

## 한 쌍의 6축 전기유압 매니플레이터의 힘제어

안경관\* (울산대 기계자동차공학부), 조용래(울산대 대학원 기계자동차공학부)  
 양순용(울산대 기계자동차공학부), 이병룡(울산대 기계자동차공학부)

### Force Control of one pair of 6-Link Electro-Hydraulic Manipulators

K. K. Ahn (Mecha. & Auto. School. UOU), Y. R. Cho (Mecha. & Auto. School. UOU)  
 S. Y. Yang (Mecha. & Auto. School. UOU), B. R. Lee (Mecha. & Auto. School. UOU)

#### ABSTRACT

Hydraulically driven manipulators are superior to electrically driven ones in the power density and electrical insulation. But an electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of electrically driven manipulator. So it is relatively difficult to realize not only stable contact work but also accurate force control for the autonomous field tasks such as the maintenance task of high voltage active electric line or the automatic excavation task by hydraulic excavator.

In this report, we propose robust force control algorithm, which can be applied to the real field task such as the construction field, nuclear plant and so on. Proposed force controller has the same structure as that of disturbance observer for position control. The difference between force and position disturbance observer is that the input and output of disturbance observer are forces in the case force disturbance observer and the plant varies much compared to the case of position control. In the design of force disturbance observer, generalized plant is derived and the stabilized filter is designed by H infinity control theory to ensure the robust stability even though the stiffness of environment changes from sponge to steel, and the contact surface also changes from flat to round shape. Experimental results show that highly robust force tracking by a 6-link electro-hydraulic manipulator could be achieved under various environment conditions.

**KeyWords** : Fluid Power Control, Field Task, Manipulator, Robust Control, Force Control

#### 1. 서론

최근 배전선의 보수공사를 행할 때, 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 송전을 멈추지 않고 공사를 수행하는 활선 배전 보수 공사 (Maintenance Task of Active Electric-Line, 이하 활선 공사)가 증가하고 있다. 현재 활선 공사를 수행할 때에는, 전용공구를 이용하여 반 자동 혹은 인간의 조작 (Master-Slave Type)에 의해 작업을 수행하고 있는 것이 현재의 상황이다. [1-3]. 이 활선 공사는 높고 불안정한 곳에서의 작업으로, 감전 등의 위험과 작업자의 감소 등의 이유로 완전한 자율화의 요구가 더욱 높아지고 있다. 한편, 활선 공사에 이용되어지는 매니플레이터는 전기 절연성을 높이기 위해서 절연성의 재료를 사용 하고

있으며 또한 전기 서보시스템을 대신하여 유압 서보 시스템을 이용하고 있다. 유압 매니플레이터의 경우, 대부분 감속기를 포함하고 있지 않아, 외란의 영향을 직접 받기 쉽고, 또 다관절 매니플레이터의 경우에는 매니플레이터의 자세의 변화에 의한 관성모멘트의 변동 등의 시스템의 파라미터 변동이 크다.

본 연구에서는 배전공사의 보수작업에 실제로 사용되어지는 한 쌍의 6축 전기 유압 매니플레이터에 대해 새로운 힘 제어를 제안한다. 제안하는 힘 제어기는 저자가 제안했던 컴플라이언스 제어[5]를 확장하여, 외란 및 시스템의 파라미터 변동에 강건한  $H_{\infty}$  제어 이론에 의해 도출되어진 안정화 필터를 이용하고 있다. 제안한 힘 제어기의 유효성을 확인 하기 위하여 2종류의 벽면에 대한 힘 제어 실험을 실시한다.

## 2. 실험장치

실험에 사용되어지는 한쪽의 6축 전기유압 매니플레이터 시스템의 구성을 그림1에 나타낸다. 각 관절의 회전각도는 로우터리 엔코더 (Rotary Encoder)에 의해 0.0044[°]의 분해능으로 검출되어져, 샘플링 주파수 2[kHz]로 컴퓨터에 읽혀진다. 또한, 매니플레이터가 외계와 접촉하는 동안에 발생하는 힘은 매니플레이터의 선단에 장착된 6축 힘센서에 의해 검출되어 A/D 변환기를 통해서 컴퓨터에 읽혀진다.

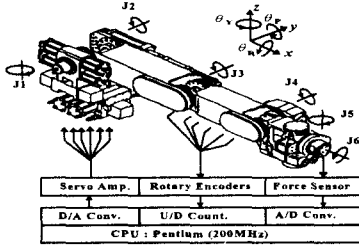


Fig. 1 System Configuration of a 6-Link Hydraulic Manipulator

## 3. 컴플라이언스 제어

외계로부터의 힘의 정보를 적극적으로 이용하는 능동적 컴플라이언스 제어의 가장 간단한 방법은 외부환경과의 접촉에 의해 발생하는 반력에 비례하는 가상 변위를 힘의 방향으로 부여하는 것이다. 그러나, 접촉 작업에서는 급격히 발생력이 변화하기 쉽기 때문에, 단순히 힘을 가상 스프링 정수로 나누어 가상 변위를 구하는 Stiffness Control 만으로는 동일한 발생력이더라도 가상 변위가 크게 됨과 함께 진동적으로 되어, 계가 불안정해지기 쉽다.

