

폴리머 기반 슬림형 촉각센서의 최적 설계 및 새로운 공정 방법

Polymer Based Slim Tactile Sensor: Optimal Design and New Fabrication Method

이 정 일*, 사토 카즈오
(Jeong Il Lee¹ and Kazuo Sato¹)
¹Nagoya University

Abstract: In this study, we propose an optimal design and new fabrication method for a slim tactile sensor. Slim tactile sensor can detect 3-axial forces and has suitable flexibility for intelligent robot fingers. To amplify the contact signal, a unique table-shaped structure was attempted. A new layer-by-layer fabrication process for polymer micromachining that can make a 3D structure by using a sacrificial layer was proposed. A table-shaped epoxy sensing plate with four legs was built on top of a flexible polymer substrate. The plate can convert an applied force to a concentrated stress. Normal and shear forces can be detected by combining responses from metal strain gauges embedded in the polymer substrate. The optimal positions of the strain gauges are determined using the strain distribution obtained from finite element analysis.

Keywords: tactile sensor, table-shaped structure, finite element analysis, polymer micromachining, layer-by-layer fabrication process

I. 서론

산업이 고도화되면서 정밀하고 복잡한 계측의 필요성이 증가하고 있으며 이에 따라서 각종 물리량의 측정을 위하여 다양한 종류의 센싱 디바이스가 제안되고 있다. 특히, 인간의 오감 -시각, 청각, 후각, 미각, 촉각- 을 모방하여 계측기로서 이용하려는 시도는 이전부터 계속되어 왔다[1]. 인간의 오감 중에서 시각, 청각의 분야는 생체 모방형 센서로서 많은 연구가 이루어져 이제 어느 정도의 성과가 드러나고 있지만 촉각을 비롯한 다른 감각 분야의 경우는 아직 그렇지 못하다.

촉각센서의 여러 적용분야 중 특히 로봇 손가락용 촉각센서에 주목하여 보자. 로봇이 인간처럼 임의의 물체를 잡기 위하여 로봇 손가락과 물체의 기계적인 접촉을 통하여 잡는 힘을 조절하는 상황에 촉각센서가 이용될 수 있다. 지능 로봇 손가락 조작부의 제어 방법을 살펴보면 현재까지도 많은 로봇들이 물체를 잡는 자세 및 손가락의 제어를 위하여 전통적 방법인 스테레오 카메라를 이용하여 거리를 측정하고 이를 제어에 응용하는 변위 제어 방식이 주로 사용되고 있다 [2]. 그러나 최근의 발달한 조작 기술에 걸맞는 정밀한 조작 또는 긴급한 상황시의 재빠른 대응 조사를 위하여 슬립 감지 등을 통한 3차원의 힘을 피드백 제어하는 기술이 요구 된다. 이전에도 6축 F/T센서를 이용하던지 폴리머 재료로 만들어진 접촉센서로서 힘 제어를 이용하려는 시도는 있었다. 그러나 비싼 가격과 비교적 큰 크기에 따른 공간적 제약이 있었다. 그리고 폴리머 재료를 이용한 센서는 1축 밖에 측정이 불가능하다는 단점 외에 낮은 해상도가 문제점으로 지적되었다. 한편, 센서를 더욱 폭 넓게 활용하기 위하여 그 부착의

문제를 고려하지 않을 수 없다. 다양한 현장에서 촉각센서를 사용하기 위하여, 예를 들어 인간과 닮은 휴머노이드의 등근 손가락에 부착이 가능하도록 센서 몸체가 유연할 필요가 있다. 따라서 지능형 로봇의 손가락에 사용하기 위하여 촉각센서는 곡면에 부착 가능하도록 충분히 유연하며, 또한 압력 및 슬립을 감지하여 로봇을 정밀하게 조작할 수 있도록 3축의 힘(수직력 및 2차원 수평력)을 측정할 수 있어야 한다.

