

병렬 구동 매니플레이터의 외란 및 속도 추정을 이용한 정밀 위치 제어

Precise Position Control of an In-Parallel Actuated Manipulator using Disturbance and Velocity Observer

°최용훈*, 심재홍*, 권동수**, 조형석**

* 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel: 02-958-3457; E-mail:choiyh@robot.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과(Tel: 042-869-3082; Fax: 042-869-3095; E-mail: kwon@robot.kaist.ac.kr)

Abstract : This thesis presents precise position control methods of a 3-PRPS in-parallel manipulator for industrial applications such as assembly of highly integrated semiconductors and microsurgery. Since real-time control is one of the most important issues required for industrial application, the experimental hardware is set up with a VME based DSP controller. In the 3-PRPS parallel manipulator, structurally existing friction at three horizontal links considerably degrades the precise position control. In order to compensate the friction of the horizontal links in the joint space, a disturbance compensation using disturbance and velocity observers has been proposed and investigated. We analyzed the decision method of eigenvalues of the disturbance observer and the effects of the control resulted from the system model errors. Through a series of simulations and experiments, we see that the method is capable of compensating variations of the robot parameters such as inertia and damping as well as the joint friction. Experiments show that the disturbance compensation method using disturbance and velocity observer is very effective to compensate the friction. Compared with conventional PID position control, it decreased position errors in a circular motion by approximately 70%.

Keywords : 3PRPS parallel manipulator, Precise position control, Disturbance and velocity observers.

1. 서론

최근 로봇을 이용하여 반도체 제조공정이나 의료계의 미세 수술등의 초정밀 작업에 응용하기 위한 산업계의 요구가 증대되고 있다. 그러나 일반 직렬로봇은 각 조인트로부터의 위치 오차 누적이나 액츄에이터, 엔코더의 낮은 분해능으로 인한 정밀도의 한계점을 가지고 있다. 이에 대한 대안으로서 고속, 고정밀, 고하중에 요구되는 작업에 적합한 6 자유도 병렬기구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 운동코일(Moving Coil)방식의 전자기학의 원리를 이용하여 빠른 응답속도와 선형화된 힘 발생이 가능하게 한 구동부를 갖도록 고안된 3PRPS(P:Prismatic, R:Revolute, S:Spherical)타입의 6 자유도 병렬 매니플레이터에 있어서, 수평링크에 존재하는 마찰 및 시스템의 비선형 동특성을 포함한 외란을 보상하는 정밀위치 제어 방법을 제안하고, 이의 실시간 구현과 실험을 통해 제안된 제어방법의 타당성을 보이고자 한다.

6 자유도 병렬기구는 1965년 D. Stewart 에 의해 처음으로 고안되어 Stewart platform 이라 불리며 현재 병렬 매니플레이터 설계의 기본모델이 되고있다[1]. 이의 주요 연구 분야는 로봇의 손목기구, 6축 힘/토크 센서, 텔레오퍼레이션 용의 마스터 핸드 컨트롤러 등 산업적인 응용분야에서의 연구와 기구학 해석에 의한 기구 구조 변수의 최적화, 동역학 해석 및 제어 알고리즘 개발 등 기구계 및 제어관련 분야에서의 연구가 있다. 3PRPS 타입의 병렬 매니플레이터에 대한 연구동향을 살펴보면, Behi 가 처음 고안한 이후[2], KAIST의 Shim,J.H.은 3PRPS 타입의 병렬 매니플레이터를 개발,제작하였으며 Park,J.Y.은 기구학,동역학 해석을 하였다[3]. 로봇 매니플레이터의 조인트에 작용하는 마찰력이나 외란을 보상하여 정밀위치 제어를 하기위한 방법으로서 Model based compensation, Torque pulse generation, Torque feedback control, Adaptive friction compensation 등 다양한 보상기법이 제안되었다. 그러나 모델을 기반으로 한 마찰보상 방법은 매우 정확한 마찰 모델링이 필요하게 되는데[4], 이것은 마찰의 비 선형적인 요소들 때문에 상당히 어려울 뿐 아니라

