

PVDF를 이용한 유연 촉각센서의 제작과 특성 평가

유기호*, 윤명종**, 권대규***, 이성철*

Fabrication and Characteristic Evaluation of a Flexible Tactile Sensor Using PVDF

Kee-Ho Yu,* Myung-Jong Yun,** Tae-Gyu Kwon*** and Seong-Cheol Lee*

ABSTRACT

The prototype of a tactile sensor with 4×4 taxels using PVDF was fabricated. The electrode patterns of the thin Cu tape are attached to the $28\mu\text{m}$ thickness PVDF using conductive adhesive and covering the sensor using polyester film for insulation. The structure of the sensor is flexible and the fabrication procedure is easy relatively. Also the output characteristics of the sensor was nearly linear with 8% deviation. The signals of a contact pressure to the tactile sensor are sensed and processed through A/D converter, DSP system and personal computer. The reasonable performance for the detection of contact shape and force distribution was verified through the experiment.

Key Words : Service robot (서비스 로봇), Flexible tactile sensor (유연 촉각센서), PVDF(압전 고분자필름), Signal processing (신호처리), Detection of contact state (접촉상태의 검출)

1. 서론

최근 의료, 재활, 가사 등의 분야에서 서비스 로봇의 역할에 대한 기대가 점점 더 커지고 있는데, 이와 같은 서비스 로봇은 충돌 안전성이 최우선으로 고려되어야 한다. 충돌 안전성의 확보를 위해서는 적절한 메커니즘 및 제어 알고리즘의 개발과 더불어 인간을 포함한 외부의 장애물 및 작업 대상과의 접촉위치, 접촉형상, 접촉압력 등을 실시간에 감지할 수 있는 촉각 검출기능을 가지는 분포형 유연 촉각센서(인공 촉각피부)의 개발이 필수 불가결하다. 분포형 유연 촉각센서는 이외에도 의족 등의 재활용 의료기구의 개발, 치아교정의 확인, 스포츠 용품의 개발 및 스포츠 동력학의 해석 등 폭넓은 분야에 그 응용이 기대되고 있다.

현재까지 압전소자, 광학, 탄소섬유 등의 다양한 재료를 이용한 촉각센서에 관한 연구가 수행되어 왔으나⁽¹⁻⁷⁾, 주로 로봇의 손가락 및 핸드부가 대부분이며 매니플레이터를 포함하여 로봇 전체에 촉각을 분포시킨 연구는, 근접센서를 로봇 암에 분포시킨 경우⁽⁸⁾나 회전을 고려한 관절부용의 접촉센서를 고안한 경우⁽⁹⁾정도이며, 범용적인 인공피부에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 고분자 압전필름(PVDF; Poly vinylidene Fluoride)을 이용하여 인간의 피부와 같은 촉각 검출기능을 가지는 인공 촉각피부의 개발을 목적으로 분포형 유연 촉각센서를 개발 중에 있다^(10,11).

위와 같은 인공촉각 피부는 촉각센서에 요구되는 기본적인 특성 이외에도, 다양한 형상의 로봇이

2000년 11월 8일 접수

* 전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구소

** 전북대학교 대학원 메카트로닉스공학과

*** 전북대학교 국책사업단

나 기구에 피복하기 위해서는 충분한 유연성을 가지고 있어야 하며, 촉각 검출요소(taxel)의 형상이나 크기를 응용형태에 따라 다양하게 변경하여 제작할 수 있는 구조를 가질 필요가 있다. 또한 방대한 양의 촉각검출 요소로부터의 신호를 효율적으로 처리할 수 있는 신호처리 구조의 설계도 요구된다.

본 연구에서는 4×4의 촉각 검출요소를 가지는 압전필름 촉각센서를 설계하여 시험 제작하고 센서의 출력을 신호처리 하여 그 특성을 평가하였다. 구체적으로는, 센서 제작방법, 출력특성, 신호처리 알고리즘, 접촉상태 검출 결과를 소개하여, 본 연구에서 개발한 센서가 인공촉각 피부의 구성에 적합한 구조를 가지고 있으며 동적인 접촉상태를 검출하는데 있어서 양호한 성능을 가지고 있음을 보인다.

