

CTM을 이용한 로봇 매니플레이터의 VSMFC 제어기 설계

(A VSMFC Controller Design of Robot Manipulators Using Computed Torque Method)

朴世承*, 朴鍾國**

(Sei Seung Park and Chong Kug Park)

要 約

로봇 매니플레이터를 제어하는데 있어서, 토오크 계산법을 이용한 새로운 가변구조 모델 추종 제어기를 설계한다. 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 충분조건은 Lyapunov 함수에 의해 유도된다. 기준 모델은 이중 적분기를 사용하고 가속도 입력은 시스템의 안정성과 원하는 성능을 얻기 위하여 비례-미분 제어기로 구성한다. 제안된 제어기법은 매니플레이터 동역학 방정식 각 항들의 상한값과 추정값을 부여함으로써 정확한 매개변수의 지식과 역행렬 계산을 요구하지 않는다. 따라서 모의실험 결과 제안된 제어기가 목적레치의 수렴성이 개선되었음을 보여준다.

Abstract

In the control of robot manipulators, this paper presents a design of a new variable structure model following controller (VSMFC) using computed torque method (CTM). A sufficient condition for the existence of a sliding mode is derived by Lyapunov function. The reference model is a double integrators and the acceleration input consists of a proportional-derivative controller for the purpose of the stabilization of system and the desired performance. The proposed control scheme which consists of upper bounded and estimated value of each term of the manipulator dynamic equation does not require good knowledge of the parameters and the computation of matrix inversion. Therefore the simulation results show that this controller is improved to the convergence of desired trajectories.

I. 서 론

n개의 강체링크로 구성된 로봇 매니플레이터는 상호결합된 비선형 미분 방정식으로 표현되는 복잡한 기계적 시스템이다.

따라서 정확한 궤적추적을 위하여 비선형작용을 효과적으로 보상하여야 하며 이러한 보상을 하기 위하여 정확한 매니플레이터의 상태와 부하 매개변수

*正會員, 朝鮮大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chosun Univ.)

**正會員, 慶熙大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyunghee Univ.)

接受日字: 1990年 6月 8日

를 요구하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로 가변구조 시스템(variable structure systems:VSS) 이론을 이용한 제어기법이 개발되었다.^[1]

VSS특징은 스위칭 평면상에 슬라이딩 모드(sliding mode)가 존재하는 것이며 슬라이딩 모드 동안은 제어 시스템의 매개변수 변동이나 외란에 대하여 거의 영향을 받지 않는다. 이러한 VSS의 둔감성은 비선형성이 심한 로봇트 매니플레이터나 인공위성과 같은 첨단기술분야에 광범위하게 적용되고 있으며 주목할만한 결론을 제시하고 있다.

Young^[7]은 관성행렬 사이의 상호결합과 역행렬 계산문제등의 어려움을 해결하기 위하여 계층제어방법을 사용하였고 Morgan^[10]은 역학 결합 보상방법을 도입하였지만 입력 토오크가 과도할 경우 만족하지 못한 응답을 얻었다. 한편, 적응 메카니즘을 통하여 설정한 목적궤적과의 상태오차를 제거시키는 적응모델 추종제어의 대안으로 Young^[7]은 미지의 매개변수를 갖는 가변구조 모델 추종제어(variable structure model following control;VSMFC)시스템 설계를 선형플랜트에 적용하였다.

또한, Young^[8]은 VSMFC 시스템 설계에 고이득 제환(high gain feedback)을 이용하여 가변이득을 결정하였다. 이경우 선정한 이득값에 의해 상태오차의 수렴성은 향상되었으나 고이득 제환으로 인한 커다란 과도응답이 발생하여 불안정성을 가져올수도 있었으며 또한 이득선정은 반복적인 시행착오 단계를 거쳐 최적의 이득값을 결정할 수 있으므로 선정한 이득값에 대한 안정 판별이 어렵다.

