

휘어짐센서와 관성센서를 이용한 손가락을 포함한 상지 운동 검출

김연준¹, 유재하¹, 김동연¹, 김수찬^{1*}

¹한경대학교 전자전기공학부

Upper Limb Motion Detection Including Fingers Using Flex Sensors and Inertial Sensors

Yeon-Jun Kim¹, Jae-Ha Yoo¹, Dong-Yon Kim¹, Soo-Chan Kim^{1*}

¹Department of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University

요약 가상현실의 활용도는 게임뿐만 아니라 재활 치료와 같은 의료에서도 높아지고 있다. 편리성으로 인하여 비디오를 활용한 비접촉 방식과 핸드 헬드 타입의 마우스 등을 사용하여 상지 움직임을 감지한다. 본 논문에서는 접힌 정도에 따라 저항값이 변화되는 휘어짐센서와 공간에서의 방향 정보를 얻을 수 있는 관성센서를 사용하여 손가락 움직임과 함께 상지 동작도 획득할 수 있는 장갑을 구현하였다. 구현된 장갑에서 얻은 신호로 오픈 소스 플랫폼인 Processing을 사용하여 손가락 움직임을 포함한 상지 동작을 실시간으로 표현하였다. 각 손가락 움직임의 감도는 0.5deg, 상지 동작 감도는 0.6deg였다.

• 주제어 : 손가락 움직임, 상지 운동, 손목 운동, 동작 감지, 가상현실

Abstract The utilization of virtual reality is increasing not only in games but also in medical care such as rehabilitation. Due to the convenience, the motion of the upper limb is detected using a non-contact method using video or a handheld type mouse, etc. In this paper, we implemented a glove which can measure finger movements and upper limb movements by using flex sensors whose resistance value changes according to the degree of folding and inertial sensors which can obtain direction information in space. We showed the upper arm movements including finger movements with signals obtained from the implemented glove on the open software platform, Processing. The sensitivity of each finger movement was 0.5deg, and the sensitivity of the upper limb motion was 0.6deg.

• Key Words : Finger movements, Upper arm movements, Wrist movements, Motion detection, Virtual reality

Received 03 June 2020, Revised 22 July 2020, Accepted 20 August 2020

* Corresponding Author Soo-Chan Kim, Department of Electronic and Electrical Engineering, Research Center for Applied Human Sciences, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea. E-mail: sckim@hknu.ac.kr

I. 서론

최근 급격한 기술의 발달로 인해 우리 생활 전반에 다양한 기기의 변화에 따른 생활 방식의 변화가 이루어지고 있다. 정보통신기술의 집약적인 발전은 컴퓨터와 인간의 소통방식에 대한 변화를 가져왔고 이는 기존의 단순히 버튼을 누르는 방식에서부터 터치방식, 나아가 동작인식방식 등의 직관적 소통방식을 사용하기에 이르렀다[1]. 또한 정보전달 역시 단순한 영상 재생방식에서 진보하여 증강현실, 가상현실 및 홀로그램 등으로 변화되고 있다. 그중 가상현실은 다양한 감각을 사용하여 직접 콘텐츠 속으로 들어가 실제감과 현실감을 체험할 수 있는 대표적인 수단으로 실감 체험형 콘텐츠의 집약적인 발전을 이루고 있다. 최근 VR 기술은 많은 관심을 받고 있다. 한국 VR 산업 협회에 의하면 VR 시장의 규모는 매년 증가하여 2020년에는 5조 7,271억이 될 것으로 보고 있다[2]. 특히, VR 기술에 적합한 콘텐츠가 게임, 교육, 의료 등 다양하기 때문에 앞으로의 발전 가능성이 매우 크다고 볼 수 있다. 의료, 교육, 훈련, 제조 등의 다양한 분야에서 직접 수행하기 어려운 작업을 가상공간에서 활용할 수 있다.

가상현실의 입력 장치로 활용되는 장비로는 기존의 마우스, 공간에서 움직임이 가능한 모션 컨트롤러, 조이스틱 등의 물리적인 동작을 감지하는 장치와 영상을 통해 사용자의 몸동작이나 손가락의 움직임을 감지하여 방식으로 나눌 수 있다. 영상을 이용하는 방법은 비접촉식이라 사용자에게 최대한의 자유도를 제공하지만 인식률이나 응답 속도 면에서 단점이 있어 여전히 물리적 동작을 감지하는 방식이 착용이나 부착으로 인해 불편한 점이 있음에도 불구하고 선호도가 더 높다. 게임용 모션 컨트롤러는 최근 게임용이 대중화되어 수십만 원대로 가격이 내려갔지만, Plexus, Captoglove, HaptX, Manus Prime II Haptic, HI5 VR 등과 같은 글로벌 형태는 여전히 고가라 직접 사용해 보기 쉽지 않다 [3, 4].

