

팔 동작 움직임을 모사하는 와이어 구동 유연 로봇의 설계 및 제어

Design and Control of Wire-driven Flexible Robot Following Human Arm Gestures

김상현¹·김민효²·강준기³·손승제⁴·김동환[†]

Sanghyun Kim¹, Minhyo Kim², Junki Kang³, SeungJe Son⁴, Dong Hwan Kim[†]

Abstract: This work presents a design and control method for a flexible robot arm operated by a wire drive that follows human gestures. When moving the robot arm to a desired position, the necessary wire moving length is calculated and the motors are rotated accordingly to the length. A robotic arm is composed of a total of two module-formed mechanism similar to real human motion. Two wires are used as a closed loop in one module, and universal joints are attached to each disk to create up, down, left, and right movements. In order to control the motor, the anti-windup PID was applied to limit the sudden change usually caused by accumulated error in the integral control term. In addition, master/slave communication protocol and operation program for linking 6 motors to MYO sensor and IMU sensor output were developed at the same time. This makes it possible to receive the image information of the camera attached to the robot arm and simultaneously send the control command to the robot at high speed.

Keywords: Flexible Robot Arm, Wire-driven, Gesture Control, Motion following

1. 서 론

기존 산업현장에서 사용되는 로봇 팔은 일반적으로 제어를 쉽게 하기 위하여 무겁고 높은 강성을 가지도록 제작되므로 로봇을 구동하는데 비교적 고 용량 모터를 사용하게 된다. 그 결과 많은 에너지를 소모하며 외형이 지나치게 커지는 단점이 있었다. 특수 작업을 수행하는 로봇 팔은 가벼워야 하며 구동

속도 역시 빨라야 하고, 작은 토크의 모터를 사용해도 충분히 구동이 가능한 형태로 제작되는 것이 필요하다^[1]. 또한 기존의 로봇은 작업공간(workspace)을 확보하기 위하여 다축의 수직 다관절 구조를 채용하고 있다. 이 경우 로봇이 지나치게 커지는 문제가 발생하며 각 관절간의 상대운동에 의하여 로봇 끝단의 엔드이펙터(End-effector)를 작동시키기 때문에 링크의 높은 강성으로 인하여 부드러운 운동을 구현하기에 어려움이 있다. 사람의 팔과 같이 자유로운 운동이나 다양한 작업을 하기에는 어려움이 크다. 또한 팔의 각 축마다 모터를 부착해야 하여 팔의 전체 무게가 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 모션의 유연성을 확보하고 비교적 경량화가 가능한 유연 구조의 로봇 팔이 필요하게 된다.

유연 로봇 팔의 구동방식은 공압^[2], 유압^[3], 와이어^[4] 등 다양하다. 그 중 와이어를 이용한 유연 로봇 팔은 1987년에 최초로 제안되었다^[5].

본 연구에서 제안한 로봇 팔 메커니즘은 와이어를 이용한 유연 로봇 팔을 구동하는 방식이며, 이를 통하여 로봇 팔 자체의 무게를 2kg이하로 크게 줄일 수 있었다. 모든 모터를 고정

Received : May. 15. 2018; Revised : Aug. 18. 2018; Accepted : Dec. 10. 2018

※ This project was funded by the grant of research funding from the Seoul National University of Science and Technology.

1. Student, Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul, Korea (ill1006@naver.com)
2. Student, Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul, Korea (khan1093@naver.com)
3. Lecturer, Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul, Korea (monacoxo@naver.com)
4. Student, Dept. of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul, Korea (seungje0927@naver.com)

† Professor, Corresponding author: Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, 232, Gongneoung-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea (dhkim@seoultech.ac.kr)

지지대에 부착하고 로봇 팔은 와이어와 디스크 형의 조인트를 통하여 구동되고, 스프링을 통하여 탄성을 확보하는 새로운 메커니즘을 제안하였다. 기존의 와이어를 이용한 로봇 팔들은 중심에 탄성 튜브를 넣는 방식이 주된 방식이었으나⁶⁾, 위와 같은 방식은 일정 규모 이상으로 로봇팔이 커지기 어렵고, 각 디스크별로 회전 각도가 상당히 제한되어 있는 문제가 존재했다. 본 연구에서는 이러한 문제를 중앙에 유니버설 조인트를 배치하고 탄성체 대신 디스크의 끝 부분에 스프링을 부착하는 방식으로 해결하였다. 또한 제한한 로봇 팔의 경우는 사람의 모션의지를 그대로 로봇을 통해 구현할 수 있기 때문에 작업성 및 신속성이 더 증대되는 효과가 크다.

본 연구에서 로봇 팔의 상박과 하박은 각각 따로 제어되고, 로봇을 조종하는 사용자는 자신의 상박에 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서를 착용하여 상박을 회전시키면 이 회전각도 만큼 로봇 팔의 상박부가 회전하게 된다. 또한 사용자의 팔 하박에는 로봇 팔을 제어하기 위한 센서와 동시에 사용자의 손가락 동작을 알아내기 위한 EMG (Electromyography) 센서를 통합한 MYO 센서를 착용하도록 하였다.

