

< 논문 >

접촉력 및 미끄러짐을 감지 가능한 촉각 센서의 개발

최병준* · 강성철** · 최혁렬†

(2005년 3월 25일 접수, 2006년 2월 23일 심사완료)

Development of Tactile Sensor for Detecting Contact Force and Slip

Byungjune Choi, Sungchul Kang and Hyouk Ryeol Choi

Key Words : PVDF piezoelectric polymer(PVDF 압전성 고분자), Pressure variable resistor ink(압력 가변 저항 잉크), Tactile sensor(촉각 센서), Signal Processing(신호 처리), Robot hand(로봇 손)

Abstract

In this paper, we present a finger tip tactile sensor which can detect contact normal force as well as slip. The sensor is made up of two different materials, such as polyvinylidene fluoride (PVDF) known as piezoelectric polymer, and pressure variable resistor ink. In order to detect slip on the surface of the object, two PVDF strips are arranged along the normal direction in the robot finger tip and the thumb tip. The surface electrode of the PVDF strip is fabricated using silk-screening technique with silver paste. Also a thin flexible force sensor is fabricated in the form of a matrix using pressure variable resistor ink in order to sense the static force. The developed tactile sensor is physically flexible and it can be deformed three-dimensionally to any shape so that it can be placed on anywhere on the curved surface. In addition, a tactile sensing system is developed, which includes miniaturized charge amplifier to amplify the small signal from the sensor, and the fast signal processing unit. The sensor system is evaluated experimentally and its effectiveness is validated.

1. 서론

향후 일상 생활에 있어서 로봇은 인간을 대신하여 다양한 작업을 수행하게 될 것이다. 특히 인간을 대신하여 가사일 및 노약자와 장애인의 일상생활 보조를 목적으로 하는 인간 친화형 로봇은 인간 또는 주변 환경과 접촉 시 접촉대상의 안전을 최우선적으로 고려하여야 하며 이를 위해서는 물체의 접촉력 및 접촉위치를 인식하여 자연스럽게 물체를 잡을 수 있는 능력이 요구된다. 따라서 로봇에게 있어 촉각 센싱은 실제 세계에서 사물들과의 접촉을 통한 물리적인 특성과 상태를 정의하는 중요한 역할을 하게 된다.

1970년대 말 로봇 분야에 사용되기 시작한 이래로, 촉각 센싱에 관한 많은 연구들은 신뢰할 수 있고 정확한 촉각 정보를 제공할 수 있는 새로운 촉각 센서 개발을 목표로 진행되어 왔다. Dario⁽¹⁾ 등은 'Artificial tactile sensing system'을 개발하여 압전성과 초전성을 가진 PVDF 필름을 인간의 피부 속 촉각 세포와 유사하게 배치함으로써 접촉력 및 진동 그리고 온도 변화를 감지하였다. Howe⁽²⁾ 등은 PVDF 소자를 이용하여 물체와 접촉하였을 때 검출 요소의 변형으로 발생하는 응력의 변화를 통한 미끄러짐을 감지할 수 있는 동적 촉각 센서를 개발하였다. 또한 Maeno⁽³⁾ 등은 PVDF를 사용한 'Artificial finger skin'을 제작하여 물체면과의 미끄러짐을 구별하였다. Hosoda⁽⁵⁾ 등은 인간의 피부 구조를 모방하여 다른 종류의 실리콘을 사용함으로써 진피와 표피를 형성하였고, PVDF 필름과 스트레인 게이지를 임의로 배치하여 물체의 질감을 구별하고자 하였다. Kawasaki⁽⁶⁾ 등은 가해지는 압력에 따라 저항값이 변화하는 전도성 잉크를 사용하여

* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

** 한국과학기술연구원 지능로봇센터

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hrchoi@me.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7449 FAX : (031)290-7507

여 총 859 개의 검출 요소를 가진 촉각 센서를 로봇 손에 부착하였다. Shimojo⁽⁷⁾ 등은 압력에 따라 저항값이 변화하는 고무를 사용하여 로봇 손가락 끝에 부착시킬 수 있는 촉각 센서를 개발하였다. 이와 같이 현재까지 개발된 많은 촉각 센서들은 다양한 소자를 이용하여 가능성을 입증하였으나, 신뢰성, 정확성, 응답속도 및 동적·정적 특성 그리고 분해능 및 히스테리시스 특성과 더불어 센서 외적인 하드웨어의 크기, 신호 처리 관련 알고리즘의 개발 등과 같은 문제로 로봇 손에 직접 적용하기에는 많은 문제점을 내포하고 있다.^(8,9) 직까지 단편적인 탐지 능력만이 로봇에게 적용되고 있을 뿐만 아니라 촉각 센서가 부착된 로봇 손을 사용하더라도 자율적이고 능동적으로 물체를 파지하는 것에는 많은 어려움을 겪고 있어 실용화에는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 로봇 손가락에 적용 가능하면서 물체를 정확하고 안정적으로 파지할 수 있도록 로봇 손에 정보를 제공할 수 있는 소형의 촉각 센싱 시스템의 개발을 목표로 한다. 이를 위해 압전 소자인 PVDF 를 사용하여 검출요소와 접촉면과의 동적 응답을 감지함으로써 안정적인 파지를 위하여 필요한 stick slip 과 같은 미끄러짐의 정보를 감지할 수 있는 촉각 센서를 개발하였으며 전도성 잉크를 사용하여 정적인 힘을 감지함으로써 접촉력 및 접촉 물체의 형상 정보까지도 인식할 수 있는 다수의 검출 요소를 가지는 매트릭스 타입의 촉각 센서를 개발하였다. 또한 로봇 손가락 끝에 집적 가능한 센서부 및 소형의 신호 처리부를 통합 개발하여 센싱 시스템 전체가 로봇 손에 직접 적용 가능하도록 하였으며, 이를 토대로 PC 또는 외부 장치와 통신이 가능하도록 하여, 외부 장비를 통하여 접촉에 대한 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 로봇 손가락에 제어를 위한 정보를 제공할 수 있도록 하였다.