본 논문에서는 플렉스와 관성센서를 사용하여 손가락의 움직임뿐만 아니라 상지 운동까지 측정이 가능한 장갑을 구현하였다. 구현된 장갑에서 무선으로 송신되는 신호를 받아 오픈 소프트웨어 플랫폼인 프로세싱(Processing 3.2, Processing Foundation, USA)으로 가상의 손가락과 상지 동작을 모사하였다[5].

II. 재료 및 방법

2.1 시스템 구성

그림 1과 같이 손가락의 동작을 얻기 위해 휘어짐 센서(Flex sensor, FS7954, Sparkfun, USA)를 장갑의 각 손가락 내부에 장착하였고, 상지 동작 감지를 위해 관성센서(Inertial sensor, MPU-9250, InvenSense, USA)를 손목, 하완, 그리고 상완에 부착할 수 있도록 구성하였다. 관성센서는 가속도, 각속도, 지자기 각각의 3축 정보가 I2C 통신 프로토콜로 제공된다[6, 7]. 이 값도 Teensy 보드의 I2C를 통해 읽었다[8]. 획득된 데이터에서 손가락 구부러진 정도와 상지의 관절 정보를 분석하고 그 결과를 블루투스 모듈(HC-06, HC Information Technology, China)을 통해 PC의 블루투스 모듈(TG-BTD90, TG삼보, Korea)로 전달한 후 오픈 소프트웨어 플랫폼인 Processing을 사용하여 3-D(dimension)로 가상의 손가락과 상지로 표현하였다[9].

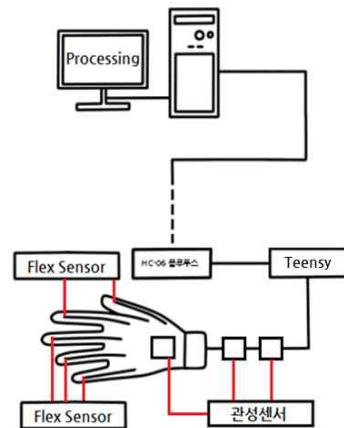


Fig. 1. System Configuration consisting of flex sensors and inertial sensors

2.1.1 손가락 움직임 검출

손가락의 움직임은 손가락이 굽어진 정도를 휘어짐 센서의 저항 변화를 통해 추정하였다. 휘어짐센서는 수동 소자이므로 전압 분배 회로(voltage divider)를 통해 전압을 얻을 수 있도록 하고 그 값을 Teensy board (ver. 3.6, PJRC, USA)의 13비트 ADC를 통해 읽었다. 그림 2는 센서 1채널에 대하여 전압 분배 회로를 적용한 회로이다.

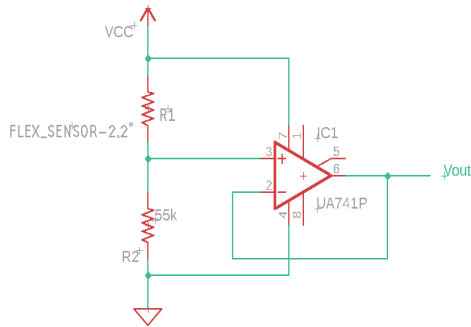


Fig. 2. Interface using a voltage divider

손가락의 각도와 휘어짐센서가 휘어지는 각도에 따라 변화되는 저항값은 높은 상관관계가 있다. 그림 3과 같이 각도기를 통해 휘어짐센서의 각도를 측정하면 손가락의 각도에 따른 저항값을 얻어 보정하였다. 휘어짐센서의 저항 값은 전혀 휘어지지 않은 상태에서 약 30kohm을 보였고, 최대로 휘어진 상태에서 약 90kohm까지의 변화하였다. 위 회로에서 저항 변화에 따른 전압 변화량을 최대로 하기 위해 고정 저항 R2는 55kohm으로 하였다. 전압 분배 회로의 출력을 ADC로 넣기 전에 연산 증폭기를 사용한 아날로그 버퍼를 삽입하여 부하 영향을 최소화하였다. 손가락의 움직임을 실시간으로 검출하고자 손가락 움직임을 최대 50Hz로 가정하고 100Hz(10ms)로 샘플링하였다.



