

# 3자유도 로봇의 하이브리드 위치/힘 제어

## Hybrid Position/Force Control of 3 DOF Robot

양선호(LG 산전), 박태욱(연세대 대학원), 양현석(연세대 기계공학과)

### ABSTRACT

For a robot to perform more versatile tasks, it is inevitable for the robot's end-effector to come into contact with its environment. In this case, to achieve better performance, it is necessary to properly control the contact force between the robot and the environment.

In this work, hybrid control theory is studied and is verified through experiment using a 3 DOF robot. In the experiment, two position/force controllers are used. First, proportional-integral-derivative controller is used as the controller for both position and force. Second, computed-torque method is used as the position controller, and proportional-integral-derivative controller is used as the force controller. For a proper modeling used in computed-torque method, the friction torque is measured by experiment, and compensation method is studied.

The hybrid control method used in this experiment effectively controls the contact force between the end-effector and the environment for various types of jobs.

**Key words** : Hybrid control, Force control, Position control, 3 DOF robot, Friction torque

### 1. 서론

근래에 들어 산업 현장에서 생산성 향상을 위하여 로봇의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 로봇이 수행해야 할 작업의 내용도 다양해지고 있다. 로봇이 작업을 수행할 때 환경과 접촉하는 경우 환경과 서로 반력을 주고받게 되므로 이 힘을 고려하지 않고 로봇을 제어했을 시는 예상하지 못한 힘의 영향이 나타날 수 있다. 이때 이 힘의 영향은 작업의 내용에 따라 무시되거나 적당한 방법으로 보상될 수도 있으나 그 반력이 중요시되는 작업의 경우(예를 들어 연삭작업) 보다 능동적인 대응 방안이 필요하게 된다. 이에 따라 위치제어와 함께 힘을 동시에 제어하는 방법이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 1980년 초부터 연구되어 온 하이브리드 위치/힘 제어<sup>[1]-[4]</sup>에 대한 이론을 알아보고 실제 하이브리드 제어를 사용한 실험을 수행하여 그 타당성을 알아보았다. 2장에서는 하이브리드 위치/힘 제어에 대한 이론을 다루고, 3장에서는 이 이론에 근거해서 3자유도 로봇(APROYS-1)에 적용한 실험결과를 보여준다.

### 2. 하이브리드 위치/힘 제어

로봇의 종단작동기가 환경과 접촉하여 서로 힘을 미치면서 움직이는 경우의 제어를 구속 운동 제어라고 부른다. 이 경우 로봇의 제어는 위치와 더불어 힘을 고려해야 하기 때문에 위치제어와는 다른 방법을 요구하게 된다. 이러한 위치와 힘을 동시에 제어하는 방법으로서 대표적인 제어방법으로 하이브리드

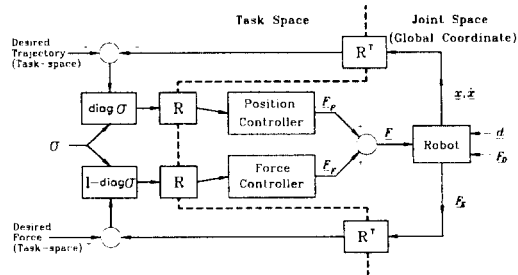


그림 1. 하이브리드 위치/힘 제어기의 구조

위치/힘 제어방법이 있다. 하이브리드 위치/힘 제어는 작업좌표계 상에서 힘을 제어하는 좌표와 위치를

제어하는 좌표를 분리하여 제어를 수행하는 것이 기본 개념이다. 이 하이브리드 위치/힘 제어의 기본 개념도는 그림1에 나타나 있다.

여기서 R은 회전행렬,  $diag(\sigma)$ 는 작업좌표계에서 힘과 위치를 분리하는 선택행렬으로 i번째 축이 위치제어가 되면 이 행렬의 (i,i)항이 1이고 힘제어 되면 0이 된다. 이 논문에서 사용된 선택행렬은  $diag(1 \ 1 \ 0)$ 이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

그림 2에서 실험에 사용한 APROYS(Advanced Pilot Robot of YonSei University)-1이 나타나 있다. APROYS-1은 평행구동방식의 3자유도 로봇으로 Denavit-Hartenberg 표시법에 의해 아래 그림과 같이 관절좌표계가 정의된다.

