

슬라이딩 모드를 이용한 로봇 매니플레이터의 추적제어기

A Tracking Controller for Robot Manipulator Using Sliding Mode Control

이정훈*, 이주장**, 윤명중**, 권우현***

Jung Hoon Lee*, Ju Jang Lee**, Myung Joong Youn**, Woo Hyun Kwon***

Abstract - In this paper, we design a Continuous Variable Structure Controller which can control robot manipulators to follow the desired planned trajectory with accuracy and robustness, and improve continuity and robustness of variable structure control, based on disturbance observer. We also analyze the stability the proposed algorithm and then verify the usefulness and performance through simulation stuics.

1. 서 론

일반적으로 로봇 추적 제어 시스템은 두가지 단계, 즉 궤적 계획(Trajectory planning)과 제어(Control)단계로 나누어 볼 수 있다. 궤적 계획은 초기위치에서 원하는 위치까지의 시간 궤적을, 필요하다면 충돌 회피를 고려하여 결정하는 것이다. 그리고 제어 단계(Control phase)에서는 결정된 궤적을 로봇으로 하여금 추적하도록 제어하게 된다[1]. 본 연구에서는 이 추적 제어 단계를 연구대상으로 하여, 고도의 비선형 로봇매니플레이터를 강인하고 정확하게 제어하기 위한 여러 가지 추적 제어 방법들을 제안하였다.

원하는 추적제어 성능을 얻기 위하여 Computed Torque method(CTM) [2-4], 적응제어(Adaptive control) [5-6], 슬라이딩 모드제어(Sliding mode control, SMC) [7-17], 그리고 기타 비선형 제어들이 [18-22] 존재한다. 각 방법들은 각각 장단점을 동시에 갖고 있다. CTM은 매니플레

이터의 동특성에 대한 정확한 정보가 있을 때 유용한 제어방법이지만 많은 현장에서는 매개변수 변화, 불확실성, 비선형성으로 인하여 완전히 정확한 동특성 모델을 얻기는 거의 불가능한 실정이다. 그리고 상당히 정확한 모델을 얻었다 하더라도, 제어입력 계산을 위해 다이내믹을 풀어야 하므로, 이것은 제어기의 계산 시간면에서 과중한 부하가 되어 제어기의 성능과 모델의 정확성 사이에 절충(trade off)을 하게 된다. 그리고 CTM은 비선형항의 근사화 및 선형화, 외란과 불확실성으로 인하여 발생하는 모델링 오차에 민감한 단점을 갖고 있다. 그러므로 모델링 오차에 강인성을 부여하기 위하여, 자기동조(Self-tuning)와 모델기준(Model reference) 방법과 같은 적응 제어 알고리즘(Adaptive Control algorithm)이 제안되었다. 하지만 이들 방법은 직접 혹은 간접적으로 제어 이득의 동정(Identification)을 하는 적응 메카니즘(Adaptive mechanism)이 절대적으로 필요하여 과중한 계산 부하, 복잡성, 디지털 구현 단가의 상승을 초래한다.

* 경상대학교 제어계측공학과, 항공기 부품기술 연구센터 연구원, 자동화 및 컴퓨터응용기술 연구소 연구원, 진주시 가좌동 900

** 한국과학기술원 전기전자공학과

*** 경북대학교 전기전자공학부

적용제어와 다른 차원의 둔감성을 갖는, 가변 구조시스템(Variable structure system)을 이용한 슬라이딩 모드 제어가 많은 연구원에 의하여 로봇 매니플레이트의 제어를 위하여 제안되었다. 이 알고리즘의 장점은 간단한 구조와 한정된 모델링 오차에 대하여 슬라이딩 모드상태에서 강인성을 갖고 슬라이딩 면을 이용하면 성능의 변경이 가능하다는 점이다.