Fig. 3. Measurement of a flex sensor resistance according to its bending

2.1.2 상지 움직임 검출

상지 운동을 검출하기 위해 사용한 관성센서의 가속도와 각속도의 감도는 각각 $\pm 2\text{ g}$, 각속도 $\pm 250\text{ degree/sec}$ 로 설정하였다. 관성센서에서 얻어진 가속도, 각속도, 그리고 지자기 정보로부터 센서의 3차원 회전 상태인 오일러 각을 추정할 수 있다. 이때 x축의 회전각은 롤(roll), y축의 회전각은 피치(pitch), z축의 회전각은 요(yaw)라 한다.

$$\text{roll} = \text{atan}\left(\frac{A_Y}{\sqrt{A_X^2 + A_Z^2}}\right), \text{pitch} = \text{atan}\left(\frac{A_X}{\sqrt{A_Y^2 + A_Z^2}}\right)$$

$$\text{yaw} = \arctan\left(\frac{M_Y}{M_X}\right) [\text{deg}]$$

여기서, A_X, A_Y, A_Z 는 가속도계의 3축 가속도 값이고, M_X, M_Y, M_Z 는 3축 지구 자기장의 세기이다.

손목, 하완, 그리고 상완을 포함한 팔의 움직임은 손가락의 움직임보다 느리지만 데이터 운용의 편리성을 위해 손가락 움직임의 획득 주파수와 같은 100Hz로 샘플링하였다.

2.1.3 데이터 획득과 처리

Teensy 보드는 ADC 25채널, I2C 통신, 최고 ADC 샘플링 주파수는 800kHz로, 제안한 시스템에 충분한 성능을 제공한다. 보드 크기(18mm×30mm)가 아두이노미니(17mm×33mm)보다 작으면서도 32bit ARM 프로세서를 사용하여 속도 면에서 우수하고 아두이노 플랫폼과 호환이 가능하기 때문에 Arduino IDE을 그대로 활용할 수 있다. Teensy 보드와 센서들의 인터페이스는 그림 4와 같다.

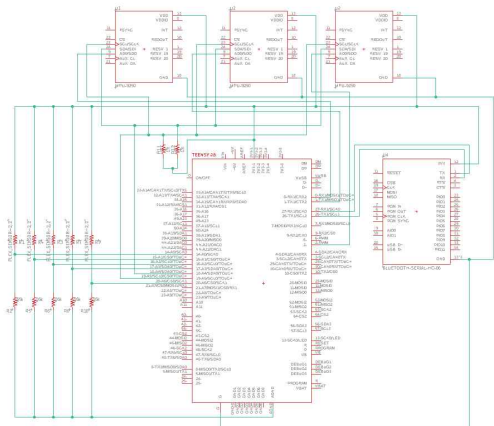


Fig. 4. Schematics with sensors and a Teensy board

휘어짐센서의 전압값 5개와 3개의 관성센서에서 얻은 3축 정보, 총 9개를 합쳐 14개의 데이터가 매 샘플링마다 얻었다. 14개의 데이터는 문자열로 전송되며, 각 채널은 콤마로 구분하였고, 데이터 그룹은 줄 바꿈으로 구별하였다. 문자열은 값에 따라 전송 데이터 길이가 변화하므로 데이터 길이가 가장 길었을 때를 가정하여 실시간 전송에 문제가 없는지 확인하였다. 전송되는 14개의 데이터 크기는 콤마와 줄 바꿈 등을 모두 합하여 가장 큰 값이 나오더라도 70bytes는 넘지 않는다. 초당 100개의 샘플이 전송되면 70100개가 되어 7,000bytes/sec 대역폭이면 된다. 무선 통신 모듈의 통신 속도는 115,200bps로 하였기에 초당 약 11,520 bytes/sec로 여유롭게 데이터 전송이 가능하다.

III. 결과 및 고찰

3.1 구현된 장갑

그림 5는 손가락 운동을 얻기 위한 5개의 휘어짐센서와 상지 운동을 얻기 위한 3개의 관성센서를 수축 튜브에 연결하여 제작된 장갑이다. 휘어짐센서는 외부에서 보이지 않도록 장갑의 각 손가락 내부에 고정시켰으며 관성센서는 회전을 감지하기 쉬운 손등, 하완, 그리고 상완에 손쉽게 부착할 수 있도록 마감하였다. 상완과 하완에 고정되는 관성센서는 케이스에 담아 탄력 밴드에 고정하였고 Teensy 보드, 무선 모듈, 배터리 등은 케이스를 직접 제작하여 내부에 삽입하였다. 케이스는 허리나 몸에 고정할 수 있도록 만들었다.



