

와이어형 형상기억합금 구동기를 이용한 인체 손가락 모델에 대한 연구

A Study on the Human Finger Model using Wire-type SMA Actuator

정진우[†] · 임수철^{*} · 박영필^{**} · 양현석^{**} · 박노철^{***}

Jin-Woo Jung, Soo-Choel Lim, Young-Pil Park, Hyun-Seok Yang and No-Cheol Park

Key Words : Shape Memory Alloy Actuator(형상기억합금 구동기), Prosthesis(의수), Human Finger Model(인간 손가락 모델), Position Control(위치 제어)

ABSTRACT

This paper describes a human finger model driven by shape memory alloy(SMA) wires. The finger model has three joints that are similar to human finger. Each joint is actuated with two wires in the antagonistic manner and six wires are used to actuate three finger joint. In order to obtain the desirable finger motion, the diameters of the SMA wires are designed with different diameters by considering the required actuating force and response time. The rotary sensors are used to measure the angle positions of the joints and PWM control using PID algorithm is used to achieve desired angle positions of the finger joints. After estimating the control performance of each finger joint for the desired angle position, the antagonistic motion control of the finger model is experimentally evaluated.

1. 서 론

인간 손 형태를 모방하여 로봇 gripper 나 의수(prosthesis)를 만드는 연구는 오랫동안 연구되어 왔다. 로봇의 gripper 나 의수의 구동기로서 전자기 모터를 이용한 구동방식이 개발되어 왔으며, 특히 초소형 모터를 사용하여 작은 크기의 손 모델을 구현하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그러나, 모터를 사용할 경우, 높은 감속비율이나 구동소음 등에 의해 손 크기에 집적하는 것은 비효율적이라 할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 다른 형태의 구동기를 개발하고자 하는 노력이 계속되어 왔으며, Piezo 물질, EAP, 형상기억합금(Shape Memory Alloy)과 같은 지능재료를 이용한 구동기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 형상기억합금은 형상기억효과(Shape Memory Effect)를 이용하여, 와이어나 스프링, 얇은 판, 또는 작동 메커니즘에 적합한 형태로 가공되어 구동기로 사용되고 있다. 스프링 형태의 경우, 길이 방향으로 인장 혹은 수축 후, 원래 기억된 길이로 복원되는 특성을 이용하는데, 원상회복력은 와이어 형태의 형상기억합금보다 작으나 긴 구동거리를 요구하는 시

스템에 적용이 용이하다. 와이어 형태의 경우, 변형길이는 짧으나, 큰 힘을 필요로 하는 시스템에서 용이하게 사용될 수 있다. 로봇 gripper 나 의수에 사용되는 손가락의 경우 회전 메커니즘이고, 구동 시 큰 모멘트가 필요하므로, 와이어 형태의 형상기억 합금을 사용하는 것이 적합하다고 할 수 있다. 더욱이, 모터에 비해 구동방식이 간단하며, 자중대비 발생시킬 수 있는 하중이 크고 구동 소음이 발생하지 않으므로 의수와 같은 작은 구조물의 구동기로서 집적하기 용이하다는 장점이 있다. 와이어형 형상기억합금을 구동기로 이용한 연구로서는, 여러 가닥의 와이어를 동시에 사용하여 구동기로 구성하는 방법에 대한 연구와[1], 여러 가닥으로 구성된 구동기의 비선형 구동 특성에 대한 연구 등이 진행되었다[2]. 와이어형 형상기억합금을 이용한 손가락이나 손 모델의 경우, 손가락 모델을 만들고 관절구동 실험을 수행하거나[3, 4], Rapid Prototyping 을 사용하여 형상기억합금의 용이한 설치가 가능한 손가락 구조물을 만드는 연구가 진행되었다[5]. 또한 손가락 관절과 유사한 구조물에 대하여 PWM, PID 제어기를 사용하여 위치 제어가 수행되었으며[6], 기존의 인가전류 대신, Peltier 효과를 이용한 열펌프를 사용하여 와이어를 구동시키는 연구가 제안되었다[7]. 따라서, 본 연구에서는 형상기억합금 와이어를 이용한 손가락 모델을 구성하였으며, 각각의 손가락 관절뿐만 아니라 전체 손가락에 대한 위치 제어 실험을 수행하였다.

