

논문 2008-45SC-1-7

자세 균형 측정을 위한 디지털 경사계 설계

(Design of Digital Inclinometer for Measuring Postural Balance)

명현석*, 이효기*, 이경중**, 권오윤***

(Hyoun-Seok Myoung, Hyo-Ki Lee, Kyoung-Joung Lee, and Oh-Yun Kwon)

요약

본 논문에서는 롤(Roll)에 누워 있는 피검자의 각도와 가속도 신호를 측정하기 위한 디지털 경사계 설계하였다. 개발된 시스템은 기울기 센서(tilt sensor), 2축 가속도 센서(biaxial accelerometer), 마이크로프로세서(single chip microprocessor)와 블루투스(Bluetooth module)로 구성된다. 개발된 디지털 시스템은 다루기 쉽고 쉽게 착용 할 수 있다. 시스템을 성능을 평가하기 위해서 Roll위의 3명의 피검자로부터 각도와 가속도 신호는 ZEBRIS와 디지털 경사계에 의해서 동기화하여 측정하였다. 측정된 신호는 정량적인 방법에 의해서 처리되며 그때의 상관계수가 0.93임을 보여 준다. 이와 같은 결과로부터 디지털 경사계는 몸의 움직임을 평가하는데 유용할 것으로 보여 진다.

Abstract

In this paper, a digital inclinometer to measure the angle and acceleration signals of subject laid on Roll was designed. The designed system consists of a tilt sensor, biaxial accelerometer, single chip microprocessor and Bluetooth module. The designed digital inclinometer was easy to handle and to wear. To evaluate the performance of the system, we measured simultaneously the angle and acceleration signals from the 3 subjects on the Roll using two instruments which are ZEBRIS and designed system. The measured signals were processed by statistical method and then the correlation coefficient of 0.93 was shown. From the results, the designed digital inclinometer is shown to be useful in assessment of body movement.

Keywords: Inclinometer, Acceleration, Postural Balance, Roll

I. 서론

균형은 일상생활의 모든 동작 수행에 중요한 영향을 주며 신체를 평형 상태로 유지 시키는 능력이다^[1~2].

최근 사고에 의한 장애인의 증가와 노령 인구의 증가로 인한 외상성 뇌손상 등의 중추질환계의 손상과 골격근의 질환에 따른 자세 균형 제어력의 손실이 환자의 재활치료에 많은 어려움을 초래함에 따라 자세균형에 대한 관심이 높아지고 있다.

자세 균형에 관한 관련 연구로는 Roll위에서 좌우 다리를 들어 올렸을 때 횡 복근과 내경근의 응답을 알아보는 연구^[3], 근전도와 역학적 방법을 이용하여 여러 등급의 불안정한 시소 위에서 균형을 잡는데 미치는 중추신경 계통에 대한 연구^[4]와 힘 측정판을 이용하여 자세 안정 및 보행 능력을 측정하는 연구 등이 이루어 졌다^[5]. 그러나 상기에 언급한 연구들에서는 자세균형에 대한 객관적이며 정량적인 데이터보다는 의사의 주관적 관찰에 의한 평형감각 능력에 대한 평가가 이루어지고 있다. 또한 병원에서도 자세가 올바른 사람과 그렇지 못한 사람의 균형 정도를 의사나 물리치료사의 주관적인 평가에 의존하기 때문에 객관적으로 균형정도를 측정할 수 있는 시스템의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 환자에 대한 진단, 관리 및 치료 효과를 효율적으로 평가하기 위해서는 환자의 균형 정도를 객관적이고 정

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 연세대학교 의공학과
(Dept. of Biomedical Engineering, Yonsei Univ.)

*** 정회원, 연세대학교 물리치료학과
(Dept. of physical Therapy, Yonsei Univ.)

※ 본 연구는 보건복지부 보건의료기술진흥사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (02-PJ3-PG6-EV08-0001)

접수일자: 2007년7월25일, 수정완료일: 2007년12월31일

량적인 수치로 측정하는 것은 중요하다.