모델링이 정확하게 되었다고 하더라도 부하량이나 온도의 변화, 기계부품의 경년변화등에 의한 복잡성으로 인하여 실제로 적용하는데는 어려움이 있다. 둘째, 토크 펄스에 의한 보상기법이 있는데[5], 이 방법의 응용분야는 제적에서 마지막 위치가 중요하지 않고 단지 미세한 이동만을 제어하고자 하는 경우로 제한된다는 단점이 있다. 셋째, 각 조인트에 장착된 힘/토크 센서에서 측정된 신호를 토크 제어를 통해 feedback 하는 것에 의해 마찰에 대한 영향을 보상하므로써 정밀한 제어가 가능하도록 한 방법이 있다[6]. 그러나 이방법은 매우 비싸고 정교한 힘/토크 센서가 필요하다는 것이 단점이다. 넷째, Adaptive friction compensation 이 여러종류의 메카니즘에 대한 비선형 마찰을 보상하기 위해 제안되었다[7]. 그러나 이 방법은 제어기의 파라미터를 조정하는 알고리즘이 매우 복잡하며 많은 연산을 필요로 하기 때문에 실제 적용이 어렵다.

따라서 본 연구에서는 3 PRPS 타입의 병렬 매니플레이터를 정밀 위치제어 하기 위하여 속도 관측기를 포함하는 외란 관측기를 이용한 추정외란 보상을 하므로써 수평링크에 존재하는 마찰력이나 부하토크등의 비선형 외란을 보상한 정밀한 위치제어를 구현하였다

2. 3PRPS 병렬 매니플레이터의 구조

그림 1. 에 본 연구에서 사용한 3PRPS 병렬 매니플레이터의 개략도를 도시하였다. 기구계는 크게 정삼각형으로 이루어진 상부 플랫폼과 하부 플랫폼, 상/하 플랫폼의 각 꼭지점을 연결하는 3개의 수직 링크, 하부 플랫폼에 연결된 3개의 수평 링크로 구성된다. 상부 플랫폼과 수직 링크는 볼 조인트(ball joint)로 연결되며, 다시 수직 링크는 핀 조인트(pin joint)에 의해서 수평 링크와 연결된다.

병렬 매니플레이터의 단위 링크(unit link)는 VCM(Voice Coil Motor)에 의해서 수평/수직 방향의 선형 운동을 할 수 있는데 이러한 운동 코일(moving coil)방식의 자기부상 액츄에이터는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용한 것으로서 빠른 응답 속도와 동작영역에서의 선형화된 힘 발생이 가능하여 토크리플이나 기

어 백래쉬에 의한 영향이 없다. 수평/수직 링크의 선형 변위를 정밀하게 측정하기 위하여 레이저와 PSD(Position Sensing Device)를 결합하여 μm 단위의 측정이 가능한 위치 검출 센서를 채용하였다.

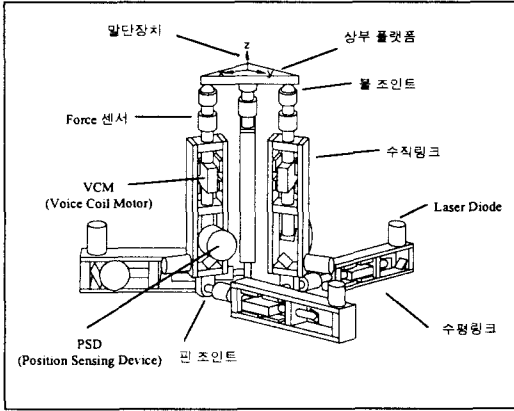


그림 1. 매니플레이터의 구조 개략도
fig. 1. Schematic of the manipulator

3. 외란추정의 원리 및 보상효과

외란 관측기를 구성하기 위해 먼저 시스템의 속도와 외란에 대한 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x} = \frac{1}{M}(K_t \cdot I_m - T_d) \quad (1)$$

$$\dot{T}_d = 0$$

여기서 외란은 시스템의 제어 주기에 비해 충분히 느리게 변화한다고 가정하였다.

