

마스터장치의 회전강성을 고려한 공압인공근육의 원격조정

김령현*·강봉수**

* 한남대학교 기계공학과

Teleoperation of Pneumatic Artificial Muscles Based on Joint Stiffness of Master Device

Ryeong Hyeon Kim* and Bong Soo Kang**

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received August 5, 2013 ; Revised October 1, 2013 ; Accepted October 6, 2013)

Key Words: Teleoperation(원격조정), Pneumatic Artificial Muscle(공압인공근육), Antagonistic Actuation(상극구동), Master/Slave(마스터/슬레이브)

초록: 본 논문에서는 마스터 조정자인 인간의 근육강도와 관절변위를 측정하여 슬레이브장치가 외부환경에 맞는 작업능력을 발휘할 수 있는 마스터/슬레이브 원격조정시스템을 제안한다. 외골격형 기구부와 경량의 관성센서를 사용하여 마스터 착용자의 편리성을 높였으며 인간의 근육과 동일한 운동특성을 가진 공압인공근육으로 슬레이브 기구장치를 구성하여 운동의 모사능력을 향상시켰다. 실험을 통해서 단순히 마스터의 위치정보만 전달하는 원격조정에 비해서 제안된 마스터는 인간 조정자가 근력의 세기를 조절함으로써 슬레이브에 작용하는 가반하중의 변화에 관계없이 균일한 제어성능을 가질 수 있었다.

Abstract: This study proposes a wearable master device that can measure the joint stiffness and the angular displacement of a human operator to enhance the adapting capability of a slave system. A lightweight inertial sensor and the exoskeleton mechanism of the master device can make an operator feel comfortable, and artificial pneumatic muscles having a working principle similar to that of human muscles improve the performance of the slave device on emulating what a human operator does. Experimental results revealed that the proposed master/slave system based on the muscle stiffness sensor yielded uniform tracking performance compared with a conventional position-feedback controller when the payload applied to the slave system changed.

1. 서론

로봇 기구부를 제어하기 위한 마스터(master)/슬레이브(slave) 장치는 로봇기술의 태동과 함께 시작된 기술로 슬레이브인 로봇의 움직임 명령을 생성하기 위해서 로봇과 유사한 기구를 가진 마스터에 센서를 장착한 후 인간 사용자가 직접 마스터를 조정하면 센서를 통해 제어에 필요한 정보를 측정하여 슬레이브에 전달한다. 마스터와 슬레이브간의 기구형태와 기구 인자(parameter) 차이로 인한 운동오차, 마스터와 슬레이브간의 원

격통신 시 발생하는 시간지연 등에 관련된 연구가 초창기에 많이 수행되었다.^(1,2) 또한 로봇에 의한 응용작업이 집어 놓기 (pick-and-place) 단순작업에서 청소, 탐색 등 외부환경과의 접촉을 통한 서비스산업으로 발전하면서 힘과 접촉정보를 전달하고 이를 구현하기 위한 마스터/슬레이브 장치에 대한 연구도 점차 활발해 지고 있다.^(3,4) 하드웨어적으로 혹은 제어이득을 높여 로봇 관절의 강성을 크게 하면 로봇 끝단에서 높은 가속도와 큰 힘을 낼 수 있으나 외부환경이나 작동자의 충돌로 인한 위험성이 커진다. 반면에 로봇 관절의 강성이 작으면 부드러운 접촉을 할 수 있으나 로봇이 내는 힘은 작아진다. 작업조건에 필요한 적절한 강성을 만들어 내기 위해서 슬레이브 장치