Fig. 5. An implemented glove and a control box

3.2 성능 평가

장갑을 착용 후 동작을 검출해본 결과 실시간으로 표현된다는 목적은 달성되었으나 데이터의 노이즈로 인한 떨림 현상과 짐벌락(Gimbal lock) 현상 등의 문제가 발생하였다[10].

휘어짐센서의 가변 전압 값은 마이크로 컨트롤러의 ADC 채널로 받게 되는데, 이때 ADC 신호는 잡음이 심하여 손가락의 움직임을 표현할 때 떨림 현상과 같은 문제가 발생한다. 이러한 문제는 디지털 저역 통과 필터를 사용하여 해결하였다.

$$y[n] = \theta \cdot x[n] + (1-\theta)y[n-1] \quad \text{for } n = 0, 1, \dots, m$$

$$\theta = 2\pi f_c T$$

여기서, f_c 는 차단 주파수, T 는 샘플링 시간을 의미한다. 필터를 거쳐서 나온 값을 기반으로 실제 각도와 비교해 본 결과 감도는 0.5deg였다.

관성센서의 가속도 센서는 노이즈가 심하며 모션이 발생하는 경우에도 모션에 의한 가속도가 추가적으로 포함된다. 노이즈와 모션에 의한 가속도의 고주파 성분은 저역통과필터를 사용하여 제거하였다. 또한 자이로 센서는 각속도를 적분하여 각도를 추정하는데, 각도를 누적하는 동안 누적 오차가 생겨 추정 값에 드리프트가 발생하게 된다. 이때 발생한 드리프트는 고역통과필터를 사용하여 제거하였다. 그럼에도 불구하고 위상왜곡이 발생하여 이를 해결하기 위해 상보필터(Complementary Filter)를 사용하여 해결하였다. 상보필터는 가속도 센서를 통해 추정한 각도와 자이로 센서를 통해 추정한 각도를 각각 저역통과필터와 고역통과필터를 통과시킨 뒤 두 각도를 더해 기울기를 추정하여 위상 문제를 해결하였다. 각도의 민감도는 약 0.6도였다.

짐벌락 현상은 물체가 회전할 때 특정 각도에서 서로 다른 두 회전축이 하나로 겹쳐지게 되어 하나의 축이 소실되는 현상을 말한다. 이 문제는 사원수(Quaternion) 체계를 사용해 해결할 수 있다. 사원수는 복소수를 확장해서 만든 체계이며 $q = a + bi + cj + dk$ 로 표현된다. 이때 a 는 실수부, $bi + cj + dk$ 는 허수부라고 하며 사원수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$$

관성센서를 통해 얻은 롤, 피치, 요를 각각 ϕ , θ , ψ 라고 하면 다음과 같은 식으로 사원수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & (\cos \frac{\phi}{2} + i \sin \frac{\phi}{2})(\cos \frac{\theta}{2} + j \sin \frac{\theta}{2})(\cos \frac{\psi}{2} + k \sin \frac{\psi}{2}) \\ &= \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \\ & (\sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2})i + \\ & (\cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2})j + \\ & (\cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2})k \end{aligned}$$

디지털 필터, 상보필터, 그리고 사원수 계산 등은 모두 Teensy 보드의 컨트롤러에서 계산하고 그 결과값만 전송하였다. 그림 6은 전반적인 프로그램 흐름도이다.

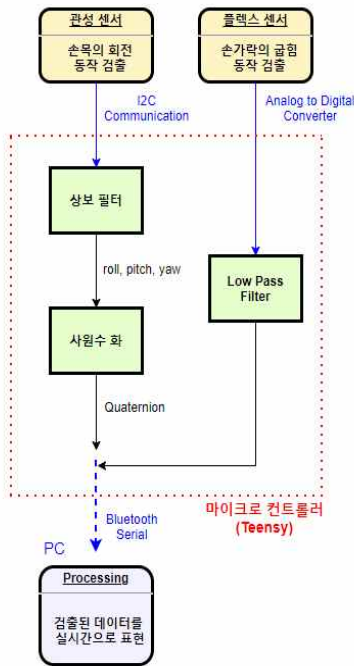


Fig. 6. Program flow for detecting the upper arm movements including finger movements

