

3D 촉각 센서의 설계와 이론적인 해석

Design and Theoretic Analysis of 3D Tactile Sensor

심귀보 · 황한근

Kwee-Bo Sim and Han-Kun Hwang

중앙대학교 전자전기공학부

요 약

본 논문에서는 외부의 힘을 효율적으로 감지하기 위한 촉각센서의 설계 및 이론적인 해석해 관한 것이다. 일반적으로 촉각 센서가 표면의 변화를 감지하기 위해서는 외부의 자극을 센서부에 효과적으로 전달할 수 있어야 하기 때문에 미세한 힘에도 변화를 감지할 수 있는 센서의 설계가 필요하다. 이에 본 논문에서는 양 전극 사이에 유연성을 갖는 유전체를 사용하여서 보다 효율적인 감지가 가능하도록 하였다. 즉, 상층부에 설치되어 있는 센서부가 하층부에 설치되어 있는 센서들과 형성하는 전계의 변화로 인하여 발생하는 전압의 차이를 감지하도록 하였으며, 상층부와 하층부의 사이에 일정한 유연성을 갖는 유전체를 삽입함으로써 효율적인 촉각 감지를 할 수 있도록 설계하였다.

Abstract

This paper presents capacitive tactile sensor that can detect normal and shear forces. This tactile sensor consists of index plate, sensing plate, and elastic dielectric layer. The calculated sensing character is based on the changes of space between two horizontal plate. Larger overlap areas and narrow space between top and bottom plate guarantees higher sensitivity. Tactile sense information can be calculated from the changes of phase of output signal. The symmetric arrangement of sensing plates makes the manufacturing process easier and guarantees the stability of the structure. In this paper, the sensor structure is designed, the mechanism of the proposed sensor is theoretically explained, and the simulated result is presented

Key Words : Tactile Sensor, Capacitive, Shear force, Robot hand

1. 서 론

촉각 센서의 목적은 사람의 피부가 느끼는 촉감과 가장 유사한 촉각 정보를, 로봇을 포함한 응용분야에 활용할 수 있도록 하는데 있다. 이때 촉각 센서가 갖추어야 할 것들으로써 미세한 크기의 자극에도 효율적으로 반응할 수 있는 특성과 사람의 피부와 같은 유연성을 들 수 있다. 이러한 촉각 센서는 여러 기능들을 하나의 구성단위에 포함시키는 방법으로 구성하거나, 하나의 구성단위로 하여금 여러 기능을 동시에 감지할 수 있도록 구성할 수가 있다. 기술의 발전과 동시에 촉각 센서가 갖추어야 할 조건들도 늘어나고 있는 추세 속에서 보다 사람의 피부에 가까운 촉각 센서가 필요하게 되었으며, 이에 따라서 온도 센서, 습도 센서 등을 포함한 촉각 센서가 개발되고 있다[1][2]. 이에 더불어 로봇이 물체를 안정적으로 잡기 위해서는 촉각 센서가 단순히 수직의 힘만을 감지하는 것이 아니라 수평의 미끄러짐도 감지할 수 있어야 한다[2]. 기본적으로 표면의 자극 변화를 감지하는 방법으로는 광학적인 방법[3], Conductive Textile을 이용한 방법[4], 커패시턴스를 이용한 방법[5] 등이 존재한다.

촉각 센서가 표면의 변화를 감지하기 위해서는 외부의 자극을 센서부에 효과적으로 전달할 수 있어야 하기 때문에 미세한 힘에도 변화를 감지할 수 있는 센서의 설계가 필요하다. 이에 본 연구에서는 센서가 유연성을 갖기 위해서 양 전극 사이에 유전체를 사용하여서 보다 효율적인 감지가 가능하도록 하였다. 즉, 상층부에 설치되어 있는 전극이 하층부에 설치되어 있는 전극들과 형성하는 전계의 변화로 인하여 발생하는 전압의 차이를 감지하도록 하였으며, 상층부와 하층부 사이에 일정한 유연성을 갖는 유전체를 삽입함으로써 효율적인 촉각 감지를 할 수 있도록 설계하였다.