† Corresponding Author, bskang@hnu.kr

©2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

에서는 관절의 강성과 위치를 동시에 조절하는 공압인공근육 (Pneumatic Artificial Muscle; 이하 PAM),^(5,6) 가변강성(variable stiffness) 구동기 등^(7,8) 이 적용되고 있다. 그리고 마스터장치에 있어서도 기존의 각도변위 덧붙여 인간근육의 강성까지 전달해야 하는 필요성을 충족하기 위해 근전도센서, 근육경도센서 등⁽⁹⁾을 접목하고 있으나 마스터와 슬레이브를 통합하여 적절한 강성을 가지고 원격제어를 수행한 연구는 미비하다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 경제적으로 저렴하고 사용하기 편리한 마스터장치를 개발하기 위해서 근력보조 기구를 모방한 외골격 기구부에 경량의 관성센서와 공압형 경도센서를 사용하여 쉽게 착용이 가능한 마스터장치를 개발한다. 그리고 마스터에서 전달된 인간근육의 강성과 움직임을 모방할 수 있도록 공압인공근육으로 구성된 슬레이브시스템을 개발하고 실제 실험을 통해서 마스터 조종자가 근육에 힘을 주어 큰 강성으로 마스터를 조정할 경우 그리고 힘을 빼고 부드럽게 마스터를 조정할 경우 각각에 대해서 이를 추종하는 슬레이브의 운동 차이점을 제시한다.

논문의 구성은 먼저 2장에서 원격조정을 구현하기 위한 마스터/슬레이브 시스템의 하드웨어 설명이 주어진다. 3장에서는 마스터의 회전강성을 고려한 슬레이브 제어기법에 대한 설명 그리고 원격조정 궤적추종 실험결과가 서술된다. 마지막으로 4장에서 결론이 제시된다.

2. 마스터/슬레이브 하드웨어

2.1 마스터장치 구성

제안하는 마스터 장치는 Fig. 1과 같이 크게 기

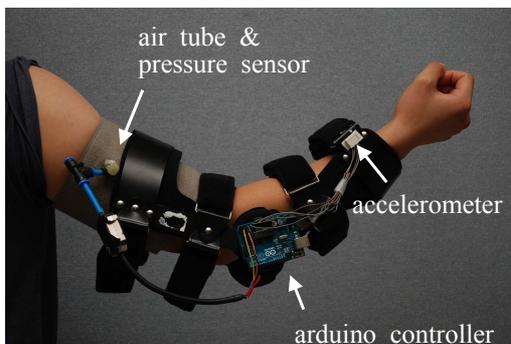


Fig. 1 Photograph of exoskeleton-type master device equipped with an accelerometer and a muscle stiffness sensor

구부, 센서부 그리고 제어부로 구성된다. 기구부는 인간의 팔에 착용이 용이하도록 외골격형으로 구성되어 팔의 굽힘운동과 동일하게 회전한다. 센서부는 하박(forearm)이 움직였을 때 하박의 각도를 추정하는데 사용되는 3축 가속도센서(ADXL 335, Analog Devices) 그리고 Fig. 2와 같이 하박의 움직임을 만드는 근육-상박에 위치한 이두근(biceps)과 삼두근(triceps)-의 경도를 측정하는 공압형 근육경도센서로 구성된다. 회전각을 재는데 많이 사용되는 엔코더에 비해서 경량의 관성센서를 사용하여 장기간 마스터장치 사용 시 사용자의 피로도를 줄일 수 있으며 기구부 구성도 엔코더가 부착된 피봇점을 기준으로 하는 한 점 회전 방식이 아닌 복합 회전 방식으로 마스터를 설계할 수 있다.

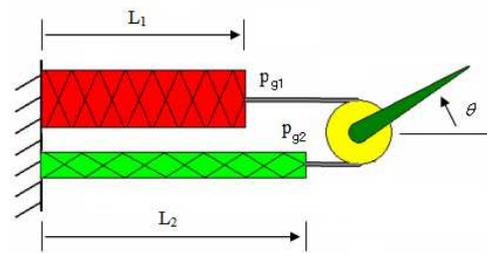
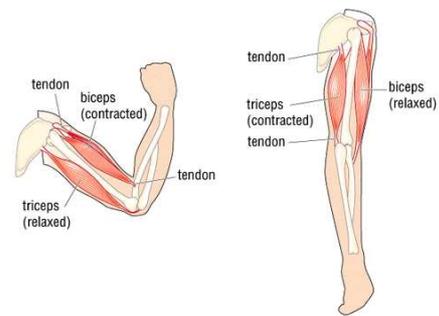


