

상보필터를 이용한 줄넘기 회전운동 검출

유병현 · 허경용*

Detection of Rotations in Jump Rope using Complementary Filter

Byeong-Hyeon Yoo · Gyeongyong Heo*

Department of Electronic Engineering, Dong-eui University, Busan 47340, Korea

요 약

줄넘기와 같은 반복적인 운동들의 횟수를 측정하는 방법은 다양하다. 그 중 대표적으로 가속도 센서의 가속도 값 또는 자이로스코프 센서의 각속도 값을 이용하여 파형과 데이터의 특징을 추출하고 선택한 후 선택한 특징을 알고리즘에 적용하여 측정하는 방법이 있다. 하지만 고정되지 않고 유동적인 운동들은 다양한 변수가 존재한다. 이러한 경우의 수를 하나의 센서만으로 찾기 쉽지 않으며, 잡음과 진동에 취약한 가속도계와 드리프트 현상이 발생하는 각속도의 문제점으로 인하여 정확한 줄넘기 개수를 세는데 다소 정확도가 떨어지는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 기존의 방식인 단일 센서만의 값으로 회전운동을 검출하는 방법의 문제점을 개선하기 위해 가속도와 각속도의 데이터 값에 상보 필터를 적용하고, 가속도와 각속도 값이 상호보완 하여 서로의 문제점을 최소화하여 보다 정확한 개수를 측정할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 센서 값의 특징만을 보고 판단하는 방법과 비교하여 정확하게 줄넘기 개수를 측정하는 것을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

ABSTRACT

There are various methods to count the number of repetitive motions such as jump rope. Most of the methods use features extracted from the time-varying waves of acceleration or angular velocity, which is the main feature in the count of rotations in jump rope. However, there exist several variables and it is not easy to find the count with a single sensor. For example, accelerometer is susceptible to noise and vibration, and the angular velocity may cause a drift phenomenon, which is the main cause of the inaccurate count of jump rope rotation. In this paper, complementary filter is used to consider two sensors simultaneously and complement each other, which results in more accurate count in jump rope rotation. The proposed method can count the exact number of jump rope rotation compared to other existing methods only using one sensor value, which is confirmed through experimental results.

키워드 : 가속도, 각속도, 상보필터, 회전운동

Key word : Acceleration, Angular velocity, Complementary filter, Rotation motion

Received 07 October 2016, Revised 14 October 2016, Accepted 18 October 2016

* Corresponding Author Gyeongyong Heo (E-mail:hgycap@deu.ac.kr, Tel:+82-51-890-1675)
Department of Electronic Engineering, Dong-eui University, Busan 47340, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkice.2017.21.1.8>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

줄넘기는 뛰어오르는 동작과 줄을 돌리는 동작 두 가지로 구분할 수 있다. 먼저 뛰어오르는 동작은 상하로 움직이는 수직운동이며, 가속도계로 가속도의 변화를 측정하여 움직임을 확인할 수 있다. 다음으로 줄을 돌리는 회전운동은 가속도계를 이용하여 회전 각속도의 변화를 측정한다[1-3]. 이 두 동작을 동시에 측정하기 위하여 6축 가속도 자이로 센서를 사용한다[4-6]. 하지만 6축 가속도 자이로 센서는 잡음과 진동에 취약한 가속도 센서의 가속도 값과 드리프트 현상이 발생하는 자이로스코프의 회전 각속도 값만으로는 정확한 개수 측정에 어려움이 있다.

본 논문에서는 가속도계와 각속도계에서 발생하는 문제점을 해결하기 위한 방법으로 상보 필터를 적용하여 가속도계의 상하움직임에 대한 문제점은 회전 각속도의 비중을 높여 줄여주고, 회전 각속도의 드리프트현상으로 발생하는 문제점을 가속도계의 비중을 높여 감소시키는 새로운 줄넘기 회전운동 검출 방법을 제시한다[7, 8].

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장의 1절에서는 6축 가속도 자이로 센서에 대하여 설명하고, 2장 2절에서는 상보 필터에 대해 설명한다. 3장에서는 기존의 방법과 비교하며, 제안하는 방법을 소개하고, 4장에서는 실험 및 결과를 통하여 제안하는 방법의 유효성을 보인다. 마지막 5장에서 4장의 실험결과를 바탕으로 결론 및 향후 연구방향에 대해서 언급한다.

