

초음파 모터를 이용한 다관절 로봇 손가락의 개발

Development of a Multi-Joint Robot Finger using Ultrasonic Motors

김 병호^{†,†*}, 유 범재[†], 오 상록[†], 서 일홍[†], 박 종오[°], 이 종원[†]

† : 한국과학기술연구원 정보전자연구부 (Tel. : (02)958-5748, Fax. : (02)958-5709)

‡ : 한양대학교 전자공학과 (Tel. : (0345)408-5802, Fax. : (0345)408-5803)

° : 한국과학기술연구원 기전연구부 (Tel. : (02)958-5621, Fax. : (02)958-5629)

Abstract

In order to develop a dextrous robotic hand, a prototype of three joint finger is designed and implemented. Each joint is driven by an ultrasonic motor and a harmonic drive for compact design and good control performance, where conventional robotic hands use tendon to drive joints which often causes control problems for fine motion of a hand. A VME-BUS-based control system is also developed and compliance control of the developed finger is experimented in real time.

Keyword : Robot finger using ultrasonic motor

1. 서론

산업용 로봇에서 엔드이펙터(end-effector)로 지칭되는 로봇 손은 대부분의 경우, 그 구조가 간단하여 제작은 용이하나 단순한 기능만을 할 수 있기 때문에 실질적으로 그 응용범위는 작업물의 이동, 간단한 부품의 조립공정, 용접, 도장 및 포장 등의 작업에 제한되어 있는 실정이다.

이러한 한계를 극복하고 다양한 작업에 적용하기 위한 다지 다관절 로봇 손의 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1]-[5]. Jacobsen, et al [1]은 4 개의 손가락을 갖는 Utah/MIT hand 를 개발하였다. 각 손가락은 공압 실린더에 의해 구동되는 텐던(tendon)을 이용하여 독립적으로 제어되며, 4 개의 관절로 구성되어 있다. Loucks, et al [2]은 로봇 손의 전반부에 장착한 구동 메카니즘(mechanism)에 연결된 텐던을 이용하여 각 관절을 구동하는 Stanford/JPL hand 를 개발하였다. 이 로봇 손은 3 개의 손가락을 갖고 있고, 각 손가락은 3 개의 관절로 구성되어 있다. Anthrobot-2 Hand [3]는 5 개의 손가락을 갖는 로봇 손으로서 각 손가락은 텐던 시스템을 통한 서보 모터에 의해 구동되는 4 개의 관절로 구성되어 있다. Toshiba Hand [4]는 4 개의 손가락을 갖고 있고

, 각 손가락은 서보 모터에 연결된 선(wire-driven)에 의해 구동되는 4 개의 관절로 구성되어 있다. Barrett Hand [5]는 텐던 구동 방식의 3 지 로봇 손으로서, 단지 4 개의 모터에 연결된 텐던을 이용하여 전체 7 개의 관절을 구동하기 때문에 손의 운동에 있어서 제한이 따른다. 이러한 기존의 다지 로봇 손은 텐던 메카니즘을 근거로 개발되었기 때문에 액츄에이터(actuator)를 포함한 로봇 손의 전체적인 시스템이 크게 되고, 초기에 텐던을 정확하게 실장하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 장 시간 사용에 따른 텐던의 변형으로 인하여 정밀하게 제어하기가 어렵다.

본 논문에서는 텐던 방식이 안고 있는 문제점을 개선하고, 가능한 액츄에이터를 손가락 내부에 포함시킨 구조의 로봇 손을 개발하기 위한 시도로서 초음파 모터를 이용하여 직접 구동이 가능하도록 한 로봇 손가락을 개발하였다. 또한 VME-BUS 를 기반으로 한 제어 시스템을 개발하여 개발한 로봇 손가락의 컴플라이언스 제어 실험을 수행하였다. 개발한 로봇 손가락은 3 개의 관절을 갖고 있는데, 손가락의 내부에 초음파 모터와 기어 메카니즘이 장착되어 있고, 관절의 위치를 센싱(sensing)하기 위한 포텐시오테타(potentiometer)가 각 관절에 부착되어 있다. 개발한 로봇 손가락은 모터에 의한 직접 구동이 가능함으로써 보다 정밀한 제어가 가능하고, 초음파 모터의 특성을 그대로 이용할 수 있기 때문에 접촉 상황에서의 컴플라이언스 제어가 용이하다.

