

광섬유 브래그 격자를 이용한 촉각 힘 센서의 개발

김만섭[†] · 이정주[†]

Development of Tactile Force Sensor using Fiber Bragg Grating

Man-Sub Kim and Jung-Ju Lee

Key Words: Fiber Bragg Grating(광섬유 브래그 격자), Tactile Force Sensor(촉각 힘 센서), Finite Element Method(유한 요소 해석)

Abstract

The tactile force sensor was studied using Fiber Bragg Grating (FBG). The FBG is able to multiplex easily and is immune to electromagnetic environment. A sensor frame was designed to a cantilever beam type. Strain of a beam is related with the peak shift of a bragg wavelength. Finite Element Method (FEM) was used for getting an appropriate thickness from 0.2 mm to 0.3 mm thick. FEM results showed that 0.3 mm thick was suitable for the force range 10 N. The force resolutions of 0.039 N and 0.113 N were obtained with optical spectrum analyser and tunable Fabry-Perot filter, respectively.

기호설명

λ_B : 광섬유 브래그 격자 파장
 p_e, p_{11} : 유효 광탄성 계수, 광탄성 계수
 n_{eff} : 유효 굴절 계수
 ν : 포아송의 비
 M, I : 굽힘력, 관성 모멘트
 t, b_o, b_1 : 센서 두께, 밀변 너비, 윗변 너비
 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xx}^t$: 변형률, 평균 변형률

1. 서론

인간의 촉감을 감지하기 위한 촉각센서의 방법이나 정의는 매우 다양하지만, Lee와 Nicholls는

촉각센서(Tactile Sensor)를 센서와 물체간의 물리적인 접촉을 통해 물체 혹은 접촉상태의 특정 물성치를 측정할 수 있는 기구나 시스템이라고 정의 하였다[1]. 정의가 매우 포괄적인 만큼 촉각센서의 종류와 측정 방법도 매우 다양하다. 광섬유 센서를 촉각 센서에 적용시킨 연구를 살펴보면, Winger와 Lee 등은 외력이 광섬유에 미소굽힘(Microbending)을 주어 광강도(Light Intensity)가 떨어지게 하는 광강도형 센서를 사용하여 센서 어레이(Sensor Array)를 구현하였으며[2], Jenstrom과 Chen 등도 비슷한 시기에 광강도형 센서를 적용한 촉각센서를 배열한 촉각 감지 시스템을 만들었다.[3] Tohyama 와 Maeda는 광섬유 끝단에 반도체 공정을 이용해 거울을 장착한 후, 외력에 의해 거울이 휘어 반사되는 광의 강도가 줄어드는 것을 이용하여, 혈관내의 Fiberscope의 위치를 탐지하기 위한 촉각센서를 구현해 의료분야에 적용을 보여주었다[4]. 최근에는, 일반 전기적 센서(Electric Sensor)에 비해 다중화가 쉽다는 장점을 가진 브래그 격자 센서의 연구가 활발하다. 브래그 격자를 이용한 다중화는, 센서의 배열에 있어,

[†] 한국 과학 기술원 기계공학과
 E-mail : leejungju@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3033 FAX : (042)869-3210

일반 측각 센서가 가지는 복잡한 배선 문제를 해결할 수 있으며, 전자기파에 노출된 환경에서도 사용가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 광섬유 브래그 격자를 이용하여 측각 센서 시스템을 구현하였다.

2. 광섬유 브래그 격자

2.1 광섬유 브래그 격자의 소개

광섬유 브래그 격자는 온도에 대한 변화가 없는 경우, 격자의 간격과 변형률의 관계가 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\epsilon \quad (1)$$

p_e 는 유효 광탄성 계수(Effective strain-optic constant)로서 식 (2)와 같이 정의된다.

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2)$$

본 논문의 실험에 사용한 광섬유는 Fibercore사의 광 민감성 광섬유(Photosensitive Optical Fiber)이다. 일반적인 광 민감성 광섬유의 사양은 Table 1과 같다.

3. 센서의 설계 및 제작

3.1 센서 설계

브래그 격자의 길이는 10 mm이며, Phase Mask 기법을 사용하여 제작하였다. 외부 코팅을 벗

Table 1 Specification of photosensitive fiber.

