

# 로봇 매니플레이터를 위한 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어의 비교

論 文

58-1-26

## A Comparison of Sliding Mode and Integral Sliding Mode Controls for Robot Manipulators

劉 同 相<sup>†</sup>  
(Dong Sang Yoo)

**Abstract** - We compare an integral sliding mode control with a typical sliding mode control for robot manipulators through two primitive tasks: set-point regulation and trajectory tracking control. To prove the asymptotic stability of two methods for robot manipulators, we introduce three important properties in the robot dynamics: skew-symmetry, positive-definiteness, and boundedness of robot parameter matrices and we present one unified control structure using a parametric velocity vector. From illustrative examples, we show that two methods effectively control for robot manipulators.

**Key Words** : Integral Sliding Mode, Robot Control, Nonlinear Control

### 1. 서 론

로봇 매니플레이터의 기계적인 특징인 비선형성과 각 관절 사이의 강한 상호 영향력으로 인한 고속정밀제어의 어려움을 극복하기 위해 동력학을 이용한 다양한 제어 알고리즘들이 제안되었다. 그러나 정확한 동력학 모델링이 불가능하고 또한 실시간 계산량이 방대하여 제어를 실제로 구현하는데 어려움이 있었다. 따라서 간단한 동력학 모델링을 통해 계산량을 줄이면서 제어기의 안정성을 보장하는 다양한 비선형 강건 제어방법이 제안되었다. 그 중에서 슬라이딩 모드 제어기(가변구조제어기)는 가장 매력적인 제어방법의 하나로 부각되었다[1]. Yeung과 Chen[2]은 복잡한 관성행렬의 역행렬을 구하지 않고도 셋포인트 조정문제를 해결하기 위한 가변구조제어기를 제안하였고, Tomei[3]는 로봇 파라미터의 중요한 특징인 관성행렬의 대칭성, 관성행렬과 전향력 행렬 사이의 왜대칭성, 로봇 파라미터의 한정성 등을 이용하여 비선형성을 모델링하고, 로봇의 안정성을 보장하는 적응 PD 제어기를 제안하였다.

슬라이딩 모드 제어에 있어 중요한 사항은 슬라이딩 운동이 일어나는 슬라이딩 평면과 이를 위한 비선형 제어입력을 설계하는 것이다[1]. 지금까지의 가변구조제어기(슬라이딩 모드 제어기)는 초기상태에서 일정한 시간이 경과한 후 슬라이딩 평면과의 접촉이 일어나며 이후에는 미리 정의된 슬라이딩 운동이 일어나기 때문에 슬라이딩 운동이 일어나기 전까지의 과도상태의 해석은 로봇 매니플레이터의 비선형성

때문에 예측하기가 쉽지 않았다. 최근에서 초기시간부터 슬라이딩 운동이 일어나도록 하는 적분 슬라이딩 모드 제어기가 제안되었다[3]-[5]. Choi[6]는 부정합 불확실성을 가진 시스템에도 적용할 수 있는 적분 슬라이딩 모드 제어기를 위한 LMI 기반의 적분 슬라이딩 평면 설계방법을 제안하였다. 이런 적분 슬라이딩 모드 제어기의 장점은 초기시간부터 슬라이딩 운동이 일어나므로 시스템의 궤적을 미리 정의된 슬라이딩 평면에서의 슬라이딩 모드 동력학을 이용하여 초기시간부터 완벽하게 예측할 수 있다는 것이다. 이런 장점을 이용하여 참고문헌[7]-[10]에서는 로봇 매니플레이터를 효과적으로 제어하기 위해 적분 슬라이딩 평면을 제안하고, 이를 이용하여 가변구조제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 제어기의 구조를 단순화하고 로봇 매니플레이터의 비선형성을 효과적으로 억제하기 위해 로봇 파라미터의 중요한 성질인 왜대칭성, 양의 정의성 및 한정성 등을 이용하여 로봇의 비선형성의 경계치를 기술하고, 기존의 일반 슬라이딩 평면과 적분 슬라이딩 평면을 설계한다. 또한 매개속도벡터를 이용하여 슬라이딩 함수를 기술함으로써 이를 이용한 단일화된 구조의 제어기를 설계하며, 슬라이딩 평면에 대한 도달가능조건을 만족하는지를 Lyapunov 안정성 이론을 이용하여 증명한다. 또한, 셋포인트 조정과 추종 제어의 경우에 대한 각각 2관절 로봇 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션함으로써 두 슬라이딩 평면 설계에 대한 효과를 비교한다.