II. 회전운동 검출을 위한 이론

2.1. 6축 가속도 자이로 센서

줄넘기 회전운동을 검출하기 위해서는 하드웨어 장치가 필요하다. 위치변화가 계속적으로 발생하는 줄넘기 운동은 엔코더 센서와 같이 고정점을 기준으로 상대 각도를 측정하기에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 그 대안으로 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 관성 센서를 이용하여 움직임을 측정한다. 관성 센서는 인가되는 가속도에 의해 관성체에 작용하는 관성력을 검출하는 것이 기본 원리이며, 운동의 관성력을 검출하여 측정 대상인 움직이는 물체

의 가속도, 속도, 방향, 거리 등 다양한 항법 관련 정보를 제공하는 부품이다. 이 센서는 가속도계와 각속도계 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 가속도계는 출력신호를 처리하여 물체의 가속도, 진동, 충격 등의 동적 힘을 측정하고, 물체의 운동 상태를 상세하게 감지할 수 있어 자동차, 기차, 선박, 비행기 등 각종 수송수단 및 로봇 등의 제어시스템에 필수적인 센서로 활용 분야가 아주 넓고, 다양한 용도로 사용된다. 다음으로 각속도계는 자이로스코프로도 불리며, 기본적으로 회전하는 물체의 역학운동을 이용한다. 지구의 회전과 관계없이 높은 정확도로 항상 처음에 설정한 일정 방향을 유지하는 성질을 이용하여 물체의 방위 변화를 측정하는 센서이다. 위치 측정과 방향 설정 등에 활용되는 기술로서 항공기, 유도 무기, 차량 등 다양한 분야에서 항법용, 자세 제어용 등으로 사용되며 스마트폰, 리모컨, 비행기나 위성의 자세제어 장치 등에도 쓰인다.

실험 환경과 대상이 정해져 있는 조건하에서는 줄넘기의 횟수만을 세는 것은 앞에서 언급한 가속도계와 각속도계 두 센서 중 하나의 센서만을 사용하여도 큰 오류 없이 정확한 측정이 가능하다. 하지만 사람의 성별, 나이, 신체조건 및 주변 환경을 모두 고려한다면, 많은 변수들이 존재하여 하나의 센서만으로는 정확한 회전운동을 검출하기가 어렵다. 때문에 이 논문에서는 모든 상황을 고려함으로 인해 발생하는 여러 변수들을 처리하기 위한 방안으로 가속도계와 각속도계 두 센서를 동시에 사용 가능한 6축 가속도 자이로 센서인 MPU-6050을 사용한다. MPU-6050은 3축가속도계와 3축 각속도계가 조합된 움직임추적이 가능한 DMP(Digital Motion Processor)이다.

DMP는 비용이 저렴하고 전력 소비가 적으며 높은 정확성과 강한 내구성을 가지고 있다. DMP는 대부분 스마트폰에서 사용되고 있으며, 최근에는 드론, 증강현실, 네비게이션 등에도 적용되고 있다. 규격은 Quad Flat Non-Leaded(QFN)로서 4*4*0.9mm에 실장되었고, 작고 얇아 하드웨어 제작에 용이하다. 통신은 I2C 방식을 따르며, 속도는 400kHz이다. 가속도계와 각속도계 각각의 3축의 값을 16-bit ADC(Analog to Digital Convert)로 디지털화하여 출력한다. 출력 값의 범위는 가속도계 full-scale 범위가 $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ 그리고 $\pm 16g$ 이고, 각속도계의 full-scale 범위는 $\pm 250^\circ/\text{sec}$, $\pm 500^\circ/\text{sec}$, $\pm 1000^\circ/\text{sec}$ 그리고 $\pm 2000^\circ/\text{sec}$ 가 있다.

며 사용자가 직접 프로그램하여 선택가능하다.

2.2. 상보 필터

MPU-6050의 성능은 우수하나, 하드웨어의 한계는 존재한다. 이는 소프트웨어로 해결해야하며, 그 방법으로 필터를 적용한다. 가속도계와 각속도계를 병합하여 사용하는 방법 중에 대표적으로 칼만 필터와 상보 필터를 이용한 방법이 많이 사용되고 있다[9, 10]. 그러나 칼만 필터는 설계 시 복잡한 수학적 문제를 다루어야 하고, 실제 구현에서 많은 연산량을 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 상보 필터는 상대적으로 설계가 간단하여 연산량이 적은 장점을 가진다. 이 필터의 원리는 연속적으로 입력 받는 값에 있어 그 값의 이전 값을 이용하여 보정된 값을 구하는 재귀 필터 중 하나이다. 아래 식 (1)을 이용하여 센서에서 얻은 데이터로부터 각도를 구할 수 있다.

$$\theta_{complementary} = \alpha * (\theta_{complementary} + \theta_{gyro}) + \beta * \theta_{acc} \quad (1)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2)$$

