

논문 2004-41SC-2-3

XY 테이블의 퍼지 데드존 보상

(Deadzone compensation of a XY table using fuzzy logic)

장 준 오*

(Jun-Oh Jang)

요 약

퍼지논리를 이용한 XY 테이블의 데드존 보상기법을 제안한다. 퍼지논리 함수의 분류특성은 다양한 영역을 가진 데드존에 의해 유발되는 오차를 제거하기 위한 보상기 설계를 가능케 한다. 데드존 보상이 적응적이고 추적오차와 파라미터 추정치가 유계가 되는 퍼지논리 파라미터 동조알고리즘과 안정도 증명을 제시한다. 퍼지논리 데드존 보상기를 위치 테이블에 실험함으로써 데드존의 해로운 영향을 줄이는 효과를 보여준다.

Abstract

A deadzone compensator is designed for a XY positioning table using fuzzy logic. The classification property of fuzzy logic systems makes them a natural candidate for the rejection of errors induced by the deadzone, which has regions in which it behaves differently. A tuning algorithm is given for the fuzzy logic parameters, so that the deadzone compensation scheme becomes adaptive, guaranteeing small tracking errors and bounded parameter estimates. Formal nonlinear stability proofs are given to show that the tracking error is small. The fuzzy logic deadzone compensator is implemented on a XY positioning table to show its efficacy.

Keywords: Deadzone compensation, XY positioning table, Fuzzy logic, Actuator nonlinearity

I. 서 론

크레인기구, 로봇 매니퓰레이터, XY 위치테이블 같은 기계적 장치는 고정밀 제어를 필요로 한다^[1,2,3,4,5]. 이 장치들의 성능은 데드존, 마찰, 백래쉬 등에 의해 저하된다. 특히, 정밀한 위치, 즉 미세한 변위 제어는 정밀 장치시스템 설계의 어려운 문제점이다. 비선형 구동기의 비분석적 성질과 파라미터의 부정확성은 시스템 설계자에게 상당한 어려움을 준다. 그 중에 데드존 효과에 의

해 발생하는 문제점을 극복하면서 발달되어온 시스템들이 있다. 관련된 일반적인 방법 중에는 진동(dithering)^[6]을 이용한 데드존 보상기와 가변구조의 제어기법이다^[7]. 비대칭 데드존을 위한 보상기는 선형시스템^[8],9]에 고려되었고, 알려진 비선형 함수를 가진 Brunosky 형태, 알려지지 않은 표준 형태(canonical form) 시스템에서는 백스텝핑 접근법을 이용하였다^{[10][11]}. 또한 모델 추종제어에서 데드존 파라미터를 동조하는 적응제어 기법^[12]과 데드존이 있는 시스템에 가변구조제어기법^[13]도 제안되었다.

퍼지논리를 이용한 시스템은 피드백 제어를 포함한 여러 분야에서 최근 빠르게 발달하고 있다^[14]. 퍼지논리 데드존 보상기 설계는 여러 문헌들^[15,16,17]에 언급되어 있다. 퍼지논리 제어에서 특히 중요한 점은 퍼지논리 시스

* 정희원, 위덕대학교 컴퓨터멀티미디어공학부
(Division of Computer & Multimedia Engineering,
Uiduk University)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-11047 -0) 지원으로 수행되었음

접수일자: 2003년7월21일, 수정완료일: 2004년1월30일

템의 일반적인 함수 근사화로 접근 가능하다는 점이다 [18,19]. 퍼지논리 시스템은 추정 파라미터에서 선형성을 요구하지 않고 각각 시스템에 대한 구체적인 역행렬 계산을 필요로 하지 않아, 적응제어보다 상당히 유리함을 보여준다. 구동기 비선형성들은 일반적으로 동작변수 영역에 따라 부분적인 선형구간 함수로 볼 수 있다. 퍼지논리 함수 근사 특성과 퍼지논리 시스템의 기능은 다양한 입력 영역에 대한 기본적인 정보를 구분하는 능력으로 표현되고, 비분석적인 구동기 비선형성에 대해서 보상기로 이용되게 한다.

본 논문에서는 퍼지논리를 이용한 XY 테이블의 데드존 보상기법을 제안한다. 증명과 함께 제어기 설계 절차가 주어지며, 데드존 보상을 위한 피드포워드 루프에서 적용 퍼지논리 시스템과 비례비분(PD) 추적루프로 이루어진다. 추적오차 방정식의 분석으로부터 추적 오차의 실제적인 유계(bound)를 얻을 수 있고, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통해 위치 테이블에서 퍼지논리 데드존 보상기의 성능을 조사한다. 퍼지논리 데드존 보상기를 위치테이블로 모의실험 및 실험함으로써 시스템 데드존의 해로운 영향을 줄이는 효과도 보여줄 것이다.

