

임피던스 방식에 의한 로봇 매니플레이터의 슬라이딩모드 제어

최 형 식*

Sliding Mode Control of a Robot Manipulator by the Impedance Approach

H. S. Choi

Key words : Target impedance(표적 임피던스), Sliding mode control(슬라이딩 모드 제어), Robust impedance controller(견실 임피던스제어기), Lyapunov function(리아푸노프 함수), Uncertainties(불확실성)

Abstract

This paper presents a robust impedance controller design to coordinate a robot manipulator under system uncertainties while regulating external forces. By an impedance approach, the relationship between the motion and external forces is defined. Due to the system uncertainties, two kind of sliding mode control schemes based on the impedance approach are derived to ensure that the manipulator end - effector follows a desired trajectory and the force applied to end effector is regulated according to a target impedance. A stability condition is shown according to a sliding condition. To evaluate the devised control scheme, a numerical example is shown.

1. 서 론

대다수 산업로봇은 외력의 작용을 고려하지 않는 위치제어에 이용되었고 이들의 예로서는 용접 및 스프레이 페인트 작업을 하는 로봇들을 들 수 있다¹⁾. 하지만 많은 경우에 로봇은 작업물체를 집거나 가공하기 위해서 주위의 환경과 접촉하게 되고 따라서 로봇 팔에는 외력이 작용하게 된다. 이러한 경우에 적용한 제어 방법중의 한가지로 외력이 작용하는 접선 방향으로서는 위치를 제어하

고 외력이 작용하는 방향으로서는 힘을 제어하는 것이 있다. 즉 힘제어 혹은 컴플라이언스제어 방식을 위치제어 방식과 혼용하여 사용하는 것이다^{2,3)}. 이러한 제어방식은 힘과 운동방향을 서로 독립적인 것으로 다루고 있다.

이와는 달리 로봇팔의 위치와 이에 의해 발생하는 외력간의 관계에 관심을 둔 연구가 있었다^{4~7)}. 이 연구 중에서 로봇팔의 궤도를 제어하면서 외력이 작용하는 방향으로 로봇팔의 위치와 그에 상응하는 외력과의 컴플라이언스 관계를 정의하

* 한국해양대학교 기계공학과

여 외력을 제어하면서 외력방향으로 로봇팔의 변위를 제어하는 연구가 행하여졌다^{4,5)}. 한편으로 는 전압과 전류간에 존재하는 임피던스의 관계를 정의하는 옴의 법칙과도 같이 외력과 운동 간에도 임피던스라고 명명되는 동력학적 관계를 정의하여 로봇 팔의 주위환경에 작용하는 외력과 외력 방향으로의 운동간에 발생하는 상호 역학적인 관계를 이용하여 로봇 팔을 제어하였다^{6,7)}. 여기서 임피던스제어의 특징은 로봇 팔이 원하는 운동 경로를 따르며 동시에 말단효과장치에 적용된 외력과 이에 의한 외력방향의 위치오차간의 원하는 동력학적 관계를 이용하여 외력을 제어하는 것이다.

로봇 시스템에 불확실성이 존재할 때, 특히 질량성분의 불확실성이 존재할 때, 로봇팔을 원하는 궤도로 제어하기 위하여 적응임피던스제어기를 설계하여 안정한 제어를 제안하였다⁸⁾. 한편으로 불확실한 부분을 외란으로 간주하고 로봇팔의 궤도와 외력의 제어를 위하여 건설한 임피던스 제어기를 설계하여 안정한 유계된 위치오차하에 원하는 궤도를 따르게 하는 제어기의 설계도 제안되었다⁹⁾.

