

이송 장치용 複數 전동기 위치 동기 제어

박진석 · 이홍희
전기전자 및 자동화공학부

<요 약>

Gantry System과 같은 이송장치에 복수 전동기가 사용될 경우 이들 전동기 사이의 위치 동기 제어가 요구된다. 이 경우의 위치 동기 운전은 두 전동기 사이에 위치 오차를 빠르게 보상할 수 있어야 하며 외란에도 강인한 특성이 요구된다. 이러한 특성을 만족시키기 위해 본 연구에서는 퍼지 제어기법과 함께 슬라이딩 모드 제어기법을 병렬로 사용하여 시스템의 동특성과 함께 외란에도 강인한 새로운 제어방법을 제안한다. 제안된 알고리즘의 타당성을 증명하기 위해 교류 서보 전동기 시스템을 등가 모델링하여 모의실험을 행하였으며 이를 실험적으로 증명해 보였다.

A Study on Position Synchronization of the Gantry Driving Multi-Motors

Jin-Seok Park · Hong-Hee Lee

School of the Electrical Engineering and Automation

<Abstract>

The position synchronization is required in case of driving multi motors which are applied to the moving systems like a gantry system. In this case, the position error between two motors should be compensated quickly and the control system must be robust to the disturbances. In order to satisfy these requirements, we propose a new control scheme which uses the fuzzy and the sliding mode techniques in parallel. In process of designing the proposed controller, the equivalent circuit model for AC servo system is used. In order to show the effectiveness of the proposed scheme, both the computer simulations and the real experiments are performed.

1. 서 론

마이크로프로세서와 벡터제어에 의한 전동기 제어 기술의 발달과 더불어 산업현장의 시스템은 거대화되고 더욱 복잡해졌다. 이러한 복잡성을 해소하고 생산성 향상을 위해 자동화 작업은 절대적으로 필요하다. 자동화를 위해 사용되는 이송장치는 단순한 물류 운반뿐만 아니라 로봇을 탑재한 작업까지를 수행하게 됨으로써 그 기능이 더욱 더 다양해지고 높은 정밀도가 요구되어진다. 이송장치의 동력원으로 복수의 전동기가 주로 사용되고 있는데 이 경우 정확한 이동을 위해서는 동기화가 필수적이다.

이러한 전동기의 동기운전을 구현하기 위한 방법으로 David M.과 M.Uchiyama 등은 한대의 전동기를 마스터(master) 전동기로 두고 슬레이브 전동기가 마스터 전동기의 속도 출력을 추종하도록 제어하고 있는데 이 경우 슬레이브 전동기의 제어기는 마스터 전동기의 역다이내믹스를 이용해 위치 동기화를 구현하고 있다.[1],[2] 이 방법은 마스터 전동기의 역다이내믹스 모델링을 이용하고 있기 때문에 마스터 전동기에 외란이 인가되는 경우에는 동기화를 수행하는 능력이 우수하지만 슬레이브 전동기에 인가되는 외란에 대해서는 시스템의 동특성이 떨어져 정밀한 동기화 운전을 기대하지 못한다. 또한 적응 피드포워드 제어기를 사용하는 방법과 이 제어기의 적응 파라미터를 조정하는 방법 및 $H\infty$ 와 구조를 가변하는 마스터/슬레이브 방법 등이 제안된 바 있다[3],[5],[6].

로봇을 탑재하는 Gantry 시스템은 부하 변동이 심하기 때문에 외란에 강인하고 빠른 동특성이 요구된다. 본 연구에서는 이송장치가 2대의 전동기로 구동될 경우 각각의 전동기에서 다른 부하가 인가되거나 시스템의 모델링 오차로 인해 위치 오차가 발생하더라도 이를 빠르게 보상하여 위치 동기 운전을 가능하게 하는 방법을 제시하고자 한다. 구체적으로 외란에 강인한 특성을 지닌 슬라이딩 모드 제어기와 시스템 정수가 정확하지 않더라도 오차 보상 능력이 뛰어난 퍼지 제어를 병용하여 시스템의 동특성과 강인성을 향상 시켰다. 또한 제어기의 원활한 설계를 위해 이송장치의 구동부로 사용되는 서보전동기 구동시스템을 등가적으로 모델링했다.

