

초음파모터를 이용한 직접구동방식의 전완로봇 개발

김재효*, 신 덕, 김대현, 김영동
조선대학교 제어계측공학과

Development of Direct Drive Forearm Robot using Ultrasonic Motors

Jae-Hyo Kim*, Duk Shin, Dae-Hyun Kim, and Young-Dong Kim
Dept. of Control and Instrumentation Eng., Chosun University
#375 Seosuk-dong, Dong-gu, Kwangju 501-759, KOREA
(E-Mail : ydkim@ic21a.chosun.ac.kr)

요 약

이 논문은 초음파모터를 이용한 직접구동 방식의 전완로봇 개발에 관해서 논하였다. 기어 감속 없이도 느린 동작하에서 큰 힘을 제공하기 위해 진행파형 초음파모터를 액츄에이터로 사용하였다. 이 시스템에서는 환경과의 상호작용력에 의한 힘 피드백 제어는 사용하지 않고, 위치 정보만을 사용하였다. 크랭크 회전같은 접촉작업과 핑거의 협력작업에 대한 실험을 고찰하였다.

1. 서론

18세기 이래 손에 대한 메카니즘과 의수나 원격조정 장치를 위한 다양한 모델링에 대한 연구가 지속되어 왔다¹⁾. 좀 더 최근에는 인간의 손에 대한 메카니즘이 산업용 로봇의 그리핑 분야에서 연구되고 있고, 그 중 대부분이 조립 작업시에 사용되고 있다. 많은 학자들은 고풍력 모터와 정밀 엔코더, 기어들을 장착하기 위해 큰 forearm을 가지고 작고 강력한 인터페이스를 가지는 역학적인 손을 개발하는데 성공하였다²⁾. 전기모터는 고속에서 낮은 토크를 발생하면서 동작하지만 대부분의 경우, 저속과 높은 토크를 요구한다. 이를 위해 변환장치로서 기어 박스를 사용하는 경우가 많다. 그러나 기어를 사용함으로써 마찰이나 백러쉬, 토크 리플, 잡음 등이 유발된다³⁾. 또한 인간 크기의 모델을

개발하는데 있어서 손의 크기와 중량을 최소화하는 것은 필수적이다.

이런 문제들을 극복하기 위해 다이렉트 드라이브 방식의 모터를 사용함으로써 저마찰, 제로-백러쉬 변환 등의 효과를 얻을 수 있다. 자체 제작한 전완로봇의 액츄에이터로 사용한 초음파모터는 소형 경량구조, 저잡음, 높은 응답특성, 저속회전 및 높은 토크-중량비와 같은 좋은 특성을 가지고 있다. 게다가 초음파모터의 경우 로터와 스테이터 사이의 접촉에 의해 유기되는 뛰어난 점탄성 특징을 가지고 있기 때문에 일반 액츄에이터보다 컴플라이언스 제어 특성이 우수하다⁴⁾. 이 제어 시스템은 힘-피드백을 사용하지 않고 위치제어를 하는 생물학적 모델에 근거를 두고 있으며, 또한 동역학적인 계산을 필요로 하지 않는다.

이 논문의 나머지 장은 이 시스템의 제어와 하드웨어 구성에 관한 생물학적 착상에 대해 서술하였고, 크랭크회전이나 협력작업과 같은 접촉작업의 실험에 관하여 고찰하였다.

2. 전완로봇과 근골격 시스템

인간의 근육은 탄성특성을 가지는데 이를 그림 1과 같이 근사적으로 모델화할 수 있다. 각 관절의 점탄성 특성은 근육의 탄성특성⁵⁾과 생물학적으로 밀접한 관련이 있다⁶⁾. 이는 관절이 팔의 끝점에서 임피던스를 측정하여 일정한 강성을 넘으로써 탄성력을 가지고 움직인다는 의

