

한 쌍의 6축 전기유압 매니플레이터를 이용한 힘 제어 (너트의 장착 및 체결 작업에의 응용)

Force Control of One Pair of 6-Link Electro-Hydraulic Manipulators (Application to the Approaching of a Bolt and the Wrenching of a Nut Tasks)

안 경 관, 양 순 용
(Kyung Kwan Ahn and Soon Yong Yang)

Abstract : An electro-hydraulic manipulator using hydraulic actuators has many nonlinear elements, and its parameter fluctuations are greater than those of an electrically driven manipulator. So it is relatively difficult to realize not only stable contact work but also accurate force control for the automatic assembly tasks using hydraulic manipulators. In this manuscript, we applied a compliance control, which is based on the position control by a disturbance observer for our manipulator system. A reference trajectory modification method is proposed in order to achieve accurate force control even though the stiffness and the position of the environment change. Experimental results show that highly robust force tracking by a 6-link electro-hydraulic manipulator could be achieved under various environment conditions. The proposed force control algorithm is applied to the approaching of bolt and the wrenching of nut tasks as one typical task in the maintenance work of live power electric line and is experimentally confirmed very effective for the task.

Keywords : fluid power control, field task, manipulator, robust control, force control

I. 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 전기절연성을 높이기 위해서 절연성의 재료를 사용하고 있으며 또한 전기 서보시스템을 대신하여 유압 서보시스템을 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 크기 때문에, 고정도의 조립작업에는 적합하지 않다고 되어 왔다. 저자중의 일부는 이미 외란 추정기에 의한 고정도의 위치제어를 기본으로 하는 컴플라이언스 제어를 6축 전기 유압 매니플레이터에 적용하여 안정적인 접촉작업 및 원형인 Peg와 Hole의 공차가 $7[\mu\text{m}]$ 인 경우의 Peg를 Hole에 삽입하는 Peg-in-Hole 작업을 실현하고 있다[4].

본 연구에서는 배전공사의 보수작업에 실제로 사용되어지는 한 쌍의 6축 전기 유압 매니플레이터에 대해 새로운 힘 제어기를 제안한다. 제안하는 힘 제어기는 저자가 제안했던 컴플라이언스 제어[5]를 확장하여, 외란 및 시스템의 파라미터 변동에 강건한 H_∞ 제어이론에 의해 도출되어진 안정화 필터를 이용하고 있다. 제안한 힘 제어기의 유효성을 확인하기 위하여 2종류의 벽면에 대한 힘 제어 실험을 실시한다. 또, 제안한 힘 제어기를 배전공사의 대표적인 보수작업인 전주의 스탠드에 애자를 장착, 체결하는 작업 중의 힘 제어에 응용하여, 제안한 힘 제어기의 유효성을 실험적으로 확인한다.

II. 실험장치

실험에 사용되어지는 한쪽의 6축 전기 유압 매니플레이터 시스템의 구성을 그림 1에 나타낸다. 각 관절의 회전각도는 로우터리 엔코더(Rotary Encoder)에 의해 $0.0044[^\circ]$ 의 분해능으로 검출되어져, 샘플링 주파수 $2[\text{kHz}]$ 로 컴퓨터에 입력된다. 또한, 매니플레이터가 외계와 접촉하는 동안에 발생하는 힘은 매니플레이터의 선단에 장착된 6축 힘 센서에 의해 검출되어 A/D 변환기를 통해서 컴퓨터에 입력된다.

그림 2는 본 연구의 대상 작업인 한 쌍의 전기 유압 매니플레이터를 이용한 애자의 스탠드에서의 장착 및 체결 작업의 개략을 나타내고 있다. 그림에서 왼쪽 매니플레이터의 선단에는 Gripper가 설치되어, 애자를 전 상태에서 스탠드의 볼트구멍에 애자의 너트부를 삽입할 때 이용한다. 오른쪽 매니플레이터의 선단에는 공기압으로 작동하는 임팩트 렌치가 설치되어 있어, 너트를 회전시키면서 애자의 볼트부와 완전한 체결 작업을 수행할 때 사용되어진다.

접수일자 : 2001. 5. 11., 수정완료 : 2001. 9. 4.