한편 Yeung과 Chen^[9]은 Lyapunov 함수를 이용한 제어기법을 로봇트 매니플레이터에 적용하였는데 역행렬 계산문제를 제거하였지만 SPR(set point regulation)문제에 한정하여 모의실험하였다. Bailey^[8]는 매니플레이터 역학 방정식에서 중력항이 실시간에서 정확하게 계산될 수 있다는 가정하에서 샘플링 시간을 0.5m초로 산정하여 입력 토크를 계산하였다. 실제 로봇트 매니플레이터에 적용하는데 있어서 어려움이 제기되었다.

본 논문은 이상의 문제점을 해결하기 위하여 일반적인 불연속 입력결정에 이용하는 전형적인 슬라이딩 모드 존재조건 $\dot{s} < 0$ 대신에 Lyapunov 함수를 도입하여 n개의 자유도를 갖는 로봇트 매니플레이터에 쉽게 적용할 수 있는 VSMFC 제어기를 설계하였다. 먼저, 목적궤적의 정확한 추적을 기하도록 기준모델을 간단한 이중적분기로 구성하였고 기준모델의 입력력은 매니플레이터 가속도로 대처한 토오크 계산법

을 사용하였다. 토오크 입력은 로봇트 매니플레이터 역학 방정식에서 각 항들의 상한값과 매개변수(즉, 매니플레이터의 질량, 부하등)의 추정치로 구성되었기 때문에 매개변수들의 정확한 값을 필요로 하지 않았다.

이상에서 제시한 VSMFC 제어기의 성능을 검토하기 위해 2자유도 매니플레이터에 적용하여 모의실험 하였다.

II. 슬라이딩 모드 제어

비선형 동력한 시스템을 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{x}(t) = f(t, x, u); x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

가변구조 시스템은 상태궤적이 스위칭 평면에 도달하면 시스템의 구조를 바꾸도록 하는 불연속 제어 입력을 갖고 있기 때문에 이같은 불연속 입력 즉 가변구조 제어입력은 다음과 같이 정의한다.

$$u_i(t, x) = \begin{cases} u_i^+(t, x) & \forall s_i(e) > 0 \\ u_i^-(t, x) & \forall s_i(e) < 0, u_i^+ \neq u_i^-, i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

여기서, $s(e) = 0$ 는 오차 상태 공간에서 스위칭 방정식으로써 다음과 같다.

$$s(e) = [C \ I] \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

여기서, $C = \text{diag}[c_1, c_2, \dots, c_n]$, $c_i > 0$, I는 항등행렬이다.

스위칭 평면 $s(e)$ 상이나 부근에서 슬라이딩 운동이 일어나면 상태궤적은 계속되는 다음 시간까지 스위칭 평면에 도달, 또는 잔존하게 된다. 이 경우를 슬라이딩 모드라하고 시스템은 매개변수 변동이나 외란에 둔감한 특징을 가지며 스위칭 평면을 결정하는 벡터C의 선택에 의해 좌우된다.^[6]

III. 로봇트 매니플레이터의 동력학 모델

n개의 조인트로 구성된 매니플레이터 동력학 방정식은 일반적으로 Lagrangian 방법을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \right) = \tau(t) \quad (4)$$

여기서, q, \dot{q} 는 조인트 좌표계에서 $n \times 1$ 위치, 속도 벡터이고 $\tau(t)$ 는 구동기에 의해 공급되는 $n \times 1$ 구동 토오크 벡터이다.

(4)식의 L은 lagrangian 함수로써 다음과 같이 주어진다.

$$L(q) = K(q, \dot{q}) - p(q) \quad (5)$$

여기서 $K(q, \dot{q})$ 는 매니플레이터의 운동에너지이고 $P(q)$ 는 위치에너지이다. (5)식을 (4)식에 대입하면 마찰 또는 외란이 없는 경우 로봇 매니플레이터의 비선형 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau(t) \quad (6)$$

여기서, $D(q)$ 는 $n \times n$ 대칭 정정치 관성모멘트 행렬, $B(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 $n \times 1$ 코리올리시힘과 원심력 벡터, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 중력 벡터이다.

(6)식의 로봇 매니플레이터 역학 방정식이 복잡하지만 제어기 설계를 용이하게 하는 몇가지 특성이 있는데 그중 하나가 koditschek,^[2] Arimoto^[11]에 의해 증명된 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$B(q, \dot{q}) = 1/2 [\dot{D}(q) - J(q, \dot{q})] \quad (7)$$

여기서, J 는 skew symmetric 행렬이다.