위에서 언급한 요구 조건들을 상기하면서 그 동안 보고된 로봇손가락에 특화된 촉각센서의 발전을 살펴보면 몇 가지 문제점을 찾을 수 있다. 먼저 시도된 것은 실리콘 기반의 센서였다. Kane 및 Mei 등은 실리콘마이크로머시닝 기술을 이용하여 다이아프램 구조를 갖는 3축 힘센서를 조합한 촉각센서를 제안하였다[3,4]. 실리콘 기반의 촉각센서들은 우수한 성능을 보였지만 힘의 측정 범위가 좁고, 실리콘 기판이 딱딱하기 때문에 임의의 곡면에 부착하기 어려웠다. 또한 실리콘 재료 자체가 기계적으로 갑작스런 충격이나 큰 변형에 견디기 힘들기 때문에 깨지기 쉬워 계속 새로 구입해야 하는 문제가 발생하였다[1]. 다른 접근 방법으로는 캐패시턴스의 변화나 전도성 폴리머를 이용하는 것이다[5-7]. 이런 종류의 센서들은 유연하여 부착이 자유롭고, 저비용으로 제작이 가능하였지만 낮은 감도와 분해능을 감수해야만 했다. 따라서 유연성을 갖는 작은 크기의 센서에 대한 요구 때문에 폴리머 재료를 이용한 마이크로머시닝 기술이 제안되었다. 유연한 폴리머 기반 위에 멤스 소자들을 집적한 폴리머마이크로머시닝 기술을 이용하여 Engel 등이 유연한 촉각센서를 제안하였다[8]. 이 센서는 작은 단위 셀의 조합을 통하여 확장이 가능한 장점이 있으나 단축의 힘 밖에 측정할 수 없었다. 최근에는 위의 단점들을 보완하고자 실리콘과 폴리머를 조합한 하이브리드 타입 및 광학적 원리를 적용한 센서를 포함한 다양한 형태의 센서들이 보고되고 있으나 3축 힘의 측정과 작은 크기는 여전히 도전적인 과제로 남아 있다[9-13].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 11. 15., 수정: 2010. 12. 5., 채택확정: 2010. 12. 20.

이정일, 사토카즈오: 나고야대학 공학연구과

(junke@kaz.mech.nagoya-u.ac.jp/sato@mech.nagoya-u.ac.jp)

* 본 연구는 일본 문부과학성 GCOE 연구비에 의하여 연구되었음.

따라서 우리는 새로운 타입의 3축 힘 측정이 가능하고 유연한 촉각센서를 제안한다. 작고 얇은 몸체에 기존에 제시되지 않았던 테이블 형상의 감지부를 갖도록 설계되었으며, 스트레인게이지의 저항 변화값을 조합한 단순한 검출 원리로 3축 힘 신호의 분리가 가능하다.

II. 센서 디자인

인간의 손가락이 임의의 물체와 만날 때 그 접촉 힘은 세 성분의 힘을 감지한다. 하나는 표면의 수직한 힘이며 다른 것들은 표면에 평행한 힘이다. 특히 물체와 손가락 사이에 슬립감지의 관점에서 수평력 성분은 로봇 손의 쥐는 힘의 조절에 있어서 매우 중요하다[1,3].

로봇 손에 부착된 촉각센서에 가해진 스트레스를 증폭하기 위하여 그림 1과 같은 테이블 형상의 구조물을 고안하였다. 3 성분의 힘을 각 축에 따라 분리하여 검출하기 위하여 유연한 폴리머 기관 위에 X 및 Y축과 나란하도록 놓인 4개의 다리를 갖는 테이블 모양의 에폭시 감지판을 형성한다. 윗편에 외부에서 하중이 가해지게 되면 각 방향의 다리를 통하여 전달된 힘이 조이스틱처럼 지렛대 역할을 하며 가해진 힘을 각 축 방향으로 분리하면서 힘의 크기도 좁은 부분에 집약하여 증폭시켜 줄 수 있다.