안경관, 양순용 : 울산대 기계자동차공학부(kkahn@mail.ulsan.ac.kr/soonyy@mail.ulsan.ac.kr)

* 본 연구는 2000년도 울산대학교 교내연구비 및 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성 평가 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

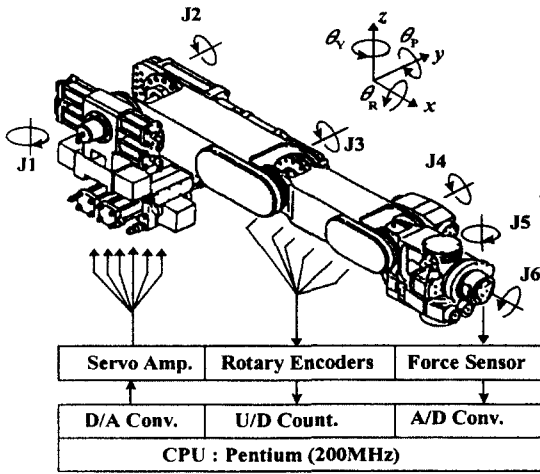


그림 1. 6축 유압 매니퓰레이터의 시스템 구성도.
Fig. 1. system configuration of a 6-link hydraulic manipulator.

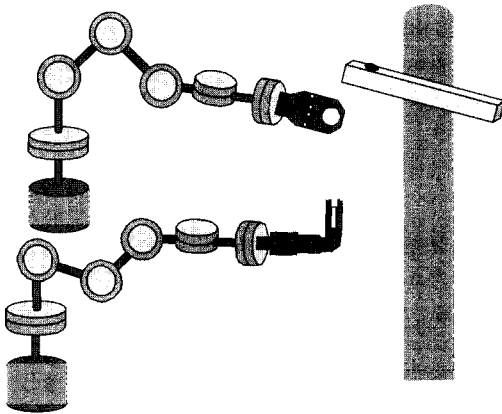


그림 2. 보수작업에서의 두 팔에 의한 매니퓰레이션.
Fig. 2. Dual arm manipulation in the maintenance task.

III. 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, 접촉작업에서는 급격히 발생력이 변화하기 쉽기 때문에, 단순히 힘을 가상 스프링 정수로 나누어 가상변위를 구하는 Stiffness Control만으로는 동일한 발생력이더라도 가상 변위가 크게 됨과 함께 진동적으로 되어, 계가 불안정해지기 쉽다. 여기서, 외부환경과의 접촉에 의해 발생하는 반력(F)과 가상변위(x)와의 관계를 단순한 스프링만의 시스템이 아니고, 그림 3에 나타난 것과 같이 가상스프링(K), 가상댐퍼(D), 가상질량(M)을 고려한 임피던스 모델에서 주어진 관계로 한다[6]. 또한, 컴플라이언스 루프의 안정성을 높이기 위해, 임피던스 모델에서 구해지는 가상속도, 가상가속도의 상태변수의 피드백을 이용한다. 여기서 각 축의 위치제어기로는 저자들에 의해 제안되어져, 6축 전기 유압 매니퓰레이터의 궤적제어에서 고정도와 강건 안정성이 실험적으로 확인된 2자유도 모델 Matching 제어계에 있어서 H_∞제어이론에 의해 설계되어진 안정화 제어기[7]를 적용하고 있다. 제안한 컴플라이언스

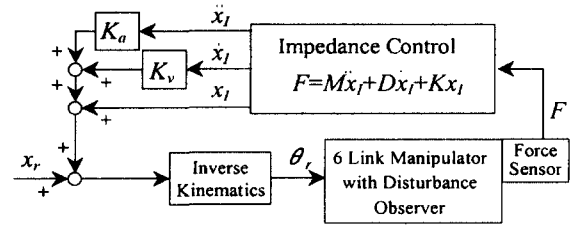


그림 3. 상태 피드백을 가진 임피던스 제어.
Fig. 3. Impedance control system with state feedback.

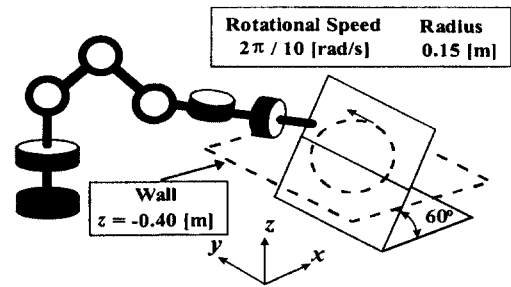


그림 4. 접촉작업을 위한 실험장치의 구성.
Fig. 4. Experimental setup for contact task.