1978년 K.K.D.Young이 처음으로 슬라이딩 모드제어를 로봇제어에 응용하였으며, Set-point 레귤레이션 문제를 다루었다. [7] 1985년 Morgan에 의하여 Young의 알고리즘이 개선, 발전되었다. [9]

1987년 마이크로 프로세스에 의하여 슬라이딩 모드를 구현한 Hashimoto[10], 모델추종(Model following)과 결합한 K.K.D.Young [11], 가변구조 제어의 구현에 관한 연구를 한 J.X.Hu[12]와 Bellini[13] 중력하의 유연 매니플레이트에 응용연구를 한 K.S.Young [14], Decentralized 가변구조 제어를 연구한 S.Singh[15], 추적제어에 응용 연구한 S.W.Wijesona[16]와 Y.F.Chen[17] 등에 의하여 로봇을 위한 가변구조 제어 알고리즘이 발전되어갔다. 하지만 이론적으로 모델링 오차에 대한 가변구조 제어기의 강인성을 얻기 위하여 모델링 오차의 최대값으로 불연속 입력을 설계하므로 불연속 입력이 상대적으로 매우 크다. 앞에서 언급한 연구의 많은 경우에는 불연속 입력의 채터링 문제를 개선하기 위해 이 상태에서 바로 Saturation function과 Boundary layer방법을 적용, 연속 근사화를 도모하고 있다.

이런 경우에는 연속 근사화의 효과와 정확성 사이에 어려운 선택이 발생한다. 즉 불연속 입력의 크기에 상응하는 Boundary layer의 폭을 선정해야 하나, 그 폭 만큼의 정확성(Accuracy)이 떨어지는 단점이 야기된다. 따라서 본 논문에서는 효과적인 외란 관측기를 사용하여 전향 보상(Feedforward Compensation)을 거친 후, 보상 오차분만을 연속화하여 제어 입력의 채터링 문제를 능률적으로

해결하고, 기존 연속 가변구조의 단점인 정확성의 저감없는 가변구조 추적 제어기를 설계한다. 제안된 제어기의 안정성을 검토하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 유용성을 검증한다.

2. 가변구조 추적제어기

Lagrange-Euler공식을 사용하여 n 자유도 로봇 매니플레이트의 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다. [1,23]

$$J(q(t), \phi) \cdot \ddot{q}(t) + D(q(t), \dot{q}(t), \phi) = \tau(t) \quad (1)$$

여기서 $J(q(t), \phi) \in R^{n \times n}$ 은 Symmetric positive definite inertia matrix, $D(q(t), \dot{q}(t), \phi) \in R^n$ 은 Smooth generalized disturbance(SGD) 벡터라 부르기로 하고, Centrifugal와 Coriolis항 $H(q(t), \dot{q}(t), \phi) \in R^n$, viscous와 Coulomb 마찰 항 $F(q(t), \dot{q}(t), \phi) \in R^n$, gravity항 $G(q(t), \phi) \in R^n$, 그리고 미지의 Payload 등을 다음과 같이 포함한다.

$$D(q(t), \dot{q}(t), \phi) = H(q(t), \dot{q}(t), \phi) + F(q(t), \dot{q}(t), \phi) + G(q(t), \phi) \quad (2)$$

$\tau(t) \in R^n$ 은 입력 벡터, $q(t)$, $\dot{q}(t)$ 그리고 $\ddot{q}(t) \in R^n$ 은 각변위, 각속도, 그리고 각가속도이다. 또 ϕ 는 질량, 길이, 링크의 관성 등 로봇 매니플레이터의 매개변수로 구성된 벡터이다. 실제의 로봇의 동특성을 정확히 모델링하는 것은 상당히 어렵다. 왜냐하면 매개변수의 불확실성, 미지의 friction, 그리고 payload의 변화 등이 존재하기 때문이다. 그러므로 모델링 과정을 거쳐 얻은 로봇의 모델을 다음과 같이 " $\hat{\cdot}$ " 표시를 하여 나타낸다.

$$J(q(t), \phi) \cdot \dot{q}(t) + \hat{D}(q(t), \dot{q}(t), \phi) = \tau(t) \quad (3)$$