II. 퍼지 데드존 보상

비대칭 데드존에 대해서 퍼지논리 보상기를 설계하려고 한다. 퍼지논리 접근법 [20-22]은 스위칭 논리와 지시함수(indicator function)를 포함하며, 멤버십 함수를 이용하여 좀 더 효율적인 보상이 되게 한다. 따라서, 위치 테이블의 데드존 보상을 위한 퍼지논리 적용의 일반적인 기준을 제시한다.

그림 1의 비대칭 데드존 비선형성은

$$T = D_d(u) = \begin{cases} u - d_- & , & u < d_- \\ 0 & , & d_- \leq u < d_+ \\ u - d_+ & , & d_+ \leq u \end{cases} \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 파라미터 벡터 $d = [d_+ \ d_-]$ 는 시스템의 데드 밴드의 폭을 나타낸다. 실제적인 제어시스템 데드존 구간은 알기 어렵고 보상하기가 힘들다. 대부분의 보상기는 $d_- = d_+$ 인 대칭 데드존의 경우에만 동작 가능하다.

비대칭 데드존은

$$T = D_d(u) = u - sat_d(u) \quad (2)$$

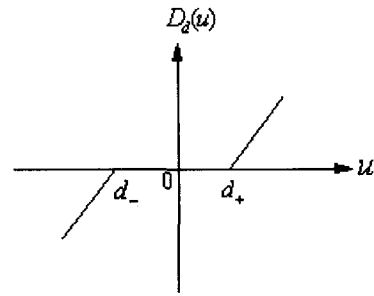


그림 1. 데드존 비선형성.
Fig. 1. deadzone nonlinearity.

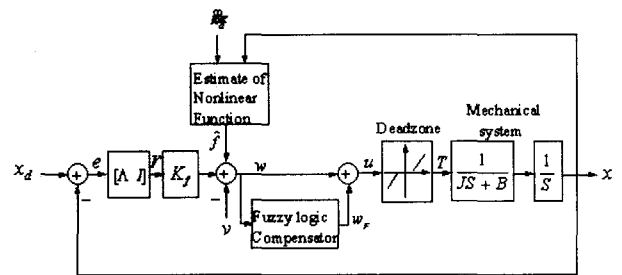


그림 2. 시스템의 퍼지 논리 데드존 보상기.
Fig. 2. Fuzzy Logic deadzone compensation of a system.

로 표현 될 수 있고, 비대칭 포화 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$sat_d(u) = \begin{cases} d_- & , & u < d_- \\ u & , & d_- \leq u < d_+ \\ d_+ & , & d_+ \leq u \end{cases} \quad (3)$$

데드존의 나쁜 효과를 줄이려는 목적으로 그림 2와 같이 전보상기가 이용된다. 여기서 보상기의 원하는 함수는 w 에서 T 까지를 1이 되게 하는 것이다.

퍼지논리 시스템의 기능은 제어시스템 설계 경험에 기반을 둔 직관적인 지식을 가능하게 한다. 그러면 정밀한 분석과 직관적인 지식의 수식화를 위해서 수학적 도구를 제공하며, 학습과 적용, 증명과 실행의 예는 3장에서 보여 줄 것이다. 퍼지논리 분류특성은 독립변수 u 가 동작하는 영역에 따라 비선형성이 의존적일 때 두드러지게 강력해진다.

엔지니어의 경험을 이용한 데드존 보상기는 불연속적이고 w 가 동작하는 영역에 따라 동작한다. 룰을 이용하여 자연스럽게 묘사하면,

$$\begin{aligned} \text{If}(w \text{ is positive}) \text{ then } (u &= w + \tilde{d}_+) \\ \text{If}(w \text{ is negative}) \text{ then } (u &= w + \tilde{d}_-) \end{aligned} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 $\tilde{d} = [\tilde{d}_+ \ \tilde{d}_-]$ 는 데드존 폭인, 파라미터 벡터 d 의 추정값이다.

수학적으로 멤버쉽 함수를 정의하면

$$X_+(w) = \begin{cases} 0, & w < 0 \\ 1, & 0 \leq w \end{cases} \quad (5)$$

$$X_-(w) = \begin{cases} 1, & w < 0 \\ 0, & 0 \leq w \end{cases}$$

가 되고, 보상기는

$$u = w + w_F \quad (6)$$

로 표현 가능하다. 여기서 w_F 는 룰 베이스

$$\text{If } (w \in X_+(w)) \text{ then } (w_F = \tilde{d}_+) \quad (7)$$

$$\text{If } (w \in X_-(w)) \text{ then } (w_F = \tilde{d}_-)$$

에 의해 주어진다.