Core diameter (μm)		8.1
Cladding diameter (μm)		125±1
Poisson's ratio		0.16
Strain optic tensor	p_{11}	0.113
	p_{12}	0.252
Effective refractive index		1.482

긴 광섬유의 최대 인장 변형률은 약 $6 \times 10^{-3} \epsilon$ 이며, 0.01 nm 분해능을 가진 광 파장 분석기(OSA)를 사용하였을 때, 브래그 격자 센서 시스템의 이론적인 분해능은 8.1~8.3 $\mu\epsilon$ 이다. 따라서 센서 길이 방향 변형률 범위는 8.1~6000 $\mu\epsilon$ 라고 할 수 있다. 브래그 격자를 광섬유 길이에 직각 방향으로 하중을 주거나 변형을 야기 시켜 격자 간격에 변화를 주면, 브래그 파장의 피크가 이동한다. 피크의 이동을 측정하는 센서로 외팔 보 타입의 센서 구조를 택하였으며, 센서 구조의 재질은 강(Steel)으로 선택 하였다. 브래그 격자에 하중이 가해지는 끝단에서 하중을 받는 부분의 접착을 위해 길이 1 mm 를 더하였다. 외팔보를 판재로 제작하여 나사로 고정하는 방식을 택하였다. 보의 고정을 위해 M2 규격의 나사를 사용한다고 할 때, 나사의 폭을 고려해 고정부의 너비는 3 mm 로 하였다. 총 길이는 14 mm 이다. 센서는, 인간의 촉감이 감지하는 최대 하중인 10 N 을 설계 하중으로 하였으며, 센서를 배열하였을 때, 센서가 가지는 공간 분해능은 브래그 격자 길이를 고려하여 $15 \times 15 \text{ mm}^2$ 으로 하였다. 센서의 형상은 길이방향 변형률의 차이를 줄이기 위해 삼각형태로 센서 끝으로 갈수록 점점 좁아지는 형태이다. 폭이 좁은 윗변의 너비는 광섬유가 지나가도록 하면서 하중을 주어야 하므로 하중 지지 부분을 고려한 2 mm 로 하였다. 폭이 넓은 밑변의 결정은 센서의 면적과 연결되는데, 센서를 구현하여 배열한 경우 센서의 공간분해능이 결정된다. 설계 형상대로 센서를 배열하는데 있어 광섬유가 지나가는 경로를 고려해 센서를 사선방향으로 9개를 배열한 경우 Fig. 1과 같다. 공간 분해

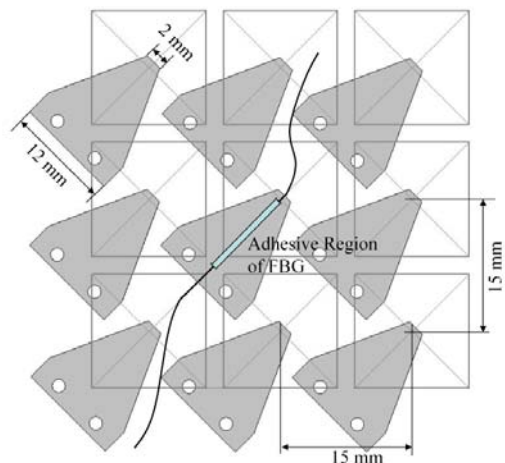


Fig. 1 Schematic drawing of sensor array.

능 15mm 안에서 센서를 배열할 때 밀변 너비는 광섬유가 지나갈만한 공간을 염두에 두어서 12 mm 로 결정하였다. 최근 브래그 격자의 길이를 수십 μm 까지 줄이는 연구들이 보고되었다[6]. 따라서 센서의 소형화가 예상된다.

3.2 보의 두께 설계

3.2.1 보 이론

두께의 결정에 있어서 가장 중요한 것은, 설계 하중인 10 N 내에서, 광섬유는 최대 인장 변형률 0.6 %를 초과하지 않도록 적절한 두께를 선정해야 한다. 접촉된 광섬유가 보의 표면에서 미끄러움이 발생하지 않는다는 가정 하에, Euler 보 이론을 적용하기 위해 Fig. 2에서와 같이 하중과 치수를 모델링하였다. x 방향의 보 끝단에 작용하는 굽힘 M 은 식 (3)과 같다.

$$M = 10 \cdot (0.01065 - x) \tag{3}$$

하중 10 N 의 작용점은 10.65 mm 이며, 임의의 x 지점에서의 보의 관성모멘트 I 는 식 (4)와 같다.