먼저 로봇 시스템 (1)의 추적제어에서는 원하는 궤적, $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t)$ 가 궤적 계획 단계에서 정해졌다고 생각하고, 이에 대한 오차 공간에서 상태변수 $X(t) \in R^{2n}$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$X(t) \equiv [X_1(t)^T \ X_2(t)^T]^T \quad (4)$$

여기서 $X_1(t)$ 와 $X_2(t)$ 는 다음의 궤적오차와 그의 미분이다.

$$\begin{aligned} X_1(t) &\equiv e(t) = (q_d(t) - q(t)) \\ X_2(t) &\equiv \dot{e}(t) = (\dot{q}_d(t) - \dot{q}(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

그러면, 로봇 시스템의 상태 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ J(q(t), \phi)^{-1} \end{bmatrix} \cdot \tau(t) \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ J(q(t), \phi)^{-1} \cdot D(q(t), \dot{q}(t), \phi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{q}_d(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

가변구조 추적제어기는 위의 상태 방정식을 원하는 궤적 $q_d(t)$ 에 대하여 안정화하기 위함이며, 설계 순서는 슬라이딩면을 선정하고 그에 상응하는 제어입력을 결정한다. 따라서 본 연구에서는 슬라이딩면 $s(t) \in R^n$ 을 기존의 일반적인 2차항에서 적분을 추가한 다음과 같은 형을 사용한다.

$$s(t) \equiv X_2(t) + K_v \cdot X_1(t) + K_p \cdot \int X_1(t) dt \quad (7)$$

여기서 K_v 와 $K_p \in R^{n \times n}$ 은 계수 매트릭스이고, 이 적분 슬라이딩면은 원하는 오차 동특성을 각 링트별로 독립적으로 이상적인 2차 동특

성으로 설계한다.

슬라이딩면 (7)에 의해 정의되는 슬라이딩 동특성은 $s(t)=0$ 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{X}_2^*(t) + K_v \cdot X_2^*(t) + K_p \cdot X_1^*(t) = 0 \quad (8)$$

그리고 (8)식을 상태방정식 형으로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X}^*(t) = \Lambda \cdot X^*(t) \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} X^*(t) &= [(q_d(t) - q^*(t))^T (\dot{q}_d(t) - \dot{q}^*(t))^T]^T \\ &\in R^{2n} \end{aligned}$$

이며 $\Lambda \in R^{2n \times 2n}$ 는 K_v 와 K_p 매트릭스로 구성되어 다음과 같다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_v \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (9)의 특성방정식은 다음 식 (11)과 같이 된다.

$$\det[\lambda I - \Lambda] = [\lambda^2 I + \lambda K_v + K_p] \quad (11)$$

따라서 슬라이딩 동특성 (9)가 안정하게 슬라이딩면의 설계 매개변수인 K_v 와 K_p 를 선정해야 한다.

슬라이딩면 (7)에 상응하는 이상적인 제어입력, 이상동가입력(Ideal equivalent control)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{eq}(t) &= D(q(t), \dot{q}(t), \phi) \\ &+ J(q(t), \phi) \cdot (\ddot{q}_d(t) + K_v X_2 + K_p X_1) \end{aligned} \quad (12)$$

하지만 이 입력은 로봇 실제 동특성으로 구성 되어 있기 때문에 바로 구현하기 어렵다.

따라서 일반적으로 기존의 가변 구조제어에서는 우선 모델을 사용하고, 모델링 오차의 최대값으로 불연속 스위칭입력을 구성한다. 이 상태에서 불연속 입력의 채터링 저감을 위하여 스위칭 함수 대신 연속함수인 Saturation 함수나, 경계층(Boundary layer)을 사용하여 연속화를 도모하고 있다.