2. 검출 소자의 원리

2.1 PVDF 의 원리

1969 년 Kawai⁽¹⁰⁾에 의해 발견된 이래로 강한 압전성을 가진 PVDF 는 대략 50% ~ 60% 결정체 구조를 갖고 있는 반결정체 고분자 물질이며, 매우 단순한 화학적 형태인 -CF₂-CH₂-을 반복 단위로 하는 고분자로서 분자쇄내에 존재하는 강한 C-F 쌍극자기에 의해 고분자 재료 중 큰 유전율을 나타내고 있다.

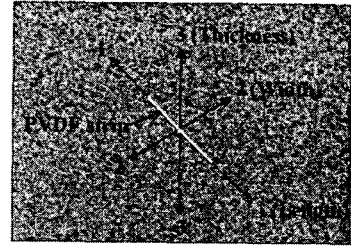


Fig. 1 Reference axes in PVDF strip

필름에 인가된 힘에 따른 물리적인 축은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 늘어난 방향인 좌표축 1 과 좌표축 2, 그리고 필름 평면상에 수직인 방향인 좌표축 3 으로 정의되며, 이에 따른 PVDF 의 압전 상수는 다음과 같다.

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

압전성으로 인하여 표면 전하 Q 는 가해진 하중에 따라 변화하게 되며 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \frac{Q}{A_3} = d_{3n} \sigma_n \quad (2)$$

식 (2)에서 D 는 전하밀도, A_3 는 좌표축 3 과 수직인 면에 존재하는 전극면적, d_{3n} 은 인가된 압축력 또는 인장력의 축방향에 대한 압전 변형률 상수 (piezoelectric strain coefficient), σ_n 은 작용한 압축 응력이다. 여기서 압전 변형률 상수 d_{3n} 의 단위는 $\left[\frac{C/m^2}{N/m^2} \right]$ 이다.⁽¹¹⁻¹³⁾

인장 응력 σ_1 이 1-1 방향으로 가해졌을 때, 출력 전하는 다음과 같다.

$$\frac{Q}{A_3} = d_{31} \sigma_1 \quad (3)$$

유사하게, 2-2 방향으로 응력이 작용할 때 출력 전하는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{Q}{A_3} = d_{32} \sigma_2 \quad (4)$$

여기서, d_{31} 은 길이 방향에서의 압전 변형률 상수, d_{32} 는 너비 방향에서의 압전 변형률 상수이다. PVDF 필름이 단단하고 평평한 표면 위에서 두께 방향으로 압축되고 있을 때, 만약 표면과 필름 사이에는 마찰이 없으며, 1-1 방향과 2-2 방향으로 팽창하는 것이 자유롭다고 가정한다면, 출력 전하는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{Q}{A_3} = d_{33}\sigma_3 = d_{33}\left(\frac{F}{A_3}\right) \quad (5)$$

$$Q = d_{33}F \quad (6)$$

여기서 d_{33} 은 두께 방향에서의 압전 변형률 상수이다. 일반적으로 출력 전하는 d_{31} , d_{32} 그리고 d_{33} 의 조합에 의한 것이며, PVDF 필름의 특성상 어느 방향에서든 물리적인 힘을 인가할 수 있기에 물리적 축은 1-1 방향, 2-2 방향 또는 3-3 방향이 될 수 있다. 그러나 필름이 매우 얇기 때문에 길이 방향과 너비 방향으로부터의 출력 전하는 두께 방향의 출력 전하보다 높게 발생하며 항상 윗면과 아랫면에 전극을 형성할 수 있기에 전기적인 축은 3-3 방향으로만 형성된다.⁽¹⁴⁾

2.2 Pressure variable resistor ink 의 원리

앞서 언급한 PVDF 필름과 같은 압전형 센서 소자는 동적인 힘 검출에는 우수하나 정적인 힘 검출에는 취약성을 나타낸다. 본 연구에서는 분포형 힘 센서를 개발하기 위하여 Creative materials 사의 전도성 잉크를 사용하였으며, 압력이 증가함에 따라 저항이 감소하는 특성을 가지고 있다.⁽¹⁶⁾ 이 전도성 잉크는 실크 스크린 및 정밀 분사 등의 여러 방법으로 사용이 가능하며, 폴리에스터 필름이나 폴리이미드 필름 등의 다양한 기판 위에 좋은 접착력을 보여 준다. 또한 기존에 개발된 센서 재료와 비교했을 때, 마모, 굽힘, 굴곡, 주름 등에 매우 저항성이 강하다. 압력이 가해지지 않을 때 10 MΩ의 저항값을 가지며, 가장 큰 압력이 가해질 때는 300 kΩ의 저항값의 감소를 가져온다. 또한 다른 전도성 잉크와 함께 배합함으로써 재료의 초기 저항값 및 최종 저항값을 변경시킬 수 있기 때문에 원하는 저항 변화 구간을 조절할 수 있다. 이는 개발하고자 하는 로봇 핸드의 손가락 끝 단토크에 따라 힘 센서의 측정 범위의 조절이 가능함으로써, 촉각 센싱 시스템을 최적화할 수 있는 장점을 갖는다.

