

위치 제어를 갖는 로봇 매니퓰레이터의 Hybrid 위치/힘 제어

이 병부* 정 광손 박 종국
 경희대학교 공과대학 전자공학과

A Hybrid Position/Force Control for Robot Manipulator with Position Controllers

Lee, Byung Boo* Jeong, Kwang son Park, Chong Kug
 Department of Electronic Engineering
 Kyung Hee University

ABSTRACT

In this paper, a hybrid position/force control scheme is proposed. The control scheme modifies the position command for force control against constraint surface of environment and is very simply designed and implemented. The merits of the control scheme are that it can cope with change of constraint conditions and small position inaccuracy of the environment. A constraint surface position observer is also proposed to reduce disturbances on controlled force.

한다. 이 제어기법의 제한된 방향으로의 힘제어는 위치 제어기의 위치 입력을 변형함으로 실현되며 환경의 동적 특성을 고려할수 있다. 이 구조는 임피던스 제어기 구조와 매우 유사하다. 제안된 제어기의 힘제한 보상기 설계에 있어 어느 정도의 임피던스를 잘 유지할수 있다. 제안된 hybrid 제어기를 사용하면 환경의 작은 위치 오차와 제한 조건들의 변화에 대처할수 있다. 제안된 표면 위치의 변화에 따른 제어된 힘의 외란을 줄이기 위해 표면 위치 관측기를 제안하였다. 제안된 hybrid 제어기법을 모의 실험해 보았다.

1. 서론

조립 작업과 연삭과 같은 로봇트 작업에서 물체와 환경에 대한 부정확한 정보에 대해서 로봇트 매니퓰레이터는 물체와 환경의 작은 위치의 불확실성을 자동적으로 해결하고 물체와 환경의 힘/모멘트 상호 작용하에 매니퓰레이터 말단효과장치의 위치와 힘을 정확하게 제어해야 한다. 이런 특성을 실현하기 위해 hybrid 위치/힘 제어와 임피던스 제어가 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. hybrid 위치/힘 제어는 입력되어지는 힘과 궤적이 제한 표면에 의해 명확하게 구분되나 제한조건과 방향의 변화시 제어 모드 스위칭이 어렵다. [1], [2] 임피던스 제어는 환경 접촉시 접촉정도를 유지할수 있고 제어모드 스위칭이 필요없으나 접촉력을 직접 입력시킬수 없다. [3], [4], [5] 이러한 단점에 대처하기 위해 위치 제어를 갖는 매니퓰레이터의 새로운 hybrid 위치/힘 제어기법을 제안

2. 위치 제어를 갖는 로봇트 매니퓰레이터

n자유도 로봇트 매니퓰레이터의 동역학 모델은 다음과 같이 쓸수있다.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) - J^T(\theta)f \quad (1)$$

여기서 τ 는 $n \times 1$ 관절 토크/힘 벡터이고 θ 는 $n \times 1$ 관절 벡터이며 $-f$ 는 매니퓰레이터의 끝점에 작용하는 $n \times 1$ 외부 힘/모멘트 벡터이다. 작업 공간에서 끝점 위치벡터 X 는 다음과 같이 표시된다.

$$X = P(\theta) \quad (2)$$

$J(\theta)$ 는 식(3)과 같이 정의된 $P(\theta)$ 의 자코비안행렬이다.

$$J(\theta) = \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\dot{X} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (4)$$

$J(\theta)$ 는 작업 공간에서 비특이성으로 가정하고 f 는 끝점이 환경과 접촉했을때에 생긴다.

매니플레이터의 동역학 모델이 완전히 알려져 있고 θ 와 $\dot{\theta}$ 가 측정할수 있으며 f 가 힘/토크 센서에 의해 또한 측정할수 있다 가정할때 위치제어기는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\tau = M(\theta)J^{-1}(\theta)(U - \dot{J}(\theta)\dot{\theta}) + h(\theta, \dot{\theta}) - J^T(\theta)f \quad (5)$$

$$U = \ddot{X}_c + K_v(\dot{X}_c - \dot{X}) + K_p(X_c - X) \quad (6)$$

여기서 $X_c(t)$ 는 궤적 입력이며 K_p, K_v 는 $n \times n$ 위치와 속도 오차 게환 행렬이다. 식(5)에서 τ 는 식(1)에서 모든 비선형과 서로 영향을 끼치는 항 및 외부 힘/모멘트가 상쇄되며 그 결과는 다음과 같다.

$$\ddot{X} = U \quad (7)$$

식(6)은 식(7)의 게환 제어 법칙으로 간주될수 있고 $e = X_c - X$ 와 같은 위치 오차 벡터 e 를 정의하면 다음과 같은 오차 방정식을 얻는다.

$$\ddot{e} + K_v\dot{e} + K_p e = 0 \quad (8)$$

만일 게환 행렬 K_p 와 K_v 를 적절하게 선택하면 X 는 X_c 에 수렴하게된다. 그림 1은 전체 시스템의 블럭선도이다. 식(8)에서 $e=0$ 가 되면 $X=X_c$ 가 되어 X_c 부터 X 까지 전달함수는 단위 행렬로 감소된다.

