

보행보조기기 사용자를 위한 2축 회전 자기안정화 휴대물품 장치의 개발

이 진

민족사관고등학교

2-axis Rotation Self-Stabilizing Platform for Mobility Assistive Device Users

Jin Rhee

Korean Minjok Leadership Academy

E-mail : jinrhee2003@gmail.com

요 약

본 연구에서는 목발을 사용하는 교통약자가 물품을 안정적으로 휴대할 수 있도록 도와주는 장치를 개발하였다. 2축 짐벌 구조를 기반으로 서보모터, IMU센서, 아두이노 나노 마이크로프로세서로 구현하였고, Pitch와 Roll 방향 회전을 상쇄하기 위해 센서 각도를 변환 없이 사용하는 기본제어법과 PID 제어법을 사용하여 비교하였다.

ABSTRACT

본 연구에서는 목발을 비롯한 보행보조기기를 이용하는 교통 약자가 휴대 물품을 이동시 안정적으로 보관하고 휴대할 수 있도록 도와주는 장치를 개발하였다. 오늘날 촬영 장비에 사용되는 짐벌 구조를 기반으로, Yaw-Pitch-Roll 기본 최적 3축 중 2축에 해당하는 Pitch와 Roll의 회전을 보정할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. Creality Ender-5 3D프린터를 이용하여 장치의 외형과 프레임 제작하고, 충격 완화 알고리즘은 아두이노 마이크로컨트롤러와 충격 가속도 센서를 사용하여 구축하였다.

키워드

Self-stabilization, gimbal, rotation axis, mobility assistance

1. 서 론

목발을 비롯한 보행 보조기기는 누구나 다치면 치료에 반드시 필요한 도구이지만, 이 기기들의 보급화에 비해 이용자의 불편함이 여전히 많이 존재한다. 목발을 사용하는 이용자가 보행 시 양손을 사용할 수 없어 휴대 물품을 따로 보관하여 이동해야하고, 액체가 담긴 컵처럼 보관하기 힘든 물품들은 휴대하기 힘들다.

일반적인 보행 시 충격 흡수 역할을 해주는 하체의 수직 움직임이 상체의 움직임보다 크지만, 목발을 사용 시 반대로 상체의 움직임이 하체의 수직 움직임보다 커 하체가 충격 흡수를 해주지 못한다. 또한, 바닥과 맞닿는 목발의 끝은 보행주기

의 시작부터 수직으로 크게 움직여 목발의 본체를 따라 어깨와 팔에 큰 충격을 준다. [1] 목발을 사용함으로써 보행주기의 모습이 달라져 목발 사용과 동시에 안정적인 손 사용이 어렵다.

본 논문은 이 문제점에 대한 하나의 해결책을 제시하고자 보행 보조기기를 이용하는 교통약자가 물품을 휴대할 수 있도록 도와주는 장치를 개발하고자 하였다. 목발에 부착이 가능하도록 설계한 이 장치는 오늘날 촬영 장비에 사용되는 짐벌 구조를 기반으로, 보행 시 목발의 회전을 상쇄시킬 수 있도록 제작되었다.

II. 이 론

2.1 짐벌

짐벌이라 불리는 구조는 x축, y축, z축을 회전축으로 자유롭게 회전 할 수 있는 축의 개수에 따라 2축 짐벌과 3축 짐벌로 나뉘어진다. 이때 x축, y축, z축을 회전축으로 회전하는 방향을 각각 Roll, Pitch, Yaw라 부른다.

본 논문에 제시되는 장치는 목발에 부착되어 Roll과 Pitch 방향만으로 회전이 제한되어 있는 점을 이용하여 2축 짐벌을 기본 구조로 선정하였다.

2.2 제어 시스템

본 장치의 목적을 달성하기 위해서는 목발의 회전에 따라 장치의 짐벌 구조를 회전시켜 자기 안정화에 이르는 제어 시스템이 필요하다.

자기 안정화 제어 시스템의 기본적인 역할은 목발과 장치의 회전각을 측정하고, 그에 따라 짐벌 구조의 제어를 통해 그 회전 정도를 상쇄시켜야 한다. 본 연구에서는 가속도계를 포함한 IMU 센서를 사용하여 계산된 목발의 Roll과 Pitch 양방향 회전각을 활용하는 기본제어법과 PID 제어법 두 가지를 사용하였다.