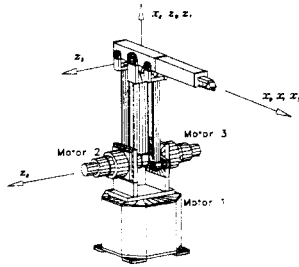


그림 2. APROYS 1

실험 장치의 개략도는 그림 3과 같다.

#### 3.2 힘센서

APROYS-1이 환경에 가하는 힘을 측정하기 위해 힘센서를 제작하였다. 힘센서의 구조는 그림 4에 나타나 있다.

스트레인 게이지는 half bridge로 회로를 구성하였으며 스트레인 게이지 앰프는 KYOWA사의 DPM-305B를 사용하였다. 힘센서는 환경이 세 번째 링크에 45°로 접촉할 때를 기준으로 설계했고 마찰이 적은 지름 9mm 베어링 볼을 지름 12mm 렌치볼트에 고정시켜 제작하였다.

힘센서는 세 번째 링크에 평행하게 부착되므로 본 연구에서처럼 수평면을 환경으로 사용했을 때 힘센서에서 측정된 힘과 환경에 작용하는 수직력은 다음과 같은 관계를 가진다.

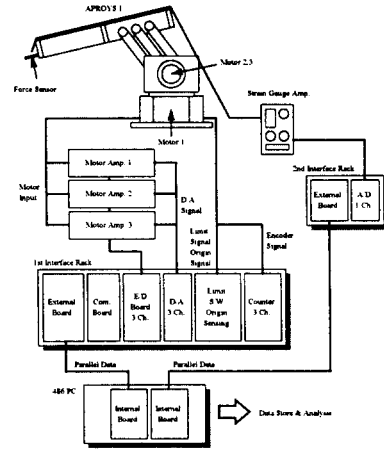


그림 3. 실험장치의 개략도

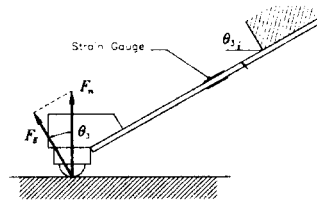


그림 4. 힘센서의 원리

$$F_n = \frac{F_E}{\cos \theta_3} \quad (3.1)$$

힘센서의 보정은 실험을 통하여 수행하였으며 그 결과는 그림 5와 같다.

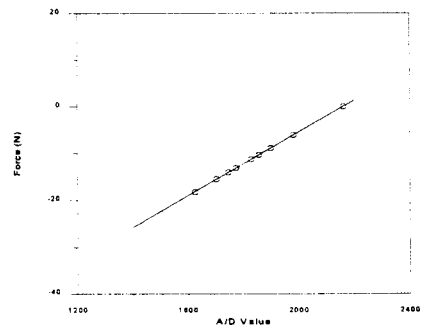


그림 5. 힘센서의 보정

### 3.3 소프트웨어 필터

APROYS-1은 엔코더만을 사용하므로 제어기에 사용될 관절의 속도는 엔코더를 수치미분하여 구해야 한다. 다음 식은 일반적으로 사용하는 엔코더로부터 속도를 구하는 식이다.

$$\dot{\theta}_k = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T} \quad (3.2)$$

여기서  $T$ 는 샘플링시간(sampling time), 하첨자  $k$ 는 이산계에서 정의되는 순서이다.

이 식에 의해서 각속도를 비교적 정확히 얻어내기 위해서는 엔코더의 분해능이 크고, 샘플링시간도 적절해야 한다. 하지만 엔코더의 분해능에는 한계가 있고, 샘플링시간의 크기에도 제한이 있기 때문에 이 식에 의해 구한 각속도 값은 이산적인 값이 된다. 그리고 이러한 방법에 의한 각속도의 측정을 제어기에 적용하면 엔코더값의 미세한 변화가 매우 작은 샘플링시간  $T$ 로 증폭되고 다시 속도오차계인으로 증폭이 되기 때문에 로봇의 제어입력에 많은 채터링을 유발시킬 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서 행한 실험은 각속도를 엔코더로부터 얻어내기 위해 다음과 같은 저주파통과필터의 전달함수를 사용하였다.

$$y(s) = \frac{\omega s}{s + \omega} \theta(s) \quad (3.3)$$

여기서  $\omega$ 는 컷-오프(cut-off) 주파수이다.