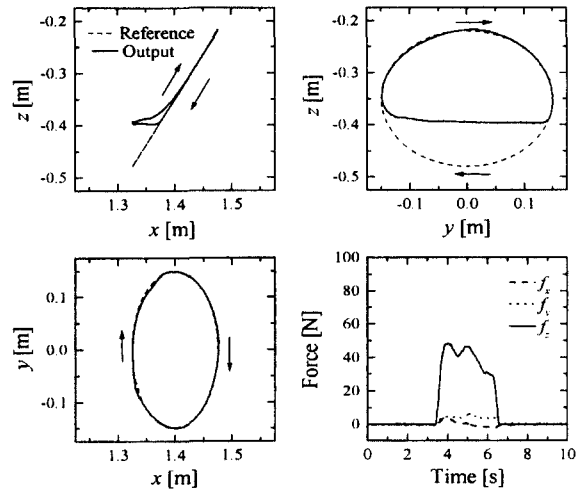


그림 5. 임피던스 제어 실험 결과.
Fig. 5. Experimental results of impedance control(M=40[kg], D=400[Ns/m], K=1000[Ns/m]).

제어기의 유효성을 확인하기 위해서 그림4에 나타난 것과 같이 매니퓰레이터 선단에 반경 0.15[m]의 원 궤적을 그리기 실험을 수행했다. 특히 이 원 궤적상에는 장애물로서 z=-0.40[m]의 위치에 수평면에 대하여 π/3[rad] 기울어진 벽면이 설치되어있다. K_v=0.08[s], K_a=0.02[s²]의 상태변수 피드백 계수를 이용할 때의 실험 결과를 그림 5에 나타낸다. 결과로부터 상태변수 피드백에 의해 벽면의 강성이 상당히 크더라도 컴플라이언스 루프의 안정성이 확보되어져, 안정적인 접촉작업이 실현 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 제안하는 힘 제어기

이 논문에서 제안하는 힘 제어 시스템은 다음의 3개의 루프로 구성되어져 있다. 그림 6에서 나타난 바와 같이 내측의

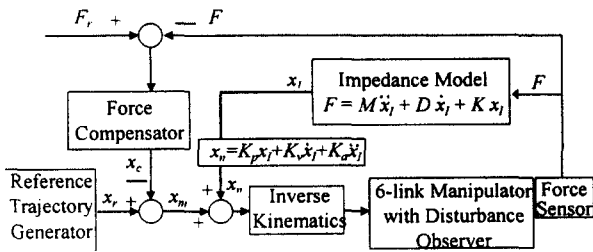


그림 6. 제안한 임피던스 힘 제어 시스템.
Fig. 6. Proposed impedance-force-control system.

H_∞ 제어이론에 의해 설계되어진 외란 추정기를 가진 고정도의 위치제어 루프, 다음으로 매니플레이터의 끝단에 발생하는 힘에 대해서 부드럽게 제어하는 컴플라이언스 제어 루프와, 목표력과 발생력을 비교하여 힘 제어를 수행하는 외측의 힘 제어 루프로 구성되어진다. 여기서 위치제어기와 컴플라이언스 제어기는 3장에서 컴플라이언스 제어기와 동일한 구조를 가진다. 또한, 본 시스템에서는 힘 제어를 실현하기 위하여 컴플라이언스 제어 루프의 외측에 사전에 설계한 목표케도를 수정하여 힘 제어를 수행하는 루프가 설치되어 있다. 이 루프는 매니플레이터가 외부 환경과 접촉할 때 발생하는 힘이 목표력보다 작으면 목표케도를 외부환경의 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 H_∞ 제어이론에 의해 도출되어진 안정화 필터를 가진 힘 제어기의 설계법에 대하여 설명한다.