이와 같은 센서 구조에서 수직, 수평의 힘을 측정하기 위하여 일정한 주파수와 위상을 갖는 정현파를 입력으로 하였을 때에 출력 신호의 크기와 위상이 외부의 자극에 의해서 어느 정도 변화하였는지를 측정하는 방식을 사용하였다. 그리고 그 정보를 분석하여 결과적으로 외부의 힘의 종류와 세기를 측정할 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 촉각 센서의 설계 방법에 대해서 상세하게 기술하고, 3장에서 설계된 센서의 이론적인 해석과 센서 구동 회로에 대해서 언급하며, 4장에서는 시뮬레이션 결과, 마지막 5장에서 결론 및 향후과제에 대해서 논한다.

2. 촉각 센서의 설계

본 센서는 촉각을 감지하는데 있어서 capacitor값만을 이

접수일자 : 2005년 10월 18일

완료일자 : 2005년 11월 30일

본 연구는 산업자원부의 뇌신경정보학연구사업의 '뇌 정보 처리에 기반 한 감각정보 융합 및 인간행위 모델 개발'의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

용하도록 설계되어서 제조 및 회로의 설계가 간단하다는 이 점을 지니고 있다. 그러므로 실제 산업분야에 응용이 되었을 때에도 보다 안정적으로 작동할 수 있는 장점을 지니고 있다. 센서는 그림 1과 같이 index plate가 포함되어 있는 상층부와 5개의 capacitive sensor plate가 포함되어 있는 하층부로 이루어져 있다. 또한 상층부와 하층부 사이에 dielectric layer가 두개의 layer 사이에 삽입되는 구조로 되어 있다.

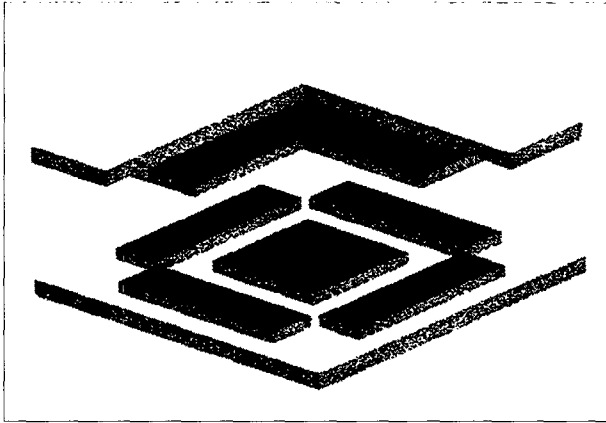


그림 1. 센서의 구조
Fig. 1. Structure of sensor

이와 같이 구성된 촉각센서의 평면도는 그림 2와 같다. 그림 2와 같이 두개의 층으로 구성된 촉각센서가 외부의 압력 변화를 감지한 후, 이를 전기 신호로 출력하기 위해서는 두개의 층 사이에 들어갈 dielectric layer가 탄성을 갖고 있어야 하기 때문에 그림 3과 같이 센서를 구성하였다.

Dielectric layer material의 예로써 polymer film[6]을 들 수 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 작은 압력이 가해질 때는 air-gap capacitor와 polymer-gap capacitor 모두가 선형적으로 동작하지만 전자의 경우 압력이 증가하면 선형성을 잃는 반면에 후자는 선형성을 잃지 않고 capacitor의 값이 변하고 있음을 알 수 있다.