Fig. 2 Antagonistic actuation⁽⁶⁾ (upper: human muscle, lower: PAM)

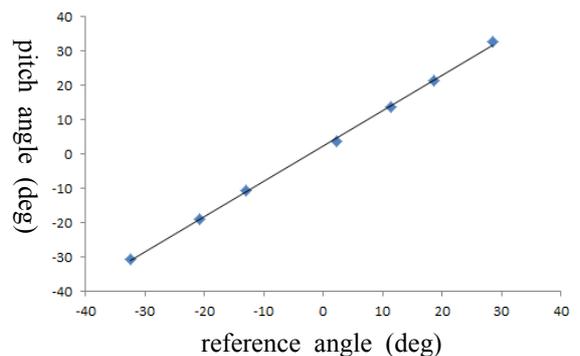


Fig. 3 Pitch-angle measurement of a forearm based on an accelerometer

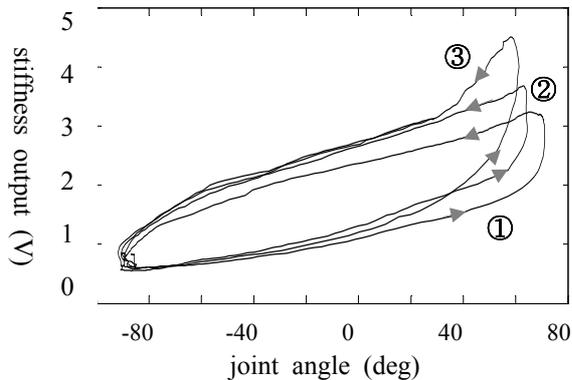


Fig. 4 Output of muscle stiffness sensor vs angular displacement of forearm (payload ①: 0 kg, ②: 1kg, ③: 3kg)

Fig. 3은 마스터장치의 작업영역 ($\pm 30^\circ$)에서 가속도센서의 보정(Calibration) 실험결과이다. 가속도신호는 버터워스(butterworth) 필터를 통해서 고주파 노이즈를 제거하였다. 팔을 수직으로 펼쳐 내렸을 때의 중력방향을 Z축으로 하여 팔꿈치 회전인 pitch 각을 X축과 Z축의 각속도 a_x 와 a_z 로 구하면 다음과 같다.

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{a_x}{a_z}\right) \quad (1)$$

실험결과 오프셋(offset) 2.36° 를 보정하면 계인 오차는 3%로 비교적 정확한 각도예측결과를 보여준다.

인간의 근육은 당기는 경우에만 힘을 전달할 수 있기 때문에 양방향 회전을 만들기 위해서는 두 근육을 상극구동(antagonistic actuation)방식으로 연결해야 한다. 즉 Fig. 2와 같이 하박을 굽혀 올리기(flexion) 위해서는 이두근은 길이방향으로 수축하고(대신 근육의 단면적과 부피는 커짐) 삼두근은 이완된다. 하박을 펼쳐 내리는 경우(extension)에는 반대로 이두근은 길이방향으로 이완되고 삼두근은 수축된다. 보통체형의 인간의 경우 삼두근보다는 이두근의 부피변화가 피부 외형적으로 크게 나타나기 때문에 상박 팔 주위에 공기튜브로 감싸고 공기의 압력을 재면 -혈압을 재는 원리와 동일- 간접적으로 근육이 팽창되는 정도를 잴 수 있다. 이 때 스트레인 게이지를 사용하면 특정부위의 부피변화를 정확하게 잴 수 있으며 압력센서를 이용하면 공기튜브에 작용하는 근육 외형부피 평균적인 변화를 잴 수 있다.