이 경우는 $D(q(t), \dot{q}(t), \phi)$ SGD의 모델이 입력에 포함되어 있는데, 이 항은 일반적으로 복잡하여 모델로부터 바로 계산하면 샘플링 시간이 길어져 추적 제어 성능을 저하시켜 제어기 설계에 어려움을 낳게 된다. 그리고 불연속 입력이 모델링 오차의 최대치에 의해 설계되므로 이미 입력의 큰 부분을 차지하고 있어 연속화를 하더라도 정확성(Accuracy)과 채터링 저감 사이의 상충이 존재한다.

그러므로 본 연구에서는 모델로부터 SGD $\hat{D}(q(t), \dot{q}(t), \hat{\phi})$ 항을 바로 계산하지 않고, 관성 매트릭스의 모델과 가속도 정보를 사용한 외란 관측기(Disturbance Observer)를 응용 추정, 연속입력으로 보상한 후, 보상 오차분에 해당하는 스위칭 입력을 연속화하여 사용한다. 따라서 제안된 제어 입력은 다음 식 (13)과 같다.

$$\tau(t) = \tau_c(t) + \tau_s(t) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tau_c(t) &= \tau(t) - J_N \cdot \tilde{q}(t) \\ &= D(q(t), \dot{q}(t), \phi) \\ &\quad + \Delta J(q(t), \phi) \cdot \tilde{q}(t) \\ &\quad - J(q(t), \phi) \cdot \Delta \tilde{q}(t) - \Delta \tau(t) \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\Delta J(q(t), \phi) = J(q(t), \phi) - J_N$$

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{q}(t) &= \tilde{q}(t) - \dot{q}(t) \\ \Delta \tau(t) &= \tau(t-h) - \tau(t) \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\tau_s(t) = (\bar{\tau}_{eq}(t) + \tau_x(t)) \quad (13c)$$

$$\bar{\tau}_{eq}(t) = J_N \cdot (\ddot{q}_d(t) + K_v \cdot X_2 + K_p \cdot X_1) \quad (13d)$$

$$\tau_x(t) = J_M \cdot k_{x1} \cdot s(t) + k_{x2} \cdot \sigma_a(t),$$

$$\sigma_a(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\| + \delta} \quad (13e)$$

여기서 $\tau_c(t)$ 가 외란관측기에 의한 보상입력이며 $\bar{\tau}_{eq}$ 는 보상된 로봇 동특성에서 2차의 슬라이딩 오차 동특성을 갖기 위한 수정된 등가 입력이고, $\tau_x(t)$ 는 보상오차를 보정하기 위한 슬라이딩면의 연속 제한 항이다. 또 $\Delta J(q(t), \phi)$ 는 관성 매트릭스인 모델링 오차, $\Delta \tilde{q}$ 는 가속도 정보의 오차, $\Delta \tau(t)$ 는 디지털 제어로 인한 제어입력의 지연, 그리고 h 는 샘플링 시간을 의미한다. 제안된 제어기의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었고, 연속 제어 입력에 의한 슬라이딩면의 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{s}(t) = n_1(t) - \left[k_{x1} \cdot s(t) + k_{x2} \cdot \frac{s(t)}{\|s(t)\| + \delta} \right] \quad (14)$$

여기서 $n_1(t)$ 는 결과 외란 벡터이다.

$$\begin{aligned} n_1(t) &= n_1(\Delta \tilde{q}(t), \Delta \tau, \hat{\phi}) \\ &= J_N^{-1} \cdot J(q(t), \phi) \cdot \Delta \tilde{q} + J_N^{-1} \cdot \Delta \tau(t) \end{aligned} \quad (15)$$

이 외란 결과 외란 벡터에서 볼 때 시스템의 불확실성이나 모델링 오차가 아닌 가속도 정보 오차와 제어입력의 지연오차에 주로 의존한다. 이것은 외란 관측기에 의하여 SGD뿐만 아니라 관성 매트릭스의 모델링 오차 또한 보상이 됐음을 의미한다. 그러므로 슬라이딩 모드 추적

제어기의 설계는 매개변수의 모델링 오차의 최대값과는 무관하다. 제어입력이 연속이고 정확한 가속도 정보를 구할 수 있다면 결과 외란 벡터 값이 매우 작게 된다. 그러므로 채터링 문제가 없는 새로운 슬라이딩 모드 제어가 구현가능하다.