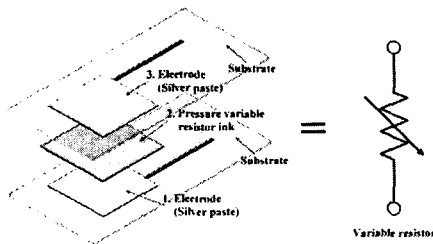


Fig. 2 Structure of force sensor which has one sensing element

힘 센서는 Fig. 2 에 나타난 것과 같이 전극 패턴이 입혀진 두 장의 폴리에스터 필름 사이에 전도성 잉크를 삽입한 구조이며 각각의 필름이나 전극은 모두 유연한 특성을 가지고 있다. 먼저 2 장의 폴리에스터 필름 위에 실크 스크린 기법을 이용하여 각각 균일한 두께의 은 전극을 형성시켰다 전극 패턴이 형성된 한 장의 필름 위로 전도성 잉크를 앞선 방법과 동일하게 실크스크린 방법을 사용하여 도포한 뒤, 제작된 다른 하나의 필름을 그 위로 포개어 놓으면 간단히 힘 센서를 제작할 수 있다. 이렇게 제작된 힘 센서는 단일의 검출요소를 가지게 되며, Fig. 2 에서와 같이 압력에 따라 저항값이 변하는 특성상 가변 저항과 동일하게 사용할 수 있다.

Fig. 3 은 제작된 힘 센서의 구동 방법을 설명하고 있다. 전도성 잉크를 사용한 힘 센서는 PVDF 센서와 달리 입력 전원을 필요로 한다. 압력에 따라 저항값이 변하는 일종의 가변저항인 힘 센서를 사용하는 방법에는 여러 가지가 있겠지만 그 중 힘 센서를 반전 증폭회로의 입력 저항으로 사용함으로써 일정한 입력 전압이 주어질 때, 압력에 따라 변화되는 전압이득을 통해 증폭된 출력값의 변화를 얻을 수 있으며, 이를 통해 외부로부터 검출 요소에 가해지는 힘 또는 압력을 감지하게 된다. 반전 증폭기로부터의 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$V_{out} = -V_{cc} \frac{R_f}{R_s} = -V_{cc} R_f S_s \quad (7)$$

여기서 R_s 는 힘 센서의 검출요소가 갖는 저항값이며, R_f 는 피드백 저항값을 의미한다. 또한 S_s 는 저항의 역수인 전도도를 의미한다. 따라서 Fig. 3 과 식 (7)로부터 센서로부터의 출력 전압은 최소 0V 에서 최대 증폭기의 구동 전압 사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

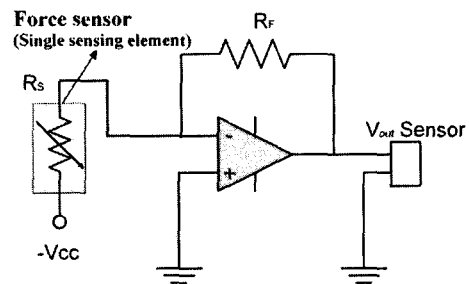


Fig. 3 Basic principle of operation of force sensor

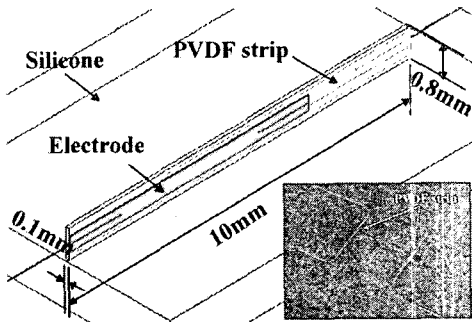


Fig. 4 Schematic of PVDF sensor and photograph

3. 손가락 끝 촉각 센서의 설계

인간의 촉각 수용기들은 손가락 끝에 많이 밀집해 있으며, 특히 엄지손가락과 검지손가락 끝은 다른 영역보다 더 민감하다. 본 연구에서는 인간의 손가락 끝과 유사한 촉각 센서를 개발하기 위하여 검출요소들을 배치하였다. 효과적인 손끝잡기(finger tip grasp)와 집기(pinch grasp)을 위해 영역을 구분하였으며 각각에는 총 24 개의 힘 센서용 검출요소가 분포되어 있으며 동적인 힘을 측정하기 위하여 2 개의 PVDF strip 이 집기 영역에 배치되어 있어 물체면과의 접촉 상태를 감지하게 된다.

3.1 PVDF texture sensor

PVDF 필름과 같은 압전 소자는 동적인 힘 검출에 매우 우수한 특성을 보이며, 특히 인간의 피부 감각과 유사한 출력 특성을 나타낸다. Fig. 4는 단일 검출요소를 가지는 PVDF strip 을 보여주고 있다. 'Aldrich Chemical' 사의 poly(vinylidene fluoride) pellet 을 폴리이미드 필름 사이에 일정하게 배열시킨 후 가열 프레스를 사용하여 230℃ ~ 240℃에서 10 MPa의 압력으로 25 분간 압착시킨다. 압착 후 필름은 약 1℃/sec 로 자연 냉각시킨다. 이 때 제작된 필름의 두께는 50 μm ~ 70 μm이다. 제작된 필름에 실크 스크린을 사용하여 그림과 같이 필름의 양면에 두께 5 μm의 은 전극을 형성시킨다. 마지막으로 제작된 필름에 높은 압전성을 부여하기 위하여 필름의 양쪽 표면에 구리 전극을 부착시킨 후 고전압 발생기를 사용하여 약 60 분 동안 필름에 강한 자기장 및 5N의 하중을 걸어주어 분극시킨다. 이렇게 제작된 너비 0.8 mm, 길이 10 mm의 PVDF strip 의 두께는 실크 스크린 방법으로 도포된 양면의 은 전극을 포함하여 대략 100 μm이며, 0.4 mm × 4 mm 크기의 검출요소를 갖는다. PVDF 텍스처 센서는 물체면과 수직으로 접촉하도록 배치되어 있어, 접촉 시 발생하는 미끄러짐

Table 1 Characteristic of thin flexible force sensor

Number of sensing elements	24
Force sensitivity	(Maximum) 2 [N]
Size of sensing element	0.5 [mm] × 0.5 [mm]
Column pitch	3 [mm]
Row pitch	3 [mm]
Thickness of sensor sheet	0.16 [mm]
Weight	3.5 [gf]
High flexibility, Stable output signal	

이나 실리콘의 변형을 통해 물체 표면 정보를 직접적으로 감지할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 소형의 PVDF strip 으로 높은 감도를 구현하였다.

