

## Sliding mode를 이용한 SCARA 로보트의 궤적 제어에 관한 연구

°홍동기", 남경태," 이해영, 박정일", 이석규  
영남대학교 전기공학과, "영남대학교 전자공학과

### A Study on the Trajectory Control of SCARA Robot Using Sliding Modes

° D.G. Hong\*, K.T. Nam\*\*, H.Y. Lee, J.I. Park\*\* , S.G. Lee  
Yeungnam University Dept. of Electrical Eng. \*\*Dept. of Electronic Eng.

#### Abstract

Sliding Mode Controller is largely used to control highly nonlinear system such as robot manipulator. This paper simulate the SCARA robot with sliding mode control algorithm and its applied form with saturation term to reduce chattering. In addition, hardware system using DSP board which operates with high speed is constructed.

#### 1. 서론

최근 비선형 시스템에 대한 많은 연구논문이 발표되고 있으며, 그 중 매니퓰레이터와 같은 비선형성이 매우 강한 시스템에 대하여 모델링 오차 및 미지의 외란에 강인한 제어법으로 가변구조 제어법에 대한 연구가 매우 활발히 진행이 되고 있다.<sup>[1][2]</sup> Sliding mode를 가진 가변구조시스템에 대한 이론은 30여년 전에 이미 러시아에서 개발이 되어졌으며, 이러한 제어법에 있어서의 근본적인 문제점 중의 하나는 제어입력의 불연속에 의한 Chattering 현상이다. Chattering 현상을 없애기 위하여 많은 연구가 행하여 졌으며,<sup>[3]</sup> 이러한 연구는 주로 다음과 같은 2가지 접근법으로 대별될 수 있다. 즉 시스템이 sliding mode manifold에 충분히 근접했을 때 고이득 feedback을 가하는 Boundary Layer Method와 시스템이 sliding mode manifold에 도달한 후 동가인 제어 입력을 계산하여 이를 시스템에 적용하는 법 등이 있다.

본 논문에서는 구조가 간단하여 제어에 장점이 있어 조립 공정 등에 많이 사용이 되고 있는 SCARA 로보트에 대한 효과적인 제어를 위한 sliding mode 제어법을 적용한 모의 실험을 행하였으며, sliding mode 제어에서 흔히 나타나는 Chattering 현상을 줄이기 위해 Saturation 함수를 사용하여 모의 실험을 하였다. 또한, 현재 빠른 속도와 높은 정밀성이 요구되는 제어가 필요한 곳에서 많이 사용하고 있는 DSP Chip을 이용하여 실험을 행하였다.

#### 2. 제어기 설계

##### 2.1 SCARA 로보트

현재 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 로보트중 스카라(SCARA)로보트는 세개의 평행인 회전 관절을 가지고 있어서 평면 내에서 움직이면서 방위를 잡을 수 있으며, 네번째의 미끄럼(prismatic) 관절은 말단 효과장치(end-effector)를 평면에 수직하게 움직이게 한다. 가장 중요한 d잇점은 첫번째 세개의 관절은 매니퓰레이터나 하중의 무게를 지탱할 필요가 없다는 것이다. 또한, 링크 0은 첫번째 두개의 관절을 돌리는 액츄에이터(actuator)를 쉽게 수용할 수 있다는 것이다.

이러한 잇점으로 인해 보통 두개의 관절로만 이루어진 평면 매니퓰레이터로 해석하여 많은 실험이 이루어지고 있다.

다음의 그림 1에 스카라 로보트의 전체적인 형태를 나타내었다.