V. H_∞ 제어이론에 의해 설계된 힘 제어기

본 장에서는 4장에서 제안한 힘 제어기의 설계법에 관하여 설명한다. 서론에서 언급한 바와 같이 배전선의 보수공사와 같은 외부환경의 파라미터 변동이 심한 대표적인 옥외작업에서 강건한 힘 제어기를 실현하기 위해서 H_∞ 제어이론에 의해 힘 제어기를 도출한다. H_∞ 제어이론에 의해 제어기를 설계하기 위해서 우선 일반화 플랜트를 설정할 필요가 있다. 여기서는 그림 7과 같은 일반화 플랜트를 설정하였다. 여기서, $W_1(s)$ 는 입력 외란의 영향을 억압하여, 정상상태오차를 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 허가하지 않는다는 H_∞ 제어의 가해조건을 만족시키기 위해, $W_3(s)$ 는 30 [rad/s] 이상에서의 출력 외란을 -20[dB/dec]로 감쇠시키도록 아래와 같이 설정했다. 여기서, (1)은 모델 매칭 하려는 유압 매니플레이터와 환경을 포함한 이상적인 임피던스 모델이고, (2)는 그 역함수이지만, 그대로는 Proper가 아니므로, PC-Matlab에서 해를 구할 수가 없어 편의적으로 Proper인 함수로 치환하였다.

$$P_n = \frac{1000}{40s^2 + 400s + 1000} \tag{1}$$

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

$$W_1(s) = 0.001 \tag{3}$$

이상으로부터 PC-Matlab를 사용해서 $Q(s)$ [7]를 도출한 결과, (4)의 제어기를 얻었다.

$$Q(s) = 2.35 \times 10^{-5} \frac{(s + (1.003 \pm 1.362 \times 10^{-5}j))}{(s + (2.775 \times 10^3 \pm 2.722 \times 10^3j))} \times \frac{(s + 600)(s + 8.193)}{(s + 30)(s + (6.64 \pm 3.043j))} \tag{4}$$

그림 8은 도출한 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 주파수범위에서 감쇠가 현저한 것을 확인할 수 있다. 다음 절에서는 이상에서 얻은 힘 외란 추정기(Force Disturbance Observer)를 힘 제어 실험에 적용하여 그 유효성을 검토한다.

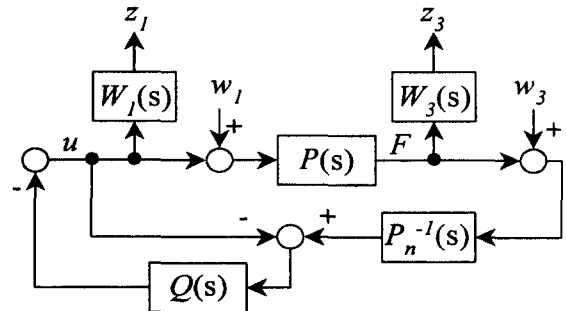


그림 7. 일반화 플랜트의 설정.
Fig. 7. Setup of generalized plant.

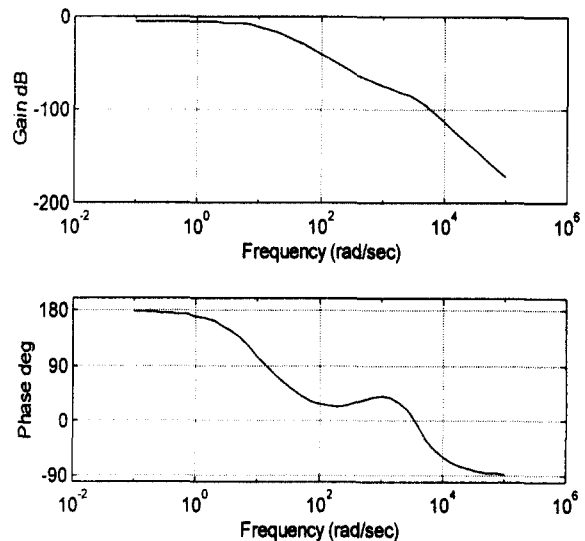


그림 8. $Q(s)$ 의 주파수 응답.
Fig. 8. Frequency response of $Q(s)$.

VI. 힘 제어 실험

도출한 목표궤도수정에 의한 힘 제어법을 이용하여 그림 9에 나타난 것과 같이 궤도를 그리는 실험을 행하였다. 특히, 이 궤도상에는 장애물로 $x=0.02m$ 의 위치에 그림 10에 표시한 것과 같이 평평한 벽면(a)와 원형 벽면(b)을 설치한다. 이와 같은 실험을 컴플라이언스 제어만으로 행할 경우, 벽면과 목표궤도가 많이 떨어져있는 원형의 벽면중심의 근방에서는 큰 힘이 발생할 것으로 예상된다. 그러나, 목표궤도의 수정에 의한 힘 제어를 이용함으로써 목표궤도를 수정하고, 일정한 힘의 작업이 실현될 것으로 예상된다.

