

Master/Slave형 로봇 손의 설계 및 제어에 관한 연구 (A Study on the Design and Control of Master/Slave Type Robot Hand)

문 희 형 (한국과학기술원)^{*}, 권 대 갑 (한국과학기술원)

H. H. Moon (KAIST)^{*}, D. G. Gweon (KAIST)

Abstract : In many cases, tasks are unpredictable and therefore not doable by special-purpose or pre-programmable robots. So master/slave type robot hands which combine human perceptions with conventional robot hands are required as robot end effector. These also can be applied to hazardous worksites such as outer space, deep sea and nuclear power plant.

In this study, master/slave type robot fingers with 3 joints each are designed and constructed. To control force accurately, TDT(tension difference type) torque sensors are constructed and attached to each joints of slave finger and new force reflecting control algorithm is suggested. Finally, experimental results show that the new control algorithm can be successfully applied.

1. 서론

공장자동화가 도입된 이래 공장에서 단순 조작자업에만 적용되던 로봇은 최근들이 삼해 로봇, 원자로 보수용 로봇 등 다양한 특수 목적용 로봇의 등장으로 별별하게 인기를 데신하고 있으나 이러한 특수 로봇들은 대부분이 특정한 작업만을 수행하도록 설계되어 있으므로 작업환경이 기변적이거나 예측 불가능한 상황이 발생할 경우에는 제 성능을 발휘할 수 없게 된다. 이 경우에 로봇의 능력에 인간의 지지능력과 판단력을 더한 원격조정(teleoperation)로봇을 이용하면 많은 잇점을 얻을 수 있다. 이러한 원격제어 로봇 시스템(telerobot system)은 외계, 삼해, 원자로 내부, 생물학적, 화학적으로 특성이 있는 곳, 화재현장 등과 같이 인간이 직접 작업하기에 위험한 장소에서의 다양한 로봇작업에 유용하게 적용할 수 있을 것이다. [1]

완전한 원격조정을 위해서는 작업중에 떨리 떨어지 있는 slave 측의 시각정보뿐 아니라 휘정보까지 master측의 작업자가 알아야 한다. 휘정보를 작업자에게 전달하는 방법으로는 모니터상에 수치나 그래프로 나타내는 간접 전단방식과 직접 master로봇에 반영하는 직접 전단방식이 있는데, 제이한 측이 많아지면 간접 전단방식으로는 문제가 있어 직접 전단방식을 사용해야 한다. 이처럼 slave측의 휘정보를 직접 master측에 반영하여 원격제어를 수행하는 방법을 힘반영 제어(force reflecting control)라 한다.

현제, 종래의 parallel jaw type의 end effector는 구조적인 제약으로 인하여 단순한 작업밖에 수행할 수 있으므로 다양하고 복잡한 작업에 사용하기 위해서는 인간의 손을 닮은 articulated hand[†] end effector로 사용해야 한다.

따라서 본 연구에서는 힘반영 제어가 가능한 master/slave 형의 로봇 손가락을 설계 제작하여 장래 원격제어 로봇의 손기구에 적용할 수 있도록 기초적인 실험을 수행하고자 한다.

2. 로봇손의 구조

2.1 손기구의 구조

본 연구에서 제작한 로봇 손기구의 구조는 그림 1과 같다. Master손기구와 slave손기구의 손가락 부분이 동일한 크기와 구조로 되어 있는데, 각 손가락은 평면 3자유도를 가지며 추후에 세축에 수직하게 한 축을 더 확장하여 사람의 손가락과 같이 공간상에서 4자유도를 기울 수 있도록 설계되었다. 각 링크의 길이 비는 manipulability를 최대로 할 수 있도록 5:3:2로 설계하였으며 전체 길이는 사람과 비슷한 11cm이다.

모터를 이용해 각 축에 동력을 전달하는 방법은 sheathe를 이용한 링법과 풀리(pulley)를 이용한 링법이 있다. Sheathe를 이용하는 링법은 구조 설계시 제한조건이 작은 잇점이 있으나 sheathe와 텐던(tendon)사이의 마찰때문에 정확한 힘제어가 필요할 경우에 문제가 된다. 반면 풀리를 이용하는 방법은 마찰을 줄일 수 있는 잇점이 있으나 손기구의 구조가 복잡하게 된다. 본 연구에서는 마찰의 영향을 줄이고 되도록 정확한 위치 힘제어가 가능하도록 풀리에 의한 전단방법을 태하였다.

