

강인한 비례적분 슬라이딩 모드를 이용한 초중량물 로봇의 제어

고창민*, 박성훈*, 이현석*, 김민찬*, 박승규*, 김두형**, 정광조**
 창원대학교*, 한국기계연구원**

Control of Heavy Duty Robot using Robust Proportional Integral Sliding Mode

Chang-Min Ko*, Seong-Hun Park*, Hyun-Seok Lee*, Min-Chan Kim*, Seung-Kyu Park*,
 Doo-Hyeong Kim**, Gwang-Jo Chung**
 Changwon National University*, Korea Institute of Machinery & Materials**

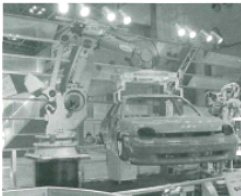
Abstract - This paper presents comparative experimental results of PI sliding mode control and PI control for a heavy duty robot which can handle an object of 600kg. The gains of the PI control was determined by TAE(Trial and Error) method.

This paper presents a novel approach for the decoupling of the states cross-coupling using sliding mode control. The sliding mode control method is based on the error between reference speeds and the actual speed. The proposed method has the advantages of PI control performance and the sliding mode control robustness. Its first step is to design PI controller, then the sliding mode control input term is added to it. This makes actual implementation of the controller easier.

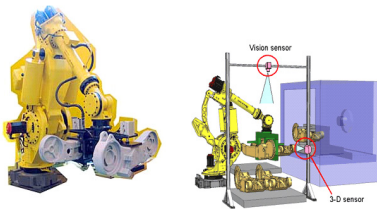
The robot and motion controllers were designed and made by author. The good control performance of the heavy duty robot was obtained by using simple algorithm. This means that the robot was designed very well in control respect.

1. 서 론

산업 현장에서는 로봇의 필요성이 점차 증가하고 있는 추세이다. [1],[2],[3],[4] 다음 그림 1은 세계 최초의 자동차 차체 이송 초 중량 핸들링 로봇을 보여주고 있다. 그림2는 FANUC社에서 개발된 핸들링 로봇이다.



<그림 1> 자동차차체 이송로봇(Nachi社)



<그림 2> FANUC 500Kg 핸들링 로봇 & 적용 예

본 논문 저자의 연구팀은 로봇의 대한 모션제어를 설계되었으며 600Kg급을 목적으로 초중량물 로봇을 제작하였다. 그림 3은 저자들이 설계 제작된 6축 초중량물 로봇을 보여주고 있다.



<그림 3> 600kg 초 중량물 로봇

로봇의 제어에 있어 각 관절들을 독립적으로 제어하였다. 위 로봇 동특성을 고려한 속도제어에 대하여 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 제어기의 이득들은 반복실험을 바탕으로 결정되었다. 강인한 PI 슬라이딩 모드 제어는 개선향상의 가능성에 대해 고려되었다.[5],[6]

본 연구에서는 로봇 제어에 있어서 각 관절을 독립적인 제어를 위하여 상태 디커플링을 행한 후에 파라미터 불확실성으로 인하여 미처 처리되지 못한 커플링 항을 슬라이딩 모드 제어를 적용함으로써 해결한다. 적용되는 슬라이딩 모드 제어기는 가장 상태를 포함하는 슬라이딩 모드 제어 방법으로 속도의 동특성을 모든 시간에 걸쳐 제어 할 수 있는 장

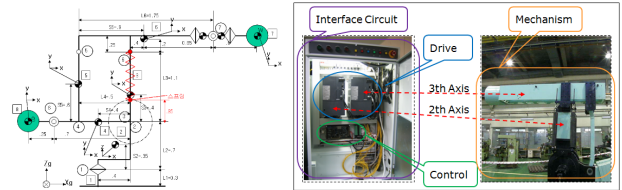
점을 가지고 있는 방법이다.[5],[6],[7],[8],[9]

본 논문에서의 제어방법은 PI제어에 기반을 두고 있으며 부하토크 값의 불확실성으로 인한 불안정한 상태 디커플링 때문에 PI제어기의 성능이 저하되는 것을 슬라이딩모드 제어가 막아주는 역할을 하고 있다. 실제 제어 시스템의 구성에 있어서도 일단 PI 제어기로 제어를 행한 다음에 추가적으로 슬라이딩 모드제어를 추가시켜주는 형태로 구성을 할 수 있기 때문에 상당히 실제적이라고 할 수 있다.[8],[9]

2. 본 론

2.1 HEAVY DUTY ROBOT SYSTEM

아래의 그림 4는 초 중량물 로봇의 구조를 보여주고 있다. 가만하중 600Kg을 핸들링 하기 위한 목적으로 설계되었다. 실험용 2축 로봇은 6축 다관절 로봇의 두 번째 관절 축과 세 번째 관절 축으로 제어 실험을 하기 위해 구성하였다.

