

An Enhanced Step Detection Algorithm with Threshold Function under Low Sampling Rate

Boyeon Kim[†] · Yunseok Chang^{**}

ABSTRACT

At the case of peak threshold algorithm, 3-axes data should sample step data over 20 Hz to get sufficient accuracy. But most of the digital sensors like 3-axes accelerometer have very low sampling rate caused by low data communication speed on limited SPI or I²C bandwidth of the low-cost MPU for ubiquitous devices. If the data transfer rate of the 3-axes accelerometer is getting slow, the sampling rate also slows down and it finally degrades the data accuracy. In this study, we proved there is a distinct functional relation between the sampling rate and threshold on the peak threshold step detection algorithm under the 20Hz frequency, and made a threshold function through the experiments. As a result of experiments, when we apply threshold value from the threshold function instead of fixed threshold value, the step detection error rate can be lessen about 1.2% or under. Therefore, we can suggest a peak threshold based new step detection algorithm with threshold function and it can enhance the accuracy of step detection and step count. This algorithm not only can be applied on a digital step counter design, but also can be adopted any other low-cost ubiquitous sensor devices subjected on low sampling rate.

Keywords : Ubiquitous, Step Detection, Peak Threshold, Low Sampling Rate, Threshold Function

낮은 샘플링 주파수에서 임계 함수를 사용한 개선된 걸음 검출 알고리즘

김보연[†] · 장윤석^{**}

요 약

피크 임계값을 사용하는 걸음 검출 알고리즘에서 충분한 정확도로 걸음을 검출하기 위해서는 3축 가속도 센서가 20Hz 이상의 주파수로 샘플링을 수행하여야 한다. 그러나 I²C나 SPI를 통하여 데이터를 전송받는 상용의 통합 MPU와 연결되는 디지털 센서 장치들의 샘플링 주파수는 아날로그 방식의 샘플링 회로들에 비하여 매우 낮은 경향이 있다. 센서의 샘플링 주파수가 낮게 되면 충분한 데이터를 확보할 수 없기 때문에 측정 결과의 정확도가 떨어지게 된다. 본 연구에서는 피크 임계값 방식의 피크 검출 알고리즘에서 데이터가 20Hz 이하의 낮은 주파수로 샘플링될 경우에 샘플링 주파수와 피크 임계값 사이에 함수관계가 있음을 발견하였으며, 실험을 통하여 임계 함수를 도출하였다. 고정 임계값 대신에 샘플링 주파수에 따른 임계 함수를 적용하고, 테스트 프로토콜에 의하여 실험을 수행한 결과, 각 걸음 유형에 대하여 평균적으로 1.2% 미만의 걸음 검출 오차율을 얻을 수 있었다. 그러므로 걸음 검출 알고리즘이 걸음 모드에 따라서 적절히 결정된 임계 함수로부터 샘플링 주파수에 적합한 임계값을 사용하여 걸음을 검출한다면, 걸음 검출 및 걸음수 측정의 정확도는 매우 높아질 수 있다. 이러한 결과는 걸음수 측정 장치에만 적용되는 것이 아니라, 샘플링 주파수가 낮게 설계될 수밖에 없는 소형, 저가의 유비쿼터스 기기에도 적용해 정확도를 효과적으로 향상시킬 수 있다.

키워드 : 유비쿼터스, 걸음 검출, 피크 임계값, 낮은 샘플링 주파수, 임계 함수

1. 서 론

현대 사회에서 건강의 중요성은 날로 증대되고 있다. 건강한 삶을 영위하기 위해서는 일정량 이상의 운동을 지속적

으로 하여야 하는데 복잡한 도심 생활 속에서 정기적으로 운동을 하기란 쉽지 않은 일이다. 최근에 들어서 건강한 생활을 유지하고 적절한 운동을 통하여 정신적, 육체적 스트레스와 질병을 예방함으로써 삶의 질을 높이고자 하는 많은 노력들이 이루어지고 있다. 그중에서도 도시인들에게 가장 간단하면서도 운동 효과가 높고, 신체의 여러 부분에 대한 여러 동작을 복합적으로 포함함과 동시에 일상에서 자유롭게 할 수 있는 운동은 단연 걷기이다. 많은 사람들이 만보계와 같은 걸음수를 측정하는 장치를 사용하여 걷기 운동을

[†] 정 회 원 : 한양대학교 컴퓨터공학부 연구교수

^{**} 종신회원 : 대전대학교 컴퓨터공학과 교수

Manuscript Received : September 4, 2014

First Revision : November 10, 2014

Accepted : November 30, 2014

* Corresponding Author : Yunseok Chang(cosmos@daejin.ac.kr)

일정하게 하고자 노력하고 있으며, 그 결과는 곧 개인의 건강과 직결되고 있다. 사람은 제한된 시간과 공간에서 필요한 걷기 운동의 양을 만보계를 통해 걸음수로 측정할 수 있기 때문에, 많은 사람들이 걷기 운동에 만보계를 사용하고 있다.

전통적인 만보계는 추의 물리적인 운동 횟수를 측정하는 기계식 장치로, 걸음을 걸을 때에 신체가 흔들리는 횟수를 측정하여 걷기 운동의 양을 표시한다. 오늘날에 이르러서는 이 기계식 만보계 대신에 전자적인 장치를 기반으로 한 디지털 만보계가 보다 일반적으로 사용되고 있다[1]. 또 최근에 들어서는 휴대전화와 스마트폰의 발달에 힘입어 WiFi나 블루투스 통신을 이용하여 개인의 스마트폰, 또는 스마트패드와 같은 스마트기기에 연결되어 걸음을 측정하고 걸음의 양과 패턴을 분석하여 사용자에게 필요한 건강 정보까지 제공하는 유비쿼터스 만보계가 등장하고 있다. 이러한 디지털 유비쿼터스 만보계는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술을 응용한 초소형의 3축 가속도 센서를 내장하고 있기 때문에 센서의 흔들림에 의하여 발생하는 3축 데이터를 분석하여 과거의 기계식 만보계에 비하여 보다 정확한 걸음수와 상세한 걸음 동작 정보를 얻을 수 있다[2].