[†] 연세대학교 기계공학과 대학원

E-mail : tristh1@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 정보처리기기 연구센터

** 연세대학교 기계공학과 정교수

*** 연세대학교 정보저장 협동과정

2. 손가락 모델의 구성

손가락 모델을 구성하기 위하여, 사람의 손가락 모양 및 관절의 운동방식을 모방하여 설계하였으며, 세 관절을 독립적으로 움직일 수 있는 손가락 모델을 설계하였다. 각각의 관절을 독립적으로 구동시키기 위하여 형상기억합금 와이어를 각각의 관절 부분에 고정시켰으며, 구동 시 관절 부분의 마찰을 줄이기 위하여 소형 베어링을 사용하였다. 형상기억합금 와이어는 인가된 전류에 의하여 발생된 열로써 상변화가 일어나며, 이 때 형상기억 효과에 의한 수축력을 발생시키도록 구성하였다. 또한 적절한 원상회복력을 얻기 위하여 와이어의 초기변형을 조절가능 하도록 설계하였으며, 각 관절에 고정된 와이어에 각각 전류를 흘리기 위하여 전체 손가락 구조물은 절연 가능한 재료로 설계되었다.

Fig. 1 은 손가락 모델의 관절 메커니즘을 나타낸다. 와이어 길이 변형에 의하여 관절 회전각이 발생하며, 관절 회전각을 θ , 와이어 변형길이를 Δl , 관절 축 반지름을 r 이라 할 때, 원하는 관절 회전각은 다음 식과 같다.

$$\theta = \frac{\Delta\ell}{r} \quad (1)$$

본 연구에서는, 관절 반지름을 3mm로 설계하였으며, 손가락 구동에 필요한 관절 회전 각도를 90°로 하였을 때, 변형길이는 약 4.7mm이다. 형상기억합금 와이어는 초기 길이에 8%정도까지 변형되었을 때 원래 길이로 완전 복원 가능하나 반복구동의 내구성을 보장하기 위하여 허용변형 양을 5%정도로 제한하였다. 따라서, 4.7mm의 변형길이를 얻기 위해서 사용해야 할 와이어 길이는, 94.2mm의 값을 얻었다. 또한 구동 시 제작상의 오차 등을 감안하여 2.5mm 이상의 여유 변형길이를 확보하기 위하여, 150mm 와이어를 적용하였다.

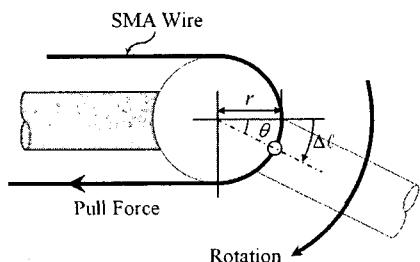


Fig. 1 Finger joint mechanism

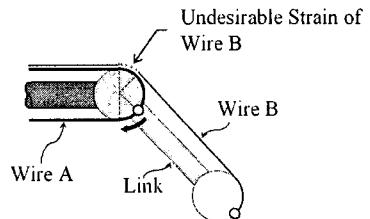
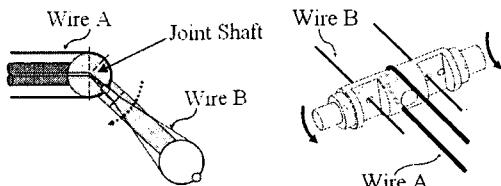


