

收斂速度 向上을 갖는 로봇 매니퓰레이터의 슬라이딩모드 制御

Sliding Mode Control of Robot Manipulators with Improvement of Convergence Rate

朴 世 承* · 朴 鍾 國**
(Sei-Seung Park · Chong-Kug Park)

Abstract- This paper presents the design of a new sliding mode controller to improve the rate of convergence by Lyapunov's stability analysis. The proposed controller shows that the elimination of the steady state position errors can be achieved by replacing the desired trajectory by the virtual reference trajectory. The proposed control scheme which consists of the upper bounded and estimated values of each term of the manipulator dynamic equation does not require good knowledge of the parameters and the computation of matrix inversion. The performance of proposed controller is evaluated by the simulation for a two-link manipulator.

1. 序 論

n 개의 剛體링크로 構成된 로봇 매니퓰레이터는 非線形이 크고 커플링이 심한 非線形 微分方程式으로 記述되는 複雜한 機械的 시스템이다.

따라서 正確한 軌跡追跡을 위하여 非線形作用을 效果의으로 補償하여야 하며 이같은 補償은 正確한 매니퓰레이터의 狀態와 負荷 파라미터를 要求하게 된다. 이러한 問題點을 解決하기 위한 可變構造 시스템(Variable Structure Systems: VSS) 理論을 利用한 制御技法이 開發되었다. [1, 2, 3]

VSS特徵은 高速(理論의으로 無限大) 스위칭 歸還制御로써 각각의 歸還經路 利得값이 可變되어 시스템 狀態를 스위칭 平面上에 殘存하도록 슬라이딩 모드(Sliding mode)가 存在하는 것이며 슬라이딩 運動 동안은 시스템의 파라미터 變動이나 外亂에 대한 強靱性(不確實性에 대한 鈍感性) 때문에 거의 影響을 받지 않는다.

슬라이딩 모드制御는 스위칭 平面의 選定과 슬라이딩 모드가 存在하도록 하는 不連續制御 入力の 選擇에 의해 左右된다.

따라서, 슬라이딩 모드制御는 外部의 影響에 無關하므로 본래의 시스템 應答이 安定되지 못하거나 시스템 파라미터 豫測이 困難하고 除去不能인 外亂 혹은 시스템 相互 作用이 크게 影響을 주는 境遇에 適合하다.

VSS理論을 最初에 로봇 시스템에 適用한

*正 會 員 : 朝鮮大 工大 電子工學科 副教授
 **正 會 員 : 慶熙大 工大 電子工學科 教授 工博
 接受日字 : 1990年 8月 1日
 1次修正 : 1991年 1月 28日
 2次修正 : 1991年 3月 8日

Young[2]은 로봇 모델을 아날로그 컴퓨터로 模擬하고 VSS制御技法을 遂行하여 조인트 位置 및 速度軌跡을 오실로스코프를 통하여 確認하였다.

Bailey와 Arapostathis[3]는 리아프노프 安定度 理論에 의해 매니플레이터에 適用한 模擬 實驗結果 狀態軌跡의 슬라이딩 平面 到達時間이 約 0.22 秒나 걸리는 反面에 채터링現象은 줄어들었으며 조인트 位置 및 速度誤差에 대한 過度狀態보다는 正常狀態의 收斂性을 立證하였다.

한편, Slotine과 Li[4]는 適應制御 알고리즘을 利用하여 軌跡 追跡誤差를 위한 假想基準軌跡에 의하여 正常狀態의 位置誤差를 除去하는 適應制御機를 設計하였다.

本 論文에서는 리아프노프 安定度 解析에 의한 슬라이딩 平面上에 漸近的 安定條件을 滿足하도록 收斂速度 向上을 갖는 새로운 슬라이딩모드 制御機를 設計하였다.

提案된 制御機는 바람직하지 못한 正常狀態의 位置誤差를 除去하기 위하여 Slotine의 假想 基準軌跡 方法을 適用하였으며[4] 토크 入力은 매니플레이터 動力學 方程式에서 各項들의 上限값과 負荷 파라미터의 推定值로 構成되었기 때문에 파라미터들의 正確한 값을 要求하지 않는다.

이상에서 提示한 슬라이딩모드 制御機의 高速 收斂性과 強靱性을 檢討하기 위하여 몇가지 例들 들어 2自由度 매니플레이터에 適用하여 模擬實驗 하였다.

2. 슬라이딩 모드 制御

非線形 動力學 시스템을 다음과 같이 表現한다.

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

슬라이딩모드 시스템은 狀態軌跡이 스위칭 平面에 到達하면 시스템의 構造를 바꾸도록 하는 不連續 制御入力を 갖고 있기 때문에 이같은 不連續 入力 즉 슬라이딩모드 制御入力は 다음과 같이 定義한다.

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

여기서, $s(e)=0$ 는 誤差 狀態 空間에서 스위칭 方程式으로써 다음과 같다.

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

여기서, $C = \text{diag}[c_1, c_2, \dots, c_n]$, $c_i > 0$, I 는 $n \times n$ 恒等行列이고 e 는 n 벡터이다.