2. 초음파 모터의 특징

초음파 모터는 초음파 진동에너지를 이용하여 모터의 회전자와 고정자의 마찰력을 회전력으로 변환시키는 새로운 형태의 모터로서, 다음과 같은 특징을 갖고 있다 [11].

(i) 크기 대 토크 비가 크고, 가볍다.

(ii) 정지 토크가 크다.

(iii) 저속에서의 응답특성이 양호하며, 정속한 운동이 가능하다.

(iv) 자계의 영향을 받지 않는다.

현재까지 초음파 모터의 기본 특성에 관한 연구뿐만 아니라, 이러한 특성을 이용한 컴플라이언스 운동 제어나 정지 상태에서의 토오크 제어, 고 정밀 위치 제어 및 의수(prothetic arm) 등에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다 [6]-[10].

3. 로봇 손가락의 구조 및 특성

개발한 로봇 손가락은 인간의 손의 두번째 손가락을 모델로 하였고, 그 외형은 그림 1 과 같다. 그리고 개발한 로봇 손가락은 초음파 모터와 기어 메카니즘(gear mechanism)에 의해 구동되고, 3 개의 회전 관절을 갖는다. 각 관절은 한 개의 초음파 모터(Model USR30-B3, Shinsei Co. Ltd.), 한 개의 하모닉 드라이브(Model CS-8-2A-R, Harmonic Drive Systems Co. Ltd.), 한 쌍의 베벨기어(Model MHN-1/module 0.3, Berg Co. Ltd.), 그리고 한 개의 포텐시오메타(potentiometer) 등으로 구성된다. 여기서, 사용된 하모닉 드라이브 메카니즘은 동력전달 특성이 매우 정밀한 감속기(50:1)로서 초음파 모터의 회전비를 조절한다. 그리고 각 관절에 부착되어 있는 포텐시오메타는 각 관절의 위치 제어를 위해 사용되었다.

개발한 로봇 손가락의 정량적인 주요 사양은 표 1 에 나타내었고, 특징은 다음과 같다.

- (i) 초음파 모터를 이용한 직접 구동이 가능하다.
- (ii) 구동원을 포함한 형태의 크기가 작고, 가벼운 손가락의 제작이 가능하다.
- (iii) 초음파 모터의 동특성을 그대로 이용할 수 있어서 손가락의 정지 및 동작시의 컴플라이언스 제어가 쉽다.
- (iv) 저속에서 고 정밀도의 위치 제어와 정속한 운동이 가능하다.
- (v) 각 관절이 독립적으로 쉽게 분해 및 조립될 수 있기 때문에 수리가 쉽다.

한편, 초음파 모터는 마찰 구동이기 때문에 마찰 손실로 인하여 내구성이 짧은편이다. 따라서 강한 마찰재 등에 관한 연구가 필요하다.

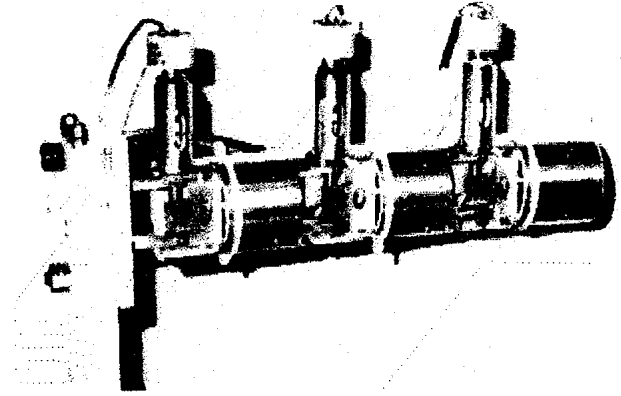


그림 1: 개발한 로봇 손가락의 사진
Figure 1: Photograph of the developed robot finger

표 1: 개발한 로봇 손가락의 사양
Table 1: Specifications of the developed robot finger

Items	Spec.
Driving Frequency	50 KHz
Efficial torque of 1st joint	14.53 Kgfcmm
Efficial torque of 2nd joint	12.87 Kgfcmm
Efficial torque of 3rd joint	10.09 Kgfcmm
Fingertip power for upwards	0.48 Kgfcmm
Fingertip power for horizontal	0.71 Kgfcmm
Fingertip power for downwards	0.95 Kgfcmm
Holding Torque	15 Kgfcmm
Line Speed of finger	90 deg/sec
Operation range	-30 to +90
Diameter	ϕ 36 mm
Total length	214 mm
Total mass	480 g