Fig. 2 SMA wire path to finger joints



(a) desired wire path

(b) joint shaft

Fig. 3 Proposed finger joint mechanism using SMA wires

Fig. 2 는 형상기억합금 와이어를 이용하여 각 관절을 움직이도록 와이어를 연결시킬 때 설정된 와이어 경로이며. 이렇게 설정되는 경우 와이어가 해당 관절을 구부릴 때 앞쪽 관절에 연결된 와이어도 늘일 수 있음을 보여준다. 이러한 간섭을 없애기 위하여, Fig. 3 (a)와 같이 관절을 지나가는 와이어의 경로를 각 관절의 중심을 지나도록 설계하였다. 관절 부분에 와이어를 연결하고 다른 관절의 와이어는 해당 관절의 중심을 지나가게 하기 위하여 Fig. 3 (b)와 같이 관절 축을 설계하였다. Fig. 4 는 실제로 제작된 손가락 모델이며, 각 관절마다 관절 회전각 측정을 위하여 로터리 센서(포텐셔미터)를 부착하였고, 손가락 맨 끝 관절을 첫 번째 관절로 정의하였다.

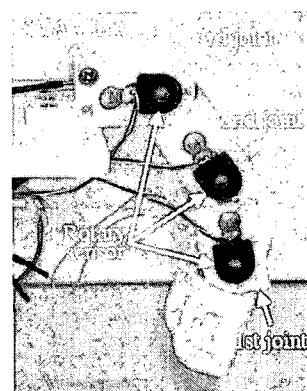


Fig. 4 Photograph of the manufactured finger model

형상기억합금 와이어는 두꺼운 지름일수록 원상회복력은 커지고 반응속도는 떨어지며, 얇은 와이어일수록 원상회복력이 작아지고 반응속도는 빨라진다. 따라서, 모델의 적절한 관절 구동을 위하여 각 관절 별로, 최소의 원상회복력으로 최대의 반응속도를 얻을 수 있는 와이어를 선택하여야 한다. 제작된 손가락 모델의 경우, 두 번째, 세 번째 관절을 구동할 때, 앞 관절의 하중과 앞 관절에 연결된 와이어의 원상회복력이 구동 하중에 영향을 미친다. 그러므로, 구동에 적합한 지름의 와이어를 선택하기 위하여, 각 관절 별로 여러 가지 지름의 와이어에 대하여 두 가지 관절 구동 실험을 수행하였다. 먼저, 앞 관절 하중 극복을 위하여 단일 관절 구동 실험을 수행한 후, 앞 관절을 구동하는 와이어의 원상회복력을 극복하기 위하여 복수 관절 실험을 수행하였다. 이 때, 과도하게 발생된 구동 열로 인하여 와이어가 타는 것을 방지하기 위하여 와이어 지름 별로 적절한 전류 양을 제한하였다. 즉, 0.002in~0.010in 지름의 와이어에 대해 실험을 수행하였으며, 첫 번째 관절의 경우, 지름 0.004in 와이어(원상회복력:150g)를 사용하였을 때, 최대 0.5Hz 의 반응속도를 얻었다. 두 번째 관절의 경우, 0.005in(원상회복력:230g) 와이어를 사용하여 0.4Hz 의 반응속도를 얻었다. 세 번째 관절의 경우, 0.010in(원상회복력:930g) 와이어를 사용하였으나 가장 많은 하중과 다른 두 관절의 와이어에 의한 원상회복력을 극복해야 하므로 원상회복력이 충분하지 않아 관절이 제대로 구동되지 않았다. 따라서, 0.008in 와이어(원상회복력: 590g) 두 가닥을 사용하여 반응속도와 원상회복력을 증가시켜(원상회복력: $1180g = 590g \times 2$) 0.1Hz 이상의 반응속도를 얻었다. 최종적으로, 첫 번째 관절은 0.004in 와이어, 두 번째 관절은 0.005in 와이어, 세 번째 관절은 0.008in 와이어 두 가닥을 구동 와이어로 사용하였다.