2. 시스템 모델링

서보 앰프는 보통 속도 제어기와 전류제어기를 포함하고 있으며 그림 1은 일반적으로 사용되는 서보 시스템의 등가 블록도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 Mitsubishi사의 0.4kW의 정격출력과 3000rpm의 정격속도를 가진 서보 앰프와 전동기를 모델로 사용했다. 그림 1에서 전류제어기는 약 4 KHz의 대역폭을 가진 저대역 필터로 모델링 했는데 그 이유는 속도 제어가 4ms의 동작 주기를 가지고 있기 때문에 전동기의 기계적 시정수 및 전기적 시정수를 고려하여 전류제어기를 보통 전동기의 속도 제어기보다 10~20 배 정도로 빨리 제어하면 특성상 문제가 없기 때문이다. 토크 정수 이득은 서보앰프 매뉴얼을 참고했다[8].

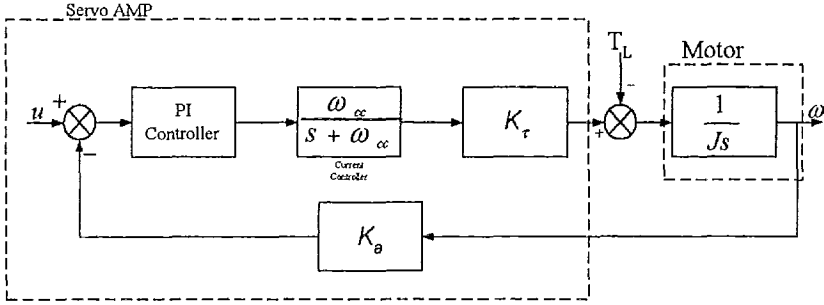


그림 1 서보 시스템 블록도

제어기의 설계를 위해 그림 1에서 전류제어기가 선형적으로 동작하고 속도 궤환 이득이 1이라고 가정하여 서보 전동기 시스템을 그림 2와 같은 간략화 된 모델로 변환했다.

그림 2에서 속도 오차(x1)와 전동기 속도(x2)를 제어변수로 두면 제어기 설계를 위한 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_1 = -x_2 + u \tag{1}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_i K_r}{J} x_1 - \frac{K_b K_r}{J} x_2 + \frac{K_b K_r}{J} u - T_L \tag{2}$$

$$y = x_2 \tag{3}$$

단, $x_1 = \int (u, \omega) dt,$

$$x_2 = \omega$$

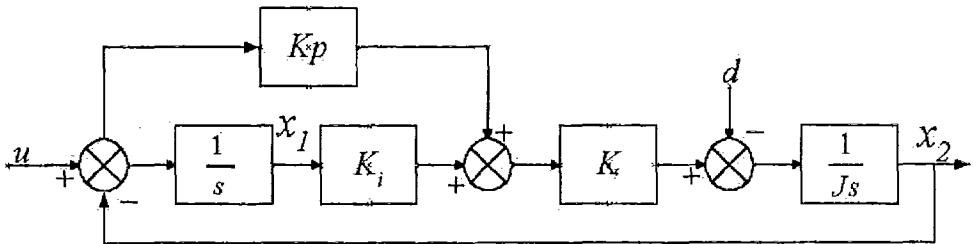


그림 2. 서보시스템의 간략화 모델

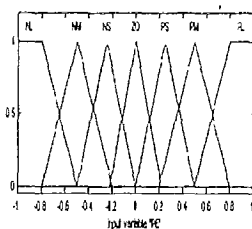
3. 제어기 설계

이송 장치가 2대의 전동기를 사용하여 구동되고 있을 경우 이들 전동기의 위치 동기는 이송장치의 성능과 수명에 중요한 영향을 미친다. 위치 동기의 오차는 각각의 전동기에 인가되는 속도 지령치에 의해 발생한다. 구체적으로 각각의 전동기에 서로 다른 부하가 인가될 경우 이에 상응하는 정확한 속도 지령치를 인가하지 못하기 때문인데 이를 극복하기 위해서는 부하변동에 따른 전동기 구동시스템의 정확한 모델링이 필요하다. 그러나 구동시스템의 정확한 모델링은 대단히 어렵기 때문에 본 연구에서는 외란에 대한 동특성이 우수한 슬라이딩 모드 제어기법과 함께 시스템 모델링 오차가 있더라도 전체 시스템의 제어특성에 강인한 특성을 지닌 퍼지 제어기법을 병용하여 위치 동기 시스템의 우수한 동특성과 강인성을 확보하고자 한다. 이들 제어기에 대한 설계 요령은 다음과 같다.

