

## 일체형 구조를 갖는 1축 광학 토크 센서 개발

# Development of a Single-Joint Optical Torque Sensor with One Body Structure

구 광 민, 장 평 훈\*

(Gwang Min Gu<sup>1</sup> and Pyung Hun Chang<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology

**Abstract:** This paper proposes a single-joint optical torque sensor with one body structure. Conventional optical torque sensors consist of three parts, two plates and an elastic structure. They have slightly slipping problem between plates and elastic structure due to the manufacturing tolerance. Since the order of measurement range of optical sensor is about ten micrometers, the slipping problem causes large measurement error, especially in the case of vibrational or high speed plant. This problem does not occur in the proposed design due to the one body structure. The proposed sensor has advantage of low cost, light weight, and small size. And it is easy to design and manufacture. Simulation works that analysis of stress and strain are performed accurately. To demonstrate the performance of proposed sensor, experiments were implemented to compare with a commercial force/torque sensor (ATI Mini45).

**Keywords:** optical, torque sensor, force sensor, one body structure, low cost, easy to design, easy to manufacture

### I. 서론

일상생활 속에서 사람과 접촉하는 다양한 종류의 서비스 로봇들이 점차 많이 등장하고 있다. 이에 따라 서비스 로봇을 개발함에 있어서 사람과의 상호작용 구현과 안전성 보장을 위해 힘-피드백(force feedback) 방법이 널리 사용되고 있다 [1]. 로봇 시스템에서 힘-피드백을 구현하기 위해 힘/토크센서를 필요로 하는데 관절에 삽입된 토크센서를 통해 환경과의 접촉을 감지할 수 있고 환경과 컴플라이언스(compliance)를 구현할 수 있는 임피던스 제어[2] 등 다양한 제어법칙들을 적용할 수 있다. 각 관절에 토크센서가 삽입된 대표적인 로봇으로 독일 DLR의 JUSTIN [3]과 한국 KAIST의 HUBO [4] 등이 있다. JUSTIN과 HUBO는 사람과 악수를 할 때 사람의 움직임에 따라 상호움직임을 구현할 수 있다.

로봇의 관절에 삽입되는 토크센서는 구동축과 피동축 사이에 연결되는 비회전형 방식(reaction type)이다. 이 때 토크센서는 로봇의 동적(dynamic) 성능을 떨어트리지 않고 액추에이터의 동력을 잘 전달해야하며, 노이즈에 민감하지 않고 관절에 작용하는 토크를 정확하게 측정할 수 있어야 한다[5]. 이를 위해 측정방향으로만 비틀림이 잘 발생해야 하며 다른 방향으로의 변형률이 적어야 한다. 다른 방향으로의 변형은 오차 요인으로 작용할 수 있기 때문이다.

힘/토크를 측정하기 위한 많은 종류의 상용센서가 존재한다. 일반적인 토크센서의 원리는 토크에 비례하여 비틀리는 비틀림 구조물인 탄성체(elastic structure)를 설계하고 그 비틀림 양을 측정하는 것이다. 이 측정 방식 중에 스트레인게이지 방식이 가장 많이 보급되어 있는데 스트레인게이지 방식은 직진성(linearity)이 높고 정밀하지만 노이즈에 민감하고 출

력신호 값이 작아서 센서 외에 별도의 증폭장치(amplifier)를 함께 사용해야만 한다. 또한 스트레인게이지 방식은 탄성체에 스트레인게이지를 부착하여 측정하기 때문에 토크가 부하될 때마다 하중이 스트레인게이지에 직접적으로 전달된다. 즉, 스트레인게이지에도 피로(fatigue)가 누적되게 되며, 큰 토크가 부하될 때 스트레인게이지의 변형범위를 초과하여 스트레인게이지가 손상될 우려가 있다. 따라서 이를 방지하기 위한 추가의 하드웨어적 멈춤(stopper) 구조 설계가 필요하다. 이런 점을 모두 고려하여 제작된 상용센서는 고가이고, 1축 토크센서임에도 불구하고 크기가 크다.

이런 상용센서의 경제적 부담과 사용적 불편함을 해소하기 위한 많은 연구들이 진행되어왔고 일본에서 광센서를 활용한 광학토크센서를 제안하여 임피던스 제어를 수행한 내용을 보고한 바 있다[6]. 광센서는 쉽게 구할 수 있고 가격이 저렴하며 별도의 증폭장치 없이 바로 출력신호를 얻을 수 있다. 또한 광센서에 하중이 직접적으로 작용하지 않고 광센서와 광센서의 감지부를 가로막는 인터럽터(interrupter)의 상대적 위치를 비접촉식으로 측정하기 때문에 피로에 대한 문제와 과도한 토크에 의한 광센서의 손상에 대한 문제가 없다.