텐던으로 사용한 재료는 Dupont사에서 개발한 복합재료 섬유인 케블라(Kevlar) 섬유를 이용하였다. 케블라 섬유는 기존의 손기구 텐던으로 사용된 강선에 비해 조립이 용이하면서 강도는 비슷한

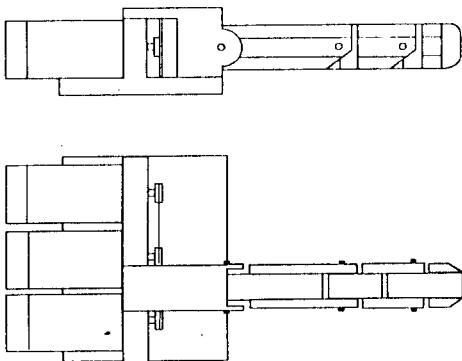


그림 1 제작된 손기구의 개이도

특성을 가졌다.

Articulated hand의 n 개의 축을 구동하기 위해 필요한 actuator의 수는 Salisbury hand에서는 $n+1$, Okada hand에서는 n , Utah/MIT hand에서는 $2n$ 개로 세가지 방법이 제안되어 있다. 본 연구에서는 compact한 손기구 제작을 위해 actuator 수를 되도록 작게하기 위해 Okada hand의 방법을 따랐다.

Master손기구와 slave손기구의 모터에는 직접 엔코더가 부착되어 각축의 회전각을 측정할 수 있게 했다. 직설한 회전수를 인기 위해 slave축에는 harmonic drive로 감속을 해주었으며 master축에는 위치지령을 용이하게 할 수 있고 힘계환을 쉽게 받을 수 있게 하기 위해 감속장치가 없도록 설계하였다.

2.2 토크센서의 설계

Master/slave형의 손기구로 밀리 밀리지 있는 작업장의 물체를 잡거나 특정한 작업을 수행하려면 정밀한 힘제어가 필수적이다. 이를 위해서는 master손가락을 움직이는 작업자가 slave손가락에 걸리는 힘을 전달받아야 하므로 각 조인트에 고성능의 토크센서가 필요하게 된다. 특히 로봇 손기구는 모터의 동력을 텐던을 통해 전달하므로 센서는 되도록 손 관절에 기압계 부착하여 텐던과 풀리사이의 마찰로 인한 힘의 손실을 최소화 시키야 한다. 본 연구에서는 그림2에 나타낸 TDT(tension difference type) 토크센서를 설계 제작하여 힘제어에 이용하고자 한다. [2]

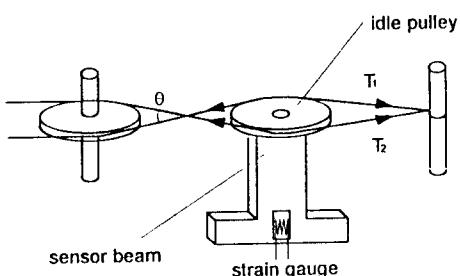


그림 2 TDT 센서의 구조

제작된 TDT 토크센서는 센서 빔과 아이들 풀리(idle pulley), 그리고 센서빔의 굽힘 모멘트를 측정할 수 있는 스트레인 게이지로 구성되어 있다.

