

보행장애 진단을 위한 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서

Fiber-optic Goniometer to Measure Knee Joint Angle for the Diagnosis of Gait Disturbance

김 선 근* · 신 상 훈* · 전 다 영* · 홍 승 환* · 심 혁 인* · 장 경 원* · 유 욱 재* · 이 봉 수†
(S. G. Kim · S. H. Shin · D. Jeon · S. H. Hong · H. I. Sim · K. W. Jang · W. J. Yoo · B. Lee)

Abstract - In this study, we developed a fiber-optic goniometer for the continuous measurement of knee joint angle which provides important medical information on Alzheimer's disease. The fiber-optic goniometer is composed of a light-emitting diode (LED), a plastic optical fiber (POF), and a voltage output photodiode (PD). As a sensing part of the fiber-optic goniometer, a unclad fiber with regular intervals of 1 mm was fabricated to improve efficiency of bending loss according to the angle variation of knee joint. The emitting light with a center wavelength of 470 nm from a LED is guided by a POF to the PD, the transmitted light is then attenuated by the bending loss inside the bent POF. The intensity variation of the light transmitted from the POF gives rise to a change in output voltage in the fiber-optic goniometer. Therefore, we measured the real-time output voltage of the proposed fiber-optic goniometer using the unclad fiber according to the knee joint angle. Through the repeated experiments, the fiber-optic goniometer shows that it has a reversibility and a wide measurable angle range.

Key Words : Fiber-optic sensor, Goniometer, Joint angle, Gait disturbance, Knee joint

1. 서 론

관절의 움직임은 측정하는 것은 질병의 진단 및 치료에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 특히 보행과 관련된 무릎관절의 각도변화를 측정하는 것은 보행장애를 대표적인 증상으로 갖는 퇴행성 뇌질환인 알츠하이머병(Alzheimer's disease)에 있어 조기진단에 유용하게 활용될 수 있다[1]. 또한 스포츠 운동에서의 기록단축 및 재활치료에서 환자의 회복 정도를 판단하는 중요한 기준이 될 수 있다[2],[3]. 이에 따라 관절각도 및 보행을 측정하고 비교 분석하는 연구 및 장치의 개발이 활발하게 이루어지고 있다[4-6]. 하지만 관절각도 및 보행 측정장비로 사용되는 기존의 의료용 측각도계(goniometer) 및 스트레인게이지(strain gauge), 3D-적외선 카메라 보행분석 시스템을 비롯한 보행 분석용 장치들의 경우, 측정자의 주관성, 한정된 측정공간과 같은 여러 단점을 가진다[7],[8]. 본 연구에서는 기존 측정장비의 단점을 보완하기 위하여, 높은 정확도를 가지고 실시간 모니터링이 가능한 광섬유(optical fiber) 기반의 무릎관절 각도센서를 제작한 뒤 성능평가를 수행하였다.

일반적으로 광섬유 기반의 물리 센서는 광 신호의 전송경로로서 유리나 플라스틱 재질의 광섬유를 사용하므로 특정

물리량을 측정하는데 있어서 전자기파의 간섭을 받지 않고, 부식이 되지 않는다. 또한 높은 유연성을 가지기 때문에 무릎관절의 움직임을 측정하는 센서로 활용하기에 적합하다. 무릎관절의 각도 측정을 위한 각도센서의 감지부(sensing part)로서 광섬유를 이용하기 위해서는 관절의 움직임에 따른 각도 변화에 의해 광섬유 내부에서 발생하는 거시적 벤딩 손실(macro bending loss)을 효율적으로 활용해야 한다.

그림 1은 광섬유의 굽힘에 따라 발생하는 벤딩 손실을 모식적으로 보여준다. 광섬유에 입사된 광 신호의 각도(θ)가 임계각(critical angle, θ_c)보다 클 경우, 광섬유 내부에서 전반사(total internal reflection)를 통해 광 계측장비로 전송된다. 하지만 광섬유가 구부러지게 되면 전송되던 광 신호의 각도(θ')가 임계각보다 작아지게 되고, 이에 따라 광 손실이 발생하게 된다. 여기서 임계각이란 광 신호의 굴절각