IV. Lyapunov 방법에 의한 VSMFC설계

제어시스템의 구성방법에 있어서 기준모델은 일반적인 선형모델을 선정하는데 본 논문에서는 다음과 같은 간단한 이중 적분기를 기준모델로 택한다.

$$\frac{d}{dt}q_m = \dot{q}_m, \quad \frac{d}{dt}\dot{q}_m = u \quad (8)$$

(8)식에서 q_m, \dot{q}_m 은 기준모델의 $n \times 1$ 위치, 속도벡터이고 기준입력 u 는 실제 측정하는데 어려움이 있는 매니플레이터 가속도를 대치하기 위하여 토오크 계산법(computed torque method)을 사용한다. 이 가속도 입력은 시스템을 안정화 시키고 목적 궤적의 추적을 위해 비례미분(PD) 제어기로 구성되며 또한, 기준모델의 입력으로 사용한다.

$$u(t) = \ddot{q}_d(t) + K_v(\dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)) + K_p(q_d(t) - q(t)) \quad (9)$$

여기서, q_d, \dot{q}_d 및 \ddot{q}_d 는 목적궤적의 위치, 속도 및 가속도 $n \times 1$ 벡터이다. (9)식에서 이득행렬 K_p 와 K_v 는 $n \times n$ 대각행렬로써 다음과 같은 오차 특정방정식의 근이 복소 좌반평면에 존재하도록 결정한다.

$$p^2 \epsilon + K_{vp}\epsilon + K_{pe} = 0 \quad (10)$$

여기서, $p = d/dt$ 인 미분 연산자이고 $\epsilon = q_d(t) - q(t)$ 는 추적 오차이다. (10)식은 제어시스템의 추적 오차를 억제하는 미분 방정식이며, K_v 와 K_p 의 값을 적절히 선정하면 이 미분 방정식의 해를 원하는 임계값

을 특성을 얻을 수 있으며 오차는 오버슈트(overshoot)를 일으키지 않는 가장 빠른 이차 선형 방법에 의해 억제된다. 로봇 매니플레이터와 기준모델 사이의 상태오차 방정식은 다음과 같이 정의한다.

$$e = q_m - q \quad (11a)$$

$$\dot{e} = \dot{q}_m - \dot{q} \quad (11b)$$

$$\ddot{e} = \ddot{q}_m - \ddot{q} = -D^{-1}(q)(\tau - B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)) + u \quad (11c)$$

여기서, $e, \dot{e}, \ddot{e} \in R^{n \times 1}$ 이다.

스위칭 평면은 기준모델과 매니플레이터 사이의 상태오차를 사용하여 고유치에 의존한 슬라이딩 모드 방정식은 다음과 같이 정의한다.

$$s(q, q_m) = c(q_m - q) + (\dot{q}_m - \dot{q}) \quad (12a)$$

$$s(e, \dot{e}) = ce + \dot{e} \quad (12b)$$

$$\dot{s}(\dot{e}, \ddot{e}) = c\dot{e} + \ddot{e}, \quad s \in R^{n \times 1} \quad (12c)$$

플랜트 상태궤적이 빠른 시간내에 스위칭 평면에 도달할 수 있는 슬라이딩 운동을 하는 제어입력이 요구되며 비선형 시스템의 상태궤적이 스위칭 평면 부근에서 떨림현상을 줄이기 위하여 제어입력을 등가 제어입력으로 대치하면 (11c)식을 (12c)식에 대입하고 $s=0$ 으로 놓으면 등가 제어입력은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{eq} = D(q)u + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D(q)c\dot{e} \quad (13)$$

(13)식에서 $D(q), B(q, \dot{q})\dot{q}, G(q)$ 는 매니플레이터 구조와 매니플레이터가 운반하는 부하에 종속되는 매개변수들이기 때문에 정확한 값을 얻는것이 어렵다. 따라서 추정근사식을 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\tau}_{eq} = \tau_{eq} + \Delta \tau_{eq} \quad (14)$$