따라서 본 연구에서는 경사센서와 가속도 센서를 이용하여 자세 균형 정도를 객관적, 정량적으로 평가할 수 있는 디지털 경사계를 설계하였다. 설계된 디지털 경사계를 높은 정밀도를 갖는 초음파 필스 측정 시스템인 ZEBRIS (Gait Analysis Measuring System CMS-HS, Germany) 장비와 비교하여 시스템의 정확도를 평가하였다^[8].

II. 시스템 설계

디지털 경사계는 경사센서와 가속도 센서를 Roll(높이: 120cm, 지름: 30cm, Tumble Forms, U.S.A)측면에 부착하고 Roll 위에 사람이 누워서 제시된 프로토콜에 따라 자세를 변형하면서 측정되는 각도성분과 가속도 성분의 값을 이용하여 자세균형 정도를 측정하는 장비로 시스템 블록도는 그림 1과 같이 구성된다.

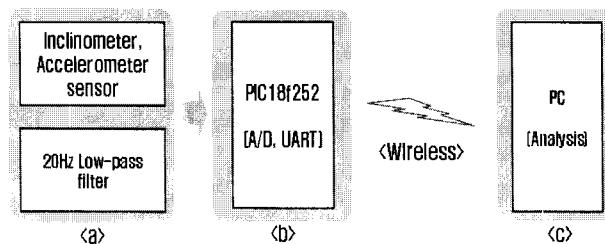


그림 1. 시스템 블록도

(a)센서부, (b)프로세서부, (c)신호분석부

Fig. 1. System block diagram.

(a)Sensor part, (b)Processor part, (c)Analysis part

2.1 센서 및 아날로그 신호처리

본 연구에서는 피검자의 움직임과 각도를 측정하기 위해 가속도센서(SCA1000, $\pm 1.7g$, VTI Technologies, Finland)와 경사센서(SCA61T, $\pm 1g$, VTI Technologies, Finland)를 사용하였다. 가속도 센서는 가로축(X축)과 세로축(Y축)의 변화를 측정 하는 2축 가속도 센서를 사용 하였으며, 경사 센서는 가로축(X축)으로 $\pm 90^\circ$ 의 각도 측정이 가능한 1축 경사센서를 사용하였다. 각각의 센서는 자세의 변화에 따른 변화량을 전압 값으로 변환하여 출력하였다.

센서에서 출력되는 신호는 여러 종류의 잡음이 포함되어 있다. 원하는 신호들의 대역은 20Hz이하에 분포하고 있으므로 고주파 잡음을 제거하기 위해서 20Hz의

차단 주파수를 갖는 2차 버터워스 저역통과 필터를 설계 하였다.

2.2 마이크로프로세서 및 시스템 제어

본 연구에서는 마이크로프로세서 PIC18f252를 이용하여 디지털경사계의 신호 수신, 처리 및 디스플레이 디바이스를 각각 제어하도록 구성하였다. 저역필터를 통과한 가속도와 경사신호는 마이크로프로세서에서 10-bit, 150Hz의 샘플링율로 A/D 변환 후 처리과정을 거쳐 블루투스 모듈(Promi-ESD200, SENA Technology, 대한민국)을 통해 데이터를 PC로 전송된다.

그림 2는 설계 제작된 디지털 경사계의 모습으로 그림 2(a)는 개발한 디지털 경사계의 모습이며, 그림 2(b)는 PC에 부착되는 무선통신모듈로서 블루투스를 통해 입력된 데이터를 PC로 전송해 준다.

또한 센서가 수평상태일 때 기준전압을 설정한 후 측정된 경사데이터를 프로세서에서 각도로 환산하여 7-세그먼트에 표시되도록 하였다.