여기서, 가상질량 $M=80[kg]$, 가상댐퍼 $D=800[Ns/m]$, 가상스프링 $K=2000[N/m]$ 의 임피던스 모델을 이용하고, 또 힘 제어기는 비례제어만의 경우와 힘 외란 추정기를 이용한 경우에 대하여 일정한 힘 제어실험을 행하였다. 목표력을 $-30[N]$ 으로 하였을 때의 실험결과를 그림 11(a), (b)에 각각 나타내었다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 힘 보상기가 없는 경우, 즉 컴플라이언스 제어만의 경우에는 벽면과 목표궤도가 제일 많이 떨어져 있는 벽면의 중앙부에서는 $-120[N]$ 의 큰 힘이 발생하고, 또 비례제어만의 경우에도 목표력과 많은 편차가 발생되어 힘 제어가 불가능함을 알 수 있다. 그러나 H_{∞} 제어이론에 의해 유도된 안정화 필터를 가진 힘 외란 추정기의 경우, 정상상태 오차 없이 목표력에 잘 추종하고 있는 것을 실험결과로부터 확인할 수 있다.

VII. 볼트와 너트의 장착, 체결작업에의 응용

1. 작업 궤도의 계획

여기서는 6장에서 제안한 H_{∞} 제어이론에 의해 유도한 안정화 필터를 가진 힘 외란 추정기를 실제의 환선 공사의 볼트와 너트의 장착, 체결작업에 응용한다. 볼트와 너트의 장착, 체결작업은 그림 12, 13에 표시한 것과 같이 2개의 작업

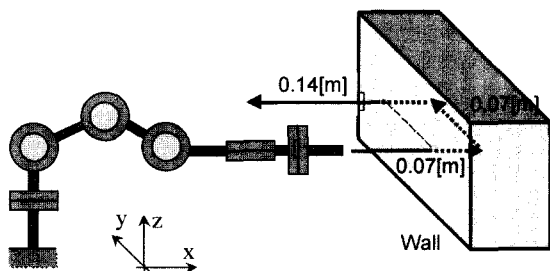


그림 9. 목표궤적.
Fig. 9. Reference trajectory.

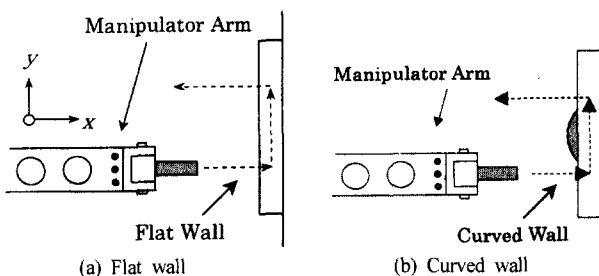


그림 10. 실험용 벽면.
Fig. 10. Experimental obstacles.

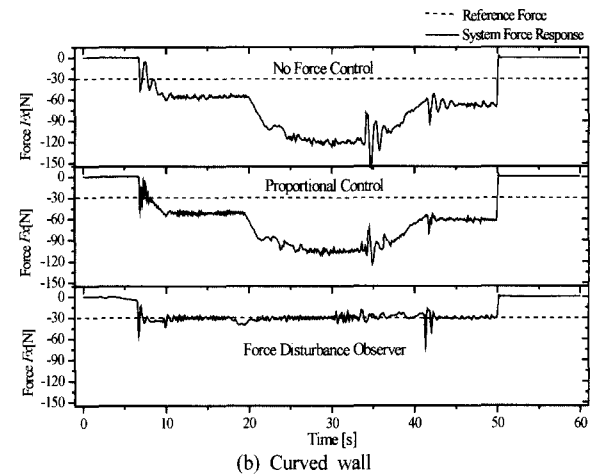
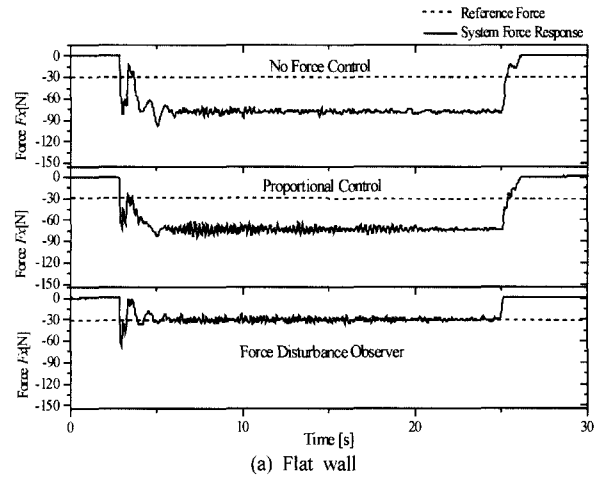