이때 α 는 각속도로 구한 각도 값의 가중치를 결정하고, β 는 가속도계로 구한 각도 값의 가중치를 결정한다. 정확성이 중요시될 때는 각속도의 가중치 α 값을 높이고, 속도가 중요시될 때는 가속도의 가중치 β 값을 높여서 조절한다. 단, α 와 β 의 가중치의 합은 1이라는 조건이 있다. dt 는 각속도의 적분 시간을 뜻한다. θ_{acc} 는 가속도 값으로 구한 각도이고 θ_{gyro} 는 각속도 값으로 구한 각도이다.

$$\theta_{accx} = atan2(y_i/z_i) \quad (3)$$

$$\theta_{accy} = atan2(x_i/z_i) \quad (4)$$

$$\theta_{accz} = atan2(x_i/y_i) \quad (5)$$

식 (3)은 가속도계 y축과 z축을 이용하여 x축을 기준으로 한 각도를 구하고, 식 (4)는 가속도계 x축과 z축을 이용하여 y축을 기준으로 한 각도를, 식 (5)는 가속도계 x축과 y축을 이용하여 z축을 기준으로 하는 각도를

구한다. 식 (6), (7), (8)은 각속도에 적분시간을 곱하여 각도를 구한다.

$$\theta_{gyro,x} = v_{angular\ velocity,x} * dt \quad (6)$$

$$\theta_{gyro,y} = v_{angular\ velocity,y} * dt \quad (7)$$

$$\theta_{gyro,z} = v_{angular\ velocity,z} * dt \quad (8)$$

식 (6),(7),(8)은 각각 각속도계 x, y, z축을 기준으로 하는 각도를 뜻한다. dt 는 적분 시간을 뜻하고 적용하는 곳에 따라 적절히 조절해 주어야 한다.

III. 제안하는 방법

가속도와 각속도 중 하나의 값만으로는 줄넘기 회전운동과 같은 다양한 패턴이 존재하는 움직임을 감지하여 판단하기에는 무리가 있다. 또한 두 개의 혹은 그 이상의 센서를 사용하여도 해결되지 않는 문제가 존재한다. 가속도계의 경우 센서의 중심축이 회전중심축과 일치하지 않으면 병진운동성분이 포함되어 오차가 발생하고, 각속도계의 경우는 적분 오차가 누적되는 드리프트 현상으로 오류가 발생한다. 현재까지는 MPU-6050 뿐 아니라 모든 센서들은 오차를 항상 동반하며, 이 오차는 소프트웨어를 이용하여 어느 정도 개선이 가능하다.

그림 1은 MPU-6050으로부터 얻은 3축 가속도 값과 3축 각속도 값을 보여준다. 기존의 방식은 단일 센서에서 얻은 데이터로부터 특징을 추출한다. 그리고 적절한 특징을 선택하여 알고리즘을 통해 줄넘기 횟수를 측정한다. 그림 1의 (a)와 (b)의 파형에서는 잡음들이 많이 존재하며, 데이터 수치를 들여다보면 센서 및 통신상의 문제로 전혀 엉뚱한 값이 생성됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 줄넘기 회전운동을 검출하는 방법으로 6축 가속도 차이로 센서와 상보필터를 이용하여 단일 센서만을 사용하여 발생하는 오차와 하드웨어 자체의 오차를 최소화하여 보다 정확한 측정을 얻고자 한다.

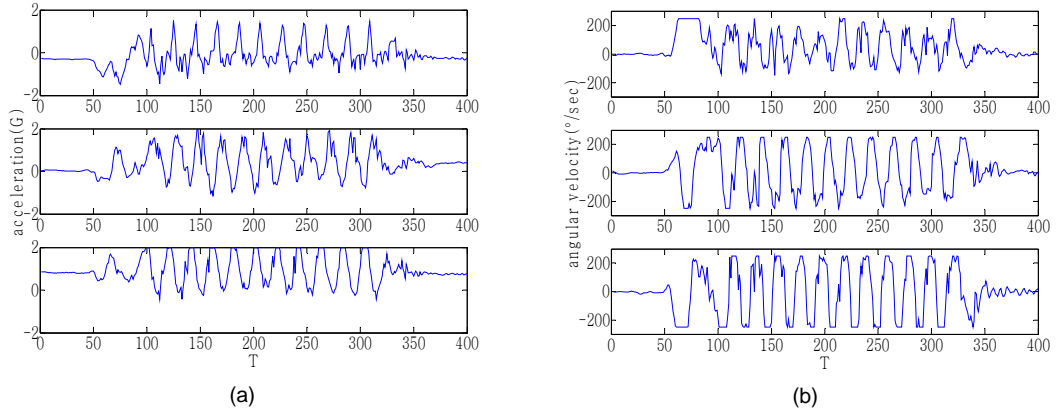


Fig. 1 Acquired data from MPU-6050 (a) acceleration of x, y, z axis (b) angular velocity of x, y, z axis