### 2. 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어

가변구조이론을 이용한 제어기 설계에 있어서 슬라이딩 운동이 일어나는 슬라이딩 평면을 설계하는 것이 첫 번째 단계이며, 이 슬라이딩 평면으로 시스템의 궤적을 유도하고 접촉이 일어나면 이후에는 이 평면에서 머무르면서 슬라이

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓京大學校 電氣工學科 副教授 · 工博,  
電子技術綜合研究所

E-mail : dsyoo@hknu.ac.kr

接受日字 : 2008年 7月 22日

最終完了 : 2008年 12月 3日

딩 운동이 일어나도록 하는 도달가능조건을 만족하게 하는 비선형 제어입력을 설계하는 것이다[1].

로봇 매니플레이터의 슬라이딩 모드 제어기 설계를 위해 먼저 다음과 같은  $n$  자유도를 가진 로봇 매니플레이터 동력학을 고려해 보자.

$$M(x_p)\ddot{x}_p = \tau - C(x_p, \dot{x}_p)\dot{x}_p - G(x_p) \quad (1)$$

여기서  $x_p(t) \in R^n$ 는 관절위치벡터이고,  $M(x_p) \in R^{n \times n}$ 은 대칭이며 양의 정의관성행렬이며,  $C(x_p, \dot{x}_p) \in R^{n \times n}$ 은 전향력 및 원심력을 표현하는 계수행렬이다. 그리고  $G(x_p) \in R^n$ 는 중력 토크이며,  $\tau \in R^n$ 는 관절구동 입력토크이다.  $M, C, G$ 는  $x_p$ 에 대해서 한정되어 있고,  $C$ 는  $\dot{x}_p$ 에 대해서 선형 관계를 가지고 있다. 즉, 모든  $(x_p, \dot{x}_p) \in R^n \times R^n$ 에 대해  $\|M\| \leq \beta_1, \|C\| \leq \beta_2 \|\dot{x}_p\|, \|G\| \leq \beta_3$ 을 만족하는 양의 상수인  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 가 존재한다. 또한, 행렬  $\dot{M} - 2C$ 은 왜대칭 행렬로 임의의 벡터  $X \in R^n$ 에 대해  $X^T(\dot{M} - 2C)X = 0$ 이다[11].

일반 슬라이딩 평면과 적분 슬라이딩 평면 설계에 앞서 먼저 변수 벡터들을 정의한다. 식(1)의 동력학에서 관절위치 벡터  $x_p(t)$ 에 대한 목표 관절위치벡터를  $x_d(t) \in R^n$ 로 정의하고, 관절위치오차벡터  $e_p(t)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$e_p = x_d - x_p \quad (2)$$

일반 슬라이딩 평면 및 적분 슬라이딩 평면 설계를 위해 슬라이딩 함수  $\sigma(t)$ 를 각각 다음과 같이 설계한다.

1) 일반 슬라이딩 모드 경우 (TSM)

$$\sigma = \dot{e}_p + \Lambda e_p \quad (3)$$

여기서  $\Lambda \in R^{n \times n}$ 는 대각행렬이며 양의 정의행렬로 선택된다. 식(3)으로부터 슬라이딩 운동이 일어난 조건인  $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ 을 설정함으로써 슬라이딩 평면에 한정되는  $n$ 차의 슬라이딩 모드 동력학은 다음과 같다.

$$\dot{e}_p + \Lambda e_p = 0 \quad (4)$$

따라서 만약 슬라이딩 운동이 일어나면 위 식은 슬라이딩 평면에서의 오차 동력학을 나타내며,  $\Lambda$ 가 양의 정의행렬이므로 식(4)의 극점들은 음의 실수 부분을 가지게 되고 따라서 안정된 운동을 하며 0으로 수렴한다.