스위칭 平面 $s(e)$ 상이나 附近에서 슬라이딩 運動이 일어나면 狀態軌跡은 繼續되는 다음時間까지 스위칭 平面에 到達, 또는 殘存하게 된다. 이 경우를 슬라이딩 모드라 하고 시스템은 파라미터 變動이나 外亂에 鈍感한 特徵을 가지며 스위칭 平面을 決定하는 벡터 C 의 選擇에 의해 左右된다.

3. 로봇 매니플레이터의 動力學 모델

n 개의 조인트로 構成된 매니플레이터 動力學 方程式은 一般의 Lagrangian 方法을 利用하여 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 座標系에서 $n \times 1$ 位置, 速度 벡터이고 $\tau(t)$ 는 驅動器에 의해 供給되는 $n \times 1$ 驅動 토크 벡터이다.

(4)式的 L 은 Lagrangian 函數로써 다음과 같이 주어진다.

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

여기서, $K(q, \dot{q})$ 는 매니플레이터의 運動에너지이고 $P(q)$ 는 位置에너지이다.

(5) 式을 (4) 式에 代入하면 摩擦 또는 外亂이 없는 境遇 로봇 매니플레이터의 非線形 動力學 方程式은 다음과 같다.

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

여기서, $D(q)$ 는 $n \times n$ 對稱 正定值 慣性모멘트 行列, $B(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 $n \times 1$ 코리올리스힘과 遠心力 벡터, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 重力 벡터이다.

(6)式的 로봇 매니플레이터 力學 方程式이 複雜 하지만 制御機 設計를 容易하게 하는 몇가지 特性이 있는데 그중 하나가 Koditschek[7]에 의해서 證明된 것으로 다음과 같이 表現된다.

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

여기서, J 는 skew symmetric 行列이다.

4. Lyapunov 方法에 의한 슬라이딩모드 制御機

슬라이딩모드 制御機의 設計目的은 로봇 매니플레이터 狀態軌跡 q 가 目的軌跡 q_d 에 接近하는 過度狀態 동안에 슬라이딩 모드가 일어나도록 하는데 있다.

實際 로보트 매니플레이터와 目的軌跡 사이의 位置 및 速度誤差 方程式은 다음과 같이 定義한다.

$$\tilde{q} = q - q_a \quad (8a)$$

$$\dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_a \quad (8b)$$

$$\ddot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_a \quad (8c)$$

여기서 q_a , \dot{q}_a 및 \ddot{q}_a 는 各各 $n \times 1$ 目跡軌跡의 位置, 速度 및 加速度 벡터이다.

그러면, 바람직하지 못한 正常狀態의 位置誤差는 이들을 슬라이딩 平面上에 놓이도록 制限함으로써 除去할 수 있다.

$$\dot{\tilde{q}} + C\tilde{q} = 0 \quad (9)$$

여기서 C 는 固有值로써 右半 平面內에 存在하는 常數對角行列이다.

(9)式을 다시 目的軌跡 q_a 를 假想 基準軌跡 q_v 으로 代置함으로써 다음과 같이 주어진다.

$$q_v = q_a - C \int_0^t \tilde{q} dt \quad (10)$$

(10)式에 의하여 \dot{q}_a 와 \ddot{q}_a 는 다음과 같이 表現된다.

$$\dot{q}_v = \dot{q}_a - C\tilde{q} \quad (11a)$$

$$\ddot{q}_v = \ddot{q}_a - C\dot{\tilde{q}} \quad (11b)$$

따라서 슬라이딩 平面向 다음과 같이 定義하면

$$s = \dot{q} - \dot{q}_v = 0 \quad (12a)$$

$$\dot{s} = \ddot{q} - \ddot{q}_v = 0 \quad (12b)$$

이고 (11a)式을 (12a)式에 代入하면, 슬라이딩모드 方程式은 다음과 같다.

$$s = \tilde{q} + C\tilde{q} = 0 \quad (13)$$

한편, (6)式을 (12b)式에 代入하면

$$\dot{s} = \ddot{q} - \ddot{q}_v = D(q)^{-1}[\tau - B(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) - D(q)\ddot{q}_v] \quad (14)$$

이고, 플랜트 狀態軌跡이 빠른 時間內에 스위칭 平面에 到達하게 하는 制御入力이 要求되는데, 이러한 制御入力を 스위칭 平面 附近에서 等價 制御入力으로 代置하면 아래와 같다.

$$\tau_{eq} = D(q)\ddot{q}_v + B(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (15)$$

(15)式에서 $D(q)$, $B(q, \dot{q})\dot{q}$, $G(q)$ 는 매니플레이터 構造와 매니플레이터가 運搬하는 負荷에 從屬되는 파라미터들이기 때문에 正確한 값을 얻는 것이 어렵다. 따라서 推定近似式을 使用하면 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$\tilde{\tau}_{eq} = \tau_{eq} + \Delta\tau_{eq} \quad (16)$$

여기서, $\tilde{\tau}_{eq}$ 는 推定된 값을 意味하며, $\Delta\tau_{eq}$ 는 파라미터 變化, 可變負荷와 外亂에 의해서 惹起되는 未知의 力學에 對應한다.

따라서 實際 制御入力 τ 는 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$\tau = \tilde{\tau}_{eq} + \Delta\tau \quad (17)$$

여기서, $\Delta\tau$ 는 슬라이딩 모드 狀態의 制御入力이며 $\Delta\tau_{eq}$ 의 影響을 除去하기 위해 使用된다.