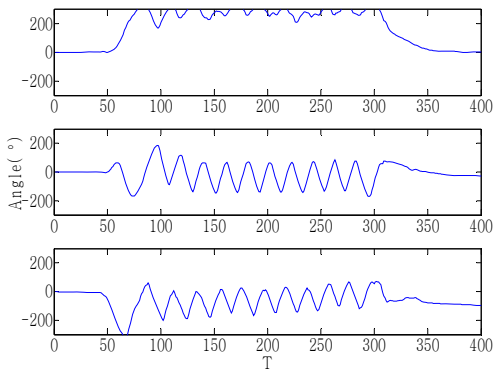


Fig. 2 Rotation angle of x, y, z axis with complementary filter

그림 2는 그림 1의 가속도와 각속도의 데이터에 상보 필터를 적용하여 구한 회전 각도를 나타낸다. 비교적 그림 1의 파형보다 눈에 띄게 잡음이 줄었음을 확인할 수 있으며, 값의 오류도 보완해주는 것을 알 수 있다. MPU-6050 모듈은 가속도계와 자이로스코프 센서 모두 y축이 비교적 가장 안정적인 값을 출력하고, 파형 또한 직관적으로 줄넘기 횟수를 측정하기에 적합함을 그림 1에서 확인할 수 있다.

이 논문에서의 실험은 높은 정확도를 얻기 위해 각속도 y축을 기준 축으로 두고, 동일한 조건을 위해 상보 필터를 적용한 데이터 또한 y축을 기준으로 줄넘기 회전운동을 검출한다. 줄넘기 회전운동의 특징으로는 파형, 극대 및 극소점, 주기 및 각 3축의 크기의 합이 있

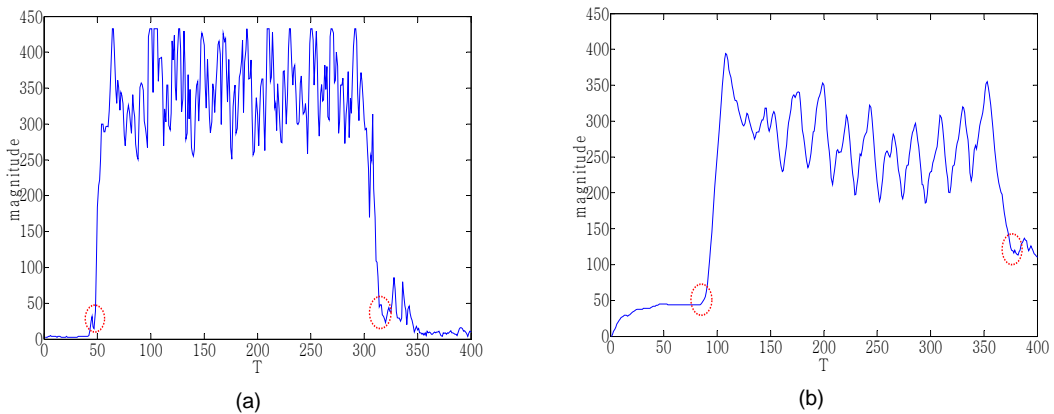


Fig. 3 Sum of 3 axis magnitude (a) Sum of 3 axis magnitude of angular velocity (b) Sum of 3 axis magnitude of rotation angle

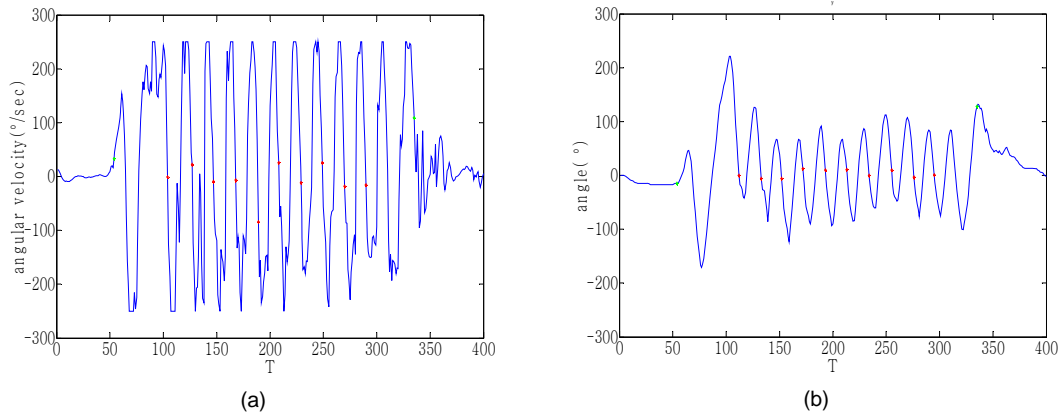


Fig. 4 Angular velocity and rotation angle cycle (a) Angular velocity cycle of y axis (b) Rotation angle cycle of y axis