미이다⁷⁾. 여러가지 근육의 강성에 변화를 주어서 손의 임피던스를 바꿈으로써 다양한 작업들을 수행할 수 있다⁸⁾. 이런 특성을 내기 위해 forearm의 액츄에이터는 마치 가변의 점탄성을 가진 탄성체처럼 동작한다. 그림 1에 표기된 스프링의 평형상태 위치 θ_{set} 를 변화시킴으로써 제어를 할 수 있다. 그림에서 관절에 가해진 토크 τ_o 는 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau_o = K_{joint}(\theta - \theta_{set}) + B_{joint}(\dot{\theta}) \quad (1)$$

이 관절은 점성과 탄성을 가진 A와 B의 끝을 반대방향으로 이동함으로써 움직인다. 이 탄성체의 강성에 변화를 주면 관절의 강성은 변하게 된다. 이 관절은 고유 평형상태 위치(θ_{set})를 가지게 되나 일반적으로 중력과 다이내믹 로드에서 기인한 차이각(θ)상태로 된다.

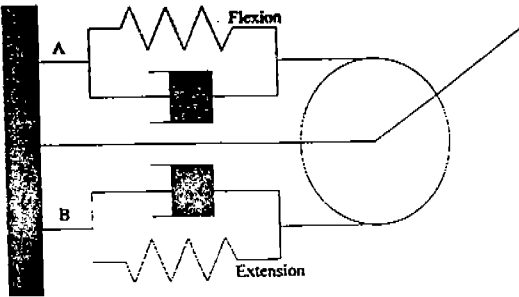


그림 1. 인간 근육의 점탄성 모델화

인간근육을 모델로 제작한 전완로봇은 스스로 감지할 수 있는 운동을 한다. 만약 로봇이 어떤 장애물의 방해를 받거나 충돌할 경우, 로봇은 간단하게 경로를 비껴 나간다. 이런 장애물들은 시스템의 제어에 의해 처리됨으로써 어떤 감지작업이나 계산도 필요로 하지 않는다. 두 번째로 이 시스템은 저주파 특성을 가지기 때문에 모터에 가해지는 명령들은 유연한 동작을 하는 동안 낮은 비율로 보내진다. 이런 특성은 충분한 지연시간을 가지고 시스템을 제어할 수 있도록 해준다. 그러나, 이 시스템의 단점은 정확한 위치제어를 전달하는 관절의 강성이 낮다는 것이다. 인간은 일반적으로 강성을 증가시킴으로써 좋은 위치제어를 하는데 이런 유사한 특성들을 자체제작한 전완로봇에서 구현해 보았다.

3. 컴플라이언스 제어

이 forearm은 탄성적이어서 실제 조인트들은 목표점과 일치하지 않는다. 이 조인트들은 전체 시스템의 동역학적 측면과 연관이 있다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \tau - \tau_o \quad (2)$$

τ 와 τ_o 는 각각 4×1 벡터의 출력 토크와 조인트 토크를 나타낸다. $M(\theta)$, $C(\theta, \dot{\theta})$, $G(\theta)$ 는 일반적인 의미의 관성, coriolis, 중력을 나타내는 항들이다. 이런 비선형적인 항들은 forearm의 모양에서 기인한 것으로서 $\dot{\theta}$ 와 θ 는 조인트각 θ 로부터 인터럽트 간격을 줌으로써 소프트웨어적으로 계산된다. 식 (1)과 (2)로부터 계산된 조인트 토크는

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) - K_{joint}(\theta - \theta_{set}) - (B_{joint} - B_{motor})\dot{\theta}$$

이다. 여기에서 B_{motor} 는 액츄에이터의 고유 점성값이다. 일반적으로 forearm의 위치는 기구학으로부터 주어진다. 이것은 조인트각 θ 에 대한 forearm 끝점의 위치벡터 \vec{X} 와 관련이 있다.

$$\vec{X} = L(\theta) = L'(\theta_{set}) \quad (4)$$

특별한 모양의 선택으로부터 force field \vec{F}_o 는 $\tau_o = J^T \vec{F}_o$ 로부터 구할 수 있고, (1)식으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$J^T(\theta) \vec{F}_o = K_{joint}(\theta - \theta_{set}) + B_{joint}\dot{\theta} \quad (5)$$