T_1 과 T_2 를 각각 풀리의 양단에 작용하는 텐던의 8장력이라 하면 축에 걸리는 토크 τ 는

$$\tau = R(T_1 - T_2) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 이때 R 은 아이들 풀리의 반지름이다. (1)식에서 각 텐던에 걸리는 장력의 차만 구하면 토크를 구할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 센서빔을 외광보로 볼 때 외광보에 작용하는 힘 F 는

$$F = 2(T_1 - T_2) \sin(\theta/2) \quad (2)$$

이니, 여기서 θ 는 두 텐던이 이루는 각도이다. 센서빔의 양면에 부착된 스트레인 게이지로 half bridge 회로를 구성할 때 입력 전압을 E_i , 토크가 작용할 때 출력전압의 변화를 ΔE_0 라 하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta E_0/E_i = K \cdot F \quad (3)$$

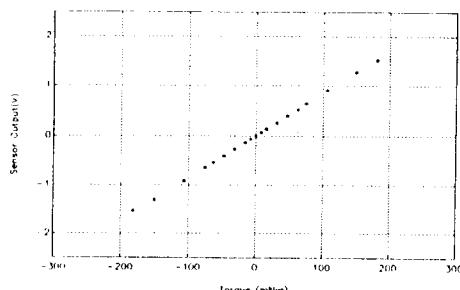
이때 K 는 스트레인 게이지의 특성에 따른 비례상수이다.

그리므로 (1), (2), (3)식으로부터 각 축의 토크는 센서의 스트레인 게이지회로의 출력전압 ΔE_0 에 정비례함을 알 수 있다. 여기서 각 센서빔의 크기는 위하는 입력전압 대 출력전압의 비와 각 축에 걸리는 최대 토크 값으로부터 계산하였다.

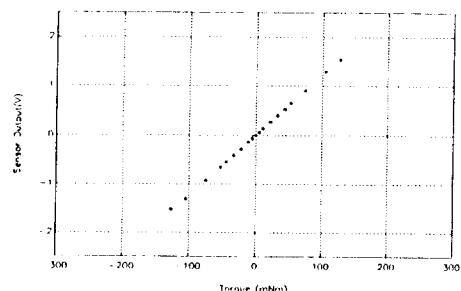
3. 토크센서의 성능 실험

제작된 토크센서의 성능을 알아보기 위하여 센서의 특성을 실험을 통해 측정하였다. 실험장치로서 토크센서에 부착된 스트레인 게이지의 신호를 증폭하기 위한 센서신호 증폭회로를 직접 제작하여 사용하였고 센서신호를 재이기능한 디지털신호로 변환해주는 A/D 컨버터 시스템으로 KAIST 정밀공학과 기계제어 실험실에서 제작한 MCL-DAS Ver 1.1 보드를 PC에 연결하여 사용했다. MCL-DAS Ver 1.1은 범용 data acquisition 카드로서 16-channel 12-bit A/D converter가 내장되어 있고 최고 100 KHz의 sampling rate를 갖는다. 토크센서의 성능 실험은 이와 같은 실험장치로 slave손가락의 두축을 조작하여 행하였다.

토크센서의 특성을 평가하기 위해 토크센서의 선형도 측정실험을 하였다. Slave손가락의 각 축의 꼭지에 수직력을 크기를 변화시키며 가해준 힘에 대한 센서신호와의 관계를 측정하였다. 그림 3의 실험결과에서 가해준 토크와 센서 출력과는 매우 선형적인 관계가 있고 히스테리시스도 전혀 없음을 볼 수 있다. 이 결과로부터 제작한 토크센서로 매우 정밀한 토크측정이 가능함을 확인할 수 있다. 이를 힘제어 실험에 사용하려면 센서앰프의 가변저항을 조정하여 각 센서의 민감도를 같도록 조정하여야 한다.



(a) 첫번째 미니 토크센서의 선형성



(b) 두번째 미니 토크센서의 선형성

그림 3 토크센서의 선형성

4. 손가락의 휘재이

4.1 제인된 휘재이방법

일반적으로 master/slave형 로봇의 휘재이방법은 bilateral control[3,4,5]와 local autonomy 개념을 이용한 제어[6,7]가 두 가지 방법이 있으나 기존의 휘민영 제어방법은 hard contact식에 물체에 원하는 힘을 정확히 가해주는데 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 휘재이 알고리즘을 제안하였다. 그림 4에 제인된 알고리즘의 블럭선도를 도시하였다. 기본적인 구조는 bilateral control과 shared compliance control[7]의 장점을 혼합한 것이다.

