

채터링 없는 슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니퓰레이터의 제어

이규준* · 경태현** · 김종식†
(2001년 6월 18일 접수, 2001년 11월 7일 심사완료)

Control of Robot Manipulators Using Chattering-Free Sliding Mode

Kyu Joon Lee, Tai Hyun Kyung and Jong Shik Kim

Key Words: Chattering-Free Sliding Mode(채터링 없는 슬라이딩 모드), Lyapunov Stability(리아프노프 안정도), Reaching Law(도달 법칙), Robot Manipulator(로봇 매니퓰레이터)

Abstract

A new chattering free sliding mode control is proposed for robot manipulators. The control input is derived from the reaching law and the Lyapunov stability criteria, which is only composed of continuous terms. It has a chattering free characteristics and a concise form. In implementing procedures, no change of equations is needed. Thus, it does not degrade the original merits of the sliding mode control. And it is applied to a 2-link SCARA robot manipulator. It is shown that the proposed control has good trajectory tracking performance compared with the PD control and the conventional sliding mode control which uses the boundary layer concept.

1. 서론

슬라이딩 모드 제어기법은 시스템의 동특성과 관계없이 설계자가 제어목적에 적합하게 슬라이딩 평면에 대한 동특성을 지정할 수 있고, 플랜트의 상태를 이 슬라이딩 평면에 머물게 할 수 있다. 이런 특성으로 인해서 플랜트 자체의 안정성과 관계없이 플랜트를 원하는 안정하고 바람직한 상태로 만들 수 있다. 또한 파라미터의 변동이나 모델링되지 않은 빠른 동특성이나 입력측으로 반영할 수 있는 불확실한 외란 등이 정합 불확실성(matched uncertainty) 조건을 만족하면 제어

기의 성능은 이들에 대하여 완전히 영향을 받지 않는 불변성(invariance property)을 가진다.⁽¹⁻⁴⁾ 그리고 슬라이딩 평면에서 시스템의 동특성은 슬라이딩 평면의 차수만큼 시스템의 차수가 감소되는 특징도 가진다. 이런 특성 때문에 가장 널리 연구되고 있는 비선형 제어기법중의 하나이다.

그렇지만 실제 적용 시에는 시스템의 비모델 동특성을 여기시키는 채터링 문제를 가지고 있다. 채터링을 유발하는 메카니즘은 두 가지로 나눌 수 있다.^(2,5) 첫째는 슬라이딩 모드 제어입력의 특징인 고주파 성분이 시스템 모델링 시 무시한 플랜트의 빠른 동역학을 여기시켜 감쇠되지 않은 유한한 주파수와 크기를 가지는 진동을 발생시키는 것이다. 둘째는 제어기를 이산시간계에서 구현할 때 제어기의 출력이 부분연속인 불연속 함수로 생성되므로 채터링이 발생한다. 이는 현재 컴퓨터와 A/D, D/A 변환기의 속도가 아주 빨라 대부분의 경우 문제가 되지 않는다.

본 논문은 첫 번째 메카니즘에 대한 연구이다. 채터링을 줄이기 위한 수많은 연구가 진행되어

* 회원, 국방과학연구소

** 부산대학교 지능기계공학과 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : jskim@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2317 FAX : (051)512-9835