스트레인게이지는 외부에서 주어진 힘을 내부의 스트레인으로 변환할 수 있고 이는 저항값의 변화로 표시된다. 수직력 및 수평력은 폴리머 기관 위에 증착된 금속 스트레인게이지의 저항값 변화를 조합하여 검출할 수 있다. 스트레인 게이지의 최적화된 위치는 유한요소 해석의 결과에서 얻어진 스트레인 분포를 이용하여 결정되었다. 감지요소 설계의 검증은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 또한 유한요소해석의 결과로 얻어진 스트레인 분포는 센서의 감도를 최대화 하기 위하여 스트레인게이지의 모양 및 크기의 결정에도 사용되었다.

해석 모델은 그림 1과 같이 멤브레인과 4개의 지지기둥 및 힘 변환 감지판으로 구성된 유한 요소 모델을 사용하였다. 기관의 바닥면은 경계조건으로서 고정되도록 가정되었다. 구속된 기관 및 테이블 모양의 구조에는 tetrahedral mesh가 적용되었다. 수직력 Fz는 감지판의 윗면에 0.1 N으로, 수평력 Fy는 감지판의 옆면에 y축을 따라서 역시 0.1 N이 주어졌다. 직관적으로 수직력(Fz)을 감지원판의 윗면에 고르게 가해준

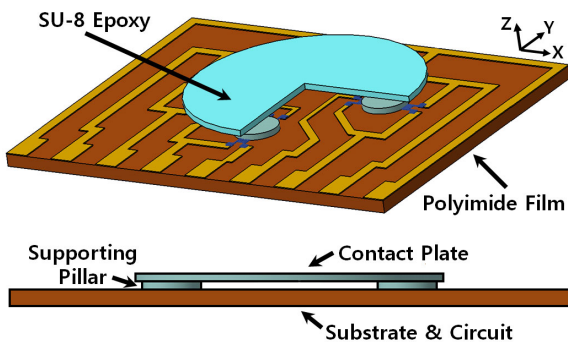


그림 1. 테이블 형상을 갖는 센서 감지부의 도해.
Fig. 1. Schematic diagram of sensing unit with table-shaped structure.

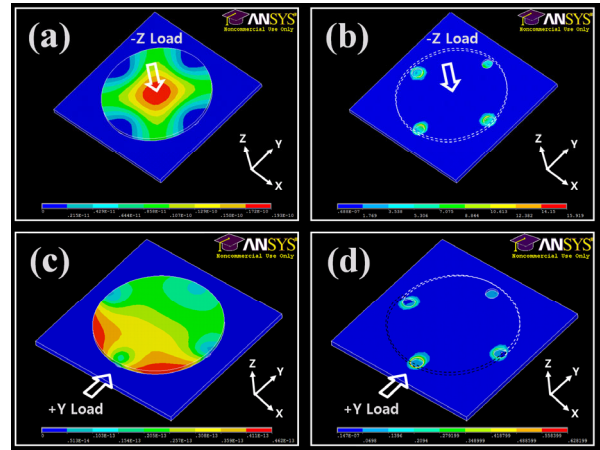


그림 2. 수직력 및 수평력이 주어졌을때의 응력 변화 분포도.
Fig. 2. Strain distribution under normal (a, b) and shear (c, d) load.

다면 4개의 지지 기둥의 안쪽 모서리를 따라서 대칭적으로 응력이 분포하게 될 것이다(그림 2(a)). 즉, 모든 기둥의 안쪽 모서리와 붙어있는 기관 부위에 압축 응력이 생성될 것이라 예측된다(그림 2(b)). 한편 수평력(Fx, Fy)을 감지원판의 옆면에 고르게 가해준다면 힘을 받는 축 방향의 기둥의 안쪽 모서리를 따라서 비대칭적으로 응력이 분포하게 될 것으로 예상된다(그림 2(c)). 예를들어 감지원판의 옆면에 수평력(+Y)이 가해진다면 +Y 방향의 기둥 안쪽 부분의 기관은 인장 응력을, -Y 방향 기둥의 안쪽 부위의 기관은 압축 응력이 형성될 것을 예측할 수 있다(그림 2(d)). 따라서 응력과 변형률의 분포를 고려하면 저항체의 가장 감도가 큰 위치는 4개의 지지 기둥의 안쪽 모서리 주변이 될 것으로 예상할 수 있다[14].