2. 제작방법 및 구조

PVDF는 가해진 하중의 변화량에 따라 전압을 발생시키는 얇은 박막의 필름으로 유연하고 가벼우며 넓은 면적과 임의의 형상에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. PVDF의 출력특성은 다음과 같다.

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

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

촉각센서의 제작에 이용된 PVDF(미국 AMP사, 두께 28 μ m)의 주요한 파라미터를 Table 1에 나타내었으며 여기에서 피에조 상수 d 와 g 는 각각 힘에 대한 전하 발생 비율과 방향 스트레스에 대한 출력 전압 비이다. 제작한 촉각센서의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. PVDF의 한쪽 면에 공통전극, 다른 한쪽 면에 4×4의 전극을 부착하여 16개의 촉각 검출요소를 가지도록 설계하였으며, 각각의 촉각 검출요소의 외부의 접촉압력에 상당하는 전압을 발생하도록 하였다. 전극과 리드 선에는 전도성 테이프(미국

3M사 1181, 전도성 아크릴 접착제 부착)를 형상에 맞게 절단하여 사용하였다. 아래에, 구체적인 제작 방법과 구조를 소개한다.

Fig.3은 촉각센서의 측면구조와 평면도를 나타내고 있다. 제작된 촉각센서는 16개의 촉각 검출요

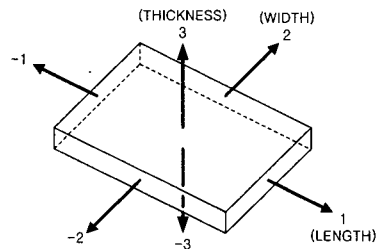


Fig. 1 Numerical classification of axes

Table 1 Parameters of PVDF

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

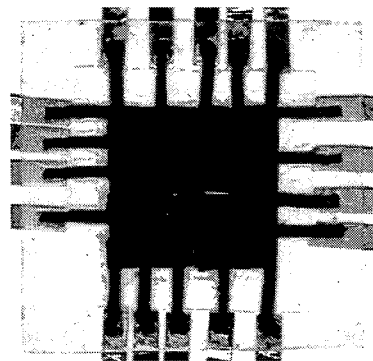


Fig. 2 Photograph of the tactile sensor using PVDF

소를 가지도록 PVDF 필름을 사이에 두고 공통전극과 4×4의 전극(면적 5mm×5mm)을 접착하였으며, 각각의 전극에서 얻어지는 압전효과를 검출하기 위해 리드 선을 두었고, 리드 선에 의한 압전효과를 가능한 한 배제하기 위해 리드 선과 PVDF 필름의 사이에는 절연층(mask)을 두었다. 그리고 접촉물체와의 절연을 위하여 센서의 접촉면에 폴리에스터 필름(polyester film)을 부착하였으며, 센서에 가해지는 압력에 대하여 적절한 반력을 가지면서도 센서 패드의 유연성을 유지하도록 높은 정도의 유연한 고무를 기반으로 사용하였다. 이상에서 사용된 각각의 층(전극 및 리드 선, 전극, 마스크)에 대한 설계형상을 Fig.4에 나타내었다.

본 연구에서 제작한 촉각센서는 구조가 유연하여 다양한 형상을 가지는 로봇 등의 기구에 피복하기가 용이하며, 처음의 제작에서는 촉각 검출요소의 크기를 5mm×5mm로 비교적 크게 제작하였으나 공간 분해능의 필요에 따라서는 더 작게, 그리고 요구되는 임의의 형상으로 제작할 수 있는 특징 및 장점을 가지고 있다.