왔으며⁽²⁾ 지금도 많은 연구를 하고 있다. 현재 가장 널리 사용하는 방법은 슬라이딩 평면의 경계층(boundary layer) 내에서 절환(switching) 요소를 연속함수로 근사화하는 방법이다.⁽⁶⁾ 이 방법은 강인성과 성능이 서로 상반되는 특성을 가지므로 이 두 제어 특성을 적절하게 조절해야 한다. 또한 진동을 완전하게 없앨 수 없으며, 플랜트 내부에 불연속 요소가 있는 경우 채터링을 없앨 수가 없고, 큰 제어 입력이 요구된다. 두 번째 방법은 점근 관측기(asymptotic observer)를 이용하는 방법^(2,7)이다. 이 방법의 핵심은 관측기의 루프에서 채터링이 일어나게 하는 것이다. 슬라이딩 모드의 변수가 관측기의 변수이고 제어기의 소프트웨어 상에서 슬라이딩 모드가 발생되므로 이상적인 슬라이딩 모드가 되고 실제 채터링은 일어나지 않는다. 그렇지만 이 방법은 관측기의 오차가 유한시간 안에 0이 되어야 효과적이라는 단점을 가지고 있다. 세 번째 방법은 슬라이딩 모드 외란 관측기를 이용하는 방법이다.⁽²⁾ 슬라이딩 모드 제어입력은 연속항과 불연속항으로 구성되고 불연속항은 외란과 파라미터의 변동에 강인성을 갖기 위해서 사용된다. 만약 외란을 보상하면 불연속항이 불필요하게 되므로 나머지 부분의 제어는 기존의 선형제어기법을 적용할 수 있다. 하지만 외란의 대역폭과 시스템의 바람직한 대역폭이 이 관측기의 절점 주파수(cutoff frequency)를 결정하는 중요한 요소이므로 외란과 시스템의 특성에 따라서 성능이 변하는 한계가 있다. 네 번째는 고차의 슬라이딩 모드를 이용하는 방법⁽⁸⁾이다. 이 방법은 슬라이딩 모드를 2차 이상으로 하면 실제 제어입력항은 불연속항을 적분한 값이 되므로 연속이 된다. 이 방법의 단점은 차수가 증가함에 따라서 새로운 변수가 추가되며 이 변수를 구해야 하므로 시스템의 차수가 증가하여 복잡해진다.

본 논문에서는 위에서 언급한 채터링 문제 해결을 위한 슬라이딩 모드 제어 방법들의 단점을 극복할 수 있는 새로운 채터링이 없는 연속 슬라이딩 모드 제어방법을 제안한다. 이 방법은 슬라이딩 모드의 도달조건(reaching condition)^(9,10) 중에서 Lyapunov 함수를 이용한 도달법칙(reaching law)과 Lyapunov 안정 조건을 이용하여 제어법칙을 유도한다. 본 논문에서 제안한 이 연속 제어법칙은 현재까지 채터링을 방지하기 위하여 제시

된 어떤 제어법칙 보다 간결하다. 제어 입력식에서 제어설계 파라미터는 외란의 최대 크기를 고려하는 δ 와 안정한 슬라이딩 면을 선정하는 것뿐이다. 그리고, 본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드 제어방법은 플랜트의 운동방정식 자체를 이용하여 유도했기 때문에 슬라이딩 모드의 장점이 조금도 손상되지 않으며, 고전 슬라이딩 모드 제어에서 경계층의 개념을 도입할 때 발생하는 경계에서의 불연속도 일어나지 않으며, 2차 슬라이딩 모드처럼 제어법칙이 복잡한 문제점도 없는 장점을 갖는다.

끝으로, 본 논문에서 제안한 채터링 없는 연속 슬라이딩 모드 제어방법을 2축 SCARA 로봇 매니퓰레이터에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 효율성을 입증한다.

2. 채터링 없는 슬라이딩 모드 제어기

2.1 도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기

이 절에서는 도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계기법을 설명하기로 한다. 우선, 제어입력에 대해 선형인 비선형시스템(affine system)을 고려한다.

$$\dot{x} = f(x, t) + B(x, t)u + d \quad (1)$$

여기서, $x \in R^n$ 는 상태 벡터, $u \in R^m$ 는 제어입력 벡터, $B \in R^{n \times m}$ 는 입력행렬, 그리고 d 는 파라미터 변동, 모델링 되지 않은 동특성, 외란을 모두 포함한다. 또한, 이 식을 슬라이딩 모드의 정규형태(regular form)로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + B_2(x_1, x_2)u + d \quad (3)$$

여기서, $x_1 \in R^{n-m}$, $x_2 \in R^m$, $u \in R^m$, 그리고 $B_2 \in R^{m \times m}$ 는 비특이행렬이다.