(17)式에서 $\tilde{\tau}_{eq}$ 는 다음과 같은 式으로 定義한다.

$$\tilde{\tau}_{eq} = \tilde{D}(q)\ddot{q}_v + \tilde{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \tilde{G}(q) \quad (18)$$

(15)式을 (14)式에 代入하면

$$\dot{s} = D^{-1}(q)(\tau - \tau_{eq}) \quad (19)$$

이고, 다시 (17)式을 代入하여 整理하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= D^{-1}(q)(-\tau_{eq} + \tilde{\tau}_{eq} + \Delta\tau) \\ &= D^{-1}(q)(-\tau_{eq} + \tau_{eq} + \Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) \\ &= D^{-1}(q)(\Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) \end{aligned} \quad (20)$$

[定理] (17)式에서 $\Delta\tau$ 는 다음과 같이 定義한다.

$$\Delta\tau = -(As + K\text{sgn}(s)) \quad (21)$$

여기서, A 는 $n \times n$ 對稱 正定值行列이고, $\text{sgn}(\cdot)$ 는 符號函數로써

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases}$$

이고, (21)式에서 K 는 다음과 같이 定義된다.

$$K \geq \max\|\tilde{B}s + \Delta\tau_{eq}\|; \text{ 모든 } s, \Delta\tau_{eq} \text{에 대하여} \quad (22)$$

여기서, $\tilde{B}(q, \dot{q})$ 는 $B(q, \dot{q})$ 의 名成分의 絕對값의 上限값을 意味하며 $\Delta\tau_{eq}$ 는 (15), (16), (18) 式들에 의해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta\tau_{eq} = \tilde{D}(q)\ddot{q}_v + \tilde{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \tilde{G}(q) \quad (23)$$

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

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

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

(23)式에서 $\tilde{D}(q)$, $\tilde{B}(q, \dot{q})$, $\tilde{G}(q)$ 는 $D(q)$, $B(q, \dot{q})$ 및 $G(q)$ 의 上限값이며 $\hat{D}(q)$, $\hat{B}(q, \dot{q})$, $\hat{G}(q)$ 는 各各 $D(q)$, $B(q, \dot{q})$ 및 $G(q)$ 의 推定值이다.

그러면 $\tilde{q} = q - q_a$ 의 軌跡은 모든 初期條件에 대하

여 스위칭 平面 $s=0$ 에 到達하기 때문에 提案된 制御機는 大局的, 漸近的으로 安定하다.

[證明] 提案된 슬라이딩모드 制御機의 安定度를 證明하고 (17)式으로 表現되는 시스템의 슬라이딩모드 存在를 保障하기 위해 다음과 같은 Lyapunov函數를 定義한다.

$$V(t) = 1/2 s^T D(q) s \tag{24}$$

(24)式을 時間 t 에 대해 微分하고 (20)式을 使用하면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 1/2 (\dot{s}^T Ds) + s^T \dot{D}s + s^T D\dot{s} \\ &= s^T (\Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) + 1/2 s^T \dot{D}s \\ &= s^T (Bs + \Delta\tau_{eq} + \Delta\tau) + 1/2 s^T Js \end{aligned} \tag{25}$$

(21)式을 (25)式에 代入하면, $1/2 s^T Js$ 는 (7)式에 의해 zero이므로 [3, 4, 7] 다음과 같이 整理된다.

$$\dot{V}(t) = s^T (\bar{B}s + \Delta\tau_{eq} - As - K\text{sgn}(s)) \tag{26}$$

여기서, $\max \|Bs + \Delta\tau_{eq}\| \leq K$ 으로 定義하였으므로 (26)式은 다음과 같이 整理된다.

$$\dot{V}(t) = -s^T As \leq 0 \tag{27}$$

따라서 提案한 슬라이딩모드 制御機의 追跡誤차는 슬라이딩 平面에 收斂하여 Lyapunov安定條件을 滿足함으로 大局的 漸近的으로 安定하다.

<Q.E.D>

그리하여 最終的인 制御入力 τ 는 (17)式에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \tau &= \bar{\tau}_{eq} + \Delta\tau \\ &= \bar{D}(q)\ddot{q}_v + \bar{B}(q, \dot{q})\dot{q} + \bar{G}(q) \\ &\quad - As - K\text{sgn}(s) \end{aligned} \tag{28}$$

그림 1은 本 論文에서 提案한 슬라이딩모드 制御機 블럭線圖이다.

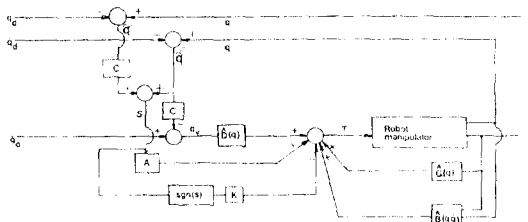


그림 1 슬라이딩모드 制御機의 블럭線圖.

Fig. 1 Block diagram of the sliding mode controller.