이러한 장점을 바탕으로[6] 연구에서는 두개의 판(plate)과 탄성체로 이루어진 센서 구조를 제안하였다. 광센서와 인터럽터가 두 개의 판에 각각 부착되고 각각의 판과 탄성체는 볼트로 조립되게 된다. 외력 토크가 발생할 때 볼트로 조립된 각각의 판과 탄성체 사이에는 볼트와 홀의 가공 오차 등으로 인한 미소의 미끄러짐 현상이 발생한다. 광센서의 선형 구간은 수십 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ) 수준이기 때문에 이런 미끄러짐은 큰 오차요인으로 작용할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 광학토크센서의 장점을 모두 수용하고 단점을 개선하는 센서를 제안하고자 한다. 제안하는 센서는 상용센서의 경제적 부담을 줄일 수 있으며 기존 광학토크센서의 미끄러짐 유발을 방지할 수 있는 일체형 구조로 설

\* 책임저자(Corresponding Author)

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

구광민, 장평훈: KAIST 기계공학과

(friendgoos@kaist.ac.kr/phchang@kaist.ac.kr)

계 되었다. 또한 사용자가 쉽게 설계할 수 있도록 센서의 구조를 단순화 하고 조립 구성품을 최소화하였다. 제안하는 센서는 일체형 구조의 탄성체와 탄성체의 비틀림을 측정하는 광센서 및 인터럽터로 구성된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 센서의 구조에 대해 설명하고 시뮬레이션을 통해 설계된 센서의 적합성을 판단한다. III 장에서는 설계된 센서를 바탕으로 가공된 센서를 교정(calibration)하는 방법에 대해 설명하고, IV 장에서 최종적으로 설계된 센서와 상용센서의 측정값을 비교하여 제안하는 센서의 사양을 요약하며 향후 전망에 대해 논한다.

**II. 센서 구조 설계**

토크센서의 구조는 탄성체와 탄성체의 비틀림을 측정하는 측정 관련 부분으로 나뉜다.

**1. 탄성체 부분**

지금까지 토크센서분야에서 탄성체의 형상은 다양하게 제안되어 왔다[7]. 원통형 타입의 탄성체가 가장 간단하고 가공하기가 쉽기 때문에 원통형 타입의 탄성체를 이용한다.

[6] 논문에서는 그림 1에서와 같이 센서의 구조를 판-탄성체-판으로 구성하여 각각의 파트를 볼트를 이용해 조립하는 형태로 설계하였다. 이렇게 각각 분리하여 가공하고 조립할 경우 다양한 형상의 탄성체를 설계할 수 있지만 볼트와 홀의 가공오차 등으로 인해 조립한 후에 각각의 파트 사이에 상대적인 미끄러짐 현상을 피할 수 없다. 또한 반복적인 토크가 가해질 때 볼트에 지속적인 피로가 누적되게 되어 센서의 강성이 약해지고 동력 전달 특성이 떨어질 우려가 생긴다. 따라서 이를 분리하지 않고 그림 1의 광학토크센서 기본 구성품인 판-탄성체-판을 한 개의 부품으로 가공한다면 볼트 체결시 발생하는 상대적인 미끄러짐 현상을 방지할 수 있으며 동적 특성이 좋아지게 되어 고속으로 운행하는 응용분야에서도 보다 안정적인 성능을 보장할 수 있다.

토크센서를 설계할 때는 먼저 설계하고자 하는 센서의 측정 용량(capacity,  $\tau d$ )을 선정하고 이를 구현하기 위한 탄성체의 탄성계수(stiffness,  $k$ )를 결정해야 한다. 센서 용량을  $\tau d$  라 하면  $-\tau d$  에서  $+\tau d$  까지의 값을 측정할 수 있어야 한다. 광센서로 측정할 수 있는 최대 변위가  $50\mu\text{m}$ 이기 때문에  $+\tau d$  가 가해졌을 때  $25\mu\text{m}(=50\mu\text{m}/2)$ 의 변형이 광센서가 위치할 곳에서 발생하도록 설계하면 된다.