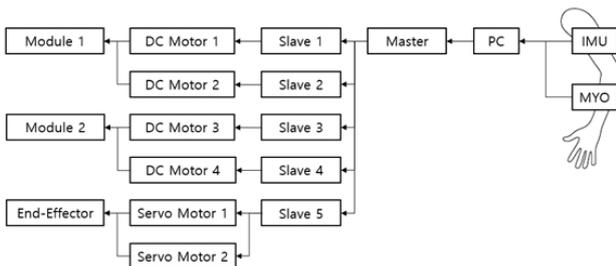
2. 시스템 구성

전체 시스템은 [Fig. 1]과 같이 구성된다. 사용자의 팔에 장착되는 IMU 센서는 각도 데이터를, 그리고 MYO 센서는 각도 데이터와 EMG 데이터를 측정하여 PC에 송신한다.

PC는 수신 받은 센서 데이터를 바탕으로 마스터(Master) MCU (Microcontroller unit)에 블루투스 통신을 통해 필요한 모터의 각도 값을 전달하고, 각각의 슬레이브(Slave) MCU는 전달받은 각도 값을 바탕으로 모터를 동작 시킨다. 총 다섯 개의 슬레이브 중 [Fig. 1]의 슬레이브 1~4는 하나씩의 DC 모터를 컨트롤하고, Slave 5는 서보 모터 두 개를 컨트롤하게 된다.

3. 유연 로봇 팔 설계

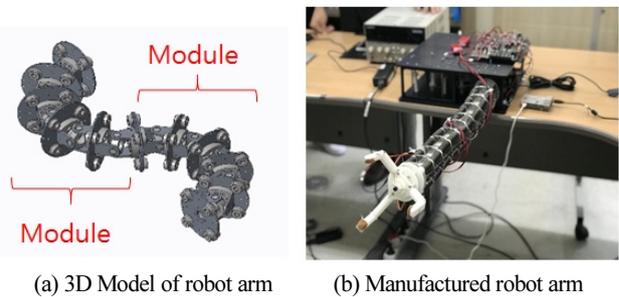
와이어 방식을 사용한 로봇 팔의 구조는 [Fig. 2(a)]의 모델링과 같다. 로봇 팔은 전체 길이의 중간을 기점으로 총 두 개의



[Fig. 1] System configuration diagram

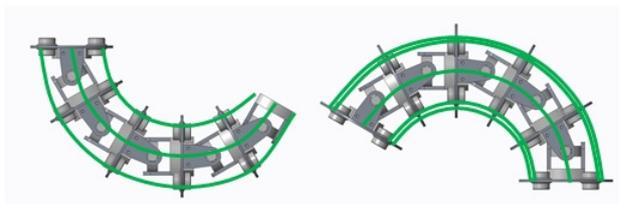
모듈로 나뉘어진다. [Fig. 2(b)]는 실제 제작된 로봇 팔의 사진이다.

모듈 1과 모듈 2는 각각 사람의 하박과 상박에 대응된다. 모듈 1은 5개의 디스크가 사용되며 그 구조는 [Fig. 2(c)]이다. 모듈 2는 총 6개의 디스크가 사용되며 그 구조는 [Fig. 2(d)]이다. 모듈 2는 와이어를 조종하는 본체와 직접 연결되고, 모듈 1은 엔드이펙터와 연결된다. 와이어는 모듈의 중간에 있는 디스크들을 통과하여 모듈의 끝에 위치한 디스크에 연결된다. 모듈 1 구조에서는 모듈 1을 동작하기 위한 네 개의 와이어가 디스크의 네 방향으로 통과하게 되고, 모듈 2는 모듈 1을 동작하기 위한 와이어 네 개, 모듈 2를 동작하기 위한 와이어 네 개 등 총 여덟 개의 와이어가 통과하게 된다. 각 모듈에서 사용된 디스크의 형상은 [Fig. 2(e)]와 [Fig. 2(f)]과 같다. 여기서 a와 b로 표기된 구멍으로 와이어가 각각 통과하게 된다. 팔의 총 길이는 500 mm 이고 각 조인트당 최대 회전 각도는 30°이고 모듈의 최대 회전각은 150°이다. 본 구조에서는 모티가 한쪽의 와이어를 당기면 전체 관절이 회전하면서 모듈이 굽혀지게 된다. 또한 모듈 내 각각의 디스크에 형상을 보조하는 스프링을 추가하여 형상의 안정성을 확보하였다.