유비쿼터스 기술의 발달은 장치의 소형화와 저전력 통신 기능을 필수적으로 요구하게 된다. 이 때문에 많은 유비쿼터스 기기들은 신호 처리, 데이터 저장 및 전송에 관한 다양한 처리 및 통신 기능들이 통합된 저전력형의 MPU를 사용하게 된다. 이러한 MPU들은 개별적인 기능의 칩들을 조합하여 구현된 기기들에 비하여 데이터 처리 능력이 떨어진다는 단점을 가지고 있기 때문에 많은 양의 데이터를 처리할 필요가 있는 응용에는 적절하지 않지만, 회로를 간단하게 구현할 수 있고, 저전력으로 동작할 수 있기 때문에 유비쿼터스 기기에 적합하다는 장점도 가지고 있다.

유비쿼터스 만보계는 3축 가속도 센서로부터 전달된 움직임 정보를 MPU로 전달하면, MPU는 내장된 무선 통신 기능을 이용하여 스마트기기로 데이터를 전송한다. 운영체제를 탑재하지 않고 있는 보급형 만보계들은 센서로부터 데이터 수신이나 메모리 저장, 무선 통신 등의 기능에 대한 요청, 즉 태스크들을 동시에 수행하는 것이 아니라 태스크의 순차에 의하여 수행하거나 VM(Virtual Machine)을 통하여 수행하도록 설계되어 있기 때문에, 블루투스나 메모리 저장과 같은 기능이 수행되면 데이터 버스의 부하가 증가되어 3축 가속도 센서로부터 데이터를 전달받는 속도가 느려지게 된다. I²C나 SPI 인터페이스를 통하여 MPU와 연결되는 많은 센서 유닛들의 샘플링 속도는 결국 데이터 전송 속도에 의해서 최종적으로 결정되므로, MPU에 연결된 구성요소들이 많을수록, 각 구성요소들의 동작이 증가될수록, 센서 유닛에서의 데이터 샘플링 속도는 급격하게 저하된다. 데이터 샘플링 속도는 신호와 샘플링 데이터간의 정확성에 직접적인 영향을 주는 요소이기 때문에, 샘플링 속도가 저하되면 데이터의 정확성도 그만큼 낮아지게 된다. 이를 방지하기 위해서는 전용의 ADC와 다중의 데이터 포트를 사용하는

고성능의 MPU를 사용하면 되지만, 이는 비용과 크기를 증가시키게 되므로 저가의 보급형 유비쿼터스 기기에는 적절한 선택이 되기 어렵다.

본 연구에서는 보급형 기기에 적합한 MPU를 기반으로 하는 유비쿼터스 만보계를 설계할 때에 낮은 샘플링 속도로 생성된 데이터로부터 최적의 걸음 검출률을 도출할 수 있는 걸음 검출 알고리즘을 제안하고 실험을 통하여 그 유효성을 입증하였다. 실험 결과는 10Hz 이하의 낮은 샘플링 속도에서도 3% 이하의 오차율로 걸음을 검출할 수 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안하는 걸음 검출 알고리즘을 사용할 경우, 샘플링 주파수가 낮게 설계될 수밖에 없는 소형, 저가의 유비쿼터스 기기들을 매우 낮은 오차율로 효과적으로 구현할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 걸음 검출 방법에 대한 기존의 연구들을 살펴보고 기존의 데이터들을 분석하여 문제점을 파악하였다. 3절에서는 기존 걸음 검출 알고리즘을 개선하기 위한 실험 환경을 구축하고 데이터를 추출하여 필터링하는 과정을 기술하였다. 4절에서는 필터링된 데이터를 분석함으로써 낮은 샘플링 속도에서 걸음 검출 오차율을 최소화할 수 있는 새로운 걸음 검출 알고리즘을 제시한다. 그리고 5절에서는 새로운 걸음 검출 알고리즘에 대한 효용성과 적용 분야에 대하여 기술하였다.

2. 걸음 검출 알고리즘

2.1 국내의 연구 동향

걷기 운동은 모든 운동의 기본이기 때문에 스포츠 과학을 비롯한 여러 신체 운동 능력에 대한 측정 관련 연구들 중에서도 가속도 센서를 이용한 걸음수 검출에 관한 연구는 현재도 많은 연구자들에 의해 활발히 진행되고 있다. 디지털 기기와 디지털 센서들의 발달로 인하여 최근에는 2축, 또는 3축의 디지털 가속도 센서를 사용하는 연구가 일반화되고 있다[3].

국내에서 수행된 연관 연구들로는 착용자의 걸음걸이 패턴을 분석하기 위해 2축 가속도 센서를 사용하여 50Hz로 샘플링한 후 노이즈에 영향을 덜 받는 Moving Average 알고리즘을 적용하여 평균 91%의 정확도로 걸음을 검출하는 방법과[4], 발목에 부착된 2축 가속도 센서의 신호를 지시기, 추진기, 억제기, 필터치다운 과정으로 구분하고 이 과정을 모두 거친 경우에만 걸음수로 인정하는 걸음수 검출 기법으로 걷기에서 97.2%, 뛰기, 끌기에서 92.25%의 평균 정확도로 걸음을 검출하는 방법[5], 3축 가속도 센서를 흉부, 손, 바지에 부착하여 동작에 의한 중력방향의 가속도를 계산할 수 있는 알고리즘을 적용하여 걷는 동작에 대해서만 PDA용 프로그램을 통해 약 97%의 정확도로 걸음을 검출하는 방법 등이 연구된 바 있다[6]. 또한 적응적인 임계값을 사용하는 보행 횟수 검출 알고리즘을 사용하여 걷기, 제자리 걷기, 뛰기, 천천히 걷기 등의 각 상황별 걸음수를 평균 98.6% 정확도로 걸음을 검출하는 방법도 연구되었다[7].