3.2 Thin flexible force sensor

접촉물체의 형상 및 정확한 접촉 위치에 관한 정보를 알기 위해서는 높은 분해능을 갖는 촉각 센서가 필요하다. 그러나 센서의 검출요소가 많아지는 것과 더불어 검출요소만큼의 선이 필요하며 만약 다수의 검출요소로부터 독립적으로 데이터를 받는다면 배선 처리로 인해 센서의 설계는 복잡해지고 각 검출요소의 크기는 작아질 것이다. 또한 정해진 공간 상에서 검출요소를 계속 늘려가는 것은 불가능하며 이는 공간 분해능의 제한을 가져오게 된다. 뿐만 아니라 데이터를 처리하기 위한 마이크로컨트롤러 자체에 다수의 입출력 포트가 요구되며, 그에 따른 하드웨어의 부담은 증가한다. 이러한 문제를 보완하여 효과적이고 높은 분해능의 힘 센서를 개발하기 위하여 가로, 세로 배열의 매트릭스 방법을 이용하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 집게 손가락과 엄지 손가락 끝에 부착될 힘 센서의 전극 패턴을 보여주고 있다. 가로, 세로의 전극 패턴은 실크 스크린을 사용하여 형성되며, 이들이 서로 만나는 점이 검출요소가 되도록 설계하였다.

100 μm와 50 μm의 두께를 갖는 폴리에스터 필름에 실크 스크린 기법을 사용하여 은 전극을 형성시켰다. 이 때 필름에는 각각 가로, 세로 은 전극 패턴이 도포된다. 다음 단계에서 은 전극이 도포된 100 μm 필름 위로 가로 방향의 전도성 잉크 패턴이 형성되게 된다. 여기서 도포된 은 전극의 굵기는 0.4 mm이며, 전도성 잉크의 전극 패턴의 굵기는 0.5 mm이다. 마지막으로 앞서 제작된 50 μm 필름에는 높은 접착력을 가진 산업용 양면테이프(3M™ VHB™ Tape 4914)가 검출 요소면을 제외한 부분에 부착되며, 이를 100 μm 필름과 서로 마주보게 결합시킴으로써 분포형 힘 센서가 제작된다.

이렇게 제작된 힘 센서는 앞서 언급하였듯이 가로, 세로 전극 패턴이 겹쳐지는 점이 검출요소로 되며, 실제 검출요소의 크기는 0.5 mm × 0.5 mm이다. Table 1 은 실제 제작된 힘 센서의 특징들을 설명해주고 있다. Fig. 5 와 Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 힘 센서 하나당 총 24 개의 검출요소를 갖는다. 만약 각각의 검출요소로부터 독립적으로 출력 신호를 받는다고 한다면 힘 센서의 특성상 총 48 개의 신호 라인이 필요하게 되며 이는 한정된 공간 상에서 매우 커다란 문제를 야기할 것이다. 그러나 이러한 가로, 세로 배열의 매트릭스 방식을 적용함으로써 8 개의 전원 입력 라인과 4 개의 신호 출력 라인만으로 24 개의 검출요소를 표현할 수 있다. 이는 공간 분해능 및 구동 회로 집적에 용이함을 제공한다.

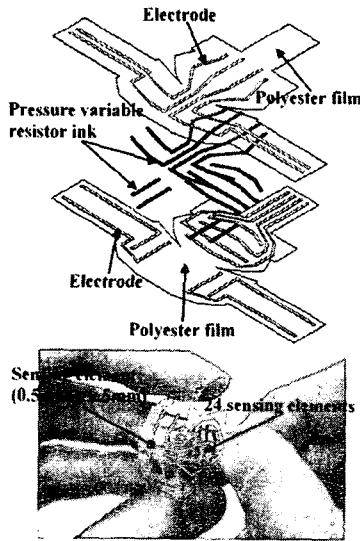


Fig. 5 Finger tip force sensor

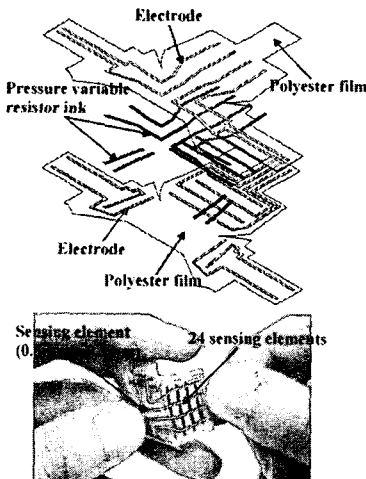


Fig. 6 Thumb tip force sensor

3.3 Thin flexible force sensor

로봇 손에 부착하고자 하는 촉각 센서는 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 접촉력과 접촉 위치를 측정하는 유연한 힘 센서와 미끄러짐을 측정할 수 있는 PVDF 센서의 두 개의 층으로 구성되어 있다. 24 개의 검출 요소를 갖는 힘 센서는 다양한 형상에 부착될 수 있는 유연성을 이용하여 로봇 손의 손가락 프레임 면에 부착되었으며, 접촉력을 감지하여 안정된 신호로 출력한다. 또한, 2 개의 PVDF strip 으로 가장 바깥쪽에 위치한 PVDF 센서는 센서 주위를 감싸고 있는 실리콘의 기계적인 변형을 통해 물체면과 검출 요소 사이의 동적인 응답을 감지한다.