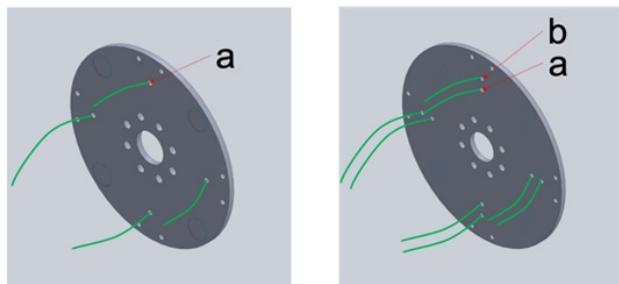
(a) 3D Model of robot arm

(b) Manufactured robot arm



(c) Module 1

(d) Module 2



(e) Disk of module 1

(f) Disk of module 2

[Fig. 2] Robot arm and its structure of key elements

4. 팔의 동작을 위한 기구학적 해석

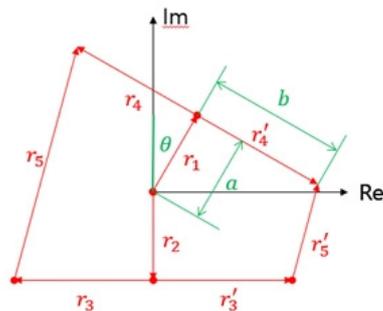
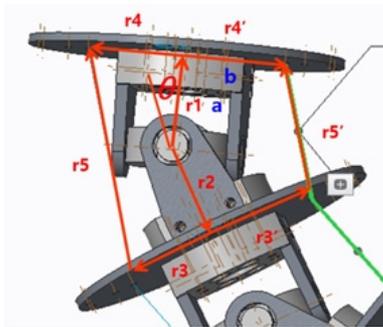
여기서는 각 모듈 내의 조인트의 회전량에 따른 와이어 길이를 계산하여 구동 모터의 회전각도를 구한다. 이를 위해 [Fig. 3]과 같이 하나의 조인트와 두 개의 디스크를 잇는 와이어를 하나의 페루프 시스템으로 가정하고, 식 (1)과 (2)에 해당하는 페루프식을 만들었다. 식 (1)과 (2)를 풀어 벡터 r_5 와 r_5' 의 길이 변화에 따른 상응하는 조인트의 회전각을 계산해 보았다. 페루프의 합성벡터가 0이 되는 원리에 의해 다음 두개의 식 (1)과 (2)가 성립한다.

$$r_1 + r_4 - r_2 - r_3 - r_5 = 0 \tag{1}$$

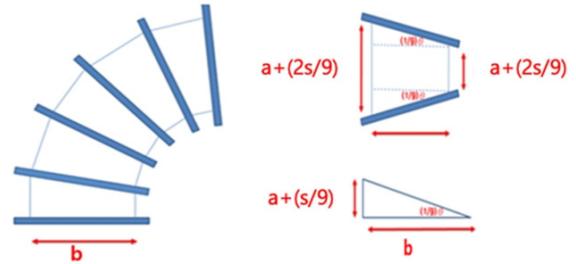
$$r_1 + r_4' - r_2 - r_3' - r_5' = 0 \tag{2}$$

r_1 벡터와 r_4 벡터의 길이를 각각 a , b 라 하고 조인트 회전각을 수직 축부터 측정하여 θ 로 하면 각각의 길이 벡터의 크기는 Euler 공식에 의하여 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= ae^{j(90^\circ - \theta)} \\ r_2 &= ae^{j(-90^\circ)} \\ r_3 &= be^{j(180^\circ)} \\ r_4 &= be^{j(180^\circ - \theta)} \\ r_3' &= b \\ r_4' &= be^{j(-\theta)} \end{aligned} \tag{3}$$



[Fig. 3] Diagram of loop closure equation



[Fig. 4] Cross section of a module

식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 벡터 r_5 와 r_5' 는 다음과 같다.

$$r_5 = (b - b\cos\theta + a\sin\theta) + j(a + a\cos\theta + b\sin\theta) \tag{4}$$

$$r_5' = (-b + b\cos\theta + a\sin\theta) + j(a + a\cos\theta - b\sin\theta) \tag{5}$$

따라서 벡터 r_5 와 r_5' 의 크기는 식 (6), (7)와 같다.

$$|r_5| = \sqrt{2(a^2 + b^2) + 2(a^2 - b^2)\cos\theta + 4absin\theta} \tag{6}$$

$$|r_5'| = \sqrt{2(a^2 + b^2) + 2(a^2 - b^2)\cos\theta + 4absin\theta} \tag{7}$$

본 연구에서 제안한 메커니즘이 사용자의 팔과 달리 와이어를 당겨 제어하는 방식이기 때문에 특정 목표 각도 값을 움직이기 위해서는 당겨야 하는 와이어 길이를 계산하는 것이 필요하다. [Fig. 4]에서 보는 것과 같이 팔의 어깨 부분은 고정되어 있고 각 모듈은 같은 길이의 변화가 일어나기 때문에 사다리꼴 형태를 띄게 된다. [Fig. 4]에 나타난 직각삼각형은 총 9개가 형성되게 되고, 로봇팔의 목표 회전 각도 θ 는 9개의 직각삼각형을 통해 표현된다. 따라서 와이어를 당겨 주어야 하는 길이 s 를 θ 를 통해 나타내면 다음의 식 (8)과 (9)와 같다. 여기서 와이어 길이 s 가 길이 반지름 r 로 나누어 모터를 회전시켜 주어야 할 각도를 구할 수 있다.

$$\tan\left(\frac{\theta}{9}\right) = \frac{s}{9} \frac{1}{b} \tag{8}$$

$$s = 9b \tan\left(\frac{\theta}{9}\right) \tag{9}$$

5. 센서 분석

5.1 MYO/EMG 센서

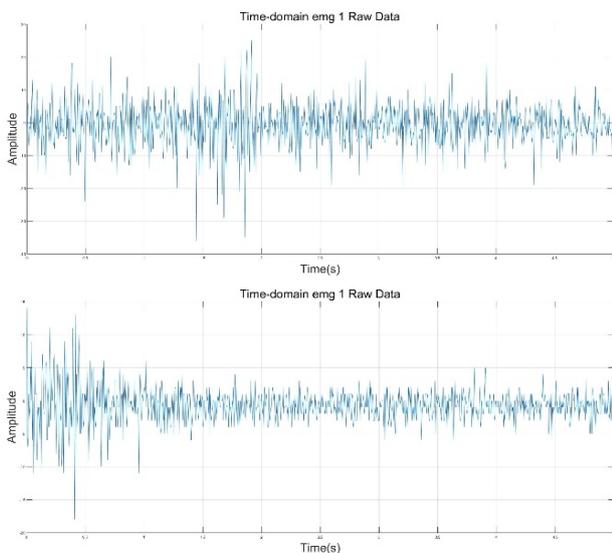
본 연구에서 사용한 MYO 센서는 Thalmic Labs에서 개발하

였으며 사람 팔의 움직임을 추적하는데 사용 가능한 센서이다⁸⁾. MYO가 내장하고 있는 센서는 9축 IMU 센서와 8개의 EMG 센서이며 실시간으로 측정 데이터를 디스플레이 하는 것이 가능하다. MYO가 지원하는 5가지 동작 외에 다른 동작을 알아내기 위해서 FFT (Fast Fourier Transform) 변환을 통하면 여러 유형의 동작을 알아 낼 수 있다. 상세한 내용은 다음 절에서 기술한다.