탄성체의 탄성계수에 영향을 주는 변수들이 탄성체의 설계 변수(design variable)가 되는데 탄성체의 재질과 탄성체의 형상과 관련된 변수들로 분류할 수 있다. 탄성체 재질에 따라 영률(Young's modulus)이 작을수록 작은 탄성계수를 갖게 된다. 따라서 용량이 큰 토크센서(100Nm이상)에는 영률이 큰 철 합금(steel alloy) 재질을 사용하고 용량이 작은(100Nm 이하) 토크센서에는 알루미늄 합금(aluminum alloy) 재질을 사용한다. 그림 2에 표시된 일체형 광학토크센서의 탄성체 형상과 관련된 설계 변수는 탄성체의 지름( $d_1$ ), 판의 지름( $d_2$ ), 탄성체 높이( $h_1$ ), 판의 높이( $h_2$ ), 그리고 판에 위치하는 홀의 지름과 개수이다. 하지만 대부분의 토크센서 응용사례에서 토크센서와 취부될 부분의 형상이 정해져 있기 때문에 그에 따라 홀의 지름과 수는 결정되고 판의 지름( $d_2$ ) 또한 취부 될 부분에 따라 정해지게 된다. 즉 실질적인 설계 변수는  $d_1$ 과

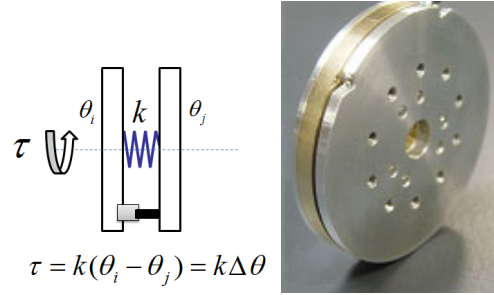


그림 1. 광학토크센서의 기본 구성.  
Fig. 1. General construction of optical torque sensor.

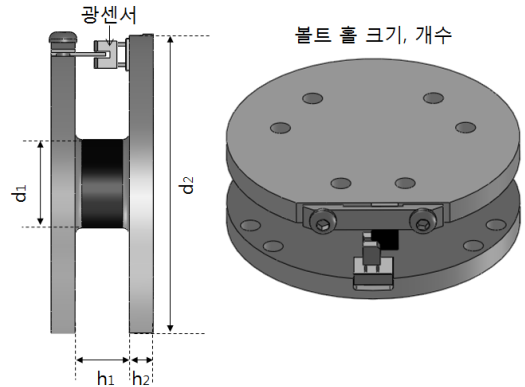


그림 2. 일체형 탄성체의 설계 변수.  
Fig. 2. Design variables of the proposed sensor.

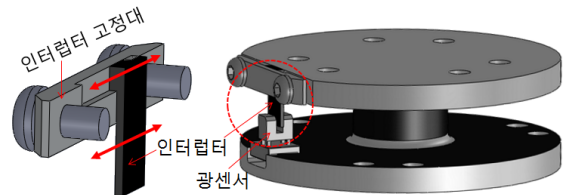


그림 3. 인터럽터와 인터럽터 고정대.  
Fig. 3. The interrupter and interrupter mount.

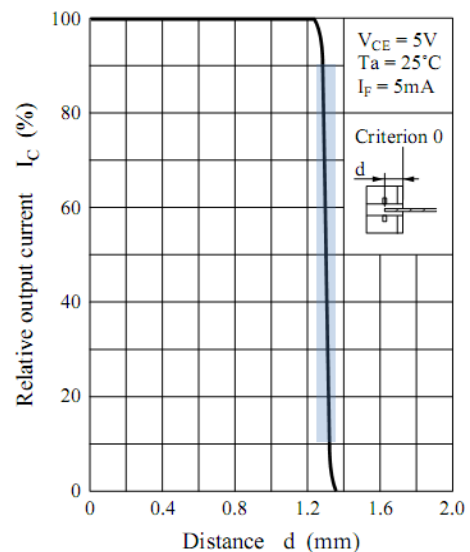


그림 4. 인터럽터 위치에 따른 광센서의 출력.  
Fig. 4. Output of an optical sensor with the position of interrupter.