4. 로봇 손가락의 컴플라이언스 제어

4.1 제어 시스템의 설계

로봇 손가락의 제어 시스템은 VME-BUS 를 기반으로 실시간 운용체제인 VxWorks 에 의해 운용되고, 주 프로세서(Motorola 68040), 초음파 모터 구동기, 엔코더 인터페이스(encoder interface) 로 구성되며, 그림 2 와 같다. 여기서, 초음파 모터 구동기는 Kato, et al [6] 가 제안한 위상차를 이용한 제어 기법을 근거로 하여 설계하였고, 이것은 손가락의 내부에 장착되어 있는 초음파 모터의 구동을 위해 사용되며, 그 블록 다이어그램은 그림 3 과 같다.

4.2 컴플라이언스 제어

초음파 모터의 탄성 및 점성 특성의 제어는 비례-미분 제어 루우프에 의해 가능하다. 미분 이득(K_D)을

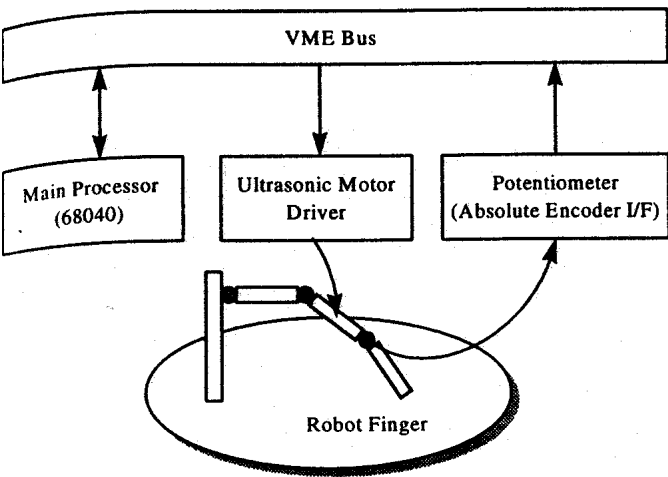


그림 2: VME-BUS 를 기반으로 한 로봇 손가락의 제어 시스템
Figure 2: VME-BUS-based robot finger control system

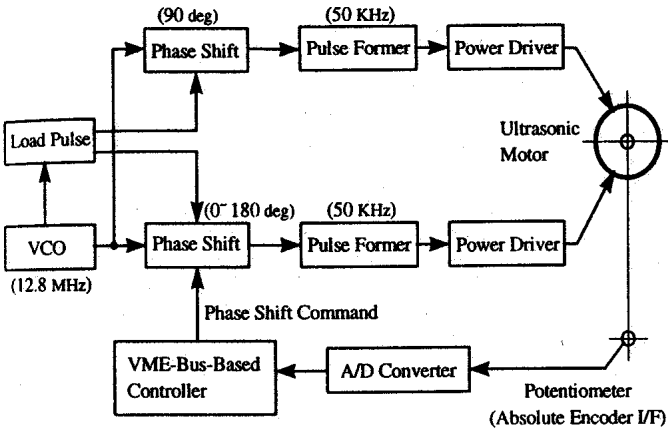


그림 3: 초음파 모터의 구동 시스템
Figure 3: Ultrasonic motor driving system

고정하고, 비례 이득(K_P)을 조절하면, 마치 스프링에 있어서 스프링 상수를 조절하는 것과 유사한 효과를 얻을 수 있고, 비례 이득을 고정하고, 미분 이득을 조절하면, 초음파 모터의 제동 계수(damping coefficient)를 가변하는 것과 같기 때문에 모터의 점성 특성을 얻을 수 있다. 이러한 근거에 의해, 본 논문에서는 비례-미분 제어 루우프를 그림 4 와 같이 구성하였다 [7].