룰 베이스에 의한 퍼지논리 시스템의 출력은

$$w_F = \frac{\tilde{d}_+ X_+(w) + \tilde{d}_- X_-(w)}{X_+(w) + X_-(w)} \quad (8)$$

가 된다. 추정치 \tilde{d}_+ , \tilde{d}_- 값은 각각 $X_+(w)$ 와 $X_-(w)$ 의 제어표시 값이다.

이는 (단, $X_+(w) + X_-(w) = 1$)

$$w_F = \tilde{d}^T X(w) \quad (9)$$

가 된다. 여기서 퍼지논리 기본함수 벡터는

$$X(w) = \begin{bmatrix} X_+(w) \\ X_-(w) \end{bmatrix} \quad (10)$$

이고 w 가 가지는 어떤 값에 의해 쉽게 계산된다.

퍼지논리 보상기의 w 에서 T 까지 합성한 값과 데드존을 합하면

$$T = D_d(u) = D_d(w + w_F) = w + [w_F - \text{sat}(w + w_F)] \quad (11)$$

이다. 이에 따라 퍼지논리 보상기를 표현하면

$$u = w + w_F = w + \tilde{d}^T X(w) \quad (12)$$

가 된다. 여기서 \tilde{d} 는 추정 데드존 폭이다.

식(7)과 같은 룰 베이스로 퍼지논리 보상기가 주어지면, 보상기와 데드존을 합하면

$$T = w - \tilde{d}^T X(w) + \tilde{d}^T d \quad (13)$$

가 된다. 여기서 데드존 구간 근사 예러는

$$\tilde{d} = d - \tilde{d} \quad (14)$$

이다. 모델링하기 부적당한 구간 δ 은 어떤 스칼라 δ_M 에 대하여 $|\delta| < \delta_M$ 되게 유계된다.

III. XY 테이블의 퍼지 데드존 보상

이 장에서는 XY 테이블의 데드존에 대하여 퍼지논리 데드존 보상기의 설계과정을 보여준다. 퍼지논리 데드존 보상은 식(12)에 의해 주어진다. 데드존 폭 추정치 \tilde{d} 의 동조(tuning)을 통해 추적오차는 줄어들고 모든 내부상태는 유계됨을 증명한다. 이는 퍼지논리 데드존 보상이 적응적임을 보여준다. 여기서 시스템 입력 $T(t)$ 는 측정할 수 없다는 가정을 한다.

시스템의 X축(Y축) 다이내믹스는

$$J\dot{x} + Bx + T_f + T_d = T \quad (15)$$

로 표현 가능하고, $X(t)$ 는 위치이고, J 는 관성 B 는 점성 마찰, T_f 는 비선형 마찰, T_d 는 미지의 외란이고, T 는 시스템 입력이다. 알려진 정수 τ_d 에 대해서 $|T_d| < \tau_d$ 라 가정한다.

시스템의 입력 $T(t)$ 는 데드존을 통하여 제어입력 $u(t)$ 와 연관된다.

$$T = D_d(u) = u - \text{sat}_d(u) \quad (16)$$

미지의 데드존 폭은 어떤 스칼라 d_M 에 대해서

$$|d| < d_M \quad (17)$$

로 가정하고, 데드존 폭은 정수라고 가정하면

$$\tilde{d} = 0 \quad (18)$$

가 된다. 원하는 신호를 x_d 라 하고, 추적 오차는 $e = x_d - x$, 필터된 추적오차는

$$r = \dot{e} + \Lambda e \quad (19)$$

이다. 여기서 Λ 는 양한정 설계변수이다. 필터된 추적오차 $r(t)$ 가 유계되면 $e(t)$ 는 유계(bound)되고, 식(19)는 안정된 시스템이 된다.

(19)식을 미분하고 (15)식을 이용하여 시스템의 다이내믹스는 필터된 추적오차로 쓸 수 있다.

$$J\dot{r} = -Br - T + f(q) + T_d \quad (20)$$

여기서 비선형 플랜트 함수 f 는

$$f(q) = J(\dot{x}_d + \Lambda e) + B(\dot{x}_d + \Lambda e) + T_d \quad (21)$$

가 된다. 벡터 q 를 포함한 모든 시간신호는 $f(\cdot)$ 계산시 필요로 하고, 이를테면 $q = [e \quad \dot{e} \quad \dot{x}_d \quad \ddot{x}_d]^T$ 처럼 정의 내릴 수 있다. 함수 $f(q)$ 는 모든 식별할 수 없는 함수를 잠재적으로 포함하고 있다. 식(20)에서 J, B 를 제외한 나머지는 뒤에 안전성 증명에서 상쇄된다.