여기에서 $J(\theta)$ 는 조인트각으로부터 카르테시안 좌표계에 대한 자코비안이고 T는 변환 연산자이다. 모든 액츄에이터들의 고유점성과 $G(\theta)$, 그리고 $C(\theta)$ 는 상대적으로 작은 값이므로 이들을 무시하면, 식 (3)에서 2차 제어시스템을 가지는 다음과 같은 폐루프 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{\theta_{set}(S)}{\theta(S)} = \frac{K_{joint}}{(Ms^2 + Bs + K)} \quad (6)$$

시스템응답을 가지는 원형 2차계를 가정했을때 제동비와 고유 비제동 주파수는 다음과 같다.

$$\xi = \frac{B}{2\sqrt{M \cdot K}}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (7)$$

그림 2는 이 제어시스템의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

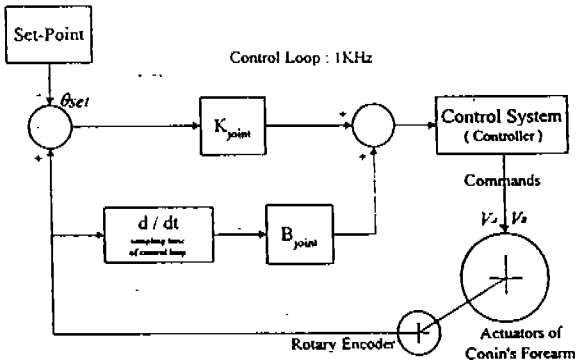


그림 2. 제어시스템의 블록 다이어그램

4. 실험

4-1. 하드웨어 설명

자체 제작한 전완로봇의 외형을 그림 3에 나타내었다. 이 전완로봇은 4-자유도를 가지고 있으며 그 구조는 팔, 손목, 그리고 두개의 핑거를 가진 손, 이렇게 세 부분으로 나눌수 있다. 각 부분들은 초음파모터와 직접 연결이 되어 있어서 독립적으로 6가지의 모션(pronation, supination, flexion, extension, grasping, hand opening)을 행할 수 있다. 모터 안에는 모터의 상태를 알수 있는 정밀한 엔코더들이 내장되어 있다. 자체 제작한 전완로봇의 액츄에이터에 대한 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 액츄에이터의 사양

	Movable Range	Torque Rating	RPM Rating
Elbow	170 deg	3.2Kgf · cm	90
Wrist	120 deg	3.2Kgf · cm	90
Hand	80 deg	1.0Kgf · cm	250
Total Length	30 cm		
Total Weight	Approximately : 1Kg		