본 논문에서는 불확실성이 존재하는 로봇팔 운동식을 작업공간좌표로 변환하고 궤도제어시 외부환경과의 접촉으로 인한 외력의 제어를 위하여 외력과 외력방향으로의 운동을 표적임피던스 방식에 의하여 정의하였다. 이 표적임피던스 관계를 이용하여 원하는 궤도제어와 동시에 외력과 외력방향의 변위제어를 만족하는 슬라이딩모드 제어기를 설계하였다. 시스템에 불확실성이 존재할 때, 슬라이딩모드 제어기의 건설성을 이용하여 불확실한 변수의 추정치와 실제치 간의 오차를 외란으로 간주하여 건설하게 제어함으로써 시스템의 안정도를 보장함을 보여준다. 시스템의 모델링시 생략된 고주파수를 자극할 가능성이 있거나 진동이 없는 출력을 원할때 적합한 부분 연속적인 슬라이딩모드 제어기가 제안되었다. 또한 고안된 제어기를 2축 미끄럼 관절 로봇에 적용하는 수치적인 예를 제시하였다.

2. 로봇의 운동방정식 및 작업공간상의 모델링

n개의 관절을 가진 비선형 로봇의 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D + J^T(q)F = \tau \quad (1)$$

여기서 q 는 $(n \times 1)$ 로봇팔의 관절각 벡터이고, τ 는 $(n \times 1)$ 로봇팔에 대한 입력토크 벡터이다. $H(q)$ 는 $(n \times n)$ 관성행렬이고 $C(q, \dot{q})$ 는 원심력, 코리올리력, 및 중력을 포함하는 $(n \times 1)$ 비선형 힘벡터이고, $J(q)$ 는 $(n \times n)$ 자코비안행렬이다. D 는 $(n \times 1)$ 정적 및 동적 마찰력을 포함하는 유계된 불확실한 외란항이고 F 는 말단효과장치와 대상물체와의 상호접촉점에서 작용하는 힘과 모멘트를 나타내는 $(n \times 1)$ 벡터이다.

제안된 제어기를 적용하기 위해서 우선 관절공간 좌표의 로봇 동방정식 (1)을 말단효과장치의 운동과 외력과의 관계를 적립하기에 적합한 작업공간 좌표의 식으로 변환해야 한다. 이러한 관절공간 좌표와 작업공간 좌표와의 관계는 자코비안 행렬을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$x = f(q) \quad (2)$$

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 방법을 이용하여 관절공간 좌표의 로봇 동방정식을 작업공간 좌표의 변수인 x 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H^*(x)\ddot{x} + C^*(x, \dot{x})\dot{x} + G^*(x) + D^* + F = J^{-T}\tau \quad (4)$$

여기서 $H^*(x) = J^{-T}(q)T(q)H(q)J^{-1}(q)$,
 $G^*(x) = J^{-T}(q)G(q)$, $D^* = J^{-T}(q)D$
 $V^*(x, \dot{x}) = J^{-T}(q)V(q, \dot{q})J^{-1}(q) - J^{-T}(q)H(q)J^{-1}(q)\dot{J}(q)J^{-1}(q)$

식(4)의 로봇 동방정식에서 작업공간 좌표의 로봇 팔에 작용하는 외력과 외력방향의 운동제어와 동시에 원하는 로봇 팔의 이동경로를 제어하기위해서 임피던스 방식에 의한 제어기를 다음과 같이 설계한다.

3. 임피던스 방식에 의한 슬라이딩모드 제어

많은 경우의 로봇 제어 방식은 외력의 방향과 운동의 방향의 제어는 동시에 이루어 질 수가 없어서 제어 알고리즘을 이용하여 선택적으로 외력이 작용하는 방향으로 힘제어를 적용하고 외력이 작용하지 않는 방향으로 운동제어를 한다. 하지만 임피던스제어 방식에서는 힘과 운동의 제어가 단일한 제어알고리즘으로 구성되어 각 경우에 있어서의 힘과 위치제어를 구분해야 하는 것이 필요하지 않다. 임피던스방식의 슬라이딩모드제어기를 설계하기 위해서 우선 슬라이딩 모드를^{13,14)} 다음과 같이 정의한다.

$$s = \dot{e} + \Delta e \tag{5}$$

여기서 Δ 는 $(n \times n)$ 이득행렬로 양의 대각행렬 (positive diagonal matrix)이다. 또한 오차상태벡터 e 는

$$e = x - x_d, \tag{6}$$

$$x_d = x_d - L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} Z_m(s)^{-1} \right\} * F$$