4. 촉각 센싱 시스템의 제작

본 장에서는 다수의 검출요소로부터 전달되는 데이터들을 효율적으로 처리하기 위한 전체 센싱 시스템에 대하여 소개한다. Fig. 8 은 본 시스템에 구성된 하드웨어를 개략적으로 보여주고 있다. 전체 시스템은 크게 힘 센서 및 PVDF 센서로부터의 출력 신호를 증폭시키기 위한 증폭기와 증폭된 검출요소부의 전송된 데이터 처리 및 다른 장치와의 통신을 위한 신호처리부로 구성되어 있다.

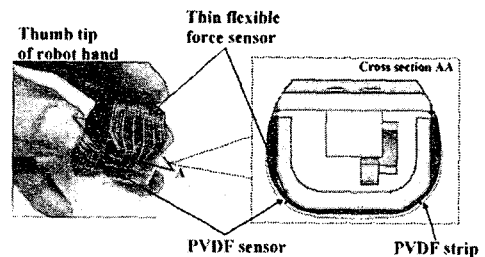


Fig. 7 Structure of fingertip tactile sensor

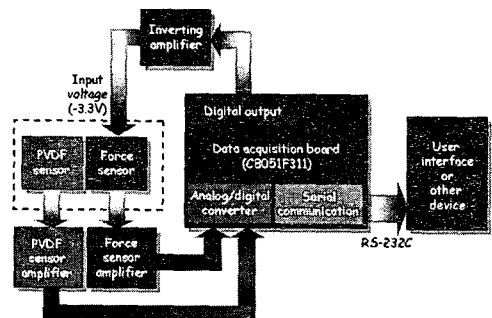


Fig. 8 Schematic of tactile sensing system

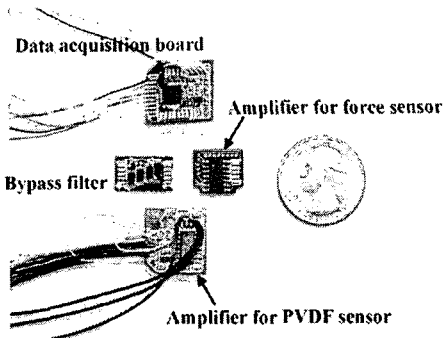


Fig. 9 Photograph of tactile sensing system

4.1 Amplifiers

증폭기는 두 가지로 나누어지며 각각 PVDF 센서와 힘 센서의 출력 신호를 증폭해 주는 역할을 담당하고 있다. PVDF의 출력은 힘의 순간 변화량에 의존하기 때문에 정적인 힘의 크기를 감지하지 못할 뿐만 아니라 짧은 지속 시간으로 인하여 외부 장치로 출력 신호를 전달할 경우 적절한 신호의 가공이 필요하다. 이러한 사항을 고려하여 charge amplifier를 제작하였다. Charge amplifier는 PVDF 전하의 미소 변화(즉, 전류변화)를 감지하여 이를 전압 신호로 바꾸어 주는 역할을 한다.

$$V_{out} = -\frac{q}{C} \tag{8}$$

Fig. 9는 실제 제작된 PVDF 센서용 증폭기를 보여주고 있다. 18 mm × 14 mm의 크기로 2 채널의 입출력부를 가지고 있다. 또한 회로 내부에는 PVDF 출력전하를 전압신호로 바꾸어 주는 charge amplifier와 미약한 신호를 증폭해 주는 non-inverting amplifier, 그리고 PVDF 필름이 자체적으로 동반하고 있는 60 Hz의 잡음을 제거하기 위한 60 Hz notch filter의 3 종류의 증폭기가 내장되어 있다. PVDF 센서용 증폭기와 달리 힘 센서에 사용된 증폭기는 힘 센서로부터 출력되는 신호를 증폭하는 것이 아니라 힘 센서 구동 회로로서의 역할로 증폭기가 가지는 전압 이득의 변화를 통하여 출력 전압을 내보낸다. 힘 센서의 검출 요소는 힘에 따라 반응하는 가변 저항과 동일하며 이러한 각각의 검출 요소들을 반전 증폭기의 입력 저항으로 사용한다면 일정한 입력 전압과 피드백 저항 조건에서 입력 저항의 변화로 인하여 전압 이득이 변화하게 되고 이를 통해 출력 전압이 변화하는 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 9는 실제 제작된 힘 센서용 구동 회로를 보여주고 있다. 4 채널의 입출력부를 가지고 있으며 감지 손가락 끝과 엄지 손가락 끝에 장착되기

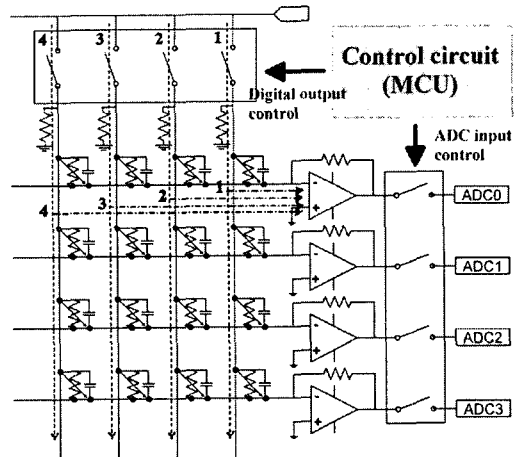


Fig. 10 The flexible force sensor scanning circuit

때문에 소형화하였다.