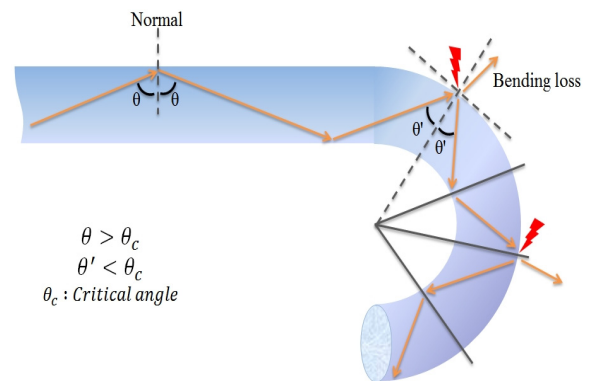


그림 1 구부러진 광섬유 내에서의 벤딩 손실
Fig. 1 Schematic diagram of the bending loss in a bent optical fiber

* School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, Chungju 380-701, South Korea

† Corresponding Author : Dept. of Biomedical Engineering, Konkuk University, South Korea.

E-mail : bslee@kku.ac.kr

Received : February 25, 2013; Accepted : May 12, 2013

(refraction angle, θ_r)이 90° 가 될 때의 입사각(incidence angle, θ_i)을 말하며, 코어(core)와 클래딩(cladding)의 굴절률(refractive index)이 각각 n_1 과 n_2 인 광섬유에서 임계각과 굴절률 사이의 관계는 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용하여 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{\sin\theta_r}{\sin\theta_i}, (\theta_r = 90^\circ) \quad (1)$$

$$\therefore \theta_i = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \theta_c$$

2. 본 론

2.1 실험 방법

무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서(fiber-optic goniometer)는 플라스틱 광섬유, 발광다이오드(light-emitting diode, LED), 포토다이오드(photodiode, PD), 신호수집장치(data acquisition board, DAQ board) 및 컴퓨터 디스플레이 장치로 구성된다. 먼저 광섬유 각도센서의 광원으로 사용하기에 적합한 LED를 선별하기 위하여 470, 530, 660, 870 nm의 파장을 가지는 4종류의 광섬유용 LED(IF-series, Industrial Fiber Optics)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 광섬유용 LED는 광섬유와의 결합이 용이하도록 커넥터 처리가 되어 있고, 내부에 위치한 플라스틱 렌즈를 통해 광원부로부터 발생된 빛을 광섬유 내로 효율적으로 전달할 수 있다는 장점을 가진다.

일반적으로 플라스틱 광섬유는 유리 광섬유보다 내구성이 강하고, 유연하다는 장점을 가진다. 따라서 LED로부터 발생한 빛의 전송 및 감지부로서의 역할을 동시에 수행하는 광섬유로는 계단형 굴절률(step-index)을 가지는 1 mm 직경의 멀티모드(multi-mode) 플라스틱 광섬유(GH4001, Mitsubishi Rayon)를 사용하였다. 플라스틱 광섬유의 코어 직경은 0.98 mm, 클래딩을 포함한 외경은 1.0 mm이며 최소 곡률반경(bending radius)은 25 mm이다. 본 연구에서 사용한 광섬유의 코어는 1.490의 굴절률을 가지는 폴리메틸메타크릴레이트(polymethyl-methacrylate, PMMA)이고, 클래딩은 1.402의 굴절률을 가지는 불소중합체(fluorinated polymer)로 구성되므로 광섬유의 개구수(numerical aperture, NA)는 0.504이다.

플라스틱 광섬유를 통해 전송된 광 신호의 측정을 위하여 사용한 PD(GDET257, KAOS)는 가시광선 및 근적외선 영역의 빛을 감지할 수 있고, 입사되는 광 신호의 광 강도(light intensity)에 비례하는 출력전압을 가진다. PD는 2.7~5.5 V의 낮은 구동전압으로 작동하고, rail-to-rail 출력으로 입력 전압을 모두 출력전압으로 사용할 수 있다. 또한 1 kHz에서 200 μ Vrms의 낮은 노이즈를 가지며, 35 dB의 높은 전원신호에 대한 제거비(power supply rejection ratio, PSRR)를 갖는다.

본 연구에서는 관절의 움직임에 따른 각도 변화에 의해 광섬유 내부에서 발생하는 벤딩 손실의 효율을 높이기 위하여 감지부가 되는 플라스틱 광섬유의 클래딩을 일정한 간격으로 제거하였다. 그림 2는 플라스틱 광섬유의 클래딩을 1

mm 간격으로 제거하여 제작한 광섬유 각도센서의 감지부의 구조를 보여준다. 광섬유 각도센서에 사용된 플라스틱 광섬유의 전체길이는 30 cm이고, 클래딩이 제거된 감지부의 길이는 15 cm이다. 클래딩이 제거되어 코어가 노출된 부분에서는 전반사가 발생되지 않으므로 감쇄율이 높아지게 되고, 광섬유의 구부림에 따른 벤딩 손실 역시 커지게 된다. 본 연구에서 개발한 클래딩이 일정하게 제거된 광섬유 각도센서는 일반적인 광섬유 기반 각도센서의 출력신호에 비하여 각도변화에 따른 출력신호의 변화가 큰 것으로 측정되었으며, 출력신호에 대한 비교결과는 결과 및 고찰부분에 나타내었다.