개발한 로봇 손가락의 컴플라이언스 특성을 확인하기 위해 먼저, K_P 를 고정하고, K_D 의 조절에 의한 실험을 수행하였고, 다음으로 K_D 를 고정하고, K_P 의 조절에 의한 실험을 수행하였다. 여기서는, 관절 3 에 대한 실험 결과를 각각 그림 5 와 그림 6 에 제시하였다.

그림 5 에서는 K_D 가 커질수록 오버슈트(overshoot)는 줄어들지만, 상승 시간(rise time) 이 길어지게 되는

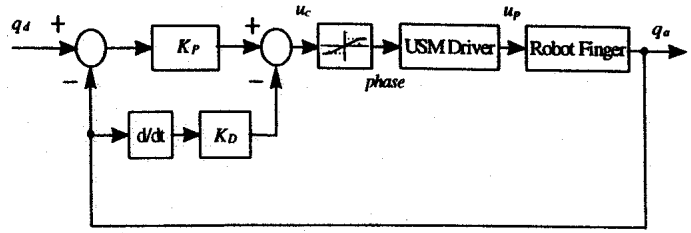


그림 4: 개발한 로봇 손가락의 컴플라이언스 제어 블록도
Figure 4: A compliance control system for the developed robot finger

경향을 확인할 수 있다. 이것은 K_D 의 조절에 의해, 손가락의 점성 특성 제어가 가능함을 의미한다. 그림 6 은 K_P 가 커질수록 오버슈트는 커지고, 상승 시간은 짧아지는 경향을 보여준다. 즉, 초음파 모터에서 속도가 빨라지게 되면, 토크가 커지기 때문에, 결과적으로 K_P 의 조절에 의해, 손가락의 탄성 특성 제어가 가능함을 확인할 수 있다.

따라서, 비례 이득과 미분 이득의 조절에 의해, 로봇 손가락의 컴플라이언스 특성 제어가 가능함을 알 수 있다.

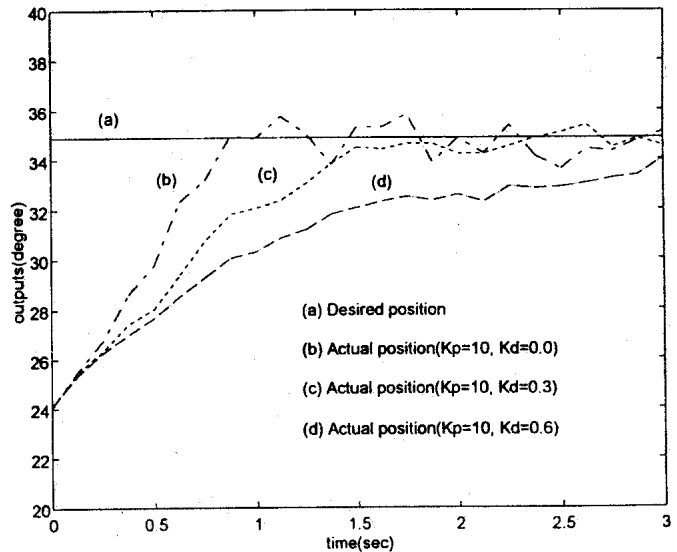


그림 5: D 이득 조절에 따른 로봇 손가락의 계단응답
Figure 5: Step responses of the 3rd joint for D gain(K_D)

5. 결론

본 논문에서는 초음파 모터를 이용하여 직접 구동이 가능한 새로운 형태의 로봇 손가락을 개발하였다. 그리고 개발한 VME-BUS 를 기반으로 한 제어 시스템을 개발하여 로봇 손가락의 컴플라이언스 제어를