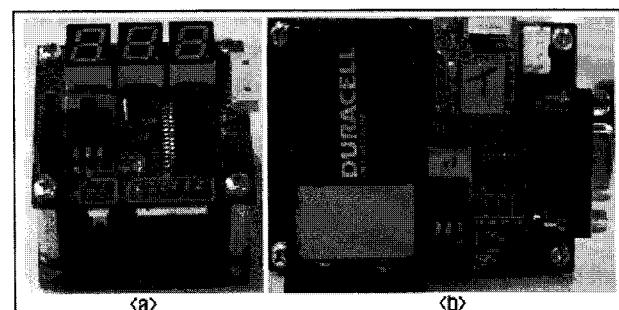


그림 2. 디지털 경사계의 모습

(a)디지털 경사계, (b)무선 수신부

Fig. 2. Designed digital inclinometer

(a)Digital inclinometer, (b)Wireless receiver

2.3 신호분석

본 논문에서는 GUI tool인 LabVIEW 6.1 (National Instrument, U.S.A)를 사용하여 획득된 데이터를 실시간으로 디스플레이하고 저장하였다. 2채널 가속도 데이터는 raw data로 표시하고, 경사데이터는 회귀방정식을 적용하여 변환된 각도로 표시하도록 하였다. 가속도 데이터(y축)는 피검자 실험 중 Roll에서 떨어지는 낙상 실험 시 활용되며 경사데이터는 환자의 각도변화를 모니터링 할 수 있도록 사용된다. 각각의 데이터들은 텍스트 형식으로 PC에 저장되며, 또한 Matlab 7.0 (Mathworks, USA)을 사용하여 측정된 데이터를 분석

하였다. 또한 측정된 데이터를 PC에 저장하여 이전에 저장되어 있는 데이터와 비교, 분석이 가능하도록 하였습니다.

III. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험 방법

자세 균형 정도를 측정하기 위해 설계된 디지털 경사계와 원통형 Roll을 이용하여 20대의 건강한 성인 남성 3명에 대해 설정한 실험 프로토콜에 따라 Roll위에서 자세 균형 정도를 측정하였다.

측정 준비 과정으로 평평한 바닥에 Roll을 놓고 그 위에 누워 좌·우 다리를 각각 들어 올린 상태에서 피검자가 균형을 잡기 위하여 Roll위에서 얼마나 흔들리는가를 측정하기 위해서 가속도 신호와 경사도 신호의 변화를 관찰하였다. 측정하는 동안 피검자의 자세가 흐트러지지 않고 모든 피검자가 같은 자세로 측정할 수 있도록 하였다. 눕는 위치를 지정하는 방법은 코에서부터 배꼽까지를 기준선으로 설정하고, 기준선이 Roll의 중앙에 위치하도록 하였다. 또한 꼬리뼈가 Roll의 끝부분에 닿도록 하였으며 양손은 가슴 위에 가볍게 모으도록 하였다.

측정 프로토콜은 물리치료사(대학교수)의 도움을 얻어 그림 3과 같이 (a)기준 데이터가 되는 자세, (b)오른쪽 다리를 곧게 펴서 45°로 들어 올린 자세 그리고 (c)왼쪽 다리를 곧게 펴서 45°로 들어 올린 세 가지 자세의 모습을 설정하였다. 그림 (a)에서 원으로 표시한 부분은 경사계를 부착한 모습을 나타내고 있다. 45°로 다리를 들어 올릴 때 초기 상태에서 고관절의 각도를 45°

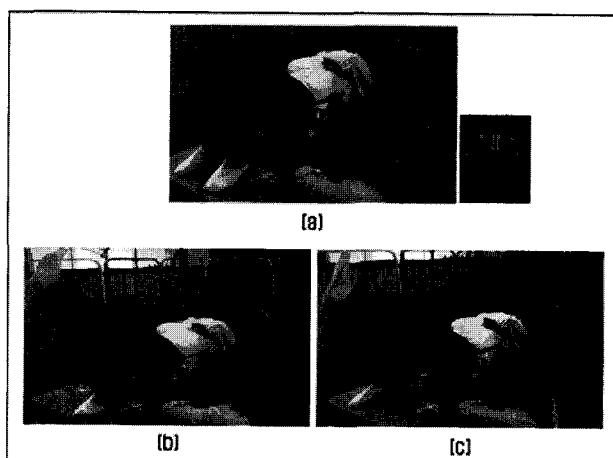


그림 3. 균형 측정 시 자세 변화

Fig. 3. Various posture changes during measurement.