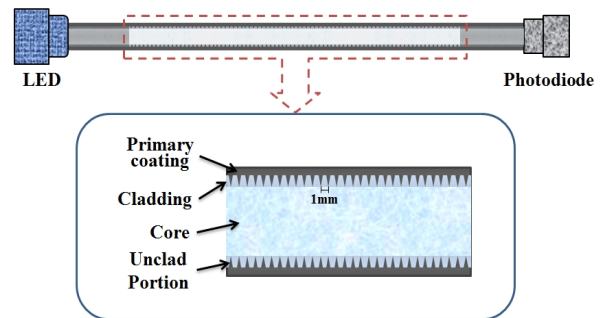


그림 2 클래딩을 일정한 간격으로 제거하여 제작한 광섬유의 구조

Fig. 2 Structure of the unclad portion of an optical fiber with regular intervals

그림 3은 제작된 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서의 구조를 보여준다. 광섬유 각도센서는 플라스틱 광섬유가 무릎관절의 움직임과 동시에 굽혀질 수 있도록 무릎밴드를 사용하여 설계 및 제작하였고, 광원부와 광 계측부가 되는 LED와 PD의 위치는 변하지 않도록 무릎밴드의 양단에 고정시켰다. 특히 PD에는 SMA(subminiature type A) 마운트를 부착시켜 SMA 905 커넥터로 처리된 플라스틱 광섬유의 끝단과 결합이 용이하도록 하였으며, 접합부에서의 광 손실 및 외부 가시광의 간섭을 최소화시켰다.

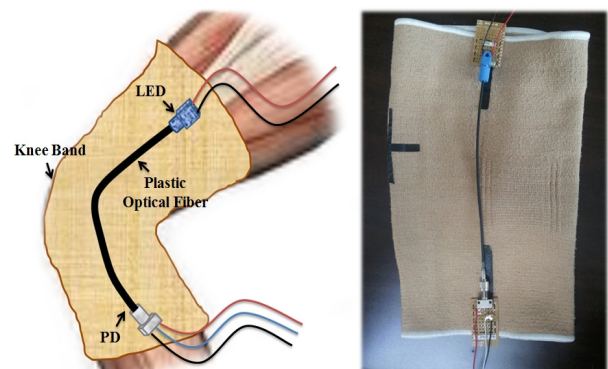


그림 3 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서의 구조

Fig. 3 Structure of a fabricated fiber-optic goniometer

그림 4는 각도 변화에 따른 광섬유 각도센서의 출력전압 변화를 측정하기 위한 전체 실험구성을 보여주며, 본 실험에서 곡률반경은 플라스틱 광섬유의 최소 곡률반경과 동일한 25 mm로 하였다. LED로부터 방출된 빛은 플라스틱 광섬유를 통해 PD로 전송되며, 이 때 광섬유의 굽힘 각도가 커질수록 벤딩 손실에 의해 전송되는 광 신호의 광 강도(light intensity)가 감소하게 되어 PD의 출력전압이 낮아지게 된다. PD로부터 출력된 전압신호는 신호수집장치(NI USB 6008, National Instruments)를 통해서 수집되고, 랩뷰(LabVIEW, National Instruments) 프로그램을 통하여 실시간 모니터링 및 저장된다. 실험에 사용한 신호수집장치는 LED와 PD에 안정된 전원을 공급할 수 있고, 이와 동시에 PD에서 출력되는 전압신호의 수집이 가능하다. 본 연구에서는 그림 4의 실험구성을 이용한 기초실험을 통해 플라스틱 광섬유의 굽힘 각도에 따른 출력신호를 측정 및 분석하였다. 또한 그림 2의 광섬유 각도센서가 부착된 무릎밴드를 피검자에게 착용시킨 뒤, 무릎관절의 반복적인 신전운동(extension exercise) 시 나타나는 광섬유 각도센서의 출력전압을 실시간 모니터링 하였다.