5. 模擬實驗

Lyapunov安定度 理論을 利用한 슬라이딩모드 制御機를 그림 2와 같은 2개의 조인트를 갖는 로보트 매니퓰레이터에 適用하여 模擬實驗을 하였다. 매니퓰레이터 動力學 方程式은 다음과 같다.

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

여기서, m_1, m_2 는 링크1, 링크2의 質量이고, r_1, r_2 는 각 링크의 길이이며, 重力加速度는 g 는 $9.8 \text{ N} \cdot \text{m/s}^2$ 이다.

慣性行列 $D(q)$, 코리올리스項 $B(q, \dot{q})$ 및 重力項 $G(q)$ 의 上限값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |D_{11}| &\leq (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2 + 2m_p(r_1 + r_2)^2 = \bar{D}_{11} \\ |D_{12}| &\leq m_2r_2^2 + m_2r_1r_2 + 2m_p r_2(r_1 + r_2) = \bar{D}_{12} \\ |D_{21}| &\leq m_2r_2^2 + m_2r_1r_2 + 2m_p r_2(r_1 + r_2) = \bar{D}_{21} \\ |D_{22}| &\leq m_2r_2^2 + 2m_p r_2^2 = \bar{D}_{22} \\ |B_{11}| &\leq m_2r_1r_2|\dot{q}_2| + 2m_p(r_1 + r_2)\{r_1|\dot{q}_1| + r_2(|\dot{q}_1| + |\dot{q}_2|)\} \end{aligned}$$

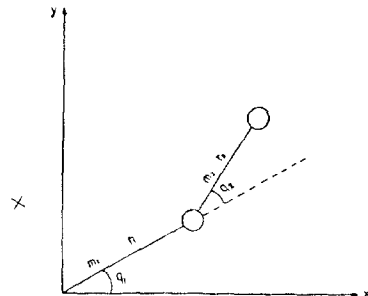


그림 2 2링크 매니퓰레이터 모델.

Fig. 2 Two-link manipulator model.

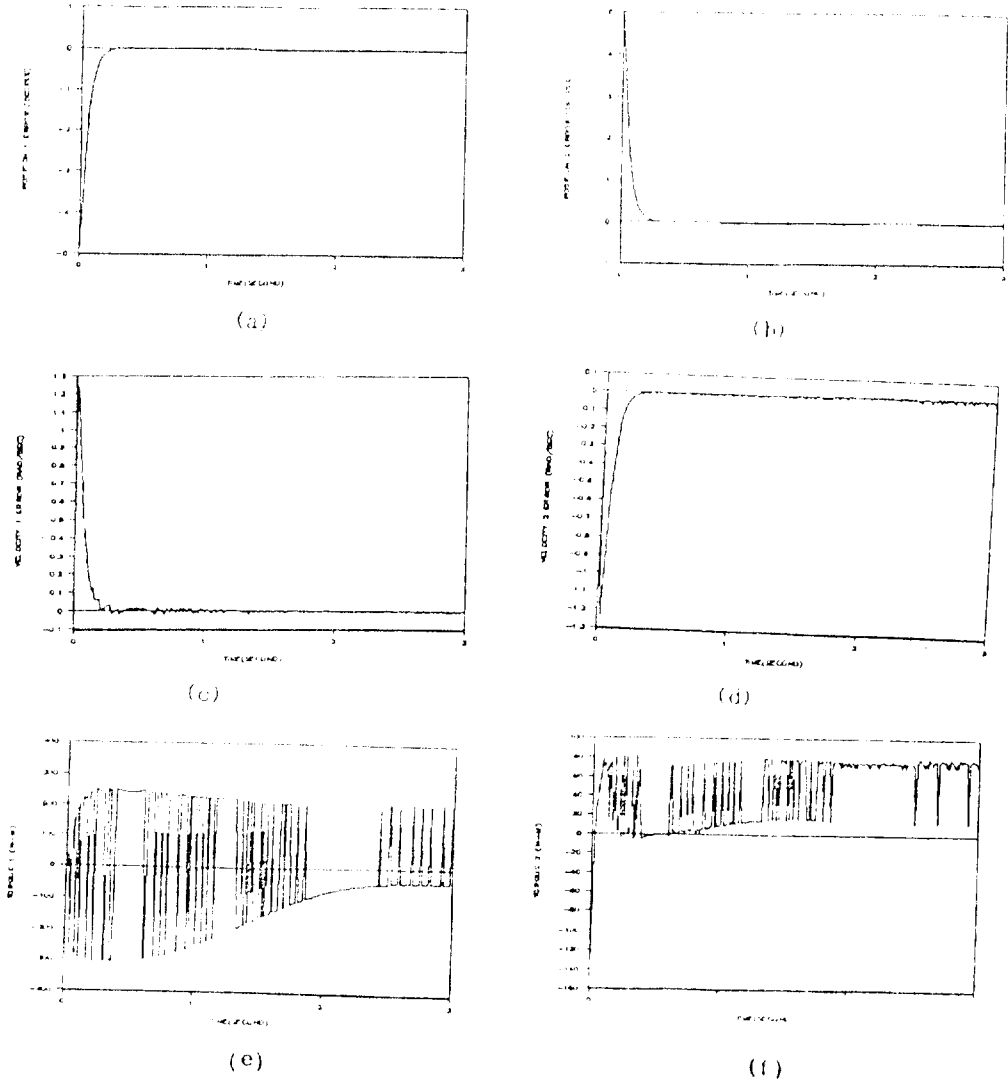


그림 3 固定 負荷일때 目的軌跡(1)에 의한 結果

- (a) 조인트 1의 位置 追跡誤差 (d) 조인트 2의 速度 追跡誤差
- (b) 조인트 2의 位置 追跡誤差 (e) 조인트 1의 토크 입력
- (c) 조인트 1의 速度 追跡誤差 (f) 조인트 2의 토크 입력

Fig. 3 Results by desired trajectory(1) when fixed payload.