해외의 대표적인 관련 연구 내용으로는 GMM(Gaussian Mixutre Model)과 HMM(Hidden Markov Model)을 이용하여 사용자의 행동상태를 인식하는 실시간 애플리케이션을 개발하거나 MEMS 센서를 이용하여 보행 상황에서의 걸음수를 구하여 보폭을 측정하고 이를 활용하는 헬스 모니터링 모바일 시스템 등이 있다[8, 9]. 이들 연구에서는 연속적으로 측정된 3축 데이터들로부터 피크 임계값(Peak Threshold)을 설정하여 피크 데이터를 찾아내어 걸음을 검출하는 피크 임계값 알고리즘(Peak Threshold Algorithm)을 공통적으로 사용하고 있다. 그러나 피크 임계값 알고리즘은 일정 수준 이상의 피크들을 모두 걸음으로 인정하기 때문에 걸음으로 검출된 값이 유효한 걸음이 아닌 노이즈값이 검출될 수도 있는 약점을 가지고 있다. 따라서 피크 임계값 알고리즘에 피크의 진폭을 같이 고려하여 실제 걸음인지 아닌지를 검사하는 가변 진폭 임계값 알고리즘(Variable Amplitude Threshold Algorithm)에 대한 연구가 수행되었다[10]. 이는 고정 피크 임계값과 에너지값(Et)의 진폭 크기로부터 구한 가변적 진폭 임계값을 같이 적용하여 걸음수를 검출하는 방식으로, 노이즈에 의한 걸음 검출 오차율을 줄일 수 있는 방법을 제공한다. 그러나 가변 진폭 임계값 알고리즘도 기본적으로는 피크 임계값 알고리즘을 사용하기 때문에, 낮은 샘플링 주파수에서도 걸음 검출 정확도가 저하되지 않도록 걸음 데이터를 분석하고 걸음 검출 오차율이 최소화될 수 있도록 피크 임계값 알고리즘을 개선할 필요가 있다.

2.2 피크 임계값 알고리즘

피크 임계값을 사용하는 걸음 검출 기법들에서는 센서 데이터의 에너지값 파형에서 걸음으로 인정되는 최소의 피크 에너지값을 설정하여 걸음을 검출한다. 임계값이 너무 작으면 실제 걸음보다 더 많은 걸음수가 검출될 가능성이 높고, 반대로 너무 높으면 실제 걸음보다도 적은 걸음수만 검출될 수 있다. 걸음은 걷는 유형과 속도에 따라서 매우 다른 피크 에너지값을 나타낼 수 있기 때문에 정확한 걸음 검출을 위해서는 걸음 유형에 따른 적절한 임계값이 필요하게 된다[7].

적절한 임계값을 도출하기 위해서는 사용하는 3축 가속도 센서의 특성과 기준 출력값들을 사전에 분석하여 실제 걸음수와 검출된 걸음수를 비교하는 방식으로 걸음 유형에 따른 가장 적절한 임계값을 계산한다. 본 연구에서는 피크 임계치에 대한 알고리즘 도출을 위하여 3절에서 기술하는 테스트 프로토콜에 의하여 각 걸음 유형과 샘플링 주파수에 따라서 실험을 수행하고 실험에 의하여 3축 가속도 센서의 출력들을 생성하였다. Fig. 1은 생성된 3축 센서 데이터를 에너지값으로 변환하고, 임계값을 설정하였을 때 임계값 이상의 피크값들이 걸음으로 검출되는 예를 보이고 있다.

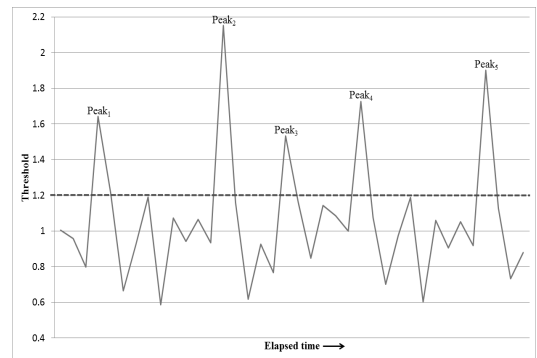
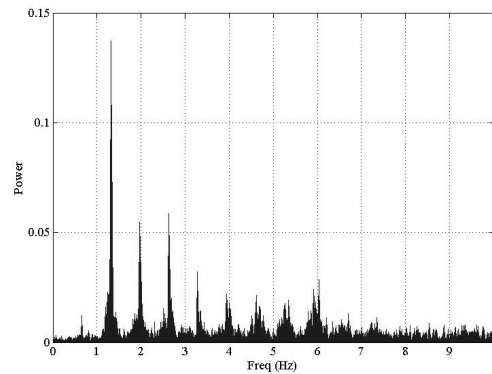
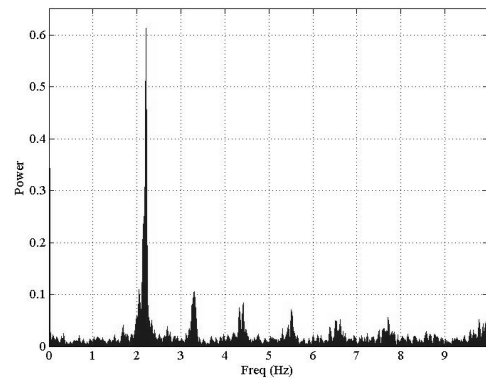