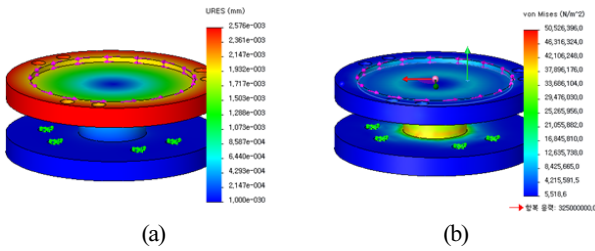


그림 5. FEM을 통한 변형률, 응력 해석.  
Fig. 5. Strain and stress analysis using FEM.

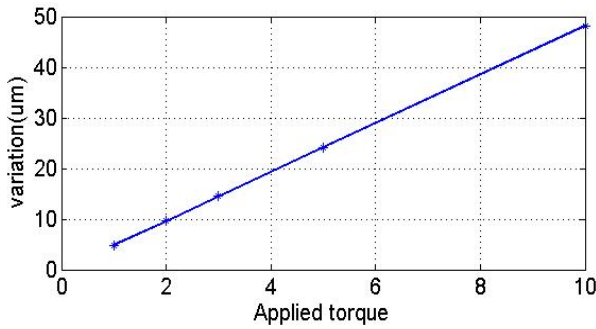


그림 6. 탄성체의 탄성변형 그래프.  
Fig. 6. The graph of elastic strain-applied torque.

$h1$ 이다.  $d1$ 이 클수록, 그리고  $h1$ 이 작을수록 큰 탄성계수를 갖게 된다.

탄성체의 탄성계수는 FEM 해석을 통해 확인한다. 설계 변수들과 탄성계수의 상관관계를 앞에서 논하였으므로 그 관계를 이용하여 적합한 탄성계수를 갖는 설계 변수를 선정해야 한다. 시뮬레이션을 통해 설계 목표에 부합하는지 확인해야 할 사항은 변형률과 항복응력이다. SolidWorks 2010 Simulation을 이용하여 FEM을 수행하였다. 앞서 언급한 것과 같이  $+\tau$ 가 가해졌을 때  $25\mu\text{m}$  이하의 변형이 발생해야 하며  $-\tau d \sim +\tau d$  구간에서 탄성변형이 일어나야 한다(그림 5(a)). 그림 5(b)를 통해 항복응력을 벗어나서 영구변형이 일어나게 된다면 설계 변수를 조절해서 센서 용량 범위안에서 탄성변형구간이 되도록 설계해야 한다. 그림 6은 센서 용량이 5Nm가 되도록 설계한 센서에 대한 탄성변형 그래프로 5Nm에서 판의 모서리에서 약  $24\mu\text{m}$ 의 변형이 발생함을 확인할 수 있고, 10Nm까지도 탄성변형 하는 것을 확인할 수 있다.

2. 측정 관련 부분

측정 관련 부분은 탄성체의 비틀림 정도에 따라 광센서의 감지부를 가로막는 인터럽터와 이 비틀림 양을 측정하는 광센서로 구성된다.

인터럽터는 가공하기 쉬운 알루미늄으로 설계하였다. 광센서의 감지부를 가로막는 인터럽터의 면적에 비례하는 출력 전압을 광센서에서부터 얻을 수 있기 때문에, 인터럽터는 직사각형 구조로 정밀하게 가공 되어야 한다. 그림 3과 같이 인터럽터는 좌우로 움직일 수 있는 구조로 설계하여 선형구간 중심에 위치시킨 후 볼트로 고정한다.

광센서는 시중에서 판매되고 있는 상용품을 고려하였다. 모델명은 CNA1311K Photo Interrupter(Panasonic) [8]이고, 크기는  $2.6 \times 4.0 \times 3.3\text{mm}$  이며 최대 측정 범위는  $50\mu\text{m}$  이다. 그림 4

표 1. 일체형 광학토크센서 구성 파트.

Table1. Parts of proposed sensor.

파트번호	품명	3D CAD model
1	탄성체	
2	인터럽터	
3	인터럽터 고정대	

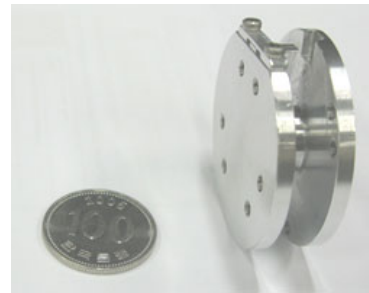


그림 7. 가공된 일체형 광학토크센서.  
Fig. 7. Manufactured optical torque sensor.