상태변수를 속도와 외란으로 놓고 입력을 전류로 놓은 상태에서 상태공간 방정식으로 변환하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_t}{M} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

where, $x_1 = \dot{x}$ (velocity)
 $x_2 = T_d$ (disturbance)
 $u = I_m$ (current)

속도는 측정가능하고 외란은 측정불가능하므로, 최소차수 관측기를 구성하기 위하여 측정가능한 상태변수 x_1 와 추정하고자 하는 변수 x_2 로 나누어 상태변수를 분리하여 외란 관측기의 식을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\tilde{\eta}} = (K_e \frac{1}{M})\tilde{\eta} + (K_e^2 \frac{1}{M})y - \frac{K_e K_t}{M} u \quad (3)$$

따라서 추정외란은 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$\tilde{x}_2 = \tilde{\eta} + K_e x_1 \quad (4)$$

또한 추정 오차를 다음과 같이 정의하면

$$e = x_2 - \tilde{x}_2 \quad (5)$$

최소차수 관측기의 오차방정식(error dynamics)은 다음과 같다.

$$\dot{e} = (A_{bb} - K_e A_{ab})e \quad (6)$$

따라서 (2)식을 대입하고 오차식의 특성방정식을 구하면

$$|sI - A_{bb} + K_e A_{ab}| = |s - \frac{K_e}{M}| = 0 \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $g = -\frac{K_e}{M}$ 이라 놓으면 g 는 관측기의 극점(pole)이 되며, g 를 결정하여 원하는 상태관측기의 특성방정식을 만족하게 할 수 있다.

외란보상에 의한 외란역압특성을 알아보기 위해 외란에 대한 속도출력의 전달함수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\dot{x}}{T_d} = \frac{1}{(Ms+b)} \cdot \frac{-s}{s+g} \quad (8)$$

따라서 외란 관측기에 의한 영향은 $\frac{s}{s+g}$ 로 나타내어지며

g 는 외란 관측기의 주파수 대역을 결정하게 되는데 이 값이 클수록 g 값에 의한 주파수 대역 아래의 주파수 성분을 갖는 외란에 외란에 대해서 외란 역압 효과가 커지게 된다. 최적의 g 값은 빠른 응답특성과 외란의 주파수 성분 및 잡음에 대한 감도 사이에서 적당히 타협하여 선택되어야 한다.

외란 관측기에 의한 보상이 있는 경우 제어 시스템의 페루프 특성이 어떻게 영향받는가를 살펴보기 위해, 외란 관측기를 포함한 전류 입력에 대한 속도 출력의 전달함수를 구해보면

$$\frac{v}{I_m} = \frac{K_t}{(Ms+b)} \cdot \frac{s+g}{s+g(\frac{K_t}{K_m})(\frac{M_n}{M})} \quad (9)$$

위 식으로부터 모델링 오차가 존재하지 않는 경우는 페루프 시스템이 관측기에 의해 전혀 영향받지 않는 것을 알 수 있다. 그런데 만약 모델링 오차가 존재하면 페루프 시스템은 위상뒤짐(phase lag)이나 위상앞섬(phase lead)의 특성을 나타내게 된다. 또한 모델링이 정확하게 되었다고 하더라도 시스템 파라미터의 변동이 있는 경우 전류 대 속도의 관계식이 변하게 되어 추정외란이 변하게 된다. 이 변화는 파라미터의 변동성분이 외란으로 나타난 것이기 때문에 이를 보상하게 되면 파라미터의 변동을 보상해 주는 효과가 있으므로 전체 제어 시스템의 동력학적 특성은 변하지 않게 되며 시스템은 외란에 대해 강인한(robust) 특성을 갖게 된다.