Fig. 4는 압력센서(MPX5010, Motorola)로 근육

경도센서를 제작하여 센서에서 나오는 출력을 표시한 실험결과이다. 먼저 팔의 각도가 증가하면 -즉 팔을 굽히게 되면- 이두근의 부피팽창으로 튜브내 공기압력이 증가하게 되어 센서값이 증가하며 반대로 각도가 감소하면 -팔을 펼치면- 이두근의 부피감소로 압력이 감소한다. 이 경우 인간 근육을 구성하는 세포조직의 생리적(physiological) 특성으로 인하여 펼침을 하는 구간이 굽힘을 하는 구간에 비해 동일한 각도에서 큰 값을 가지는 히스테리시스(hysteresis) 현상을 보이게 된다.⁽¹¹⁾

동일한 굽힘/펼침 운동의 경우에도 근육의 힘을 빼고 팔을 움직일 때에 비하여 손에 하중을 들고 움직일 경우 하중의 무게에 비례하여 근육에 더 큰 힘을 주어야 하므로 근육부피가 증가한다. 실험에서는 조정자가 마스터를 장착한 팔에 연결된 손에 아무것도 잡지 않는 경우 그리고 1 kg, 2 kg, 3 kg 까지 하중을 바꾸어 가면서 손에 잡고 팔의 굽힘과 펼침운동을 수행하는 동안 근육경도센서 출력값을 측정하였다. 아무것도 잡지 않았을 경우 Fig. 4 하단 폐곡선과 같이 출력은 0.5V에서 3V까지 변화하는 반면에 하중을 높이면 근력의 강도가 커지므로 센서의 출력도 점점 커져 3 kg을 잡고 운동한 경우 상단 폐곡선과 같이 5V까지 증가한다. 따라서 동일한 위치체적에 대해서 서로 다른 근육부피의 차이는 근육경도센서의 출력값 차이를 가져오고 이를 근육 강성 지표로 사용할 수 있다.

마스터기구의 위치정보와 강성정보를 수집하고 전달하는 제어기는 보편적인 저가 프로세서인 아두이노(arduino)를 사용하였다. PC 환경에서 용이하게 알고리즘을 작성하고 다운로드할 수 있으며 ZigBee 모듈을 부착하면 무선으로 데이터를 전송할 수 있어 마스터를 착용하고 자유롭게 공간을 이동하면서 슬레이브에 명령을 전달할 수 있다.

마스터/슬레이브 원격조정시스템은 LabVIEW 환경에서 구현하여 알고리즘 구축 및 관리가 용이하나 아직까지 LabVIEW에서 아두이노 제어기와 무선연결은 9600 bps 에서만 안정적으로 이루어져 유선연결에 비해 데이터손실이 많이 발생하였다. 따라서 본 논문에서 수행한 마스터/슬레이브 원격조정실험은 유선으로 수행하였다.

2.2 슬레이브장치 구성

인간 근육의 상극운동을 모사하기 위한 슬레이브 구동부는 Mckibben형 공압인공근육으로 구성

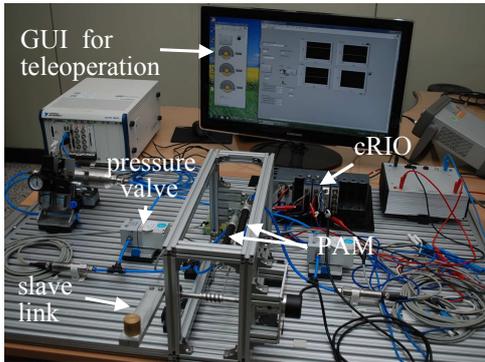


Fig. 5 Photograph of slave system consisting of PAMs, pressure valves and cRIO

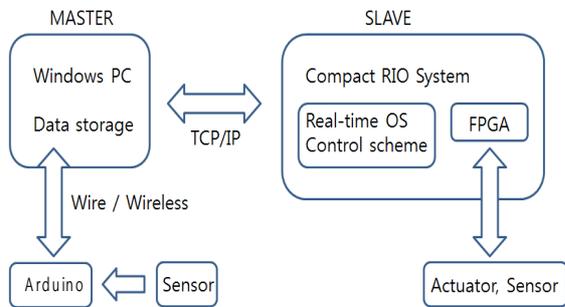


Fig. 6 Schematic diagram of Master/Slave system

하였다. McKibben형 공압인공근육의 동작원리는 인간근육과 매우 유사하다. 즉 인공근육의 게이지 공기압력, p_g 이 증가하여 근육의 부피가 팽창하고 길이, L 가 수축하면 당기는 힘, F 가 발생한다.⁽⁵⁾