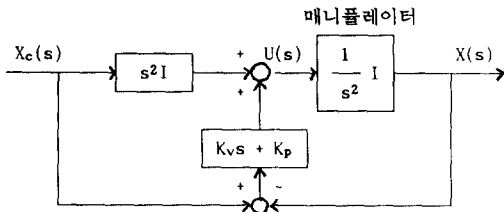


그림 1. 위치제어기를 갖는 매니플레이터의 블럭선도

3. 환경의 동역학 특성

매니플레이터의 끝점이 환경과 접촉했을때 환경은 매니플레이터의 운동을 제한하고 매니플레이터와 상호작용력을 갖고 움직인다. 단순하게 1개의 표면인 환경을 생각한다. 또한 표면은 탄성적이다. 그림 2에서와 같이 매니플레이터의 끝점이 위치 X_s 인 표면과 접촉했다고 가정하고, n 은 표면에 수직인 단위 벡터이다. 만일 힘 f 가 매니플레이터에 의해 표면위에 가해지면 표면은 위치 X_s

에서 n 방향으로 변형된다.

$$e_n = X_n - X_{sn} \quad (9)$$

여기서 X_n 과 X_{sn} 은 각각 X 와 X_s 의 n 성분이다. X_s 는 변형이 없는 접촉 위치이다. f_n 을 f 의 n 성분이라 하고 표면의 동역학 특성을 실제적으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_n = m_s \ddot{e}_n + d_s \dot{e}_n + k_s e_n \quad (10)$$

m_s 는 질량이고 d_s 는 감쇠 상수이며 k_s 는 스프링 상수이다. 이것은 다음과 같이 전달함수 형태로 쓸수 있다.

$$f_n(s) = G_s(s) e_n(s) \quad (11)$$

여기서

$$G_s(s) = m_s s^2 + d_s s + k_s \quad (12)$$

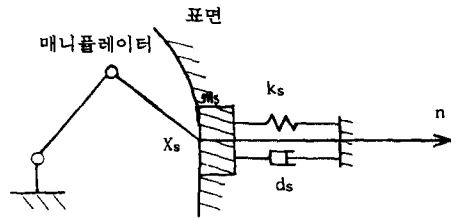


그림 2. 환경의 동역학

4. Hybrid 위치/힘 제어 기법

위치 제어기 식(5), 식(6)은 식 (5)에서 $-J(\theta)^T f$ 에 의해 외부힘 $-f$ 의 효과를 보상하기때문에 매니플레이터를 매우 강건하게 만든다. 만일 궤적 입력 X_c 가 강건한 환경 내부로 설정되어 있으면 매니플레이터는 환경에 대해 큰 힘을 발생한다. 이런 단점을 피하고 접촉력을 제어하기 위해 제한된 표면의 수직 방향에 대한 궤적 입력을 변형하는 hybrid 위치/힘 제어기법을 제안한다.

$X_d(t)$ 가 원하는 궤적이고 $f_{dn}(t)$ 가 n 방향으로의 원하는 힘이라고 가정할때 다음과 같이 궤적을 수정한다.

$$X_c(s) = X_d(s) + \left[\frac{1}{s} C_f(s)(f_{dn}(s) - f_n(s)) \right] n \quad (13)$$

여기서 $C_f(s)$ 는 적절한 동역학 보상기이며 설계 방법은 다음 절에서 논의된다. 그림 3은 이 제어 설계를 갖는 전체 시스템의 블럭 선도이다.