며, 이 네 가지 특징을 이용하여 줄넘기 횟수를 측정하고 비교분석한다. 그림 3은 각속도 및 회전각도의 3축 크기의 합을 구한 것을 보여준다.

그림 3에서 처음 급격히 증가하는 첫 지점과 마지막 급격히 감소하는 끝 지점이 표시되어있다. 이것은 언제 줄넘기가 시작되었고, 언제 끝이 나는지 알 수 있게 해준다. 그림 3의 (a)는 잡음이 많이 보이지만 시작점과 끝나는 지점을 찾는 것은 그림 3의 (b)와 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. 줄넘기의 시작과 끝을 미리 찾으면 줄넘기를 하지 않을 때 발생하는 오류를 사전에 제거할 수 있다. 3축의 크기의 합은 아래 식(9)를 이용하여 계산한 것이다.

$$magnitude_{x,y,z} = \sqrt{(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)} \quad (9)$$

식 (9)에서 x_i 는 x축 성분의 값, y_i 는 y축 성분의 값, z_i 는 z축 성분의 값을 나타낸다.

그림 4는 y축 회전 각속도 및 회전각도의 한 주기마다의 각 지점에 점을 찍은 것이다. 그림 4의 (a)는 0을 중심으로 하였을 때, 주기의 위치가 많이 벗어남을 볼 수 있다. 이는 하드웨어의 한계로 값이 손실되는 현상과 빠른 변화가 맞물려서 생기는 현상이다. 값이 일정한 간격을 갖지 못하고 급격하게 변하기 때문에 그림 4의 (a)에서 보듯이 주기가 기준점에서 많이 벗어나는 현상이 생겨난다. 반면 상대적으로 그림 4의 (b)에서는 값

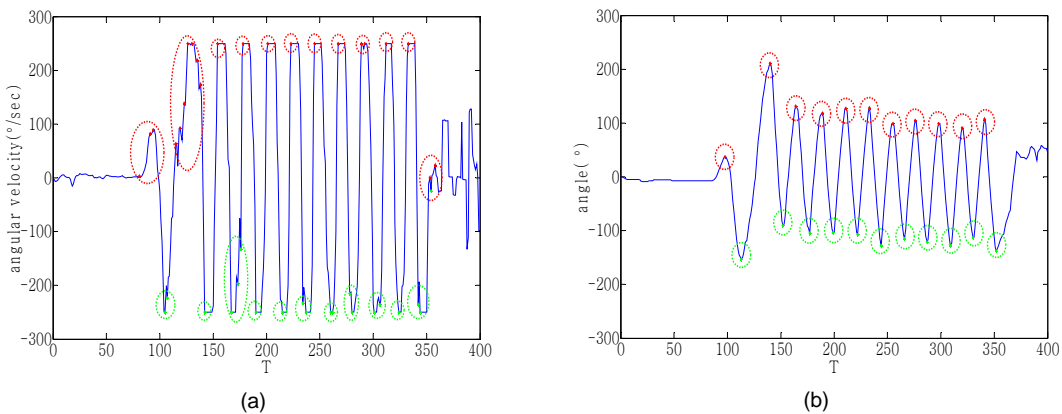


Fig. 5 Maximum and minimum point of angular velocity and rotation angle (a) Maximum and minimum value of angular velocity of y axis (b) maximum and minimum value of rotation angle of y axis

의 변화폭이 크지 않기 때문에 주기가 기준점에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다.

그림 5의 (a)는 잡음으로 인하여 불필요한 극대 및 극소점이 찾아진다. 반면 그림 5의 (b)에서는 정확히 극대 및 극소점을 찾아내는 것을 볼 수 있다.