본 연구에서는 힘센서에서 측정되는 신호에도 소프트웨어적인 저주파통과필터를 사용하였다. 힘센서는 일반적으로 매우 작은 전압의 변화를 증폭하여 사용하므로 잡음이 측정신호에 포함될 가능성이 매우 높다. 따라서 본 실험에서는 엔코더에 사용한 것과 같은 저주파통과필터를 힘센서의 신호를 분석하는데도 사용했다.

본 실험에서 사용한 저주파통과필터의 컷-오프 주파수는 엔코더 미분값의 경우 5 Hz, 힘센서 신호의 경우 50 Hz를 사용하였다.

저주파통과필터를 사용할 경우에는 항상 시간지연을 고려해야 한다. 본 실험에서 사용한 컷-오프 주파수는 이를 고려하여 실험적으로 설정한 값으로 위치값은 상대적으로 느리게 변하고 힘의 크기는 상대적으로 빠르게 변할 수 있으므로 이 설정은 타당하다고 판단된다.

### 3.4 실험 결과

하이브리드 제어를 이용한 힘제어로서 위치제어기와 힘제어기로 각각 PID제어기를 사용한 경우와 위치제어기로 계산형 토크 제어기를 사용하고 힘제어기로 PID제어기를 사용한 경우를 실험하였다.

힘을 가할 환경은 수평인 평면을 사용하였고 위치는 이 평면 위에서 2차원적으로 결정하였다. 위치의 경우 고정점, 직선, 원의 세 가지 경로를 추종하도록 제어하였고 힘의 경우 일정한 힘과 삼각함수에 의해 시간에 따라 변하는 힘 두 가지 경로를 추종하도록 하였다. 그림 6은 두 가지 하이브리드 제어기에 대해서 먼저 위치와 힘제어기로 PID를 사용한 경우, 그리고 위치제어기로 계산형 토크 제어기를 사용한 경우 순으로 수록했다. PID-PID에 대해 좌상의 그

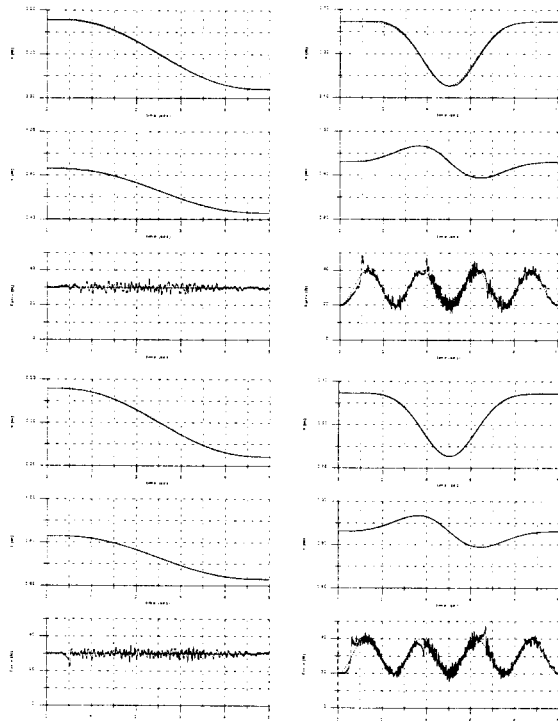


그림 6. 하이브리드 위치/힘 제어의 결과  
(좌상,우상:PID-PID, 좌하,우하:계산형토크-PID)

래프는 직선 경로와 일정한 힘, 우상의 그래프는 원 경로와 삼각함수형 힘에 대한 반응이며, 계산형 토크-PID에 대해서 좌하의 그래프는 직선 경로와 일정한 힘, 좌하는 원 경로와 삼각함수형 힘에 대한 반응이다. 그래프에서 점선은 주어진 궤적이며 실선

이 실험값이다. 다음은 실험에 관련된 수치이다.