3. 위치 제어 실험 및 성능 고찰

위치제어 성능 실험을 위하여 Fig. 5 와 같이 컨트롤 회로를 구성하였다. 컨트롤 마이크로 프로세서로는 Atmega128 칩을 사용하였고, 로터리 센서로부터 측정된 관절의 회전각을 AD 컨버터를 사용하여 받아들였으며, 목표 각도까지 회전시키기 위하여 와이어에 충분한 전류가 입력되도록 전류

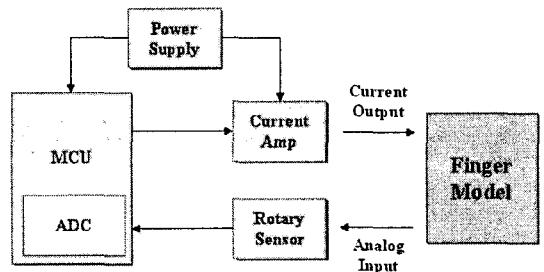


Fig. 5 Block diagram of control circuit

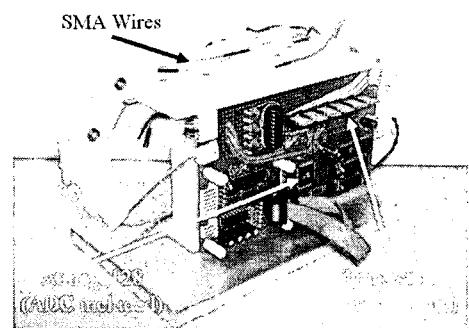
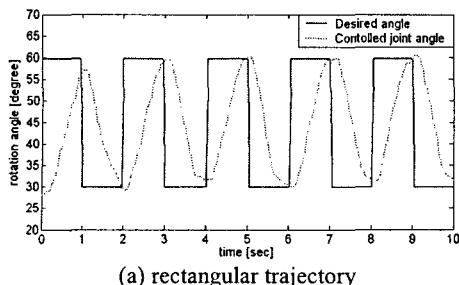


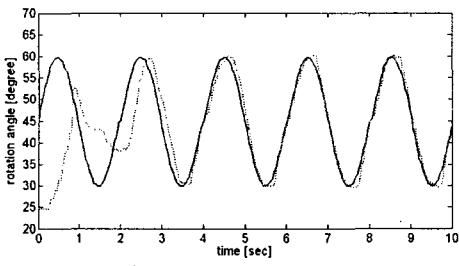
Fig. 6 Experimental setup

증폭 트랜지스터를 사용하였다. 관절의 효과적인 위치제어를 위하여 PID 제어기를 설계하였으며 이로부터 얻은 제어 계인을 이용하여 PWM 듀티비를 조절하여 입력전압을 제어하였다. 또한, 각각의 형상기억합금 와이어의 성능을 고려하여 제어 기기를 구성하였다. Fig. 6 은 손가락 모델과 제어기를 포함하는 전체 실험장치를 나타낸 것이다.

먼저, 각각의 손가락 관절의 제어 성능을 알아보기 위하여 각 관절에 대한 개별적인 제어성능 실험을 수행하였으며, Fig. 7 은 첫 번째 관절에 대한 사각파 및 sinusoidal 과형의 요구 위치에 대한 제어 실험 결과이다. 결과들로부터 알 수 있듯이 0.5Hz 의 요구 위치에 대해 우수한 제어 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 두 번째, 세 번째 관절에 대해서 각각 0.4Hz, 0.1Hz 의 요구 위치에 대하여 유사한 제어 성능을 확인하였다. 이 후, 세 개의 관절을 동시에 목표 각도로 제어하는 실험을 수행하였다. Fig. 8 은 각 관절에 각각 30°~ 60°사이의 사각파형 입력을 동시에 주었을 때의 제어 결과이다. 각 관절에서의 제어 성능이 단일 관절 구동 제어 실험결과와 매우 유사한 제어 성능을 보였으며, 각 관절의 원하는 위치제어가 잘 달성됨을 확인하였다.