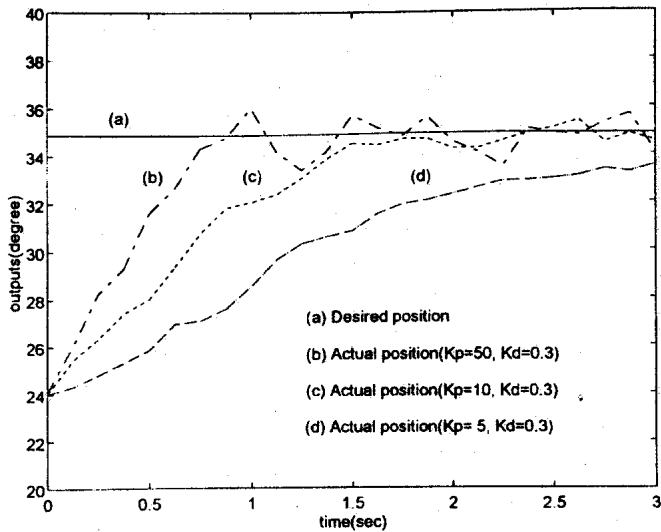


그림 6: P 이득 조절에 따른 로봇 손가락의 계단응답
Figure 6: Step responses of the 3rd joint for P gain(K_P)

수행하였다.

개발한 로봇 손가락의 특징은 다음과 같다. 첫째, 액츄에이터(초음파 모터)를 손가락의 내부에 장착함으로써 직접 구동이 가능하여 기존의 텐던(tendon) 방식에 의한 로봇 손가락의 제어 오차를 개선할 수 있다. 둘째, 초음파 모터의 동특성을 직접 활용할 수 있기 때문에 외부환경에 대한 컴플라이언스 제어가 용이하다. 셋째, 수리(maintenance)가 쉽다. 결과적으로, 기존의 텐던 방식에 의한 로봇 손가락에 비해, 한층 더 제어성을 향상시킬 수 있고, 액츄에이터(actuator)를 포함한 구조로써 비교적 작은 크기의 로봇 손의 개발에 응용이 가능하다.

• 한편, 손가락의 기구적인 보완과 구동 방법, 센서를 기반으로 한 제어(sensor-based control), 그리고 각종 신호를 보다 효과적으로 처리할 수 있는 제어 알고리즘의 개발 등에 대한 연구가 필요하다. 특히, 손가락의 크기와 성능은 초음파 모터의 크기와 특성에 직접적으로 관련이 있기 때문에 소형이면서 고투오크 특성을 갖는 초음파 모터의 개발이 요구된다.

참고 서적

[1] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Jhonson, and K. Biggers, "Design of the Utah/MIT dextrous hand," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1520-1532, 1986.

[2] C.S. Loucks, V.C. Johnson, P.T. Boissiere, G.P. Starr, and J.P.H. Steele, "Modeling and control of the Stanford/JPL hand," *Proc. of IEEE In-*

ternational Conference on Robotics and Automation, pp. 573-578, 1987.

- [3] M.S. Ali, K.J. Kyriakopoulos, and H.E. Stephanou, "The kinematics of the Anthrobot-2 dextrous hand," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 705-710, 1993.
- [4] H. Hashimoto, H. Ogawa, M. Obama, T. Umeda, K. Tatuno, and T. Furukawa, "Development of a multi-fingered robot hand with fingertip tactile sensors," *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 875-882, 1993.
- [5] -, "Barrett hand BSM8-200 manual," *Barrett Technology Inc., Cambridge, Massachusetts, USA*, 1994.
- [6] A. Kato, K. Ito, and M. Ito, "Adjustable compliant motion of ultrasonic motor," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 5, No. 5, pp. 434-437, 1993.
- [7] A. Kato, N. Kondo, H. Narita, K. Ito, and Z.W. Luo, "Compliance control of direct drive manipulator using ultrasonic motor," *Proc. of Ro. Man. Sym. '94, Gdańsk, Poland*, Sept. 12-15, 1994.
- [8] K. Ito, M. Pecson, Z.-W. Luo, M. Yamakita, A. Kato, T. Aoyama, and M. Ito, "Compliance control of an EMG-controlled prosthetic forearm using ultrasonic motor," *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1816-1823, 1994.
- [9] M. Kaneko, T. Nishihara, and T. Tsuji, "Active control of self-locking characteristic of ultrasonic motor," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2928-2934, 1995.
- [10] T. Senjyu, H. Miyazato, and K. Uezato, "Quick and precise position control of ultrasonic motors with two control inputs," *26th Annual IEEE Power electronics Specialists Conference*, pp. 415-420, 1995.
- [11] T. Sashida, and T. Kenjo, "An introduction to ultrasonic motors," *Oxford science publications*, 1993.