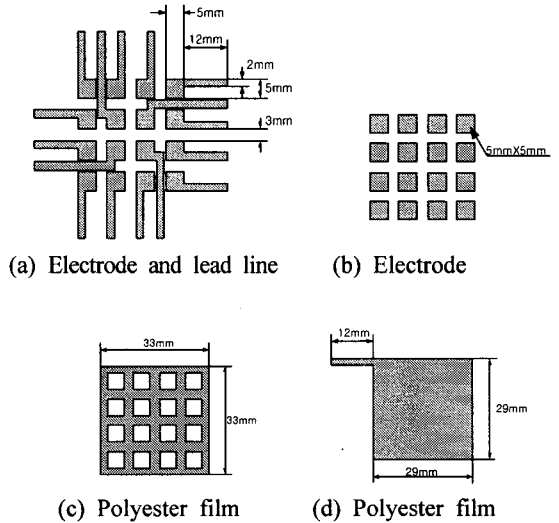
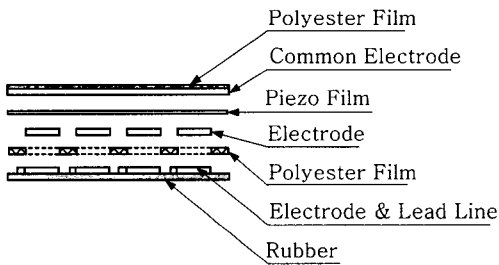


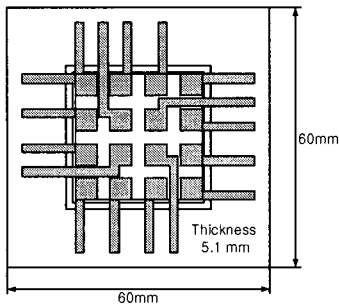
Fig. 4 The pattern of layers used for the fabrication of the tactile sensor

3. 출력특성

제작과정의 균일성에 근거하여 각 검출요소의 출력특성은 동일하다는 전제아래 한 개의 검출요소를 임의로 선정하여 가진 해머(impulse hammer)로 센서의 중심에 다양한 충격력을 가하고 그로 인하여 나타나는 검출요소의 출력을 기록하여 Fig. 5에 나타내었다. 이때 가해지는 충격력은 가진 해머의 형상을 고려하여 점접촉에 의한 충격으로 가정하였다. 수평축은 가진 해머로 가한 힘의 크기(Newton)



(a) Side view of the tactile sensor



(b) Upper view of the tactile sensor

Fig. 3 Structure of the tactile sensor

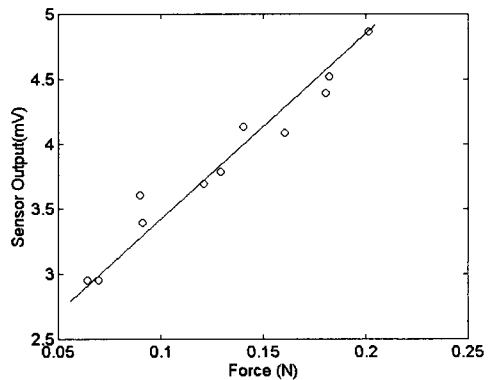


Fig. 5 Output characteristics of the sensor

이며, 수직축은 센서의 출력(mV)이다. 8% 이내의 편차를 포함하고는 있지만, 거의 선형적인 특성을 나타내고 있어, 제작된 센서가 인공촉각피부를 구성하기 위한 압전 변환요소로서 충분한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 신호처리

4.1 시스템 구성

Fig. 6은 제작된 촉각센서의 신호를 처리하는 시스템의 구성도이다. 센서에서 얻어진 출력신호는 컴퓨터에 장착된 실시간 처리 DSP 보드인 dSPACE 사 1103 제어보드에 병렬 입력(16개의 입력 신호)되어 각각 A/D변환을 포함한 증폭 및 필터링을 거친다. 이때 A/D변환의 분해능은 12bit이며 신호처리 시스템의 샘플링 시간은 0.1ms이다. 한편 DSP 보드 상의 신호처리 알고리즘은 입력된 데이터를 이용하여 접촉형상 및 압력분포를 추정하고 영상처리 하여 접촉상태를 가시화 한다.