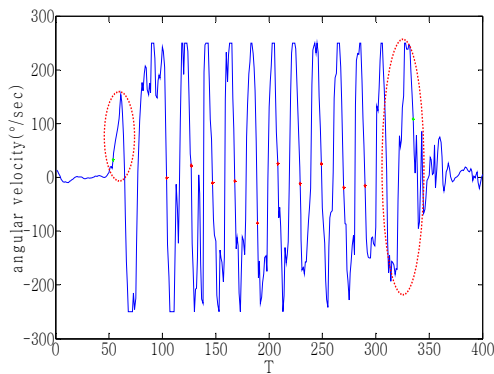
식 (1), (4), (7) 그리고 (9)를 이용하여 제안하는 방법인 상보필터를 적용한 알고리즘을 나타내면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

```

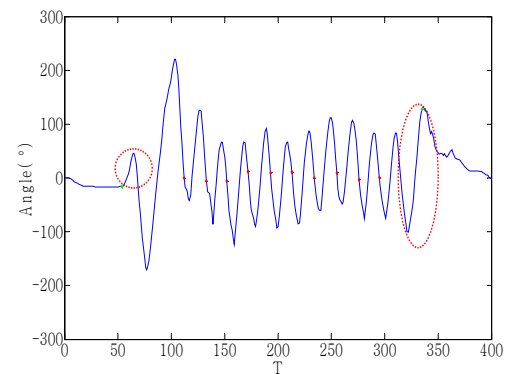
1: initialize MPU-6050
2: initialize T = 0, count = 0
3: initialize  $\alpha = 0.95, \beta = 0.05, dt = 0.1$ 
3: do
5:   T  $\leftarrow$  T + 1
6:   calculate  $\theta_{acc,y}$  using Eq. (4)
7:   calculate  $\theta_{gyro,y}$  using Eq. (7)
8:   calculate  $\theta_{complementary}$  using Eq. (1)
9:   calculate magnitude using Eq. (9)
10:  if(three features satisfy convergence
      qualification) count  $\leftarrow$  count + 1
11: while T is not reached end point
12: return count
    
```

Fig. 6 The Proposed Algorithm

본 논문에서 실험은 MPU-6050과 Arduino Uno 보드 간의 I2C 통신을 이용하여 데이터를 수집하고, Arduino Uno 보드로부터 받은 데이터를 Matlab에서 인식하여



(a)



(b)

Fig. 7 Starting and end point of angular velocity and rotation angle (a) Starting and end point of angular velocity of y axis (b) Starting and end point of rotation angle of y axis

줄넘기 회전운동을 검출하는 방법을 사용한다. MPU-6050에서 가속도계 full-scale 범위는 $\pm 2g$, 자이로스코프의 full-scale 범위는 $\pm 250^\circ/\text{sec}$, 통신속도는 38400bps로 설정한다.

IV. 실험 결과

4.1. 실험결과

그림 7의 파형에서 특이 지점 두 곳을 찾을 수 있다. 그림 7의 (a)와 (b) 모두 처음 줄넘기를 시작하는 지점과 줄넘기가 끝나는 지점의 파형을 보면 중간 지점에 있는 파형과의 차이를 쉽게 찾을 수 있다. 중간 지점의 파형은 일정한 주기로 사인파 형태를 그리며 극대극소점을 하나씩 가진다. 반면 처음 시작점 극대점은 하나 더 가지는데, 이 현상은 사람들이 줄넘기를 시작 할 때 손이 정면위쪽으로 올라갔다 줄을 돌리기 때문에 생겨난다. 또한, 줄넘기가 끝나는 지점에서 사람들은 줄을 돌려 손이 지면을 향하는 방향에서 멈춘다. 이로 인해 마지막 부분의 파형은 대략 3/4만큼의 주기가 더 생겨남을 알 수 있다.

Table. 1 Recognition rate

Type	Accuracy
Before applying the complementary filter	74%
After applying the complementary filter	92%

표 1은 성인 남녀 50명을 대상으로 10회~14회 줄넘기를 실시하여 수집한 데이터를 바탕으로 측정된 값이다.

표 1에서 보여주듯이 상보 필터를 적용하여 줄넘기 개수를 측정하였을 때, 적용하기 전 보다 확연히 높은 정확도를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 총 535개 데이터 중 한 주기가 끝나는 지점을 찾지 못하는 경우가 센서에서 출력한 값을 입력받아 바로 적용하였을 때, 139개의 오류 값이 있었고, 입력받은 값에 상보필터를 적용한 후의 결과 값에는 43개 오류가 생겼다. 오류 지점은 직관적으로 판단하였고, 정확도 계산은 아래 식 (10)을 사용하였다.

$$Accuracy = \left(1 - \frac{Type1\ error + Type2\ error}{n}\right) \cdot 100 \quad (10)$$

식(5)에서 Type1error는 줄넘기를 한 번 할 때마다의 위치를 찾지 못하였을 때, Type2error는 잘못된 위치를 찾았을 때의 오류를 뜻하며, n은 줄넘기를 시행한 총 횟수를 의미한다.