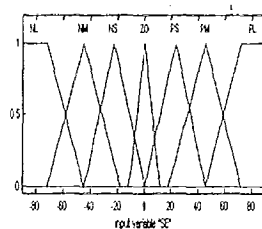
3.1 퍼지 제어기 설계

시스템 정수를 정확히 알지 못하더라도 위치 오차를 빠르게 최소화 할 수 있도록 본 논문에서는 속도형 퍼지 제어기를 사용했다. 일반적으로 2대의 전동기의 동기화를 위해서 PD 제어기나 PID 제어기가 상위제어기로 사용되어 왔다. 그러나 이들 제어 기법은 시스템 정수를 정확히 알고 있어야 하며, 시스템 정수를 알고 있다 하더라도 제어 이득에 민감한 특성을 가져 이득 조정이 잘못 될 경우 동기화 성능이 떨어지거나 시스템이 불안정해진다. 이러한 제어 기법의 단점을 보완하기 위해 경험에 바탕을 둔 퍼지 제어 기법의 제어 멤버쉽 함수를 효율적으로 사용하여 보다 좋은 동기 특성을 얻고자 한다.

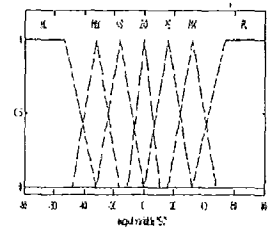
퍼지 제어기의 설계를 위해서는 경험에 의한 퍼지 규칙을 작성해야 한다. 2대의 전동기를 동기화시킬 경우 PID에 있어서 적분기는 순간적인 보상을 추구하는 동기화에는 별다른 효과를 발휘하지 못하기 때문에 본 연구에서는 PD 제어기법을 바탕으로 퍼지 규칙을 만들었다. 퍼지 규칙을 작성함에 있어 입력 제어 변수는 위치 동기 오차와 속도 동기 오차로 선정하고 출력 변수는 속도 지령으로 선정했다. 입출력 변수는 그림 3과 같이 모두 7개의 삼각형 멤버쉽 함수를 선정하고 표 1과 같은 퍼지 제어 규칙에 의해 퍼지제어가 수행된다. 비퍼지화는 최대치 평균법을 사용했다.



(a) 위치오차 입력



(b) 속도 오차 입력



(c) 출력

그림 3. 퍼지 멤버쉽 함수

표 1. 퍼지 제어 규칙표

E E	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZO	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PL	PL
ZO	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZO	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZO

3.2 슬라이딩 모드 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어는 외란이나 불확실한 매개변수에 대해서 매우 견실하고, 불변성, 차수 감소 등의 장점을 가지고 있다. 따라서 자동차 엔진 제어, 자기 부상 시스템 제어, 모터의 전류나 속도 토크 및 위치 제어 등의 선형 플랜트나 비선형 플랜트에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서 사용하고 있는 구동장치나 전동기 시스템을 근사적으로 모델링 했기 때문에 모델의 불확실성을 포함하고 있다. 그래서 서보 시스템 사이에서도 모델링 오차가 존재하기 때문에 슬라이딩 모드 제어는 이러한 문제를 극복하는데 효과적이다.

3.2.1 부호 함수를 이용한 제어기

절환 함수(switching function)는 식(4)와 같이 선정한다.

$$s = w_{ref} - w \quad (4)$$

여기서 w_{ref} 는 속도 지령이며 w 는 전동기의 출력으로 전동기의 속도이다. 식(4)의 양변을 미분하면 다음의 식(5)과 같다.

$$\dot{s} = \dot{w}_{ref} - \dot{w} \quad (5)$$

도달 조건 $s\dot{s} < 0$ 을 $\dot{s} = -\eta \text{sgn}(s)$ 로 η 는 양의 상수이며, 부호 함수는 다음의 식(6)과 같이 정의한다.

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} +1 & \text{if } s > 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (6)$$

식 (2)를 이용하면 제어입력 u 는 식 (7) 과 같다.

$$u = u_{eq} + \frac{I}{K_p K_r} (\dot{w}_{ref} + \text{sgn}(s)) \quad (7)$$

여기서, u_{eq} 는 $\dot{x}_2 = 0$ 으로 놓으면 다음과 같이 정상상태에 도달했을 때의 제어입력을 구할 수 있다.

$$u_{eq} = -\frac{K_I}{K_p} x_1 + x_2 \quad (8)$$

3.2.2 포화 함수를 이용한 제어기 설계

부호 함수는 불연속이기 때문에 제어입력이 불연속적으로 변하게 되고 실제 플랜트는 시간 지연이 있기 때문에 채터링(chattering) 현상이 나타나게 된다. 채터링 현상은 시스템을 고주파에서의 동적 특성을 나쁘게 한다. 따라서 이러한 채터링을 줄이기 위해 부호함수 대신 포화 함수를 사용한다.