이다. 여기서 Z_m 은 표적임피던스이고 x_d 은 작업 공간상에서 로봇팔의 원하는 경로 x_d 와 말단효과장치에 가해지는 외력과 표적임피던스의 적분간의 관계에 의한 변위와의 오차벡터이다. 여기서 L^{-1} 는 역 라플라스 변형자이고 *는 컨벌루션 연산자이다. F 는 역각센서에 의해 샘플링한 값이다. 식(5)와 식(6)은 시스템에 모델링 오차가 존재하거나 외란이 존재하여 원하는 궤도와 실제 궤도간의 오차와 외력과 표적임피던스 간의 정확한 관계가 성립되지 못하는 경우이다. 만약 식(6)에서 모델링 오차나 외란이 없을 경우에는 $e=0$ 이고 따라서

$$x - x_d = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} Z_m(s)^{-1} \right\} * F \tag{7}$$

가 성립된다. 이의 관계는 수동적인 환경 임피던스 Z_e 와 함께 Fig. 1의 블럭선도에 나타나있다¹⁶⁾.

한편 식(6)에서

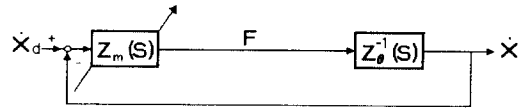


Fig. 1 Block diagram of impedance model

$$Z_m = Ms + B + K / s \tag{8}$$

여기서 Z_m 은 표적 임피던스로 L, B 및 K 는 대각행렬이고 각각 로봇팔의 원하는 질량, 감쇠 및 스프링 계수를 나타낸다. 표적 임피던스는 옴의 법칙에서 전압과 전류간의 관계를 정의하는 것과 같이 외력과 외력에 의한 말단효과장치의 변위간의 원하는 동력학적 관계를 구성하는 것이며 s 는 라플라스 변환의 변수이다. 시스템의 위치오차는 식(6)에서 나타난 것같이 작업공간에서 원하는 경로와 말단효과장치의 실제위치와 외력과 이에 저항하는 표적임피던스간의 관계에 의한 변위간의 오차로 정의 된다. 따라서 이 오차를 줄이거나 제거함으로써 로봇팔에 가해지는 외력을 줄이거나 제거하며 동시에 외력방향의 변위도 제어될 수 있도록 제어기를 설계해야 한다. 즉 식(6)을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$|x_d - x| = 0 \tag{9}$$

하지만 로봇팔의 운동식을 정확히 알 수 없을 때, 이상적인 제어목표는 다음과 같다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x_d - x| = \alpha \tag{10}$$

여기서 α 는 작은 양의 수이다.

식(10)을 만족하는 제어기를 설계하기 위하여 에너지 보존의 법칙에 의거하여 탄성에너지와 위치에너지의 항으로 구성된 리야푸노프함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T H^* s \tag{11}$$

식(11)에서 슬라이딩모드는 다음과 같이 표현된다.

$$s = \dot{x} - \dot{x}_r \tag{12}$$

여기서 $\dot{x}_r = \dot{x}_d - \Delta e$

식(12)에서 \dot{x}_d 는 식(6)을 미분하면 구해지고 다

음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_d = \dot{x}_d - L^{-1}\{Z_m(s)^{-1}\} * F \quad (13)$$

식 (11)의 선택한 리아푸노프함수를 시간에 관해 미분하고 식 (4)와 (12)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} V = s^T & \left(\frac{1}{2} \dot{H}^* s + H^* \dot{s} \right) \\ & s^T \left(\frac{1}{2} \dot{H}^* s + H^* \ddot{x} - H^* \ddot{x}_r \right) \\ & s^T \left(\frac{1}{2} \dot{H}^* s + J^{-T} \tau - C^*(x, \dot{x})s - C^*(x, \dot{x})\dot{x}_r \right. \\ & \left. - G^*(x) - D^* - F - H^* \ddot{x}_r \right) \quad (14) \end{aligned}$$