제어기의 안정성을 검증하기 전에 상수 N 을 다음과 같이 정의하자.

$$N = \max_{t, q, \dot{q}, \delta} \{ \|n_1(\Delta \dot{q}(t), \Delta \tau(t), \delta)\| ; q(t) \in B(\epsilon_1; \dot{q}_d(t)) \wedge \dot{q}(t) \in B(\epsilon_2; \ddot{q}_d(t)) \} \quad (16)$$

여기서 경계집합 $B(\rho; v)$ 은 식 (17)과 같다.

$$B(\rho; v) = \{ \omega \in R^n; \|\omega - v\| \leq \rho \} \quad (17)$$

안정성은 다음 정리에 의하여 검증된다.

정리 1 :

제어 입력 (13)과 (13a)~(13e)에 의한 로봇 매니플레이터를 고려할 때, 만약 제어이득, k_{x^1} 과 k_{x^2} 가 δ 에 대해서 다음 (18)식을 만족하면

$$k_{x^2} \geq N - k_{x^1} \cdot \delta \quad (18)$$

전체 제어 시스템은 $s(t)$ 의 n_1 영역 bounded 안정성을 만족한다.

$$\eta_1 = \sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2}, \quad \alpha_1 = \frac{\left[\delta + \frac{(k_{x^2} - N)}{k_{x^1}} \right]}{2}, \quad \beta_1 = \frac{\delta \cdot N}{k_{x^1}} \quad (19)$$

증명 :

Lyapunov 후보함수 $V(t) = \frac{1}{2} s^T(t) s(t)$ 로 선정하고, 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= s^T(t) \cdot \dot{s}(t) \\ &= s^T(t) \cdot n_1(t) \\ &\quad - s^T(t) \cdot \left\{ k_{x^1} \cdot s(t) + k_{x^2} \cdot \frac{s(t)}{\|s(t)\| + \delta} \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

다음 매트릭스 부등식

$$\|x^T y\| \leq \|x\| \cdot \|y\| \cdot \|A\| \quad (21)$$

을 식 (20)에 적용하면 식 (22)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= \|s(t)\| \cdot \|n_1(t)\| - k_{x^1} \cdot \|s(t)\|^2 \\ &\quad - k_{x^2} \cdot \frac{\|s(t)\|^2}{\|s(t)\| + \delta} \end{aligned} \quad (22)$$

N 의 정의에 의하여 (22)는 (23)으로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &\leq \|s(t)\| \cdot \{ N - k_{x^1} \cdot \|s(t)\| \\ &\quad - k_{x^2} \cdot \frac{\|s(t)\|}{\|s(t)\| + \delta} \} \\ &= - \frac{\|s(t)\| \cdot k_{x^1}}{\|s(t)\| + \delta} \\ &\quad \cdot \{ \|s(t)\|^2 + 2 \cdot \alpha_1 \cdot \|s(t)\| - \beta_1 \} \end{aligned} \quad (23)$$

식 (23)에서 제어 이득 k_{x^1} 과 k_{x^2} 가 (18)식을 만족한다면 $\|s(t)\| \geq n_1$ 영역에서

$$\frac{dV(t)}{dt} < 0 \quad (24)$$

를 만족하여 정의가 증명이 된다.

다음 절에서는 추적 제어기의 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터를 이용하여 모의 시뮬레이션 수행한다.

