

외란 관측자와 가변구조제어기를 이용한 AC 서보모터의 속도 및 위치 제어

Speed and Position Control of the AC Motor using Variable Structure Controller with Disturbance Observer

°은용순, 김광수, 조동일

서울대학교 공과대학 전기공학부, 제어계측신기술연구소

Abstracts This paper develops an AC motor controller for applications. The AC motor controller is designed based on the variable structure control method and a variable structure disturbance observer is added to reduce the effects of exogenous disturbances. The designed controller is installed on the z-axis of a CNC machining center and milling experiments were performed. The results show improved performance on both position and speed tracking, when compared to the factory-designed servo controller.

Keywords variable structure control, variable structure disturbance observer, milling experiment, CNC machining center, sliding mode

1. 서론

Computer Numerical Control (CNC) 공작기계는 다양한 도구를 바꾸어 가며 여러 형태의 가공을 자동으로 수행할 수 있는 복합 공작 기계이다. CNC 공작기계가 사용되는 작업환경은 온도나 습도변화 등 제어기의 매개변수에 영향을 줄 수 있는 외부요인이 많다. CNC 공작기계의 제어기는 가공시에 발생하는 외란 뿐 아니라 매개변수의 불확실성 및 변화 등에 견딜하면서 빠르고 정밀한 가공을 수행할 수 있어야 한다.

기존의 CNC 머신은 AC 모터의 속도를 제어하는 서보팩과 이 서보팩에 속도 지령을 주는 위치 제어기로 구성되어 있다. 속도 제어기인 서보팩은 비례제어기나 비례적분제어기를 쓰는 것이 일반적이거나, 다른 여러 가지 연구도 진행되고 있다. 참고문헌 [15]에서는 폐환선형화(Feedback Linearization)기법을, 참고문헌 [1]에서는 최적제어기법을 이용해 AC 모터를 제어했다. 부하 등의 외란을 관측자를 이용해 보상하는 기법도 연구되고 있다. 참고문헌 [13]에서는 적분-비례제어에 외란관측자를 추가했다. 최근에는 참고문헌 [6, 12] 등, 가변구조제어기법을 모터제어에 적용한 연구도 진행되고 있다.

본 논문에서는 가변구조제어기 [12]에 가변구조 관측자를 첨가하여 CNC 공작기계의 속도 및 위치제어를 위한 AC 모터제어기를 개발하였으며, 절삭력 등에 의한 외란을 관측, 보상하여 건설성과 성능을 향상시켰다.

2. AC 서보 모터와 서보팩의 모델링

본 연구에서 사용한 AC 서보 모터는 Yaskawa의 USAMED-20M2으로 영구자석을 사용한 것이고, 정격 속도 1000 rpm, 정격 출력 2Kw이다. 이 모터를 구동하기 위해서 사용되는 서보팩은 동사의 제품인 CACR-SR20BB1AM이다. 서보팩은 전류 제어기와 비례-적분 속도제어기를 내장하고 있는데 이의 분리가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 모터와 서보팩을 하나의 시스템으로 보고 이 시스템 외부에 폐환 루프를 추가하였다. AC 모터와 서보팩의 모델링은 [12, 14]를 참고로 했다. 서보팩의 속도제어기는 비례-적분제어기인데 이것을 비례제어기만

으로 동작시킬 수 있다. 식 (1)은 제어기 설계를 위해 간략화된 모델이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix} \quad (1)$$
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -K \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}, \quad K = \frac{K_p K_t}{J}$$

3. 가변구조 제어기 및 관측자

가변구조제어기법(Variable Structure Control, VSC)은 매개변수의 변화나 부하 등의 외란에 대한 상한과 하한 값 이내에서 건설성이 보장되고, 또 비선형 플랜트에도 쉽게 적용될 수 있는 특징을 가진다 [9]. 이러한 이유로 가변구조제어기법은 여러분야에 다양하게 적용되고 있다 [2-3, 10]. 가변구조제어기법은 건설성을 보장하지만 불연속 입력을 사용하기 때문에 채터링현상을 보이는 특징을 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위한 연구는 다양한 각도에서 진행되고 있는데 일정한 범위내에서 불연속 입력을 연속 입력으로 바꾸어주거나, 외란 관측자를 사용하여 건설성계수의 값을 작게 함으로써 건설성의 보장범위를 희생하지 않고 채터링을 줄이는 방법, 퍼지이론을 이용하여 상황에 따라 가변구조제어기의 이득을 변화시키는 방법 등이 있다.