기본제어법을 사용할 때에는 장치에 목발의 양방향 회전각과 같은 값의 역회전을 주어 자기 안정화를 달성한 반면, PID 제어법은 목발의 양방향 회전각과 장치의 서보 모터 회전 각도를 합하여 목발이 아닌 장치의 양방향 회전각을 계산하여 자기 안정화를 달성하도록 하였다.

2.3 IMU 센서를 이용한 기본 제어법

3축 가속도계를 포함하는 MPU6050은 x축, y축, z축을 따른 가속도 G_{px}, G_{py}, G_{pz}를 측정한다. 이를 이용하여 Roll과 Pitch 회전 각도를 계산할 수 있다. 먼저 장치를 Roll (φ), Pitch (θ), Yaw (ψ) 방향의 회전변환행렬들을 연속적으로 적용하여 z축을 따르는 수직 중력가속도 벡터를 선형변환 할 수 있다. [2]

$$R_{xyz} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi) = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix}$$

이렇게 선형변환된 행렬을 IMU 센서의 3축을 따른 가속도 행렬로 취급할 수 있다.

$$\frac{G_p}{|G_p|} = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{G_{px}^2 + G_{py}^2 + G_{pz}^2}} \begin{pmatrix} G_{px} \\ G_{py} \\ G_{pz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\theta) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta)\cos(\phi) \end{pmatrix}$$

이 행렬식을 사용하여 Roll과 Pitch 각도를 계산

할 수 있다.

$$\tan(\phi) = \frac{G_{py}}{G_{pz}}$$

$$\tan(\theta) = \frac{-G_{px}}{\sqrt{G_{py}^2 + G_{pz}^2}}$$

짐벌 구조를 제어하는 기본제어시스템은 이처럼 IMU 출력값을 사용하여 목발의 Roll과 Pitch 회전 각 값을 각각 구한후, 역회전각도로 짐벌의 서보를 회전시킨다.

2.4 Ziegler-Nichols 방법을 활용한 PID 제어법

PID 제어법은 피드백 시스템으로, 제어가 필요한 시스템에서 출력되는 에러값 e(t)를 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Derivative)하여 새로운 입력값 u(t)로 만들어 제어를 하는 방법이다. PID 제어는 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau)d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

본 장치에서는 에러값 e(t)를 장치가 양방향으로 수평에서 벗어난 각도로 지정하였고, PID의 비례, 적분, 미분 부분의 이득값을 Ziegler-Nichols 방법으로 튜닝하였다.

III. 시스템 설계 및 구현

3.1 본체 구현

장치의 본체는 Creality Ender-5 3D 프린터를 사용하여 제작하였다. 목발에 부착하기 위해 팔받침대와 손잡이 사이에 플랫폼을 설치하여 장치의 본체를 고정시켰다. 장치의 2축 짐벌 구조는 각각 Roll과 Pitch 방향으로 회전 할 수 있는 2개의 링을 사용하였다. 링의 회전을 제어하기 위해 TowerPro MG-996R 서보 모터 2개를 사용하였다. 0에서 180도까지 회전 할 수 있는 이 모터들을 가로로 놓혀 서보 모터의 90도 회전 방향이 링의 수평에 맞도록 장착하였다.

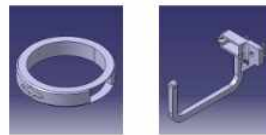


그림 1. 장치 부품 3D 모델 사진

3.2 아두이노 및 전자회로 구현

제어 시스템을 구현하기 위해 아두이노 나노(Arduino Nano) 마이크로컨트롤러, MPU-6050 IMU 센서, LM7805 전압 레귤레이터를 사용하였고, 다른 전자회로를 PCB 전자회로판에 구현하였다.