2) 적분 슬라이딩 모드 경우 (ISM)

$$\sigma = \dot{e}_p + \Lambda e_p + z \quad (5)$$

$$\dot{z} = \Gamma(\dot{e}_p + \Lambda e_p), z(0) = -(\dot{e}_p + \Lambda e_p)(0) \quad (6)$$

여기서  $\Gamma \in R^{n \times n}$ 는 대각행렬이며 양의 정의행렬로 선택된다. 식(5)와 (6)으로부터 슬라이딩 운동이 일어난 조건인  $\dot{\sigma} = \sigma = 0$ 으로 설정함으로써 슬라이딩 평면에 한정되는  $n$ 차의 슬라이딩 모드 동력학은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\ddot{e}_p + \Lambda \dot{e}_p + \Gamma(\dot{e}_p + \Lambda e_p) = \ddot{e}_p + (\Lambda + \Gamma)\dot{e}_p + \Gamma\Lambda e_p = 0 \quad (7)$$

위 식은 적분 슬라이딩 평면에서의 오차 동력학을 나타내게 되며 적절한  $\Lambda, \Gamma$ 를 선택하면  $e_p(t)$ 가 0으로 수렴한다. 한편 식(6)에서 제시된 초기값에 대해 슬라이딩 함수값을 보면  $\sigma(0) = 0$ 임을 알 수 있다. 따라서 초기시간부터 오차 동력학에서의 궤적은 슬라이딩 평면에 머물러 있으며, 적절한 제어

입력에 의해 지속적으로 그 평면상에 머물러 있도록 유도된다면 슬라이딩 운동이 유지될 수 있음을 알 수 있으며, 따라서 식(7)에 의해 관절위치오차벡터  $e_p(t)$ 를 초기시간부터 완벽하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

제어입력 설계 및 안정도 판별 등을 단순화하기 위해 다음과 같이 매개속도벡터  $\dot{e}_r(t) \in R^n$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{e}_r = \begin{cases} \dot{x}_d + \Lambda e_p & \text{(TSM)} \\ \dot{x}_d + \Lambda e_p + z & \text{(ISM)} \end{cases} \quad (8)$$

따라서, 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 경우에 대해 다음과 같은 단일의 슬라이딩 함수로 표현된다는 것을 알 수 있다.

$$\sigma = \dot{e}_r - \dot{x}_p \quad (9)$$

식(8)과 (9)를 이용하여 슬라이딩 운동을 보장하는 단일화된 구조를 가진 제어기를 다음과 같이 설계한다.

$$\tau = \begin{cases} (\beta_1 \|e_r\| + \beta_2 \|\dot{x}_p\| \|e_r\| + \beta_3) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} + K_\sigma \sigma & \text{if } \sigma \neq 0 \\ 0 & \text{if } \sigma = 0 \end{cases} \quad (10)$$

여기서  $K_\sigma \in R^{n \times n}$ 는 양의 정의행렬이다. 위의 제어기는 비선형성의 영향을 억제하면서 시스템의 궤적이 슬라이딩 평면과 접촉하도록 이끄는 역할과 일단 슬라이딩 평면에 도달한 궤적이 슬라이딩 평면에서 벗어나지 못하게 하는 역할을 한다. 지금까지의 기술한 내용을 바탕으로 다음과 같은 정리를 제안한다.

**정리1:** 식(1)로 표현되는 로봇 매니플레이터의 동력학을 고려해 보자. 슬라이딩 평면을 식(3)이나 식(5)와 (6)과 같이 선택하고, 제어기를 식(10)와 같이 설계했을 때  $\sigma = 0$ 은 점근적 안정하다.