가변구조제어기와 외란관측자를 함께 사용하는 연구는 참고문헌 [4-5, 10] 등에서 찾아볼 수 있다. 참고문헌 [4-5]는 가변구조제어기와 외란 관측자를 사용하여 로봇 매니플레이터를 제어했고 참고문헌 [11]은 엔진의 연료분사제어에 가변구조제어기에 외란 관측자를 사용하였다.

3.1 가변구조 제어기 및 관측자의 설계

식 (1)의 모델을 이용하여 가변구조 제어기와 관측자를 설계한다. 슬딩 평면 s 는 속도 오차와 위치오차의 선형 합으로 다음과 같이 설정한다.

$$s = e_2 + \lambda e_1 \quad (2)$$

외란 d 는 추정치 \hat{d} 와 추정 오차 \tilde{d} 로 구분한다.

$$d = \hat{d} + \tilde{d} \quad (3)$$

식 (1)의 모델에 대해서 슬롯평균면 s 를 0으로 만드는 제어입력 u 는 연속시간공간에서 다음과 같이 구해진다[12].

$$u = x_2 + \frac{J}{K_p K_r} (\dot{x}_2 + \lambda e_2 + \frac{\hat{d}}{J} + \eta \text{sat}(\frac{s}{\phi})) \quad (4)$$

$$\text{sat}(\frac{s}{\phi}) = \begin{cases} 1 & (s > \phi) \\ s/\phi & (-\phi < s < \phi) \\ -1 & (s < -\phi) \end{cases}$$

식 (3)(4)를 플랜트 모델인 식 (1)에 대입하여 정리하면 절환 함수 s 의 동적특성을 구할 수 있다.

$$\dot{s} - \frac{\tilde{d}}{J} = -\eta \text{sat}(\frac{s}{\phi}) \quad (6)$$

$$\tilde{d} = J(\dot{s} + \eta \text{sat}(\frac{s}{\phi})) \quad (7)$$

식 (7)에서 외란 추정값의 오차와 슬롯 평균면을 나타내는 절환 함수 s 와의 관계를 얻는다.

마이크로프로세서의 빠른 발전에 힘입어 제어기는 이산시간에서 구현되는 것이 일반적이고 별도의 상태 관측자나 센서를 사용하지 않고 신호의 미분값을 구하는 방법은 역차분법(backward difference method) 를 사용하는 것이 일반적이다. 이러한 배경에서 식 (7)을 바탕으로한 외란 추정 법칙은 이산 시간 공간에서 절환함수 s 의 값을 바탕으로 (8)와 같이 설정한다 [11].

$$\hat{d}(k+1) = \hat{d}(k) + J\eta(g_1 s(k+1) + g_2 s(k)) \quad (8)$$

참고문헌 [5]에서도 가변구조 제어기에 외란관측자를 사용하였는데 외란추정법칙이 가속도 추정을 바탕으로 설정되었다. 반면 외란추정법칙 (8)는 절환함수의 값만을 바탕으로 하므로 별도의 가속도추정이 필요하지않아 위치 인코더(encoder)로부터 속도를 계산하는 AC 모터제어시스템에는 더 적합하다고 할 수 있다.

3.2 안정성

가변구조관측자는 이산시간공간에서 설계되었으므로 페루프 시스템의 안정도는 이산시간공간에서 분석한다. 식 (1)의 플랜트 모델을 $\phi = e^{AT}$, $\Gamma = \int_0^T e^{A\tau} B d\tau$ 을 이용해 이산시간공간으로 변환하면 플랜트의 이산시간모델 (9)을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \phi \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \Gamma \begin{bmatrix} u(k) \\ d(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a}{K} \\ 0 & 1-a \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} T - \frac{a}{K} & -\frac{1}{JK} (T - \frac{a}{K}) \\ a & -\frac{a}{JK} \end{bmatrix}$$

$$(T : \text{샘플링주기}, a = 1 - e^{-KT}, b = \frac{T\lambda}{K} - \frac{a\lambda}{K^2} + \frac{a}{K})$$

제어입력 $u(k)$ 와 절환함수 $s(k)$ 는 연속시간공간에서 설계되었으나, 마이크로 프로세서를 이용하여 제어기를 구현하므로, 이산시간공간에서 안정도를 분석한다.