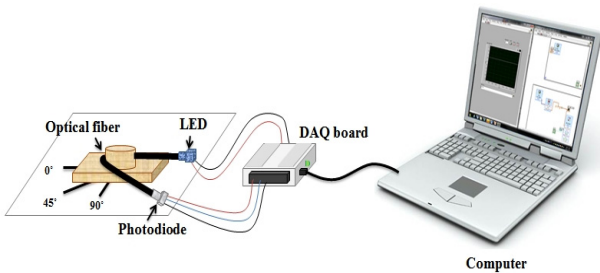


그림 4 광섬유 각도센서를 이용한 실험구성
 Fig. 4 Experimental setup for measuring angle variation using a fiber-optic goniometer

2.2 결과 및 고찰

본 연구에서는 광섬유 각도센서의 광원으로 사용하기에 적합한 LED를 선별하기 위해 470, 530, 660, 870 nm의 중심파장(center wavelength)을 가지는 4종류의 광섬유용 LED를 이용하여 그 특성을 비교하였다. 그림 5는 각 LED의 광

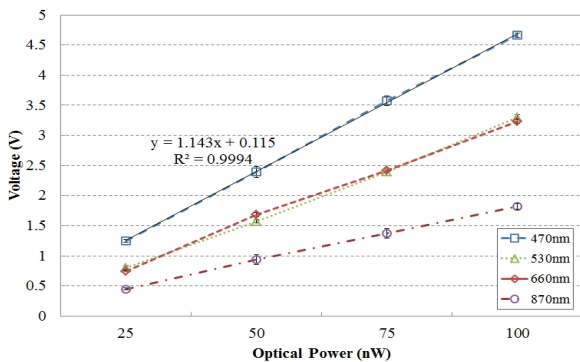


그림 5 LED의 중심파장별 광 출력 변화에 따른 광섬유 각도센서의 출력전압 비교
 Fig. 5 Relationship between the optical power of LEDs and the output voltage of the fiber-optic goniometer

출력(optical power) 변화에 따른 광섬유 각도센서의 출력전압을 비교한 그래프를 보여준다. LED의 광 출력을 25 nW에서 100 nW까지 변화시켜가며 PD에서 출력된 전압을 측정한 결과, 470 nm의 청색 LED를 사용할 경우 가장 큰 전압 변화폭을 보였으며, 870 nm의 근적외선 LED를 사용하였을 때 가장 낮은 변화폭을 보였다. 결과그래프의 R² 값은 0.9994, p-value는 0.015로 추정된 회귀식은 통계적으로 유의함을 알 수 있다.

일반적으로 광섬유를 통해 전송되는 광 신호의 광 감쇄(attenuation)는 광섬유가 가지는 고유한 파장별 전송률(transmission rate) 및 길이에 의해 결정된다. 본 연구에서 사용한 PMMA 재질의 코어로 구성된 플라스틱 광섬유의 경우에는 470 nm의 빛이 전송될 때, 광 강도의 변화에 따른 감쇄율이 큰 것을 알 수 있다. 따라서 추후의 실험에서는 470 nm의 중심파장을 갖는 청색 LED를 이용하여 실험을 수행하였다.

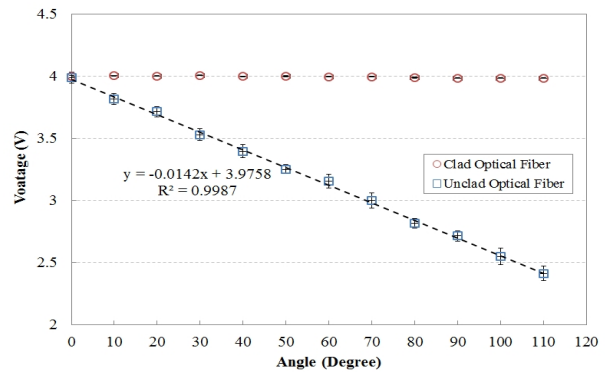


그림 6 클래딩의 제거 유무에 따른 각도별 광섬유 각도센서의 출력전압 비교
 Fig. 6 Comparison of the output voltages according to the bending angle with clad and unclad optical fibers

그림 6은 클래딩의 제거 유무에 따른 각도별 광섬유 각도센서의 출력전압을 보여주고 있다. 플라스틱 광섬유의 최소 곡률반경 25 mm를 기준으로 실험한 결과, 클래딩이 제거되지 않은 플라스틱 광섬유를 사용한 광섬유 각도센서의 경우에는 0°에서 110°까지의 각도 변화에도 출력전압의 변화가 미미한 반면, 1 mm 간격으로 클래딩이 제거된 광섬유를 사용한 광섬유 각도센서는 동일한 각도 변화에 대하여 출력전압이 선형적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 감지부에 위치한 광섬유의 클래딩을 일정부분 제거할 경우, 제거하지 않은 광섬유에 비해 벤딩 손실이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 결과그래프의 R² 값과 p-value는 각각 0.9987과 1.94E-10으로 추정된 선형회귀식은 통계적으로 유의함을 알 수 있다.