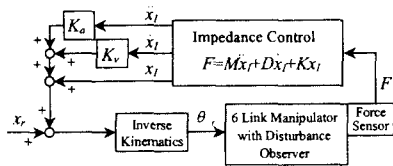


Fig. 2 Impedance Control System with State Feedback

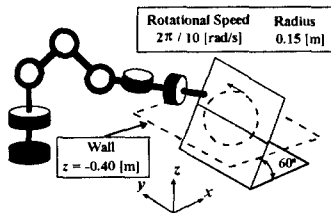


Fig. 3 Experimental Setup for Contact Task

여기서, 외부환경과의 접촉에 의해 발생하는 반력( $F$ )과 가상변위( $x_I$ )와의 관계를 단순한 스프링만의 시스템이 아니고, 그림2에 나타낸 것과 같이 가상 스프링( $K$ ), 가상 댐퍼( $D$ ), 가상 질량( $M$ )을 고려한 임피던스 모델에서 주어진 관계로 한다.[6] 또한, 컴플라이언스 루프의 안정성을 높이기 위해, 임피던스 모델에서 구해지는 가상 속도, 가상 가속도의 상태변수의 피드백을 이용한다.

제안한 컴플라이언스 제어기의 유효성을 확인하기 위해서 그림3에 나타낸 것과 같이 매니플레이터 선단에 반경 0.15[m]의 원궤적을 그리는 실험을 수행했다. 특히 이 원궤적상에는 장애물로서  $z=-0.40$ [m]의 위치에 수평면에 대하여  $\pi/3$  [rad] 기울어진 벽면이 설치되어있다.  $K_v=0.08$ [s],  $K_a=0.02$ [s<sup>2</sup>]의 상태변수 피드백 계인을 이용할 때의 실험 결과를 그림4에 나타낸다.

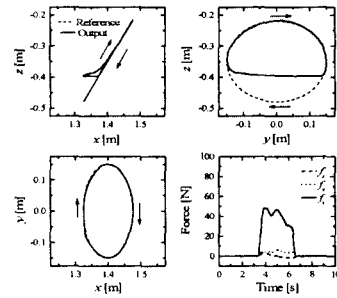


Fig. 4 Experimental Results of Impedance Control ( $M=40$ [kg],  $D=400$ [Ns/m],  $K=1000$ [Ns/m])

결과로부터 상태변수 피드백에 의해 벽면의 강성이 상당히 크더라도, 컴플라이언스 루프의 안정성이 확보되어져, 안정적인 접촉작업이 실현 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 제안하는 힘 제어기

이 논문에서 제안하는 힘 제어 시스템은 다음의 3개의 루프로 구성되어 있다. 그림5에서 나타낸 바와 같이 내측의 제어이론에 의해 설계 되어진 외란 추정기를 가진 고정도의 위치제어 루프, 다음으로 매니플레이터의 끝단에 발생하는 힘에 대해서 부드럽게 제어하는 컴플라이언스 제어 루프와, 목표력과 발생력을 비교하여 힘 제어를 수행하는 외측의 힘제어 루프로 구성되어진다. 여기서 위치 제어기와 컴플라이언스 제어기는 3장에서 컴플라이언스 제어기와 동일한 구조를 가진다. 또한, 본 시스템에서는 힘 제어를 실현하기 위하여 컴플라이언스 제어 루프의 외측에 사전에 설계한 목표궤도를 수정하여 힘 제어를 수행하는 루프가 설치되어 있다.

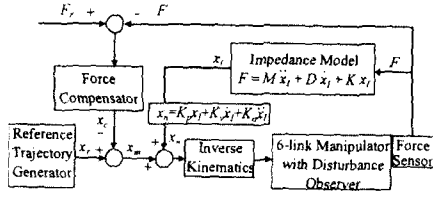


Fig. 5 Proposed Impedance-Force-Control System

이 루프는 매니플레이터가 외부 환경과 접촉할 때 발생하는 힘이 목표력보다 작으면 목표 궤도를 외부 환경의 안쪽으로 더 깊게 수정하고, 목표력보다 크다면 얇게 수정함으로써 발생력을 간접적으로 제어하는 역할을 한다. 즉, 위치제어에 의해 간접적으로 힘 제어가 가능하도록 하는 역할을 하고 있다. 다음 절에서는 제안한 힘 제어기로서, 외부 환경의 파라미터 변동 및 매니플레이터 자신의 파라미터 변동에 대하여 강건한 힘 제어를 실현하기 위해 제어이론에 의해 도출되어진 안정화 필터를 가진 힘 제어기의 설계법에 대하여 설명한다.