3. 시뮬레이션 연구

SCARA-type 2-자유도 매니플레이터의 아래 동특성에 대하여 추적제어 시뮬레이션을 수행한다. [23]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = & \rho \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_1 + \frac{4}{3} m_2 + m_2 C_2 & \frac{1}{3} m_2 + \frac{1}{2} m_2 C_2 \\ \frac{1}{3} m_2 + \frac{1}{2} m_2 C_2 & \frac{1}{3} m_2 \end{bmatrix} \\ & \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \rho \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} m_2 S_2 \dot{q}_2^2 - m_2 S_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ \frac{1}{2} m_2 S_2 \dot{q}_1^2 \end{bmatrix} \\ & + l \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_1 g C_1 + \frac{1}{2} m_2 g C_{12} + m_2 g C_1 \\ \frac{1}{2} m_2 g C_{12} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 c_i , s_i 그리고 c_{ij} 는 $\cos(q_i)$, $\sin(q_i)$ 그리고 $\cos(q_i + q_j)$ 를 의미한다. 매개변수는 $m_1 = m_2 = 0.782[\text{kg}]$, $l = 0.23[\text{m}]$ 그리고 $g = 9.8[\text{m/sec}^2]$ 이다.

시뮬레이션시에 강인성을 확인하기 위하여 모델링 오차는 각 질량과 길이에, 미지의 payload는 질량 m_2 에 직접 첨가한 형태로 인가된다. 모델링 오차와 payload의 세가지 경우, (i) 영 모델링오차와 영 payload, (ii) 10[%] 모델링 오차와 0.5[kg] 미지의 payload, (iii) 10[%] 모델링오차와 1[kg] 미지의 payload에 대하여 CTM과 제안된 제어기와의 비교 시뮬레이션을 수행한다.

각 링크에 원하는 궤적을 다음 식 (26)에 의하여 계획된다.

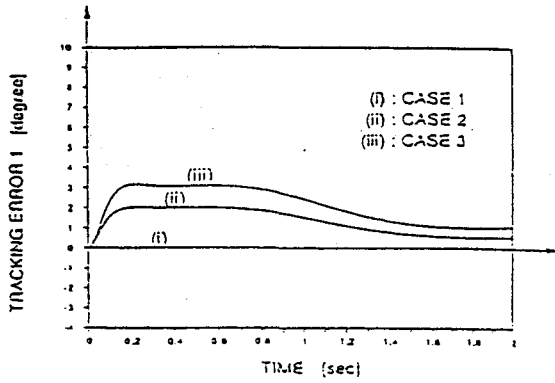
$$\begin{aligned} q_d(t) = & \left\{ q_i + \frac{(q_f - q_i)}{2} \cdot t - \frac{(q_f - q_i) \cdot \sin(\pi t)}{2\pi} \right\} \\ & \cdot \frac{180}{\pi} [\text{deg.}] \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 초기위치는 $q_i = [0.0, 0.0]^T [\text{deg.}]$ 이고 최종 위치는 $q_f = [60.0, -60.0]^T [\text{deg.}]$ 이다. 그리고 궤적 추적 수행 시간을 2초로 선정되었고 샘플링 시간은 2[m/sec]로 선정하여 CTM알고리즘에서 모델(2)의 계산에 필요한 시간분이다. 슬라이딩 면의 계수매트릭스는 슬라이딩 동특성이 -20에 중근을 갖도록 $K_p = 400I$, $K_v = 40$ 로 선정하였으며, 제어기의 이득 k_{x1} 와 k_{x2} 는 안정성 조건 식(18)을 만족하도록 50과 10으로 결정하였다. 그림1은 CTM 알고리즘의 시뮬레이션 결과인 링크1의, 앞에서 언급한 세가지 경우의, 추적오차와 제어입력을 나타냈으며, 그림2는 제안된 알고리즘의 결과로, CTM과 같이 세가지 경우의 링크1의 추적오차와 상용하는 제어입력이다. 추적오차면에서 CTM알고리즘은 모델링오차가 없고 미지의 payload가 영인 경우에 아주 미소한 추적오차를 갖고 있다. 하지만 모델링오차와 미지의 payload가 증가할수록 추적오차가 크게 증가하였다. 반면 제안된 알고리즘에서는 모델링오차와 미지의 payload가 있을 경우와 없을 경우에도 추적오차는 그림2(a)에서 얻은 바와 같이 매우 적어 명령궤적을 정확하게 추적하고 있으며, 제어입력 또한 채터링문제가 전혀 없는 연속이다.

