

광학 토크 센서 설계 및 재활 로봇에의 응용 Design of an optical torque sensor and its application to rehabilitation robot

*구광민¹, #김정¹

*G.M. Gu¹, #J. Kim¹

¹한국과학기술원 기계공학과

Key words : Optical torque sensor, one-body structure, low cost, home-based rehabilitation robotic systems

1. 서론

재활 치료에 있어서 치료 강도(intensity)는 치료 효과에 영향이 있다고 알려져 있다[1]. 환자들이 집에서 충분한 치료를 받게 된다면 환자의 회복 속도에 큰 향상을 기대할 수 있다. 재택치료를 위해 상용화된 재활 로봇은

- 환자들이 스스로 사용하기에 편리해야 한다.
- 치료사의 도움 없는 환경인 집에서 사용하더라도 안전해야 한다.
- 치료사에 의한 외래진료의 치료비와 비교했을 때 가격 경쟁력을 갖추어야 한다.

치료사의 노동력 감소와 환자의 치료비 부담에 대한 요구 조건을 만족시키기 위한 로봇 시스템 개발을 위해서는 저렴한 힘/토크 센서 개발이 필수적이다.

힘 피드백 방법은 재활 로봇에서 안정성을 확보하기 위해 널리 사용되는 방법이다[2]. 민감도(Sensitivity) 특성이 좋은 스트레인 게이지 타입의 센서가 많이 사용되고 있는데, 이 타입 센서는 노이즈에 민감하고 신호 레벨(signal level)이 작기 때문에 증폭기와 항상 함께 사용해야 한다[3]. 또한 설계 과정에서 고려해야 할 복잡한 구조 설계로 인해 그 크기가 크고 가격도 고가이기 때문에 재활 로봇에 적용하기에 많은 어려움이 있다

토크 센서의 가격을 줄이기 위해 광학 토크 센서가 제안되었다[4]. 이 센서의 경우 세 개의 파트로 나뉘어져 있는데 각 파트는 최종적으로 볼트로 조립되는 구조를 갖는다. 가공 오차를 고려하면 이렇게 설계된 각 파트는 토크가 부하될 때 미세한 각 파트끼리의 미세한 미끄러짐 현상을 유발할 수 있다. 광센서의 측정범위가 마이크로미터(μm) 수준이므로 작은 미끄러짐 현상은 큰 측정오차를 유발하게 된다.

따라서 본 논문에서는 광학토크센서의 장점을

수용하고 단점을 개선하는 센서를 제안하고자 한다. 제안하는 센서는 상용센서의 경제적 부담을 줄일 수 있으며 기존 광학토크센서의 미끄러짐 유발을 방지할 수 있는 일체형 구조로 설계 되었다. 또한 사용자가 쉽게 설계할 수 있도록 센서의 구조를 단순화 하고 조립 구성품을 최소화하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 센서의 구조에 대해 설명하고, 센서 적합성 판단을 위해 필요한 시뮬레이션에 대해 설명한다. 3절에서는 설계된 센서를 바탕으로 가공된 센서를 교정(calibration)하는 방법에 대해 설명하고, 실제 재활 로봇 적용 사례를 설명한다. 4절, 결론에서는 최종적으로 설계된 센서와 상용센서의 성능을 비교하여 제안하는 센서의 사양을 요약하며 향후 전망에 대해 논한다.

2. 센서 구조 설계

토크 센서의 구조는 탄성체와 탄성체의 비틀림 양을 측정하는 측정 부분으로 나뉜다.

1. 탄성체 부분

탄성체는 토크 센서에서 가장 핵심적인 부분이다. 측정하고자 하는 방향으로의 효과적인 변형률을 위해 다양한 형상이 제안되어왔다[5]. 이 형상 중에서 원통형 타입의 탄성체가 가장 가공하기 쉽기 때문에 원통형 타입의 탄성체를 이용한다.

탄성체를 설계한 후에는 정적해석 시뮬레이션을 통해 적합성을 판별해야 한다. 먼저 응력해석을 통해 설계하고자하는 센서 용량(capacity) 범위 안에서 항복응력을 초과되는 부분이 없어야 한다. 두 번째로는 변형률해석을 통해 탄성변형을 통해 가해지는 힘에 따라 선형적으로 변형률이 발생해야 한다. 이 두 가지 조건이 만족되지 않는다면 설계변수를 조절하여 다시 시뮬레이션을 수행하고 만족한다면 가공 단계로 넘어간다.

