible Wire) 또는 FC(Flexible Circuitry)라고 통용되는 전자부품이다. 기존의 PCB(Printed

Circuit Board)와의 차이점은 배선간 절연물로 Polyimide 필름을 사용하므로 기존 PCB에 비해 대단히 얇고 가벼우며 두께가 100 μ m 정도(단면기준)의 필름이므로 굴곡이 가능하고 3차원 배선이 가능하다. 제작된 촉각 센서는 64개의 촉각검출요소를 가지도록 PVDF 필름 양면에 공통전극(common electrode)과 8 \times 8의 전극(면적 5mm \times 5mm)과 리드선(electrode & lead line)을 두었다. 또한 접촉 물체와의 절연과 촉각센서의 손상을 최소화하기 위하여 센서의 접촉면과 배면에 폴리에스터 필름을 부착하였다.

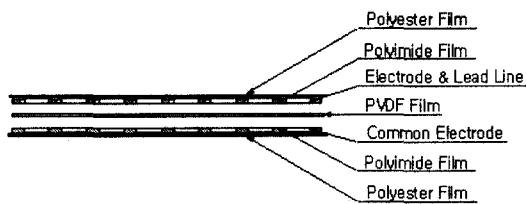
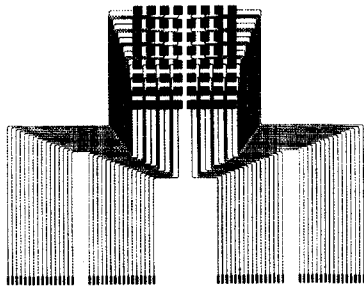
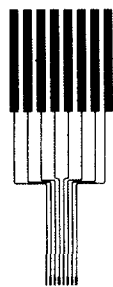


Fig. 3 Structure of the tactile sensor



(a) Electrode and lead line



(b) Common electrode

Fig. 4 Pattern of layers used for fabrication of the tactile sensor

이상에서 사용된 각각의 전극과 리드선, 공통전극에 대한 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 촉각검출요소의 크기는 5mm \times 5mm이며 촉각검출요소들의 간격은 3mm, 리드선의 두께는 0.3mm이고 커넥터 쪽의 리드선 간격은 2.54mm이다. 촉각센서의 크기는 213mm \times 165mm이며 유효 검출 면적의 크기는 61mm \times 61mm이다.

3. 신호처리

3.1 시스템 구성

Fig. 5는 촉각센서의 신호 처리 시스템 구성도이다. 64개의 촉각검출요소로부터 나오는 대량의 신호를 처리하기 위하여 64개를 4등분하여 16개씩 4개의 아날로그 멀티플렉서(analog multiplexer)를 사용하여 일정시간 간격으로 순차적으로 검출하도록 하였다. 이때 각각의 촉각검출요소의 검출시간 간격은 8ms로 125Hz이다. 여기서 사용한 아날로그 멀티플렉서는 MAXIM사의 16-Channel CMOS analog multiplexer (MAX306)이며, 최대 스위칭 속도는 250ns로서, 그 기능도를 Fig. 6에 나타내었다. 제어단자(A0, A1, A2, A3, EN)를 통하여 스위치를 제어하고 \pm 12V를 전원입력단자(V+, V-, GND)에 공급하여 입력단자(NO1-NO16)로부터 들어오는 센서검출 신호를 출력단자(COM)를 통하여 컴퓨터에 장착된 실시간 처리 DSP 시스템(dSPACE 1102)에 순차적으로 입력한 후 A/D변환 및 필터링을 거친다. 한편 DSP 시스템상의 신호처리 알고리즘은 입력된 데이터를 이용하여 접촉형상 및 압력분포를 추정하고 영상 처리하여 접촉상태를 가시화 한다.