### 5. 힘 제어기의 설계

본 장에서는 4장에서 제안한 힘제어기의 설계법에 관하여 설명한다. 서론에서 언급한 바와 같이 배전선의 보수공사와 같은 외부환경의 파라미터 변동이 심한 대표적인 옥외 작업에서 강건한 힘제어기를 실현하기 위해서  $H_2$  제어이론에 의해 힘제어기를 도출한다.  $H_2$  제어이론에 의해 제어기를 설계하기 위해서 우선 일반화 플랜트를 설정할 필요가 있다. 여기서는 그림6과 같은 일반화 플랜트를 설정하였다. 여기서,  $W_1(s)$ 는 입력 외란의 영향을 억압하여, 정상상태 오차를 줄이기 위한 외란 억압 함수(disturbance rejection weight),  $W_3(s)$ 는 강건 안정화 함수(robust stabilizing weight)를 의미한다. 여기서,  $W_1(s)$ 는 무한대의 입력을 허가 하지 않는다는  $H_2$ 제어의 가해조건을 만족시키기 위해,  $W_3(s)$ 는 30[rad/s] 이상에서의 출력 외란을 -20[dB/dec]로 감쇠 시키도록 아래와 같이 설정했다.

$$P_*(s) = \frac{1000}{40s^2 + 400s + 1000} \quad (1)$$

$$P_n^{-1}(s) = \frac{40s^2 + 400s + 1000}{10^{-8}s^2 + 10^{-8}s + 1000} \quad (2)$$

$$W_1(s) = 0.001, \quad W_3(s) = \frac{600(s+30)}{(s+600)} \quad (3)$$

여기서, 식(1)은 모델 매칭하려는 유압 매니플레이터와 환경을 포함한 이상적인 임피던스 모델이고, 식(2)는 그 역함수이지만, 그대로는 Proper가 아니므로, PC-Matlab에서 해를 구할 수가 없어, 편의적으로

Proper인 함수로 치환하였다. 이상으로부터 PC-Matlab를 사용해서  $Q(s)$ 를 도출한 결과, 식(4)의 제어기를 얻었다.

$$Q(s) = 2.35 \times 10^{-5} \frac{(s + (1.003 \pm 1.362 \times 10^0 j))}{(s + (2.775 \times 10^0 \pm 2.722 \times 10^0 j))} \times \frac{(s + 600)(s + 8.193)}{(s + 30)(s + (6.64 \pm 3.043 j))} \quad (4)$$

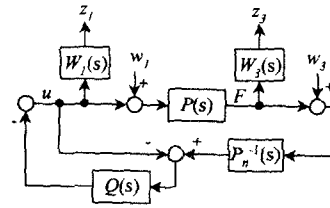


Fig. 6 Setup of Generalized Plant

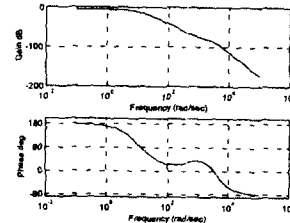


Fig. 7 Frequency Response of  $Q(s)$

그림 7에는 이 제어기의 주파수 특성을 나타낸다. 이 결과로부터, 30[rad/s]에서 2000[rad/s]까지의 주파수 영역에서 약 -20[dB/dec], 또한 그 이상의 주파수 영역에서는 -40[dB/dec]의 감쇠 특성을 가지고 있어, 상기  $W_3(s)$ 에서 설정한 주파수 범위에서 감쇠가 현저한 것을 확인할 수 있다. 다음 절에서는 이상에서 얻은 힘 외란 추정기(Force Disturbance Observer)를 힘제어 실험에 적용하여 그 유효성을 검토한다

### 6. 힘 제어 실험

도출한 목표궤도수정에 의한 힘 제어법을 이용하여 그림8에 나타낸 것과 같이 궤도를 그리는 실험을 행하였다. 특히, 이 궤도상에는 장애물로  $x=0.02m$ 의 위치에 그림9에 표시한 것과 같이 평평한 벽면(a)와 원형 벽면(b)을 설치 한다. 이와 같은 실험을 컴플라이언스 제어만으로 행할 경우, 벽면과 목표 궤도가 많이 떨어져있는 원형의 벽면중심의 근방에서는 큰 힘이 발생할 것으로 예상된다. 그러나, 목표궤도의 수정에 의한 힘 제어를 이용함으로써 목표 궤도를 수정하고, 일정한 힘의 작업이 실현될 것으로 예상된다.