제어기를 이산시간 공간에서 구현하면 유한한 샘플링주기에 의해 오차가 야기된다. 이를 보상하기 위해 식 (4)를 바탕으로 이산시간 공간에서 구현한 제어입력 $u(k)$ 에 두 상수 α 와 β 를 도입하여 (10)과 같이 설정한다.

$$u(k) = x_2(k) + \frac{1}{K} [\alpha \cdot \frac{x_2(k+1) - x_2(k)}{T}] + \frac{1}{K} [\beta \cdot \lambda e_2(k) + \eta \text{sat}(s(k)) + \frac{\hat{d}(k)}{J}] \quad (10)$$

이산시간 모델 (9)를 이용하여 페루프 다이내믹스를 분석하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} s(k+1) &= s(k) + (\lambda T + 1 - \frac{ba}{T}) x_2(k+1) \\ &\quad + (-1 + \frac{ba}{T} - b\beta\lambda) x_2(k) \\ &\quad + (-\frac{a\lambda}{K} + a - bK + b\beta\lambda) x_2(k) \\ &\quad + \frac{b}{J} \tilde{d}(k) - b\eta \text{sat}(s(k)) \end{aligned} \quad (11)$$

이산시간 공간에서 구현됨으로서 야기되는 오차를 보상하기 위한 두 상수를 $\alpha = \frac{(\lambda T + 1)T}{b}$, $\beta = \frac{T}{b}$ 로 선정하면, 식 (11)는 식 (12)로 간단히 되고,

$$s(k+1) = s(k) - b\eta \text{sat}(s(k)) + \frac{b}{J} \tilde{d}(k) \quad (12)$$

식(8)와 식 (12)으로부터 관측자의 추정 오차에 대한 동적특성 (13)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \tilde{d}(k+1) &= (1 - g_1 \eta b) \tilde{d}(k) \\ &\quad + J\eta [g_1 \eta b \text{sat}(s(k)) - (g_1 + g_2) s(k)] \\ &\quad + d(k+1) - d(k) \end{aligned} \quad (13)$$

관측자 이득을 $g_2 = g_1 \frac{(\eta b \text{sat}(s(k)) - s(k))}{s(k)}$ 로 놓으면 식 (13)는 식 (14)로 간단히 된다.

$$\tilde{d}(k+1) = (1 - g_1 \eta b) \tilde{d}(k) + d(k+1) - d(k) \quad (14)$$

식 (14)는 외란관측자가 오버슈트없이 외란을 추정하고 또 절환 함수 s 의 동적특성으로부터 분리됨을 보여준다. 전체 제어시스템의 페루프 다이내믹스는 다음과 같다.

$$|s(k)| > \phi : s(k+1) = s(k) - b\eta \text{sat}(s(k)) + \frac{b}{J} \tilde{d}(k)$$

$$|s(k)| < \phi : s(k+1) = (1 - \frac{b\eta}{\phi}) s(k) + \frac{b}{J} \tilde{d}(k)$$

$$\tilde{d}(k+1) = (1 - g_1 \eta b) \tilde{d}(k) + d(k+1) - d(k)$$

안정성은 다음 세 조건이 만족되면 보장된다.

$$|1 - \eta b g_1| < 1, \quad |1 - \frac{\eta b}{\phi}| < 1, \quad \left| \frac{d}{J} \right| < \eta$$

관측자를 사용하지 않는 경우, 견실성 계수 η 는 $|d/J| < \eta$ 를 만족해야 한다. 관측자를 사용하는 경우, 견실성 계수 η 는 $|d/J| < \eta$ 를 만족하면되므로, 견실성은 매개변수의 변화나 부하 등의 외란에 대한 상한과 하한값대신 외란 추정 오차에 대한 상한과 하한값에 관련되고, 따라서 작은 견실성 계수로도 제어기의 안정성과 견실성을 보장할 수 있다.

4. 실험 결과

실험 결과의 비교평가는 본 실험실에서 설계한 가변구조제어기[12]를 대상으로 행하여졌다. 실험을 위해 제안된 제어기는 PC를 이용해 구현하였고, 직접 제작한 I/O 보드를 이용해 서보팩 및 AC 모터와 연결되었다. 모터의 속도추정을 위해 24000 pulse/rev. 인코더와 M/T 기법[7]을 사용하였다. 속도지령을 위해서는 12bit D/A 컨버터를 사용하였다.