EMG는 골격근 및 운동 신경의 생리학적인 연구에 대표적으로 사용되고 있다. 그러나 근육 한 지점에서만 측정할 경우 동작을 판단하는데 한계가 있어 동작을 알아내고자 하는 신체 부위 몇 군데에 여러 개의 EMG 센서를 부착하여 데이터를 분석해야만 사람의 동작을 정확히 알아낼 수 있다. MYO 센서에는 동작을 측정하고 알아내는 내부 알고리즘이 존재하지만, 보다 더 많은 손동작을 알아낼 수 있게 하기 위해서는 EMG에 대한 분석이 필요하다. 이 연구에서는 이러한 EMG 데이터를 이용하여 사용자의 손가락 동작까지 알아내어 물체를 잡고 놓는 행동을 파악하는 것이 가능하게 하였다.

5.2 EMG 센서의 데이터 처리

EMG 데이터는 생체 신호이기 때문에 그 크기가 상당히 미세하다. 단순히 이 EMG 데이터를 진폭만으로 분석하기에는 큰 어려움이 있다. EMG의 진폭은 근육이 내하고자 하는 힘의 크기에 따라서 달라지기 때문에 다리 또는 팔의 수많은 곳에 EMG 센서를 부착해도 같은 동작을 하였을 때 그 힘에 따라 진폭은 크게 달라지며, 분명히 다른 동작을 하는데도 비슷한 데이터가 나올 수도 있다. [Fig. 5]는 손가락을 접을 때와 폼을 때 EMG 센서 1번 위치에서의 시간에 따른 출력신호 값이다. 보는



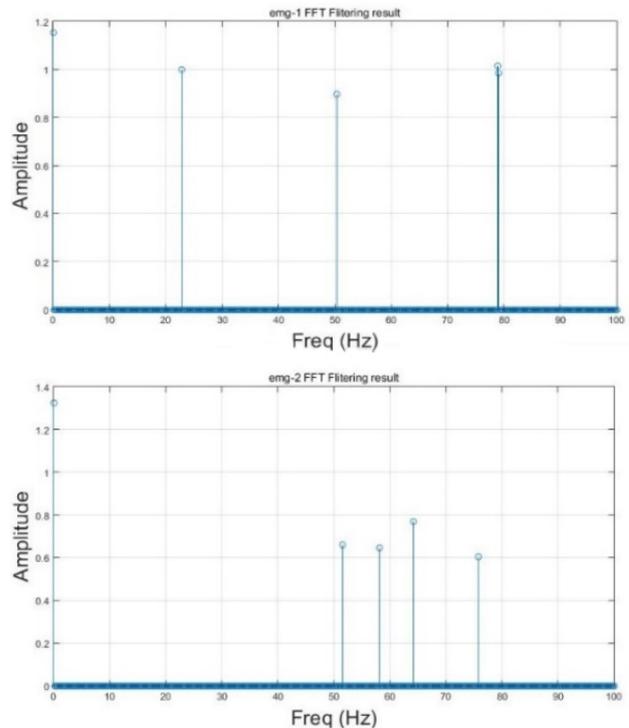
[Fig. 5] EMG data from sensor location 1 for finger fist (up) and spread (bottom)

바와 같이 두 신호 간의 동작의 구별이 불가능함을 알 수 있다.

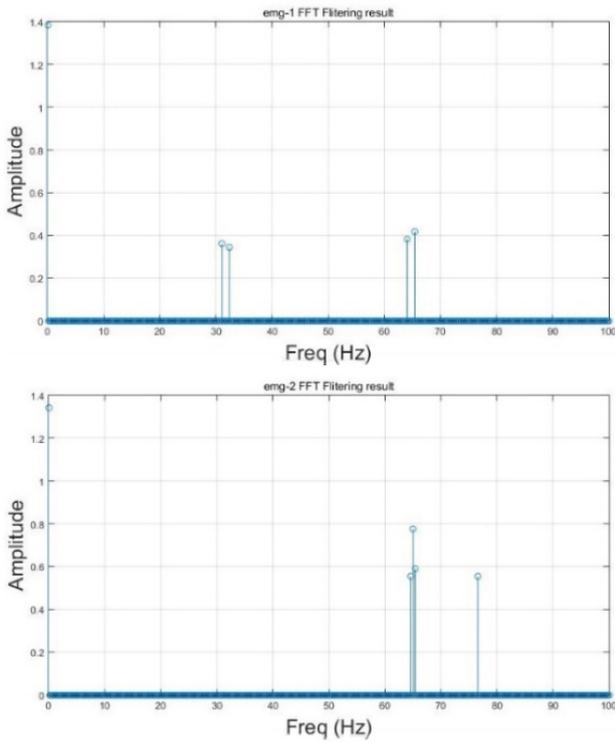
이러한 경우 생체신호를 시간 응답을 하는 대신에 FFT 분석 방법을 통한 주파수 응답을 이용하여 손가락 동작의 구별을 하는 것이 더 효과적이다. 우선 EMG 위치 1과 2에 대하여 FFT를 하기 전에 저대역 필터를 사용하였고 컷오프 주파수(cutoff frequency)를 90Hz로 적용하였다. 이후 FFT 알고리즘을 사용하여 주파수에 따른 크기 값을 추출한다. [Figs. 6~8]은 추출된 주파수 응답값이다. 그림에서 보는 주먹을 쥐는 경우와 폼을 쥐는 경우, 그리고 엄지손가락을 올리는 경우 주파수 응답값이 서로 크게 차이남을 알 수 있다. 바와 같이 FFT 알고리즘을 실제로 손 동작을 FFT를 사용하여 판단하는 연구는 많이 수행되었다^{9),10)}.