4. 외란 및 속도추정을 이용한 정밀위치제어

외란에 대한 역압효과를 높이기 위해서는 앞에서 설명한 바와 같이 관측기의 고유치 g 를 크게 해야 한다. 그러나, 고유치 g 를 크게 함에 따라 속도정보에 포함된 노이즈를 증폭시키게 되고 전체 시스템이 불안정하게 되는 원인이 된다. 또한 본 연구에서의 속도정보는 위치를 감지하기 위한 PSD(Position Sensing Device)소자의 전압출력을 A/D 변환기를 사용하여 위치정보로 변환한 후 역차분법(backward difference method)에 의한 미분에 의해 속도정보를 얻고 있으므로 미분에 의한 노이즈의 영향이 매우 크다. 그림 4.에 하나의 링크가 정현파로 움직이는 경우에 DSP에서 이산시간으로 구한 속도정보를 나타내었으며 실제로 노이즈가 매우 많음을 알 수 있다.

따라서 속도정보에 나타나는 노이즈를 제거하고 외란 추종의 능력을 향상시킬 수 있는 속도 관측기를 설계하였다. 그림 2.는 속도관측기를 포함하는 외란 관측기의 보상에 대한 블록선도를 나타낸다. 즉, 전류 입력으로부터 계산된 속도와 실제 측정된 속도의 차이를 보정하여 추정된 속도를 출력하며, 추정속도는 외란 관측기의 입력으로 들어가게 된다. 속도 관측기는 시스템의 동력학적 특성에 영향을 주지 않고 노이즈를 작게 하면서 속도를 추정하는 것이 가능하다. 만약 속도정보의 노이즈를 줄이기 위해 저역 통과 필터(Low Pass Filter)를 사용하면 신호의 위상 지연 때문에 정확한 외란 추정이 어렵다.

속도 관측기의 궤환이득 F_1 과 외란 관측기의 고유치 g 의 관계는 외란 역압도의 성능과 전체 시스템의 안정도를 결정하

게 된다. 만약 속도 관측기의 게환이득 F_1 을 작게 선택하면, 추정된 속도가 입력으로 들어가는 추정외란 정보의 주파수 대역이 줄어들게 된다. 또한 속도 관측기의 게환이득 F_1 을 아주 작게 하면 외란 억압 성능은 아주 나빠지게 될 것이다. 반면에 게환이득 F_1 을 아주 높이면 센서 노이즈를 증가시키게 된다. 따라서 게환이득 F_1 과 외란 관측기의 고유치 g 는 센서 노이즈와 시스템의 안정도를 고려하여 원하는 외란 억압도가 얻어지도록 설정하여야 한다.

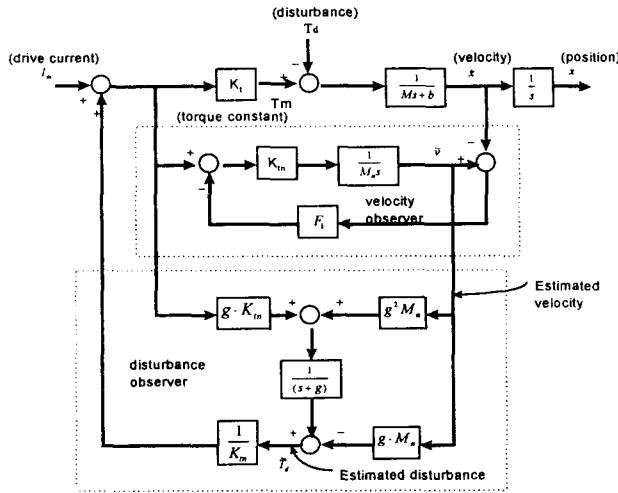


그림 2. 속도 관측기를 포함하는 외란 관측기의 보상

Fig.2. Compensation of disturbance observer with velocity observer

5. 실험장치 구성

최근 로봇 매니플레이터의 성능을 개선하기 위한 많은 개선된 형태의 제어기법이 나오고 있으나 이러한 방법들은 행렬연산, 부동 소수점 계산, 삼각함수 등의 과중한 계산량을 요구하므로 실시간으로 제어를 수행하는데 어려움이 따르고 있다.