**증명:** 다음의 Lyapunov 함수를 고려하자.

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} \sigma^T \Lambda \sigma \quad (11)$$

식(11)을 시간에 대해 미분하고, 식(9)와 로봇 동력학의 왜대칭성을 이용하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T \dot{\Lambda} \sigma + \frac{1}{2} \sigma^T \dot{\Lambda} \sigma \\ &= \sigma^T \Lambda (\dot{e}_r - \ddot{x}_p) + \frac{1}{2} \sigma^T (\dot{\Lambda} - 2C + 2C) \sigma \\ &= \sigma^T \Lambda \dot{e}_r - \sigma^T \Lambda \ddot{x}_p + \sigma^T C \sigma \end{aligned} \quad (12)$$

로봇 동력학 (1)과 제어입력 (10)을 식(12)에 대입하고 로봇 파라미터의 한정성을 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma^T (\Lambda \dot{e}_r - \tau + G + C\dot{x}_p + C\sigma) \\ &= \sigma^T (\Lambda \dot{e}_r + C_r + G - \tau) \\ &\leq -\sigma^T K_\sigma \sigma + \|\sigma\| \{ (\|\Lambda\| - \beta_1) \|e_r\| + (\|C\| - \beta_2 \|\dot{x}_p\|) \|\dot{e}_r\| \\ &\quad + (\|G\| - \beta_3) \} \\ &\leq -\sigma^T K_\sigma \sigma < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

따라서  $\sigma = 0$ 는 점근적 안정하다. ■

안정된 슬라이딩 운동이 초기시간에서부터 일어난다는 것을 보이는 것은 슬라이딩 함수  $\sigma(t)$ 의 초기값을  $\sigma(0) = 0$ 으로 주어지고,  $\sigma(t) \neq 0$ 인 경우에 대해서에 경우에 대해서는 정리 1에 의해 슬라이딩 평면으로의 도달가능조건을 만족함

으로써 충분하다[7].

참고 1: 추종제어 문제에 있어서 일반적으로 초기시간에 있어서 위치오차나 속도오차 등이 없는 것으로 설정한다. 따라서 일반 슬라이딩 모드나 적분 슬라이딩 모드 제어 모두 초기시간에 슬라이딩 평면상에 궤적이 존재한다. 일반 슬라이딩 모드 제어를 살펴보면  $e_p$ 와  $\dot{e}_p$ 가 모두 0이므로 식(3)에서 슬라이딩 함수  $\sigma$ 가 0이 되고 정리 1에 의하여 운동계적은 항상 슬라이딩 평면에 머무르게 된다. 한편, 적분 슬라이딩 모드 제어의 경우에는 식(5)와 (6)에서  $e_p$ ,  $\dot{e}_p$  및  $z$  모두 0이 되므로 결국 슬라이딩 함수  $\sigma$ 도 0이 되고 다시 정리 1에 의해 초기시간에서부터 슬라이딩 운동이 일어나게 된다.

참고 2: 셋포인트 조정문제에 있어서는 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어는 다른 결과를 보여준다. 일반 슬라이딩 모드 제어의 경우 초기시간에 위치오차가 존재하고 슬라이딩 함수값이 0이 아니므로 운동계적은 슬라이딩 평면에 있지 않는다. 따라서 초기시간에는 슬라이딩 운동이 일어나지 않으며 비선형 제어 입력에 의해 운동계적이 슬라이딩 평면으로 유도된 이후 슬라이딩 운동을 하게 된다. 따라서 로봇 매니플레이터의 운동계적은 슬라이딩 운동이 일어나지 전까지는 로봇의 비선형과 불확실성에 의해 예측하기 어려우며 슬라이딩 운동이 일어나는 시점부터 식(4)에 의해 예측이 가능하게 된다. 반면 적분 슬라이딩 모드 제어의 경우에는 비록 초기 위치오차가 존재하더라도 식(5)에서 적분 부분의 초기값을  $z(0) = -(\dot{e}_p(0) + \Lambda e_p(0))$ 와 같이 설정함으로써 슬라이딩 함수의 초기값이 0이 되도록 만들 수 있다. 따라서 초기시간에서부터 운동계적이 슬라이딩 평면상에 존재하게 되고 슬라이딩 운동을 하게 된다. 그리고 로봇 매니플레이터의 운동계적은 식(7)에 의해 초기시간에서부터 완벽하게 기술된다.

3. 시뮬레이션 예제

일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어기의 효율성을 비교하기 위해 그림 1과 같은 2관절 로봇 매니플레이터 대상으로 시뮬레이션 예제를 살펴보았다.