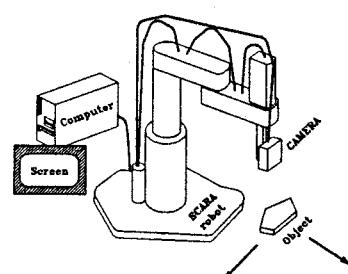


그림 1. 스카라 로보트의 외형

##### 2.2 가변구조제어기의 설계

가변구조 시스템은 전체 시스템이 설계자가 원하는 동작을 하도록 스위칭 논리에 따라 매우 빠른 속도로 그 구조가 변하는 시스템이며, 여기서는 이러한 가변구조시스템의 설계의 한 형태인 sliding mode에 대한 것을 다루기로 한다. 일반적으로 가변구조제어기는 다음과 같은 순서로 설계되어진다. a) 주어

진 시스템이 스위칭 평면상에서 접근 안정이 되도록 스위칭 평면을 설계한다.

b) 주어진 시스템의 상태가 스위칭 평면으로 이동을 하여, 그 평면상에 머무르도록 하는 제어기를 설계한다.

본 연구의 제어 대상인 스카라 로보트는 2 자유도 평면 매니퓰레이터로 표현될 수 있으며 이를 운동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} (m_1+m_2)a_1^2 + m_2a_2^2 + 2m_2a_1a_2\cos\theta_2 & m_2a_2^2 + m_2a_1a_2\cos\theta_2 \\ m_2a_2^2 + m_2a_1a_2\cos\theta_2 & m_2a_2^2 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2a_1a_2(2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2)\sin\theta_2 \\ m_2a_1a_2\dot{\theta}_1^2\sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (m_1+m_2)ga_1\cos\theta_1 + m_2ga_2\cos(\theta_1+\theta_2) \\ m_2ga_2\cos(\theta_1+\theta_2) \end{bmatrix}$$

$m_1$ 과  $m_2$ 는 각 링크의 질량이고  $l_1$ 과  $l_2$ 는 각 링크의 길이이다.

위의 식(1)과 같은 운동 방정식에 대하여 시스템이 접근 안정되는 스위칭 평면을 설계하기 위하여 먼저 각 관절의 목표 각도, 각속도, 각각속도를  $\theta_d$ ,  $\dot{\theta}_d$ ,  $\ddot{\theta}_d$ , 측정한 각도, 각속도, 각각속도를  $\theta_r$ ,  $\dot{\theta}_r$ ,  $\ddot{\theta}_r$ 이라고 두면 그에 따른 오차와 오차의 속도, 오차의 가속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon = \theta_d - \theta_r, \dot{\epsilon} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}_r, \ddot{\epsilon} = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}_r \quad (2)$$

상태공간상에서의 스위칭 평면을 다음식 (3)과 같이 설정한다.

$$\tau = \Lambda e + \dot{\epsilon} \quad (3)$$

이에 대한 제어 입력은 다음식 (4)와 같다.

$$\tau = \tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{V}_m\dot{q}_r + \tilde{G} + K\text{sgn}(r) \quad (4)$$

$$\dot{q}_r = \Lambda e + q_d$$

$$\text{sgn}(r_i) = +1 \text{ if } r_i > 0, \text{ sgn}(r_i) = -1 \text{ if } r_i < 0,$$

안정한 영역 내의 K의 성분은 다음식 (5)와 같은 조건을 만족 시켜야 한다.

$$k_i \geq [|\tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{V}_m\dot{q}_r + \tilde{G}|]_i + \eta_i \quad (5)$$

단,

$$\tilde{V}(r) \leq -\sum_{i=1}^n k_i |r_i|$$

$$\tilde{V}(r) = r^T [\tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{V}_m\dot{q}_r + \tilde{G}] - \sum_{i=1}^n k_i |r_i|$$

$$\tilde{M} = M - \bar{M}, \quad \tilde{V} = V - \bar{V}, \quad \tilde{G} = G - \bar{G}$$

이와 같은 형태로 Chattering을 줄이기 위한 Saturation 함수를 사용하게 된 경우의 제어 입력은 다음식 (6)과 같이 주어

지게 된다.

$$\tau = \tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{V}_m\dot{q}_r + \tilde{G} + K\text{sat}(r) \quad (6)$$

여기서,

$$\text{sat}(r_i) = +1 \text{ if } r_i > 1, \text{ sat}(r_i) = -1 \text{ if } r_i < -1,$$

$$\text{sat}(r_i) = r_i \text{ if } -1 < r_i < 1$$

이러한 제어기를 Block diagram으로 나타낸 것이 그림 2에 있다.