Fig. 1. Step detection with Peak Threshold from Energy value graph (5 steps detected at Threshold = 1.2)

각 걸음 유형에 대하여 가장 적절한 임계값은 여러 가지 실험에 의하여 결정될 수 있다. 그러나 피크 임계값에 의한 걸음 검출 방법은 3축 센서가 충분한 샘플링 주파수로 데이터를 샘플링하는 것을 그 전제조건으로 하고 있다. 이는 걸음 검출이 피크값을 기준으로 하는 것이기 때문에, 에너지값이 충분한 정밀도로 측정되지 않으면 피크를 놓치거나, 실제보다 낮은 피크로 인식되어 걸음으로 검출되지 않는 가능성이 높기 때문이다. 이 때문에 디지털 방식의 3축 가속도 센서는 에너지값의 피크를 나타내기에 충분한 샘플링 주기를 가져야 한다.



a) Slow walking



b) Normal walking

Fig. 2. Frequency spectrum from Step Energy waveform

사람은 걸음 유형에 따라서 다르지만 대체로 초당 1~4걸음, 즉 4Hz 이내의 주파수로 걷는다. 샘플링 이론에 의하면, 4Hz의 2배인 8Hz로 샘플링을 수행하면 충분한 파형 특성을 얻을 수 있다. 그러나 에너지값은 피크를 가지고 있기 때문에 샘플링 주파수는 8Hz가 아니라, 파형에 포함된 최고 주파수의 파형, 즉 피크 파형에 대한 주파수의 2배 이상이 되어야만 실제적으로 발생하는 피크들을 모두 포함할 수 있게 된다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 사용한 데이터 중, 천천히 걷기(Slow Walking)의 경우와 정상 걷기(Normal Walking)에 해당되는 데이터를 사용하여 걸음 에너지값에 대한 주파수 파워스펙트럼(Power Spectrum)을 분석한 결과이다. 분석 결과, 피크 데이터는 약 1~7Hz의 대역에 분포되어있기 때문에 올바른 피크 검출을 위해서는 최소 15Hz 이상의 주파수로 데이터 샘플링이 이루어져야만 한다.

2.3 기존 데이터 분석

3축 가속도 센서를 사용하여 수행된 이전 연구들에 의하면, 20Hz 이상의 샘플링 주파수를 사용하여 3축 가속도 데이터를 생성하고, 피크 임계값 알고리즘을 이용하여 걸음 분석을 수행하면 3% 미만의 오차로 걸음수를 측정할 수 있다[9]. 본 연구에서 생성된 걸음 데이터들도 걸음 유형에 따라서 피크 임계값을 적절하게 조정하면 이전 연구들과 유사한 정확도로 걸음수를 검출할 수 있었다. 그러나 3축 가속도 센서의 샘플링 속도가 20Hz 이하로 낮아질 경우에는 정확도가 급격히 낮아질 뿐만 아니라, 10Hz 이하로 낮아질 경우에는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 매우 심각한 걸음 검출 오차를 보인다. 이는 기존의 피크 임계값 알고리즘이 고정된 임계값을 사용하여 걸음을 검출하기 때문이다. 실제 실험 데이터를 분석한 결과는 10Hz 이하의 샘플링 주파수에서 걸음 검출 오차율(Error rate)이 급격하게 증가하게 되는데 이는 충분한 정밀도로 데이터를 샘플링하지 못하여 피크를 놓치거나 피크값이 실제보다 더 낮게 나타나는 경우가 증가되기 때문이다.

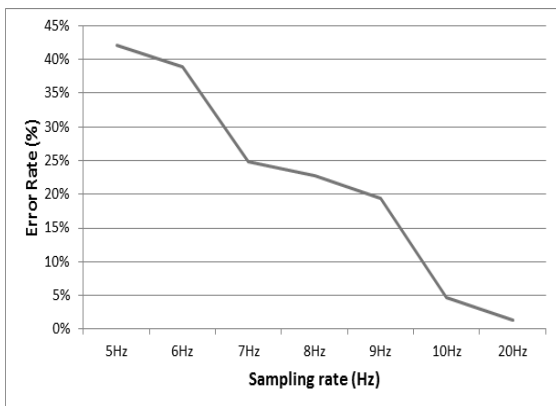


Fig. 3. Step detection Error rates vs. sampling frequencies (Normal walking with Peak threshold = 1.2)

서론에서 기술한 바와 같이, 3축 센서와 MPU 간의 인터페이스의 데이터 전송 속도와 대역폭이 충분히 제공될 경우, 20Hz 이상의 샘플링 주파수로 샘플링이 가능하므로 높은 정확도로 걸음을 검출할 수 있다. 그러나 저가의 유비쿼터스 기기용 MPU를 사용하면서 실제로 동작 가능한 최대 샘플링 주파수가 20Hz 이하가 될 경우, 걸음 검출 오차율이 증가하게 된다. 따라서 시스템 설계자는 충분한 데이터 전송 대역폭을 제공할 수 있는 보다 고성능의 MPU를 사용하여 설계하거나, 낮은 주파수에서도 걸음 검출 오차를 줄일 수 있는 알고리즘을 개발하여야 할 필요가 있다. 전자는 비용의 증가를 고려하여야 하기 때문에, 본 논문에서는 고정된 임계값을 사용하는 피크 임계값 알고리즘을 개선하여 걸음 검출의 정확도를 향상시킴으로써 20Hz 이상의 샘플링을 수행할 때와 유사한 오차율을 가질 수 있도록 하는 방법을 연구하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 3축 센서의 측정 데이터를 직접적으로 생성해낼 수 있도록 3축 센서와 저가의 MPU를 사용한 걸음 측정기를 설계, 구현하고, 이를 사용하여 다양한 샘플링 주파수에서 걸음 데이터를 생성하여 걸음 검출률을 분석함으로써 낮은 샘플링 주파수에서도 주파수에 따라 가장 최적으로 걸음 검출을 수행할 수 있는 방법을 도출하였다.