여기서, $\hat{\tau}_{eq}$ 는 추정된 값을 의미하며, $\Delta \tau_{eq}$ 는 매개변수 변화, 가변부하와 외란에 의해서 야기되는 미지의 역학에 대응한다. 따라서 실제 제어입력 τ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \hat{\tau}_{eq} + \Delta \tau \quad (15)$$

여기서, $\Delta \tau$ 는 슬라이딩 모드 상태의 제어입력이며 $\Delta \tau_{eq}$ 의 영향을 제거하기 위해 사용된다. (15)식에서 $\hat{\tau}_{eq}$ 는 다음과 같은 식으로 대치된다.

$$\hat{\tau}_{eq} = \hat{D}(q)u + \hat{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{D}(q)c\dot{e} \quad (16)$$

(13)식을 식(12)에 대입하면

$$\dot{s}(e, \dot{e}) = D^{-1}(q) (\tau_{eq} - \tau) \quad (17)$$

이고, 다시 식(15)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(e, \dot{e}) &= D^{-1}(q) (\tau_{eq} - \hat{\tau}_{eq} - \Delta\tau) \\ &= D^{-1}(q) (\tau_{eq} - \tau_{eq} - \Delta\tau_{eq} - \Delta\tau) \\ &= -D^{-1}(q) (\Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) \end{aligned} \quad (18)$$

[정리] 식(15)에서 $\Delta\tau$ 는 다음과 같은 방정식으로 표현한다.

$$\Delta\tau = As + K \operatorname{sgn}(s) \quad (19)$$

여기서, A 는 $n \times n$ 대칭 정정치행렬이고, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 는 부호함수로써

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & As(e, \dot{e}) > 0 \\ 0 & As(e, \dot{e}) = 0 \\ -1 & As(e, \dot{e}) < 0 \end{cases}$$

이고, 식(19)에서 K 는 다음 조건을 만족하도록 정의한다.

$$K \geq |\bar{B}(q, \dot{q})s - \Delta\tau_{eq}| \quad (20)$$

여기서, $\bar{B}(q, \dot{q})$ 는 $B(q, \dot{q})$ 의 상한값을 의미하며 $\Delta\tau_{eq}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\tau_{eq} = \bar{D}(q)u + \bar{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \bar{G}(q) + \bar{D}(q)c\dot{e} \quad (21)$$

여기서, $\bar{D}(q) = \bar{D}(q) - \hat{D}(q)$

$$\bar{B}(q, \dot{q}) = \bar{B}(q, \dot{q}) - \hat{B}(q, \dot{q})$$

$$\bar{G}(q) = \bar{G}(q) - \hat{G}(q) \text{이다.}$$

$\bar{D}(q), \bar{B}(q, \dot{q}), \bar{G}(q)$ 는 $\hat{D}(q), \hat{B}(q, \dot{q})$ 및 $\hat{G}(q)$ 의 상한값이며 $\bar{D}(q), \bar{B}(q, \dot{q}), \bar{G}(q)$ 는 각각 $D(q), B(q, \dot{q})$ 및 $G(q)$ 의 추정치이다. 그러면 $e(t)$ 의 제곱은 모든 초기조건에 대하여 스위칭 평면 $s=0$ 에 도달하며 $s=0$ 에서, 대국적, 점근적으로 안정하다.

[증명] 제안된 VSMFC 제어기의 안정도를 증명하고 식(15)으로 표현되는 시스템의 슬라이딩 모드 존재를 보장하기 위해 다음과 같은 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V(t) = 1/2 s^T(e, \dot{e})D(q)s(e, \dot{e}) \quad (22)$$

식(22)을 시간 t 에 대해 미분하고 식(18)을 사용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 1/2 (\dot{s}^T Ds + s^T \dot{D}s + s^T \dot{D}s) \\ &= s^T \dot{D}s + 1/2 s^T \dot{D}s \\ &= -s^T (\Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) + 1/2 s^T \dot{D}s \\ &= s^T (Bs - \Delta\tau_{eq} - \Delta\tau) + 1/2 s^T \dot{J}s \end{aligned} \quad (23)$$

식(19)을 식(23)에 대입하면, $1/2 s^T \dot{J}s$ 는 식(7)에 의해 zero이므로^[3] 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{V}(t) = s^T (\bar{B}s - \Delta\tau_{eq} - As - K \operatorname{sgn}(s)) \quad (24)$$