[Fig. 6]은 손가락을 접을 때의 1번과 2번의 위치에서의 EMG 출력신호를 FFT 처리한 결과이며 [Fig. 7]은 손가락 모두를 폼을 때의 동일한 위치에서의 EMG 신호를 보여준다. 다음으로 [Fig. 8]은 엄지손가락을 올려 로봇 엔드이펙터를 회전시키는 경우 EMG 신호를 보여준다. 손가락 동작을 구별하는 기본 알고리즘은 다음과 같다.

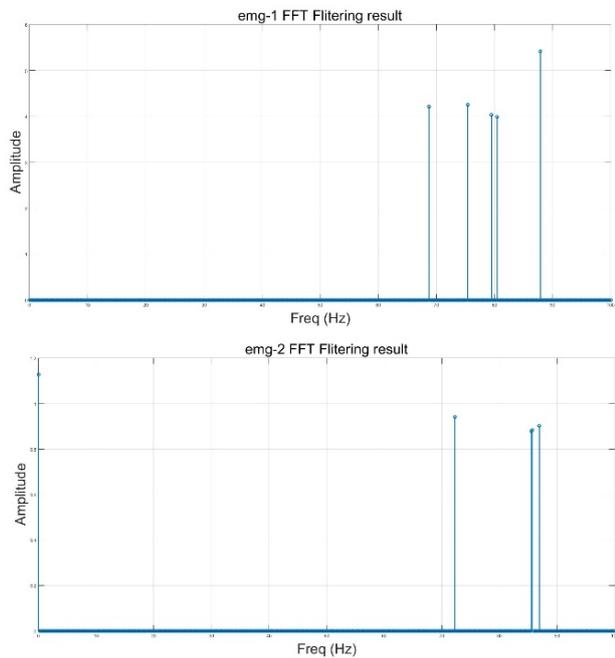
- i) FFT 데이터를 읽는다.
- ii) 경계값(threshold value)을 V_{th} 로 정한다
- iii) FFT의 주파수를 0부터 100Hz까지 스캔한다.
- iv) 크기값이 경계값보다 큰 경우의 주파수를 모두 기록하여 주파수열 $Freq_peak$ 로 저장한다.
- v) 스캔 완료 후 사전에 실험으로 찾은 기준 주파수열과 비교한다.



[Fig. 6] EMG FFT data from sensor locations 1 and 2 for making fist operation



[Fig.7] EMG FFT data from sensor locations 1 and 2 for spreading fingers operation



[Fig. 8] EMG FFT data from sensor locations 1 and 2 for thumb-up motion for rotating a robot wrist

- vi) 3개의 동작에 대하여 측정된 주파수열과 기준 주파수 열과의 근사도 값을 Closeness 값으로 정의한다.
 $Closeness = 1 / (\text{Freq_peak} - \text{Predefined data})^2$

예로 [Fig. 6]에서 1번 위치에서 $\text{Freq_peak} = [23, 50, 79]$ 이고 [Fig. 7]에서는 $\text{Freq_peak} = [31, 32, 64, 65]$ 이다. 실험적으로 구한 실제 주먹을 쥐었을 때의 기준 FFT 데이터 값이 $[24, 50, 80]$ 이면 이 값과 측정된 $\text{Freq_peak} = [23, 50, 79]$ 와 비교하여 근사도를 계산한다. 2번 위치에서도 같은 방법으로 근사도를 계산하여 1번 위치에서의 근사도 값과 평균하여 최종 근사도 값을 계산한다. 이 근사도 값이 다른 동작에 대한 근사도 값들과 비교하여 제일 큰 값을 가지면 주먹을 쥐는 것으로 판단하여 로봇 엔드이펙터에 주먹을 쥐라는 명령을 전달한다.

본 연구에서는 로봇 팔에 부착된 그리퍼를 펴는 경우와 잡는 경우와 그리퍼를 돌리는 세 가지 동작에 대해서만 데이터를 제시하였다. 그 외 다른 손가락 동작 역시 충분히 같은 방법으로 추정할 수 있다.

MYO 센서에서 제공하는 동작은 펴는 동작, 흔드는 동작 등 6개를 제공하고 있지만 본 연구에서와 같이 로봇 엔드이펙터를 이용하여 물체를 잡는 경우와 손목을 돌리는 경우와 같이 특별한 동작을 하는 경우 제공되는 동작 모드를 사용할 수 없기에 별도의 FFT 분석을 통하여 여러 형태의 사용자의 손가락 동작을 분리 할 수 있는 방법 및 절차를 제시하였다.

5.3 IMU 센서의 신호값 처리

본 연구에서는 IMU 센서로 MPU9250을 사용하였다. 가속도 및 각속도 출력 데이터에 상보필터를 적용하여 팔의 회전 각도값을 구하였다.