Slave측에 들어가는 제어토크는 아래와 같다.

$$\tau_s = P\theta_i + D\dot{\theta}_i \quad (4)$$

여기서 P , D 는 각각 PD제어기의 이득행렬이며 PD제어기의 입력 θ_i 는 아래와 같이 구해준다.

$$\theta_i = \Delta\theta - \theta_c \quad (5)$$

$\Delta\theta$: master로봇과 slave로봇의 위치오차

θ_c : 보상기의 출력값

θ_c 의 각 원소는 아래와 같은 세이법칙에 따라 구한다.

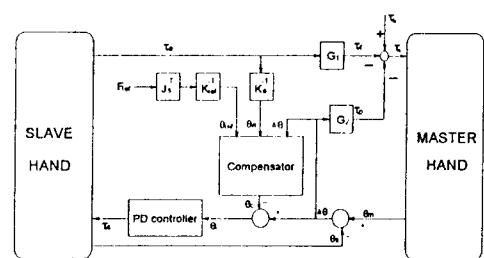


그림 4 제인된 알고리즘의 블럭선도

$$\theta_{c,j} = \{ h(\theta_{a,j} - \theta_{ref,j}) \} (\Delta\theta_j - \Delta\theta_{c,j}) \quad (6)$$

$$\Delta\theta_c = \theta_{ref} - \theta_a \quad (7)$$

j : 조인트의 수

θ_a : 측정 토크의 각도환산값

θ_{ref} : 원하는 접촉력의 각도환산값

$$h(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases}$$

식 (6)에서 보상기에 들어오는 입력은 master측과 slave측의 위치오차 $\Delta\theta$, 실제 측정한 조인트토크를 각도로 환산한 θ_a , 원하는 접촉력을 각도로 환산한 θ_{ref} 이다. Slave로봇이 벽에 접촉하지 않았을 경우에는 θ_a 가 θ_{ref} 보다 작을 것이므로 비교 함수 $h(x)$ 가 0이 되어 θ_c 는 0이 되고 따라서 식 (4)로부터 PD제어기의 입력은 $\Delta\theta$ 가 되어 시스템은 순수한 bilateral control에 의해 제어된다. 그러나 그림 5와 같이 slave로봇이 벽에 접촉하여 측정힘이 원하는 접촉력보다 커지만 θ_a 가 θ_{ref} 보다 크므로 비교함수 $h(x)$ 의 값이 1이 되어 θ_c 는 (θ_{ref} -

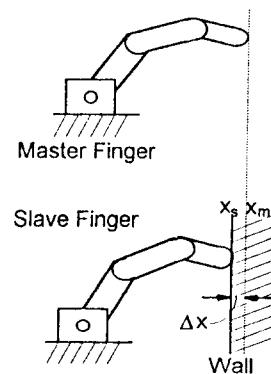


그림 5 slave손가락이 벽에 접촉했을 경우

θ_a)가 된다. 즉 원하는 접촉력과 slave측에서 실제 측정된 힘의 차가 PD제어기의 입력이 되므로 master측의 명령에 관계없이 τ_a 는 τ_{ref} 가 된다.

한편 원하는 접촉력이 유지되는동안 master측과 slave측의 위치오차가 계속 커지면 곤란하므로 측정토크 τ_a 뿐만 아니라 위치오차로 인한 토크오차까지 master에 반영하여 작업자의 오류가 계속되는것을 막을 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned}\tau_r &= \tau_f + \tau_p \\ &= G_1 \tau_a + G_2 \Delta \theta\end{aligned}\quad (8)$$

여기서 G_1 , G_2 는 각각 힘만영 이득이다.

4.2 실험장치

실험장치의 전체 시스템은 그림 6에 나타낸것과 같이 master/slave손가락, 모터, 엔코더, 모터 드라이버, 측제이기, PC로 구성되었다. 측제이기는 master측과 slave측의 위치신호를 비교하여 각 모터 드라이버에 입력된 속도지령을 만들어내는 역할을 한다. 이는 인터페이스부와 빙스 분주회로, 카운터부, CPU, D/A converter로 구성된다. PC는 전체 시스템을 통제하면서 각 부분의 gain을 조정하거나 동작 모드를 바꾸어주는 역할을 한다. 본 연구에 사용된 H/W의 구성요소들은 다음과 같다.