식(14)에서 \ddot{x} 를 구성하는 성분 $x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d$ 는 설계된 로봇트팔의 원하는 경로이므로 유계되고 F 는 주위환경이 수동적이면 항상 유계된다¹⁴⁾. 또한 식 (14)에서 행렬 \dot{H}^* 와 $2C^*(x, \dot{x})$ 는 다음의 관계를 만족한다¹²⁾.

$$s^T (\dot{H}^* - 2C^*(x, \dot{x}))s = 0, \quad \forall s \in R^n \quad (15)$$

위의 관계를 이용하여 식(14)는 다음과 같이 간략하게 표현된다.

$$\dot{V} = s^T (J^{-T} \tau - C^*(x, \dot{x})\dot{x}_r - H^* \ddot{x}_r - G^*(x) - D^* - F) \quad (16)$$

시스템이 안정하려면 $\dot{V} \leq 0$ 가 되어야하고 이를 위하여 다음과 같은 슬라이딩모드 제어기를 설계하였다.

$$\begin{aligned} J^{-T} \tau = & \hat{C}^*(x, \dot{x})\dot{x}_r + \hat{H}^*(x)\ddot{x}_r + \hat{G}^*(x) + D^* \\ & + F - K \operatorname{sgn}(s) \quad (17) \end{aligned}$$

여기서 $\operatorname{sgn}(s) = +1$ if $s > 0$,
 $\operatorname{sgn}(s) = -1$ if $s < 0$

또한 $\hat{H}^*(x)$, $\hat{C}^*(x, \dot{x})$, $\hat{G}^*(x)$, 및 D^* 는 각각 $H^*(x)$, $C^*(x, \dot{x})$, $G^*(x)$, 및 D^* 의 추정치이고 K 는 $(n \times n)$ 양의 대각행렬이다. 특히 $\hat{H}^*(x)$ 와 $\hat{C}^*(x, \dot{x})$ 는 로봇트 팔의 질량과 관성으로 구성되어 있는 $H^*(x)$ 와 $C^*(x, \dot{x})$ 의 추정치이다. 식 (17)에서 나타난 것같이 임피던스 방법에 의한 슬라이딩모드의 제어는 오직 엔코더나 타코미터를 필요로 하는 x, \dot{x} 와 힘센

서를 필요로 하는 F 의 측정만을 요구하며 이는 현실적으로 타당한 것이다. 제안된 제어기를 식(16)에 적용하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = s^T & (\hat{C}^*(x, \dot{x})\dot{x}_r + \hat{H}^* \ddot{x}_r + \hat{G}^*(x) + D^*) \\ & - \sum_{i=1}^n k_i |s_i| \quad (18) \end{aligned}$$

여기서 $\hat{H}^* = \dot{H}^* - H^*$, $\hat{C}^* = \dot{C}^* - C^*$, $\hat{G}^* = \dot{G}^* - G^*$, $\hat{D}^* = \dot{D}^* - D^*$ 이고 $\hat{H}^*(x)$, $\hat{C}^*(x)$, $\hat{G}^*(x)$ 및 \hat{D}^* 는 모델링 오차이고 k_i 는 행렬 K 의 대각성분이다.

$\dot{V} \leq 0$ 이기 위해서는 k_i 를 다음과 같이 선택하고

$$k_i \geq |(\hat{C}^*(x, \dot{x})\dot{x}_r + \hat{H}^* \ddot{x}_r + \hat{G}^*(x))_i| + \sum_{j=1}^n \eta_j, \quad \eta_j > 0 \quad (19)$$

여기서 k_i 가 식(19)의 조건을 만족하도록 설계되면 다음의 슬라이딩 조건이 만족된다.

$$\dot{V} \leq \sum_{j=1}^n \eta_j |s_j| \quad (20)$$

식 (20)의 슬라이딩 조건은 유한한 시간안에 $s = 0$ 가 이루어지며 일단 슬라이딩 면에 도착하면 원하는 경로에 지수함수적으로 근접한다.