$$I = \frac{t^3}{12} \cdot \left(\frac{b_1 - b_0}{0.011} \cdot x + b_0 \right) \tag{4}$$

t 는 보의 두께이고, b_0 는 밑변의 너비 12 mm, b_1 윗변의 너비 2 mm, 보의 길이는 11 mm 이다. Euler 보의 이론에 의해 보 윗면의 변형률 ϵ_{xx} 는 식 (5)와 같다.

$$\epsilon_{xx} = \frac{Mt}{2EI} \tag{5}$$

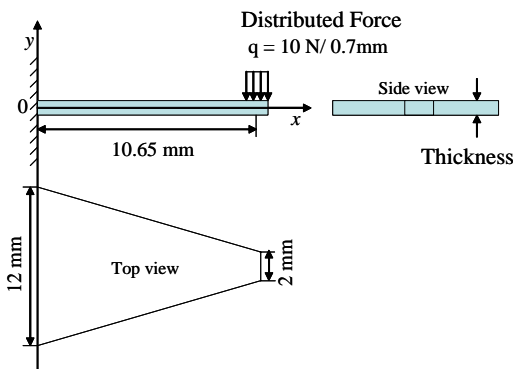


Fig. 2 Drawing of trapezoidal sensor plate.

E 는 Young 계수로 210 GPa 이며, 최대 인장 변형률 ϵ_{max} 는 광섬유 파단 변형률인 0.6 %이다. 설계 하중 10 N 이 부과되었을 때, 보의 표면에서 최대 변형률이 발생하는 지점에서의 변형률이 0.6 %를 초과하지 않도록 하는 최소 두께를 식 (5)에 의해 구하면 0.209 mm를 얻을 수 있다. 즉, Euler 보의 이론에 따라 보의 두께를 설계할 경우 보의 두께는 최소 0.209 mm 이상이 되어야 한다.

3.3 유한 요소 해석

이론 식에 의해 얻어진 결과를 기초로 하여, 보의 두께 0.2 mm와 0.3 mm에 대해서 유한 요소 해석을 수행하였다. 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.4를 사용하였으며, 요소는 굽힘 거동 표현에 적합한 Incompatible mode 요소인 3차원 8절점 C3D8I 를 사용하였다. 유한 요소 해석에 필요한 보의 물성치는 일반적인 강철의 물성치를 사용하였다. 두께 0.3 mm를 갖는 보의 유한 요소 해석 모델은 Fig. 3과 같고, 하중을 받는 끝단의 너비를 0.7 mm로 하였고, 10 N의 정적 하중을 부과하였으며, 모델의 하단은 모든 방향으로 구속이 되어있도록 모델링 하였다. 앞서 센서 구조물 가공의 어려움으로 판재 형상의 보를 구속부에 나사로 체결하는 방식을 택했는데, 유한 요소 해석에는 체결이 완벽하다고 보고 보가 구속부와 하나의 파트처럼 모델링 하였다. Fig. 3에서 가운데 영역은 길이 10 mm 의 브래그 격자가 접촉되어질 부분으로 간주하였다. 모든 두께의 모델은 Fig. 3과 같은 형태의 Mesh 구조를 가진다. Fig. 4는 두께가 0.2 mm 센서의 하중 10

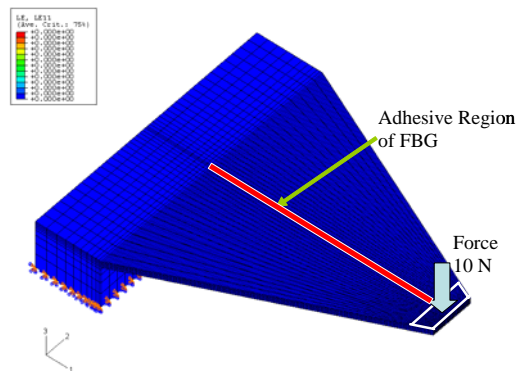


Fig. 3 Drawing of FEM model of 0.3 mm thick sensor.