3. 실험 환경 및 데이터 처리

3.1 걸음 측정기의 설계 및 구현

걸음 검출 알고리즘 개선에 필요한 실험을 위하여 본 연구에서 사용한 걸음 측정기는 본 연구진과 u-Healthcare 기기 및 솔루션 전문업체인 Umedix(주)가 공동으로 설계, 제작한 LSM(Lifestyle Sensor Module)이라고 하는 범용 3축 가속도 측정 모듈이다. 이 측정 모듈은 3축 가속도 센서를 사용하여 모듈의 움직임을 감지하고 가속 변위 데이터를 블루투스 통신을 통하여 스마트폰과 같은 스마트 장치에 전송하는 기능을 가지도록 설계되어있다. 측정 모듈은 연산 장치와 블루투스 송수신 장치가 복합된 CSR의 블루투스 통신 전용 MPU(BlueCore4-External)와 BOSCH사의 3축 가속도 센서(BMA250)를 기본으로 설계, 구현되었다[11]. MPU에는 3축 가속도 모듈 외에도 측정된 데이터를 내부적으로 저장하기 위한 1Mbit EEPROM(M24M01)과 실시간클럭(RTC : Real Time Clock), 그리고 USB 데이터 인터페이스를 내장하고 있다[12]. 대부분의 저가형인 소형, 저전력 유비쿼터스 장치들과 마찬가지로, LSM의 MPU는 장치 간 인터페이스로 I²C를 사용하여 각 장치들을 제어하고 데이터를 전송하거나 전송받도록 되어있다. 또한 MPU 내에는 태스크를 제어하고, 블루투스 전송을 제어하는 가상 머신(VM : Virtual Machine)이 내장되어있다. 따라서 본 연구에서는 3축 가속도 센서가 측정한 3축 데이터들을 블루투스 네트워크를 통하여 실시간으로 스마트기기에 전송하거나 사용자가 원하는 순간에 일괄 전송될 수 있도록 하는 기능을 가지는 펌웨어를 별도로 구현하였다. 측정 모듈에서 사용된 3축 가속도

센서는 x, y, z 각 방향의 가속도 요소에 해당하는 출력에 갖춘 동작 인식 센서로, 동작 범위를 2g, 4g, 8g, 16g로 설정할 수 있다. 측정된 x, y, z 데이터의 출력, 즉 데이터 셋(Data Set)은 각각 Sign bit(MSB)를 포함하여 총 10bit이지만 EEPROM 저장과 블루투스 통신을 위해서 Sign bit를 포함한 상위 8bit만 사용하였다.

각 데이터 셋의 값은 센서를 어떻게 위치하였는지에 따라서 다른 값이 출력된다. LSM을 허리에 부착하고 움직이지 않았을 경우 3축 가속도 센서의 데이터 셋은 x=1g, y=0g, z=0g이다.

3.2 실험 환경

1) 테스트 프로토콜

분석에 필요한 데이터를 도출하기 위하여 본 연구에서는 Table 1와 같은 테스트 프로토콜을 설정하고, 이에 따라 각각 실험자별로 실험을 수행하였다. 측정 모듈에서의 샘플링 주파수는 5Hz에서 10Hz까지의 반복 측정과 20Hz에서의 측정을 모두 실시하였다. 모든 실험자들은 각 샘플링 주파수에 대하여 천천히 걷기, 보통 걷기 및 조깅의 3가지 유형으로 각각 100걸음씩을 걷은 후에 결과를 저장하도록 하여, 1인당 실험 횟수는 21회씩 수행되었다. 일반 걷기는 성인 남성의 보행 평균 속도로 초당 평균 2.4걸음을 걷는 것으로 하였고, 천천히 걷기는 이보다 느린 초당 평균 1.1걸음, 조깅은 초당 평균 3걸음 정도를 기준으로 실험하였다.

Table 1. Test Protocol Parameters

Test parameter	Values
실험자 수	5(Men)
키	168~183(cm)
몸무게	45~81(kg)
샘플링 주파수	5~10Hz, 20Hz
걸음 횟수	100(걸음)
걸음 모드	천천히 걷기(1.1step/sec) 보통 걷기(2.4steps/sec) 조깅(3.2steps/sec)
센서 민감도	2G

2) 데이터의 처리

측정 모듈로부터 측정된 3축 가속도 데이터 셋들은 SVM 알고리즘에 의하여 Equation (1)과 같이 각각의 데이터 셋을 하나의 에너지값 E_t 로 변환한다[13]. 이는 각 셋의 x, y, z 가속도값들을 개별적으로 처리하여 걸음을 검출하는 것보다 처리 과정이 단순해지고 걸음 검출에 걸리는 시간을 단축할 수 있게 해준다.

$$E_t = \sqrt{|x_t|^2 + |y_t|^2 + |z_t|^2} \quad (1)$$

데이터 샘플링 시간에 따른 에너지값의 변화는 결국 3차원 운동의 변화를 나타내는 것이므로, 에너지값을 분석함으로써 걸음 검출 알고리즘을 적용할 방법을 연구할 수 있다.