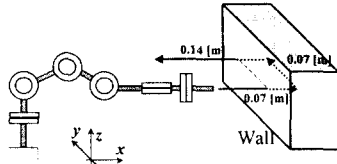


Fig. 8 Reference Trajectory

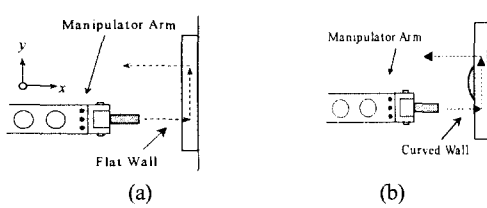
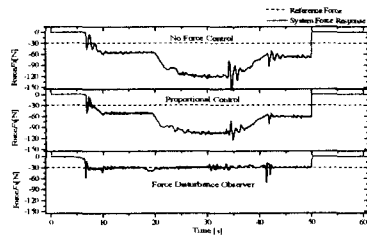


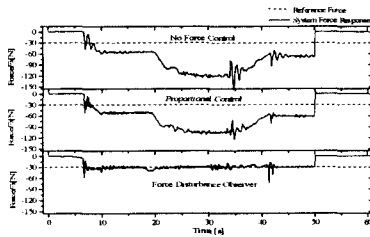
Fig. 9(a) Experimental Obstacles : Flat Wall

Fig. 9(b) Experimental Obstacles : Curved Wall

여기서 가상질량  $M=80[\text{kg}]$ , 가상댐퍼  $D=800[\text{Ns/m}]$ , 가상스프링  $K=2000[\text{N/m}]$ 의 임피던스 모델을 이용하고, 또 힘제어기는 비례제어만의 경우와 힘 외란 추정기를 이용한 경우에 대하여 일정한 힘 제어실험을 행하였다. 목표력을  $-30[\text{N}]$ 으로 하였을 때의 실험 결과를 그림 10 (a), (b)에 각각 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 10(a) Experimental Results for Force Control: Flat Wall

Fig. 10(b) Experimental Results for Force Control: curved Wall

결과에서 알 수 있는 것처럼 힘 보상기가 없는 경우, 즉 컴플라이언스 제어만의 경우에는 벽면과 목표 궤도가 제일 많이 떨어져 있는 벽면의 중앙 부에서는  $-120[\text{N}]$ 의 큰 힘이 발생하고, 또 비례제어만의 경우에도 목표력과 많은 편차가 발생되어 힘제어가 불가

능함을 알 수 있다. 그러나  $H_\infty$  제어이론에 의해 유도된 안정화 필터를 가진 힘 외란 추정기의 경우, 정상상태 오차 없이 목표력에 잘 추종하고 있는 것을 실험 결과로부터 확인할 수 있다.

## 7. 결론

비선형성과 시스템의 파라미터 변동이 큰 유압식 매니퓰레이터를 이용하여 자동조립작업을 수행할 때 필수 불가결한 요소인 안정된 접촉 작업의 구현 및 고정도의 힘제어를 구현하기 위하여, 외란 추정기에 의한 고정도 위치제어를 기본으로하는 컴플라이언스 제어기와 목표 궤적의 수정에 의한 힘 제어를 제안하였다. 특히, 힘 제어기로서 힘 외란 추정기를 제안,  $H_\infty$  제어이론에 의해 힘 외란 추정기의 안정화 필터를 설계, 두 가지 다른 형상의 벽면에 대한 힘 제어 실험에 응용하여 그 유효성을 확인 하였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학 재단 지정 울산대학교 기계 부품 및 소재 특성평가 연구 센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고 문헌

1. M.Nakashima, H.Yakabe, Y.Maruyama, K.Yano and K.Morita, H. Nakagaki: Application of Semi-Automatic Robot Technology on HotLine Maintenance Task, Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp843-850(1995)
2. M.Nakashima, Y.Maruyama, K.Yano and H.Yakabe : The Hot-Line Work Robot System and its Human-Robot Interface "MOS", Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A, pp116-123(1995)
3. M.Boyer: System Integration in Telerobotics : Case Study: Maintenance of Electric Power Lines, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on R&A, pp1042-1047(1996)
4. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA, Tomohiko OZEKI and Toshiro YAMAMOTO : Compliance Control of a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator (Application to the Peg-in-Hole Task), Trans. of JSME(C), Vol.64, No.624, pp3019-3025, (1998)
5. Kyoungkwan AHN, Shinichi YOKOTA and Toshiro YAMAMOTO: Application of an Impedance-Force Control to a 6-Link Electro-Hydraulic Manipulator; Proc. of Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control, pp111-121 (1998)
6. N.Hogan, Impedance Control: An Approach to Manipulation Part2, Transaction of ASME, Journal of DSMC, Vol.107, pp8-16 (1985)