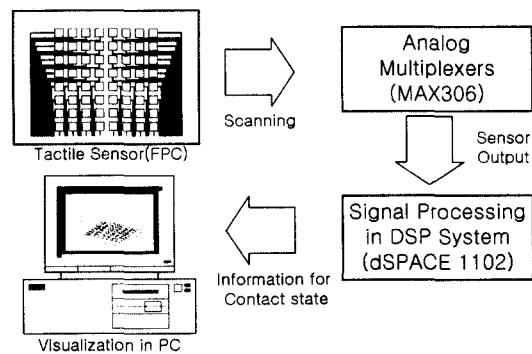


Fig. 5 Configuration of signal processing system

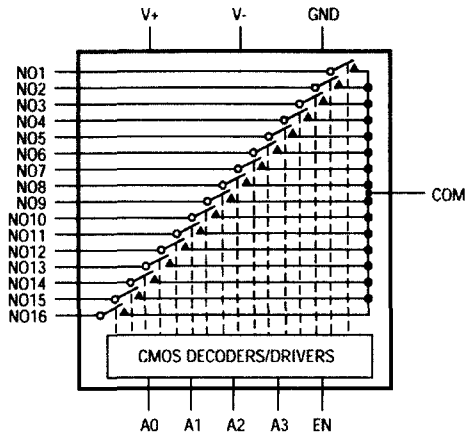


Fig. 6 Functional diagram of MAX306 16-channel multiplexer

3.2 신호처리

촉각센서로부터 얻어진 신호를 처리하는 알고리즘의 개략도를 Fig. 7에 나타내었다. 아날로그 멀티플렉서를 통하여 차례로 검출된 촉각센서의 신호는 각각의 촉각검출요소들의 검출된 시간과 순서로 신호를 분리하는 신호분리과정(Demultiplex)을 거친다. 이렇게 분리된 촉각검출요소들의 신호를 DC 전압 성분(offset)과 교류 전원에 의한 60Hz 전후의 주파수를 가지는 잡음 및 전기적, 기계적 잡음들을 없애기 위하여 차단주파수가 각각 0.5Hz와 40Hz인 Butterworth식의 2차 대역통과 필터(Band Pass Filter; BPF)를 사용하여 신호에 포함된 잡음을 제거하였다. 이렇게 하여 얻어진 신호는 작용한 힘의 시간에 따른 변화량($\frac{\partial F}{\partial t}$)을 나타내고 있기 때문에 적분을 취함으로써 시간에 따른 힘의 변화를 파악할 수 있으며, 이를 개인용 컴퓨터에서 영상처리하여 힘의 분포 및 동적인 변화를 실시간으로 가시화 하였다.

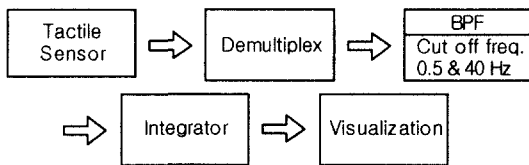


Fig. 7 Block diagram of signal processing flow

4. 출력특성

Fig. 8은 제작된 촉각센서의 출력특성을 평가하기 위한 실험 장치의 구성도이다. DC 서보모터(servomotor)와 볼 스크류 메커니즘(ball screw mechanism)으로 구성된 병진운동을 하는 보에 스트레인 게이지(CAS사, AE-11-S30N-120-EL)를 부착하고, 병진운동 기구로부터 다양한 힘을 지지대(base)에 고정되어 있는 촉각센서에 가했다. 스트레인 게이지로부터 얻은 스트레인(strain)과 힘의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{6Fl}{Ebh^2} \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 스트레인(strain), F 는 힘(force), l 은 스트레인 게이지로부터 접촉점까지의 거리(length), E 는 보의 영계수(Young's modulus), b 는 보의 폭(width), h 는 보의 두께(thickness)이다. 식 (2)로부터 병진운동하는 보에 의한 접촉력과 촉각센서의 출력을 Fig. 9에 나타내었다. X축은 병진운동기구로 가한 힘의 크기(newton)이며, Y축은 촉각센서의 출력(mV)이다. 약간의 편차를 포함하고 있지만, 거의 선형적인 특성을 나타내고 있어, 제작된 센서가 양호한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 실험결과를 1차식으로 근사하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$Y = 0.56 X - 0.88 \quad (3)$$

여기서 X는 힘의 크기(N)이며, Y는 촉각센서의 출력(mV)이다.