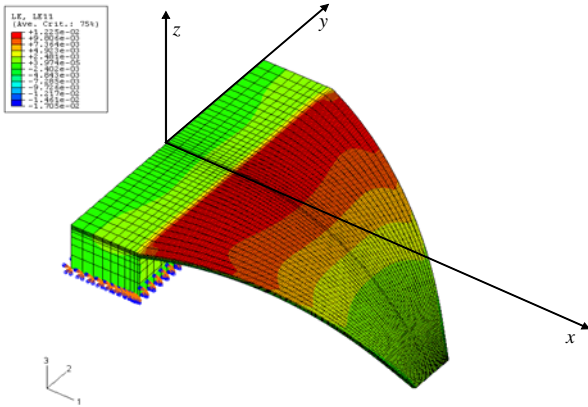


Fig. 4 Drawing of deformed model of 0.2 mm thick sensor.

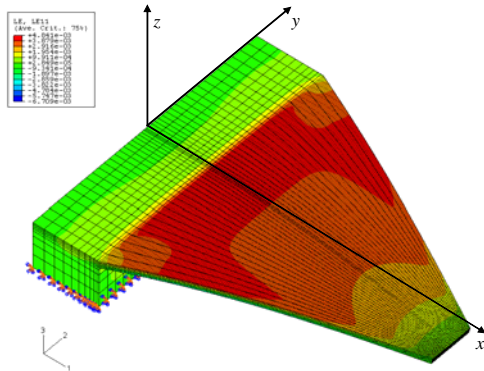


Fig. 5 Drawing of deformed model of 0.3 mm thick sensor.

N 에 의해 변형된 모델의 모습이다. 0.2mm 센서의 처짐은 10 N 의 하중에 상당히 크게 나타난다. 하중이 6 N 일 때 1 mm 부근의 변형률은 이미 광섬유 파단 변형률인 0.6% 를 넘어선다. 따라서 0.2 mm 두께의 센서는 설계 하중 10 N 을 만족하지 못하므로, 실제로 사용할 수가 없다. Fig. 5은 두께가 0.3 mm 센서의 하중 10 N 에 의해 변형된 모델의 모습이다. 설계 하중인 10 N 에도 변형률 ϵ_{xx} 는 광섬유 파단 변형률 0.6% 를 넘지 않았다. 브래그 격자 접착부의 보의 길이 방향 x 로 하중에 따른 변형률 ϵ_{xx} 분포를 나타내면 Fig. 6과 같다. 변형률의 분포가 하중이 작을 때는 선형성을 보여주다가 하중이 증가하면서 변형률의 차이도 커지고 선형성도 사라진다. 불균일한 ϵ_{xx} 의 분포가 브래그 격자가 Chirping 현상을 일으키는 원인이 되는데, 불균일한 변형률

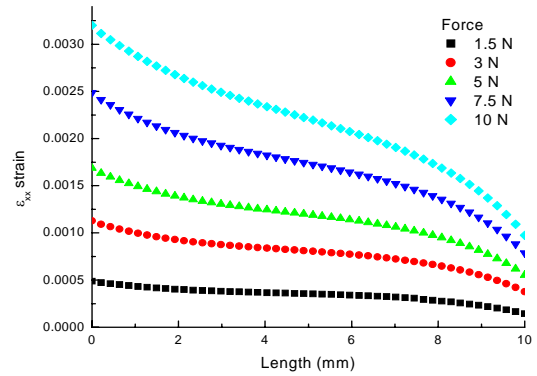


Fig. 6 Graphs of strain along beam length of 0.3mm thick.

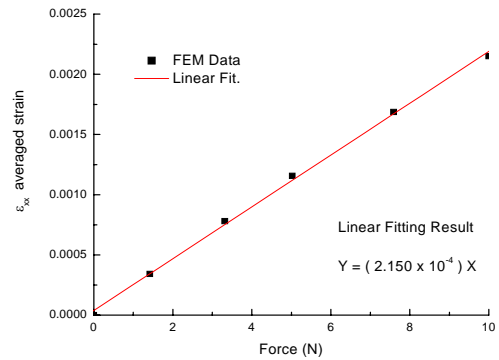


Fig. 7 Relation between force and averaged strain of 0.3mm thick.