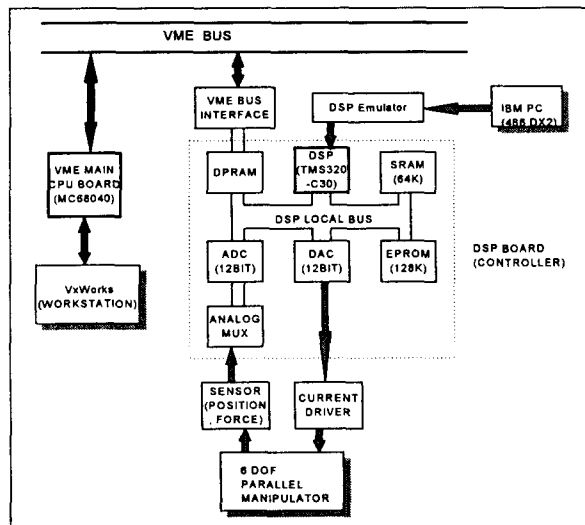


그림 3. 실험장치 구성

Fig. 3. Experimental setup

특히 본 연구의 6 자유도 병렬 매니플레이터의 기구학적인 계산의 복잡성은 실시간 제어를 위해 빠른 프로세서를 요구하

고 있다. 따라서 실험 장치의 구성은 다른 범용 프로세서보다 속도가 월등히 뛰어난 DSP를 채택하여 VxWorks를 OS (operating system)로 하는 VME 버스상에서 제어하는 실험 환경을 구축하고자 한다. 그림 3. 는 실험 장치 구성을 나타내며 A/D, D/A 와 DPRAM, 메모리 등을 포함하는 DSP 보드와 MC68040을 CPU로 사용하는 VME의 MAIN BOARD 및 병렬 매니플레이터의 위치, 힘에 대한 센서부와 전류 구동기 등으로 구성되어 있다.

6. 실험결과

외란 관측기의 설계와 시뮬레이션 결과를 바탕으로 6 자유도의 병렬 매니플레이터에 대해 실험을 수행하였다.

본 연구의 3 PRPS 타입의 병렬 매니플레이터에서 수직 링크는 Z축 방향의 병진운동 및 X,Y축에 대한 회전운동을 하는 역할을 하고, 수평링크는 X-Y 평면상의 병진운동 및 Z축에 대한 회전운동을 하도록 분리하여 동작시킬 수 있다. 그런데 본 연구의 병렬 매니플레이터의 구조상 수직 링크는 자기부상 (magnetically levitated)되어 있으므로 마찰토크가 거의 걸리지 않게 되며, 대부분의 마찰은 수평링크에 걸리게 된다. 따라서 정밀위치 제어에 있어서의 가장 문제가 되는 부분은 수평링크의 마찰을 얼마나 보상하느냐 하는 것이 중요하게 되므로 본 연구에서의 실험은 3 개의 수평링크를 가지고 직선운동과 원운동을 하면서 마찰동의 외란을 보상하므로써 정밀한 위치제어를 하고자 하였다. 그림 4. 는 단위링크에서의 속도추정에 대한 실험결과를 나타내고 있으며 속도 관측기에서의 추정속도가 실제속도에 비해 노이즈가 훨씬 적음을 볼 수 있다. 그림 5. 는 3 개의 수평링크의 외란 관측기에서의 추정외란을 나타내고 있다. 그림 6. 은 3 개의 수평링크의 위치 데이터를 정기구학에 의해 구한 직각좌표 공간에서의 원운동의 실험결과를 나타내고 있다. 여기서 PID 제어시에 비해 외란 및 속도관측기를 이용한 보상에서의 기준위치 추종성능이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 즉, 원운동시 rms 오차를 구해보면 약 $21 \mu\text{m}$ 로서 기존의 PID 제어기의 약 $65 \mu\text{m}$ 에 비해 70% 정도 개선되었음을 볼 수 있다.