로 유지 한 후 실험을 시작 하였으며 무릎관절만 이완 시킴으로써 45°를 유지시켰다. 다리는 어깨 넓이만큼 벌려 바닥에 붙이도록 하고 한쪽 다리를 들어 올렸을 때 균형이 흐트러지면 반사적으로 지지하는 다리를 움직여 균형을 유지하려 하기 때문에 피검자의 다리 양쪽에 천장과 바닥에 줄을 연결하여 다리가 벌어 지지 않도록 하였다. 또한 물리치료사가 피검자의 자세를 항상 모니터링 하면서 자세가 변형 되지 않도록 주의를 주면서 실험을 진행하였다. 피검자는 평소 차림의 복장과 운동화를 착용하였고 실험 전 Roll위에 누워 실험 동작에 대해 충분히 연습하여 익숙해지도록 하였다.

측정 시작 후 3초 동안은 양다리를 지면에 붙이고 누워있는 편안한 자세를 유지하여 측정 데이터의 기준 데이터로 사용하였다. 이후에는 다리를 곧게 펴서 45°로 들어 올린 상태를 유지하여 자세가 흐트러져 넘어질 때 까지 측정하였으며, 계속 유지 시 최대 1분까지 측정하였다. 실험은 각각 좌·우측 다리를 나누어 실시하였다. 모든 피검자에 대해서 좌·우 각각 5회씩 반복하여 총 30개의 데이터를 획득하였다.

3.2 결과 및 고찰

3축 가속도 센서를 이용하여 팔의 움직임을 측정 하였던 기존의 연구에서는 성능평가를 위해 표준으로 선정한 장비(Mac Reflex system, OPT)와 각자의 연구에서 개발한 시스템을 분석 하는 지표로 서로의 상관성을 비교하였다^[7]. 본 연구에서는 이와 유사하게 자세의 변화를 측정하는데 표준으로 사용되고 있는 ZEBRIS 장비와 저자가 개발한 디지털 경사계를 비교 분석하여 신뢰성 평가를 수행하였다. 또한 낙상한 지점을 검출함으로써 피검자의 균형 상태를 평가하였다.

가. 각도센서의 특성 분석

본 연구에서 사용한 각도센서의 특성을 살펴보기 위해 각도를 측정하는 표준 장비로 널리 사용되고 있는 ZEBRIS와 각도를 비교 하였다.

그림 4(a)는 ZEBRIS의 각도를 2°씩 변화시키면서 그에 대응되는 경사센서의 출력 값은 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 실선은 $y=x$ 에 해당하는 선이며, Circle-(‘o-’)는 ZEBRIS와 경사계로부터 출력된 각도 데이터이다. 자세 균형을 평가하는 데는 일반적으로 30° 까지의 각도 값이 유용하지만 저자는 범위를 확대하여 50°까지 측정하였다.

전체적인 그래프는 부분적으로 선형성을 보여주고

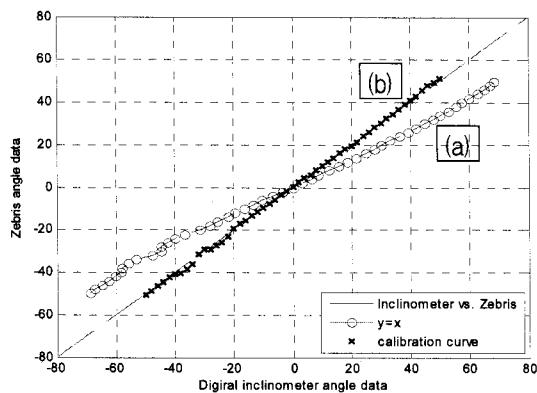


그림 4. (a) 경사계의 Raw data 와 ZEBRIS로부터 얻은 각도 데이터의 비교, (b)설계한 경사계와 ZEBRIS로부터 출력된 각도데이터를 선형화시킨 회귀방정식을 적용한 결과

Fig. 4. (a) Comparison of raw data(degree) measured from inclinometer and ZEBRIS, (b) Calibration curve computed by regression equation which show the angle correlation between inclinometer and ZEBRIS

있으나 세로축의 ZEBRIS로부터 출력된 각도 데이터와 가로축의 경사계로부터 측정된 각도 값이 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. 각도가 0°인 경우에는 두 데이터가 거의 차이가 없으며 ZEBRIS의 경우 -50°에서는 경사계가 -68.9°로 18.9°의 차이를 보이며 ZEBRIS의 50°에서는 경사계가 68.4°로 18.4°의 차이를 보임으로써 0°에서 멀어 질수록 오차가 점점 더 커짐을 알 수 있다. 상기에서 언급한 부분적인 선형성을 갖는 데이터를 선