부호 함수가 불연속적인데 반하여 포화 함수는 연속적인 함수이다. 포화함수는 경계층(boundary layer) 밖에서만 부호 함수처럼 작용하고, 경계층 안에서는 선형 함수로 작용한다. 오차가 클 경우에 부호함수의 영향이 제어 입력에 나타나게 되어 절환 함수처럼 작용하고, 경계층 안에서는 선형 함수로 작용한다. 따라서, 오차가 클 경우는 부호 함수의 영향이 제어 입력에 나타나게 되어, 절환 함수가 빠르게 경계층 안으로 들어가게 한다. 경계층 안에서는 절환 함수의 값에 따라 제어 입력의 크기가 달라지게 된다. 포화함수는 다음과 같다.

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} \text{sgn}(s) & \text{if } |s| > \phi \\ \frac{s}{\phi} & \text{if } |s| < \phi \end{cases} \quad (9)$$

여기서, ϕ 는 양의 상수이다.

절환 함수는 다음의 식(10)과 같이 선정한다.

$$s = (\omega_{ref} - \omega) + \lambda \int (\omega_{ref} - \omega) dt \quad (10)$$

여기서 λ 는 양의 상수이며 (10)식의 양변을 미분하면

$$\dot{s} = (\dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}) + \lambda(\omega_{ref} - \omega) \quad (11)$$

이 된다. 도달조건 $s \dot{s} < 0$ 이 $\dot{s} = -\eta \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right)$ 이 되게 하는 제어 입력 u 를 선정한다. 식 (2)와 (8)을 이용하면 식(12)를 유도할수 있다.

$$u = u_{eq} + \frac{\lambda I}{K_p K_r} \left((\omega_{ref} - \omega) + \dot{\omega}_{ref} + \eta \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \right) \quad (12)$$

3.3 위치 동기 시스템의 구현

그림4는 2대의 전동기를 사용할 경우 위치동기를 구현하기 위해 본 연구에서 제안한 위치 동기 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

그림 4 에서 알수 있는 바와 같이 위치명령 블록에서 시간에 따른 위치 지령치를 생성하면 현재의 위치와의 오차를 이용해 비례 제어기를 통해 위치지령치를 추종할수 있는 속도지령치를 생성한다. 이 속도지령치와 실제속도가 슬라이딩 모드제어기에 인가되어 식(7), 식(8), 식(12)에 의해 제어입력을 출력한다. 또한 운전 중인 2대의 전동기의 실제속도 오차와 위치오차를 이용해 표 1에서 제안한 퍼지규칙에 의해 또 다른 제어입력을 출력한다. 슬라이딩 모드제어기에 의한 제어입력은 전동기의 위치오차를 빠르게 보상할 수 있는 성분이고 퍼지 제어기에 의한 제어입력은 시스템의 부정확성을 보완해주는 성분이다. 이 두가지 성분의 제어 입력이 서보앰프에 인가되어 위치동기화 특성을 개선하게 된다