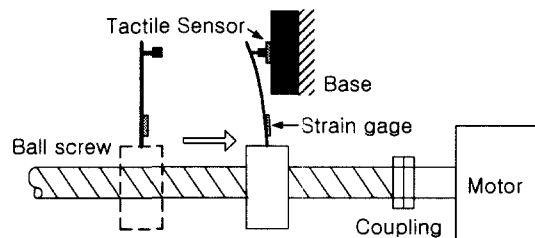


Fig. 8 Experimental setup for calibration

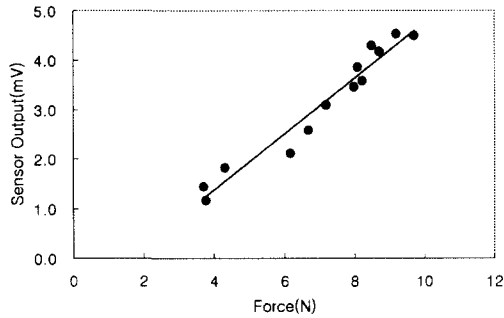


Fig. 9 Output characteristics of the sensor

5. 접촉력 검출실험 및 고찰

Fig. 10은 이상에서 소개한 분포형 유연촉각센서 시스템의 사진이다. 유연한 촉각센서와 신호처리 시스템에 연결된 촉각센서의 패드에 몇 가지 형상의 접촉력을 가하여 얻어진 접촉형상 및 압력분포에 관한 정보를 3차원과 2차원 영상처리하여 가시화 하였다. 3차원 영상의 경우 접촉력의 크기를 쉽게 파악할 수 있는 장점과 2차원 영상의 경우 칼라 혹은 흑백으로 영상처리를 하여 접촉력의 분포를 쉽게 파악할 수 있는 장점을 이용하여 2가지 형태로 접촉상태를 가시화 하였다.

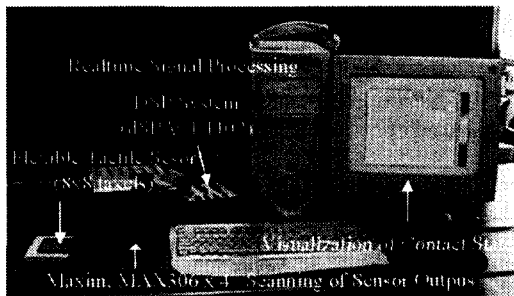


Fig. 10 Photograph of the distributed tactile sensor system

Fig. 11은 다점접촉, 즉 일(一)자 형상의 물체를 임의의 압력으로 접촉하였을 경우의 3차원, 2차원 영상처리 결과이다. 여기서 3차원 영상의 경우 X,

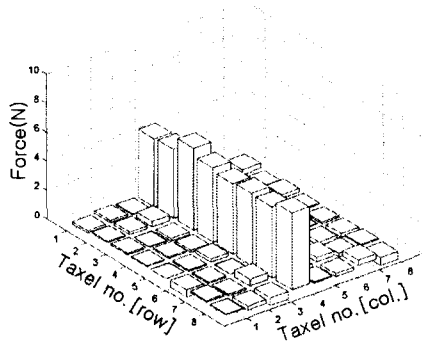
Y축은 촉각검출요소의 행과 열을 나타내고 있으며, Z축은 촉각센서에 가해진 힘(N)이며, 2차원 영상의 경우 X, Y 축은 3차원 영상과 같이 촉각 검출요소의 행과 열을 나타내고 있으며 오른쪽에 힘의 크기에 따른 색깔을 나타내는 기준표를 나타내었고 힘의 단위는 0.1N이다. 4번째 행에 해당하는 요소에 압력을 가한 결과로서 주변의 요소로부터도 미세한 전압이 검출되고 있지만, 무시할 수 있을 정도의 양이며, 이로써 다점접촉 검출에 있어서 양호한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

수차례의 실험을 통하여 임의의 접촉물체의 형상을 추정하고 접촉압력의 분포도 양호하게 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 센서 노이즈로 인하여 촉각검출요소들간에 미세한 불균일 출력이 나타나고 있음을 알 수 있다.