사용한 LPF (Low pass filter) 전달함수 TF_1 과 HPF (High pass filter)의 전달함수 TF_2 는 다음과 같다.

$$TF_1(s) = \frac{a_1}{s + a_1} \tag{10}$$

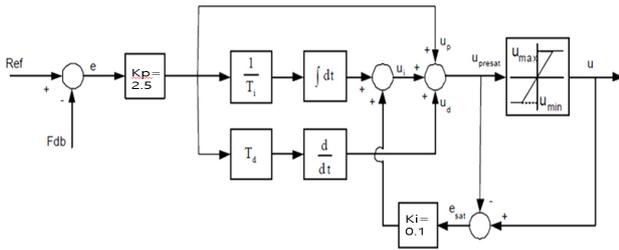
$$TF_2(s) = \frac{s}{s + a_1} \tag{11}$$

여기서 필터의 게인만 설정해주면 되는데 보통 0.9~1사이의 값을 가진다. 이는 센서의 환경 또는 센서의 사용처에 따라 유동적으로 변경이 가능하다.

6. 로봇 팔 제어시스템

6.1 Wind-up을 적용한 PID제어

로봇팔에 사용하는 모터는 엔코더가 부착된 DC모터이며, 로봇팔을 원하는 위치로 구동하려면 모터의 각도를 정확히 제



[Fig. 9] Anti-windup PID block diagram^[11]

어할 필요가 있다. 이를 위해 모터 위치제어 기술 중 간단한 PID제어를 사용하면 적분항 값이 누적되어 값이 급격히 바뀌는 경우가 있는데, 이를 보안하기 위해 Anti-windup PID를 사용하였다. [Fig. 9]는 이에 관한 블록다이어그램이다. 최종값의 상한과 하한을 두어 한계를 벗어나지 않게 하였고, 적분항에 최종값에 대한 피드백을 주어 적분값이 지나치게 누적되지 않게 하였다.

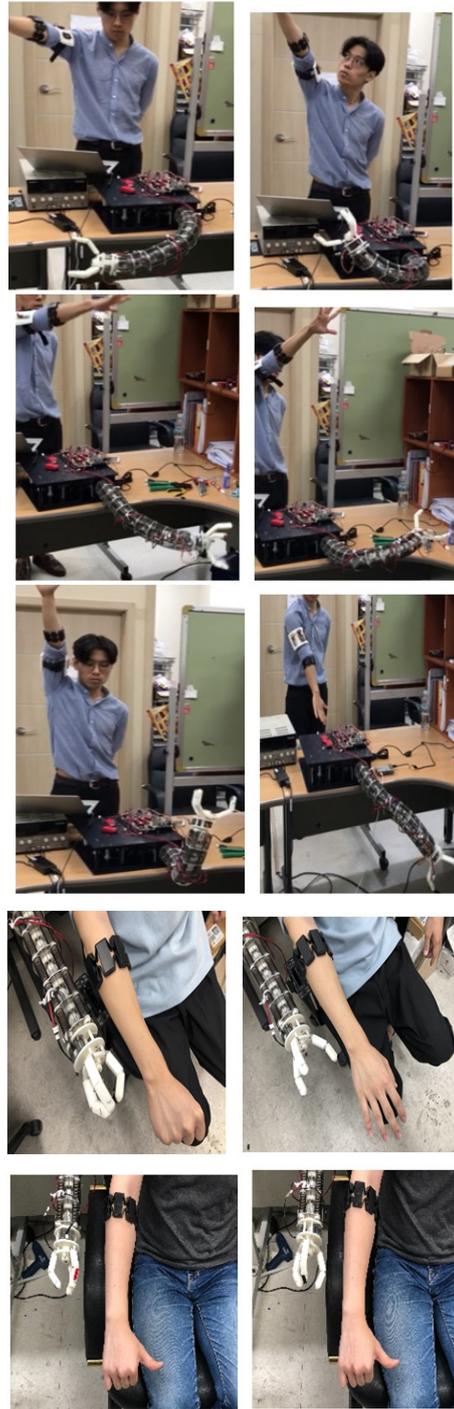
6.2 제어명령 전송

이 로봇은 총 6개의 모터를 사용하는데, 그 중 4개의 모터는 자세, 2개의 모터는 손목의 움직임을 제어하는데 사용한다. 이 중에 4개의 DC모터에 Anti-windup PID 제어를 적용하기 위해 모터 하나 당 한 개씩의 제어기를 사용하였다. 이러한 제어기를 슬레이브로 설정하였고, 이를 총괄적으로 통제하는 마스터 제어기를 하나 두었다. 다중통신은 SPI, I2C, RS485 등 다양하지만 본 연구에서는 SPI^[12]를 사용하였다.

본 연구에서는 1번 모터부터 4번 모터까지 순차적으로 명령을 보내고 값을 수신받는데, 이때 걸리는 주기를 50ms로 설정하여 통신을 설계하였다.