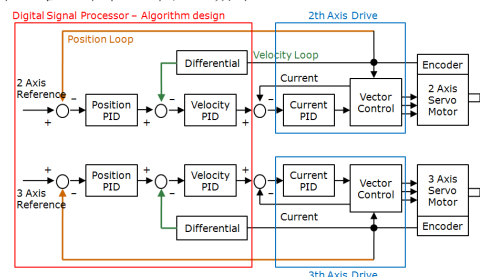


<그림 4> 로봇의 구조

<그림 5> 실험용 로봇 시스템

위의 그림 5는 실험용 2축 로봇의 인터페이스 회로에 관한 시스템 구성을 나타내고 있다.

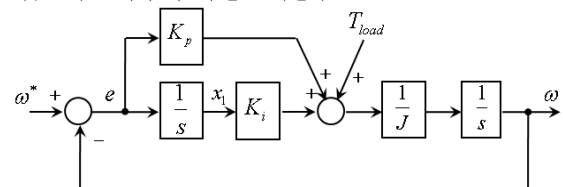
본 논문에서는 토크모드를 이용한 미쯔비시社의 서보 드라이브를 사용하였다. 모션 제어기는 Digital Signal Processor인 TMS320VC33을 이용하여 설계되었다. 속도 제어기와 위치 제어기는 상위제어기인 DSP에서 실현하였다. 서보 드라이브 안의 모션 제어기와 전류 제어기의 구조는 아래의 그림 6에서 보여주고 있다.



<그림 6> 디지털 위치 속도 PI제어기의 블록다이어그램

2.2 강인한 PI 슬라이딩 모드 제어

로봇의 강인한 제어를 하기 위해서 그림 7과 같은 부하토크와 PI제어기를 갖는 속도 제어 시스템을 고려한다.



<그림 7> PI제어기의 속도제어 시스템

그림 7로부터 PI제어를 포함한 시스템 전체 계통의 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= e(t) \\ \dot{J}\dot{e}(t) &= K_i x_1(t) + K_p e(t) + T_{load} \end{aligned} \quad (1)$$

위의 상태 방정식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= e(t) \\ \dot{e}(t) &= -\frac{K_i}{J} x_1(t) - \frac{K_p}{J} e(t) - \frac{T_{load}}{J} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $e(t) = \omega^* - \omega$ 이고 T_{load} 는 토크링 항이다. 위에서 주어진 1차 계통에 슬라이딩 모드를 적용시키는 경우 궁극적으로 제어 목적을 달성하지만 과도상태에 있어서의 동특성을 보장받기가 어려워진다. 슬라이딩 모드 제어에서는 이것을 도달시간 문제라고 부른다. 이러한 문제점을 피하기 위해서 다음과 같이 가상 상태를 정의하여 슬라이딩 평면을 구성한다. 가상 상태는 다음과 같이 공칭계통을 바탕으로 하여 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= e(t) \\ \dot{e}(t) &= -\frac{K_i}{J} x_1(t) - \frac{K_p}{J} e(t) \end{aligned} \quad (3)$$

가상 상태를 다음과 같이 정의한다.

$$x_v = -\frac{K_i}{J} x_1(t) - \frac{K_p}{J} e(t) \quad (4)$$

가상 상태의 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{x}_v = -\frac{K_i}{J} e(t) - \frac{K_p}{J} x_v(t) \quad (5)$$

위의 가상 상태를 포함하여 구성된 슬라이딩 평면은 다음과 같다.

$$s = x_v(t) + \frac{K_i}{J} x_1(t) + \frac{K_p}{J} e(t) \quad (6)$$

위의 슬라이딩 모드는 PI제어가 적용된 공칭계통의 동특성을 갖는다. 슬라이딩 모드에 도달하기 위한 슬라이딩모드 제어입력을 구하는 과정은 다음과 같다. 슬라이딩 평면에 도달할 조건은 다음과 같다.

$$s\dot{s} < 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} s\dot{s} & \text{는 다음과 같이 정리된다.} \\ s\dot{s} &= s \left(\dot{x}_v(t) + \frac{K_i}{J} \dot{x}_1(t) + \frac{K_p}{J} \dot{e}(t) \right) \\ &= s \left(-\frac{K_p}{J} x_v(t) + \frac{K_p}{J} \left(-\frac{K_i}{J} x_1(t) - \frac{K_p}{J} e(t) - \frac{1}{J} u_o - \frac{T_{load}}{J} \right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

입력 u 를 다음과 같이 결정한다.

$$u = -K_i x_1 - K_p e - J \dot{x}_v + \gamma \left| \frac{T_{load}}{J} \right| \text{sign}(s) \quad (9)$$

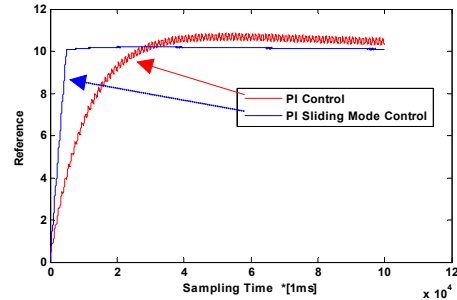
2.3 시뮬레이션 및 실험결과

시뮬레이션과 실험에 사용된 파라미터는 표1과 같다.