절삭실험을 위해서 통일중공업의 TNV-40 머시닝센터를 이용하였다. 머시닝 센터의 z축 이송용 AC 모터에 설계된 제어기를 장착하여 밀링(milling) 가공 실험을 행하였다. 절삭조건은 표 1에 정리되어 있다.

PI 서보팩, 가변구조제어(VSC), 그리고 관측자가 첨가된 가변구조제어(VSO+VSC)의 절삭조건1에서의 실험결과가 각각 그림1부터 그림3까지이고, 절삭조건2에서의 실험결과가 같은 순서로 그림4부터 그림6까지에 나타나 있다. 부하가 걸리기 시작하는 지

점을 그래프에서 화살표로 표시하였다. 속도성능에서 보면 PI 서보팩의 경우 부하가 걸리는 지점을 확실하게 볼 수 있으나, 이에 반해 VSC, VSO+VSC는 거의 알아볼 수 없다. 위치오차에서는 PI 서보팩의 경우 심하게는 100 μm 까지의 오차가 생기는 것을 알 수 있으나, VSC의 경우 10 μm 이내이고, VSO+VSC는 부하가 걸리더라도 1 μm 이내인 것을 볼 수 있어 위치추종성능에서 월등히 향상됨을 알 수 있다.

표 1. 절삭조건
Table 1. Cutting conditions

	z축 이송	z축 모터 회전	스핀들회전	피삭재	드릴지름
조건1	1.67 mm/s	10 rpm	1200 rpm	SS41C	7 ϕ
조건2	2.5 mm/s	15 rpm	1500 rpm	SS41C	7 ϕ

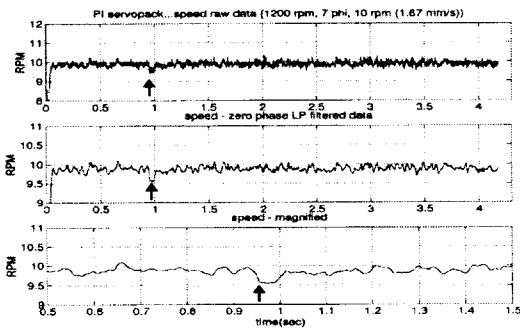


그림1. 절삭조건 1에서의 PI 서보팩 제어기
Fig1. PI servopack(cutting condition 1)

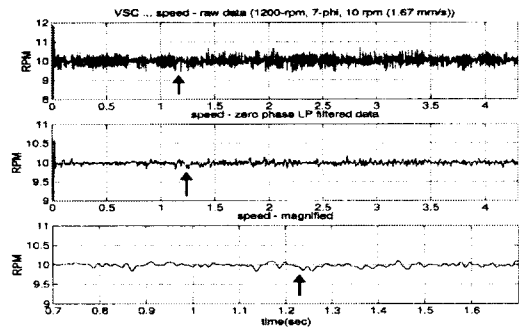
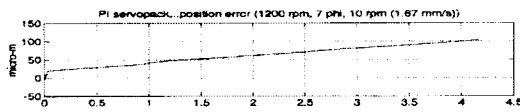


그림2. 절삭조건 1에서의 가변구조제어기
Fig2. VSC (cutting condition 1)

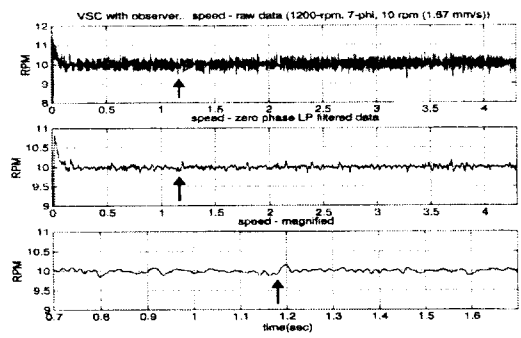
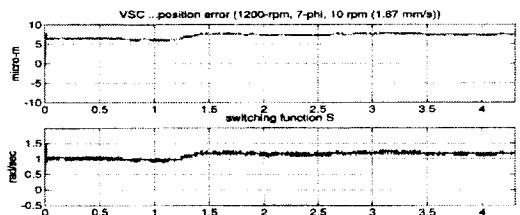