그림 11. 힘 제어에 대한 실험결과.
Fig. 11. Experimental results for force control.

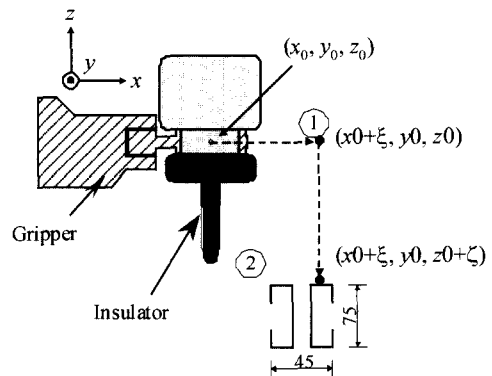


그림 12. 볼트구멍 중심의 탐색 및 삽입작업.
Fig. 12. Random search of hole center and insertion of bolt of insulator to the hole of stand.

으로 나누어 고려한다.

2. 작업 알고리즘

2.1 볼트구멍의 중심탐색 및 삽입작업

이 작업은 그림 12에 표시한 것과 같이 왼쪽의 매니플레이터에 취부되어 있는 공기압으로 작동하는 그립퍼(Gripper)를 이용하여 랜덤 중심 탐색법에 의해 볼트구멍의 중심을 탐색하고, 애자의 볼트를 스탠드의 볼트구멍에 삽입하는 작

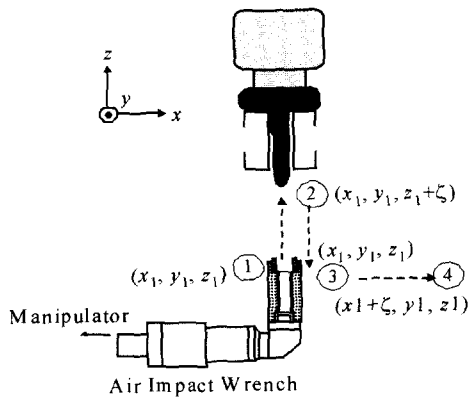


그림 13. 임팩트 렌치의 체결작업.
Fig. 13. Wrenching task by air impact wrench.

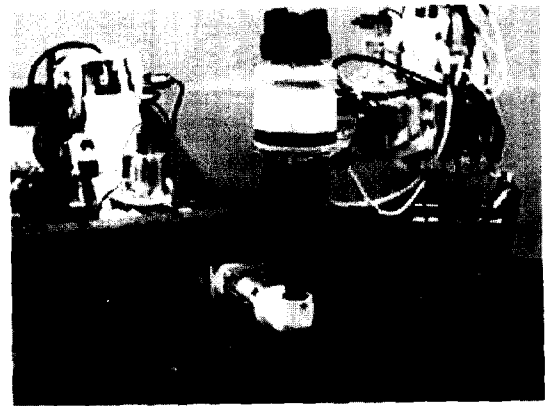


그림 15. 볼트와 너트의 장착, 체결작업.
Fig. 15. Approaching of bolt and wrenching of nut task.