- 모터 : Swiss Minimotor사의 Brushless DC Motor Type 2444
최대출력 33 W, 최고토크 0.6 Nm
- 엔코더 : Swiss Minimotor사의 Type 10B17 180 pulse/rev
- 모터 드라이버 : Swiss Minimotor사의 Type BLD453
- 측제이기 : INTEL 8752 CPU, 8255 parallel interface
Burr Brown사의 12bit D/A Converter DAC1201KP-V

사진 1에서 위의 H/W들로 구성된 전체 실험 장치를 보아준다.

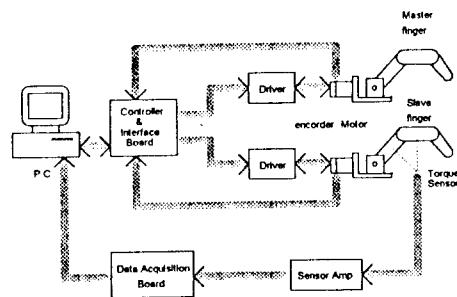


그림 6 실험장치의 전체시스템

4.3 실험결과

4.1절에서 제안한 힘제어 알고리즘을 실제로 적용하여 힘제어 실험을 수행하였다. 실험은 두 손을 임김한 상태에서 수행하였으며 임의의 손가락 위치에서 단단한 벽에 정해진 수직력을 가하도록 master손가락을 움직이고 slave손가락의 각 토크센서에서 측정된 토크를 계산)에서 구한 토크와 비교하는 방법으로 힘제어 성능을 측정하였다.

그림 7과 그림 8은 $\theta_1=20^\circ$, $\theta_2=-44^\circ$ 일때의 손가락 모양에서 slave손가락이 벽면에 1.6 N의 힘을 가하도록 제어하는 경우의 결과이다. 실험결과는 힘제어 동안의 각 손가락의 위치와 측정토크로 나타내었다. 실험결과를 살펴보면 master손가락과 slave손가락의 위치오차가 벽면에 의해 계속 커짐에도 불구하고 slave손가락의 각 축이 어느정도의 오차를 가지고 정해진 기준토크를 잘 기해주고 있음을 알 수 있다. 이는 제안된 힘제어 알고리즘이 hard contact시의 불안정성을 상당히 제거하고 있음을 증명하는 결과이다.

그림 9와 그림 10은 $\theta_1=25^\circ$, $\theta_2=-47^\circ$ 이고 벽에 가하는 수직력이 3.2 N일때 같은 실험을 반복한 결과로 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 위의 두 실험에서 상대적으로 기준토크가 클 때에 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

인간의 지능과 지각능력을 필요로 하는 복화실한 작업환경에서 master/slave type의 손가구는 기존의 로봇으로는 하기 힘든 여러 가지 작업들을 손쉽게 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 master/slave type의 로봇 손가구를 제작하여 기본적인 위치 추종 실험을 해보고 정밀한 힘제어를 위해 TDT type의 토크센서를 설계 세작하여 특성을 실험을 통해 측정하였다. 또한 기존의 힘반영 제어기법이 해결하지 못한 hard contact시의 불안정성을 개선할 수 있는 새로운 힘반영 제어기법을 제안하고 실제 실험에 적용하여 인정된 힘제어 결과를 얻었다.