- (a) Position tracking error of joint 1 (d) Velocity tracking error of joint 2
- (b) Position tracking error of joint 2 (e) Torque input of joint 1
- (c) Velocity tracking error of joint 1 (f) Torque input of joint 2

$$= \bar{B}_{11}$$

$$|B_{12}| \leq m_2 r_1 r_2 |\dot{q}_1 + \dot{q}_2| + 2m_p r_2 (r_1 + r_2) (|\dot{q}_1| + |\dot{q}_2|)$$

$$= \bar{B}_{12}$$

$$|B_{21}| \leq m_2 r_1 r_2 |\dot{q}_1| + 2m_p r_2 (r_1 |\dot{q}_1| + r_2 |\dot{q}_1| + |\dot{q}_2|)$$

$$= \bar{B}_{21}$$

$$|B_{22}| \leq 2m_p r_2^2 (|\dot{q}_1| + |\dot{q}_2|)$$

$$= \bar{B}_{22}$$

$$|G_{11}| \leq (m_1 + m_2) g r_1 + m_2 g r_2 + m_p (r_1 + r_2) g$$

$$= \bar{G}_{11}$$

$$|G_{21}| \leq m_2 r_2 g + m_p r_2 g = \bar{G}_{21}$$

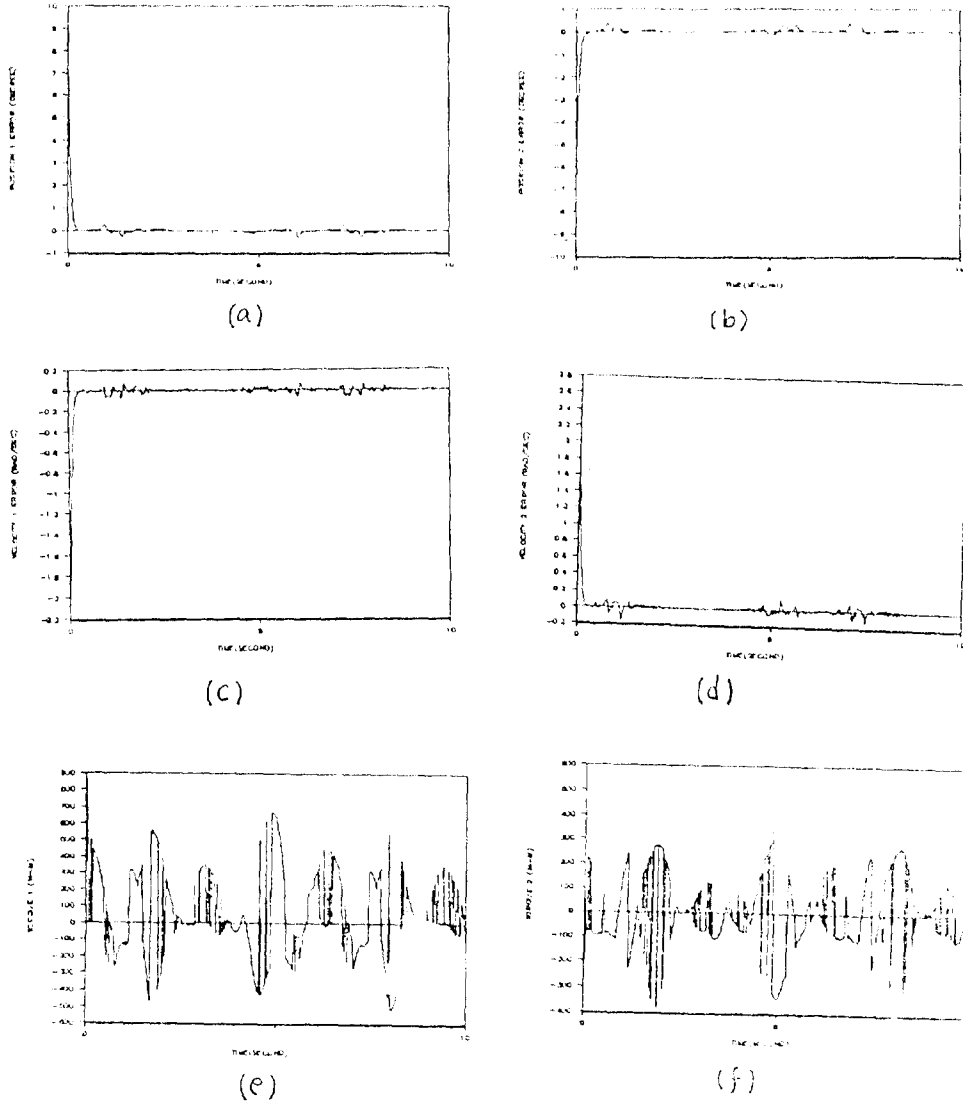


그림 4 固定 負荷일때 目的軌跡(2)에 의한 結果

- (a) 조인트 1의 位置 追跡誤差 (d) 조인트 2의 速度 追跡誤差
- (b) 조인트 2의 位置 追跡誤差 (e) 조인트 1의 토크 入力
- (c) 조인트 1의 速度 追跡誤差 (f) 조인트 2의 토크 入力

Fig. 4 Results by desired trajectory (2) when fixed payload.