슬라이딩 면, S 를 아래와 같이 정의하면 제어 목적은 시스템의 상태를 집합 S 로 가게 유도하는 것이다.

$$S = \{x : s(x_1, x_2, t) = 0\} \quad (4)$$

여기서, $s(x_1, x_2, t)$ 는 연속함수이다. 페루프 시스템의 특성은 제어 대상 시스템 (1)의 제한조건인 슬라이딩 면 (4)의 선정에 의해 결정된다.^(3,5)

바람직한 슬라이딩 면 선정을 위해 시스템 (1)과 슬라이딩 면 (4)에 대한 Lyapunov 함수를 2차곱의 형태로 나타내고, 그 도함수가 음의 한정함수 (negative definite function)가 되도록 한다. 이 때 $s=0$ 의 해는 안정성을 가진다. 즉, Lyapunov 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (5)$$

그리고, Lyapunov 함수의 도함수가 음의 한정함수이면 슬라이딩 모드는 안정하게 되므로, Lyapunov 함수의 도함수 \dot{V} 는 다음과 같이 표현되어야 한다.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = -s^T D s \quad (6)$$

여기서, D 는 양의 한정(positive definite)이다. 이 때 식 (6)으로부터 다음 식이 성립한다.

$$s^T (D s + \dot{s}) = 0 \quad (7)$$

이 방정식의 해로부터, 다음과 같은 슬라이딩 모드에 대한 도달법칙⁽⁴⁾이 유도된다.

$$D s + \dot{s} = 0 \quad (8)$$

위 조건으로부터 제어법칙을 구하면, 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$u = u_{eq} - \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} D s \quad (9)$$

여기서,

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial s}{\partial x_2} f_2 \right] - \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x_2} d \quad (10)$$

이 제어법칙은 도달법칙을 만족하고 불연속 항을 포함하고 있지 않으므로 채터링을 발생하지 않는다. 그렇지만 이 제어법칙에는 미지의 외란 항 d 를 포함하고 있다. 따라서 도달법칙 (8)을 만족하기 위해서는 d 를 정확하게 구해야 적용이 가능하므로 현 상태로는 적용할 수 없다.⁽⁹⁾

2.2 채터링 없는 새 슬라이딩 모드 제어기

이 절에서는 2.1 절에서 논한 도달법칙을 이용한 슬라이딩 모드 제어법칙을 Lyapunov 안정 조건에 적용하여 새로운 연속 슬라이딩 모드 제어법칙을 유도하기로 한다. 식 (9)는 식 (10)에서 미지의 외란 항을 포함하고 있으므로 정확한 외란 항을 구해야만 이용가능하지만, 여기서는 외란을

모르는 상태에서 연속 슬라이딩 모드 제어법칙을 유도하고자 한다.

식 (10)의 등가제어 항을 공칭 항과 외란 항으로 구분하여 나타내면 다음과 같다.

$$u_{eq} = u_{eq}^n + d_{eq} \quad (11)$$

여기서,

$$u_{eq}^n = -\left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial s}{\partial x_2} f_2 \right]$$

$$d_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x_2} d$$

외란에 대한 정보는 보통 상한치만 알고 있으므로, 도달법칙에서 구한 제어법칙은 현재의 상황에서는 아래와 같은 변형된 형태로 이용이 가능하다.

$$u = u_{eq}^n - \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} D s \quad (12)$$

이 제어법칙이 슬라이딩 모드의 도달조건을 만족하면 연속 슬라이딩 모드 제어입력이 구해진다. 즉, 식 (12)가 아래의 Lyapunov 함수의 도함수가 음이 되는 부등식을 만족하게 하면 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} \\ &= s^T \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x_1} f_1 + \frac{\partial s}{\partial x_2} (f_2 + B_2 u + d) \right) < -\epsilon \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, ϵ 은 양의 작은 실수이다. 식 (13)을 만족하면 s 는 유한시간 이내에 슬라이딩 면에 도달하여 슬라이딩이 일어나고 그 면에 계속해서 머무르게 된다.