3) 데이터 필터링

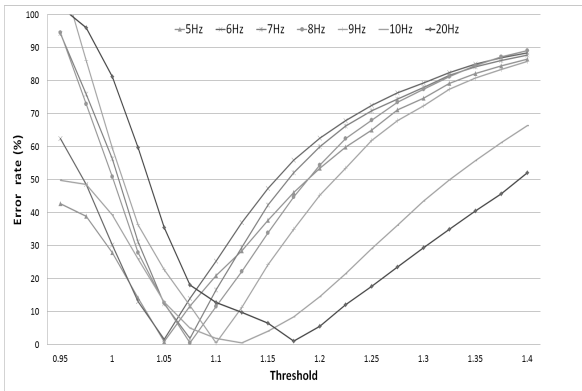
본 연구에서 사용된 3축 가속도 센서는 측정된 3축 데이터를 센서에서 내부적으로 디지털로 변환하여 직접 MPU로 전송하도록 설계되어있다. 따라서 3축 가속도 센서와 MPU 사이에서는 노이즈 필터링을 하드웨어적으로 수행할 수 없다. 그러므로 SVM 알고리즘을 통하여 변환된 에너지값에 포함된 노이즈를 제거하기 위해서는 걸음 검출 알고리즘에서 소프트웨어적인 필터링을 수행하도록 한다.

소프트웨어 필터링은 성인의 일반적인 걸음수를 분석함으로써 필터링에 필요한 기준을 설정하여 수행한다. 성인의 경우, 일반적으로는 2초 동안 약 2~5걸음을 걷고, 조깅과 같이 뛰는 경우에는 5~7걸음을 걷는다[10]. 따라서 한 번 피크가 검출된 후 일정 시간 간격 이내에 또 다른 피크가 검출되면, 걸음 검출 알고리즘은 이를 노이즈로 판단하여 필터링하게 된다. 본 연구의 걸음 검출 알고리즘은 천천히 걷기의 경우 0.7초 이내, 보통 걷기의 경우는 0.4초 이내, 그리고 조깅의 경우에는 0.25초 이내에 또 다른 피크가 발생할 경우 걸음 검출에서 제외하도록 설계하였다.

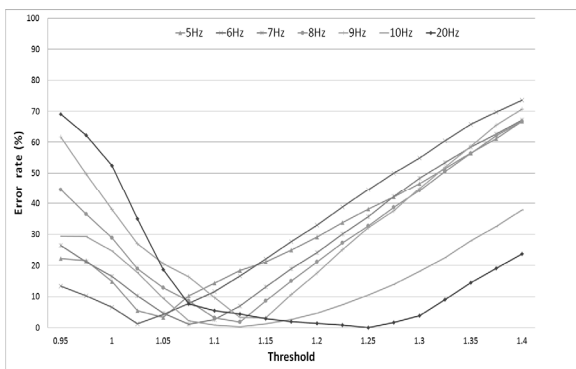
4. 걸음 검출 알고리즘의 개선

걸음 검출과 분석은 실험 중에 실시간으로 처리할 수도 있지만 실험 후의 사후 분석으로 보다 정확한 걸음 검출 및 분석을 할 수 있다. 테스트 프로토콜에 따라서 실험을 수행하고, 저장한 결과를 분석하기 위하여 별도의 걸음 검출 및 분석 프로그램을 구현하고, 피크 임계값 알고리즘의 임계값(에너지값)을 0.9~1.7 사이로 변화시키면서 걸음 검출을 수행하였다[14]. Fig. 4는 각 걸음 유형과 샘플링 주파수에 대하여 분석 프로그램으로 검출한 걸음수와 실제 걸음수와의 차이에 대한 오차율을 나타내고 있다.

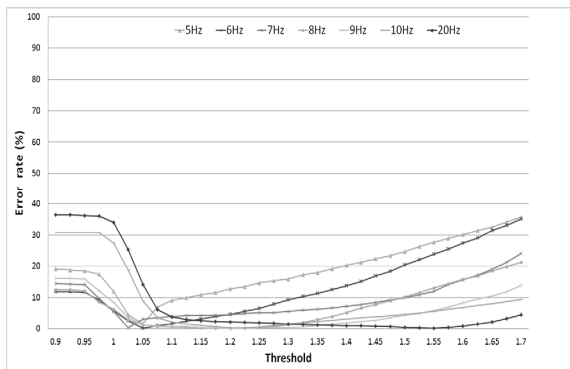
Fig. 4의 결과를 분석해보면, 샘플링 주파수가 달라지면 걸음 검출의 정확도가 가장 높아지는, 즉 실제 걸음수에 근접하는 걸음수를 검출해내는 피크 임계값이 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 걸음 유형에 따라서도 달라지지만, 대체로 샘플링 주파수가 낮아질수록, 걸음 검출 정확도가 가장 높아지는 임계값도 낮아지는 결과를 볼 수 있다. 특히 Fig. 5a는 이러한 특성을 뚜렷이 보여주고 있다. 따라서 샘플링 주파수가 낮아지게 되면, 그에 따라서 임계값도 적절하게 변경해주어야만 검출 정확도가 높아지는데, Fig. 4의 그래프들은 검출 정확도가 가장 높아지는, 즉 오차율이 가장 낮아지는 임계값과 샘플링 주파수 간에 일정한 함수관계가 있음을 나타내고 있다.



a) Slow walking



b) Normal walking



c) Jogging

Fig. 4. Error rate Err vs. Peak Threshold values according to the sampling rates

Fig. 5는 각 걸음 모드에 대하여 샘플링 주파수에 대한 최적의 피크 임계값을 나타내고 있다. 최적의 피크 임계값은 해당 샘플링 주파수로 실험을 수행한 결과에 대하여 피크 임계값을 변화시키면서 걸음을 검출하였을 때 오차율이 가장 낮아지는 경우의 임계값으로 정의된다. 그래프의 결과가 나타내는 바와 같이, 센서의 샘플링 주파수와 최적의 임계값과는 대략적으로 일차함수 관계가 존재한다는 사실을 확인할 수 있다.