그림 6. 의 말단장치 경로 데이터는 조인트 공간에서의 링크의 운동경로를 정기구학 방정식을 통해 직각좌표 공간에서의 말단장치의 운동경로로 변환한 것이므로, 외부 위치센서를 통해 말단장치의 실제 경로를 측정해 보고자 한다. 측정을 위한 실험장치의 구성은 그림 7. 과 같이 하였으며, 말단장치에 설치되어 있는 레이저(Laser)에서 나온 빛이 2D photodetector에 작은 점으로 입사되고 2D photodetector의 출력을 증폭하고 A/D 변환하여 위치를 측정하게 된다. 그림 8. 에 원 운동시의 말단장치의 실제경로를 측정 한 실험결과를 보여주고 있으며, PID 제어시보다 외란 및 속도추정 보상의 경우가 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 즉, 각 링크의 운동방향이 바뀌는 순간에 발생하는 큰 마찰력에도 불구하고, 외란 및 속도추정 보상의 경우 rms 위치오차가 $50 \mu\text{m}$ 정도 나오는 것을 알 수 있다.

외란 관측기에 의한 추정외란을 보상하는 경우, 로봇 파라미터의 변동까지도 보상해 주는 효과가 있음을 실험을 통해 확인하기 위해 말단장치의 무게를 변화시켜 가면서 실험하였다. 즉, 말단장치의 위에 물체를 올려놓고 이 물체의 무게를 40g, 80g, 120g 으로 바꾸는 것에 의해 말단장치의 무게를 변화시켰으며 원 운동을 하면서 실험하였다. 이때, PID 제어시와 외란추정에 의한 보상시의 단위링크의 위치오차를 측정하였으며 그 결과를 그림 9. 에 그래프로 나타내었다. 여기서 PID 제어만 하는 경우는 말단장치의 무게가 증가하는 것에 비례하여

위치오차가 커지게 되지만 외란추정에 의한 보상은 위치오차의 증가가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 본 연구의 병렬 매니플레이터 구조상 말단장치의 무게가 증가하면 수평링크의 마찰력도 비례하여 커지게 되어 있으므로, 이 실험결과는 외란추정에 의한 보상이 무게와 마찰력의 변동까지도 보상하는 것을 보여주고 있다.

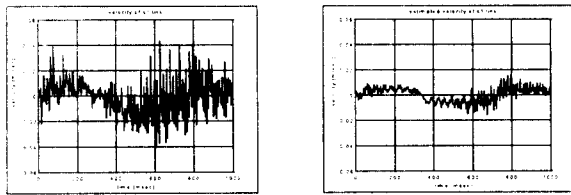


그림 4. 속도추정에 대한 실험결과

Fig. 4. Experimental results for velocity estimation

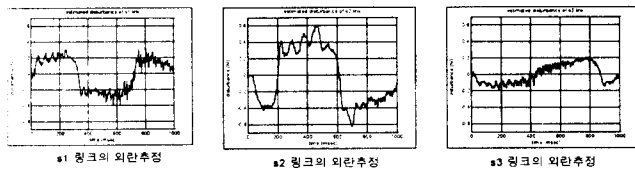


그림 5. 외란추정의 실험결과

Fig. 5. Experimental results for disturbance estimation

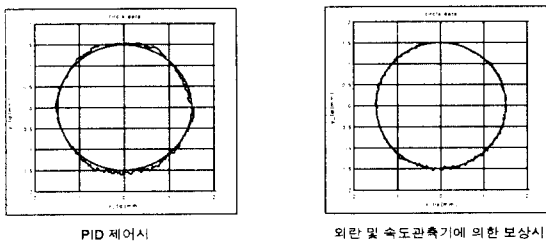


그림 6. 원운동시 위치제어 실험결과

Fig. 6. Position control results in a circular motion

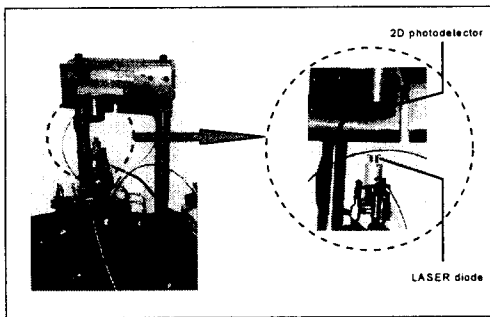
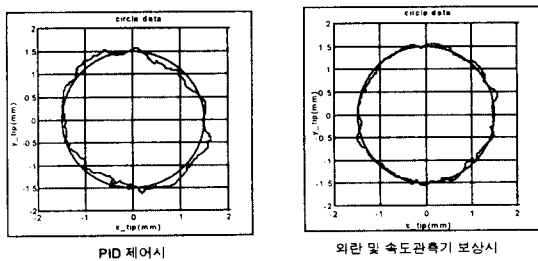