하지만 식(17)과 같은 슬라이딩제어기는 Fig. 2와 같이 상태의 오차는 상당히 감소시킬 수 있으나 진동(chattering)을 유발하여서 모델링에서 생략한 고주파수(high frequency unmodeled dynamics)를 자극할 수도 있다. 이와 같은 진동을 완화 혹은 제거하기 위하여 불연속적인 제어입력을 유화(smoothing)시키는 부분 연속적인 슬라이딩제어기를 제안해야 하고 이를 위해서 다음과 같은 경계층을 정의한다.

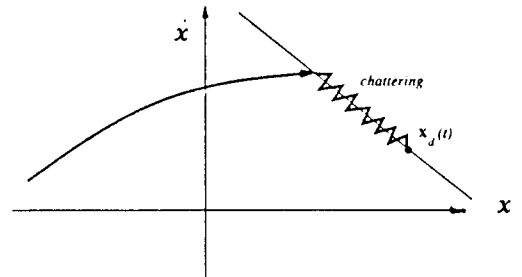


Fig. 2 Chattering due to control switchings

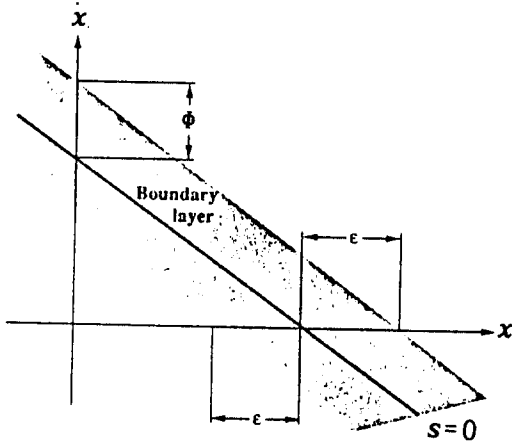


Fig. 3 Boundary layer

$$B(t) = \{x, |s(x;t)| \leq \phi\} \quad \phi > 0 \quad (21)$$

여기서 ϕ 는 경계층두께(boundary layer thickness)이다.

Fig. 3에서 $\epsilon = \phi/\Delta^n$ 이고 $n=2$ 일 경우이다. 제어 알고리즘은 식 (17)과 궁극적으로 같고 다만 경계층 내에서는 연속적인 제어를 하고 경계층 외에서는 식 (17)과 같은 불연속적인 스위칭제어 입력을 적용하는 것이다. 이를 위해서 식 (17)에서 $sgn(s)$ 을 $sat(s/\phi)$ 로 표현하고 이의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{cases} sat(s/\phi) = s/\phi & \text{if } |s| \leq \phi \\ sat(s/\phi) = sgn(s/\phi) & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

식 (22)를 이용하면 제어입력식 (17)은 다음과 같은 부분 연속적인 제어입력식으로 표현된다.

$$J^{-T}\tau = \hat{C}^*(x, \dot{x})\dot{x}_r + \hat{H}^*(x)\ddot{x}_r + \hat{G}^*(x) + \hat{D}^* + F - Ksat(s/\phi) \quad (23)$$

4. 시뮬레이션

3장에서 고안된 로봇트 매니퓰레이터의 동작 및 힘제어를 위한 임피던스 방식의 슬라이딩모드 제어를 IBM 486 - DX 개인용 컴퓨터를 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 제어기를 적용한 페루프식이 비선형식이어서 4차 Runge - Kutta 알고리즘을 이용하였다. Fig. 4와 같은 2축 미끄럼 관절로

보트를 사용하였고 운동식은 [15]와 같이 정의되었다.