와 같이 광센서의 중심에서부터 좌우로 약  $25\mu\text{m}$ 구간에서 선형구간이 존재한다. 이 구간에서는 인터럽터의 위치에 따라 광센서의 출력신호가 선형관계를 갖게 된다(그림 4의 음영부분).

센서의 구조 설계를 통해 가공이 필요한 총 파트는 3개로 표 1에 정리하였다. 설계 목표를 만족하는 설계 변수를 확인하였으면 시뮬레이션 수행에서 선택한 탄성체의 재질과 동일한 재질로 가공탄성체를 가공한다. 가공된 센서는 그림 7과 같다.

III. 센서 교정 및 결과

가공된 탄성체에 광센서를 배선하여 배치한 후 인터럽터를 광센서의 선형구간 중심에 배치하여야 한다. 오실로스코프나 ADC (Analog to Digital Converter)를 이용하여 출력값을 확인하며 정확히 중심에 위치시켜야 한다. 광센서는 인터럽터가 가로막지 않았을 때 그림 4와 같이 출력전압이 약 3.6V (high)로 출력되고 모두 가로막았을 때 0V(low)로 출력되는데 정확히 중심인 1.8V에 위치하게 하여  $\pm$ 토크가 가해졌을 때 그에 해당하는 전압이 출력되어야 한다.

세팅한 광학토크센서를 교정하기 위해서 상용센서를 이용해야 한다. 상용센서는 Mini45 (ATI 6축 토크센서, 2방향 토크 용량 20Nm) [9]를 이용하였다. 광학토크센서와 Mini45를 그림 8과 같이 직렬로 연결하고 토크를 가하면 동일한 토크가 각각의 센서에 걸리게 된다. 이 때 그림 9의 결과처럼 광학토크센서에서는 전압(V)가 출력되고 Mini45에서는 토크값( $\tau$ )이 출력된다. 따라서 이 값의 관계를 추정하여야 한다.

$$\tau = aV + b \tag{1}$$

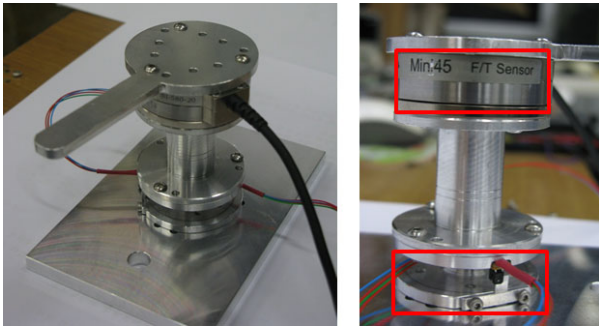


그림 8. 광학토크센서 교정을 위한 테스트 베드.  
Fig. 8. Test bed for calibration of the proposed sensor.

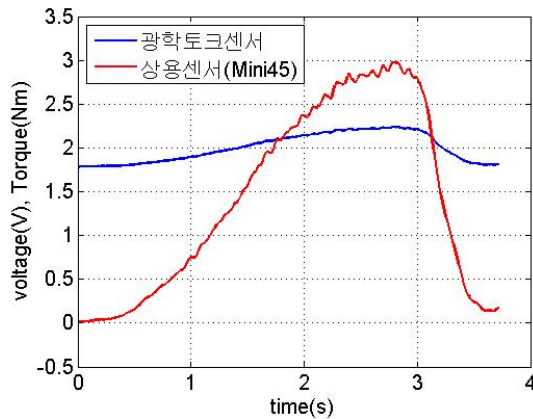


그림 9. 광학토크센서의 출력전압과 상용센서의 토크.  
Fig. 9. Output voltage and torque value of each sensors.

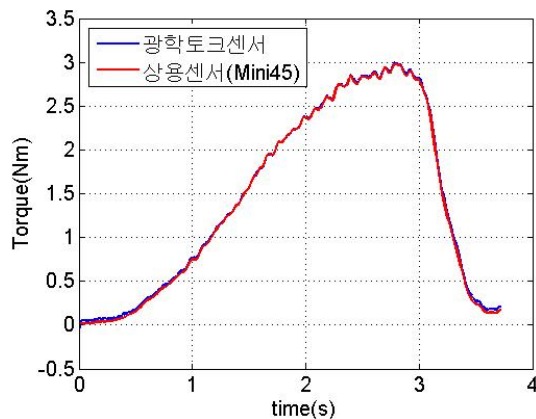


그림 10. 센서 교정 후 광학토크센서의 추정값 비교.  
Fig. 10. Comparison between the proposed and commercial sensor after calibration.