- (a) Position tracking error of joint 1 (d) Velocity tracking error of joint 2
- (b) Position tracking error of joint 2 (e) Torque input of joint 1
- (c) Velocity tracking error of joint 1 (f) Torque input of joint 2

로봇트 매니퓰레이터 動力學 方程式에서 模擬實驗을 簡素化 하기 위하여 링크의 길이 r_1, r_2 와 重力加速度 g 는 正確하게 알고 있다고 假定한다. 첫 번째 조인트 實際의 質量과 길이는 $m_1=15.91\text{Kg}$, $r_1=0.432\text{m}$ 이고 두 번째 조인트 質量과 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 推定되었다고 假定하여 模擬實驗을 하였다. 目的軌跡과 負荷의 變化에 대해 性能을 調査하기 위하여 目的軌跡은 아래와 같이 두가지 軌跡으로 選定하였다.

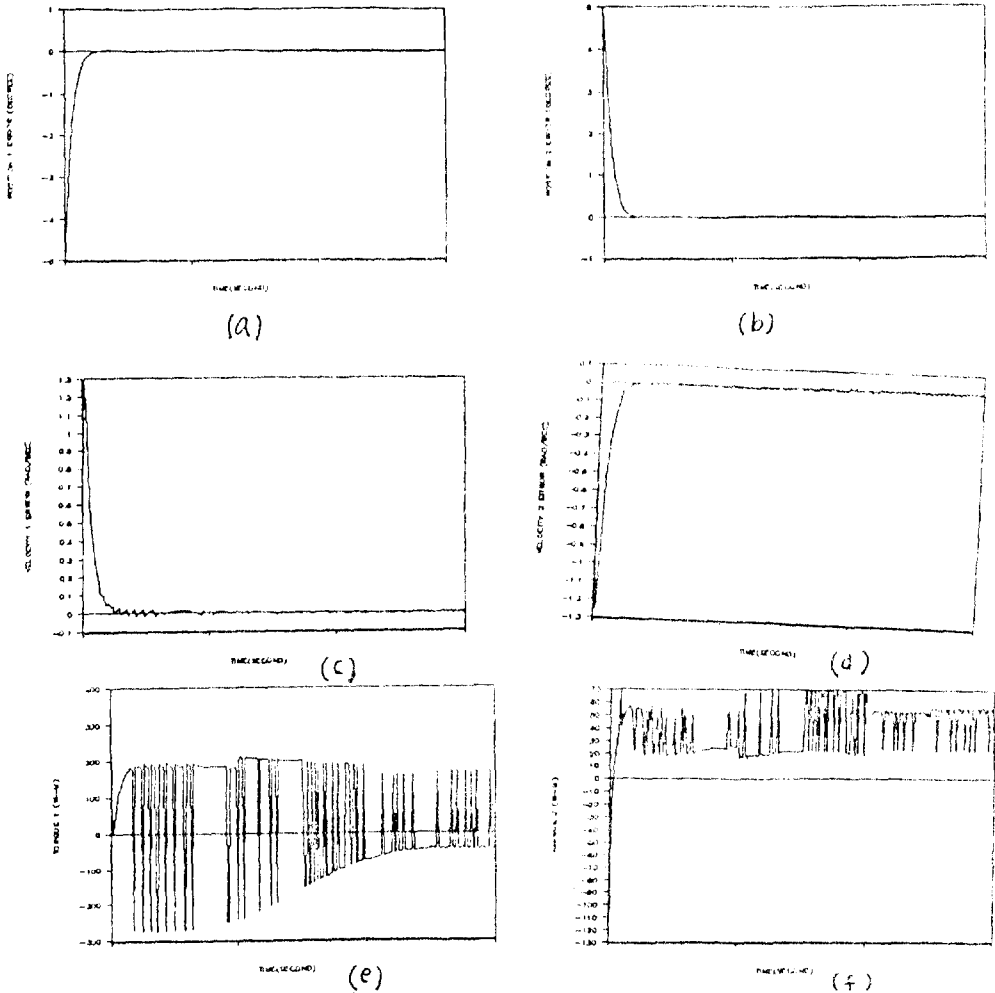


그림 5 可變 負荷일때 目的軌跡(1)에 의한 結果

- (a) 조인트 1의 位置 追跡誤差 (d) 조인트 2의 速度 追跡誤差
- (b) 조인트 2의 位置 追跡誤差 (e) 조인트 1의 토크 입력
- (c) 조인트 1의 速度 追跡誤差 (f) 조인트 2의 토크 입력

Fig. 5 Results by desired trajectory (1) when varying payload.