여기서, $|\bar{B}s - \Delta\tau_{eq}| \leq K$ 는 식(20)에 의하여 식(24)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V}(t) = -s^T As \leq 0 \quad (25)$$

한편 모든 $t > 0$ 에 대하여 e, \dot{e} 가 한정되고 $0 < \|D(q)_{\min}\| = a \leq \|D(q)\| \leq \|D(q)_{\max}\| = b < \infty$ 이라고 가정하면

$$\dot{V}(t) \leq -[\lambda_{\min}(A)/b]V \quad (26)$$

가 되므로 아래와 같은 조건이 성립한다.

$$1/2 a|s|^2 \leq V \leq 1/2 b|s|^2 \quad (27)$$

따라서 $t \rightarrow \infty$ 일때 $|s| \rightarrow 0$ 이 되므로 제안한 VSMFC는 식(11)의 오차방정식에 대하여 대국적 점근적으로 수렴함을 보증한다. (Q. E. D)

그리하여 최종적인 제어입력 τ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{\tau}_{eq} + \Delta\tau \\ &= \hat{D}(q)u + \hat{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{D}(q)c\dot{e} + As + K \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (28)$$

그림 1은 본 논문에서 제안한 VSMFC 제어기 블록선도이다.

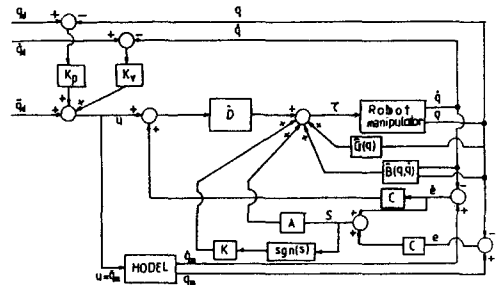


그림 1. VSMFC 제어기의 블록선도
Fig. 1. Block diagram of the VSMFC controller.

V. 모의실험

Lyapunov 안정도 이론을 이용한 VSMFC 제어기를 그림2와 같은 2개의 조인트를 갖는 로봇트 매니플레이터에 적용하여 모의실험을 하였다. 매니플레이터 동역학 방정식은 다음과 같다.^[4]

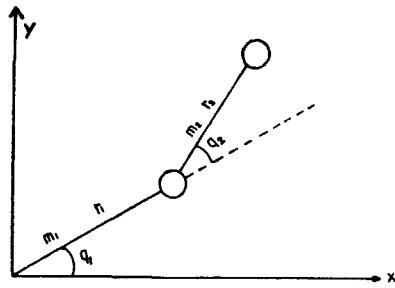


그림 2. 2링크 매니퓰레이터 모델
Fig. 2. Two-link manipulator model.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1+m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos(q_2) \\ m_2r_2^2 + m_2r_1r_2\cos(q_2) \\ m_2r_2^2 \\ m_2r_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_2r_1r_2\dot{q}_1\sin(q_2) & -m_2r_1r_2(q_1+\dot{q}_1)\sin(q_2) \\ m_2r_1r_2\dot{q}_1\sin(q_2) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1+m_2)gr_1\cos(q_1) + m_2gr_2\cos(q_1+q_2) \\ m_2gr_2\cos(q_1+q_2) \end{bmatrix}$$

여기서, m_1, m_2 는 링크1, 링크2의 질량이고, r_1, r_2 는 각 링크의 길이이며, g 는 중력가속도이다. 관성행렬 $D(q)$, 코리올리스항 $B(q, \dot{q})$ 및 중력항 $G(q)$ 의 상한 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |D_{11}| &\leq (m_1+m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2 = \bar{D}_{11} \\ |D_{12}| &\leq m_2r_2^2 + m_2r_1r_2 = \bar{D}_{12} \\ |D_{21}| &\leq m_2r_2^2 + m_2r_1r_2 = \bar{D}_{21} \\ |D_{22}| &\leq m_2r_2^2 = \bar{D}_{22} \\ |B_{12}| &\leq m_2r_1r_2|\dot{q}_2| = \bar{B}_{11} \\ |B_{22}| &\leq m_2r_1r_2|\dot{q}_1 + \dot{q}_2| = \bar{B}_{12} \\ |B_{11}| &\leq m_2r_1r_2|\dot{q}_1| = \bar{B}_{21} \\ |B_{21}| &\leq 0 = \bar{B}_{22} \\ |G_{11}| &\leq (m_1+m_2)gr_1 + m_2gr_2 = \bar{G}_{11} \\ |G_{21}| &\leq m_2r_2g = \bar{G}_{21} \end{aligned}$$