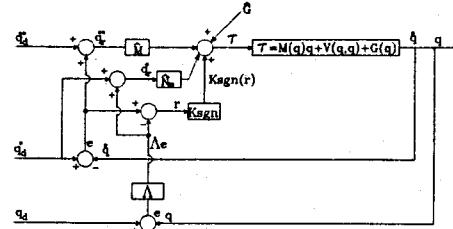


그림 2. 제어기의 Block diagram

### 3. 실험 및 검토

#### 3.1 모의실험

이상에서 제시한 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 4 위의 Runge-Kutta수치적분법을 이용하여 시뮬레이션을 행하였다. 이에 사용된 파라미터들의 값을 아래의 표 1에 나타내었다.

$m_1$	10 kg
$m_2$	5 kg
$l_1$	1 m
$l_2$	1 m
K	18
$\Lambda$	5

표 1. 모의실험의 각 파라미터 값

실험에 있어서 샘플링 주기를 1 ms로 하여 2000개의 각도와 그에 따른 값을 받아들이도록 하여 파일로 저장할 수 있게 하였다. 슬라이딩 면에 수렴하는지를 알아보기 위하여  $\eta$  값과  $k$  값 그에 따른 조건을 설정하여 그 조건에 맞는지를 확인하고 그 영역을 표시하여 볼 수 있게끔 하였다.

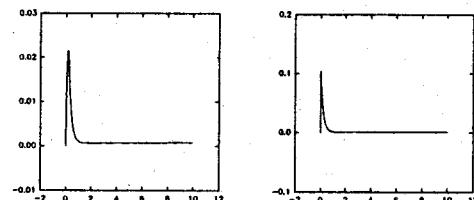


그림 3. 각 관절의 오차

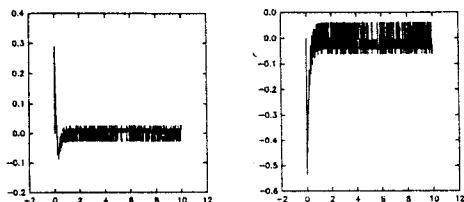


그림 4. 각 관절의 속도 오차

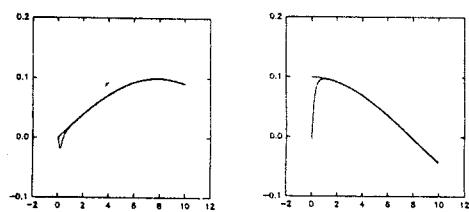


그림 5. 각 관절의 원하는 궤적과 실제 궤적

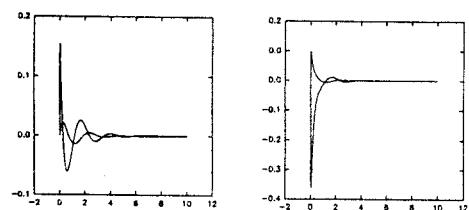


그림 6. Saturation 함수를 사용했을 경우 오차와 속도 오차

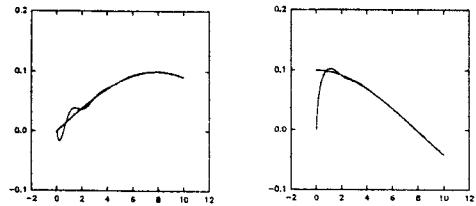


그림 7. Saturation 함수를 사용했을 경우 궤적

그림 3에서 그림 7 까지는 모의 실험을 하여 얻은 결과들이다. 그림 3은 sliding mode 제어를 이용하였을 경우에 나타나는 오차를 보여 주고 있다. 그림에는 잘 나타나지 않으나 시간이 경과한 후 안정 영역에 들어간 경우에도 Chattering이 나타남을 볼 수 있었다. 그림 4는 속도의 오차를 나타내 보이고 있다. 이 경우 Chattering이 심하게 생겼다. 그림 5의 궤적으로 볼 경우 안정되게 목표 궤적을 추종하는 것을 알 수 있다. 이상에서 볼 수 있듯이 일반적인 sliding mode 제어기는 Chattering이 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 성분을 줄이기 위하여 saturation 항을 첨가시켜 모의 실험을 한 결과 그림 6과 7의 결과를 얻을 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Chattering이 많이 줄어들었다. 그러나 한가지 단점으로 목표