〈표 1〉 시뮬레이션 및 실험 파라미터

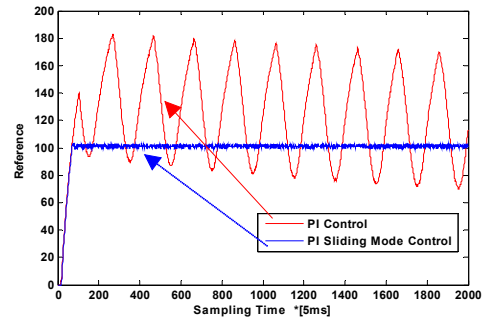
| Parameter | Simulation | Experimental |
|----------------|-------------------------------|------------------------------|
| | 3th joint | 3th joint |
| Inertia Load J | $99.6 \times 10^{-4} [Kgm^2]$ | $0.2 \times 10^{-4} [Kgm^2]$ |
| Torque Load | $100 \text{Sin}(\omega t)$ | $5 \text{Sin}(\omega t)$ |
| Speed Kp | 10 | 0.1 |
| Speed Ki | 0.1 | 0.000005 |

그림 8은 Matlab Simulink를 이용하여 속도제어에 대한 시뮬레이션 결과이다. 부하에 강인함을 보여주며 빠른 응답특성을 갖는다.



〈그림 8〉 Matlab을 이용한 속도 PI슬라이딩제어 시뮬레이션 결과

그림 9는 DSP를 이용하여 3th 관절 축에 대한 속도제어의 응답특성 실험결과이다. 여기서 기준속도 100은 모터의 현재속도로 2340rpm으로 고속회전하고 있는 상태이다.



〈그림 9〉 3th 관절축의 PI제어와 PI슬라이딩제어의 속도 응답특성

위의 그림은 3th 축에 대한 부하토크와 관성에 강한 PI슬라이딩 제어를 인식함으로써 로봇의 속도제어에 있어 우수한 성능을 보여주고 있다.

3. 결 론

실험용 로봇을 제어하는데 있어 부하토크 및 관성에 강인한 제어성을 향상시키기 위하여 PI제어와 슬라이딩 모드제어를 함께 사용하였다. 각축을 독립적인 제어가 가능함을 보여주고 있다.

제시된 방법은 먼저 PI제어를 적용시킨 후 슬라이딩 모드 제어입력을 별도로 추가하는 설계과정을 거치기 때문에 실제 적용에 유리한 장점을 가지고 있다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부 지역산업기술개발사업 <IH-13-63(경남)> 지원으로 수행된 연구입니다. 과제번호(70000656)

[참 고 문 헌]

- [1] Unknown, "Robot for Handling Extra-Heavy Object", New technology Japan, v.21 no.6, pp.33, September 1993.
- [2] Unknown, "HEAVY DUTY ROBOT LINK TWO PROCESSES", Robotics world, v.4 no.12, pp.26~27, 1986.
- [3] Astrop. Arthur, "UK FIRM LAUNCHES HEAVY DUTY ROBOTS", Machinery and production engineering, v.140 no.3617, pp.53, December 1982.
- [4] "HEAVY DUTY ROBOT CAN HANDLE 250 LBS", Robotics world, v.3 no.3, pp.38, March 1985.
- [5] S. Morimoto, M. Sanada, Y. Taketa, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors with High Performance Current Regulator", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-30, pp.920-926, Jul./Aug. 1994.
- [6] J. Kim, S. Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Driven for the Flux Weakening Operation", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-33, pp.43-48, Jul./Aug. 1997.
- [7] Ali J. Koshkouei, Keith J. Burnham, "Control of DC motors Using Proportional Integral Sliding Mode", International Conference on Systems Engineering, IEEProceeding Control Theory Applications, vol.18, no.-, pp.213-218, 2006.
- [8] S. K. Park, H. G. Ahn, "Robust controller design with novel sliding surface", IEEProceeding Control Theory Applications, vol.146, no.3, pp.242-246, 1999.
- [9] S. K. Park, T. W. Kim, T. S. Yoon, K. P. Kwak, H. K. Ahn, "Sliding mode decoupling for IPM machine", International Society for Optical Engineering, vol.6042, no.1, pp.60421B, 2005.