그림 2에서 보여지는 유한요소해석의 시뮬레이션의 결과는 직관적으로 예상했던 결과와 일치함을 보여준다. 일정한 하중 조건(0.1 N) 하에서 지지기둥 및 감지원판의 직경, 높이를 변화시키면서 최적의 규격을 결정할 수 있었다. 설계된 촉각센서는 두께 125- μ m, 4.18 x 2.91 mm의 크기의 직사각형 멤브레인 위에 두께 60- μ m, 지름 2.31-mm의 감지부 원판 및 높이 60- μ m, 지름 0.44-mm의 힘 변환 기둥을 갖는다. 멤브레인 재료는 영률 2.5 GPa, 포아송비 0.34를 갖는 폴리이미드 필름으로 되어 있다. 기둥 및 감지 원판은 영률 4.4 GPa, 포아송비 0.22를 갖는 SU-8로 제작되었다[15].

III. 센서 제작

1. 공정 설계

폴리머 기반의 3축 촉각센서는 폴리머 재료의 훌륭한 열적, 전기적, 기계적 그리고 화학적 안정성 때문에 그동안 촉각센서 제작 과정에서 제기되었던 문제점에 적절한 해답이 될 수 있다. 최근 건식 및 습식 에칭 기술을 이용한 유연한 멤스 기반의 촉각센서가 개발되었으나 물리적 손상에 의한 폴리머 재료의 경화라는 단점이 존재하였다[14,16]. 또한 폴리머마이크로머시닝은 실리콘마이크로머시닝에 비하여 균일한 코팅의 문제 및 3차원 구조를 형성하기 위한 두꺼운 희생층 제작의 어려움이 있었다. 더우기 마이크로머시닝 공정에서 필수적인 포토리소그라피 공정을 진행함에 있어서 폴리머 재료의 열적 변형에 의한 포토마스크 정렬 작업의 어려움

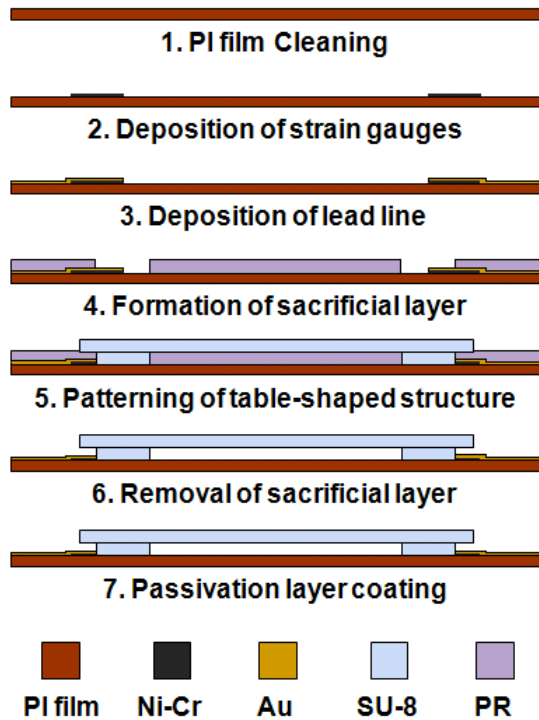


그림 3. 상세 공정 순서도.
Fig. 3. Flow chart of fabrication process.

과 같은 태생적 단점도 가지고 있다.