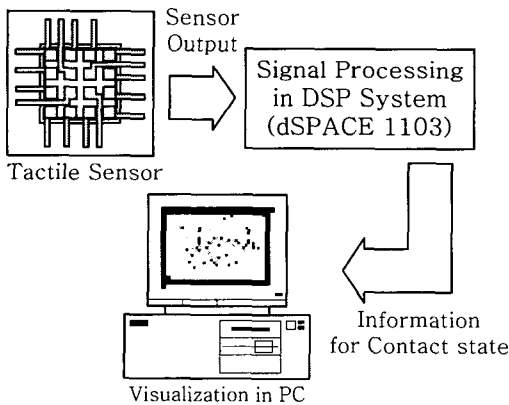


Fig. 6 Configuration of signal processing system

4.2 신호처리

센서로부터 얻어진 신호를 처리하는 알고리즘의 개략도를 Fig.7에 나타내었다. 센서로부터의 신호를 증폭하고 신호에 포함된 다양한 성분의 잡음을 제거하고 적분하여 시간에 따른 접촉압력의 변화를 얻었다. 이하, 사용된 필터의 설계 사양을 소개한다.

먼저 DC 전압 성분(offset)을 제거하기 위하여

진폭특성을 중요시한 필터의 하나로써 차단주파수가 0.5 Hz인 Butterworth 4차 고역통과 필터(HPF)를 설계하였다. 필터의 전달 함수는 다음과 같다

$$H(s) = \frac{s^4}{s^4 + 8.2s^3 + 33.69s^2 + 81.02s + 97.41} \quad (2)$$

교류 전원 에 의한 것으로서는 60 Hz 근방의 주파수를 가지는 잡음이 섞이게 되는데, 통상적으로 이 신호는 센서의 출력신호보다 진폭이 크기 때문에 같이 섞이게 될 경우 촉각센서의 신호가 잘 보이지 않게 된다. 이에 따라 60Hz의 주파수를 가지는 신호만을 제거할 수 있는 노치(notch) 필터를 사용하였다. 또한, 측정 신호를 분석하는데 있어서 주변에서 일어나는 전기적, 기계적 잡음들이 더 큰 값으로 나타나 분석하는데 어려움이 따르므로, 이러한 각종 고주파 신호를 없애기 위해서 100Hz 이하의 신호만을 통과시키는 Chebyshev 4차 저역통과 필터(LPF)를 적용하였다. 사용한 저역통과 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{0.2s^4 + 0.33s^3 + 0.45s^2 + 0.33s + 0.20}{s^4 - 0.225s^3 + 0.6568s^2 + 0.349s + 0.548} \quad (3)$$

한편, 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.

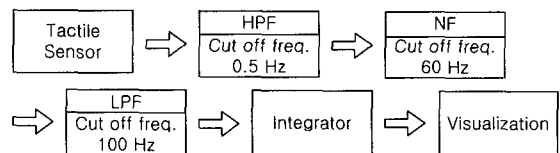


Fig. 7 Block diagram of signal processing flow

5. 접촉력 검출실험

이상에서 소개한 유연 촉각센서와 신호처리 시

시스템을 연결하고 촉각센서의 패드에 몇 가지 형상의 접촉력을 가하여 얻어진 접촉형상 및 압력분포에 관한 정보를 영상처리하여 가시화 하였다. 수차례의 실험을 통하여 임의의 접촉물체의 형상을 추정하고 접촉압력의 분포도 양호하게 추정하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 시험 제작한 센서의 촉각 검출요소의 수(16개)가 충분치 못하여 제한적인 범위 내에서 접촉상태에 관한 정보를 얻을 수 있었음을 부기 한다.

Fig.8은 점 접촉에 관한 처리결과이다. X, Y축은 촉각 검출요소의 행과 열을 나타내고 있으며, Z축은 센서의 출력전압(V)이다. 행렬 (2,2)에 해당하는 요소에 압력을 가한 결과로서 주변의 요소로부터도 미세한 전압이 검출되고 있는데, 이는 센서 패드의 굽힘에 의한 영향으로 무시할 수 있을 정도의 양이며, 이로써 점 접촉 검출에 있어서 양호한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

한편, 다점 접촉의 경우로서 일(-)자 형상의 물체를 임의의 압력으로 접촉하였을 경우의 검출결과를 Fig.9에 나타내었다. 점 접촉의 경우와 마찬가지로 양호한 검출성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