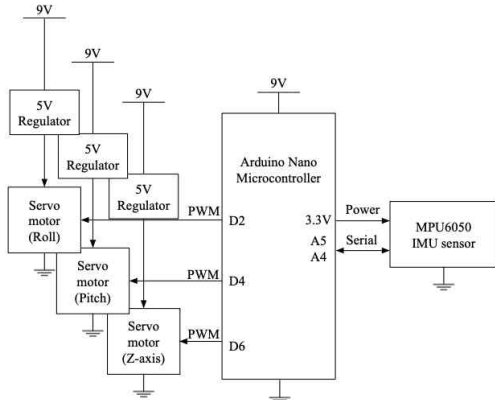


그림 2. 본체의 블록 다이어그램

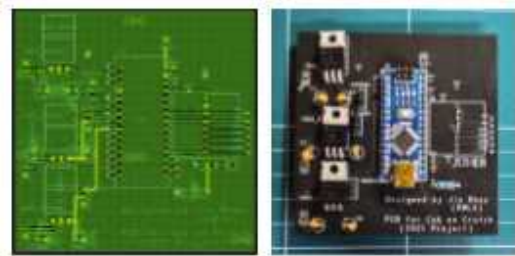


그림 3. PCB 디자인 및 장착모습

IV. 실험 및 결과

4.1 Ziegler-Nichols 방법을 활용한 PID 튜닝

Ziegler-Nichols 튜닝 방법은 시스템의 출력 신호가 피드백 신호로 시스템에 다시 입력되는지에 따라 다른 개방 제어 시스템과 폐회로 피드백 시스템에 적용법이 다르다. 개방 시스템의 튜닝은 단위 계단응답 출력 신호를 사용하여 튜닝을 하는 반면, 폐회로 제어 시스템은 안정 상태의 출력 신호를 사용하여 튜닝을 진행한다. 본 장치에서는 폐회로 제어법을 사용하였다.

폐회로 피드백 시스템의 Ziegler-Nichols 튜닝 방법은 적분이득과 미분이득을 0으로 맞춰 제외한 뒤, 안정화된 상태에서 출력 신호가 일정하고 안정화된 진동으로 나타날때까지 비례이득 K_p 를 증가시켜야 한다. 이때의 비례이득 값인 K_u 와 진동의 주기인 T_u 를 구해, 비례, 적분, 미분이득 값을 계산하는 방식이다. [3]

$K_p=0.9$ 일때는 진동의 진폭이 점점 작아져 상쇄되고, $K_p=1.1$ 일때는 진폭이 증가하여 서보 모터의 물리적 한계인 회전각 90도를 넘어, $K_p=1.0$ 일때 안정화된 진동 조건이 만족되었다.

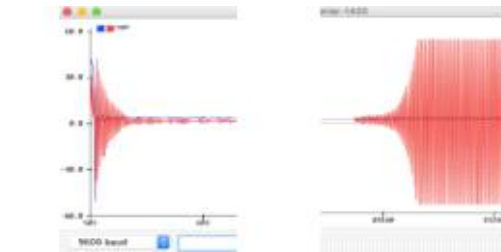


그림 4. $K_p=0.9$, $K_p=1.1$ 출력 신호

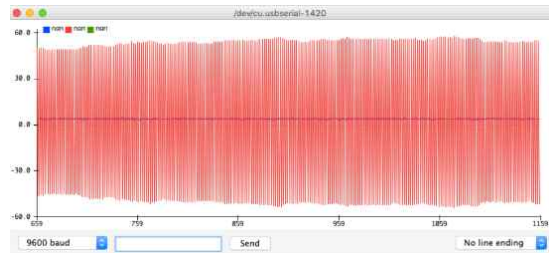


그림 5. $K_p=1.0$ 출력 신호

이때 $K_u=1.0$ 와 $T_u=0.08s$ 으로 측정되었고, 이를 이용하여 이득값들을 튜닝하였다.

표 1. Ziegler-Nichols 이득 계산표

	K_p	T_i	T_d
P	$K_u/2$		
PI	$K_u/2.2$	$T_u/1.2$	
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

튜닝의 실효성을 확인하기 위해 MPU6050센서를 직접 움직여 파란색 그래프인 입력 신호에 대해 시스템의 반응을 볼 수 있었다. 큰 진동 없이 안정점에 비교적 빠르게 도달하였고, 서보 모터 작동에 문제가 없었음을 확인하였다.

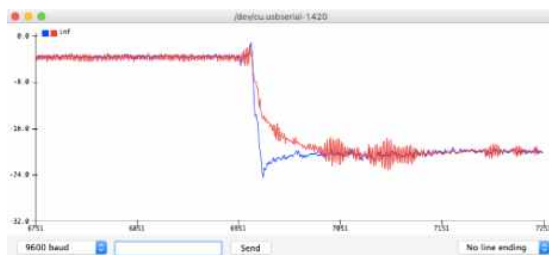


그림 6. PID 제어법 출력 그래프

4.2 IMU 센서를 이용한 기본 제어법 활용 결과

장치의 2축 짐벌의 성능을 실험하기 위해 장치를 목발에 부착하여 두 가지 제어법을 적용한 상태로 실험하였다. 목발을 Roll과 Pitch 양방향으로 약 20° 회전하여 출력신호와 실제 수평에서 벗어난 오차값을 기록하고 짐벌의 반응을 살펴보았다.