그림3. 절삭조건 1에서의 가변구조제어기와 관측자
Fig3. VSC with observer(cutting condition 1)

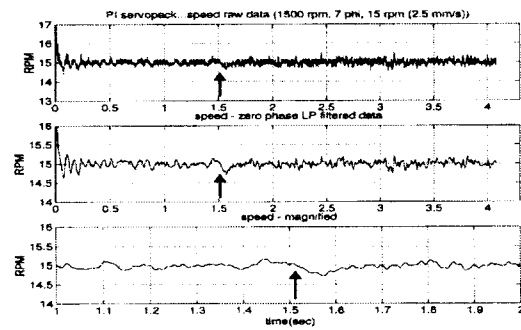
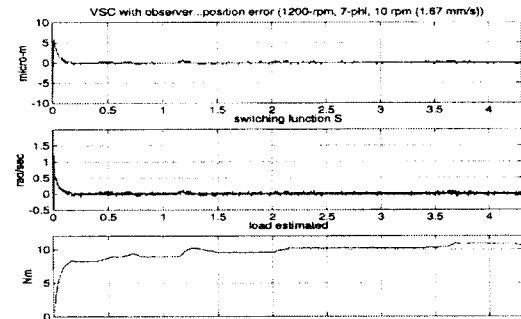
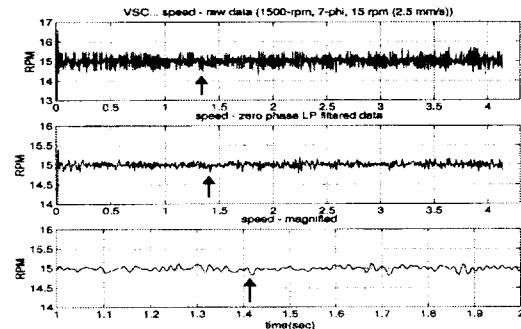
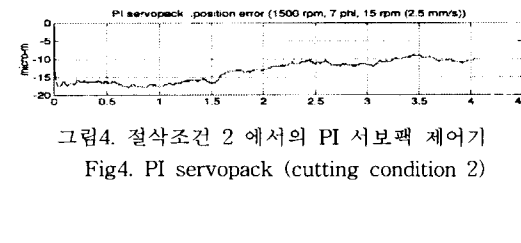


그림4. 절삭조건 2에서의 PI 서보팩 제어기
Fig4. PI servopack (cutting condition 2)



(다음 쪽에 그림 계속)

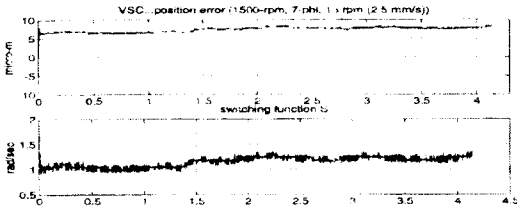


그림5. 절삭조건 2에서의 가변구조제어기

Fig5. VSC (cutting condition 2)

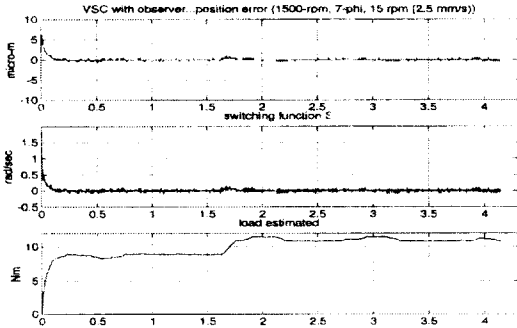
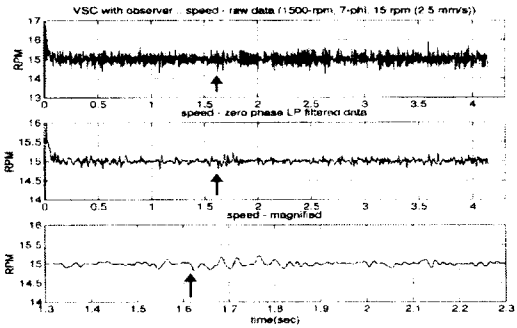


그림6. 절삭조건 2에서의 가변구조제어기와 관측자

Fig6. VSC with observer (cutting condition 2)

5. 결론

본 논문에서는 가변구조제어기에 가변구조관측자를 추가하여 CNC용 AC 모터 제어기를 설계하였다. 본 연구에서는 기존의 서보팩과 모터를 하나의 플랫폼으로 보고 모델링을 하였다. 제어기는 이러한 모델을 바탕으로 가변구조제어기법을 이용하여 설계되었다. 제안된 제어기를 TNV40 머시닝 센터에 장착하여 실제 절삭실험을 하였다. 가변구조제어기에 가변구조관측자를 첨가한 제어기는 가변구조제어기만을 사용한 경우보다 위치제어추종 성능이 향상되었다.