이상으로, 4×4의 촉각검출요소를 가지는 유연 촉각센서의 시험 제작을 소개하고, 신호처리 시스템을 구성하여 접촉상태에 관한 정보를 얻고 이를 가시화한 결과를 보였다. 본 논문에서 소개한 제작 방법은 촉각 검출요소의 형상을 임의로 설계할 수 있으며, 제작방법도 특별한 기기나 공정을 요구하고 있지 않기 때문에 실험실에서도 용이하게 제작할 수 있는 장점이 있다. 이처럼 센서의 구조가 유연하며 검출요소의 형상 및 공간분해능을 필요에 따라 다양하게 변경 제작할 수 있어 인공촉각피부를 구성하는데 적합하며, 설계한 신호처리 알고리즘은 접촉상태에 관한 정보를 양호하게 얻고 있음을 확인하였다.

한편, 소개한 제작방법을 이용하여 8×8의 촉각검출요소를 가지는 센서를 제작 중에 있으며, 정보처리량의 증대에 따른 처리시간의 지연문제를 해결하기 위한 방법을 검토하고 있다.

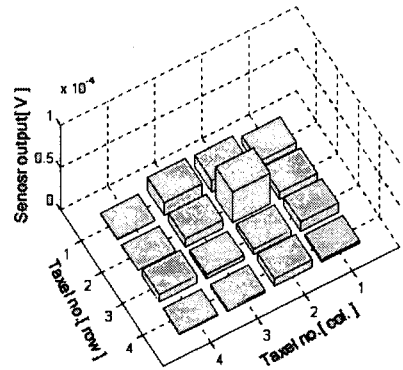


Fig. 8 Sensor response in case of single point contact

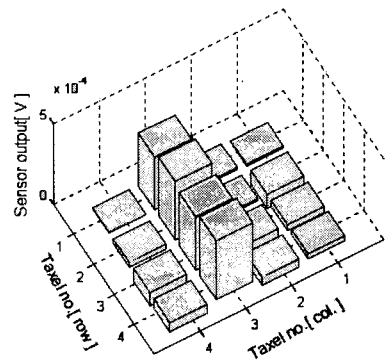


Fig. 9 Sensor response in case of multiple points contact

후기

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

참고문헌

1. Makoto Shimojo, Sigeru Sato, Yoshikazu Seki, and Akihiko Takahashi, "A System for Simultaneous Measuring Grasping Posture and Pressure Distribution," Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 831-836, 1995.
2. Hiroyuki Shinoda, and Shigeru Ando, "Ultrasonic

- Emission Tactile Sensor for Contact Localization and Characterization," Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 2536-2543, 1994.
3. Howard R. Nicholls, and Mark H. Lee, "A survey of robot tactile sensing technology," Int. J. Robotics and Research, Vol. 8, No. 3, pp. 3-30, 1989.
 4. P. Dario, and D. De Rossi, "Tactile Sensors and the Gripping Challenge," IEEE Spectrum, Vol. 22, No. 8, 1985.
 5. A. A. King, and R. M. White, "Tactile Sensing Array based on Forming and Detecting an Optical Image," Sensor and Actuators, Vol. 8, pp. 49-63, 1985.
 6. M. H. E. Larcombe, "Carbon Fiber Tactile Sensors," Proceedings of the First International Conference on Robot Vision and Sensory controls, pp. 273- 276, 1981.
 7. D. M. Siegel, Inaki Garabieta, and John M. Hollerbach, "A Capacitive Based Tactile Sensor," SPIE Intelligent Robots and Computer Vision, Vol. 579 pp. 153-160, 1985.
 8. Edward Cheung, and Vladimir 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.
 9. Yoji Yamada, Kazuhisa Shin, Nuiro Tsuchida, and Mataji 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.
 10. 윤여홍, 김성진, 이영춘, 유기호, 이성철, "압전 필름 촉각센서의 특성평가," 한국정밀공학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 211-214, 1999.
 11. 유기호, 윤여홍, 윤명종, 정구영, 권대규, 이성철, "PVDF를 이용한 유연 촉각센서의 개발," 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 461-464, 2000.