(1)과 같이 전압과 토크가 선형관계라고 가정하고 최소자승법(least square method)을 이용하여 ADC로 측정된 출력전압 V와 상용센서로 측정된 토크  $\tau_{Mini45}$ 를 이용하여 각 계수를 추정한다. 여러 번 반복하여 a, b값을 구하고 (1)을 이용해 실제 토크값을 추정할 수 있다.

**IV. 결론 및 추후 과제**

10차례 실험을 수행하여 a, b값의 평균값을 구한 결과 a=6.534, b=-11.641을 얻을 수 있었다. 이 값을 이용하여 (1)

로 추정된 토크값은 Mini45의 측정값과 일치함을 확인할 수 있었다(그림 10). 측정값과 추정값의 RMS오차는 0.0016Nm이며 전압과 토크사이의 관계식 (1)에서 기울기에 해당하는 a값(6.534)을 바탕으로 0.4%의 직진성을 갖는 것을 확인하였다. (직진성: a값의 평균에 대한 각 시행시 구한 a값의 평균오차로 정의함) 이는 스트레인게이지방식의 상용센서와 근사한 수준이다. 또한 그림 9, 10의 2~3초구간의 진동까지도 정확하게 추정하여 빠른 속도로 움직이는 응용분야에서도 일체형 구조를 갖는 광학토크센서는 상용센서를 대체할 만한 성능을 나타내었다.

상용센서의 경우 가격이 고가이며 규격도 크기 때문에 산업용 로봇이 아닌 의료 로봇 등의 다양한 서비스 로봇에 적용하기에는 많은 한계점을 가지고 있다. 본 논문에서 제안하는 일체형 토크센서는 구조가 간단하여 d1, h1 두개의 설계 변수만을 이용하여 사용자가 원하는 용량과 크기로 맞춤형 설계를 수행할 수 있고 가공성도 좋다. 또한 광센서는 시중에서 저가에 구매가 가능하며 별도의 증폭장치 없이 사용할 수 있기 때문에 저가형 토크센서를 구현할 수 있다는 장점을 갖는다.

현재 제안된 광학토크센서의 교정작업을 수행하기 위해서는 상용센서가 꼭 필요하다. 상용센서가 없어도 센서를 교정할 수 있게 하기 위해서는 탄성체의 탄성계수를 II 장에서 언급한 설계 변수와 관련된 식으로 표현하는 것이 필요하다. 설계 변수와 탄성계수 사이의 관계식이 구해진다면 광학토크센서를 보다 효율적으로 설계 및 활용할 수 있을 것이다.

**참고문헌**

- [1] D. E. Whitney, "Historical perspective and state of the art in robot force control," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 6, no. 1, pp. 3-14, Mar. 1987.
- [2] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation," *Proc. of American Control Conference*, San Diego, CA, USA, pp. 304-313, Jun. 1984.
- [3] T. Wimbock, C. Ott, and G. Hirzinger, "Impedance behaviors for two-handed manipulation: Design and experiments," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, pp. 4182-4189, Apr. 2007.
- [4] I. W. Park, J. Y. Kim, J. Lee, and J. H. Oh, "Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3: HUBO," *Proc. of 5th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 321-326, 2005.
- [5] D. Vischer and O. Khatib, "Design and development of high-performance torque-controlled joints," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 4, pp. 537-544, Aug. 1995.
- [6] D. Tsetserukou, R. Tadakuma, H. Kajimoto, and S. Tachi, "Optical torque sensors for implementation of local impedance control of the arm of humanoid robot," *Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, pp. 1674-1679, May 2006.
- [7] F. Aghili, M. Buehler, and J. M. Hollerbach, "Design of a hollow hexaform torque sensor for robot joints," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 12, pp. 967-976, Dec. 2001.
- [8] <http://www.alldatasheet.com>, "CNA1311K".
- [9] <http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>, "Mini 45".



### 구 광 민

2008년 KAIST 기계공학과 졸업. 현재 KAIST 기계공학과 석·박사 통합과장. 관심분야는 재활 로봇, 로봇 설계 및 제어, 토크센서 설계.



### 장 평 훈

1974년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1977년 서울대학교 기계공학과 석사. 1987년 MIT 기계공학과 박사. 현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 비선형 강인 제어기, 임피던스 제어, 여유 자유도 로봇 제어.