형화시켜 주기 위한 회귀방정식은 식(1)과 같다.

$$Y = 2 \times 10^{-5} X^3 + 10^{-5} X^2 + 0.6085X + 0.4404 \quad (1)$$

단, 변수 'Y'는 회귀방정식에 의해 계산된 각도이며, 'X'는 경사계로부터 측정된 raw data 이다.

그림 4(b)는 회귀 방정식을 적용한 경사계와 ZEBRIS로부터 출력된 각도 데이터로서 디지털경사계로부터 구한 raw data를 활용하여 각도를 구할 수 있다. 그림 4(b)로부터 -50°~50°까지 ZEBRIS와 디지털경사계의 각도 데이터 값이 거의 일치함을 보이고 있다. 회귀방정식이 적용된 경사계와 ZEBRIS와의 표준 오차는 약 0.01°이며, 결정 계수(R-square)는 99%로써 높은 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있었다.

나. 디지털 경사계의 신뢰성 평가

그림 5는 세 명의 피검자에게 실험프로토콜에 따라 실험을 하면서 측정된 각도 데이터의 일부로, 그림 5.(a), (c), (e)와 그림 5.(b), (d), (f)는 각각 세 명의 피검자의 좌측/우측 다리를 45° 각도로 들어 올리는 반복 실험 중 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 데이터를 나타낸 것이다. 즉 각 그림의 가로 데이터는 각각 피검자의 좌측/우측 다리를 들어 올릴 때의 데이터이며, 세로 데이터는 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 실험에 의해서 얻은

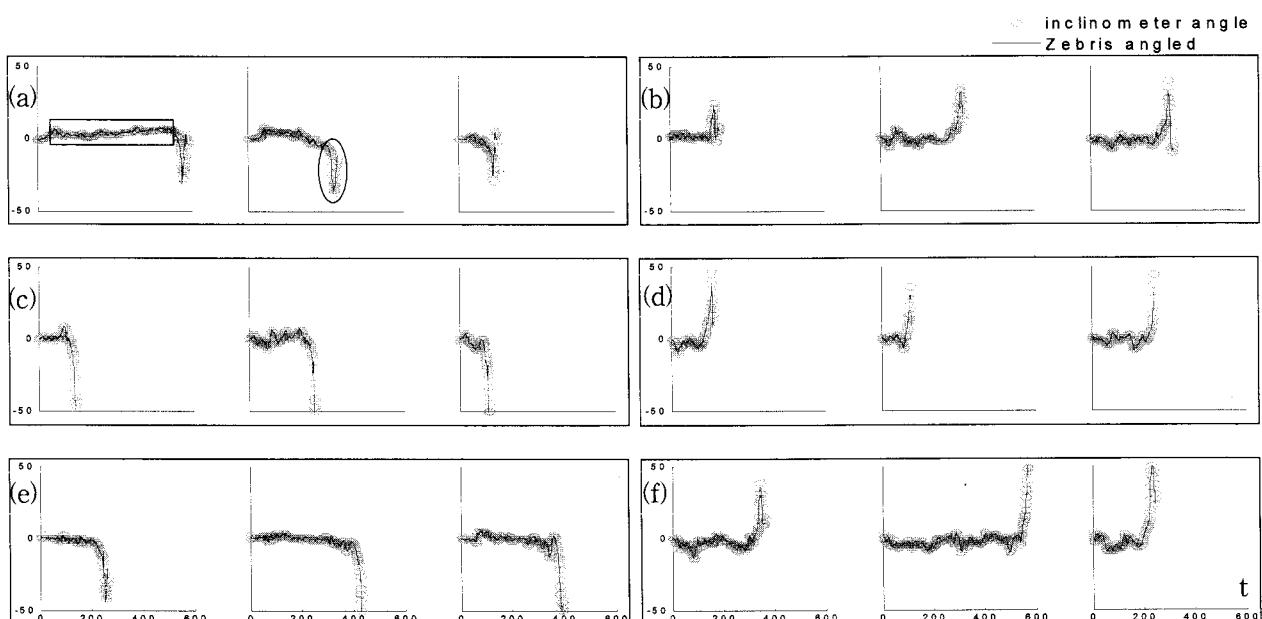


그림 5. 설계한 경사계와 ZEBRIS로부터 얻은 각도 데이터의 비교

(Circle('o')는 경사계의 회귀방정식을 적용한 각도 데이터, '-'(실선)은 ZEBRIS로부터 얻은 각도 데이터)