$$F = p_g [a(1 - \epsilon)^2 + b] \quad (2)$$

$$\text{where } a = \frac{3D_o^2\pi}{4\tan^2\alpha_o}, b = \frac{D_o^2\pi}{4\sin^2\alpha_o}, \epsilon = \frac{L - L_o}{L_o}$$

여기서 D 는 근육의 직경, a 는 근육섬유의 나선각, 그리고 아래첨자 ‘o’ 는 압력이 없는 상태에서의 해당 인자값이다. 식 (2)는 마찰 그리고 상태변환 시 에너지 손실이 없다는 가정에서 가해진 압력과 근육 수축률, ϵ 에 대한 근육 장력의 수식이다.

실험에 사용된 공압인공근육은 FESTO사의 Fluidic Muscle™ (DMSP-10-100N)을 이용하여 제작하였으며 인공근육의 움직임은 압력을 제어함으로써 가능하기 때문에 가해진 전압입력에 대해서 비례적으로 압력을 조정하는 압력제어밸브

(VPPE-3, FESTO)를 슬레이브 장치의 구동기로 사용하였다. 따라서 두 개 인공근육의 상극구동을 통해서 회전운동을 만들고 이를 보(beam) 형태의 링크에 연결하여 Fig. 5와 같이 슬레이브 기구부를 구성하였다. 실험장치에서 마스터에서 전달된 위치, 강성정보를 기준입력으로 받아 슬레이브의 위치를 추종하는 제어기는 cRIO(National Instruments)로 구현한다. cRIO의 FPGA(Field Programmable Gate Array)부분은 센서, 구동기 등 외부기기와의 신호 입출력을 고속으로 담당하고, cRIO의 RT(Real-time) 제어부분은 마스터에서 전달된 추종신호에 맞추어 적절한 제어신호를 내보낸다. 전체적인 마스터/슬레이브 원격조정 시스템 개략도는 Fig. 6과 같다.

3. 원격조정 궤적추종실험

3.1 강성을 고려한 피드포워드 제어기

마스터의 위치를 추종하는 슬레이브 제어시스템은 마스터의 위치정보를 기준계적으로 하고 슬레이브의 위치를 피드백하여 PID 제어기 등을 통해서 구현할 수 있다. 그러나 마스터 조정자인 인간이 힘을 주고 움직이는지, 힘을 빼고 움직이는지를 슬레이브 운동으로 모사하기 위해서는 인간 근육강성에 대한 정보를 슬레이브 제어기에 전달해야 한다. 팔의 굽힘과 펼침운동을 담당하는 이두근과 삼두근에서 실지로 이두근만 피부 표면위로 두드러지는 부피변화를 보이기 때문에 근육경도센서의 출력은 오직 이두근의 부피변화로 간주한다. 따라서 Fig. 2와 같이 슬레이브 장치를 구동하는 인공근육 쌍에서 삼두근에 해당하는 인공근육은 고정된 강성 즉 일정한 평형압력 (equilibrium pressure), P_e 을 가해주며, 이두근에 해당하는 다른 인공근육은 평형압력에 대해서 가변압력, Δp 을 추가하여 회전관절의 위치와 강성을 가변하도록 공압 제어시스템을 구성하였다;

$$F_1 = (p_e + \Delta p)[a(1 - \epsilon)^2 + b] \quad (3)$$

$$F_2 = (p_e)[a(1 + \epsilon)^2 + b] \quad (4)$$

따라서 Δp 가 양의 값을 가지면 F_1 가 F_2 보다 커져 Fig. 2와 같이 당기는(agonist) 근육으로 작용하여 슬레이브 링크가 굽혀지고 반대로 Δp 가 음의 값이 되면 피동적으로 당겨지는(antagonist)

근육이 되어 슬레이브 링크가 펼쳐진다.