그리고, 식 (12)를 식 (13)에 대입하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} = s^T \left(-D s + \frac{\partial s}{\partial x_2} d \right) \\ &\leq -\lambda_{\min}(D) \|s\|^2 + \lambda_{\max} \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} \right) \delta \|s\| < -\epsilon \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, 다음 조건을 만족하면 Lyapunov 함수의 도함수는 음이 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{\min}(D) &> \lambda_{\max} \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} \right) \delta \|s\|^{-1} + \epsilon \|s\|^{-2} \\ \delta &\geq \|d\|_{\max} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서, 도달조건을 만족하는 연속 슬라이딩 모드 제어법칙은 다음과 같이 구해진다.

$$u = u_{eq}^n - \left(\frac{\partial s}{\partial x_2} B_2\right)^{-1} D s \quad (16)$$

도달법칙과 Lyapunov 안정 조건을 이용하여 유

도한 이 연속 슬라이딩 모드 제어법칙을 식 (9)와 비교하면, 식 (9)는 외란을 정확하게 구해야 적용이 가능하기 때문에 외란을 정확하게 추정하는 항이 추가되어야 한다. 그러나, 조건식 (15)를 만족하는 본 기법의 제어 입력식 (16)은 외란의 상한치만 알면 언제나 적용이 가능하다. 본 기법의 장점은 현재까지 채터링을 방지하기 위하여 제안된 어떤 방식 보다 간결하여 제어 입력식에서 설계 파라미터는 외란의 크기를 고려하는 δ 와 슬라이딩 면의 선정뿐이다. 또한 플랜트의 운동방정식에서 그대로 유도했기 때문에 슬라이딩 모드의 장점인 불변성(invariance)과 시스템의 차수감소(reduced order)가 조금도 손상되지 않는다. 고전 슬라이딩 모드 제어에서 경계층 개념을 도입할 때 발생하는 경계에서의 불연속도 일어나지 않으며, 저주파 필터를 설계하기 위하여 자세한 외란에 대한 정보가 필요하지 않고, 2차 슬라이딩 모드⁽⁸⁾처럼 제어법칙이 복잡하지 않는 장점을 갖는다.

3. 스카라 로봇의 모델링 및 슬라이딩 모드 제어기의 적용

3.1 스카라 로봇의 모델링

Fig. 1에 표시된 스카라 형 로봇 매니플레이터의 동역학 모델은 다음과 같이 나타난다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + F = u \quad (17)$$

여기서, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 는 각 관절의 각변위 벡터, u 는 관절에 가해지는 제어입력 토크 벡터, M 은 관성행렬, V 는 원심력과 Coriolis 힘을 나타내고, F 는 파라미터 변동, 비모델링 항, 그리고 외부에서 유입되는 교란하중 모두를 나타낸다. 그리고 $M(\theta)$ 와 $V(\theta, \dot{\theta})$ 를 자세하게 나타내면, 각각 다음과 같다.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \alpha + 2\gamma \cos \theta_2 & \beta + \gamma \cos \theta_2 \\ \beta + \gamma \cos \theta_2 & \beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -\gamma \dot{\theta}_2 (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 + b_1 \dot{\theta}_1 \\ \gamma \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + b_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, $\alpha = 2.087$, $\beta = 0.2294$, $\gamma = 0.2563$, $b_1 = 3.47$, $b_2 = 0.565$ 이다. 그리고 상태벡터를 각 관절의 각변위 벡터와 각속도 벡터로 정의하기로 한다.

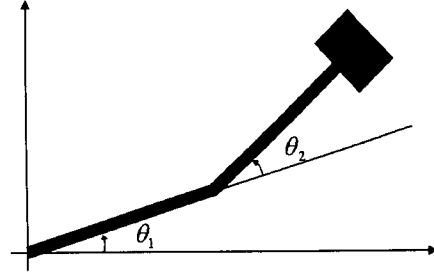


Fig. 1 Joint angles of the SCARA robot

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서,

$$x_1 = [\theta_1 \ \theta_2]^T$$

$$x_2 = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$$

이 때 로봇 매니플레이터의 동역학을 슬라이딩 모드 정규형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -M^{-1}(x_1)[V(x_1, x_2) + F] + B_2 u \end{cases} \quad (21)$$

여기서,

$$B_2 = M^{-1}(x_1)$$

3.2 슬라이딩 모드 제어기의 적용

우선, 추적 오차벡터를 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = x_d - x \quad (22)$$