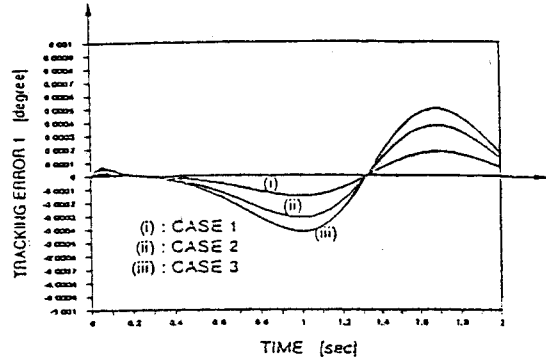
따라서 제안된 알고리즘이 추적오차, 모델링오차와 미지의 payload에 대한 강인성면에서 CTM알고리즘보다 우수하다고 할 수 있다.

4. 결론

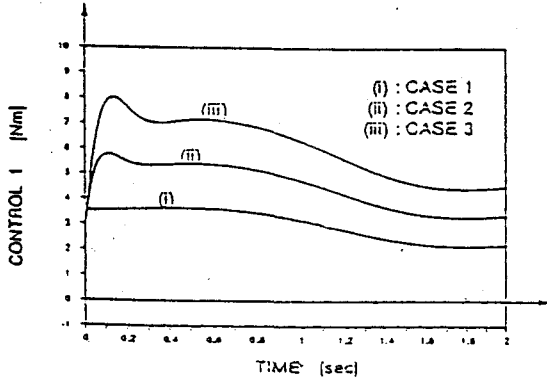
본 연구에서는 로봇의 매니플레이터를 정확하고 강인한 추적제어를 할 수 있는 연속가변구조제어를 설계하였다. 외란관측기를 도입하여 가변구조제어의 연속화 및 강인성을 개선하였으며, 제시된 알고리즘의 안정성에 대하여 해석하였으며 유용성과 성능을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.



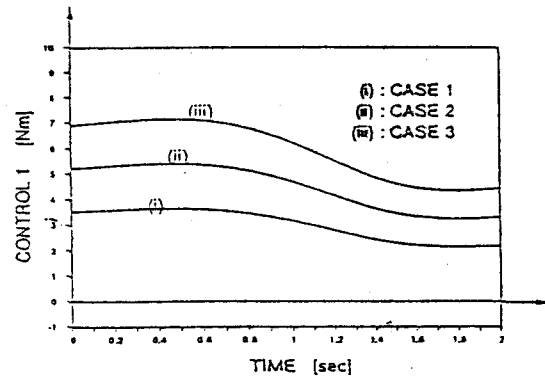
(a) 링크 1의 추적오차



(a) 링크 1의 추적오차



(b) 링크1의 제어입력



(b) 링크 1의 제어입력

그림1. CTM에 의한 시뮬레이션 결과

그림2. 제안된 추적제어기의 시뮬레이션 결과

5. 참고 문헌

- [1] M.Brady et al., Robot Motion: Planning and Control (The MIT Press, Massachusetts, 1982).
- [2] M. Sahba and D.O. Mayne. "Computer-Aided Design of Nonlinear Controller for Tonque Controlled Robot Arms" *IEE Proc. D* 131, 8-14(Jan., 1984).
- [3] V. D. Tourasis and C.P. Neuman, "Robust Nonlinear Feedback Controller Robotic Manipulators" *IEE Proc. D* 132, 134-143 (July, 1985).
- [4] O. Egeland. "On the Robustness of Computed Tonque Method in Manipulator Control" *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* 1203-1208(1986).
- [5] A.J. Kivio and T.H. Huo. "Adaptive Linear Controller for Robotic Mainplators" *IEEE Trans. on Automat. Cont.* AC-28, No. 2, 162-171 (1983).
- [6] J.J Craig, Adaptive Control of Mechanical Manipulators (Ph. D. thcsis. Stanford University, Department of Electrical Engineering. 1986).
- [7] K.K.D. Young, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems" *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-8, No.2, 101-109 (Feb, 1978).
- [8] J.J. Slotine and S.S. Sastry, "Tracking Control of Nonlinear systems Using Sliding Surface, with Application to Robot Manipulators", *Int. J. Control* 38, No. 2, 465-492 (1983).
- [9] R. G. Morgan and U. Ozguner, "A