(1) 제어에 사용된 이득

- 위치와 힘제어기로 PID를 사용한 경우

제어 대상	위치 이득	속도 이득	적분 이득
위치 : X	12000	7	5000
위치 : Y	12000	9	5000
힘 : Z	0.70	0.009	25

- 위치제어기로 계산형 토크 제어기를 사용한 경우

제어 대상	위치 이득	속도 이득	적분 이득
위치 : X	4500	5	-
위치 : Y	5500	9	-
힘 : Z	1.2	0.009	25

샘플링시간은 0.002초 ( 500 Hz )로 실험 하였다.

3.6. 모터의 마찰토크

로봇의 운동에서 존재하는 사구간은 모터 자체의 마찰토크에서 기인한 것으로 보인다. 앞의 실험 결과에서 알 수 있듯이 이러한 사구간의 영향은 로봇의 동역학을 고려하지 않은 PID제어기보다는 로봇의 동역학을 고려한 계산형 토크 제어기에서 더 영향이 크게 나타난다. 다음 그래프는 일정한 위치에서 힘제어를 수행한 결과로서 제어 이득은 일정하게 하고 힘의 크기를 각각 40N에서 75N까지 변화시킨 결과이다.

그림 7.에서 55N~65N 사이의 힘을 제어할 때는 매우 심한 떨림 현상이 나타남을 알 수 있다. 이는 모터가 출력하는 토크가 0에 가깝기 때문에 사구간 안에서 제어력이 바뀌기 때문이다. 실제로 로봇의 Jacobian 행렬과 중력의 영향을 고려하여 모터의 출

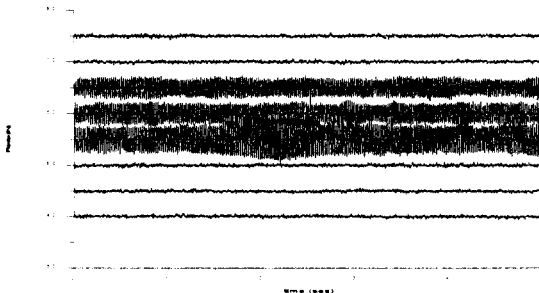


그림 7. 모터 마찰 토크 : 일정한 위치에서 힘제어

력이 0일 때 로봇 중단작동기가 평판에 가하는 힘을 계산하면 57N이 된다.

사구간의 원인으로는 모터와 감속기가 가지고 있는 점성마찰과 건조마찰이 유력하다. 특히 본 실험에 사용한 APROYS-1의 경우 비교적 큰 감속기를 사용하므로 모터 마찰의 효과가 더욱 크게 나타날 수 있다.

각각 모터의 마찰효과를 실험적으로 측정하기 위하여 전술한 중단속도를 측정하였다. 그리고 측정된 속도와 이때 모터에 가해진 토크와의 관계에서 마찰 행렬  $B$ 와  $D$ 를 구할 수 있었다. 이렇게 구한 결과는 다음과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} 24.9758 & 0 & 0 \\ 0 & 4.77476 & 0 \\ 0 & 0 & 8.4988 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$D = \begin{bmatrix} 19.2393 & 0 & 0 \\ 0 & 16.5762 & 0 \\ 0 & 0 & 15.4355 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

이상을 실험한 그래프는 다음 장의 그림 8과 같다. 이 실험은 각 링크를 분해한 상태에서 모터만 구동시켜서 실험한 것으로 일정한 토크를 일정 시간 동안 가한 뒤 일정해진 속도를 측정하는 것이다. 원이 실험값, 점선은 최소화승법을 사용하여 구한 계산 결과이다.