그림 6의 데이터에서 각도별 최대, 최소 측정치에 대한 Bland-Altman plot 결과는 그림 7과 같으며, 0~110°까지의 각 각도에서 측정된 전압의 최대값과 최소값에 대한 차이를 알 수 있다. x축은 최대값과 최소값의 평균을, y축은 그 차이를 나타낸다. 차이의 평균값은 0.043 V이고, 95% 회귀직

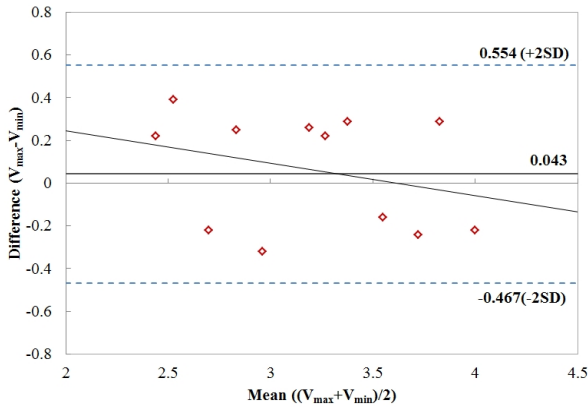


그림 7 그림 6의 데이터에 대한 Bland-Altman Plot 결과
 Fig. 7 Bland-Altman plot for datum in Fig 6

선의 신뢰구간(confidence interval: CI)이 0을 포함하므로 측정값은 통계적으로 동일하다고 볼 수 있다.

그림 8은 본 연구에서 제작한 광섬유 각도센서를 이용하여 실시간으로 측정된 무릎관절의 신전운동에 따른 출력전압 변화를 보여준다. 본 연구에서는 보행장애 진단을 위한 실험을 수행하기에 앞서 광섬유 각도센서의 정상작동에 대한 기초성능을 평가하기 위하여 실험 피검자로 20대 중반의 무릎에 질환을 갖지 않은 남성을 선택하였고, 의자에 앉은 상태에서 무릎 관절의 지속적인 신전운동에 따른 광섬유 각도센서의 실시간 응답신호를 측정하였다. 실험결과, 무릎관절의 굽힘 운동(flexion)과 펴 운동(extension)에 따라 출력전압이 3.2 V에서 3.9 V까지 실시간으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한 무릎관절의 최소 또는 최대 각도에서 광섬유 각도센서의 출력전압이 안정화되었을 때 비교적 유사한 전압값을 보이므로 본 연구에서 제작한 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서가 가역성(reversibility)을 가지므로, 피검자의 보행패턴 및 신전운동 능력을 측정하는데 충분히 적용 가능할 것으로 보인다.

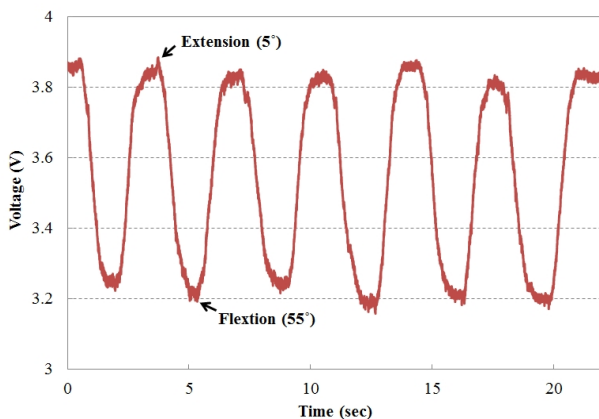


그림 8 무릎관절의 움직임에 따른 광섬유 각도센서의 실시간 응답

Fig. 8 Real-time response of the fiber-optic goniometer according to the extension exercise of the knee joint