4.2 Signal processing board

데이터의 수집과 제어 및 통신을 위한 회로는 Fig. 9에 나타난 것과 같이 하나의 기판 위에 설계되어 있다. 전체적인 데이터 수집 및 통신은 마이크로프로세서(Silicone laboratory, C8051F311)을 이용하여 수행되며, 센서로부터의 3차원적인 출력 정보를 표시하기 위하여 직렬 통신을 이용하여 PC와 정보를 교환하거나 SMBus를 사용하여 외부 다른 장치와 연결되어 정확한 제어 및 구동을 위한 정보를 제공해 줄 수 있다. 본 연구에서 제작한 회로에는 최대 8개의 AD converter 채널 포트와 8개의 디지털 출력 포트를 사용하였다. AD converter의 경우 내부 해상도는 10비트이며, AD 변환 모듈의 최소 변환 시간은 10 μs이다. 또한 마이크로프로세서의 코어칩은 최대 25MIPS로 구동할 수 있기 때문에 빠른 연산이 가능하다.

다수의 PVDF 센서와 힘 센서의 검출요소로부터의 출력 신호를 받기 위해서 힘 센서를 가로, 세로 배열의 매트릭스 방법을 이용하여 제작하였으며 데이터 획득을 위해 마이크로프로세서에서는 이를 일정한 시간 간격을 가지고 스캔하는 방식을 채택하였다. 이를 통해 8개의 디지털 출력 포트는 힘 센서의 입력 전압이 되며, 4개의 AD 변환 포트는 힘 센서로부터의 출력 신호를, 2개의 AD 변환 포트는 PVDF 센서로부터의 출력 신호를 입력받게 된다. Fig. 10은 실제 집게 손가락과 엄지 손가락 끝에 부착될 힘 센서의 검출요소 및 구동 회로의 일부분을 보여주고 있다. 마이크로프로세서의 디지털 출력 라인도 그림과 같이 순차적으로

“High”로 변환되며 이 때 마이크로프로세서에서는 ADC0 를 열어 각각의 검출요소로부터의 출력 신호를 받아들리게 된다. 또한 1, 2, 3, 4 의 순서로 진행되며 이러한 과정을 반복하게 된다. 이와 같은 매트릭스 방식을 적용함으로써 최소의 입력 전원 및 출력 라인을 이용하여 다수의 검출 요소를 보다 효율적으로 제어 할 수 있다.

마이크로프로세서를 통하여 수집된 개별 검출요소로부터의 출력 데이터는 PC 상의 유저 인터페이스를 통해 사용자에게 3 차원적인 정보를 제공하거나, 센서로부터의 정보를 필요로 하는 외부 장치와 연결되어 정밀한 제어 및 구동을 위한 정보를 제공하게 된다.

5. 촉각 센싱 시스템의 실험

개발된 센서의 성능 평가를 위해 PVDF 텍스처 센서와 힘 센서를 결합하여 평면 상에 놓은 후, 다음의 실험들을 수행하였다. Fig. 11 과 Fig. 12 에서의 그래프는 개발된 PVDF sensor 로부터 임의의 힘을 가했을 때의 출력 특성을 보여준다. Fig. 11 과 Fig. 12 에서 보는 바와 같이 PVDF 는 양과 음의 피크점들을 갖는다. 첫 번째로, 임의의 힘을 가했을 때 발생하는 양의 피크는 인가한 힘에 따른 필름의 변형에 비례한 것이며, 다음으로 발생하는 음의 피크는 외부의 자극이 사라짐과 동시에 필름이 원래의 전위 상태로 돌아오기 위한 복원력에 의해 발생하는 것으로 접촉이 끝나는 시점에 작용한 힘에 비례한다. Fig. 11 은 PVDF sensor 표면 위의 검출 요소 부분을 사람의 손으로 두드리거나 문지르는 때의 응답을 보여주고 있다. 제시된 그래프에서 볼 수 있듯이 변곡점 부분에서는 경사가 매우 급하며 뾰족함을 알 수 있다. 또한 stick slip 의 발생 시 기울기의 급격한 변화를 확인할 수 있다. Fig. 12 는 100g 의 일반 원통형 추를 센서 표면 위에 굴렸을 때의 출력 특성을 보여주고 있다. 앞서 보여준 Fig. 11 과 비교하였을 때 stick slip 의 영향이 거의 없고 실리콘의 변형만을 유도하였기 때문에 기울기의 변화가 완만하며, 특히 100g 의 추가 검출 요소 바로 위를 지날 때 대략 1.2V 의 일정한 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 1.2V 보다 작은 값들은 원통형의 추가 검출 요소 주변에서 굴러지고 있을 때에 발생하는 실리콘의 변형이 PVDF strip 에 영향을 주어 출력되는 것이다. 이를 통해 접촉되는 물체의 표면 특성 및 접촉 방법에 따라 출력 특성이 달라짐을 확인할 수 있다.