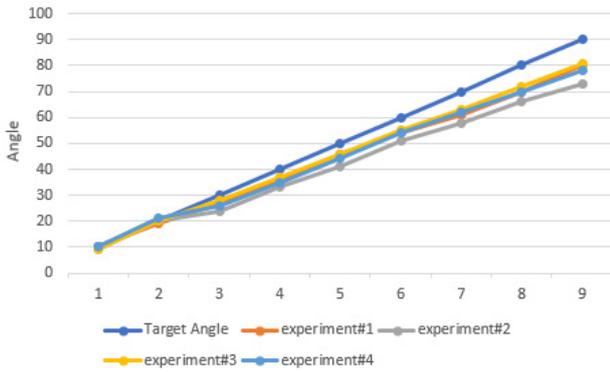
7. 실험결과

[Fig. 10]에서는 실제 팔을 움직인 각도와 로봇 팔이 움직인 각도 차를 확인하고, 손가락 동작에 따라 움직이는 엔드이펙터의 움직임을 확인하기 위하여 실험을 하는 이미지를 보여준다. [Figs. 11~14]는 실험자가 팔을 10도씩 움직였을 때 로봇 팔이 회전한 각도를 나타낸 것이다. Pitch(상하) 및 yaw(좌우) 동작을 사용자가 수행하면서 각 동작에 대한 로봇 팔의 추종 성능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 로봇 팔의 기구적 한계 상 최대 구동 각도는 100도이고 실험은 90도까지 행하였다. 실험 1~4는 같은 실험을 반복한 결과를 나타낸 것이다. 평균 오차율은 운동에 대한 반복 실험1~4에서 목표 각도와 실험 각도 간의 오차율을 계산하여 평균값으로 나타낸 것이다.

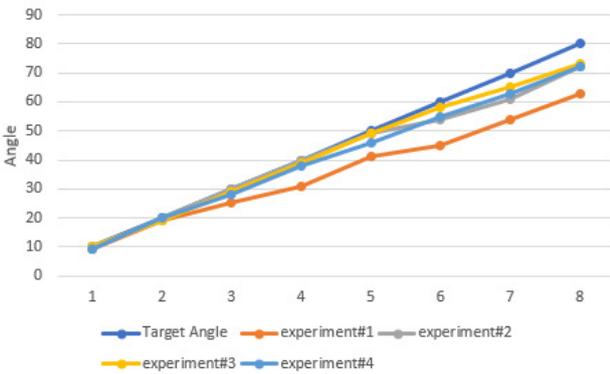


[Fig. 10] Actual operation of robot arm following human arm gestures and finger operations

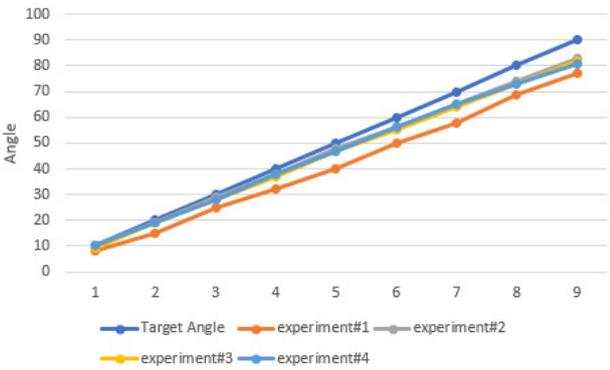
[Fig. 11]은 로봇 팔 전완부의 좌우 움직임을 나타내고 [Fig. 12]는 전완부의 상하 움직임을 나타낸다. 그리고 [Fig. 13]은 로봇 팔 상완부의 좌우 움직임을 나타내고 [Fig. 14]는 로봇 팔 상완부의 상하 움직임을 나타내며 4가지 운동 모두 90도 까지 움직인 실험 결과이다.



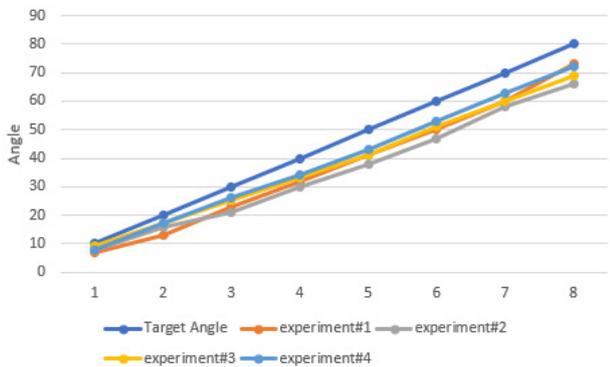
[Fig. 11] Yaw 1 motions for forearm



[Fig. 12] Pitch 1 motions for forearm



[Fig. 13] Yaw 2 motions for upper arm



[Fig. 14] Pitch 2 motions for upper arm

초기 30도 내에는 각도 오차가 크게 발생하지 않지만 오차가 누적되어 90도에 도달했을 때 15도 이상 차이가 남을 확인하였다. 특히 Pitch 값은 중력의 영향을 받아 각도 오차가 큰데, 이를 보완하기 위해서는 강성이 큰 스프링을 사용하여 기구적 치짐을 줄이거나, 치짐 값을 사전에 측정하여 각도 명령을 보상하는 방법이 있다. 각 운동에 대한 평균 오차율은 5%에서 최대 13%에 이르는 것으로 나타났다. 이 오차는 주로 90도 근방에서 발생하는 오차이며 회전 각도가 클수록 로봇 팔에 스프링의 저항이 증대하여 실제 사람의 팔 동작 각도를 충분히 따라가지 못하는 것으로 판명되었다.

각 동작 당 추종지연 시간은 최대 500 msec 이내로 측정되어, 사용자와 로봇 팔에서 벗어난 제3자가 보기에는 사용자가 90도 근방의 큰 각도로 움직일 경우를 제외하고는 동작지연은 크지 않게 보였다. 한편 이 지연시간은 저가 모터로 인한 늦은 응답성에 기인하였으며 또한 와이어가 완전하게 고정되거나 연결부가 제작되지 않아 응답지연이 발생하였다. 고 사양의 모터를 사용하고 와이어 고정부나 연결부를 고도화 시키면 충분히 줄일 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 저가의 모터 및 로봇 팔을 제작하여 비교적 우수한 성능을 구현하고자 한 것이 연구의 주목적이다.