4.2. 오차분석

그림 8은 y축 각속도와 회전각도의 오류 지점들을 표시한 것이다. 그림 8의 (a)에서 y축 각속도의 대부분은 잡음들로 인한 오류가 가장 많이 발생하였다. 반면 그림 8의 (b)에서 y축 회전각도는 각속도에서 생겨난 문

제가 줄넘기를 하는 도중에는 발생하지 않았다. 하지만 줄넘기가 끝나는 지점에서는 두 경우 모두 오류가 발생한다. 이는 끝점에서 뒀 상태에서 착지를 하고, 손을 멈추게 되는데, 사람이 힘을 주는 것보다 힘을 풀 때 더 큰 떨림이 생겨난다. 이처럼 착지와 손의 정지 두 경우가 맞물려 진동이 발생하며, 이로 인하여 잡음이 많이 발생한다.

V. 결 론

본 논문에서는 잡음과 진동에 의한 가속도계와 드리프트 현상이 발생하는 각속도의 문제점을 개선하여 정확한 결과를 얻기 위해 MPU-6050로부터 얻은 데이터에 상보 필터를 적용하는 방법을 제안하였다. 실험 결과에서 첫 번째는 3축의 크기의 합은 상보 필터를 적용하기 전의 각속도 y축과 상보 필터를 적용하여 구한 y축 각도의 파형이 비슷하며, 시작점과 끝점을 찾는 데 잡음의 영향을 거의 받지 않았다. 이는 값의 스펙트럼이 증가하여 잡음이 다소 미비한 영향을 줄일 수 있다.

다음으로 극대극소점을 찾을 때는 잡음의 영향이 많이 미쳤다. 대부분의 오류가 극대극소점을 찾는 곳에서 발생하였다. 이는 정확도를 낮추는 가장 큰 원인 중 하나이다. 또한 이를 해결하기 위해 추가적인 알고리즘을 적용한다면, 오히려 상보 필터를 적용한 것보다 더 많

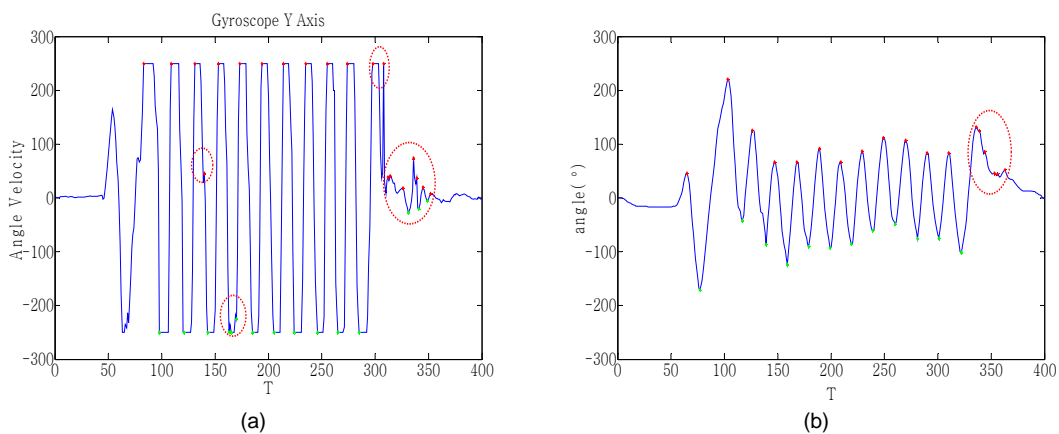


Fig. 8 Error point of angular velocity and rotation angle (a) Error point of angular velocity of y axis (b) error point of rotation angle of y axis

은 계산량을 필요로 할 수 있다. 마지막으로 줄넘기를 한 번 뛸 때마다의 마지막 지점을 찾는 경우이다. 시작 지점을 찾는 것은 큰 차이가 없었지만, 끝 지점을 찾을 때는 대부분의 데이터가 잡음이 많이 발생하여 상보 필터를 적용하기 전 각속도 y축에서는 오류가 빈번히 발생하였다. 더하여 시작 지점과 끝 지점의 파형의 모습은 대부분 동일하나, 그렇지 않은 경우 제안한 방법과 기존의 방법 두 가지 모두 오류를 범한다. 결과적으로 제안하는 방법은 순수한 센서의 값만으로 측정하는 방식과 비교하여 실제 정확도가 더 높음을 확인할 수 있으며, 끝점에서는 동일한 이유로 오류가 발생하고, 이를 개선하기 위하여 다른 특징을 선택하여 적용할 필요가 있다.