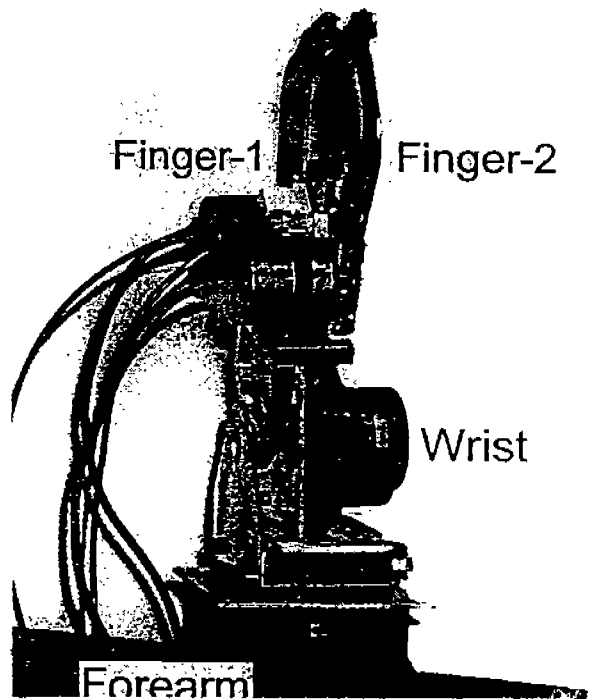


그림 3. 전완 로봇의 외형

초음파모터의 속도 특성은 스테이터의 온도, 외부 부하, 소비마찰 등에 의해서 비선형적으로 변한다. 그래서 구동 모터의 안정성과 고효율 토크를 얻기위한 일정한 공진주파수를 유지하기 위해 DDFS를 장착한 자동추적 주파수 회로를 개발하였다. 명령들을 구동 액츄에이터에 전달해주는 AD 컨버터는 16비트로 3MHz의 버스클럭을 가진다. 16비트 타이머-카운트 보드는 로터리 엔코더들의 값들을 읽어들이고, 이 값들은 다음 명령들을 계산하기 위해 AD컨버터 카드에 보내진다. 그림 4는 제어기의 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 여기서 사용된 제어 소프트웨어는 Visual C++ 컴파일러로 프로그램 되었다.

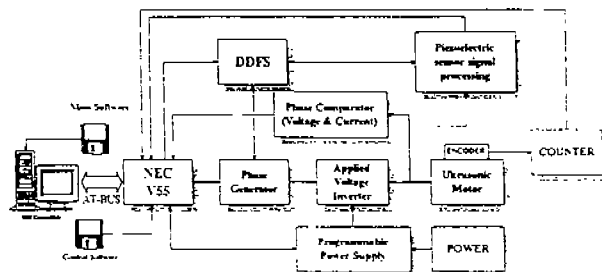


그림 4. V55 마이크로 프로세서 컨트롤러 블록 다이어그램

4-2. 실험 결과

그림 5에서는 접촉작업 실험에서 나타난 힘에 대한 응답결과를 나타내고 있다. 가상의 위치값을 주었을 때 전완로봇은 반원모양으로 일

정한 속도를 유지하며 도달했다. 전완로봇의 이동경로 안에 평평한 표면을 가진 강체를 놓았다. 그림 5는 전완로봇이 장애물과 접촉했을 때 엔드포인트에서 나타나는 상호작용력이다. 초음파모터는 전완로봇의 자유동작시나 작업공간 내 장애물이 있을때에도 뛰어난 컴플라이언스 제어능력을 나타내었다.

위치응답에 대한 점탄성 특성을 관찰하기 위해 K_{joint} , B_{joint} 와 같은 파라미터들은 소프트웨어에 의해서 계속해서 보정되어진다. θ_{set} 은 90(deg)로 고정시켰다. 위치 제어를 위해 관절의 탄성계수 K_{joint} 를 크게 했을 때는 그림 6과 같이 목표점에 도달하지 못하고 진동을 발생하였다. 여기에서 발생한 진동을 없애기 위해 관절의 점성계수 B_{joint} 값을 증가시킨 결과 그림 7과 같이 오실레이션 없이 목표점에 도달하였다.

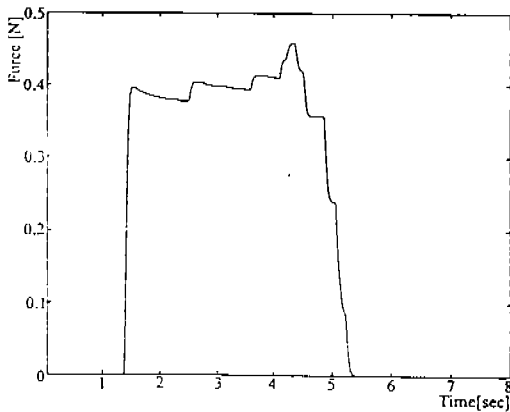


그림 5. 장애물과 접촉시 상호작용력

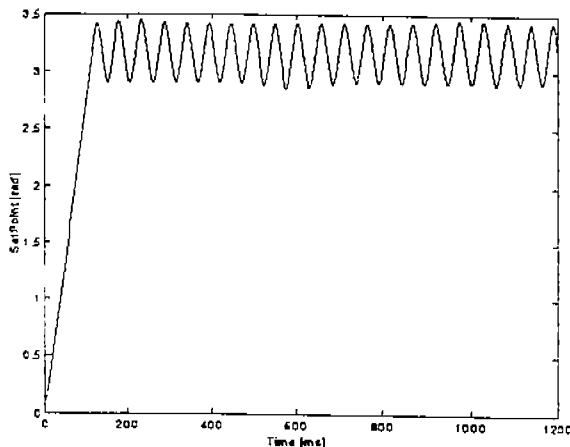


그림 6. 위치 응답 ($K_{joint}=200$, $B_{joint}=-40$)