8. 결 론

본 연구에서는 와이어를 이용한 새로운 유형의 메커니즘을 제안하여 무게를 줄이고 크기도 기존 로봇과 대비하여 줄인 로봇 팔에 대한 결과를 소개하였다. 모든 모터를 고정 지지대에 부착하고 로봇 팔은 와이어와 디스크 형의 조인트를 통하여 구동되는 메커니즘을 제안하였다. 로봇 팔은 총 2개의 모듈로 구성되고 이 모듈로 제작된 관절은 모두 유니버설 조인트로 연결되어 유연한 움직임을 확보할 수 있었다. 2개의 모듈을 모두 통과하는 와이어가 동작할 때 코일러의 크기를 각각 다르게 하여, 두 모듈을 동작시키는 모터의 회전각을 일치시키도록 하였다. 이를 통해 모션의 유연성을 확보하고 비교적 경량화가 가능한 유연 구조의 로봇 팔을 완성할 수 있었다.

다음으로 사용자 팔에 착용한 EMG 센서와 IMU 센서를 이용해 사용자의 팔 동작을 파악하고 제어기에서 로봇 팔에 각도 명령을 내려 로봇 팔이 사람의 팔 동작을 추종하도록 하였다. 또한 사용자의 손가락 동작을 인지하여 로봇의 엔드이펙터를 작동시켰다. 와이어를 이용해 각 모듈을 연결한 방식을 이용해 로봇 팔이 유연하여 장애물이 있을 경우 원만하게 휘어지는 장점이 생겼지만, 자체 무게로 인하여 치짐이 발생하고 각도를 크게 움직일 경우 로봇 팔 운동범위의 제한으로 오차 값이 다소 증가하여 목표지점에 정확하게 도달하지 못하는

경우가 발생하였다. 이 경우 모터의 회전에 필요한 각도 값을 이론적으로 계산하기 보다 실험적으로 보상하여 이를 수식화 하는 방법이 보다 현실적이다. 차후 보다 연구를 발전시켜 실제 작업자의 팔 동작을 완전하게 재현하기 위한 기구의 일부 수정에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- [1] H. C. Lee, S. C. Kim, and C. Y. Oh, "A study on position and vibration control of a flexible robot arm endpoint using PID and fuzzy controller", *Korean Society of Mechanical Technology*, vol.18, no.4, pp. 529-535, 2016.
- [2] D. Trivedi, C. D. Rhan, W. M. Kier, and I. D. Walker, "Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research", *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, no. 3, September, 2008, pp. 99-117, 2008.
- [3] W. Bernzen and T. Wey, B. Riege, "Nonlinear control of hydraulic differential cylinders actuating a flexible robot", *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1333-1334, 1997.
- [4] C. Ciofu and G. Stan, "Research regarding stiffness optimization of wires used for joints actuation from an elephant's trunk robotic arm", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 161, no. 1, 2016.
- [5] H. Takagi and Y. Nishi, "Flexible Robot Arm", *US5174168A*, 1992.
- [6] S. Song, Z. Li, H. Yu, and H. Ren, "Shape Reconstruction for Wire-driven Flexible Robots based on Bezier Curve and Electromagnetic Positioning.", *Mechatronics*, vol. 29, pp. 28-35, 2015.
- [7] Z. Li and R. Du, "Design and Analysis of a Bio-Inspired Wire-Driven Multi-Section Flexible Robot", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, 2013.
- [8] <https://www.forbes.com/pictures/emjl45himf/thalamic-labs/#436eb8f75a30>
- [9] X. D. Zhang and H. Y. Choi, "Pattern Recognition of Human Grasping Operations Based on EEG," *International Journal of Control, Automation, and System*, vol. 4, no.5, pp. 592-600, 2006.
- [10] K. J. You, K.W. Rhee, and H.C. Shin, "Finger Motion Decoding Using EMG Signals Corresponding Various Arm Postures," *Experimental Neurobiology*, Vol. 19, No. 1, pp. 54-61, June, 2010.
- [11] I. H. Ahn, "Study on inspective comparison for anti-windup schemes of PID controllers," M.S thesis, Kyungil University Graduate School, Gyungbuk, Korea, 2002.
- [12] H. Jo, J. Cheon, G. Park, M. Kwon, and S. Choi, "Design and Implementation of Artificial arm based on SPI communication," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Science*, pp. 778-778, 2017.



김 상 현

2018 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과(공학사)

관심분야: Automatic Control, Robotics, programming



김 민 호

2018 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과(공학사)

2018~현재 대학원 석사과정

관심분야: Robotics, 센서



강 준 기

2018 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과(공학사)

2018~현재 컴퓨터 학원 강사

관심분야: Programming



손 승 제

2017 서울과학기술대학교 기계시스템디자인 공학과(공학사)

2017~현재 대학원 석사과정 재학 중

관심분야: Image Processing, Programming, AI



김 동 환

1986 서울대학교 기계설계학과(공학사)

1988 서울대학교 기계설계학과(공학석사)

1995 Georgia Tech(공학박사)

1998~현재 서울과학기술대학교 기계시스템 디자인공학과 교수

관심분야: Mechatronics, Robotics, 자동차