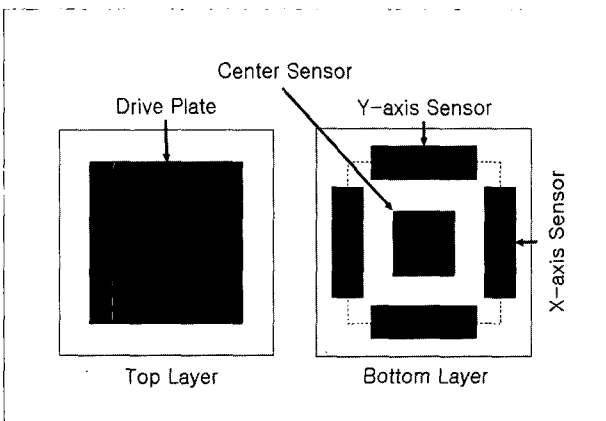


그림 2. 센서 평면도
Fig. 2. Plane figure of sensor

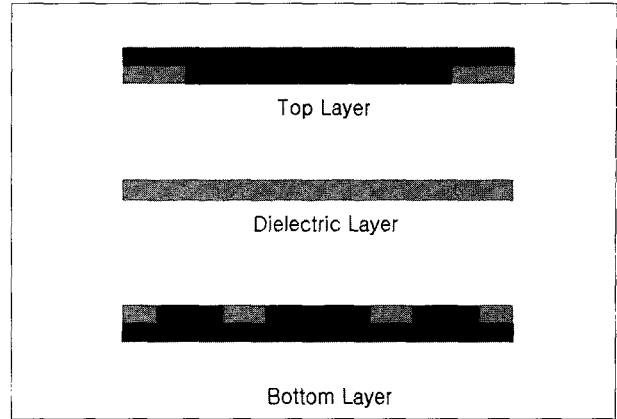


그림 3. 센서 단면도
Fig. 3. Cross section of sensor

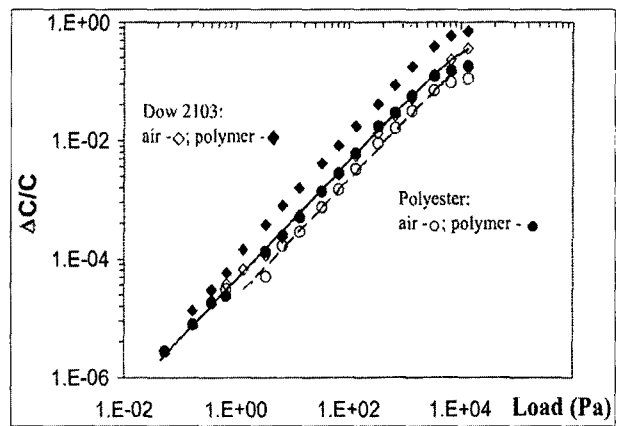


그림 4. Air-gap capacitor와 polymer-gap capacitor에 각각 일정한 힘이 가해졌을 때, capacitance의 변화[6]
Fig. 4. Variation of capacitance when the constant force is applied between air-gap capacitor and polymer-gap capacitor[6]

3. 센서의 동작 및 이론적인 해석

3.1 센서의 동작

촉각센서에 힘(F)이 가해진다고 가정하면 센서 표면에 작용하는 힘의 수평과 수직 성분은 그림 5와 같이 표현될 수 있다. 그림 5에서 표면에 가해지는 힘은 식(1)~(3)을 통해서 계산될 수 있다.

$$\tau_{zx} = \frac{F}{A} \cos \theta \cos \phi \quad (1)$$

$$\tau_{zy} = \frac{F}{A} \cos \theta \cos \phi \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \sin \theta \quad (3)$$

이들 식에서 τ 와 σ 는 각각 stress의 수평성분과 수직 성분을 나타내고 있으며, 이때 변형의 범위가 elastic dielectric layer의 linear response region을 벗어나지 않는다는 전제 하에서 strain과 stress의 관계는 식(4)~(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} \sigma_z \quad (4)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \quad (5)$$

$$\gamma_{zy} = \frac{1}{G} \tau_{zy} \quad (6)$$

이들 식에서 E는 Young's modulus, G는 shear modulus를 각각 의미하고, 이러한 변수들은 선택된 dielectric material의 물성에 의해서 결정되며 식(1)~(6)은 압력이 가해지더라도 상층부와 하층부 간의 평행이 유지된다는 것을 전제로 하고 있다. 그림 5에서와 같이 촉각센서의 표면에 힘이 가해졌을 때 dielectric layer의 변형과 이로 인한 상층부와 하층부 센서의 엇갈림을 센서의 단면으로 살펴보면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