- (a) Position tracking error of joint 1 (d) Velocity tracking error of joint 2
- (b) Position tracking error of joint 2 (e) Torque input of joint 1
- (c) Velocity tracking error of joint 1 (f) Torque input of joint 2

[目的軌跡의 設定]

目的軌跡(1)

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

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

初期位置 誤差는 各各(-5°, +5°)이고, 初期速度

誤差는 0으로 選擇하였다.

目的軌跡(2)

$$q_{d1} = \pi/2 + \cos 2t - \cos 4t ; 0 \leq t \leq 10$$

$$q_{d2} = -\pi/2 + \cos t - \cos 3t ; 0 \leq t \leq 10$$

初期位置 誤差는 各各(10°, -10°)이고, 初期速度 誤差는 0으로 選擇하였다.

以上の 目的軌跡에 대하여 多様な 파라미터값을

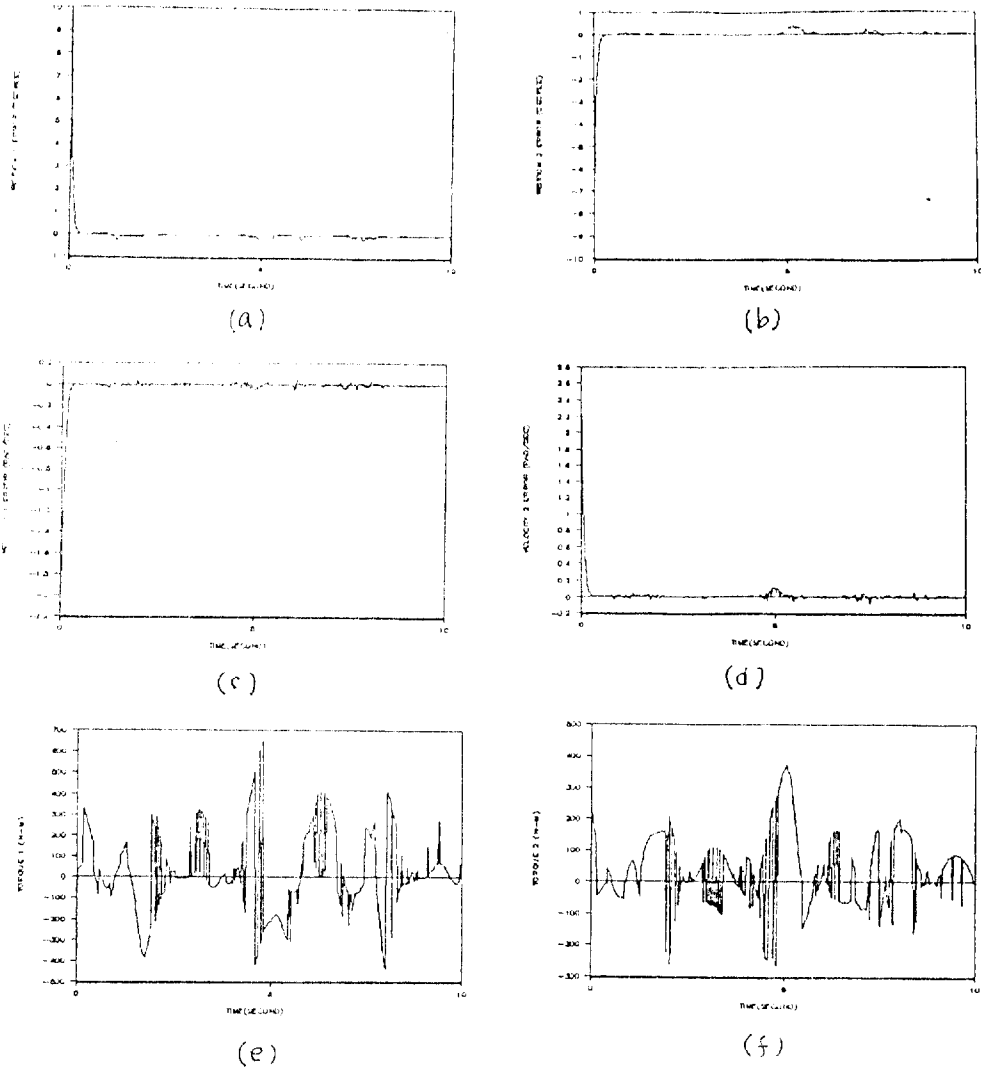


그림 6 可變 負荷일때 目的軌跡(2)에 의한 結果

- (a) 조인트 1의 位置 追跡誤差 (d) 조인트 2의 速度 追跡誤差
- (b) 조인트 2의 位置 追跡誤差 (e) 조인트 1의 토크 입력
- (c) 조인트 1의 速度 追跡誤差 (f) 조인트 2의 토크 入力

Fig. 6 Results by desired trajectory (2) when varying payload.

- (a) Position tracking error of joint 1 (d) Velocity tracking error of joint 2
- (b) Position tracking error of joint 2 (e) Torque input of joint 1
- (c) Velocity tracking error of joint 1 (f) Torque input of joint 2

使用하여 模擬實驗해 본 結果 最適의 파라미터 값 은 $C=20$, $A=100$ 이었으며 샘플링 間隔은 0.1 msec로 하였다.