따라서 우리는 에칭 기술을 이용하지 않고 높은 두께의 형성이 가능한 포토레지스트 재료를 희생층으로 사용하여 3차원 구조물의 제작이 가능한 새로운 적층 공정식 폴리머마이크로머싱 기법을 제안한다. 열팽창률이 각기 다른 폴리머 재료를 함께 병용하는 공정을 달성하기 위하여 모든 공정이 각각의 폴리머 재료들이 화학적으로 안정한 110°C 미만의 낮은 공정 온도 조건하에서 진행되도록 고려되었다. 설계된 센서는 포토공정이 가능한 폴리머 재료 기반의 표면 마이크로머싱 기술을 이용하여 제작되었다. 자세한 공정 조건은 그림 3의 공정 순서도에 따른다.

2. 제작 공정

센서의 기판으로서 지름 64-mm, 두께 125- μ m의 폴리이미드 필름을 준비하였다. 표준 세정 후, 공정 정렬 문제를 피하기 위하여 폴리이미드 필름은 3" 실리콘 캐리어 웨이퍼에 물방울의 표면장력을 이용하여 소자 제작에 앞서 부착하였다. 표준적인 포토리소그래피 기법에 의하여 금속 스트레인지지 및 금속 배선을 패터닝하였다. 스트레인지지는 니켈-크롬 합금 (Ni-Cr, 80:20)을 400 Å 두께로 증착하였고, 금속 배선은 스트레인지지와 동일한 공정을 통하여 400 Å의 크롬 접착층 위에 4000 Å 두께의 금으로 구성되었다.

접촉 감지부로서 테이블 모양의 3차원 구조물을 만들기 위하여 우선 희생층을 두꺼운 포토레지스트 재료를 사용하여 60- μ m 두께로 포토리소그래피 공정으로 형성하였다. 폴리이미드 필름 표면과 희생층 사이에 지지기둥 및 감지판을 SU-8 에폭시를 역시 포토리소그래피 기법으로 형성하였다. 희생층을 전용 스트리퍼를 이용하여 제거한 후, 센서는 캐리어 웨이퍼로부터 분리되었다. 그리고 폴리이미드 기판과 에

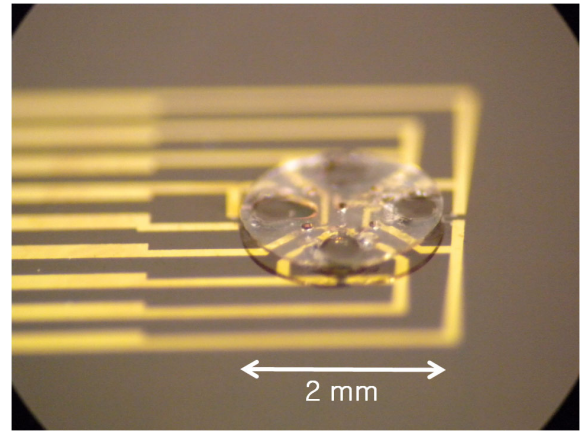


그림 4. 폴리머마이크로머싱 공정으로 제작된 센서 감지부.
Fig. 4. Microfabricated table-shaped sensing unit.

폭시 구조물과의 접착력 증가를 위하여 5- μ m 두께의 파릴렌 수지를 증착하였다. 그림 4는 제작된 테이블 형상의 센서 감지부를 보여 준다. 촉각센서는 기판을 포함한 두께 250- μ m, 곡률반경 8 mm 미만의 휨성을 나타내었다.

IV. 측정

제작된 센서는 3축 로드셀이 장착된 평가장치를 통하여 교정되었다. 평가장치는 XYZ, 3개의 축에 따라 이동이 가능한 스테이지에 장착 되어진 촉각센서에 각 방향의 하중을 가할 수 있다. 평가장치는 로드셀에 부착되어 있는 가는 프로브 팁과 센서의 정렬을 위하여 비전 시스템을 갖추고 있다. 센서는 수직력 및 수평력을 각각 0에서 1N까지 측정하였다. 0에서 1N까지 증가시키며 하중을 가하고, 로드셀로부터 얻어진 힘의 측정값에 대하여 센서의 저항의 변화값을 표준화하여 그림 5에 표시하였다.