Fig. 5. Comparison of degree data obtained from inclinometer and ZEBRIS.

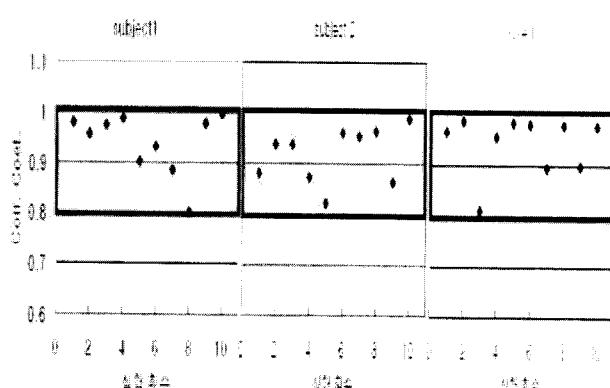


그림 6. 경사계와 ZEBRIS의 상관관계 분포도

(a) 첫 번째 피검자, (b) 두 번째 피검자,
(c) 세 번째 피검자

Fig. 6. Correlation distribution chart of inclinometer and ZEBRIS.

(a) first subject, (b) second subject and (c) third subject

각도 데이터이다. 그림 5의 X축은 시간을 나타내며, Y축은 각도데이터이다.

Circle('o')는 저자가 개발한 디지털경사계로부터 얻은 데이터를 회귀방정식에 적용하여 구한 각도 성분을 나타낸 것이며 실선('—')은 ZEBRIS로부터 출력된 각도 성분을 도시화 한 것으로서 두 장비로부터 얻은 결과가 거의 일치 하는 것을 볼 수 있다.

그림 5(a)의 첫 번째 그림에서 박스로 표시한 부분은 실험 시작 후 3초 이후에 피검자가 다리를 들었을 때 중심을 잡기 위해서 움직이는 것을 보여 주고 있다.

피검자마다 흔들리는 정도는 조금씩 다르지만 중심을 잡기 위해 움직여서 데이터가 흔들리는 모습을 관찰할 수 있으며, 그림 5(a)의 두 번째 데이터에서 타원형으로 표시된 것은 일정한 각도 이상이 벗어나면 피검자는 자세를 바로 하지 못하고 Roll에서 떨어지는 것을 의미한다.

그림 6은 그림 5에서 얻은 데이터를 이용하여 각 피검자별로 설계된 디지털경사계와 ZEBRIS간의 상관관계를 구한 것이다. 첫 번째 피검자의 상관관계는 0.81~0.98의 분포를, 두 번째 피검자는 0.81~0.99, 세 번째 피검자는 0.82~0.99의 분포를 보임으로써 비교적 높은 상관성을 보여 주고 있으며 각각의 피검자에 대한 상관도가 거의 비슷함을 보여주고 있다. 이를 근거로 본 연구에서 설계된 디지털경사계는 높은 신뢰성을 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

다. 디지털 경사계를 이용한 낙상 검출

그림 7은 세 명의 피검자에게 실험프로토콜에 따라 실험을 하면서 측정된 Y축 가속도 데이터(상하 움직임 검출)의 일부로 그림7.(a), (c), (e)와 그림7.(b), (d), (f)는 각각 세 명의 피검자의 좌측/우측 다리를 45° 각도로 들어 올리는 반복 실험 중 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 가속도 데이터를 나타낸 것이다.