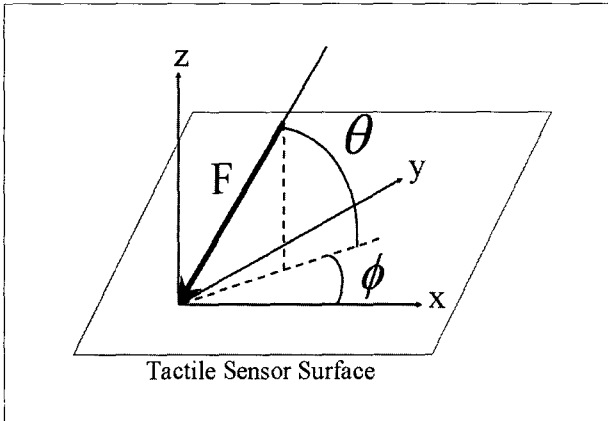


그림 5. 센서에 가해지는 외부 압력
Fig. 5. External stress applied in the sensor

그림 6(a)는 압력이 가해지기 전의 센서의 단면으로써 상층부와 하층부가 정렬되어있는 초기 상태의 모습을 나타내고 있다. 그림 6(b)는 일정한 압력이 센서의 표면에 작용하였을 때 dielectric layer가 변형하면서 상층부와 하층부가 엇갈리는 현상을 나타내고 있다. 이러한 일련의 변화에서 측정할 수 있는 센서들의 capacitance를 (7)~(9)와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{\epsilon_d \eta (\beta_0 - w \gamma_{zx})}{h(1 - \epsilon_z)} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_d \alpha^2}{h(1 - \epsilon_z)} \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_d \eta (\beta_0 + w \gamma_{zx})}{h(1 - \epsilon_z)} \quad (9)$$

이들 식에서 ϵ_d 는 dielectric layer의 유전율, α 는 sensing plate의 폭, β_0 는 초기 상태에서 index plate와 side sensing plate간의 교차 폭, $w \gamma_{zx}$ 는 압력이 가해졌을 때 dielectric layer의 가로 변형 폭, $h \epsilon_z$ 는 압력이 가해졌을 때 dielectric layer의 세로 변형 폭을 각각 의미한다.

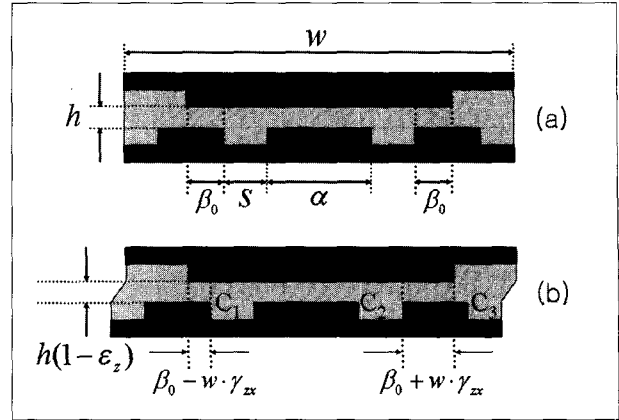


그림 6. 압력이 가해졌을 때의 센서의 단면 변화
Fig. 6. Variation of cross section with stress

3.2 센서 구동 회로

센서가 압력을 감지하기 위해서는 센서에 적절한 입력신호를 인가하였을 때 출력되는 신호를 측정할 수 있는 회로가 필요하다. 본 센서는 그림 7과 같은 회로로 센서를 구성하여 크기와 주파수는 같고 위상이 다른 정현파를 각각의 sensing plate에 인가함으로써 압력이 변할 때 발생하는 출력 전압의 크기와 위상의 변화를 통해서 압력을 분석할 수 있다.