3.3 동작 검출 실험

동작을 검출 결과를 실시간으로 보여주기 위해서는 가상 환경에서 3D로 표현된 팔을 사용하였다. 렌더링 프로그램으로 Solidworks(Solidworks 2016 Edition, Dassault Systems, USA)를 사용하여 손가락의 각 마디, 손바닥, 팔 모형을 렌더링하였으며 렌더링된 3D 모델은 Processing에서 활용하였다. Processing은 데이터를 시각화하는데 편리한 함수를 제공하는 오픈 소스 플랫폼으로, 간단한 명령 및 함수를 통해 3D 모델을 불러오고 불러온 모델에 대해 음영, 색채 등 시각적인 요소를 줄 수 있으며 회전 및 이동과 같은 동적인 요소도 넣을 수 있다. 그림 7과 같이 3D 모델 구현을 모두 마치면, 동작 데이터에 따라 장갑의 움직임을 실시간으로 보여준다. 그림 8은 동작의 정지 영상의 예이며, 동영상은 <https://youtu.be/96hOLEjP7Qg>에 볼 수 있다.



Fig. 7. Implemented 3D finger and arm using processing



Fig. 8. Experiment images according to finger shapes

IV. 결론

본 논문에서는 휘어짐센서와 관성센서를 장착한 장갑을 제작하고 센서의 정보를 마이크로컨트롤러를 사용하여 실시간으로 획득하고 처리하여 가상의 상지 모델을 이용하여 손가락과 상지 운동을 시각화하였다. 제한한 방법에서 사용한 Teensy 보드 하드웨어와 Processing은 개발 시 라이선스 비용이 발생하지 않아 누구나 저렴하고 활용할 수 있고, 기술적 자료가 모두 공개되어 있어 학습용으로 유익하다. 장갑과 장갑 구동에 활용한 가상현실은 컴퓨터 게임, 상지를 포함한 손동작의 숙련도를 요구하는 스포츠, 그리고 재활 치료의 바이오 피드백 혹은 정량적 치료 효과 평가 등에 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

[1] J. H. Lee, "VR system environment technologies and user input elements," J of the Kor. Soc. of Des. Cul., pp.585-596, 2018.

[2] Y. C. Jang, J. S. Im, J. H. Kim, "Industry trends of VR/AR," J. of the KICS, vol. 36, no. 1, pp.35-41, 2018.

[3] Comparison of virtual reality headsets, 2020. https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_virtual_reality_headsets

[4] S. C. Kim, M. J. Park, "Evaluation of a head-mouse combined with Gyro- and Opto-sensors," J. of Adv. Info. Tech. and Conv., vol. 9, no. 6, pp. 97-104, 2011

[5] Processing, 2020. <https://processing.org>.

[6] FS7954, 2020. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/flex22.pdf>.

[7] MPU-9150, 2020. <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-9150-Datasheet.pdf>

[8] Teensy USB Development Board, 2018. <https://www.pjrc.com/store/teensy32.html>.

[9] HC-06, 2020. <https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>

[10] Gimbal lock, 2020. https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal_lock.

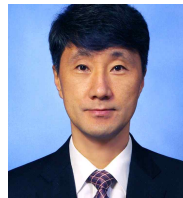
저자 소개

김 연 준 (Yeon-Jun Kim)



2016년 : 한경대학교
전기전자제어공학과
관심 분야 : 의공학,
임베디드시스템, 애플리케이션
개발

유 재 하 (Jae-Ha Yoo)



1990년 : 연세대학교
전자공학과(공학사)
1992년 : 연세대학교 대학원
전자공학과(공학석사)
1996년 : 연세대학교 대학원
전자공학과(공학박사)
2002년~현재 : 한경대학교

전자전기공학부 교수

관심 분야 : 신호처리 응용, 적응신호처리

김동연 (Dong-Yon Kim)



1986년 : 연세대학교 전자공학과
공학사
1988년 : 연세대학교 전자공학과
공학석사
1995년 : 연세대학교 전자공학과
공학박사
1996년 9월 ~ 현재 :

국립한경대학교 전자전기공학부 교수

관심분야 : 컴퓨터네트워크, 무선 통신 시스템

김 수 찬 (Soo-Chan Kim)



1994년 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1998년 연세대학교 대학원
생체공학협동과정(공학석사)
2003년 : 연세대학교 대학원
생체공학협동과정(공학박사)
2004년~현재 : 한경대학교

전자전기공학부 교수

관심 분야 : 생체신호 계측 및 분석, HCI, 전자기장을
이용한 세포 성장 촉진, 인간의 자기 감지 능력