그림 7의 X축은 시간을 나타내며, Y축은 순간 가속도 데이터(A/D변환 값)이다. 실선('—') 데이터는 디지털 경사계의 Y축 가속도 데이터이며, 점선('---')으로 표시

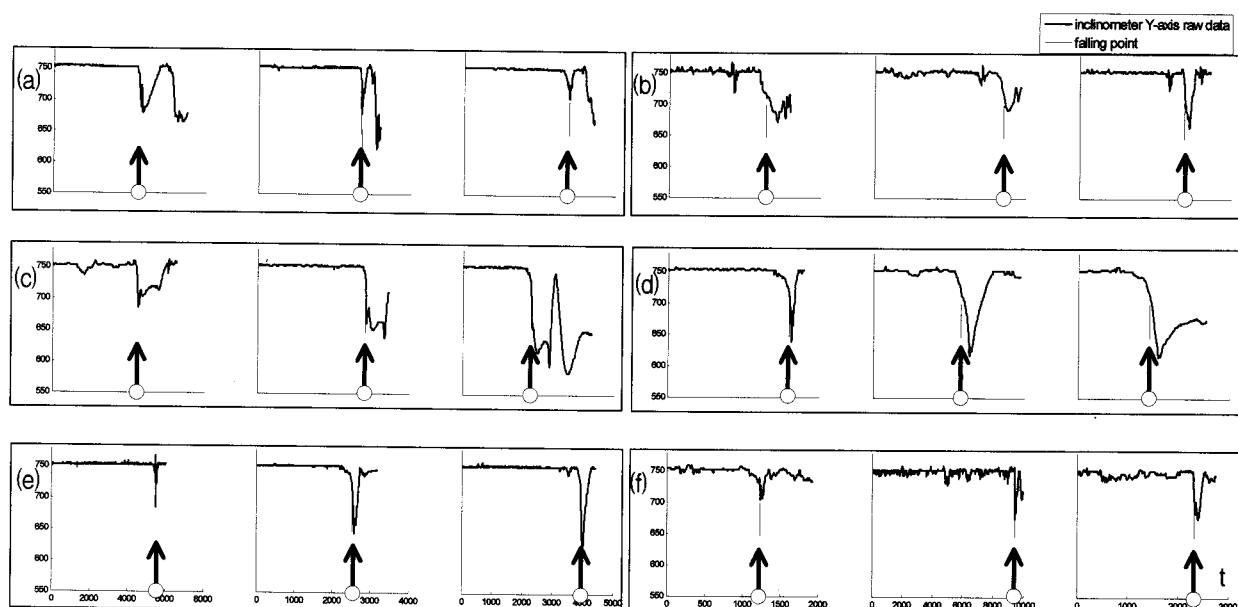


그림 7. 낙상 지점 검출

Fig. 7. Detection of falling point.

된 세로선 부분은 피검자가 낙상한 지점을 나타낸 것으로 피검자가 Roll에서 떨어지는 지점을 검출할 수 있다.

화살표(↑)로 표시된 부분은 낙상지점(실험 시작 후 낙상할 때까지의 시간)을 나타내며, 낙상지점은 실험을 통해 미리 정한 문턱치에 의해서 구해진다. 화살표로 표시된 이후의 데이터는 낙상한 이후의 데이터이다.

그림 7은 30개 가속도 데이터 중 18개의 데이터만을 표시한 것으로 낙상 검출이 가능함을 보여주고 있으며 나머지 데이터에서도 낙상지점을 모두 검출하였다.

본 연구에서 실행한 회귀 분석의 결과 $r=0.93$ 의 결정 계수(R-square)와 각도 오차가 약 0.7° 로서 매우 신뢰성이 있는 결과임을 확인하였다.

상기의 실험들을 통해 설계한 디지털경사계를 자세 균형 평가를 위해 사용되고 있는 고가의 ZEBRIS 장비와 비교함으로 자세균형 평가를 위해 측정된 데이터의 정확도뿐 아니라 실험도중 낙상지점도 정확하게 검출이 가능하였다. 특히 데이터의 정확도 측면에서는 고가의 ZEBRIS 장비와 필적할만한 성능을 지니고 있으며, 자동으로 낙상을 검출하는 기능도 추가 되었으며 손바닥 크기로 소형화함으로 휴대성을 매우 높였다. 본 연구에서는 피검자들의 자세균형이 정상인인 경우였지만 향후, 실제 임상실험을 통해 환자들의 균형 정도를 측정하고, 다양한 방법의 비교 테스트와 분석과 보완을 통해 더욱 정확하고 신뢰성이 높은 시스템을 구현하여야 할 것이다