그림 7에서 V1과 V2는 크기와 주파수는 같지만 위상은 ψ 만큼 차이가 나는 정현파이다. 이와 같이 V1과 V2를 각각 C1, C3에 인가하였을 때, 출력 V3의 측정치는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$V_3 = - \frac{C_2(C_1 V_1 + C_3 V_2)}{C - 4(C_1 + C_2 + C_3)} \quad (10)$$

식 (10)에 (7)~(9)식을 대입하고 정리하면 다음과 같은 식 (11)이 얻어진다.

$$V_3 = - \frac{\epsilon_d \eta \alpha^2}{C_4 [(2\eta \beta_0 + \alpha^2)]} \times \frac{1}{(1 - \epsilon_z)} \times [(\beta_0 \gamma_{zx}) V_1 + (\beta_0 + w \gamma_{zx}) V_2] \quad (11)$$

식 (11)을 살펴보면 출력 함수의 첫 항은 상수, 두 번째 항은 ϵ_z 에 관한 함수, 마지막 항은 γ_{zx} 에 관한 함수로 표현되고 있음을 알 수 있다. 이때, 구동 회로의 V1과 V2에 $\sin(\omega t)$ 와 $\sin(\omega t + \psi)$ 를 각각 인가한다고 가정하고 마지막 항을 벡터로 표현하게 되면 γ_{zx} 에 의한 벡터의 위상 변화를 계산할 수 있다

V1의 주파수가 변하더라도 V2와 이루는 위상의 차이는 일정하기 때문에 벡터로 표현하는 과정에서 계산상의 편의를 위하여 V1이 x축과 일치될 수 있는 임의의 주파수를 선택하여서 그림 8과 같이 구동 회로의 출력을 벡터 성분으로 표현하였다.

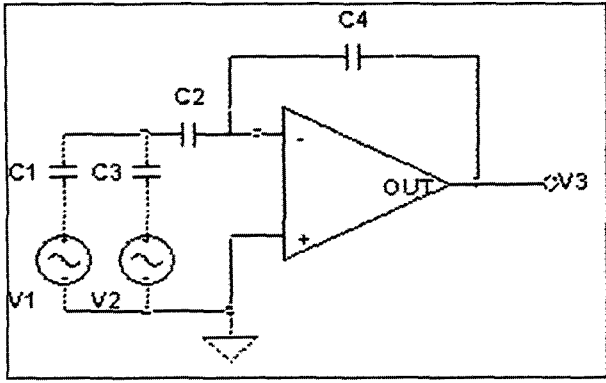


그림 7. 센서 구동 회로
Fig. 7. Driving circuit for sensor

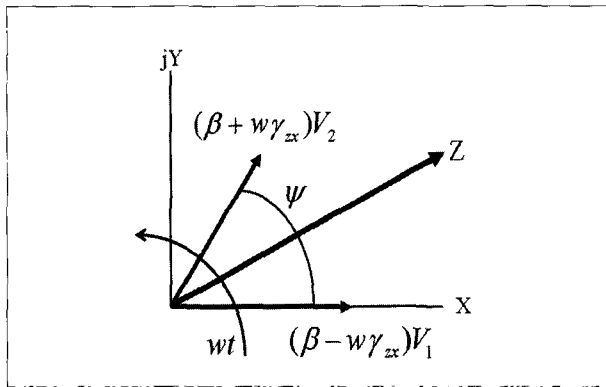


그림 8. 구동 회로의 출력 벡터
Fig. 8. Output vector of driving circuit

4. 시뮬레이션 결과

이상에서 설계한 측각센서의 유효성을 검증하기 위해서 다음은 같은 시뮬레이션을 하였다.