로봇 매니퓰레이터 동력학 방정식에서 모의실험을 간소화 하기 위하여 링크의 길이 r_1, r_2 와 중력가속도 g 는 정확하게 알고 있다고 가정한다. 첫번째 조인트 실제의 질량과 길이는 $m_1=15.91\text{kg}, r_1=0.432\text{m}$ 이고 두번째 조인트 질량과 길이는 $m_2=11.36\text{kg}, r_2=0.432\text{m}$ 이지만 $m_1=12.8\text{kg}, m_2=9.6\text{kg}$ 으로 추정되었다고 가정하여 모의실험 하였다. 목적제적과 부하의 변화에 대해 성능을 조사하기 위하여 목적제적은 아

래와 같이 두가지 제적으로 선정하였다.

[목적제적의 설정]

case(1)

$$q_{d1} = \begin{cases} -90^\circ + 52.5^\circ(1 - \cos 1.26t) & 0 \leq t \leq 2.5 \\ 15^\circ & 3 \geq t \geq 2.5 \end{cases}$$

$$q_{d2} = \begin{cases} 170^\circ - 60^\circ(1 - \cos 1.26t) & 0 \leq t < 2.5 \\ 50^\circ & 3 \geq t \geq 2.5 \end{cases}$$

초기위치 오차는 각각 (+5°, -5°)이고, 초기속도 오차는 0으로 선택하였다.

case(2)

$$q_{d1} = \pi/2 + \cos 2t - \cos 4t$$

$$q_{d2} = -\pi/2 + \cos t - \cos 3t$$

초기위치 오차는 각각 (10°, -10°)이고, 초기속도 오차는 0으로 선택하였다.

다음 모의실험에서 사용한 스위칭 평면 기울기 C와 제어기의 이득은 다음과 같이 선정하여 수행해 보았다.

- (a) $c=10, A=20, K_P=400, K_V=40$
- (b) $c=10, A=20, K_P=100, K_V=20$
- (c) $c=5, A=10, K_P=100, K_V=20$
- (d) $c=5, A=10, K_P=400, K_V=40$

이같이 수행해본 결과 (a)의 경우가 바람직하며 [그림 3], [그림4]에 나타냈으며 샘플링 간격은 0.1msec로 하였다.

부하가 가변하는 경우(팔호안은 부하의 추정값임) 시간에 따른 부하의 추정값은

case (1)인 경우

- $0 < t \leq 1$ 일때 0kg(0Kg)
- $1 < t \leq 2$ 일때 3Kg(2.4Kg)
- $2 < t \leq 3$ 일때 0Kg(0Kg)

case (2)인 경우

- $0 < t \leq 2$ 일때 0Kg(0Kg)
- $2 < t \leq 3$ 일때 3Kg(2.4Kg)
- $4 < t \leq 6$ 일때 5(Kg(4.2Kg)
- $6 < t \leq 8$ 일때 3Kg(2.4Kg)
- $8 < t \leq 10$ 일때 0Kg(0Kg)으로 추정되었다고 가정했다.

부하의 변화에 대하여, (9)식에서 기준 입력의 이득 K_P, K_V 가 클수록 부하 매개변수 변동에도 조인트 위치 추적오차는 강인하게 0에 수렴함을 보여준다. 또한, 스위칭 평면기울기 C도 클수록 도달성은 빠르고 속도 추적오차도 K_P, K_V, A, C 값이 클수록 0에 빨리 수렴하였으나 떨림현상이 약간 발생했음을 알 수 있었다. 토오크 입력은 이득값이 적은 경우 약간더 커