여기서, x_d 는 바람직한 상태벡터이다. 그리고, 슬라이딩 면을 다음과 같이 정의한다.

$$s(x, t) = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = G_1 e_1 + G_2 e_2 \quad (23)$$

여기서, 행렬 G_1 과 G_2 는 설계단계에서 선정되는 설계 파라미터이다.

$$G_1 = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{12} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} g_{21} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{bmatrix} \quad (25)$$

그리고, g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} 는 양의 상수이다. 앞에서 유도한 제어법칙 (16)을 본 플랜트에 적용하면 다음과 같다.

$$u = u_{eq}^n + (G_2 M^{-1})^{-1} D s \quad (26)$$

여기서,

$$u_{eq}^n = (G_2 M^{-1})^{-1} [G_1 \dot{e}_1 + G_2 (\dot{x}_{2d} + V)]$$

그리고

$$\lambda_{\min}(D) > \lambda_{\max}(B_2) \delta \|s\|^{-1} + \epsilon \|s\|^{-2}$$

$$\delta \geq \|F\|_{\max}$$

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

본 절에서는 본 논문에서 제안한 연속 슬라이딩 모드(SMCC라 칭함)와 경계층 슬라이딩 모드(SMCB라 칭함), PD 제어기법(PDC라 칭함)을 이용하여 2관절 스카라형 로봇 매니퓰레이터에 0.1rad의 계단과 명령 입력을 가했을 때의 응답을 컴퓨터상에서 수치 시뮬레이션하고 그 결과를 비교하여 본 제어기법의 특성을 평가하기로 한다.

시뮬레이션에 사용된 실제 파라미터 값은 다음과 같다. 이 파라미터들은 각각의 제어기법에서 최대의 추적성능을 나타내는 값을 시행착오적으로 선정한 값이다. 여기서, K 는 강인제어 파라미터, ϕ_i 는 경계층의 두께, K_p 는 비례제어게인, 그리고 K_d 는 미분제어게인이다.

1) SMCC의 설계 파라미터

$$G_1 = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 250 \end{bmatrix}$$

2) SMCB의 설계 파라미터

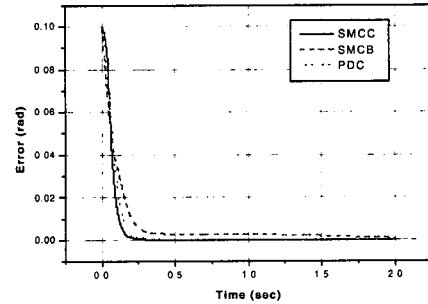
$$G_1 = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}$$

$$\phi_1 = 1.75, \phi_2 = 15.8$$

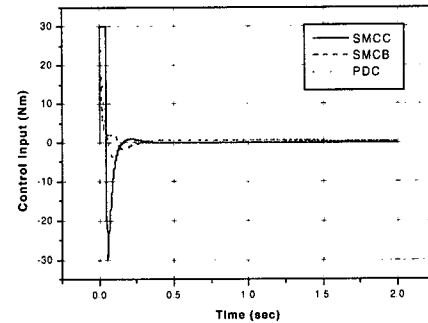
3) PDC의 설계 파라미터

$$K_p = \begin{bmatrix} 1350 \\ 320 \end{bmatrix}, K_d = \begin{bmatrix} 100 \\ 22 \end{bmatrix}$$

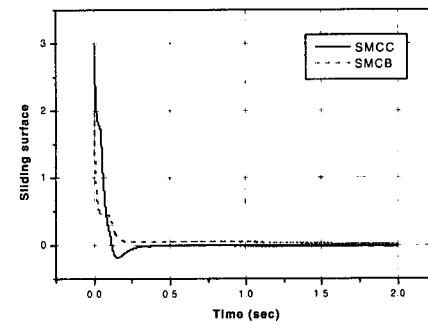
스카라 로봇의 특성상 관절 2의 성능이 관절 1보다 중요하므로 관절 2의 제어성능에 대해 자세히 언급한다. 관절 2의 추적성능 응답은 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 SMCC가 가장 우수하고, 제어입력에서는 SMCC의 경우 초기 과도기에서 타 제어기보다 큰 제어입력이 요구된다. 그리고 슬라이딩 면에 도달하는 시간은 SMCC가 SMCB에 비해, 약간의 오버슈트가 발생되나, 빨리 슬라이