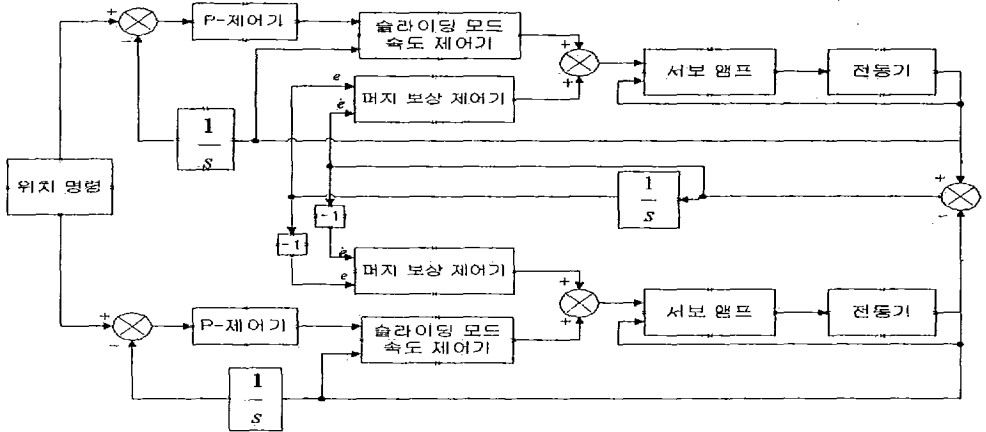


그림 4. 2대의 전동기 위치 동기 시스템

결국 앞에서 언급한 바와 같이 본 제어 시스템은 슬라이딩모드 제어기와 퍼지제어기를 병행하여 사용함으로써 시스템의 동특성을 향상시킵고 동시에 시스템 모델링의 불확실성을 보상해 강인성을 확보할 수 있게 된다.

4. 모 의 실험

본 연구에서 제안한 제어알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 mathwork사의 simulink를 사용해 모의 실험을 행했다.

그림 4와 같은 제어 시스템을 simulink상에서 구현하고 슬라이딩 모드 제어는 식(7)과 식(8)의 부호함수를 이용한 제어기를 설계했다. 퍼지제어기는 표 1, 그림 3 과 같은 멤버쉽 함수와 표 1과 같은 퍼지규칙을 이용해 구현했다. 양쪽 시스템의 모델링 오차를 고려하여 비례이득과 적분이득의 상수를 5%씩 다르게 설정하고 샘플링 시간은 1ms로 했다. 그리고 모든 모의 실험에 5%의 부하를 1초에서 2.5초 사이에 인가했다.

그림 5는 모의 실험에 사용된 전동기의 속도지령치 선도로 2대의 전동기에 같은 크기의 속도지령치를 인가한 것으로 정지상태에서 500[rpm]으로 기동하여 1000[rpm]으로 가변시킨 경우이다.

그림 6, 7, 8은 그림 5와 같이 2대의 서보시스템에 동일한 속도지령치를 인가하더라도 모델링 오차 및 외란 때문에 전동기의 위치오차가 발생하게 되는데 이 경우 각종 위치동기제어 시스템을 사용해 동기화를 구현한 결과를 보여주고 있다. 구체적으로 그림 6은참고 문헌 [1]에 있는 한쪽 시스템의 출력을 다른 시스템의 입력으로 인가해 동기화를 구현하는 Master/Slave 기법을 사용해 동기화를 시킨 경우의 위치오차를 나타내고 있으며 그림 6(a)는 Master에 외란이 인가된 경우이고 그림6(b)는 Slave에 외란이 인가된 경우를 나타내고 있다. 이 방법은 마스터 전동기의 역다이나믹스 모델링을 이용하고 있기 때문에 마스터 전동기에 외란이 인가되는 경우 비해 슬레이브 전동기에 외란이 인가될 경우의 동특성이 떨

어짐을 알 수 있고 위치 동기 오차가 상당히 커져 Master/Slave 방법으로는 정밀한 동기 운전을 구현하기 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 PD제어기를 이용할 경우의 위치오차를 나타내고 있으며 이 방법은 Master/Slave방식에 비해 위치오차는 현저히 줄지만 PD 이득설정과 시스템 모델링에 따라 위치오차가 상당히 달라짐을 확인할 수 있었다.

그림 8은 슬라이딩 모드제어기와 퍼지제어기를 병용한 경우의 위치오차를 보여주고 있는데 PD제어기를 사용한 경우보다 위치오차가 현저히 줄어들 뿐 아니라 서보 시스템 정수가 다소 바뀌더라도 오차의 크기는 거의 일정함을 확인했다.

이상의 모의실험 결과에서 나타난 바와 같이 본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드제어기와 퍼지제어기를 병용한 위치동기 제어시스템의 동기화 특성이 다른 방식에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다.