분포에서도 최대 광세기를 가지는 브래그 파장은 변형률 ϵ_{xx} 의 평균값에 해당하는 거동을 보일 것이라는 가정을 하였다. 1.5 N , 3 N, 5 N, 7.5 N, 10 N 에 해당하는 평균 변형률을 그래프로 도시하면 Fig. 7과 같다. 하중 F 과 평균 변형률 $\epsilon_{xx}^{0.3t}$ 간의 관계를 구할 수 있는데, 이는 식(6)과 같다.

$$\epsilon_{xx}^{0.3t} = (2.150 \times 10^{-4}) \cdot F \quad (6)$$

식(6)은 두께 0.3 mm 센서의 하중과 변형률 간의 수치해석으로 구한 민감도라 할 수 있다. 유한 요소 해석에 따라 0.3 mm 두께 센서를 가공하여 센서 상단에 브래그 격자 광섬유를 5분 경화 에폭시 접착제를 발라 고정시켰으며, Fig. 8(b)는 최종 완성 후 모습이다.

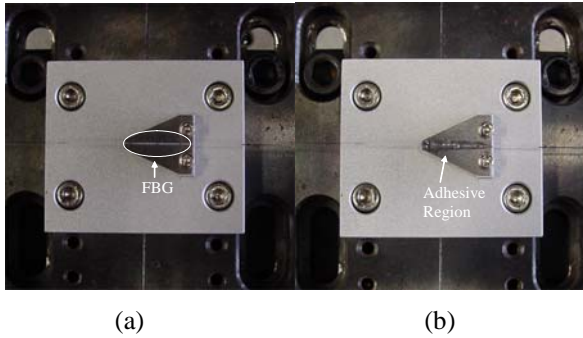


Fig. 8 Aligned FBG on the block before adhesion (a) and after adhesion(b).

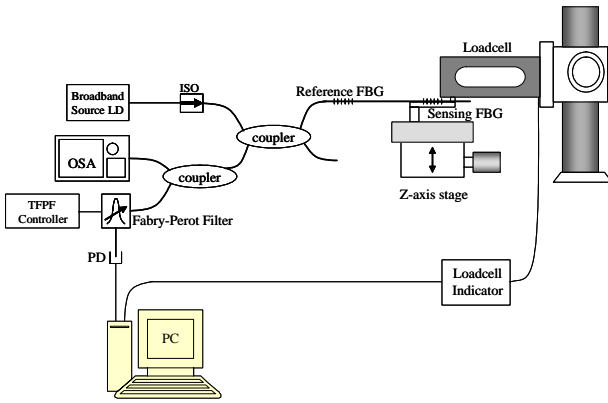


Fig. 9 Schematic Diagram of experiment and data acquisition. (ISO: isolator, PD: photo detector)

4. 실험

4.1 실험 장치

제작된 센서의 민감도 및 분해능을 측정하기 위하여 Fig. 9와 같은 실험 장치가 이용되었다. 광원에서 입사된 빛은 브래그 격자를 투과하고, 브래그 격자에 의해 반사된 광은 커플러를 통하여 광 파장 분석기(OSA) 및 가변 패브리-페롯 필터(TFPF)로 입력된다. 센서에 가해지는 변위는 Z 축 스테이지에 의해서 조절이 가능하며, 각 변위에 대한 하중은 센서에 접촉된 로드셀에 의해서 측정되고, 각 변위에 대한 브래그 파장 이동(shift)는 OSA 및 TFPF를 통하여 측정된다. 센서에 가해지는 변위를 0.01 mm 단위로 증가하면서 각 변위에 대한 하중 및 브래그 파장 변이를 측정하였다. C+L band의 광원이 사용되었으며, 광의 역전파 방지를 위해 광 단로기(isolator)가 사용되었다. 최대하중용량 1 kgf, 하중 분해능 0.002

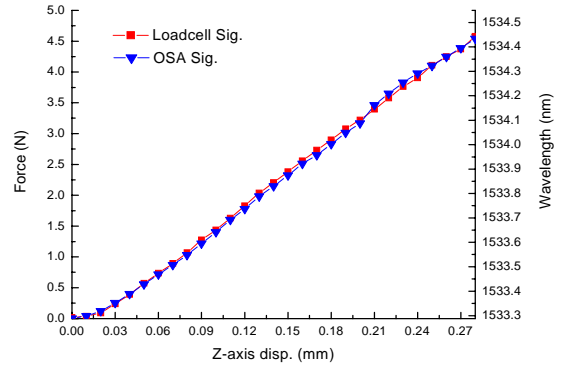


Fig. 10 Loadcell and OSA signal by increasing Z-axis displacement of 0.3mm thick sensor.