기호설명

- x_1 : 위치 (rad)
- x_{1r} : 위치지령 (rad)
- $e_1 = x_{1r} - x_1$: 위치오차 (rad)
- x_2 : 속도 (rad/sec)
- x_{2r} : 속도지령 (rad/sec)
- $e_2 = x_{2r} - x_2$: 속도오차 (rad/sec)
- K_p : 서보팩 속도 제어기의 비례이득
- K_t : 토크 상수 ($N \cdot m/A$)
- J : 회전 관성 ($N \cdot m \cdot sec^2$)
- d : 외란 ($N \cdot m$)

- s : 가변구조제어기에 사용되는 절환함수 또는 슬딩평면
- ϕ : 가변구조제어기의 경계층의 크기
- η : 가변구조제어기의 건설성계수
- g_1 : 가변구조관측자의 이득
- g_2 : 가변구조관측자의 이득
- α : 가변구조제어기의 이산시간구현오차 보상 이득
- β : 가변구조제어기의 이산시간구현오차 보상 이득

6. 참고문헌

- [1] K.-T. Chang, T.-S. Low, and T.-H. Lee, "An optimal speed controller for permanent-magnet synchronous motor drives", *IEEE Transactions on Industry Electronics*, vol. 41, no. 5, pp. 503-510, Oct. 1994.
- [2] D. Cho, and H. K. Oh, "Variable structure control method for fuel-injected systems", *ASME Journal of Dynamic System, Measurements, and Control*, vol. 115, pp. 475-481, 1993.
- [3] D. Cho, Y. Kato, and D. Spilman, "Experimental comparison of sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems", *IEEE Control System Magazine*, vol. 13, pp. 42-48, 1993.
- [4] A. Kawamura, H. Itoh, K. Sakamoto, "Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 2, pp.456-461, Mar/Apr, 1994.
- [5] O. Kaynak, A. Denker, "Discrete time sliding mode control in the presence of system uncertainty", *International Journal of Control*, vol. 57, no. 5, pp. 1177-1189, 1993.
- [6] J.-H. Lee, J.-S. Ko, S.-K. Chung, D.-S. Lee, and M.-J. Youn, "Continuous variable structure controller for BLDDSM position control with prescribed tracking performance", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 5, pp. 483-491, Oct. 1994.
- [7] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, M. Tachikawa, "A microprocessor-controlled high accuracy wide-range speed regulator for motor drive", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE-29, no. 3, pp. 207-211, 1982.
- [8] M. I. Spong, R. Narino, S. M. Peresada, and D. G. Taylor, "Feedback linearizing control of switched reluctance motors", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-32, no. 5, pp. 371-379, 1987.
- [9] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, 1977.
- [10] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, 1993.
- [11] M. C. Won, "Multiple surface sliding control with application to engine control", Ph. D. Thesis, University of California at Berkeley, pp 56-61, 1994.
- [12] 김 성호, 은 용순, 조 동일, "성능과 강인성 제고를 위한 AC 서보 모터의 가변구조제어", 제1회 자동제어학술대회, pp. 515-518, 1995. 10.
- [13] 이 재희, 이 석호, 허 옥열, "2자유도를 갖는 적응 서보 제어기 설계", 제어계측신기술연구센터 1995년도 참여교수 하계 워크샵, pp. 67-74, 1995. 8.
- [14] 최 중호, 장 태정, 최 병갑, 나 일주, 송 오석, "CNC 머시닝 센터용 고기능 위치제어기 개발에 관한 연구", 제어계측신기술연구센터 1995년도 참여교수 하계 워크샵, pp. 55-66, 1995. 8.
- [15] 하 인중, 강 장익, 한 석희, "극저속제어가 가능한 서보제어에 관한 연구", 고기능 NC 콘트롤러에 관한 워크샵, pp. 1-15, 1994. 2.