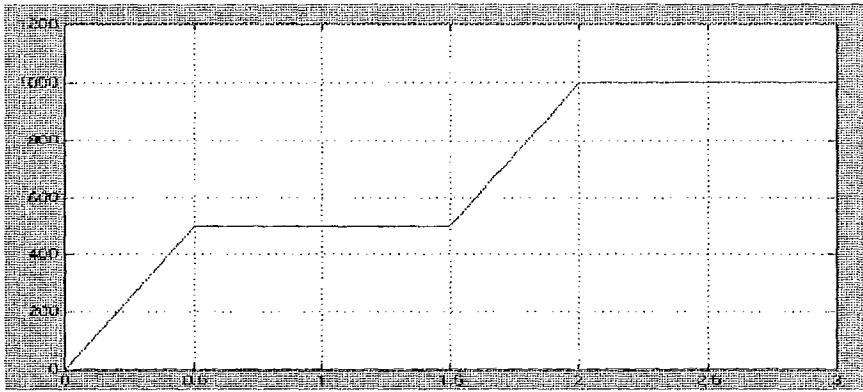
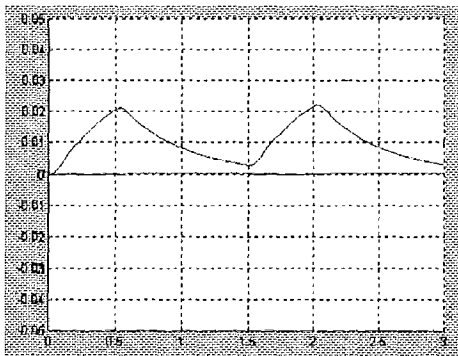
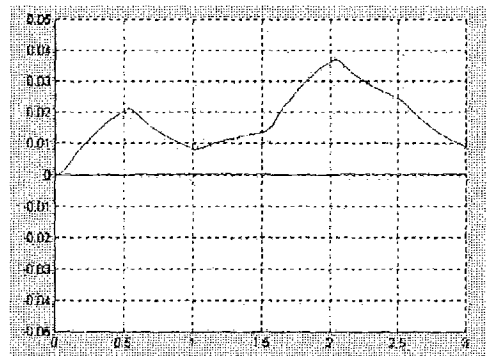


그림 5. 속도 지령치 선도



(a)



(b)

그림 6. Master/Slave 방식에 의한 위치 오차
(a) Master에 외란이 인가될 경우 (b)Slave에 외란이 인가될 경우

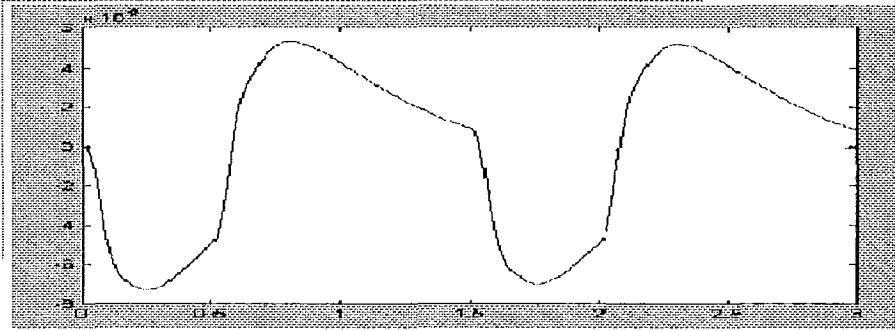


그림 7. PD 제어 기법에 의한 위치 오차

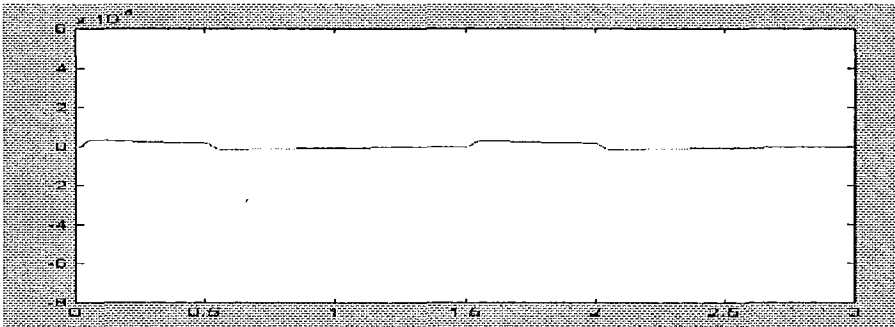
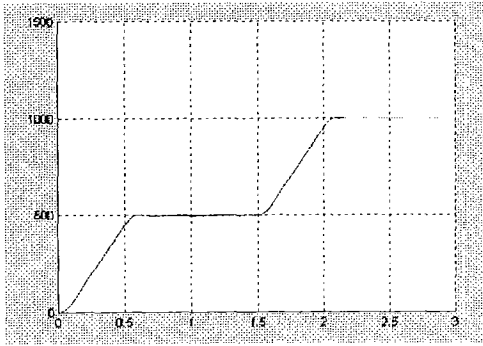