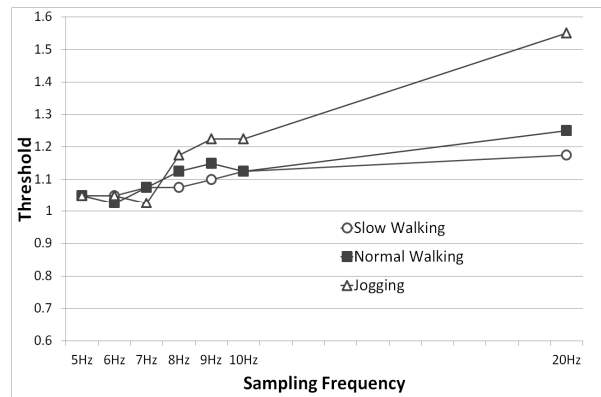


Fig. 5. Optimal Peak Thresholds vs. Sampling rates

Fig. 5의 결과에 따라서 3축 센서의 샘플링 주파수가 낮은 경우에는 낮은 임계값을 사용하여 걸음을 검출하여야 하고, 주파수가 증가할수록 높은 임계값을 사용하여 걸음수를 검출하여야 한다. 따라서 샘플링 주파수에 대한 최적의 임계값은 Equation (2)와 같은 임계 함수(Threshold Function) $F_{Th}(freq)$ 로 도출될 수 있다.

$$F_{Th}(freq) = angle_Th \cdot freq + Th_Shift \quad (2)$$

Equation (2)에서 $angle_Th$ 는 Fig. 5의 그래프에서 구해지는 기울기의 평균을 나타내고, Th_Shift 는 그래프의 절편을 나타낸다. $freq$ 는 3축 가속도 센서의 샘플링 주파수가 된다. 본 연구에서 제시된 조건과 테스트 프로토콜에 따라서 실험한 결과 데이터를 *MatLAB*의 회귀 분석 모듈을 이용하여 분석한 결과, $angle_Th$ 는 0.011873, Th_Shift 는 -0.73332가 도출되었다. Fig. 6은 도출된 임계 함수 $F_{Th}()$ 을 이용하여 샘플링 주파수에 따라서 가장 알맞은 임계값을 사용하여 걸음수를 검출한 결과를 나타내고 있다. 동일한 테스트 프로토콜에 의하여 실험을 수행한 결과, 천천히 걷기에서는 평균 1.1%, 보통 걷기에서는 평균 2.3%, 그리고 조깅의 경우에는 5Hz의 경우를 제외하면 0.2% 미만의 오차율을 보이고 있다. 그러므로 걸음 검출 알고리즘이 걸음 모드에 따라서 적절히 결정된 함수관계로부터 샘플링 주파수에 적합한 임계값을 사용하여 걸음을 검출한다면, 걸음 검출 및 걸음수 측정의 정확도는 매우 높아질 수 있게 된다.

5. 결 론

피크 임계값을 사용하는 걸음 검출 알고리즘에서 충분한 정확도로 걸음을 검출하기 위해서는 3축 가속도 센서가 20Hz 이상의 주파수로 샘플링을 수행하여야 한다. 그러나 I²C나 SPI를 통하여 데이터를 전송받는 저가의 MPU와 연결되는 디지털 센서 장치들의 샘플링 주파수는 아날로그 방식의 샘플링 회로들에 비하여 매우 낮은 경향이 있다. 센서의 샘플링 주파수가 낮게 되면 충분한 데이터를 확보할 수 없기 때문에 측정 결과의 정확도를 보장할 수 없게 된다.