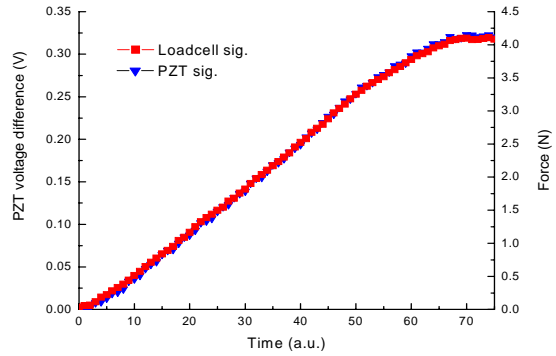


Fig. 11 Loadcell and TFPF signal by increasing Z-axis displacement of 0.3mm thick sensor.

N 인 로드셀을 사용하였다.

4.2 실험 결과

로드셀 및 OSA를 통해 측정된 하중 및 브래그 파장 변위는 Fig. 10과 같다. 실험 결과 식(8)과 같은 하중 F 와 브래그 파장 이동치 λ 와의 관계식을 얻었다.

$$\lambda_{0.3t} = 0.2535F - 0.0076 \quad (8)$$

민감도는 0.253 nm/N 이며, OSA의 최고 분해능이 0.01 nm 이고, 분해능은 0.01/0.253 이므로, 0.039N 을 가진다. Chirping 현상은 뚜렷이 나타나지 않았다. TFPF로 측정된 결과는 Fig. 11과 같다. 필터를 구동시키는 PZT(Piezoelectric) 간극에 인가하는 전압의 변화가 브래그 격자 피크 이동치인데, 온도 보상을 위해 Reference 브래그 격자

와 Sensing 브래그 격자에 해당하는 전압 차이 V 와 하중 F 간의 관계식은 식(9)와 같다.

$$V = 0.0796F - 0.0044 \quad (9)$$

잡음크기는 0.009 V 이고, 민감도는 0.0796 V/N 을 가지며, 분해능은 0.009/0.0796 이므로, 0.1130 N 을 가진다.

5. 결 론

본 연구에서는 브래그 격자를 이용하여 촉각 힘 센서를 제작하였다. 센서는 외팔 보 형태의 구조를 사용하였으며, 보의 치수는 이론적 해석 및 유한 요소 해석을 통하여 결정하였다. 정적 하중을 인가해주는 실험 장치를 구성하여 브래그 파장 피크의 이동을 OSA와 TFPF로 측정하였다. 0.01 nm의 분해능을 가지는 OSA와 0.009V의 노이즈두께를 가지는 TFPF를 사용하였다. 센서를 OSA로 측정한 결과 0.2535 nm/N 의 민감도와 0.0395 N 분해능을 가진다. TFPF로 측정한 결과 0.0796 V/N 의 민감도를 가지며 0.1130 N 의 분해능을 얻었다. 광섬유 브래그 격자를 이용하여 촉각 센서를 제작한 결과, 매우 높은 분해능을 가지는 힘 센서제작이 가능하였다. 길이가 작은 브래그 격자를 사용하면 더 좋은 공간분해능을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 인간기능 생활지원 지능로봇 기술개발사업단의 연구비 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M.H. Lee, H.R. Nicholls, 1999, "Tactile sensing for mechatronics-a state of the art survey", *Mechatronics*, 1-31.
- (2) J.G. Winger, K.M. Lee, 1988, "Experimental Investigation of a Tactile Sensor Based on Bending Losses in Fiber Optics", *Robotics and*

Automation, Proceeding of IEEE, pp.754-759.

- (3) D. T. Jenstrom, Chin-Lin Chen, 1989, "A Fiber Optic Microbend Tactile Sensor Array", *Sensors and Actuators*, vol. 20, pp. 239-248.
- (4) O.Tohyama, S. Maeda, H. Itoh, 1999, "Fiber-Optic Tactile Microsensor for Detecting the Position of the Tip of a Fiberscope", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 115-118.
- (5) K.O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki, 1978, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication", *Appl. Phys. Lett.* 32 647-649.
- (6) Meng-Chou Wu, R.S. Rogowski, K.K. Tedjojuwono, 2002, "Fabrication of Extremely Short Length Fiber Bragg Gratings for Sensor Applications", *Sensors, Proceeding of IEEE*, vol. 1, pp. 49-55.