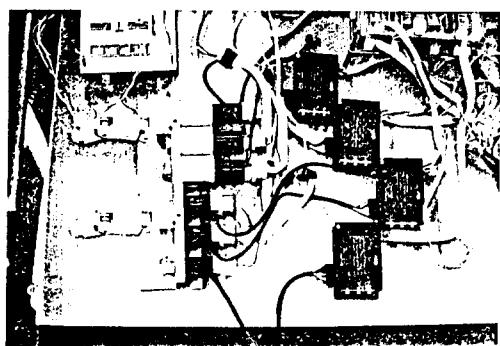


사진 1 전체 실험장치

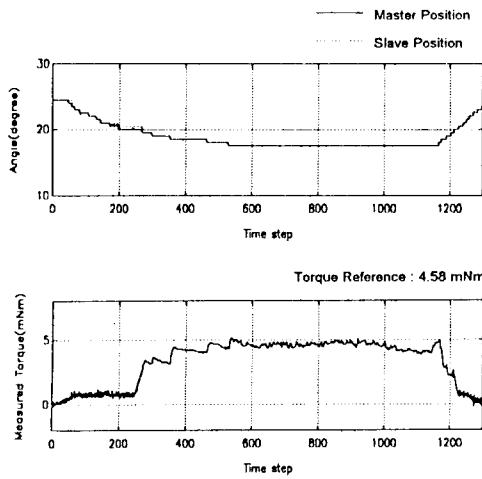


그림 7 첫번째 마디의 힘제어 결과

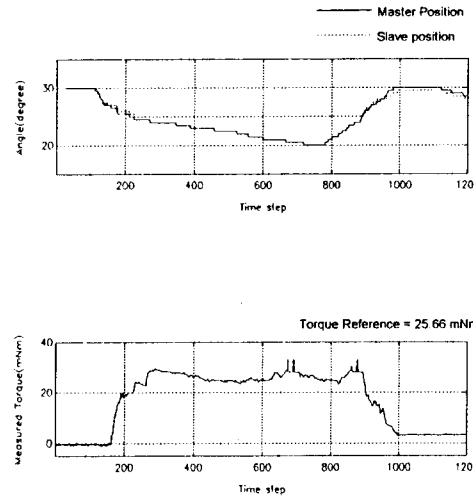


그림 9 첫번째 마디의 힘제어 결과

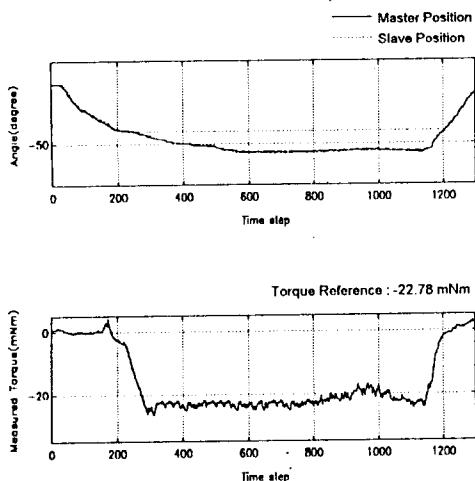


그림 8 두번째 마디의 힘제어 결과

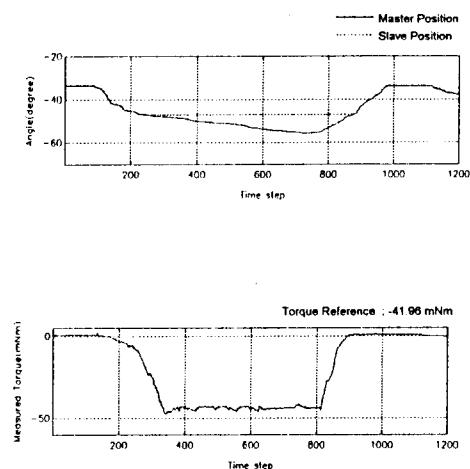


그림 10 두번째 마디의 힘제어 결과

참고문헌

1. T.B.Sheridan, "Telerobotics", Automatica, Vol. 25, No. 4, pp. 487-507, 1989
2. 김 천우, "다관절 손 기구의 설계 및 제어에 관한 연구", 석사학위논문, KAIST, 1993
3. M. Handlykken and T. Turner, "Control System Analysis and Synthesis for a Six DOF Universal Force Reflecting Hand Controller", Proc. IEEE CDC., pp.1197-1205, 1980
4. T. Arai et al, "Advanced Teleoperation with Configuration Differing Bilateral Master-Slave System", Robotics Research The 4th Int. Symposium, pp.163-170, MIT Press, 1988

5. Y.Yokokohji and T.Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling", Preceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1992
6. B. Hannaford and R. Anderson, "Experiments & Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation", Proc. IEEE Int. Conf. on Robtcs and Automation, pp.584-589, 1988
7. W.S. Kim and A.K. Bejczy, " A Stability Analysis of Shared Compliance Control", Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Japan, 1990