(a) Tracking error



(b) Control input



(c) Locus of the sliding surface

Fig. 2 Simulation results of the step input for the link 2

딩 면에 접근함을 알 수 있다. 관절 1의 결과는 지면 관계상 생략하였으나 관절 2와 같은 경향이고 제어입력의 경우 보다 더 큰 입력이 요구되었다. 그러나 SMCB의 경우 설계 파라미터가 SMCC에 비해서 하나 더 많고 제어기의 출력에 고주파 성분이 존재하여 제어기의 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 플랜트 내부에 자체 불연속 비선형 요소가 있는 경우 채터링을 피할 수 없다.

이에 비해서 SMCC는 채터링이 발생되지 않는다.

4.2 실험

Fig. 3은 로봇 매니플레이터 제어시스템에 대한 실험장치의 개략도이며, Fig. 4는 본 실험에 사용된 실험장치의 사진이다. 실험에서 적용된 제어 기법들의 설계 파라미터는 시뮬레이션에서 사용한 값과 같다.

Fig. 5는 탑재하중이 0이고 0.1rad의 계단과 명령 입력에 대한 추적오차, 제어입력, 슬라이딩 함수의 궤적을 나타낸다. 추적오차는 SMCB가 가장 우수하나 제어입력은 SMCB의 경우 예상대로 초기에 진동이 많고, SMCC는 추적오차 성능은 SMCB에 비해 떨어지나 채터링은 거의 일어나지 않는다. 슬라이딩 함수의 궤적도 SMCB의 경우 진동이 심하나, SMCC는 초기 오버슈트 외에는 부드럽게 나타나 채터링에 대해서는 아주 우수한 성능을 보여준다. SMCC와 SMCB 모두 과도기의 제어 입력값이 크게 변하는 것은 슬라이딩 모드

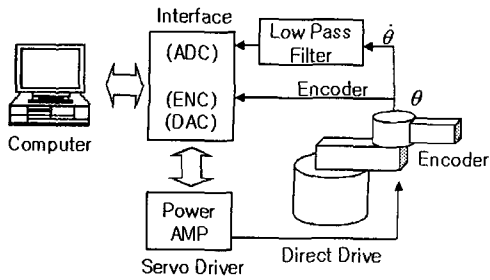


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental device

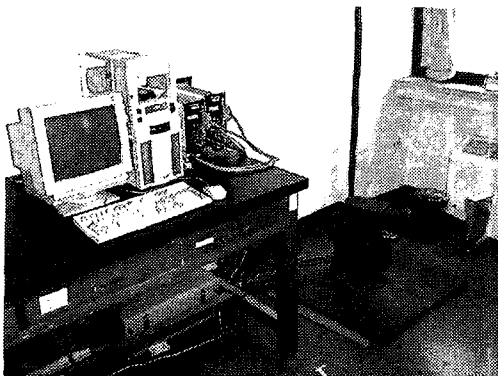
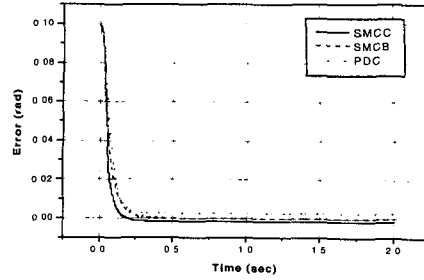
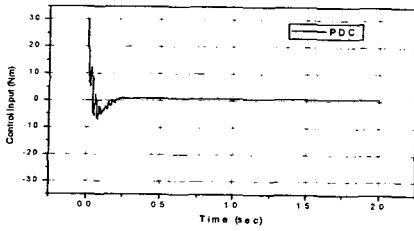
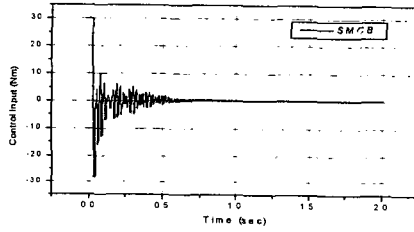
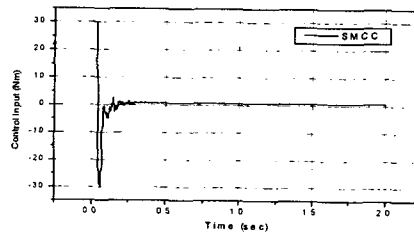