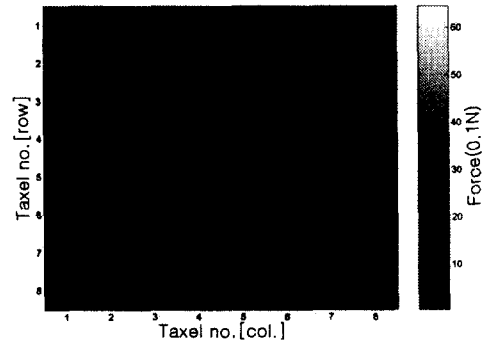
한편, 다점접촉의 다른 경우로서 도넛형의 물체로 임의의 압력을 가했을 경우의 검출결과를 Fig. 12에 나타내었다. 일(一)자 형상의 경우와 마찬가지로 양호한 검출능력을 가지고 있음을 알 수 있다. 다만, 검출요소들의 사이에 물체가 접촉함으로써 접촉주위의 검출요소에도 약간의 압력분포가 생성됨을 알 수 있다.

본 연구에서 제작된 촉각센서가 충분한 유연성을 가지고 있어 임의의 형상을 가지는 기구부에 용이하게 적용할 수 있음을 보이기 위하여, 아크릴 봉에 센서를 부착하여 Fig. 13에 나타내었다. 또한 접촉상태의 동적인 변화에 대한 센서의 출력을 확인하기 위하여, 센서패드 촉각요소의 한 열을 거의 일정한 힘으로 누르면서 이동하였으며, 이때 얻어진 촉각요소의 시간별 출력변화를 Fig. 14에 나타내었다. 센서패드에 분포되어있는 촉각요소가 2차원적으로 움직이는 접촉상태의 변화를 실시간에 양호하게 나타내고있음을 확인할 수 있다.

이상에서 알 수 있는 것처럼, 본 연구에서 개발한 촉각센서는 기존의 관련연구[1][2]에 비하여 제작이 용이하고, 충분한 유연성을 가지고 있어 다양한 형상을 가지는 메카트로닉스 및 로봇의 기구부에 피복하기가 용이한 잇점을 가지고 있으며, 실시간의 동적인 응답이 요구되는 응용분야에도 적용할 수 있는 특성을 가지고 있다.

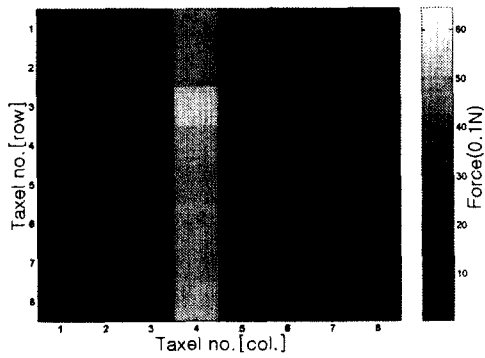


(a) 3-dimensional image



(b) 2-dimensional image

Fig. 12 Sensor response in the case of doughnut shape contact



(b) 2-dimensional image

Fig. 11 Sensor response in the case of bar shape contact

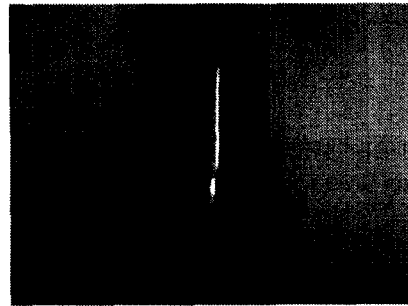
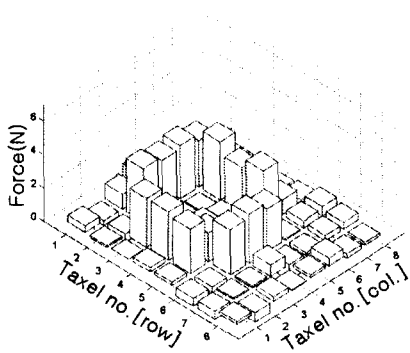