먼저, 그림 8에서 표현된 벡터의 크기와 위상은 식 (12)~(13)으로 나타낼 수 있다.

$$|Z| = \sqrt{\{(\beta + \omega\gamma_{zx})\cos\psi + (\beta - \omega\gamma_{zx})\}^2 + \{(\beta + \omega\gamma_{zx})\sin\psi\}^2} \quad (12)$$

$$\angle Z = \text{atan} \frac{(\beta + \omega\gamma_{zx})\sin\psi}{(\beta + \omega\gamma_{zx})\cos\psi + (\beta - \omega\gamma_{zx})\sin\psi} \quad (13)$$

|Z|위의 식에서 볼 수 있듯이 출력신호의 위상을 분석하면 γ_{zx} 의 값을 얻을 수 있다. 또한 γ_{zx} 값을 식 (11)에 대입하여서 전압 크기의 변화를 계산하면 ϵ_z 를 구할 수 있다. 또한 입력되는 V1과 V2의 위상차인 ψ 값의 변화는 측각센서의 민감도에 영향을 미치게 된다. 그림 9에서 ψ 값이 0에서 pi로 변화할 때 센서 반응의 변화도 명확히 관측됨을 알 수 있다. |Z|의 경우에는 그림 9(a)에서와 같이 ψ 의 값이 커질수록 변화량이 커짐을 알 수 있지만, $\angle Z$ 의 경우에는 그림 9(b)에서와 같이 ψ 값이 0에서 pi로 변화함에 따라서 $0 < \psi < \pi/2$ 의 구간에서는 $\angle Z$ 의 민감도가 커지지만 다시 $\pi/2 < \psi < \pi$ 구간에서는 $\angle Z$ 의 민감도가 떨어지고 있음을 알 수 있다.

그러므로 그림 9의 결과를 종합하였을 때, 입력되는 두 신호의 위상차(ψ)는 $0 < \psi < \pi/2$ 의 범위에서 정해져야 함을 알 수 있다.

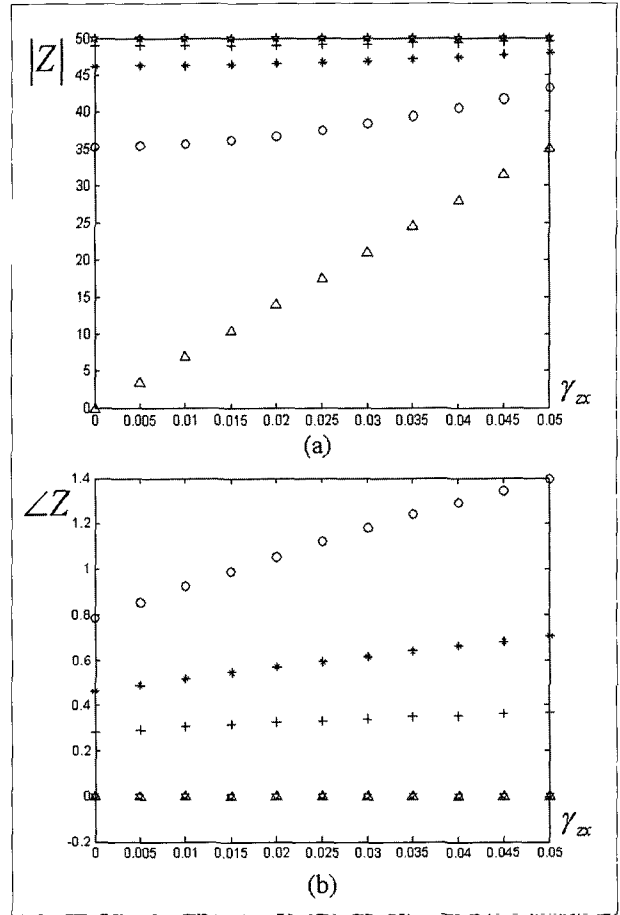


그림 9. ψ 의 변화에 따른 |Z|와 $\angle Z$ 의 변화

(☆: $\psi=0$, +: $\psi=\pi/8$, *: $\psi=\pi/4$, ○: $\psi=\pi/2$, △: $\psi=\pi$)

Fig. 9. Variation of |Z| and $\angle Z$

(☆: $\psi=0$, +: $\psi=\pi/8$, *: $\psi=\pi/4$, ○: $\psi=\pi/2$, △: $\psi=\pi$)