그림에서 나타난 좌표는 다음과 같이 구성된다.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 x 는 작업공간 좌표를 나타내고 x_1, x_2 는 고정좌표를 나타내는 것으로 x_1 은 작업표면의 수직변위이고, x_2 는 작업표면의 경사표면을 따르는 변위를 나타낸다. 로봇트팔은 Fig. 2의 경사표면을 따르며 표면의 수직방향으로는 외력이 작용한다. 여기서 제어목표는 로봇트팔을 경사표면 방향으로 이동시키며 표면에 수직방향으로 발생하는 외력을 표적임피던스 관계를 이용하여 제어하며 동시에 이 방향으로의 변위를 제어하는 것이다. 시스템의 관절공간좌표와 작업공간 좌표간의 관계는 다음의 식으로 표현된다.

$$x = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} q_1 - q_2 \\ q_1 + q_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Fig. 4의 로봇트팔의 운동식은

$$T = H\ddot{q} + G + J^T F \quad (26)$$

$$T = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 + m_2 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_1 + m_2)g \end{bmatrix}$$

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, J = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

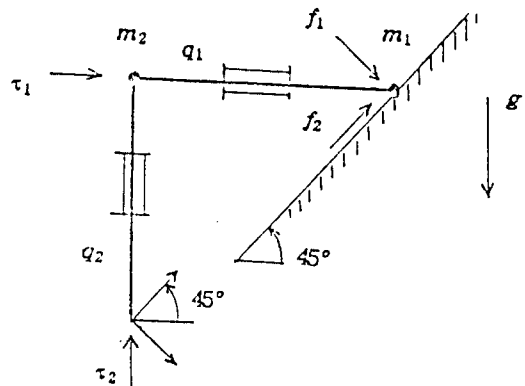


Fig. 4 2-axis prismatic joint robot on the sliding surface

슬라이딩모드 제어기의 구성에서 궤적을 따르는 원하는 경로는

$$x_d = \begin{bmatrix} x_{1d} \\ x_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/\sqrt{2} \\ \sin(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

표면에 수직하는 방향으로의 변위와 외력간의 관계는

$$x_{1d}(s) - x_1(s) = \frac{f_1(s)}{s^2 + 4s + 4} \quad (28)$$

슬라이딩모드 제어기의 게인 k_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_i \geq \left| [\hat{H}^* \ddot{x}_r + \hat{G}^*(x)]_i \right| \quad (29)$$

실제 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용된 슬라이딩모드의 게인과 질량과 그의 추정치는 다음과 같고

$$\Delta = 100, k_1 = 70, k_2 = 40, m_1 = m_2 = 1\text{kg}, \\ \hat{m}_1 = 0.4\text{kg}, \hat{m}_2 = 0.4\text{kg}$$

로봇트팔의 위치의 초기조건은 다음과 같다.

$$q_1(0) = 1.5, \text{ 이고 } q_2(0) = -1.5$$

[15]에서 제시된 $f_1 = 1000(x_2 - 3/\sqrt{2})$ 의 외력을 사용하였다. 위와 같은 조건에서 행한 시뮬레이션의 결과는 Fig. 5 - a, 5 b, 5 - c에 잘 나타나있다. 여기서는 불연속 슬라이딩 제어기인 식 (17)을 적용하였다. Fig. 5 - a는 경사면에 수직방향으로 외력제어의 상태를 나타내며, Fig. 5 - b는 경사면을 따르는 방향의 위치오차를 나타낸다. 또한 Fig. 5 - c는 제안된 제어기의 외력방향으로의 제어 입력의 상태를 나타낸다. 5초간 행한 시뮬레이션에 의하면 제안된 제어기는 경사면에 수직방향으로의 외력을 잘 제어하며 동시에 경사면을 따르는 방향으로로는 작은 위치오차를 유지함으로써 원하는 경로를 잘 따름을 알 수있다. 하지만 스위칭 제어 입력에 따른 출력상태는 많은 진동을 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 경계층을 이용한 부분연속 제어 입력식 (23)을 적용하였고 이때 사용된 경계층 두께는 $\phi = 0.2$ 이다. 다른