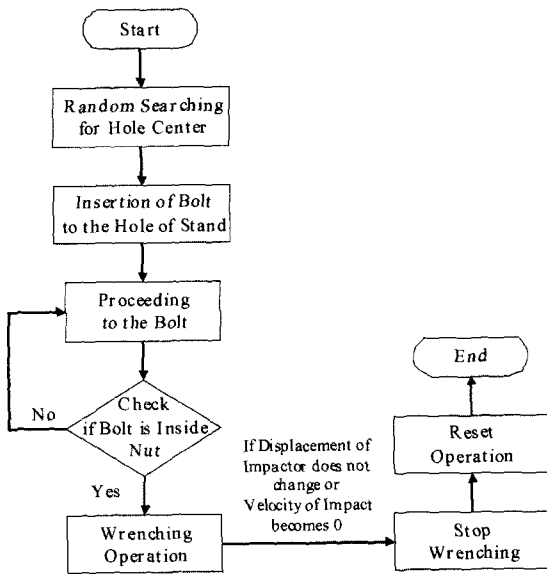


그림 14. 볼트 체결 작업 알고리즘.
Fig. 14. Algorithm of bolt wrenching task.

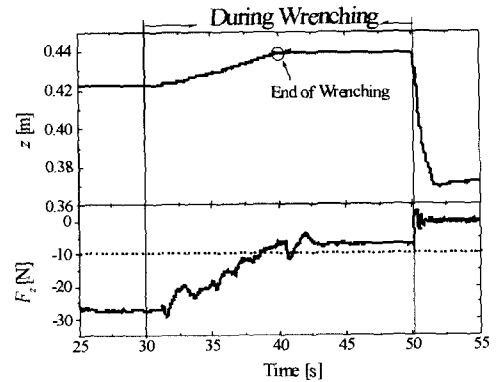
업이다.

2.2 볼트 체결작업

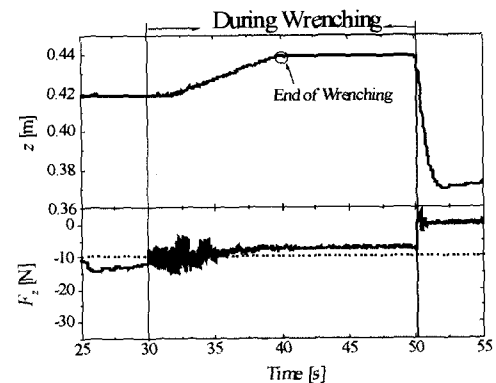
이 작업은 그림 13에 표시한 것과 같이 오른쪽 매니플레이터를 이용하여 임팩트 렌치를 애자 볼트의 중심부에 접근하여, 힘 제어를 하면서 너트를 볼트에 체결하고, 그 뒤 본래의 위치로 되돌아가는 작업이다. 이때에는 볼트가 임팩트 렌치의 중심부에 위치하는지를 판단하는 것과 너트를 체결할 때 누르는 힘이 일정하도록 목표궤도를 수정하여 임팩트 렌치의 상승속도를 적절하게 조절하는 것이 중요하다. 이상의 2개의 작업을 조합하는 것에 의해 그림 14에 표시한 것과 같은 작업 알고리즘을 작성된다. 이 알고리즘에 의해 볼트와 너트의 장착, 체결작업은 실현될 것으로 생각된다.

3. 임팩트 렌치의 누르는 힘의 제어에 대한 실험결과

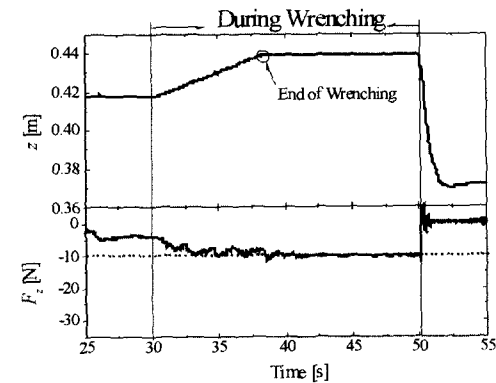
한 쌍의 매니플레이터를 이용한 볼트와 너트의 장착, 체결작업에 7.2절의 작업 알고리즘을 적용하여 실험을 수행하였다(그림 15). 특히 이 작업 중에서 임팩트 렌치의 누르는 힘의 제어에 대한 실험결과를 그림 16(a),(b),(c)에 나타내고 있다. 그림 16(a)는 컴플라이언스 제어만을 사용한 경우, 그



(a) When no force control is applied



(b) In the case of proportional control



(c) In the case of force disturbance observer

그림 16. 힘제어 실험 결과.

Fig. 16. Experimental results of force control.