그림 8. 슬라이딩 모드 제어기와 퍼지 제어기를 병용한 경우의 위치 오차

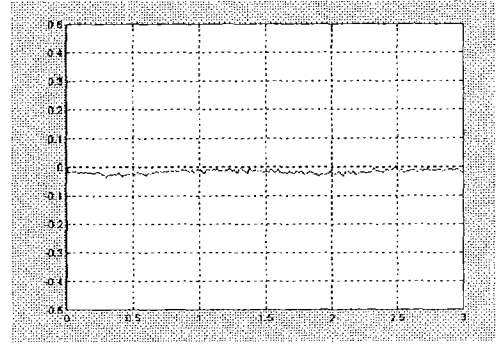
5. 실험결과

본 논문에서 제안한 방법을 실험적으로 구현해 보았다. 서보제어기로는 400Watts급 Mitsubishi사 제품을 사용했으며 부하인가를 위해 비접촉식 자기브레이크를 사용했다. 제어회로의 유연성과 실시간 제어를 위해 Texas Instrument사의 고성능 DSP 칩인 TMS320C32 사용해 모든 제어 알고리즘을 소프트웨어적으로 구현했다. 제어알고리즘은 모의실험에서 사용된 것과 완전히 일치한다. 다만 슬라이딩 모드제어기와 퍼지제어기에 의해 생성된 속도 제어입력을 D/A converter 사용해 전압 형태로 변환하여 서보 앰프에 인가했다. 또한, 전동기의 실제 속도는 펄스엔코드의 출력을 사용해 M/T방식에 의해 측정했으며 전동기 위치는 이 속도를 적분하여 계산했다.

그림 9는 본 논문에서 제안한 동기화 시스템에 의한 실험 결과를 보여주고 있는데 그림 9(a)는 모의실험의 그림 5와 같은 속도기준치를 인가할 경우 전동기에 속도출력 응답 선도이며 그림 9(b)는 위치 동기 오차 선도이다. 그림에서 세로축 단위는 각각 rpm 및 degree이다. 그림에서 위치오차가 모의실험에 비해 크고 오프셋이 있는 것은 모의실험에서의 위치오차가 radian임에 비해 실험에서는 degree를 사용했고 아울러 속도 측정오차에 기인한다고 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 9. 슬라이딩 모드 제어와 퍼지 제어를 병용했을 경우 선도
(a) 속도응답 선도 (b) 위치 오차

6. 결 론

본 논문에서는 이송장치용 전동기의 위치 동기 운전을 구현할 수 있는 새로운 방법을 제안했다. 전용 구동 장치가 있는 2대의 전동기를 사용하는 이송장치의 구동부를 등가적으로 모델링하고 이를 슬라이딩 모드 제어 기법과 퍼지 제어 기법을 병용하여 다양한 부하의 변동에서도 견실한 제어 특성과 함께 정밀한 위치 동기 운전 제어를 구현할 수 있는 방법을 제시했다. 모의실험 결과 슬라이딩 모드 제어 기법과 퍼지 제어 기법을 병용한 시스템은 모델링 오차 및 외란의 영향에도 강인하고 동특성이 우수하며 비례 제어기만 사용하는 위치 제어 시스템 보다 제어 특성이 월등히 뛰어남을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] David M. Tome and Jacob Tal, "Master/Slave Motion Synchronization for Industrial Processes", Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, 1986
- [2] M. Uchiyama and Y. Nakamura, "Symmetric Hybrid Position/Force Control of Two Cooperating Robot Manipulators", Proceeding of 1988 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and System pp. 512~520 1988
- [3] M. Tomizuka, J.S. Hu, T.C. Chiu, and T. Kamano, "Synchronization of Two Motion Control Axes Under Adaptive Feedforward Control", Trans. Of the ASME, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control 114-2 pp.196-203 1992
- [4] 김정호, 은용순, 조동일, "성능과 강인성 제고를 위한 AC 서보 모터의 가변구조제어", '95 KACC p515-518, 1995
- [5] 신인승, 이흥희, "Gantry Robot 이송용 주행축 Dual Motor의 동기제어에 관한 연구" 울산대학교 산업기술대학원 대학원 석사학위 논문, 1999
- [6] Mitsubishi Mel-Servo 매뉴얼