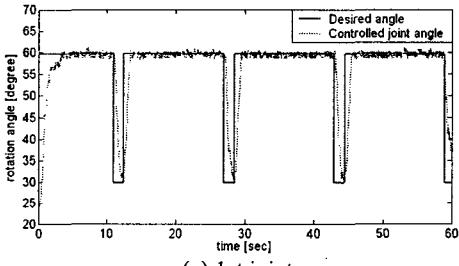


(a) rectangular trajectory

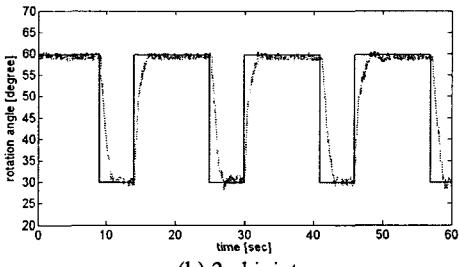


(b) sinusoidal trajectory

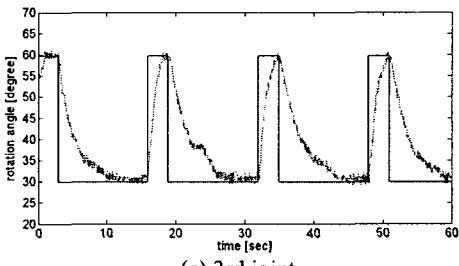
Fig. 6 Measured control responses



(a) 1st joint



(b) 2nd joint



(c) 3rd joint

Fig. 7 Rectangular trajectory control responses of the Multi finger joints

4. 결 론

와이어형 형상기억합금을 손가락 관절의 구동 기로 사용하였으며, 개별 관절의 구동 실험과 복수 관절을 동시에 구동하는 실험을 수행하였다. 단일관절인 경우(첫 번째 관절), 최대 0.5Hz의 반응속도를 얻었으며, 복수 관절을 구동 시 모든 관절의 구동 완료까지 최대 0.2Hz의 반응속도를 얻었다. 위 실험 결과를 통해, 와이어형 형상기억합금이 작은 구조물이나 무소음 특성 요구하는 구동기로서 효과적으로 쓰일 수 있음을 확인하였다. 앞으로 제어 성능을 높이기 위하여 수학적 모델링을 통한 강건제어기 설계와 더불어 손가락 모델을 포함하는 전체 손 모델의 구성 및 제어성능 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- (1) DeLaurentis, K. J., Fisch, A., Nikitczuk, J., and Mavroidis, C., 2002, "On the Design of Shape Memory Alloy Wire Bundle Actuators", Proc. of the 14th CISM-IFToMM Symposium on ROBOTICS, RoManSy 2002, Springer-Verlag.
- (2) Mosley, M., and Mavroidis, C., 2001, "Experimental Nonlinear Dynamics of a Shape Memory Alloy Wire Bundle Actuator", Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Trans. ASME, Vol. 123, No.1, pp. 103-112.
- (3) Pfeiffer, C., DeLaurentis, K. J., and Mavroidis, C., 1999, "Shape Memory Alloy Actuated Robot Prostheses: Initial Experiments", Proc. of the 1999 IEEE International Conf. on Robotics and Auto., Detroit, Michigan, May 1999, pp. 2385-2391.
- (4) DeLaurentis, K. J., Mavroidis, C., and Pfeiffer, C., 2000 "Development of a Shape memory Alloy Actuated Robotic Hand", Proc. of the ACTUATOR 2000 Conference, Bremen, Germany, June 19-21, 2000, pp. 281-285.
- (5) DeLaurentis, K. J., and Mavroidis, C., 2002, "Mechanical Design of a Shape Memory Alloy Actuated Prosthetic Hand", Technology and Health Care, Vol. 10, No. 2, pp. 91-106.
- (6) Toshiyuki, H., and Takashi, M., 2004, "Development of a Miniature Robot Finger with a Variable Stiffness Mechanism using Shape Memory Alloy", International Symposium on Robotics and Automation, August 25-27, 2004, Querétaro, México.
- (7) Selden, B., Cho, K. J., and Asada, H. H., 2004, "Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect", Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4931-4936.
- (8) Gorbet, R. B., and Russell, R. A., 1995, "A Novel Differential Shape Memory Alloy Actuator for Position Control", Robotica, Vol. 13, pp. 423-430.