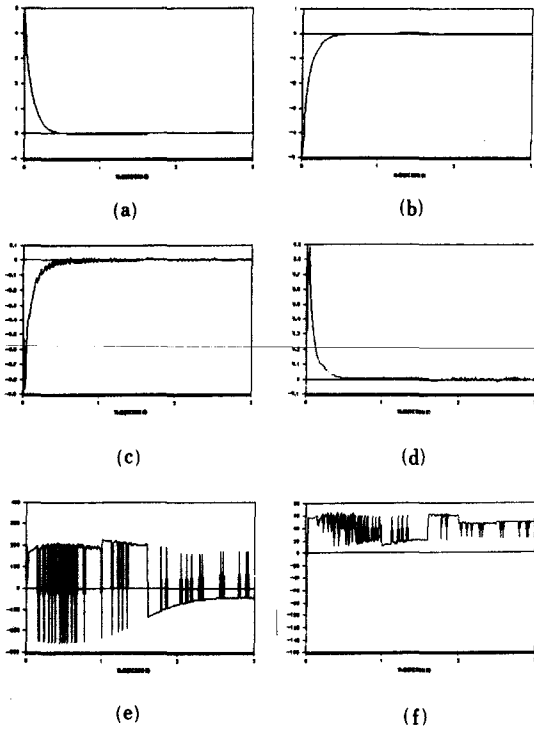


그림 3. 가변 부하일때 목적궤적(1)에 의한 결과
 (a) 조인트 1의 위치 추적오차
 (b) 조인트 2의 위치 추적오차
 (c) 조인트 1의 속도 추적오차
 (d) 조인트 2의 속도 추적오차
 (e) 조인트 1의 토크 입력
 (f) 조인트 2의 토크 입력

Fig. 3. Results by desired trajectory(1) when varying payload.
 (a) Position tracking error of joint 1,
 (b) Position tracking error of joint 2,
 (c) Velocity tracking error of joint 1,
 (d) Velocity tracking error of joint 2,
 (e) Torque input of joint 1,
 (f) Torque input of joint 2.

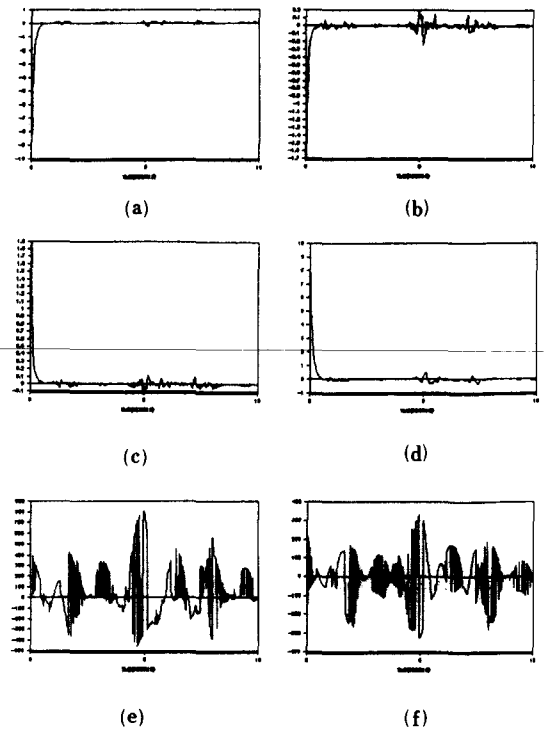


그림 4. 가변 부하일때 목적궤적(2)에 의한 결과
 (a) 조인트 1의 위치 추적오차
 (b) 조인트 2의 위치 추적오차
 (c) 조인트 1의 속도 추적오차
 (d) 조인트 2의 속도 추적오차
 (e) 조인트 1의 토크 입력
 (f) 조인트 2의 토크 입력

Fig. 4. Results by desired trajectory(2) when varying payload.
 (a) Position tracking error of joint 1,
 (b) Position tracking error of joint 2,
 (c) Velocity tracking error of joint 1,
 (d) Velocity tracking error of joint 2,
 (e) Torque input of joint 1,
 (f) Torque input of joint 2.