마스터의 회전강성과 회전변위를 동시에 고려하여 마스터의 움직임을 추종하는 원격제어기는 슬레이브의 위치오차를 피드백하는 부분과 강성정보를 피드포워드(feedforward)하는 부분으로 다음과 같이 제안한다.

$$u(t) = k_p (e + T_d \frac{de}{dt} + \frac{\int e dt}{T_i}) + k_f v_s \quad (5)$$

여기서 오차, e 는 마스터위치에 대한 슬레이브의 위치오차이며 k_p , T_d , T_i 는 각각 비례이득, 미분시간, 적분시간이다. 그리고 마스터의 강성정보를 슬레이브의 제어입력에 반영하기 위해서 마스터 근육경도센서에서 측정된 전압, v_s 를 식 (5)와 같이 PID 피드백 제어입력과 병렬적으로 합하여 첨가한다. 인간 근육의 히스테리시스(Fig. 4)와 공압인공근육의 히스테리시스는 동일한 히스테리시스 방향을 -당길 때에 비해 펼칠 때 큰 값을 가짐- 가지므로 경도센서의 출력은 비례적으로 피드포워드항으로 부가한다. 이 때 비례상수에 해당하는 피드포워드 이득 k_f 는 히스테리시스의 크기차이를 보상하기 위한 이득값으로 실험적으로 구한다.

식 (5)로 주어진 제어입력을 입력으로 하고 가변압력을 출력으로 하는 압력제어밸브를 포함한 공압장치의 동특성은 주파수응답실험을 통해서 다음과 같이 근사하여 나타낸다.

$$\frac{\Delta p(s)}{u(s)} = \frac{0.59}{0.2s + 1} \quad [\text{bar/V}] \quad (6)$$

Table 1 Parameters of experimental set-up

Moment of inertia	No load	11 kg·cm ²
	100g payload	23 kg·cm ²
equilibrium pressure	p_e	3 bar
PID control	k_p	0.2 V/deg.
	T_d	0.025 s
	T_i	0.1 s
PID-plus-stiffness	k_p	0.34 V/deg.
	T_d	0.025 s
	T_i	0.1 s
	k_f	0.5

Table 2 Trajectory tracking error (RMS)

	no load (deg.)	100g payload (deg.)
PID	1.40	1.54
PID-plus-stiffness	1.11	1.14

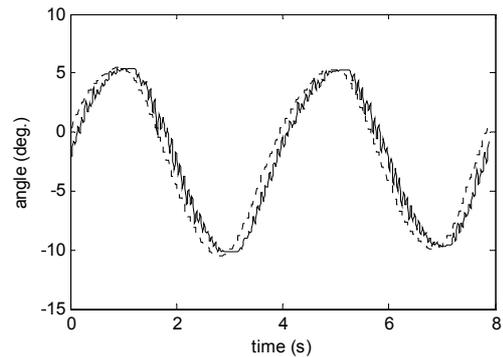


Fig. 7 Trajectory Tracking with PID controller and no payload (dotted: master, solid: slave)

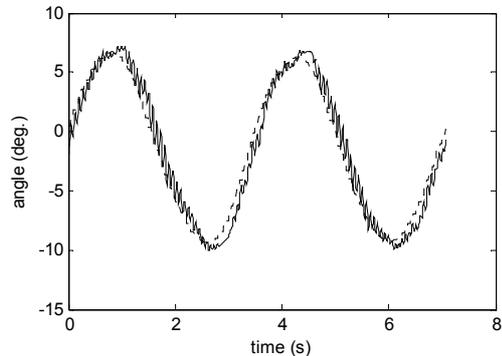


Fig. 8 Trajectory Tracking with PID-plus-stiffness and no payload (dotted: master, solid: slave)