림 16(b)는 힘 제어기에 비례제어만을 이용한 경우, 그림 16(c)는 힘 제어기로 힘의 외란 추정기를 이용한 경우의 실험 결과이다. 각각의 그림에서 상단부는 임팩트 렌치의 상승위치를, 하단부는 임팩트 렌치의 선단에 발생한 반력을 각각 나타낸다. 실험결과로부터 컴플라이언스 제어만으로 작업을 행한 경우(그림 16(a)), 목표력에 대해 발생력에 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 만약 최초의 목표위치가 상당히 낮게 설계되어 있었다면 완전한 볼트와 너트의 체결작업이 실현되지 못할 것으로 생각되어진다. 힘 보상기에 비례제어를 이용한 경우(그림 16(b)), 임팩트 렌치가 상승하는 중에 힘 데이터에서 알 수 있듯이 상당히 진동적인 거동을 나타내고, 체결이 끝난 단계에서도 정상상태오차가 발생함을 알 수 있다. 이에 반해서, 힘의 외란 추정기를 이용한 경우(그림 16(c)), 정상상태오차 없이 목표치(-10[N])과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

VIII. 결론

비선형성과 시스템의 파라미터 변동이 큰 유압식 매니퓰레이터를 이용하여 자동조립작업을 수행할 때 필수 불가결한 요소인 안정된 접촉작업의 구현 및 고정도의 힘 제어를 구현하기 위하여, 외란 추정기에 의한 고정도 위치제어를 기본으로 하는 컴플라이언스 제어기와 목표궤적의 수정에 의한 힘 제어를 제안하였다. 특히 힘 제어기로서 힘 외란 추정기를 제안, H_{∞} 제어이론에 의해 힘 외란 추정기의 안정화 필터를 설계, 두 가지 다른 형상의 벽면에 대한 힘 제어 실험에 응용하여 그 유효성을 확인하였다.

마지막으로 제안한 제어법을 한 쌍의 6축 전기유압 매니퓰레이터에 의한 활선 공사의 보수작업 중 애자를 스탠드에 장착, 체결하는 작업에 적용, 제안한 제어법의 유효성을 확

인하였다. 향후 제안한 제어법을 바탕으로 건설기계의 지능로봇화에 응용할 예정이다.

참고문헌

- [1] M. Nakashima, H. Yakabe, Y. Maruyama, K. Yano, and K. Morita, H. Nakagaki, "Application of semi-automatic robot technology on hot line maintenance task," *Proc. of the 1995 IEEE Int. Conf. on R&A*, pp. 843-850. 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*, pp. 116-123, 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*, pp. 1042-1047. 1996.
- [4] Kyoungkwan Ahn, Shinichi Yokota, Tomohiko Ozeki, and Toshiro Yamamoto, "Compliance control of a 6-link electrohydraulic manipulator (application to the peg-in-hole task)," *Trans. of JSME(C)*, vol. 64, no. 624, pp. 3019-3025, 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*, pp. 111-121, 1998.
- [6] N. Hogan, Impedance Control, An Approach to Manipulation Part2, *Transaction of ASME, Journal of DSMC*, vol. 107, pp. 8-16, 1985.
- [7] Toshiro Yamamoto and Shinichi Yokota, "Application of control theory for 2-DOF control system (a design method of robust controller for each axis of a hydraulic manipulator)," *Trans. of JSME(C)*, vol. 64, no. 617, pp. 177-184, 1998.



안 경 관

1966년 12월 16일생. 1990년 서울대 기계공학과 졸업. 1999년 일본동경공업대학 정밀기계시스템 박사. 1992년~1995년 삼성중공업 연구원. 1999년~2000년 2월 일본 동경공업대학 정밀공학연구소 객원연구원. 2000년

3월~현재 울산대학교 기계자동차공학부 조교수. 관심분야는 Fluid Power Control, Autonomous Field Robot, Machine Intelligence .



양 순 용

1955년 2월 17일생. 1979년 부산대학교 기계설계학과(공학사). 1981년 동 대학원(공학석사). 1987년 일본 동경대학 정밀기계(공학석사). 1997년 일본동경대학(공학박사). 1982년~1985년 한국동력자원연구소 연구

원. 1992년~1998년 2월. 삼성중공업 수석 연구원. 1998년 3월~현재 울산대학교 기계자동차공학부 조교수. 관심분야는 Field Robot(건설기계의 자동화). Silver Robot 개념 설계 및 제어, Soft Finger의 파지제어, 유압제어, 카메라트로닉스.