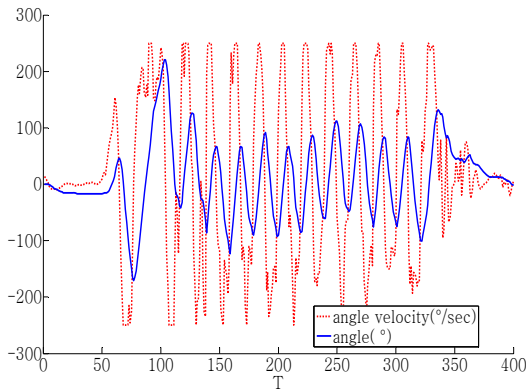


Fig. 9 Time delay by applying a complementary filter

단, 그림 9에서 볼 수 있듯이 상보 필터를 적용하면, 단순 센서의 값인 각속도만을 이용하였을 때 비해 상보 필터를 적용하여 측정하는 속도가 느려지는 현상이 발생한다. 따라서 적용분야에 맞춰 속도가 중요시 된다면, 상보 필터를 적용하지 않고 단순 센서 값을 사용하여도 된다. 하지만 속도 지연문제를 제외한다면 상보 필터를 사용하는 것이 효과적인 방법임에 분명하다. 따라서 향후 상보 필터의 속도 지연문제를 최소화하여 개선할 방안에 대한 연구를 진행할 것이며, 칼만필터를 개선하여 회전운동 검출에 적용할 방안 또한 연구계획에 있다.

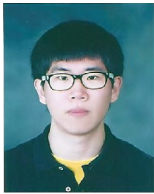
ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE) of the Republic of Korea and Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) through the Regional Specialized Industry Development Program(Grant Number: R0005050)

REFERENCES

- [1] E. S. Choi, W. C. Bang, S. J. Cho, J. Yang, D. Y. Kim, and S. R. Kim, "Beatbox music phone: gesture-based interactive mobile phone using a tri-axis accelerometer," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 97-102, 2005.
- [2] T. Iso, and K. Yamazaki, "Gait analyzer based on a cell phone with a single three-axis accelerometer," in *Proceedings of the 8th conference on Human-computer interaction with mobile devices and services*, pp. 141-144, 2006.
- [3] B. J. Mortazavi, M. Pourhomayoun, G. Alsheikh, N.Alshurafa, S. I. Lee, and M. Sarrafzadeh, "Determining the single best axis for exercise repetition recognition and counting on smartwatches," in *Proceedings of the 11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pp. 33-38, 2014.
- [4] J. Masino, B. Daubner, M. Frey, and F. Gauterin, "Development of a tire cavity sound measurement system for the application of field operational tests," in *Proceedings of the Systems Conference (SysCon)*, 2016 Annual IEEE, pp. 1-5, 2016.
- [5] H. J. Luinge, and P. H. Veltink, "Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscope and accelerometers," *Medical and Biological Engineering & Computing*, vol. 43, no. 2, pp. 273-282, Apr. 2005.
- [6] J. Parkka, M. Ermes, K. Antila, M. van Gils, A. Manttari, and H. Nieminen, "Estimating intensity of physical activity: a comparison of wearable accelerometer and gyro sensors and 3 sensor locations," in *Proceedings of the 29th*

- Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1511-1514, 2007.
- [7] M. Vetterli, and C. Herley, "Wavelets and filter banks: Theory and design," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 40, no. 9, pp. 2207-2232, Sep. 1992.
- [8] C. Zhu, and W. Sheng, "Wearable sensor-based hand gesture and daily activity recognition for robot-assisted living," *IEEE Transactions on Systems*, vol. 41, no. 3, pp. 569- 573, May 2011.
- [9] C. W. Kang, Y. M. Yoo, and C. G. Park, "Performance improvement of attitude estimation using modified Euler angle based Kalman filter," *Journal of Institute of control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 9, pp. 881-885, 2008.
- [10] R. G. Brown, and P. Y. Hwang, "Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions," *Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions*, New York: Wiley, 1997.



유병현(Byeong-Hyeon Yoo)

전자공학과 공학사 (2015)
동의대학교 전자공학과 공학석사 과정 (2015~현재)
※ 관심분야 : 인공지능, 패턴인식



허경용(Gyeongyong Heo)

연세대학교 전자공학과 공학석사 (1996)
University of Florida 컴퓨터공학과 공학박사 (2009)
동의대학교 전자공학과 교수 (2012~현재)
※ 관심분야 : 인공지능, 패턴인식, 로봇공학