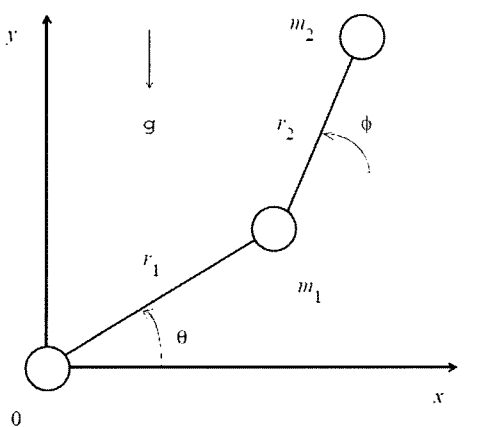


그림 1. 2 관절 로봇 매니플레이터 모델  
Fig. 1. Two link robot manipulator model

$$\begin{bmatrix} M_{11}(\phi) & M_{12}(\phi) \\ M_{12}(\phi) & M_{22}(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{12}(\phi)\dot{\phi} & C_{12}(\phi)\dot{\theta} + C_{12}(\phi)\dot{\phi} \\ -C_{12}(\phi)\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(\theta, \phi)g \\ G_2(\theta, \phi)g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서

$$\begin{aligned} M_{11}(\phi) &= (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos\phi \\ M_{12}(\phi) &= m_2r_2^2 + m_2r_1r_2\cos\phi, \quad M_{22}(\phi) = m_2r_2^2 \\ C_{12}(\phi) &= -m_2r_1r_2\sin\phi \\ G_1(\theta, \phi) &= (m_1 + m_2)r_1\cos\phi + m_2r_2\cos(\theta + \phi) \\ G_2(\theta, \phi) &= m_2r_2\cos(\theta + \phi) \end{aligned}$$

$$r_1 = 1.0m, \quad r_2 = 0.8m, \quad m_1 = 0.5kg, \quad m_2 = 0.5kg, \quad x_p = [\theta, \phi]^T$$

일반 슬라이딩 평면과 적분 슬라이딩 평면 설계에 있어서 각 관절에 대해 슬라이딩 평면이 서로 분리될 수 있도록 다음과 같이 파라미터를 선정하였다.

$$\Lambda = \text{diag}[7 \ 7], \quad \Gamma = \text{diag}[6 \ 6]$$

따라서 일반 슬라이딩 평면의 경우 슬라이딩 모드 동력학의 특성근은 식(4)에 의해 각 관절에 대해 모두 -7이 되고, 적분 슬라이딩 평면의 경우 슬라이딩 모드 동력학의 특성근은 식(7)에 의해 각 관절에 대해 모두 -7과 -6이 되므로 두 경우 모두 슬라이딩 운동 상태에서 관절위치오차는 0으로 수렴됨을 알 수 있다. 제어이득  $K_p = \text{diag}[2 \ 2]$ 로 결정하였다. 로봇 동력학 파라미터의 경계치를 결정하는 것은 어떤 행렬 노름 (Norm)을 선택하느냐에 달려 있다. 참고문헌 [11]의 예제에서 제시된 바와 같이 1-norm을 사용함으로써 계산을 간단하게 할 수 있다. 이와 더불어 로봇 동력학 모델의 불확실성을 고려하여 다소 여유있는 값을 선택하였다.

$$\beta_1 = 3, \beta_2 = 2, \beta_3 = 15$$

제안된 제어기의 효율성을 보이기 위해 두 가지 작업에 대해 시뮬레이션하였다. 먼저, 셋포인트 조정특성을 살펴보기 위해 목표 관절위치벡터  $x_d(t)$ 를  $[1 \ 1]^T$ 로 선정하였다. 그리고 초기 위치오차에 대한 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어기의 성능을 비교하기 위해 로봇 관절위치의 초기값  $x_p(0)$ 는 0으로 설정하여 초기위치오차가 발생하도록 하였다. 그림 2-a)는 첫 번째 관절에 위치값, 위치 오차, 슬라이딩 함수와 제어입력을 보여주며, 그림 2-b)는 초기 구간에 대해 결과를 확대하여 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 일반 슬라이딩 모드의 경우 초기구간에서의 위치오차로 인해 즉시 슬라이딩 모드가 발생하지 않고 제어입력에 의해 궤적이 슬라이딩 평면에 도달한 후 슬라이딩 운동을 시작함을 알 수 있다. 한편 적분 슬라이딩 모드의 경우에는 비록 초기위치오차가 존재하지만 슬라이딩 평면을 설계할 때 초기위치오차가 슬라이딩 함수값이 0이 되도록 인위적으로 조절됨으로 초기값에서부터 슬라이딩 운동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 하지만 두 경우 모두 비선형성과 불확실성에도 불구하고 로봇 매니플레이터를 효과적으로 제어하고 있음을 알 수 있다.