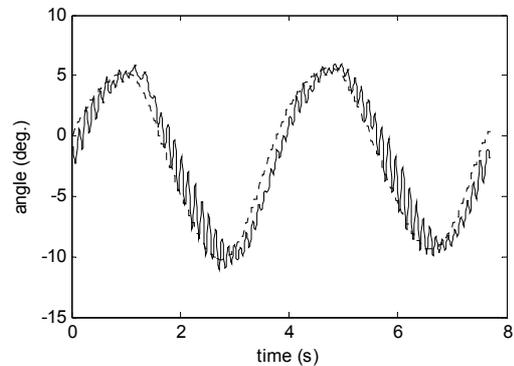


Fig. 9 Trajectory Tracking with PID controller and 100g payload (dotted: master, solid: slave)

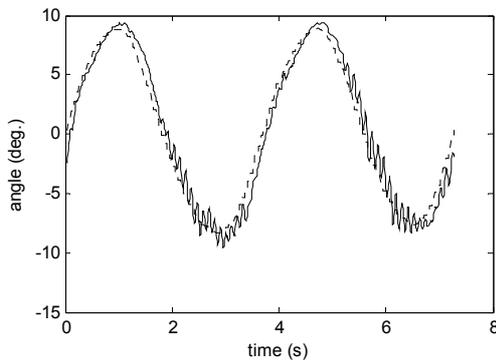


Fig. 10 Trajectory Tracking with PID-plus-stiffness and 100g payload (dotted: master, solid: slave)

3.2 실험결과

강성을 고려한 슬레이브 제어기와 강성을 고려하지 않은 슬레이브 제어기에 있어서 정현적인 마스터 궤적명령에 대한 슬레이브의 위치 추정 성능의 차이점을 보여주기 위해서 실험은 다음과 같이 수행하였다. 먼저 마스터 조정자를 숙련시켜 Fig. 7과 같이 대략 4 초 정도의 주기를 가지는 부드러운 정현운동을 만들도록 하였다.

그리고 슬레이브인 기구부 링크에 가반하중(payload)을 달지 않고 마스터장치가 보낸 위치궤적을 정밀하게 추종하도록 슬레이브 제어기의 PID 피드백 게인을 조절(tuning)하였다. Table 1은 여러번의 시행착오를 걸쳐 구한 PID 게인값을 보여주고 있다. 다음으로 가반하중 100g 을 슬레이브 링크 끝단에 부착하고 마스터장치 조정자도 근육에 힘을 주고 구동하는 실험을 수행하였다. 하중 100g 을 가지고 궤적추종을 하는 경우에도 피드백 게인값은 부하가 없는 경우와 동일한 값으로 수행하였다. 100g 가반하중을 슬레이브 링크에 부착하면 Table 1 과 같이 회전조인트에 걸리는 관성모멘트는 약 2배로 증가하여 시스템에 큰 동적변화를 가져오게 된다.

Fig 7은 가반하중이 없는 경우에 강성정보를 반영하지 않은 PID 피드백 제어기만으로 원격조정을 수행한 결과이다. 게인조율을 하였으나 공기의 압축성 등 비선형적 특성으로 일반적으로 전기모터 기반 제어성능에 비해서 큰 진동특성과 시간지연을 보이고 있다. 그러나 강성정보를 피드포워드하면 상극구동에 필요한 압력 가감분을 미리 제어입력으로 가해줄 수 있기 때문에 Fig. 8

과 같이 PID 제어기에 비하여 시간지연을 줄일 수 있어 궤적추종오차가 Table 2 (2 주기 동안 추종오차의 root-mean-square 값) 와 같이 줄어든다.