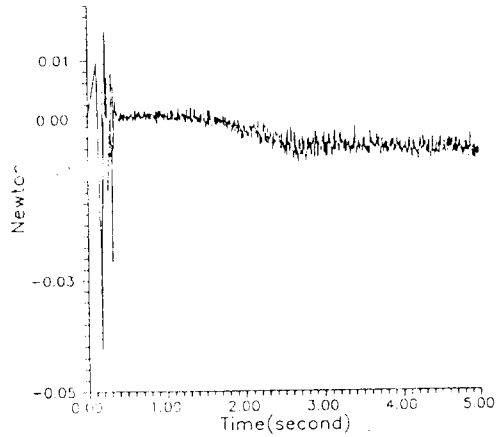


Fig. 5 - a The plot of force error state

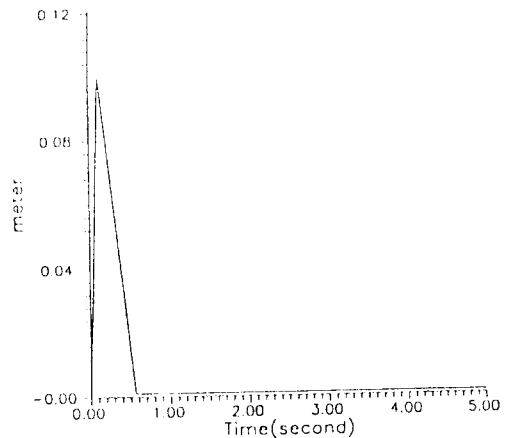


Fig. 5 - b The plot of position error state

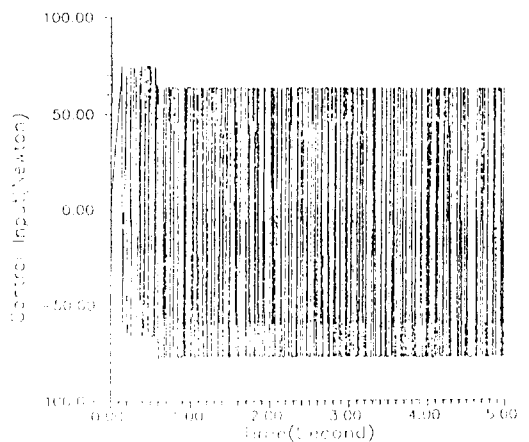


Fig. 5 - c The plot of control input

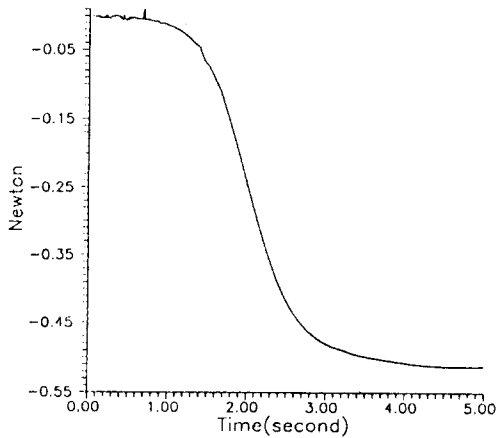


Fig. 6 - a The plot of force error state

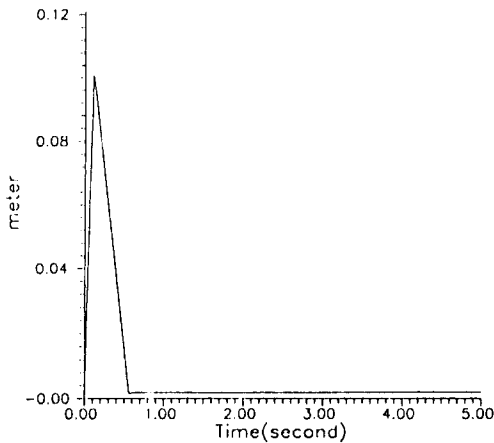


Fig. 6 - b The plot of position error state

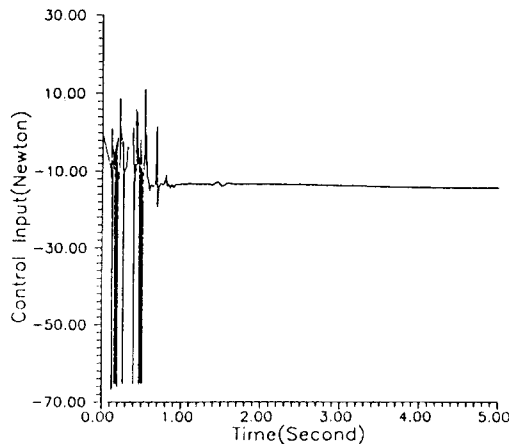


Fig. 6 - c The plot of control input

조건은 위의 경우와 같고 적용결과는 Fig. 6 - a, 6 - b, 6 - c에 잘 나타나있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 외력의 제어상태는 식 (17)의 제어를 적용한 것 보다 좋지 않으나 진동은 상당히 감소 되었음을 알 수있다. 따라서 모델링에서 생략한 고주파수를 자극할 가능성이 있는 시스템에서는 제어 입력식 (23)이 더 적합함을 알 수있다.

5. 결 론

로봇팔의 경로제어시에 말단효과장치에 외력이 작용할 때 이 외력과 이에 의한 로봇팔의 변위간의 관계가 임피던스방식에 의하여 정의되었다. 특히 불확실한 로봇시스템의 제어시에 모델링 오차에 의한 외란을 견실하게 대처하며 표적임피던스 관계를 이용하여 원하는 궤도제어와 동시에 외력과 외력방향의 변위제어를 이루는 슬라이딩모드 제어가 설계되었다. 시뮬레이션에 따르면 제안된 제어기는 외력을 잘 제어하며 원하는 로봇팔의 경로를 잘 따르는 결과를 보여준다. 시스템의 안정도는 슬라이딩모드의 조건을 만족하면 항상 보장된다.

참고문헌

- 1) Tanner, W. R., "Industrial Robots" Volume 2 : Applications, Society of Manufact. Engineers, Mich., 1981.
- 2) Raibert, M. H., and Craig, J. J., "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME J. of Dynamics, Measurement and Control, Vol. 102., pp. 126 - 133, June 1981.
- 3) Mason, M. T., "Compliance and Force Control for Computer - Controlled Manipulators", IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC_11, No. 6, 1981.
- 4) Kazerooni, H. "Fundamentals of robust compliant motion for manipulators", IEEE J. of Robotics and Automation, N2, V2, June 1986b.