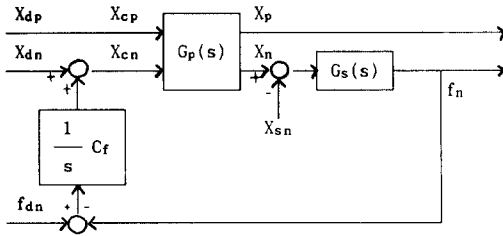


그림 3. hybrid 위치/힘 제어시스템의 블록 다이어그램

x_{dn} 과 x_{cn} 은 x_d 와 x_c 의 n 성분이며 x_{dp} 와 x_{cp} , x_p 는 작업 공간에서 x_d , x_c , x 의 벡터 n 의 직교 성분으로의 부사성분이다. x_c 부터 x 까지 전달 함수 형태 $G_p(s)$ 는 위치제어를 갖는 매니플레이터의 동역학을 표현한다. 위치 제어를 갖는 매니플레이터를 제어기법 식(13)에 적용하면

$$x_p(s) = x_{dp}(s) \quad (14)$$

$$f_n(s) = \frac{C_f(s)G_s(s)}{s + C_f(s)G_s(s)} f_{dn}(s) + \frac{sG_s(s)}{s + C_f(s)G_s(s)} (x_{dn}(s) - x_{sn}(s)) \quad (15)$$

이 경우에 매니플레이터의 끝점이 환경과 접촉을 유지하고 n 방향으로 제한되어 있다. f_{dn} , x_{dn} , x_{sn} 이 상수이고 특성 방정식 $s + C_f(s)G_s(s) = 0$ 가 안정되도록 $C_f(s)$ 를 선택하면 f_n 은 f_{dn} 에 수렴한다. 그러므로 제어기법 (13)은 hybrid 위치/힘 제어기로서 작용한다. $C_f(s)$ 에서 적분기 사용은 f_n 이 f_{dn} 으로 수렴하기 위해 필요하다. 제어기법을 수행하기 위해 식 (13)에서 주어진 x_c 의 1차, 2차 미분을 식(6)에서 계산해야 한다. $C_f(s)$ 는 그런 계산에서 측정된 힘 데이터 f_n 의 시간 미분의 사용을 피하기 위해 아주 정확하게 선택되어야 한다. $C_f(s)$ 가 다음과 같이 f_{dn} 부터 f_n 까지 원하는 전달 함수 $G_d(s)$ 를 실현한다고 가정하면

$$G_d(s) = \frac{C_f(s)G_s(s)}{s + C_f(s)G_s(s)} \quad (16)$$

$$C_f(s) = \frac{sG_d(s)}{(1 - G_d(s))G_s(s)} \quad (17)$$

식(18)로부터 $G_d(s)$ 가 적절하면 $C_f(s)$ 가 적절하게 된다. 단위 이득 상수를 갖는 $G_d(s)$ 를 적절하고 안정되게 선택해 제어기를 설계할 수 있다. 이것은 식(18)에 따라 $C_f(s)$ 를 계산하고 f_{dn} 에 대해 f_n 의 바른 응답을 준다.

$G_s(s)$ 의 정확한 값을 구하기 어렵기 때문에 $C_f(s)$ 를 얻기 위해 $G_s(s)$ 의 추정 $\hat{G}_s(s)$ 를 사용한다. $G_s(s)$ 의 m_s 와 d_s 가 매우 작기 때문에 $s^2 G_d(s)$ 가 적합한 $G_d(s)$ 를 택하는 것이 바람직하다. 만일 $C_f(s)$ 의 이득이 크게 택해지면 강건한 환경과 $G_s(s)$ 의 부정확성에 대처할 수 있으며 큰 관절 토크가 이경우에 요구된다.

제어기 설계의 한방법으로 2차 임계감쇄 시스템과 같은 $G_d(s)$ 를 선택하는 것이다.

$$G_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

$$C_f(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + 2\zeta_s \omega_n)G_s(s)} \quad (19)$$

환경의 동역학 특성 (12)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G_s(s) = K_s \frac{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2}{\omega_s^2} \quad (20)$$

여기서 ω_s 와 ζ_s 는 실제 고유주파수와 제한표면의 감쇄 상수이다. ω_s 와 ζ_s 가 추정하기 어렵기 때문에 스프링 상수만을 추정하고 식 (20)에 대한 $G_s(s)$ 의 추정으로 간주한다. 이것은 다음과 같이 기술된다.

$$\hat{G}_s(s) = K_s = \alpha^2 K_s \quad (21)$$

여기서 α 는 추정 오차를 의미한다. $C_f(s)$ 는 식(20)과 식(22)로부터 얻어지며 전달 함수 $\hat{G}_d(s)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{G}_d(s) = \frac{\frac{\omega_n^2}{\alpha^2 \omega_s^2} (s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2)}{(1 + \frac{\omega_n^2}{\alpha^2 \omega_s^2})s^2 + 2\omega_n(1 + \frac{\omega_n}{\alpha^2 \omega_s} \zeta_s)s + \frac{\omega_n^2}{\alpha^2}} \quad (22)$$

보통 ω_s 는 ω_n 보다 훨씬 크며 ζ_s 는 매우 작다. 이런 조건하에서 다양한 추정오차 α 에 대해 $\hat{G}_d(s)$ 의 스텝응답을 모의 실험했다.