- Decentralized Variable Structure Control Algorithm for Robotic Manipulators", *IEEE J. of Robotics and Automation* RA-1, No. 1, 57-65 (March 1985).
- [10] H. Hashimoto, K. Maruyama and F. Harashima, "A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode", *IEEE Trans. on Indust. Electr.* IE-34, No. 1, 11-18(Feb., 1987).
- [11] K.K.D. Young, "A Variable Structure Model Following Control Design for Robotics Applications", *IEEE J. of Robotics and Automation* RA-4, No. 5, 556-561 (1988).
- [12] J.X. Xu, H. Hashimoto, J.J. Slotine, Y. Arai and F. Harashima, "Implementation of VSS Control to Robotic Manipulators-Smoothing Modifications", *IEEE Trans. on Indust. Electr.* IE-36, No. 3, 321-329 (Aug. 1989).
- [13] A. Bellini, G. Figall, P. Pinello and G. Vanninulivi, "Realization of a Control Device for a Robotic Manipulator Based on Nonlinear Decoupling and Sliding Mode Control", *IEEE Trans. on Industry Applicat.* IA-25, No. 5, 790-799 (Sept./Oct., 1989).
- [14] K. S. Young and Y. P. Chen, "Sliding mode Controller Design of a Single-link Flexible Manipulator Under Gravity", *Int. J. Contr.* 52, No. 1, 101-117 (1990).
- [15] S. Singh, "Decentralized Variable Structure Control for Tracking in Nonlinear Systems", *Int. J. Contr.* 52, No. 4, 811-831 (1990).
- [16] S. W. Wijesoma and R.J. Richards, "Robust Trajectory Following of Robots Using Computed Torque Structure with VSS", *Int. J. Contr.* 52, No. 4, 935-962 (1990).
- [17] Y. F. Chen, T. Mita and S. Wakui, "A New and Simple Algorithm for Sliding Mode Trajectory Control of the Robot Arm", *IEEE Trans. on Automat. Contr.* AC-33, No. 7, 828-829 (July, 1990).
- [18] S. Komada and K. Ohnishi, "Force Feedback Control of Robot Manipulator by the Acceleration Tracking Orientation Method", *IEEE Trans. on Industr. Electr.* IE-37, No. 1, 6-12 (1990).
- [19] C. Abdallah, D. Dawson, P. Dorato and M. Jamshidi, "Survey of Robust Control for Rigid Robots", *IEEE Control System Magazine II*, No. 2, 24-30 (Feb., 1991).
- [20] J.S. Lee and W.H.Kwon, "A Hybrid Control Algorithm for Robotic Manipulators", *Robotica*(In print).
- [21] D. M. Dawson, Z. Ou, F.L. Lewis and J.F. Dorsey, "Robust Control for the Tracking of Robust Motion", *Int. J. Contr.* 52, No. 3, 581-595 (1990).
- [22] S.R. Oh, Z.N. Bien and I.H. Suh, "A Model Algorithmic Learning Method for Continuous-path Control of a Robot Manipulator", *Robotica* 8, Part 1, 31-36 (1990).
- [23] K.S. Fu, R.C. Gonzalez and C.S.G. Lee, *Robotics, Control, Sensing Vision, Intelligence* (McGraw-Hill, NY, 1987).