두 번째 시뮬레이션에서는 로봇의 추종능력을 살펴보기 위해 다음과 같이 기술되는 목표 궤적 함수를 사용하였다.

$$\begin{aligned} x_d(t) &= x_d(0) + \frac{x_d(2) - x_d(0)}{2\pi}(\pi t - \sin\pi t) \quad 0 \leq t \leq 2 \\ \dot{x}_d(0) &= \dot{x}_d(0) = \dot{x}_d(2) = \dot{x}_d(2) \end{aligned}$$

초기값과 최종값은 다음과 같다.

$$\theta_a(0) = \theta(0) = \phi_a(0) = \phi(0) = 0, \theta_a(2) = \phi_a(2) = 1$$

그림3-a)은 첫 번째 관절에 위치값, 위치오차, 슬라이딩 함수와 제어입력을 보여주며, 그림3-b)는 초기 구간에 대해 결과를 확대하여 보여주고 있다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 일반 슬라이딩 모드나 적분 슬라이딩 모드 제어기 두 경우 모두 초기시간부터 슬라이딩 운동이 발생되고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 궤적 추종제어의 경우에는 초기오차가 없다고 설정하기 때문에 가능한 결과이다. 또한 두 경우 모두 비선형성과 불확실성이 존재하여도 효과적으로 목표 궤적을 추종하고 있음을 알 수 있다.

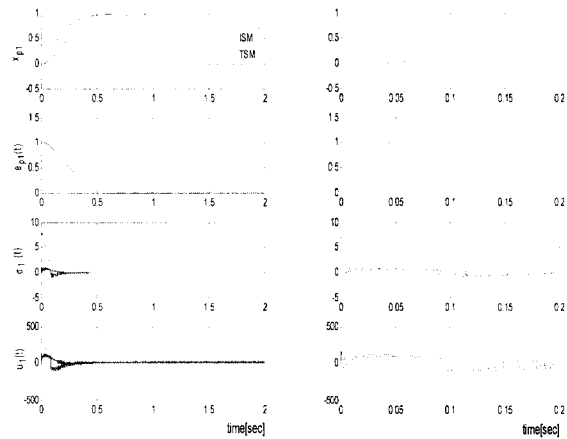
두 시뮬레이션 결과로부터 추종제어의 경우에는 두 제어기간의 성능 차이는 유사하지만 셋포인트 조정의 경우에는 초기시간부터 슬라이딩 운동이 일어나는 적분 슬라이딩 모드 제어기가 비선형성과 불확실성이 존재하는 상황에서 로봇 매니플레이터의 운동을 예측하는데 유리하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 로봇 매니플레이터를 대상으로 기본적인 두 가지 작업인 셋포인트 조정과 궤적 추종문제에 대해 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드 제어의 성능에 대해 비교하였다. 이를 위해 제어기의 구조를 단순화하고 로봇 매니플레이터의 비선형성을 효과적으로 억제하기 위해 로봇 파라미터의 중요한 성질인 왜대칭성, 양의 정의성 및 한정성 등을 이용하여 로봇의 비선형성의 경계치를 기술하였고, 이 경계치를 비선형 제어기 설계에 이용하였다. 또한 매개속도벡터를 도입하고 일반 슬라이딩 모드와 적분 슬라이딩 모드의 경우에 따라 각각 다르게 정의함으로써 단일화된 슬라이딩 함수를 기술할 수 있었으며, 이를 이용하여 제어기를 설계함으로써 역시 제어기 구조를 단일화할 수 있었다. 설계된 제어기에 의해 로봇의 궤적이 슬라이딩 평면에 대한 도달가능한지는 Lyapunov 안정성 이론을 이용하여 증명하였다. 그리고 2관절 로봇 매니플레이터를 대상으로 시뮬레이션함으로써 두 슬라이딩 평면 설계에 대한 효과를 비교하였으며, 초기시간부터 슬라이딩 운동이 발생하는 적분 슬라이딩 모드 제어기가 로봇 매니플레이터의 운동 궤적을 정확한 예측에 있어서 일반 슬라이딩 모드 제어기보다 유리함을 보였다.