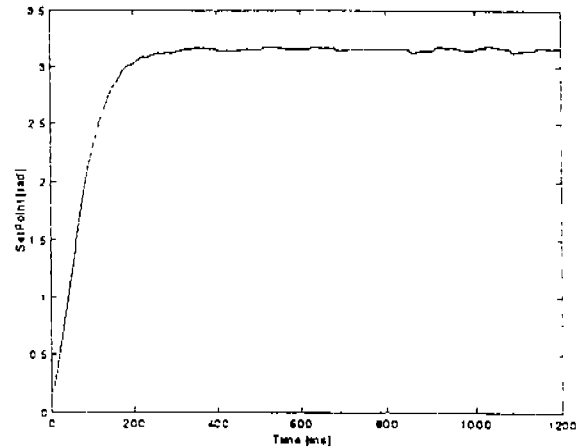


그림 7. 위치 응답 ($K_{joint}=50$, $B_{joint}=250$)

5. 결론

이 논문에서 텔리오퍼레이션을 위한 중속로봇으로서 4자유도를 갖는 전완로봇을 개발하였다. 초음파모터는 전완로봇의 액추에이터로서 뛰어난 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 특히 초음파모터는 백러쉬나 비선형 마찰이 거의 없는 직접구동 방식의 모터로서 적합하였다. 두 번째로 출력도오르는 점탄성 특성의 요소를 도입함으로써 보정될 수 있었고 전완로봇은 동작시 강체와 부딪쳤을 때에도 점성과 탄성을 가지고 그 표면과 상호작용하였다. 이 전완로봇의 조인트는 인간과 유사한 점탄성 특성을 가지고 있어서 앞에서 밝힌 특성들을 기반으로 해서 컴플라이언스 제어를 함으로써 유연한 동작들을 할 수 있었다.

위 실험의 결과들로부터 중앙 신경 시스템에 의해 보내진 모터 명령으로써 EMG 신호를 사용한 전완로봇은 생체공학 분야에서 장애인들에게 적용될 수 있다. 또한 가상현실 환경에서 촉각 인터페이스를 가진 일방적인 주/종 로봇 시스템을 도입함으로써 열악한 작업환경하의 로봇 응용분야에 막대한 영향을 미칠 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Lundstorm, G., Glemme, B., Rooks, B. W., "Industrial Robots-Gripper Review", International Fluidics Services Ltd., 1979.
- [2] Brock, David L. Brock, and Salisbury, J. Kenneth, "Implementation of Behavioral

- Control on a Robot Hand/Arm System", 1991
- [3] H. Asada and T. Kanade, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms", ASME Trans., Vol. 105, pp. 312-316, 1983
 - [4] S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, and N. Nakamura, "Ultrasonic Motors : Theory and Applications", Clarendon press, OXFORD, 1993.
 - [5] Felix E. Zajac, "Muscle and Tendon : Properties, Models, Scaling, and Application to Biomechanical and Motor Control", CRC Critical Reviews of Bio. Eng., 1989.
 - [6] S. Cannon and G. I. Zahalak, "The mechanical behavior of active human skeletal muscle in small oscillations", Journal of Biomechanics, 15:111-121. 1982.
 - [7] Ferdinando A. Mussa-Ivaldi, Neville Horgan, and Emilio Bizzi, "Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans", Journal of Neuroscience, 2732-2743, October, 1985
 - [8] Neville Horgan, "The mechanics of multi-joint posture and movement control", Biomedical Cybernetics, 52:315-331, 1993