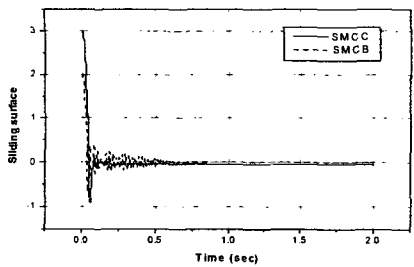
Fig. 4 Photograph of the experimental device



(a) Tracking error



(b) Control input



(c) Locus of the sliding surface

Fig. 5 Experimental results of the step input for the link 2

제어 기법이 과도기에서 강인성이 좋지 않아서 발생하는 슬라이딩 모드의 근본적인 문제이며, 이에 대해서는 PDC가 가장 우수한 성능을 보여 준다.

Fig. 6은 로봇의 끝에 질량 1에서 10kg까지의 질량을 부가하고 0.1rad의 계단과 명령입력에 대해 강인성을 실험한 결과이다. Fig. 5와 같이 정상상태 오차는 SMCB가 가장 우수하게 나타났다. 이 이유는 관절 2의 마찰 영향으로 판단된다. 마찰 요소가 있는 플랜트에 계단과 명령입력을 가하면 운동마찰로 인하여 정상상태오차가 발생하며, 이 오차를 극복하는 방법중의 하나가 입력에 디더링(dithering)을 첨가하는 것이며, SMCB 제어입력의 고주파 성분이 디더링을 첨가한 것과 같은 효과를 일으킨 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾

그러나, Fig. 7에 표시된 직교좌표상의 점 (0.0, 0.4)를 중심으로 하고 반지름 0.1로 하여, 각속도 2π rad/s로 회전하는 운동에 대한 궤적의 최대 오차는 SMCC가 가장 작다. 그리고 Fig. 8에 표시된 점 (0.4, -0.4)에서 점 (0.4, 0.4)로 0.8m/s의 속도로 정속이동하는 직선궤적의 최대오차는 SMCC와 SMCB가 유사한 성능을 나타낸다.

그리고, Fig. 9는 관절 1에 대한 응답 특성을 나타낸다. 0.1rad의 계단과 명령입력을 가했을 때 탑재하중을 1에서 10kg까지 변화시키면서 구한 정상상태 응답 모두 SMCC가 가장 우수하게 나타났다.

실험결과를 통하여 SMCC, SMCB와 PDC의 장단점을 살펴보면, SMCB의 경우 제어입력에 진동이 발생되어 시스템에 나쁜 영향을 미칠 수 있어, 실제 시스템에 적용하기에는 다소 무리가 따를 수 있다. 이에 비해서, 계단과 명령입력에 대한 SMCC의 성능은 SMCB에 비하여 약간 떨어지나, 원 궤적과 직선 궤적에 대한 추적이 있어 성능과 강인성이 우수하고, 채터링이 없는 정속한 제어입력이 생성되어, SMCB에 비하여 훨씬 안정한 시스템을 구성할 수 있다. 본 실험에서 PDC는 정상상태에서 강인 성능은 좋지 않으나 과도기에서 제어입력 특성이 가장 좋게 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 도달법칙과 Lyapunov 안정도 조건을 이용하여 제어법칙이 비교적 단순하고 연속