#### 참 고 문 헌

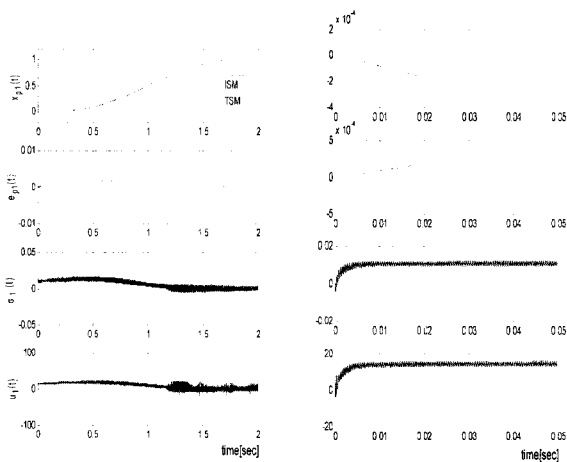
- [1] R.A. DeCarlo, S. Žak, and G.P. Mathews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial," IEEE Proc., vol. 76, pp. 212-232, 1988
- [2] K. S. Yeung and Y. P. Chen, "A New Controller Design for Manipulator Using the Theory of Variable Structure System," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 33, no. 2, pp.200-206, 1988
- [3] V. Utkin and J. Shi, "Integral Sliding Mode in Systems Operating Under Uncertainty Conditions," Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, pp.4591-4597, Kobe, Japan, December 1996
- [4] J. Ackermann and V. Utkin, "Sliding Mode Control Design based on Ackermann's Formula," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 43, no. 2, pp.234 - 237, 1998
- [5] F. Castanos and L. Fridman, "Analysis and Design of Integral Sliding Manifolds for Systems With Unmatched Perturbations," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 51, no. 5, pp.853-858, 2006
- [6] H. H. Choi, "LMI-Based Sliding Surface Design for Integral Sliding Mode Control of Mismatched Uncertain Systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 52, no. 4, pp.436-742, 2007
- [7] T.-L. Chern, "Integral Variable Structure Control Approach for Robot Manipulators," IEE Proc.- Contr. Theory & Applicat., vol. 139, no. 2, pp.161-166, 1992
- [8] J.-H. Lee and M.-J. Youn, "A New Integral Variable



a) 전체 구간      b) 초기 구간

그림 2. 셋포인트 조정 결과

Fig. 2. Set-point regulation results



a) 전체 구간      b) 초기 구간

그림 3. 추종 제어 결과

Fig. 3. Tracking control results

Structure Regulation Controller for Robot Manipulators with Accurately Predetermined Output," Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics, pp. 336-341, Bled, Slovenia, 1999

- [9] M. N. Ahmad and J. H. S. Osman, "Proportional-Integral Sliding Mode tracking Controller with Application to a Robot Manipulator," Int. Conf. Contr., Automat., Robot. and Vision, pp.863-868, Singapore, December 2002
- [10] M. Defoort, J. Palos, T. Floquet, A. Kokosy and W. Perruquetti, "Practical Stabilization and Tracking of a Wheeled Mobile Robot With Integral Sliding Mode Controller," Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, New Orleans, pp.1999-2004, LA, USA, December 2007
- [11] F. L. Lewis, S. Jagannatha, and A. Yesildirek, Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems, CRC Press, pp.129-134, 1988

---

## 저 자 소 개



### 유 동 상 (劉 同 相)

1962년 4월 12일생. 1985년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년, 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사, 공박). 1992년 ~ 2000년 LG 생산기술원 책임연구원. 2000년~현재 국립한경대학교 전기공학과 부교수  
Tel : 031-670-5322  
Fax : 031-670-5329  
E-mail : dsyoo@hknu.ac.kr