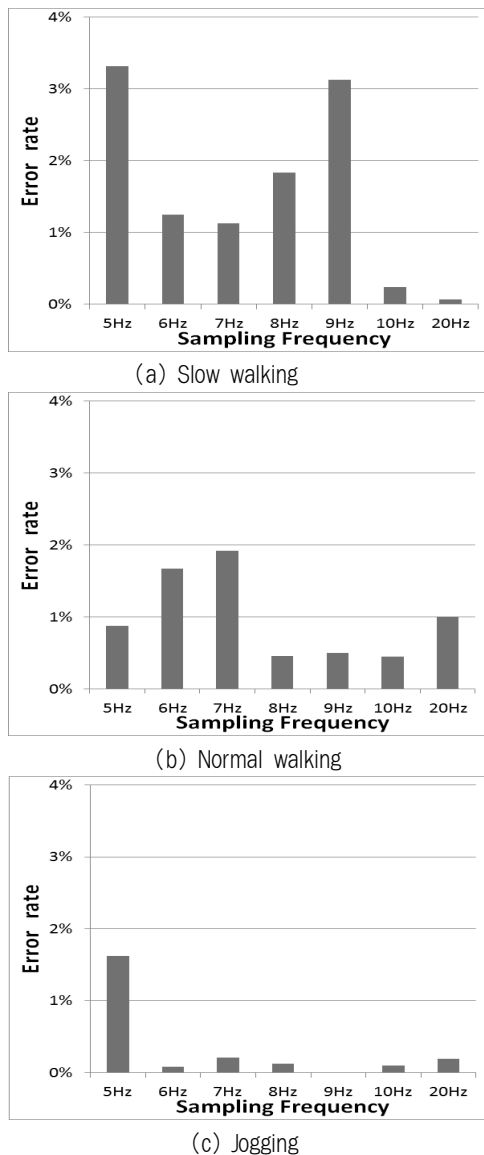


Fig. 6. Error rates vs. sampling rates with Threshold Function

본 연구에서는 피크 임계값 방식의 걸음수 측정 알고리즘에서 데이터가 20Hz 이하의 낮은 주파수로 샘플링될 경우에 샘플링 주파수와 피크 임계값 사이에 함수관계가 있음을 발견하였으며, 실험을 통하여 이를 증명하고, 임계 함수를 도출하였다. 실험 결과, 고정 임계값을 사용한 경우에 비하여 임계 함수를 이용하여 샘플링 주파수에 적합한 임계값을 가변적으로 적용할 경우, 걸음 검출 정밀도가 매우 향상될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구 결과는 걸음수 측정 장치에서만 적용되는 것이 아니라, 샘플링 주파수가 낮게 설계될 수밖에 없는 소형, 저가의 유비쿼터스 기기의 정확도를 향상시켜줄 수 있다는 점에서 그 범용성이 높다고 할 수 있다. 유비쿼터스 기기의 활용이 증가될수록, 그리고 스마트폰과 같은 스마트기기의 사용이 증가될수록, 소형, 저가의 기기에 대한 수요는 계속적으로 증대될 것으로 예상된다. 따라서 낮은 샘플링 주파

수에 의하여 생성된 데이터로부터 최대의 정밀도를 얻을 수 있는 방법들에 대한 연구는 앞으로도 지속적으로 수행될 수 있을 것으로 예상된다.

References

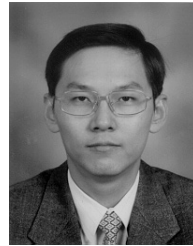
- [1] Tan Joshep, "E-Health Information System," San Francisco : Jossey-Bass, 2005.
- [2] C. V. Bouten, K. T. Koekkoek, M. Verduin, R. K. Kodde and J. D. Janssen, "A triaxial accelerometer and portable data processing unit for the assessment of daily physical activity," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.44, No.3, pp.136-147, 1997.
- [3] R.boulic, N. M. Thalmann, "A Global Human Waling Model With Realtime Kinematic Rersonification," *The Visual Computer*, Vol.6, pp.344-358, 1991.
- [4] I. H. Lee, J. C. Kim, S. M. Jung, and Sun K. Yoo, "The Detection of Gait Cycle and Realtime Monitoring System Using the Accelerometer," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, CICS 2008, pp.476-477, 2008.
- [5] Han-Jin Jang, Jeong Won Kim, and Dong-Hwan Hwang, "Design of a Robust Pedometer for Personal Navigation System against Ground Variation and Walking Behavior," *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers D*, Vol.55, No.9, pp.420-422, 2006.
- [6] Kim Nam-Jin, Hong Joo-Hyun, and Lee Tae-Soo, "Motion Sensor data Normalization Algorithm for Pedestrian Pattern Detection," *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol.5, No.4, pp.94-102, 2005.
- [7] Yun-Kyung Kim, Sung-Mok Kim, Hyung-Suk Lho and We-Duke Cho, "Real-Time Step Count Detection Algorithm Using a Tri-Axial Accelerometer," *Journal of Korean Society for Internet Information*, Vol.12, No.3, pp.17-26, 2011.
- [8] R.W DeVaul, S. Dunn, Real-time motion classification for wearable computing applications, Technical report, MIT media LAB, 2001.
- [9] S.H. Shin, C.G. Park, "Adaptive Step Length Estimation Algorithm Using Low-Cost MEMS Inertial Sensors," *IEEE Sensors Applications Symposium*, San Diego, California USA, pp.1-5, 2007.
- [10] U. J. Ryu, E. T. Kim, K. H. Ahn, and Y. S. Chang, "Accuracy Improvement Method of Step Count Detection Using Variable Amplitude Threshold," *The KIPS Transactions on Computer and Communication System*, Vol.2, No.6, 2013.
- [11] "BMA250 Datasheet," BOSCH.
- [12] CSR BlueCore4-Ext Specification, CSR, Cambridge, 2009.
- [13] D. M. Karantonis, M. R. Narayanan, M. Mathie, N. H. Lovell and B. G. Geller, "Implementation of a real-time human movement classifier using a triaxial accelerometer for ambulatory monitoring," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol.10, No.1, pp.156-165, 2006.
- [14] K. H. Ahn, E. T. Kim, U. J. Ryu, and Y. S. Chang, "Implementation on SVM based Step Detection Analyzer," *Proceedings of the 2013 KMMS Conference*, Korea Multimedia Society, 2013.



김보연

e-mail : wiki139@naver.com
1990년 이화여자대학교 전자계산학과(이학사)
1991년 서울대학교 전자계산기공학과(공학석사)
1998년 서울대학교 협동과정 의용생체공학전공(공학박사)

2000년~2006년 강원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수
2006년~2010년 한양대학교 정보시스템학과 겸임교수
2014년~현재 한양대학교 컴퓨터공학부 연구교수
관심분야 : 인공지능, 의사 결정 시스템, 의료정보, 생체 신호
계측 및 분석 등



장윤석

e-mail : cosmos@daejin.ac.kr
1988년 서울대학교 물리학과(이학사)
1990년 서울대학교 전자계산기공학과(공학석사)
1998년 서울대학교 컴퓨터공학과(공학박사)
1994년~현재 대진대학교 컴퓨터공학과

교수
2000년~2001년 University of Southern California, Dept. of
EE-Systems, Visiting Scholar
관심분야 : 컴퓨터 시스템 설계, 마이크로 임베디드 시스템,
RFID, 스마트 모바일 시스템 등