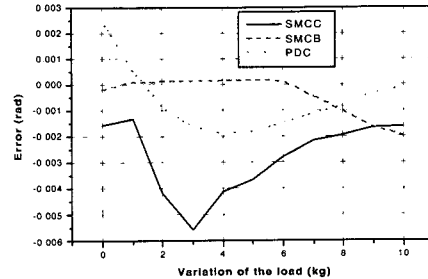


Fig. 6 Steady state error of the link 2 according to the variation of the load

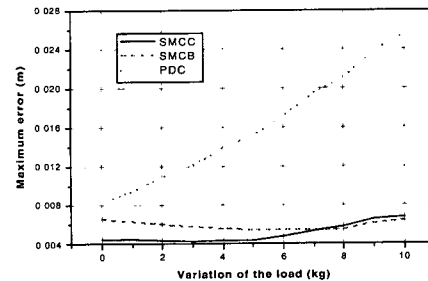


Fig. 7 Maximum tracking error of the circular locus according to the variation of the load

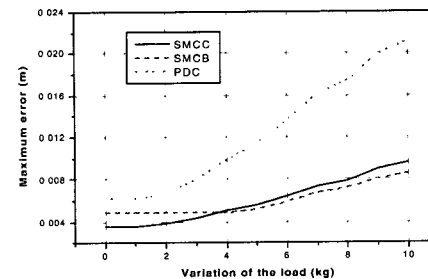


Fig. 8 Maximum tracking error of the straight line command according to the variation of the load

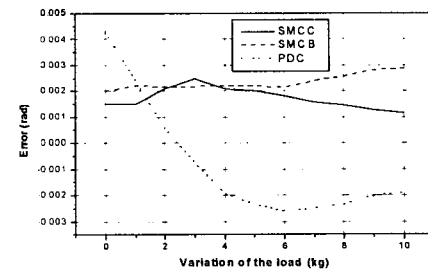


Fig. 9 Steady state error of the link 1 according to the variation of the load

함수형태인 채터링 없는 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 제안된 슬라이딩 모드 제어기는 기존의 슬라이딩 모드 제어기에 비해 설계가 용이하고 채터링이 일어나지 않으며, 제어기 구조상 채터링을 방지하는 기존 기법들에 대한 단점을 대부분 극복할 수 있었다. 또한 슬라이딩 모드 제어의 특징이 그대로 유지되므로 성능과 강인성이 아주 우수한 제어기임을 2축 스카라 로봇 매니퓰레이터에 적용시켜 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다. 향후 연구 과제로는 과도응답 특성을 개선하는 연구와 보다 많은 적용 사례를 통하여 아직 발견되지 않은 단점을 보완하는 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Utkin, V. I., 1992, *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer-Verlag.
- (2) Young, K. D., Utkin, V. I., and Ozguner, U., 1999, "A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control," *IEEE Trans. on Con. Sys. Tech.*, Vol. 7, No. 3, pp. 328~342.
- (3) Edwards, C. and Spurgeon, S. K., 1999, *Sliding Mode Control : Theory and Applications*, Taylor & Francis.
- (4) Decarlo, R. A., Zak, S. H., and Matthews G. P., 1988, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems : A Tutorial," *Proc. IEEE*, Vol. 76, No. 3, pp. 212~232.
- (5) Hung, J. Y. and Gao, W., 1993, "Variable Structure Control : A Survey," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, Vol. 40, No. 3, pp. 2~22.
- (6) Slotine, J., and Sastry, S., 1983, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces, with Application to Robot Manipulators," *Int. J. Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 465~492.
- (7) Bondarev, A. G., Bondarev, S. A., Kostyleva, N. E., and Utkin, V. I., 1985, "Sliding Mode in Systems with Asymptotic State Observers," *Automation and Remote Control*, pp. 679~684.
- (8) Bartolini, G., Ferrara, A., and Usani, E., 1998, "Chattering Avoidance by Second Order Sliding Mode Control," *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, Vol. 43, No. 2, pp. 241~246.
- (9) Erbatur, K., Kaynak, M. O., and Sabanovic, A., 1999, "A Study of Robustness Property of Sliding-Mode Controllers : A Novel Design and Experimental Investigation," *IEEE Trans. on Indus. Elect.*, Vol. 46, No. 5, pp. 1012~1018.
- (10) Xu, J. X. and Cao, W. J., 2000, "Synthesized Sliding Mode and Time Delayed Control for a Class of Uncertain Systems," *Automatica*, Vol. 36, pp. 1909~1914.
- (11) Armstrong, B., Dupont, P., and Canudas, C., 1994, "A Survey of the Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083~1138.