지금까지의 측각인식 과정은 센서의 수평면을 그림 2와 같이 보았을 때, 수직 성분과 x축에 관한 수평 성분을 분석한 경우였다. 그러므로 y축에 관한 수평성분 γ_{zy} 는 γ_{zx} 를 계산하는 방법과 동일하게 구할 수 있다. ϵ_z , γ_{zx} , γ_{zy} 가 얻어지면 그 값들을 이용해서 단위 센서에 가해지는 압력을 입체적으로 계산할 수 있게 된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 외부의 힘을 효율적으로 감지하기 위한 측각센서의 설계 및 이론적인 해석에 관한 것이었다. 일반적으로 측각센서가 표면의 변화를 감지하기 위해서는 외부의 자극을 센서부에 효과적으로 전달할 수 있어야 하기 때문에 미세한 힘에도 변화를 감지할 수 있는 센서의 설계가 필요하다. 이에 본 논문에서는 양 전극 사이에 유연성을 갖는 유전체를 사용하여 보다 효율적인 감지가 가능하도록 하였다. 본 측각센서는 단위 센서의 크기가 작을수록 보다 정밀한 측각인식이 가능하기 때문에 크기의 축소가 필요하다. 즉, dielectric layer와 capacitive sensor가 그 특성을 잃지 않는 범위 내에서 최소한의 두께 및 넓이로 설계되어야 하며, 이

부분을 구현하기 위해서는 재료에 관한 좀더 깊은 고찰이 필요하다. 또한 촉각센서에 외부의 자극이 효율적으로 전달되기 위해서 센서의 표면에 실리콘과 같은 물질을 입히는 것도 촉각 인식의 효율 증대에 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Franco Castelli "An integrated tactile-thermal robot sensor with capacitive tactile array," IEEE Trans. of Industry Applications, vol. 38, no. 1, pp. 85-90, January/February 2002.
- [2] M. Jungmann, H. F. Schlaak "Miniaturised electrostatic tactile display with high structural compliance," Proceeding of Eurohaptics, 2002.
- [3] Hisashi Osumi, Nobuhiko Ishii, Kentaro Takahashi, Kazunori Umeda, and Gen-ichiro Kinoshita "Optimal grasping for a parallel two-fingered hand with compliant tactile sensor," Proceeding of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 2, pp. 799-804, October, 1999.
- [4] Shimojo M, et al, "A flexible full-body tactile Sensor suit using electrically fabric and strings capacitive," Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 96, vol. 2, pp. 450-457, November 1996.
- [5] Franco Castelli, "An integrated tactile thermal robot sensor with capacitive tactile array," IEEE Conference on Industry Applications, vol. 3, pp. 1970-1975, October 1995.
- [6] Yuri M. Shkel and Nicola J. Ferrier, "Electrostriction enhancement of solid-state capacitance sensing," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 8, no. 3, pp. 318-325, September 2003.

저 자 소 개



심귀보(Kwee-Bo Sim)

1984년 : 중앙대학교 전자공학과 공학사
 1986년 : 동대학원 전자공학과 공학석사
 1990년 : The University of Tokyo 전자공학과 공학박사
 1991년 ~ 현재 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수

2003년~2004년 : 일본계측자동제어학회(SICE) 이사
 2000년~2004년 : 제어자동화시스템공학회 이사 및 (현) 지능시스템연구회 회장
 2003년~2004년 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 부회장
 2002년~현재 : 중앙대학교 산학연컨소시엄센터 센터장 및 기술이전센터 소장
 2005년~현재 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 수석부회장
 관심분야 : 인공생명, 지능로봇, 지능시스템, 다개체시스템, 학습 및 적응알고리즘, 소프트 컴퓨팅(신경망, 퍼지, 진화연산), 인공면역시스템, 침입탐지시스템, 진화하드웨어, 인공두뇌, 지능형 홈 및 홈네트워킹, 유비쿼터스 컴퓨팅 등

Phone : +82-2-820-5319
 Fax : +82-2-817-0553
 E-mail : kbsim@cau.ac.kr
 Homepage URL : <http://alife.cau.ac.kr>

황한건(Han-Hun Hwang)

2005년 현재 : 중앙대학교 전자전기공학부 4학년 재학 중