졌으며 상태궤적이 스위칭 평면에 빨리 도달하기 위해서 제어이득을 크게 정함으로써 이로 인해 슬라이딩 모드에서 떨림이 커지는데 이에 비하여 제안된 제어기의 경우 식(15)에 의해 떨림현상이 줄어들었다. 본 논문에서 제안된 VSMFC 제어기는 매우 빠른 시간내에 목적궤적을 추적하며 부하의 변화에도 둔 감함을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 VSMFC 상태궤적의 스위칭평면의

도달속도 및 상태오차를 개선시키기 위하여 슬라이딩 모드 존재조건 $ss < 0$ 대신 Lyapunov 함수를 도입하고 스위칭 평면에 점근적으로 안정할 수 있는 조건을 만족하도록 제어기를 설계하였다.

기준모델은 간단한 이중 적분기로 구성하였고, 매니플레이터에 대한 가속도 입력을 토크 계산법에 의해 발생시켰으며 또한, 기준모델의 입력으로 사용하였다. 로봇트 매니플레이터 동역학 방정식에서 매개변수의 상한값과 추정값을 부여함으로써 정확한 매개변수값을 필요하지 않으며 역행렬 계산을 요구하

지 않으므로 계산시간이 절약되었다. 모의 실험결과로부터 목적제적은 부하 변화에 대해 위치 오차는 떨림이 없이 0으로 수렴하였지만, 반면에 속도오차는 약간의 떨림이 있었으나 0에 수렴함을 보여 주었다.

차후의 연구과제로 잡음 및 외란 또는 비모형화 역학이 존재할 경우 강인한 VSMFC 제어기 설계 그리고 제안한 VSMFC의 직교영역 적용 및 산업용 로봇에 실제 적용해 볼 것이다.

参 考 文 献

- [1] V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-22, pp. 212-222, Apr. 1977.
- [2] D.E. Koditschek, "Natural motion for robot arms," *In. Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 733-735, Las Vegas, 1984.
- [3] E. Bailey and A. Arapostathis, "A sliding mode control for robot manipulators," *Conference on Applied Motion Control*, pp. 199-240, 1986.
- [4] J.J. Craig, "Introduction to Robotic Mechanics & Control." Addison-Wesley Publishing Co., 1986.
- [5] K.S. Yeung and Y.P. Chen, "A new controller design for manipulators using the theory of variable structure systems," *IEEE Trans. Auto. Control*, vol. 33, pp. 212-221, Feb, 1988.
- [6] K-K. D. Young, "Controller design for a manipulator using theory of variable structure systems," *IEEE Trans Systems, Man, and Cybernetics* vol. SMC-8, pp. 101-109, 1978.
- [7] K-K.D. Young, "Design of variable structure model following control systems," *IEEE Trans. Auto, Control* vol. AC-23, pp. 1079-1085, 1978.
- [8] K.D. Young, "A variable structure model following control design for robotics applications," *IEEE Int. Conf. Robotics and Auto.* vol. 3, pp. 540-545, 1986.
- [9] 안수관, 박세승, 배준경, 박종국, "Lyapunov 안정도 이론을 이용한 가변구조 모델 추종 제어기 설계방법," 대한전자공학회 하계종합학술대회, vol. 12, pp. 187-190, 1989.
- [10] R.G. Morgan and U. Özgüner, "A decentralized variable structure control algorithm for robotic manipulators," *IEEE J. Robotics and Auto.*, vol. RA-1, pp. 57-65, Mar. 1985.
- [11] S. Arimoto and F. Miyazaki, "Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulator of sensory capability," *Int. Symp. Robotics Res.*, pp. 783-800, MIT Press, 1984.

著 者 紹 介

朴 世 承 (正會員)

1948年 8月 8日生. 1975年 2月
조선대학교 전자공학과 졸업. 1980
年 2月 조선대학교 대학원 전자
공학과 공학석사. 1987年 2月 경
희대학교 대학원 전자공학과 박
사과정 수료. 1985年 5月 미국

Univ. of Michigan 객원교수. 1986年 1月 미국 Univ.
of Washington 객원교수. 1990年 10月 현재 조선대학
교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 로봇릭스 및
가변구조 시스템 제어 등임.

朴 鍾 國 (正會員) 第27卷 第8號 參照

현재 경희대학교 전자공학과
교수