그림 7. 외부 위치센서에 의한 말단장치 경로측정 실험장치
Fig. 7. Experimental setup for position measurement of end effector using external sensor



PID 제어시

외란 및 속도관측기 보상시

그림 8. 외부 위치센서에 의한 말단장치 경로측정 실험결과
Fig. 8. position measurement of end effector using external sensor

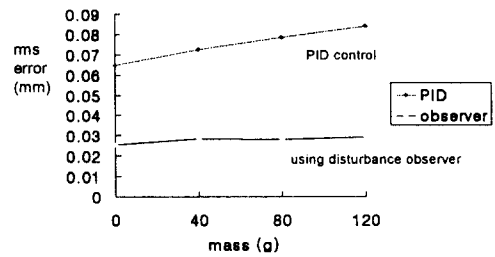


그림 9. 말단장치의 무게 변동에 따른 rms 오차 비교
Fig. 9. The comparison of rms errors as mass varies

7. 결론

본 논문에서는 3PRPS 병렬 매니플레이터의 수평링크에 존재하는 마찰보상 방법으로서 외란 및 속도추정을 이용한 정밀위치 제어의 적용을 제안하고, 외란 및 속도추정의 원리와 보상효과에 대한 관계식을 유도하였으며 고유치 g 값과 파드백 이득 $F1$ 의 선정방법을 분석하였다. 또한 모델링 오차가 있는 경우, 외란보상이 페루프 시스템에 위상지연이나 앞샘을 주는것에 의해 시스템이 불안정해질 수 있음을 파악하였고, 외란추정에 의한 보상은 로봇 파라미터의 변동에 의한 보상도 해주는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다. 실험결과 마찰을 포함한 외란성분을 억제하여 기준위치를 잘 추종하게 하므로서 원운동시 rms 오차를 기존의 PID 제어기에 비해 약 70% 개선하는 결과를 얻었다.

8. 참고문헌

- [1] D.Stewart, "A Platform with Six Degree of Freedom", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol.180, PP.1, No.15, pp.371-386, 1965/1966.
- [2] Fariborzo Behi, "Kinematic Analysis for a 6-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism", *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol.4.4, No.5, pp.561-565, 1988.
- [3] J.H.Shim, J.Y.Park, D.S.Kwon, H.S.Cho, and S.Kim, "Kinematic Design of a Six Degree-of-Freedom In-Parallel Manipulator for Probing Task", *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, April21-27, New Mexico, 1997.
- [4] L.Cai and G.Song, "A Smooth Robust Nonlinear Controller for Robot Manipulators with Joint Stick-Slip Friction", *IEEE Int. Conf.R&A*, pp.449-454, 1993.
- [5] M.R.Popovic, D.M.Gorinevsky and A.A.Goldenberg, "Accurate Positioning of Devices with Nonlinear Friction Using Fuzzy Logic Pulse Controller", *Int. Symposium of Experimental Robotics, ISER*, preprints, pp.206-211, 1995.
- [6] G.Morel and S.Dubowsky, "Precise Control of Manipulators with Joint Friction: A Base Force/Torque Sensor Method", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat.* pp.360-365, 1996.
- [7] Canudas, C., Astrom, K.J., and Braun, K. "Adaptive Friction Compensation in DC-Motor Drives", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No6, pp.681-685, 1987.
- [8] M.Nagasawa, E.Yokoyama and Y.Ishida, "Precision Motor Control System for VCR Using Disturbance and Velocity Observer", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.38, No.4, pp.747-754, 1992.