- 5) Kazerooni, H. "A Design method for robust compliant motion of manipulators", IEEE J. of Robotics and Automation, N2, V2, June 1986c.

- 6) Hogan, N., "Stable execution of Contact Tasks using Impedance control", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 595 - 601, 1989.
- 7) Hogan, N., "Impedance Control : an approach to manipulations", Parts I, II, ASME Journal of Dynamics, Measurement and Control, vol. 107, March. 1985.
- 8) Kelly, R., Carelli, R., Amestegui, M., "Unified approach to adaptive impedance control of robot manipulators", IEEE Conf. on Decision and Control, 1988.
- 9) Dawson, D. M., Lewis, F. L., and Dorsey, J. F., "Robust force control of a robot manipulators", The int. J. of Robotics Research, vol. 11, No. 4. Aug. 1992.
- 10) Leitmann, G., "Guaranteed Asymptotic Stability for Some Linear Systems with Bounded Uncertainties", J. of Dynamic Systems, Meas., and Control, vol. 101. Sep. 1979.
- 11) Aizerman, M. A. and Gantmakher, F. R., "On some features of switchings in nonlinear control with a piecewise - smooth response of the nonlinear element", Avtomatika i Telemekhanika, 18, 11, 1957.
- 12) Koditschek, D., "Natural motion of robot arms", IEEE Conf. Decision and Control, Las Vegas, NV, Dec 1984.
- 13) Slotine, J. J. E. "Sliding controller design for nonlinear systems", Int. Journal of Control., 40, 2, 1984
- 14) Slotine, J. J. E. "The robust control of robot manipulators", Int. Journal of Robotics Research", 4, 2, 1985
- 15) Spong, M., and Vidyasagar, M., "Robot dynamics and control", New York : John Wiley and Sons, 1989.
- 16) Goldenberg, A. A., "Implementation of force and impedance control in robot manipulators" Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1626 - 1632, 1988.