5. 표면 위치 관측기를 갖는 hybrid 위치/힘 제어기

hybrid 위치/힘 제어에서 식(15)는 제어된 접촉력 f_n 이 x_{sn} 의 변화에 의해 영향을 받는 것을 보여 준다. 매니플레이터의 말단효과장치가 표면의 궤적을 따라 움직이는 동안 x_{sn} 은 표면의 위치가 아주 정확하게 알려져 있지 않기 때문에 변화한다. 만일 x_{sn} 의 변화가 빠르게 추정되

어 질수 있다면 변화를 보상시키기위해 수정한 X_{cn} 에 의해 외란을 감소시킬수 있다. 이와같은 목적을 위해 X_{sn} 의 추정 \hat{X}_{sn} 을 얻는 관측기를 제안하며 그림 4에 나타나져 있다.

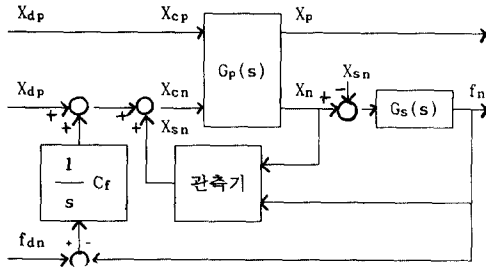


그림 4. 표면위치 관측기를 갖는 hybrid 제어기

여기서, 추정하는 동안 X_{sn} 의 변화가 매우 느리다고 가정하면

$$\dot{X}_{sn} = 0 \quad (23)$$

그때 표면의 동역학은

$$f_n = m_s \ddot{X}_n + d_s \dot{X}_n + K_s (X_n - X_{sn}) \quad (24)$$

이 방정식으로부터 다음의 상태 방정식이 유도된다.

$$\dot{w} = A_s w + B_s f_n \quad (25)$$

$$y = C_s w \quad (26)$$

여기서 w, y, A_s, B_s, C_s 는 다음과 같다.

$$w = \begin{bmatrix} X_n \\ \dot{X}_n \\ X_{sn} \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} X_n \\ \dot{X}_n \end{bmatrix}$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -K_s/m_s & -d_s/m_s & K_s/m_s \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ m_s^{-1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

위 시스템에서 X_n, \dot{X}_n, f_n 이 측정되어지면 X_{sn} 을 추정하기 위한 추종 관측기를 제안한다.

$$\dot{\hat{X}}_{sn} = \eta + g \dot{X}_n \quad (27)$$

$$\dot{\eta} = \hat{a}_s \eta + \hat{b}_s y + \hat{j}_s f_n \quad (28)$$

여기서 $\hat{a}_s, \hat{b}_s, \hat{j}_s$ 는 다음과 같다.

$$\hat{a}_s = -g \hat{K}_s / \hat{m}_s, \quad \hat{j}_s = -g \hat{m}_s^{-1}$$

$$\hat{b}_s = [g \hat{K}_s / \hat{m}_s \quad \hat{d}_s / \hat{m}_s - g^2 \hat{K}_s / \hat{m}_s]$$

g 는 수렴율과 관계가 있는 설계 매개 변수이며 $\hat{m}_s, \hat{d}_s, \hat{K}_s$ 는 m_s, d_s, K_s 의 추정된 값이다. 이 관측기의 출력 \hat{X}_{sn} 는 X_{sn} 의 추정이며 X_{sn} 의 변화에 대한 영향을 감소시키는데

사용된다.

6. 결론

실제 작업에서 제한표면의 접촉조건의 변화와 부정확한 위치에 대처하는 새로운 hybrid 위치/힘 제어기를 다루었다. 힘 응답을 향상시키기 위해 표면 위치 관측기를 도입하여 모의 실험을 통해 hybrid 제어기법의 타당성을 보였다. 더욱 정교한 작업에 대한 계획과 힘 궤환 보상기 설계에 대하여 더 많은 연구가 수행되어야 할것이다.

참고문헌

- [1] M.H Raibert and J.J.Craig: "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators," Trans.ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.102, pp.126-133(1981)
- [2] T.Yoshikawa: "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators-Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.3, No.6, pp.531-537(1985)
- [3] N.Hogan: "Impedance Control :An Approach to Manipulation, Part 1-3," Trans. ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.107, pp.1-24 (1985)
- [4] K.Kosuge, K.furuta and T.Yokoyama: "Virtual Internal Model Following Control System-Application to Mechanical Impedance Control," SICE Trans. Vol. 24, No.1, pp.55-62(1988)
- [5] H.Kazerooni: "On the Robot Compliant Motion Control," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.111, pp.416-425(1989)