IV. 결 론

본 연구에서는 자세 균형 정도를 객관적, 정량적으로 표시할 수 있는 휴대용 디지털 경사계를 설계하였다. 설계된 시스템을 원통형 Roll 측면에 부착하여 피검자의 자세 변화에 따른 균형 유지 상태를 관찰하였다. 설계된 시스템의 평가를 위해 표준 측정 장비로 널리 사용되고 있는 ZEBRIS를 이용하여 동시에 측정한 결과 두 시스템을 통해 획득된 데이터의 상관계수는 $r=0.93$ 으로 매우 좋은 성능을 갖고 있음을 알 수 있었다.

향후 보다 많은 피검자를 대상으로 데이터를 수집하여 자세균형을 객관적으로 평가할 수 있는 지표를 개발한다면 요통 환자의 비정상 정도를 객관화하고 재활 치료 성과를 평가하는데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Jung-Byung Chae, Byung-Jo Kim and Sung-Soo Bae, "A study on the control factors of posture and balance," The Journal of Korean Society of Physical Therapy, Vol. 13, No. 2, pp. 421-431, 2001.
- [2] H. Cohen, C. A. Blatchly and L. L. Combash, "A study of the clinical test of sensory interaction and balance," Physical Therapy, Vol. 73, pp. 346-354. 1993.
- [3] G. L. Almeida, R. L. Carvalho and V. L. Talis, "Postural strategy to keep balance on the seesaw," Gait & Posture, Vol. 23, no. 1, pp 17-21, 2006.
- [4] Anne-Marie Ainscough-Potts, Matthew C Morrissey and Duncan Critchley, "The response of the transverse abdominis and internal oblique muscles to different postures," Manual Therapy 11, pp 54 - 60, 2006.
- [5] A. Shumway-Cook, D. Anson and S. Haller, "Effect on balance and locomotion on hemiparetic adult," Arch. Phys. Med. Rehabil, Vol. 69, pp.395-400, 1989.
- [6] 이재영, 이경중, 김영호, 이성호, 박시운, "가속도계를 이용한 편마비 환자의 보행 분석 알고리즘 개발," 전자공학회논문지, 제41권, SC편, 4호, 2004.
- [7] Eva Bernmark and Christina Wiktorin, "A triaxial accelerometer for measuring arm movement," Applied Ergonomics 33, pp 541-547, 2002.
- [8] E. Cattrysse, S. Provyn, P. Kool, O. Gagey, J. P. Clarys and P. Van Roy, "Reproducibility of kinematic motion coupling parameters during manual upper cervical axial rotation mobilization_ A 3-dimensional in vitro study of the atlanto-axial joint", Journal of Electromyography and Kinesiology, accepted 21 June 2007.

저자소개



명현석(학생회원)
 2006년 원광대학교 전기전자
 공학부 학사 졸업.
 2006년~현재 연세대학교
 의공학과 석사과정.
 <주관심분야 : 의용계측, 생체신호처리>



이경중(정회원)
 1981년 연세대학교 전기공학과
 학사 졸업.
 1983년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1993년 미국 Case Western
 Reserve Univ. 객원교수.
 1989년~현재 연세대학교 의공학부 교수
 <주관심분야 : 의용계측, 생체신호처리, 생체모델링>



이효기(학생회원)
 2005년 연세대학교 의용전자
 공학과 학사 졸업.
 2005년~현재 연세대학교
 의공학과 석박사통합과정.
 <주관심분야 : 생체신호처리, 보행분석>



권오윤(정회원)
 1986년 연세대학교 재활학과
 학사 졸업.
 1992년 연세대학교 보건대학원
 졸업.
 2004년 계명대학교 대학원 졸업.
 2003년~현재 연세대학교
 물리치료학과 부교수.
 <주관심분야 : 동작분석, 운동손상증후군 진단 및
 관리, 작업관련 부상방지 및 예방>