2. 측정 부분

측정부분은 광센서와 인터럽터로 구성된다. 광센서는 포토인터럽터(photo-interrupter)를 사용하며 탄성체의 한쪽 면에 부착하게 된다. 탄성체에 토크가 가해지게 되면 비틀림이 발생하게 되는데 이 비틀림 정도에 따라 부착된 인터럽터가 같이 움직이게 된다. 이 때 광센서를 가로막는 인터럽터의 면적에 따라 광센서의 출력전압이 달라지게되며 이 전압을 통해 토크 값을 추정할 수 있게 된다.

3. 센서 교정 및 사용

광센서 출력전압(V)은 인터럽터의 위치에 비례하고, 인터럽터의 위치변화(Δx)는 탄성체의 변형에 비례하도록 설계하였기 때문에 다음과 같은 비례관계가 성립한다.

$$V \propto \Delta x \propto T \tag{1}$$

따라서 센서에 가해진 토크(T)와 광센서의 전압을 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = aV + b \tag{2}$$

10차례의 실험을 통해 a, b값을 결정하는데 최소자승법으로 구하여 나온 값의 10회 평균값을 사용한다. 이렇게 교정된 토크 센서는 출력전압을 이용해 (2)식을 이용해 토크 값을 추정할 수 있다.

이를 검증하기 위해 Fig 1과 같이 손 재활로봇에 적용하여 임피던스 제어[6]를 수행하였다. 재활로봇은 환자와 직접 접촉하기 때문에 안정성을 위해 임피던스 제어와 같은 제어법칙들이 적용되고 있다. 임피던스 제어를 통해 환자의 손이 과도하게 굽혀지거나 펴지는 방지하여 통증이 유발되지 않도록 재활치료를 수행 할 수 있다.

4. 결론

측정값과 추정값의 RMS오차는 0.0016Nm이며 0.4%의 직진성(Linearity)을 갖는 것을 확인하였다. 이는 스트레인게이지방식의 상용센서와 비슷한 수준이다. 임피던스 제어를 수행할 때에도, 측정 오차가 발생했을 경우 나타날 수 있는 궤적 추종 오차 등의 문제없이 임피던스 제어가 잘 수행되었다. 또한 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 가지

고 있다. 본 논문에서 제안하는 일체형 토크센서는 구조가 간단하여 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 있다.

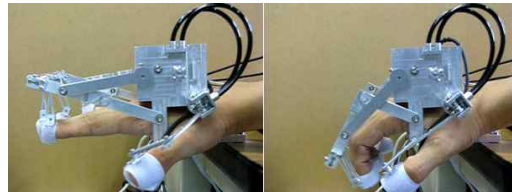


Fig. 1 Implementation of proposed sensor to hand rehabilitation robot.

참고문헌

1. G.Kwakkel, R.C.Wagenaar, T.W. Koelman, G.J.Lankhorst, J.C.Koetsier, "Effects of Intensity of Rehabilitation After Stroke: A Research Synthesis", Stroke, vol. 28, no. 8, August, 1997, pp. 1550 - 1556
2. D.E. Whitney, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", The International Journal of Robotics Research, vol. 6, no. 1, March, 1987, pp. 3 - 14.
3. D.Vischer and O.Khatib, "Design and Development of High-Performance Torque-Controlled Joints", in Proc. IEEE Transactions On Robotics And Automation, vol. 11, no. 4, August, 1995, pp. 537 - 544.
4. D.Tsetserukou, R.Tadakuma, H.Kajimoto and S.Tachi, "Optical Torque Sensors for Implementation of Local Impedance Control of the Arm of Humanoid Robot", in Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May, 2006, pp. 1674 - 1679.
5. 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, December, 2001, pp. 967 - 976.
6. N. Horgan, "Impedance control: An approach to manipulation", in Proc. of American Control Conference, San Diego, CA, USA, June, 1984, pp. 304 - 313