Fig. 13 Attached sensor on a rod



(a) 3-dimensional image

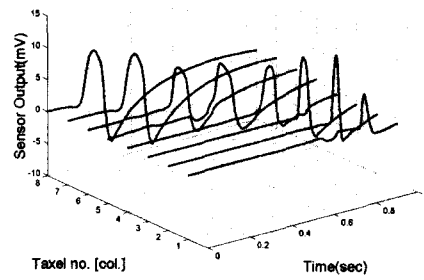


Fig. 14 Sensor response due to the moving force

6. 결론

이상으로, 고분자 압전필름을 이용하여 8×8의 촉각검출요소를 가지는 분포형 유연촉각센서의 시험제작을 소개하고, 출력특성과 신호처리 시스템을 구성하여 접촉상태에 관한 정보를 얻고 이를 가시화한 결과를 보였다. 앞에서도 언급한 것처럼, 센서의 구조가 인공촉각피부를 구성하는데 적합하며, 설계한 신호처리 알고리즘은 접촉상태에 관한 정보를 양호하게 얻고 있음을 확인하였다. 또한 접촉형상 및 접촉력 분포를 2차원과 3차원 영상 처리하여 가시화 함으로써 사용자가 쉽게 접촉상태를 파악할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 개발한 센서시스템은 초보적인 기능을 가지는 인공촉각피부뿐만 아니라, 분포형의 다점 촉각검출이 요구되는 의료용, 산업용의 접촉력 검출시스템에도 이용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 전북대학교 메카트로닉스연구센터(RRC)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. H. R. Nicholls, and M. H. Lee, "A survey of robot tactile sensing technology," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 3-30, 1989.
2. Edward S. Kolesar, Jr. and Craig S. Dyson, "Object Imaging with a Piezoelectric Robotic Tactile Sensor," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 87-96, 1995.
3. D. J. Beebe, A. S. Hsieh, D. D. Denton, and R. G. Radwin, "A silicon force sensor for robotic manipulation," *7th Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 889-894, 1995.
4. P. Dario, and D. DeRossi, "Tactile sensors and the gripping challenge," *IEEE Spectrum*, pp. 46-52, 1985.
5. D. DeRossi, L. Lazzeri, C. Domenici, A. Nannini, and P. Basser, "Tactile sensing by an electromechano-chemical skin," *Sensors and Actuators*, Vol. 17, pp. 107-111, 1989.
6. S. Hackwood, G. Beni, L. A. Hornak, R. Wolfe, and T. J. Neson, "A torque-sensitive tactile sensor array for robotics," *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 2, pp. 46-50, 1985.
7. B. Hok, L. Tenerz, and K. Gustafson, "Fiber-optic sensors: A micro-mechanical approach," *Sensors and Actuators*, Vol. 17, pp. 157-166, 1989.
8. Jr. E. S. Kolesar, R. R. Reston, D. G. Ford, and Jr. R. C. Fitch, "Multiplexed piezoelectric polymer tactile sensor," *J. Robotic System*, Vol. 9, pp. 37-63, 1992.
9. M. K. Brown, "Feature extraction techniques for recognizing solid objects with an ultrasonic range sensor," *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-1, pp. 191-205, 1985.
10. E. Cheung and V. Lumelsky, "Development of sensitive skin for a 3D robot arm operating in an uncertain environment," *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1056-1061, 1989.
11. Y. Yamada, K. Shin, N. Tsuchida, and M. Komai, "A tactile sensor system for universal joint sections of manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 4, pp. 512-517, 1993.
12. 윤여홍, 김성진, 이영춘, 유기호, 이성철, "압전 필름 촉각센서의 특성평가," '99년도 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 221-214, 1999.
13. 윤명중, 권대규, 유기호, 이성철, "PVDF를 이용한 유연 촉각센서의 제작 및 특성해석," 제15회 한국자동제어학술회의 CD-ROM (요약문집 p.294), 2000.
14. 유기호, 윤명중, 권대규, 이성철, "PVDF를 이용한 유연촉각센서의 제작과 특성평가," *한국정밀공학회지*, 제18권 제7호, pp. 161-166, 2001.