Fig. 9와 Fig. 10은 슬레이브 링크에 100g 가반하중을 가한 상태에서 수행한 실험이다. 가반하중이 없는 상태에서 게인이 조절(tuning) 되었기 때문에 가반하중이 작용하면 조인트에 작용하는 관성모멘트가 증가하여 Table 2와 같이 궤적추종오차가 증가한다. 그리고 인공근육의 히스테리시스와 공기 입·출력 시 공압밸브의 동특성차이로 굽힘(상승구간)과 펼침운동(하강구간)에서 제어특성이 다르게 나타난다. 마스터의 강성정보가 없는 PID 제어만을 수행한 경우 10% 정도의 궤적추종오차가 증가하지만 강성정보를 피드포워드한 제어기의 경우 추종 오차에 변화가 거의 없다. 즉 슬레이브에 하중이 작용함을 인지하고 마스터 조정자도 팔 근육에 더 큰 힘을 주어 굽힘운동을 함으로써 큰 값의 강성정보가 슬레이브제어기의 피드포워드로 작용한다. 따라서 마스터의 움직임을 추종하는 슬레이브는 Fig. 10과 같이 가반하중이 없는 경우(Fig. 8)와 유사한 동특성을 보이고 있다. 따라서 제안한 마스터/슬레이브 장치는 원격에 위치한 슬레이브장치의 접촉환경을 미리 인지하고 이를 맞도록 마스터 조정자가 근육의 힘과 위치를 조정하면 슬레이브장치의 작업성능을 비교적 균일하게 유지할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 마스터/슬레이브 시스템에서 마스터 조정자인 인간의 근육강도를 측정·전달하여 슬레이브의 제어성능을 향상하는 원격조정방법을 제안한다. 마스터장치의 자세측정은 소형 관성센서를 사용하여 조정자의 피로도를 줄일 수 있으며, 공기튜브형 압력센서를 도입하여 근육의 부피변화 통해서 인간근력의 강도를 측정하여 위치정보와 함께 원격의 슬레이브 제어기에 전달한다. 따라서 슬레이브 기구에 큰 강성이 필요하면 마스터 조정자는 근육에 좀더 힘을 주어 마스터 장치를 움직이고 슬레이브 기구에 부드러운 운동이 필요하면 마스터 조정자는 힘을 빼고 움직이므로써 슬레이브 접촉환경에 알맞은 원격조정을 수행할 수 있다. 그리고 이를 실제 실험을 통해서 적용가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2013년 한남대학교 교비학술연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. and Lee, H.-S., 1993, "Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control Systems with Short Time Delay," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 607 ~623.
- (2) Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T., 1994, "Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling - Formulation and Experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 5, pp. 605~619.
- (3) Hashtrudi-Zaad, K. and Salcudean, S. E., 2002, "Bilateral Parallel Force/Position Teleoperation Control," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No. 4, pp. 155~167.
- (4) Park, J. and Khatib, O., 2006, "A Haptic Tele Operation Approach Based on Contact Force Control," *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 575~591.
- (5) Tondu, B. and Lopez, P., 2000, "Modeling and Control of Mckibben Artificial Muscle Robot Actuators," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 20, No. 2, pp. 15~38.
- (6) Kang, B.-S., Kothera, C., Woods, B., Wereley, N., 2009, "Dynamic Modeling of Mckibben Pneumatic Artificial Muscles for Antagonistic Actuation," *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 182~187.
- (7) Migliore, S. A., Brown, E. A. and DeWeerth, S. P., 2006, "Biologically Inspired Joint Stiffness Control," *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 4508~4513.
- (8) Wolf, S. and Hirzinger, G., 2008, "A New Variable Stiffness Design: Matching Requirements of the Next Robot Generation," *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1741~1746.
- (9) Bae, G. T., Song, J. B., Kim, B. S., Kim, T. K., 2011, "Comparison Between Strain Gauge Type MSS and Pneumatic Type MSS for a Wearable Robot," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 245~246.
- (10) Walker, D. S., Wilson, R. P. and Niemeyer, G., 2010, "User-Controlled Variable Impedance Tele Operation," *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 5352~5357.
- (11) Sherwood, L., 2004, *Human Physiology -From Cells to Systems- 5th Ed.*, Thomson Learning.