그림 7. 실험 모습

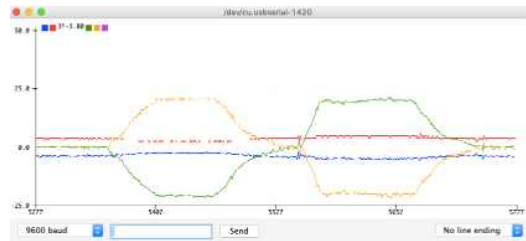


그림 8. 기본제어 Pitch 변화 실험 측정값

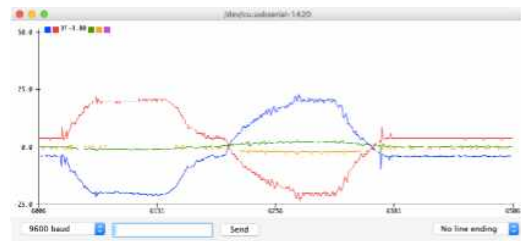


그림 9. 기본제어 Roll 변화 실험 측정값

기본 제어법은 Roll과 Pitch 회전축에 따라 서보 모터가 센서의 회전각을 반대로 입력 받는 모습을 볼 수 있다. 서보 모터의 특성상 입력값을 정수로 받아 센서 값을 double 자료형으로 출력하는 MPU6050 센서와 오차가 조금 났다. 이에 더해 실제 실험시 각도의 최대 오차가 3°를 넘지 않아 예상된 짐벌 구조의 작동에 문제가 없었다.

4.3 Ziegler-Nichols 방법을 활용한 PID 제어법 활용 결과

PID 제어법은 Roll과 Pitch 회전축에 따라 센서에 입력값에 잘 반응하는것을 볼 수 있었다. PID 제어법은 서보 모터와 IMU센서의 물리적 제약 때문에 이론적으로 완벽한 제어를 이루지는 못했지만, 서보 모터와 짐벌의 작동에는 큰 영향이 없었다.

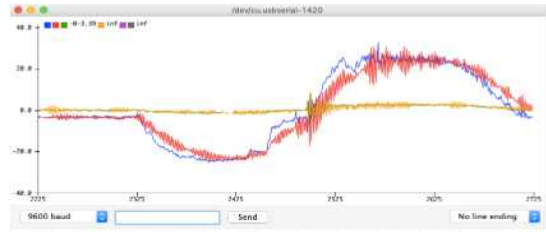


그림 10. PID 제어 Pitch 변화 실험 출력값

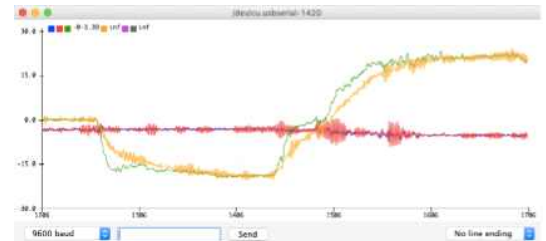


그림 11. PID 제어 Roll 변화 실험 측정값

V. 결 론

본 연구에서는 목발을 비롯한 보행보조기를 사용하는 교통약자들이 물품을 휴대하기 위해 회전 축 자기안정화 장치를 개발하였다. 2축 짐벌을 기반으로 장치를 제작하고 IMU센서를 이용하여 두 개의 회전축인 Roll과 Pitch 회전각을 계산하였으며, 기본 제어법과 PID 제어법을 적용하고 튜닝을 거쳐 회전각 제어 실험을 진행하였다.

본 연구에 가장 큰 제약이었던 단점은 크게 장치를 구성하는 부품들의 물리적 한계이었다. 서보 모터는 Brushless DC 모터와 달리 각속도가 아닌 회전각을 조절할 수 있어 PID 제어에 어려움을 겪었다. 이 처럼 본 연구에 적용된 제어법들이 완벽하지는 않았지만, 결과적으로 개발된 장치는 목표를 달성하기 위해서는 충분히 작동하였다.

References

- [1] Shoup, T. E., L. S. Fletcher, and B. R. Merrill. "Biomechanics of crutch locomotion." *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, No. 1 pp. 11-19, 1974.
- [2] Pedley, M., 2013. Tilt sensing using a three-axis accelerometer. *Freescale semiconductor application note, 1*, pp. 2012-2013
- [3] University of Michigan. PID Tuning via Classical Methods [Internet]. Available: <https://eng.libretexts.org/@go/page/22413>