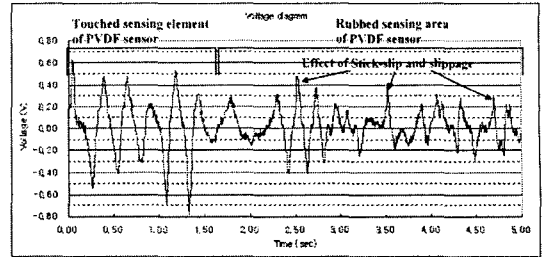


Fig. 11 Signal output from touching and rubbing

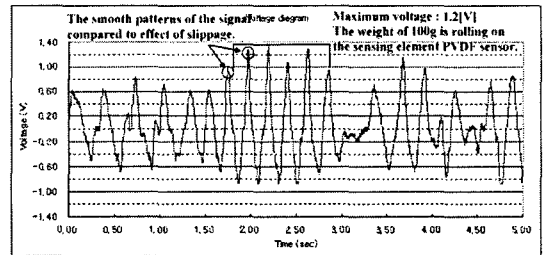


Fig. 12 Signal output from rolling of 100g weight

또한 압력에 따라 저항값이 변하는 전도성 잉크를 사용하여 최대 2 N 까지 측정 가능한 가로, 세로 매트릭스 배열의 힘 센서를 제작하였으며, PVDF 센서를 힘 센서 위에 부착하여 완전한 촉각 센서를 구성하였다. Fig. 13 은 로봇의 엄지손가락 끝 및 검지 손가락 끝에 부착시킬 목적으로 제작된 힘 센서의 개별 검출요소 출력을 보여주고 있다. Fig. 13 에서 볼 수 있듯이 검출요소 위에 100g 과 200g 의 추를 올렸을 때, 각각 2V 와 4.25V 의 출력 전압을 얻을 수 있었다. 200g 의 추를 올렸을 때, 일정한 출력 형태가 아닌 신호의 변화가 존재하는데 이는 저항값의 급격한 감소로 인한 전압이득의 변화 때문이다. 따라서 200g 의 추가 올려졌을 때, 힘 센서는 작은 변화에도 매우 민감하게 반응함을 그래프를 통해 볼 수 있다. 그러나 실제로 개발된 촉각 센서가 적용될 로봇 핸드는 손가락 끝에서 낼 수 있는 최대 힘이 0.1kgf 이며 Fig. 12 에서 보여지듯이 100g 의 추를 올렸을 때 2V 의 일정한 출력을 보이므로, 로봇 핸드에 촉각 센싱 시스템으로 적용 가능하다. 또한, 전도성 잉크의 혼합 비율을 달리함으로써 측정 범위를 조절할 수 있기 때문에 이러한 문제를 해결할 수 있다. 그래프에서 보여지는 노이즈는 두 장의 폴리에스터 필름이 접촉하기 때문에 발생하는 것이지만, 바이패스 필터를 사용하여 노이즈를 현저히 감소시킬 수 있다. 따라서 개발된 힘 센서를 사용하여 정적인 힘의 감지가 가능하며 검출요소 위에 누르는 힘 또는 압력의 변화에 따라 출력 전압이 변화하는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 또

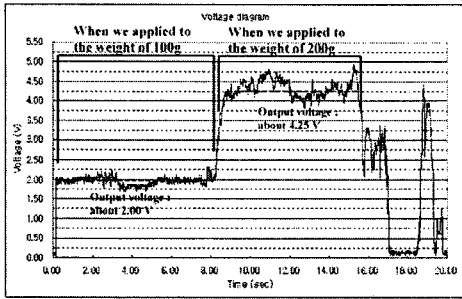


Fig. 13 Response to the weight of 100g and 200g

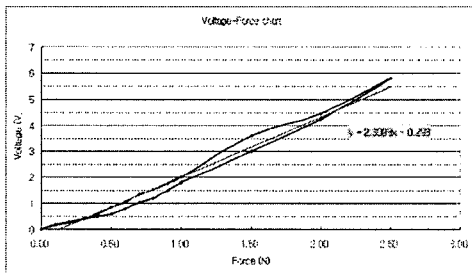


Fig. 14 Hysteresis characteristic curve of force sensor

또한, Fig. 14 에서 볼 수 있듯이 0V 에서 증폭기 구동 전압까지의 범위 내에서 선형적인 변화가 가능하며, 들어오는 입력에 따라 지연없이 출력을 나타낸다.

마지막으로 PVDF 센서와 힘 센서를 결합한 촉각 센서를 개발된 로봇 핸드에 부착시켰으며, PC 상의 유저 인터페이스를 통해 접촉 정보를 확인하였다. Fig. 15 는 단일 촉각 센서 표면 위를 엄지손가락 및 검지손가락으로 눌렀을 때의 접촉 정보를 보여주고 있다. 그림 상에 표시된 부분은 실험에서 사람의 엄지손가락 및 검지손가락 끝이 위치하는 부분이며, 실제 손가락 끝으로 많은 힘을 주었을 때 이 영역에서 가장 큰 출력값을 나타냄을 볼 수 있다. 또한, Fig. 16 은 실제 로봇 핸드에 부착된 촉각 센서 및 User Interface 를 보여주고 있다. 촉각 센서는 로봇 손가락 끝에 부착되어 있으며, 센싱 시스템도 모두 로봇 손에 내장되어 있다. 또한 Fig. 16 에서 볼 수 있듯이, 센서로부터 측정된 데이터는 PC 로 전달되며, PC 상의 User interface 는 접촉력 및 접촉형상 등의 정보를 3 차원 영상으로 처리하여 사용자에게 접촉 정보를 제공하여 줄 수 있다. 이를 통해 개발된 촉각 센서는 접촉 위치 및 정적인 힘의 측정뿐만 아니라 미끄러짐으로 인한 동적인 힘의 측정도 가능함을 시험을 통해 확인할 수 있었다.