Z 축을 따라 0에서 1N까지 하중의 변화에 대한 저항값의 기울기는 20,100 ppm/N이다. 한편 Y축을 따라서 0에서 1N까지 변하는 하중에 대한 수평력의 기울기는 12,800 ppm/N이다. 측정 분해능은 0.1N이며 수평력에 대한 수직력의 감도는 약 1.57배로서 이전 연구에서 보고되었던 폴리머 기반 센서의 문제점 중 하나였던 Z/XY 출력비를 개선할 수 있었다[14,16]. 힘성분 Fz와 Fy는 1N까지는 좋은 선형성을 보인다. 하지만 센서 몸체가 폴리머 재료로 구성되어 있기 때문에 1.5N 이상

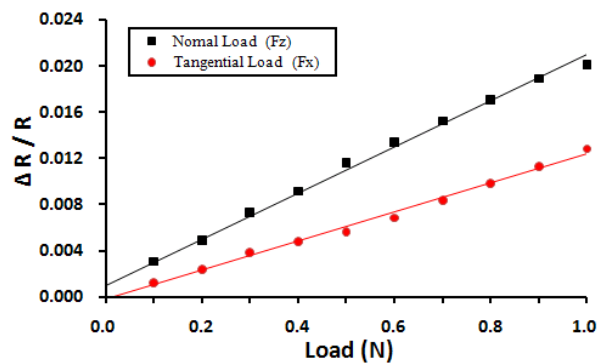


그림 5. 수직력 및 수평력에 대한 저항치의 표준 변환값.
Fig. 5. Normalized resistance change for normal and shear loading.

의 하중이 가해질 경우 탄성 복원에 따른 히스테리시스가 나타나며 출력값이 점점 포화점이 이르게 되어 이에 대한 추가 분석이 필요하다. 향후 센서 감지부에 가해지는 비틀림의 영향을 고려한 추가실험을 시행할 예정이다.

V. 결론

우리는 작으면서도 3축 힘 측정이 가능하고 지능형 로봇의 손가락에 적용할 수 있도록 충분한 유연성을 갖는 슬림형 촉각센서를 설계, 제작하였다. 유한요소해석 시뮬레이션에 의한 최적설계를 바탕으로 센서에 가해지는 분포하중을 집중하중으로 바꾸어 힘의 출력 크기를 증폭하고 3 성분의 힘을 각 축에 따라 독립적으로 검출할 수 있도록 테이블 모양의 3차원 구조물의 형상을 디자인하였다. 또한 본 연구에서는 폴리머 재료의 경화를 피하기 위하여 전 공정을 예칭 대신 높은 두께의 형성이 가능한 포토레지스트 재료를 희생층으로 사용하는 적층 공정 구조를 택함으로써 내구성이 강화된 두꺼운 3차원 폴리머 구조물을 형성할 수 있었다. 우리의 접근 방법을 통하여 확립된 설계 및 제작기술은 다양한 분야의 새로운 연구에 널리 적용될 수 있으리라 생각한다.