궤적을 추종하는 데 있어 settling이 되는데 일반 sliding mode제어기 보다 많은 시간이 필요하고 초반 오차가 커진 것을 알 수 있다.

### 3.2 실험

실험 대상은 삼성전자의 FARA 스카라 로보트를 이용했고 제어기의 제어기의 핵심이 되는 부분은 현재 널리 사용되고 있는 DSP Chip을 이용하여 제어기를 구성하여 하였다. 기존의 2축 제어와 달리 4축을 동시에 제어해야 하므로 연산 속도와 데이터의 빠른 전송이 필요하게 되었다. 이러한 이유로 기존에 널리 사용되어 왔던 16bit DSP Chip을 사용하지 않고 대신 32bit 데이터 처리가 가능하고 병렬 프로세서 사용이 가능한 뿐만 아니라 연산 속도가 빠른 32bit DSP Chip인 TMS320C40을 사용하였다.

아래의 그림 8은 DSP 보드와 Motor Drive 사이에 신호를 전달해 주기 위한 인터페이스 부분의 Block Diagram이다. 빠른 Data 전송이 요구되므로 내부 및 외부의 인터럽트를 동시에 사용할 수 있도록 제작했다.

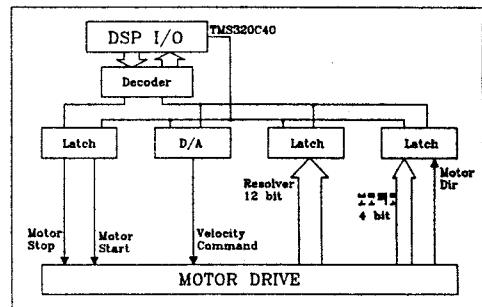


그림 8. 인터페이스 부분의 Block Diagram

### 4. 결론

비 선형성이 강한 스카라 로보트에 sliding mode제어기를 적용한 결과 그림 3에서 그림 7 까지의 결과에서 보는 것처럼 비교적 적은 오차로 목표치에 추적을 하는 것을 알 수가 있으며 또한 Chattering을 제거하기 위한 Saturation 함수로 된 항을 첨가하였을 경우 Chattering이 줄어든 결과를 볼 수 있었다. 또한 DSP를 사용하여 하드웨어적인 실험을 현재 진행하고 있다.

### 참고문헌

- K.S. Yeung and Y.P.Chen,"A New Controller Design for Manipulator Using the Theory of Variable Structure

System", IEEE Trans. Automat. Cont., Vol.AC-33, No.2,  
1988.

2. H.Hashimoto, K.Maruyama, and F.Harashima,"A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.IE-34, No.1, pp.11-18, Feb, 1987.

3. A.Sabanovic, K. Wada, and N. Sabanovic, "Chattering Free Sliding Modes in Robotic Manipulators Control", Proc. of 1993 IEEE/RSJ intl. Conf. on Intelligence Robots and Systems, pp. 1260-1267, July, 1993.

4. F.Lewis, C.T.Abdallah, and D.M.Dawson," Control of Robot Manipulators", Macmillan Pub. Co., 1993.

5. A.K.Paul, J.K.Mishra and M.G.Radke, "Sliding Mode Control of Pneumatic Actuator for Robotic Application", Proc. of 1993 IEEE/RSJ intl. Conf. on Intelligence Robots and Systems, pp. 1268-1275, July, 1993.

6. K.K.David young,"Variable Structure Control for Robotics and Aerospace Application", Elsevier Co., 1993.