3. 결 론

본 연구에서는 플라스틱 광섬유의 클래딩을 일정한 간격으로 제거하여 벤딩 손실의 효율을 높인 무릎관절 각도 측정용 광섬유 각도센서를 개발하였다. 첫 번째로, 광섬유 각도센서에 적합한 광원을 선별하기 위해 파장이 다른 4종류의 광섬유용 LED를 이용하여 광섬유 각도센서의 출력특성을 비교하였다. 실험결과, 470 nm의 파장을 갖는 청색 LED를 사용하였을 때 광섬유 각도센서가 LED의 광 출력 변화에 따라 가장 넓은 출력전압 범위와 선형성을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 광섬유 각도센서의 광원으로 미세한 각도변화에도 출력전압의 변화가 큰 청색 LED와 소형 PD를 이용하여 광섬유 각도센서를 제작하였다. 두 번째로, 제작된 광섬유 각도센서를 이용하여 무릎관절의 각도의 변화에 따른 PD의 출력전압 변화를 측정하였다. 실험결과, 0~110°의 각도범위에서 출력전압이 선형성을 가지고 변하는 것을 확인하였다. 또한 무릎관절의 신전운동 시 광섬유 각도센서의 출력 전압이 실시간으로 측정되는 것을 확인하였다.

기존에 개발되거나 연구되었던 의료용 측각도계 및 보행 측정 시스템은 특정 구간에서 측정 불가능한 제한적인 각도, 측정자의 주관적인 측정방식, 측정공간의 제약 등 여러 단점들이 존재해왔다. 하지만 본 연구에서 제작한 무릎관절의 굽힘에 따른 벤딩 손실을 이용한 광섬유 각도센서는 구성이 매우 간단하고 무릎부위에 착용이 가능함에 따라 공간적인 제약을 받지 않으며, 전용 프로그램을 통해 객관적인 측정값을 획득할 수 있으므로 측정자의 주관성을 최소화할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 실시간 측정과 기록이 가능하므로 보행장애의 진단 및 재활치료 시 회복 정도를 판단할 수 있는 모니터링 시스템에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로의 연구방향은 광섬유 각도센서의 측정 분해능 향상과 피검자의 보행패턴 분석 시스템을 개발하는 것이며, 이를 이용해 일반인과 보행장애를 갖는 환자의 보행패턴을 비교 분석하는 것이다.

References

- [1] J. S. Choi, H. S. Oh, D. W. Kang, K. R. Mun, M. H. Choi, S. J. Lee, S. C. Jeong, G. R. Tack, "Comparison of Differences among Alzheimer's Disease, Mild Cognitive Impairment and Healthy Elderly using Gait and Cognitive function," *Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 10, pp. 1403-04, 2010.
- [2] W. A. Sands and M. H. Stone, "Monitoring the elite athlete," *USOC Olympic Coach E-Mag.*, vol. 17, no. 3, Fall 2005. [Online]. Available: <http://coaching.usolympicteam.com/coaching/kpub.nsf/>
- [3] D. M. Karantonis, M. R. narayanan, M. Mathie, N. H. Lovell, and B. G. Celler, "Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 10, no. 1, pp.

156-157, Jan. 2006

- [4] B. Culshaw and J. Dakin, *Optical Fiber Sensors: Systems and Applications*. Boston, MA: Artech House, 1989.
- [5] E. Udd, *Fiber-Optic Sensors for Scientists and Engineers*. New York: Wiley, 1993.
- [6] J. Dunphy, G. meltz, and W. Morey, "Optical fiber Bragg grating sensors: A candidate for smart structure applications," in *Fiber-Optic Smart Structures*, E. Udd, Ed. New York: Wiley, ch. 10.
- [7] D. A Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 3rd edition, NewYork, USA; Wiley&Sons, 2005.
- [8] M. M. Patil and O. Prohaska, "Fiber-optic sensor for joint angle measurement," in *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 2, pp. 803-804, Nov. 4-7, 1988.

저 자 소 개



김 선 근 (金 宣 根)

2013년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2013년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



신 상 훈 (辛 尙 勳)

2009년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사), 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



전 다 영 (全 多 榮)

2012년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



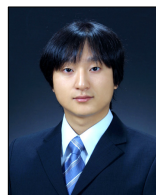
홍 승 한 (洪 承 漢)

2013년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2013년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



심 혁 인 (沈 赫 仁)

2013년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사), 2013년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



장 경 원 (張 岡 源)

2011년 8월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학박사), 2013년 4월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



유 욱 재 (兪 昱 在)

2013년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학박사), 2013년 4월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



이 봉 수 (李 奉 洙)

1999년 8월 University of Florida(공학박사), 2001년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 교수