참고문헌

- [1] M. H. Lee and H. R. Nicholls, "Tactile sensing for mechatronics — A state of the art survey," *Mechatronics*, vol. 9, pp. 1-31, Feb. 1999.
- [2] G. D. Hager, "A modular system for robust positioning using feedback from stereo vision," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 4, pp. 582-595, Aug. 1997.
- [3] B. J. Kane, M. R. Cutkosky, and G. T. A. Kovacs, "A traction stress sensor array for use in high-resolution robotic tactile imaging," *JMEMS*, vol. 9, no. 4, pp. 425-434, Dec. 2000.
- [4] T. Mei, W. J. Li, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni, and M. H. Chan, "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range," *Sensors and Actuators A*, vol. 80, pp. 155-162, Mar. 2000.
- [5] M.-Y. Cheng, X.-H. Huang, C.-W. Ma, and Y.-J. Yang, "A flexible capacitive tactile sensing array with floating electrodes," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 19, pp. 115001-115010, Sep. 2009.
- [6] H.-K. Lee, S.-I. Chang, and E. Yoon, "A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment," *JMEMS*, vol. 15, no. 6, pp. 1681-1686, Dec. 2006.
- [7] Y.-J. Yang, M.-Y. Cheng, W.-Y. Changa, L.-C. Tsao, S.-A. Yang, W.-P. Shih, F.-Y. Chang, S.-H. Changa, and K.-C. Fan, "An integrated flexible temperature and tactile sensing array using PI-copper films," *Sensors and Actuators A*, vol. 143, pp. 143-153, May. 2008.
- [8] J. Engel, J. Chen, and C. Liu, "Development of polyimide flexible tactile sensor skin," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no. 3, pp. 359-366, Feb. 2003.
- [9] F. Jiang, G. B. Lee, Y. C. Tai, and C. M. Ho, "A flexible micromachine-based shear-stress sensor array and its application

to separation-point detection," *Sensors and Actuators A*, vol. 79, pp. 194-203, Feb. 2000.

- [10] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material," *Sensors and Actuators A*, vol. 127, pp. 295-301, Mar. 2006.
- [11] H. Onishi, M. Sohigawa, H. Tachibana, Y. M. Huang, T. Kanashima, M. Okuyama, K. Yamashita, M. Noda, and H. Noma, "Stability improvement of tactile sensor of normal and shear stresses using Ni-Cr thin film gauge," *IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines*, vol. 129, no. 11, pp. 411-416, Nov. 2009.
- [12] Y. Hasegawa, M. Shikida, T. Shimizu, T. Miyaji, H. Sasaki, K. Sato, and K. Itoigawa, "A micromachined active tactile sensor for hardness detection," *Sensors and Actuators A*, vol. 114, pp. 141-146, Sep. 2004.
- [13] H. Yussof, M. Ohka, H. Suzuki, N. Morisawa, and J. Takata, "Tactile sensing-based control architecture in multi-fingered arm for object manipulation," *Engineering Letters*, 16-2-9, May. 2008.
- [14] J. H. Kim, J. I. Lee, H. J. Lee, Y. K. Park, M. S. Kim, and D. I. Kang, "Design of flexible tactile sensor based on three component force and its fabrication," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2589-2592, Barcelona, Spain, April 2005.
- [15] J. E. Mark, *Polymer Data Handbook*, 2nd Ed., Oxford University Press, 1999.
- [16] J. H. Kim, W. C. Choi, H. J. Kwon, and D. I. Kang, "Development of tactile sensor with functions of contact force and thermal sensing for attachment to intelligent robot finger tip," *Proc. of the IEEE International Conference on Sensors*, pp. 1468-1472, Daegu, Korea, Oct. 2006.



이 정 일

2000년 성균관대학교 물리학과 졸업. 2002년 성균관대학교대학원 응용물리학과 졸업. 2003년~2005년 한국표준과학연구원 연구원. 2005년~2006년 한국과학기술연구원 연구원. 2008년~현재 나고야대학 공학연구과. 관심분야는 멤스소자, 촉각센서, 플렉서블멤스, 폴리머마이크로머시닝.



사토 카즈오

1970년 요코하마국립대학 기계공학과 졸업. 1982년 동경대학 공학박사. 1970년~1994년 Hitachi Ltd., Tokyo. 수석연구원. 1994년~현재 나고야대학 공학연구과 교수. 2006년~현재 동경공업대학 객원교수. 관심분야는 멤스, 실리콘예칭, 마이크로/나노 물리, 미세소자 제작.