[模擬 實驗의 條件]

負荷의 影響에 대한 性能을 調查하기 위하여 固定負荷일때와 可變負荷일때를 考慮하여 模擬 實驗

하였다.

(1) 負荷의 質量이 5kg으로 固定된 境遇(負荷質量의 推定값 $m_p=3.5$ kg으로 假定)

(2) 負荷의 質量이 可變하는 境遇(괄호안은 負荷의 推定값임)

目的軌跡 設定(1)일때 時間에 따른 負荷質量은

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

目的軌跡 設定(2)일때 時間에 따른 負荷質量은

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

[模擬 實驗結果 및 考察]

1. 固定負荷일때

- a) 目的軌跡(1)에 대하여 : 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂速度는 各各 0.22秒, 0.28秒에서 0에 收斂하였고 슬라이딩 平面의 到達時間은 約 0.03秒, 채터링의 크기는 ± 0.5 範圍였으며 슬라이딩 平面의 固有值 C 와 利得 A 값이 작으면 작을수록 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂性은 아주 緩慢하게 接近하였음을 보여주었다.
- b) 目的軌跡(2)에 대하여 : 位置 및 速度 追跡誤차는 各各 0.08秒에서 收斂하였고 速度誤差에서 微少의 채터링이 發生하였으나, 슬라이딩 平面의 到達時間은 約 0.03秒이고, 채터링의 크기는 ± 0.25 程度였다. 그리고 固有值 C 와 利得 A 가 작을수록 軌跡(1)에서 처럼 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂性은 더욱더 緩慢하였다.

2. 可變負荷일때

- a) 目的軌跡(1)에 대하여 : 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂速度는 約 0.23秒에서 收斂하였고, 速度 追跡誤差에서 微少의 채터링이 發生하였다. 슬라이딩 平面의 到達時間은 約 0.07秒, 채터링의 크기는 ± 0.25 範圍 程度였으며 슬라이딩 平面의 固有值 C 와 利得 A 가 작을수록 收斂性은 緩慢하였다.
- b) 目的軌跡(2)에 대하여 : 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂速度는 約 0.087秒 걸렸으나 間歇의 으로 약간의 채터링 現象을 보여주었고, 슬라이딩 平面의 到達時間은 a) 境遇와 同一하였고, 크기는 ± 0.1 程度 나타났으며, 固有值 C 와 利得 A 에 따라 收斂性이 左右됨을 알 수 있었다.

以上的 模擬 實驗結果 本 論文에서 提案한 리아프노프 安定度 解析에 따른 假想基準軌跡을 利用한 슬라이딩모드 制御機는 빠른 時間內에 目的軌

跡을 追跡하고 目的軌跡의 變化와 負荷의 變化에도 鈍感하며, 正常狀態의 位置 및 速度誤差를 슬라이딩 平面에 놓이도록 制限함으로써 除去됨을 알 수 있었다.

6. 結 論

本 論文에서는 狀態軌跡의 正常狀態의 誤差 및 스위칭平面의 到達速度를 改善시키기 위하여 目的軌跡을 假想 基準軌跡으로 代置하고 리아프노프 安定度 解析에 의해 스위칭平面에 漸近的 安定條件을 滿足하도록 收斂速度 向上을 갖는 새로운 슬라이딩모드 制御機를 設計하였다.

로봇 매니퓰레이터 動力學 方程式에서 파라미터의 上限값과 推定값을 附屬함으로써 正確한 파라미터값을 必要하지 않고 逆行列 計算을 要求하지 않으므로 計算時間이 節約되었다.

模擬 實驗結果로부터 빠른 時間內의 位置 및 速度 追跡誤差的 收斂性을 保證하고 正常狀態의 誤차를 減少시키며 目的軌跡과 負荷의 變化에 대한 鈍感性을 立證하였다.

今後의 研究課題로 雜音 및 外亂이 存在할 境遇 強靱한 슬라이딩모드 制御機 設計 그리고 카티시안 領域의 適用 및 産業用 로봇에 實際 適用할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," IEEE Trans. Auto. Control, AC-22, pp. 212~222, Apr. 1977.
- [2] 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.
- [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.E. Slotine and W.Li, "Adaptive Manipulator Control-A Case Study," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 740~745, 1986.
- [5] J.J.E. Slotine and S.S. Sastry, "Tracking Control of Non-linear Systems using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipu-

- lators," Int. J. Control, Vol. 38, No. 2, pp. 465~492, 1983.
- [6] J.J.E. Slotine, "Sliding Controller Design for Non-linear Systems," Int. J. Control, Vol. 40, No. 2, pp. 421~434, 1984.
- [7] D.E. Koditschek, "Natural Motion for Robot Arms," In. Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 733~735, Las Vegas, 1984.
- [8] 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.
- [9] 安秀寬, 朴世承, 裴煥垸, 朴鍾國, "Lyapunov 安定度 理論을 利用한 可變構造 모델 追從 制御機 設計方法," 大韓電子工學會 夏季綜合學術大會, vol. 12, pp. 187~190. 1989.
- [10] 朴世承, 朴鍾國, "CTM을 利用한 매니플레이터의 VSMFC制御機 設計," 大韓電子工學會 論文誌, 第27卷, 第10號, pp. 1528~1534, Oct. 1990.