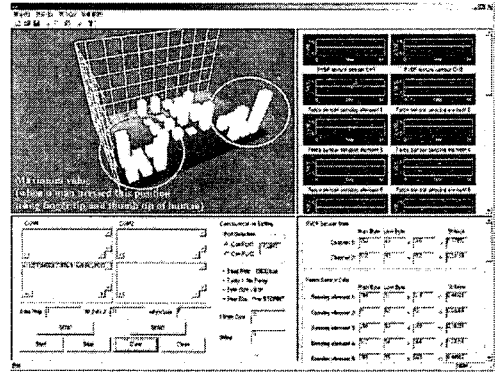


Fig. 15 When we pressed sensors in finger tip and thumb tip of human

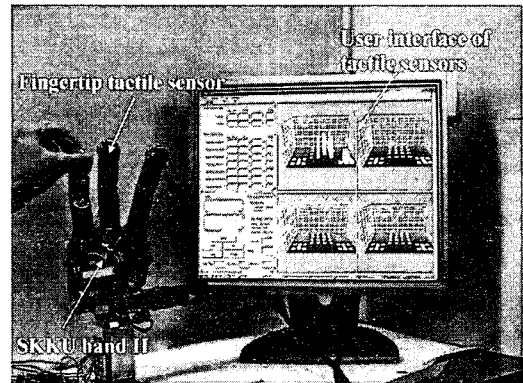


Fig. 16 Experiment of fingertip tactile sensor

6. 결론

본 연구에서는 물체와의 접촉 시 미끄러짐 및 접촉력을 탐지할 수 있는 촉각 센서를 개발하고 데이터 처리가 가능한 시스템을 제작하였다. 미끄러짐을 감지하기 위해서 동적인 힘에 민감한 PVDF 필름을 사용하였으며, 로봇 손가락 끝에 부착하기 위하여 소형화시켰다. 또한 정적인 접촉력을 감지하기 위하여 입력에 따라 저항값이 변하는 전도성 잉크를 사용하였으며, 가로, 세로 배열의 matrix 방식을 채택함으로써 센서로부터 출력 신호를 효율적으로 사용하도록 하였다. 개발된 센서 시스템은 제작된 로봇 손가락에 모두 집적이 가능하도록 소형화시켰다. 개발된 센서는 유연한 재질로 구성되어 있기 때문에 다양한 형상의 촉각 센서로 적합하며, 센서 시스템을 통하여 접촉 형상 및 접촉력 등의 정보를 3 차원 영상으로 처리하여 사용자가 쉽게 접촉 상태를 파악할 수 있도록 하였다. 또한 PC 뿐만 아니라 다른 외부 장치와의

연결이 가능하면 이를 통해 범용성을 확장시킬 수 있다. 본 연구에서 개발된 센서 시스템은 실제 로봇 손에 부착하여 실험을 수행하였으며, 향후 연구를 통해 로봇 손의 자율적이고 능동적인 파지를 가능하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원에 몰입형 실감 공간 기술 개발의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dario, P. and Buttazzo, G., 1987, "An Anthropomorphic Robot Finger for Inverting Artificial Tactile Perception," *Int. J. Robotics. Res.*, Vol. 6, No. 3, pp. 25~48.
- (2) Howe, R. D. and Cutkosky, M. R., 1993, "Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 2, pp. 140~151.
- (3) Fusjimoto, I., Yamada, Y. and Maeno, T., 2003, "Development of Artificial Finger Skin to Detect Incipient Slip for Realization of Static Friction Sensation," *Proc. Of IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, MFI2003, pp. 15~20.
- (4) Kolesar, E. S., Dyson, C. S., Reston, R. R., Fitch, R. C., Ford, D. G. and Nelms, S. D., 1996, "Tactile Integrated Circuit Sensor Realized with a Piezoelectric Polymer," *Innovative Systems in Silicon, Proceedings., Eighth Annual IEEE International Conference on*, pp. 372~381.
- (5) Tada, Y., Hosoda, K., Yamasaki, Y. and Asada, M., 2003, "Sensing the Texture of Surfaces by Anthropomorphic Soft Fingertips with Multi-modal Sensors," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 31~35.
- (6) Kawasaki, H., Komatsu, T. and Uchiyama, K., 2002, "Dexterous Anthropomorphic Robot Hand with Distributed Tactile Sensor: Gifu hand II," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, Issue. 3, pp. 296~303.
- (7) Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R. and Mabuchi, K., 2004, "A Tactile Sensor Sheet using Pressure Conductive Rubber with Electrical-Wires Stitched Method," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 589~596.
- (8) Nicholls, H. R. and Lee, M. H., 1989, "A Survey of Robot Tactile Sensing Technology," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 9, pp. 3~30.
- (9) Lee, M. H. and Nicholls, H. R., 1999, "Tactile Sensing for Mechatronics-A State of the Art Survey," *Mechatronics*, Vol. 9, pp. 1~31.
- (10) Kawai, H., 1969, "The Piezoelectricity of Poly(vinylidene fluoride)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 8, pp. 975~976.
- (11) Russell, R. A., 1990, "Robotic Tactile Sensing," *Prentice Hall, Inc.*
- (12) Fraden, J., 1997, "Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications," *American Institute of Physics Press.*
- (13) Yu, K. H. Kwon, T. G., Yoon, M. J. and Lee, S. C., 2002, "Development of a Tactile Sensor Array with Flexible Structure using Piezoelectric Film," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 10, pp. 1222~1228.
- (14) Dargahi, J., 2000, "A Piezoelectric Tactile Sensor with Three Sensing Elements for Robotic, Endoscopic and Prosthetic Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 80, pp. 23~30.
- (15) Butterfass, J., Grebenstein, M., Liu, H. and Hirzinger, G., 2001, "DLR-Hand II: Next Generation of a Dexterous Robot Hand," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 109~114.
- (16) Ashruf, C. M. A., 2002, "Thin Flexible Pressure Sensor," *Sensors Review*, Vol. 22, No. 4, pp. 322~327.