식 (3.4)와 식 (3.5)의 계산 결과가 타당한지를 알아보기 위하여 실험과 모의실험을 수행하였다. 비교

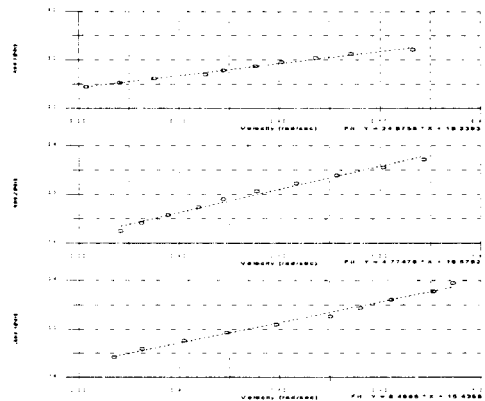


그림 8. 모터 마찰 토크 : 중단 속도의 측정

방법은 세 관절을 동시에  $-10^\circ$  에서  $10^\circ$  까지의 5차함수 궤적을 2초동안 추종하도록 계산형 토크 제어기를 설계하고 적절한 제어 이득을 사용하여 실험한 결과와, 식 (3.4)와 식 (3.5)을 모델의 운동방정식에 포함하여 같은 궤적을 추종하도록 모의실험한 결과를 비교하였다. 그 결과는 그림 9와 같다. 그림 9의 좌측 그래프에서 점선은 모의실험 결과, 실선은 실험 결과로 여기서는 궤적에 대한 오차를 표시하였다.

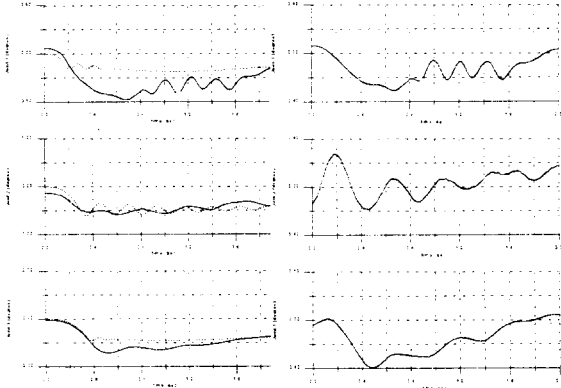


그림 9. 좌 : 실험과 모의실험의 비교(궤적 오차)  
우 : 마찰 보상을 했을 때의 실험 결과

구해진  $B, D$  행렬을 운동방정식에 적용하여 계산형 토크 제어기를 설계하고 실험을 수행하였다. 이때 궤적은 앞의 비교실험과 같은 5차함수 궤적을 사용하였고 같은 제어 이득을 사용하였다. 이 실험 결과는 그림 9와 같다.

이상에서 사용한 제어 이득은 다음과 같다.

제어 대상	위치 이득	속도 이득
관절 1	2200	0
관절 2	700	0
관절 3	2500	0

#### 4. 결론

3자유도 로봇 APROYS 1에 2종류의 하이브리드 제어기를 설계하고 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하이브리드 제어이론을 사용하여 분리된 위치제어기와 힘제어기는 각각 잘 동작했으며 만족할 만한 제어성능을 보여줬다. 그러나 속도가 빠를 경우 힘제어 시 떨리는 현상이 나타나는 등 위치제어기와 힘제어기가 완전히 분리되지 않음을 알 수 있었다. 이는 모델링 되지 않은 동역학적인 요소, 즉 센서부의 변형 등의 원인에서 기인한다.
2. 힘측정결과는 전반적으로 심한 잡음을 포함하고 있다. 이는 센서 자체의 잡음과 외부와 종단작동기 사이의 마찰에서 기인한다. 이들에 대한 고려가 더 많이 필요함을 알 수 있다.
3. 감속기가 큰 모터를 사용하는 경우 사구간의 영향이 매우 크게 나타났다. 사구간의 원인으로서는 모터와 감속기의 마찰토크를 고려했고 실험적으로 마찰계수를 측정하여 이를 보상한 제어기를 설계하고 실험하여 성능이 향상됨을 보였다.

#### 후기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME95-A-31)에 의하여 연구되었으며 본 연구에 도움을 주신 분께 깊은 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

- [ 1 ] Fisher, W. D. and Mujtaba, M. S., 1992, "Sufficient stability condition for hybrid position /force control", Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1336-1341.
- [ 2 ] Raibert, M. H. and Craig, J. J., 1981, "Hybrid position/force control of manipulators", J. Dyn. Syst. Meas., and Contl., pp. 126-133.
- [ 3 ] Yoshikawa, T., Sugie, T., and Tanaka, M., 1988, "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators - controller design and experiment", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 699-705
- [ 4 ] Arimoto, S., Naniwa, T., and Liu, Y. H., 1995, "Model-based adaptive hybrid control for manipulators with geometric endpoint constraint", Advanced Robotics, pp. 67-80