미지 항 $f(q)$ 에 대해서 견실한 보상을 위한 추적제어를 설계하면

$$w = \tilde{f}(q) + K_f r - v \quad (22)$$

가 된다. 여기서 비선형 구간 $f(q)$ 의 추정치는 $\tilde{f}(q)$ 이고, $v(t)$ 견실화 항, $K_f > 0$ 이다.

데드존 보상은

$$u = w + \tilde{d}^T X(w) \quad (23)$$

로 쓸 수 있고 $X(w)$ 는 식(10)에 의해 주어진다. 전체적인 제어구조는 그림 2에서 보여진다. 여기서 제어기는 $K_f r = K_f \dot{e} + K_f \Lambda e$ 인 비례-미분(PD) 추적 루프이고, 데드존 효과는 피드포워드 보상기에 의해 보상된다. 추정치 $\tilde{f}(q)$ 는 비선형 제어루프 내에서 계산된다.

(22)과 (13)을 (20)에 대입하여 계산하면 페루프 오차 다이내믹스는

$$J\dot{r} = -(K_f + B)r + \tilde{d}^T X(w) - \tilde{d}^T \delta + [\tilde{f} + T_d + v] \quad (24)$$

이다. 여기서 비선형 함수의 추정오차는 $\tilde{f} = f(q) - \tilde{f}(q)$ 에 의해 주어진다.

일반적으로 추정값 \tilde{f} 은 많은 방법에 의해 제공되었다^{[23][24]}. 함수 추정오차는 어떤 미지의 유계함수 $f_M(q)$ 에 대해 유계된다고 가정하면

$$|\tilde{f}| \leq f_M(q) \quad (25)$$

가 된다.

다음 정리는 데드존 보상기를 동조하기 위한 알고리즘이다.

정리 1 : 식(20)으로 표현되는 시스템에서, 추적제어기 (22)식에 데드존 보상기 (23)식을 합한 것을 선택한다. 여기서 $X(w)$ 는 (10)에 의해 주어진다. 견실한 신호

$$v(t) = -(f_M(q) + \tau_d) \frac{r}{|r|} \quad (26)$$

를 이용하고, 추정 데드존 폭은 다음과 같이 퍼지 논리 동조알고리즘에 의해 주어지며,

$$\tilde{d} = X(w)r - \tilde{d} \quad (27)$$

이다. 여기서 스칼라 $k > 0$ 이다. 그러면 추적오차 r 은 실질적인 유계

$$|r| \leq \frac{c_0^2}{4(K_f + B)k} \quad (28)$$

를 얻는다.

증명 : 오차 다이내믹스 (24)의 리아프노프 후보 함수 (Lyapunov Like function)를 정의하면

$$L = \frac{1}{2} J r^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}^T \tilde{d} \quad (29)$$

가 되고, 식 (29)를 미분하면

$$\dot{L} = J\dot{r}r + \frac{1}{2} J r^2 + \tilde{d}^T \dot{\tilde{d}} \quad (30)$$

이다. 따라서 (24)식을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -(K_f + B)r^2 + \frac{1}{2} J r^2 \\ & + \tilde{d}^T (X(w)r - \delta r + \tilde{d}) + r[\tilde{f} + T_d + v] \end{aligned} \quad (31)$$

가 된다. 여기서 $\tilde{d} = d - \hat{d}$, (18)로부터 $\dot{\tilde{d}} = -\tilde{d}$ 가 된다. 따라서 동조알고리즘(27), 견실화 항 (26)과 가정 $|J| = 0$ 를 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -(K_f + B)r^2 + \tilde{d}^T (-\delta r + k(d - \hat{d})|r|) + r[\tilde{f} + T_d + v] \\ \leq & -(K_f + B)|r|^2 + \delta_M |\tilde{d}| |r| + k d_M |\tilde{d}| |r| - k |\tilde{d}|^2 |r| \end{aligned} \quad (32)$$

가 된다. 여기서 어떤 스칼라 δ_M 에 대해서 $|\delta| < \delta_M$ 이다. 그리고 $c_0 \equiv \delta_M + k d_M$ 로 정의하면

$$\dot{L} \leq -|r| [(K_f + B)|r| - c_0 |\tilde{d}| + k |\tilde{d}|^2] \quad (33)$$

이다. 이것은 괄호 항이 음이면 전체는 양이 된다. 이러한 조건을 만족하기 위해 완전제곱에서 L 이 식(34)과 식(35)를 만족하면 전체적으로 음이 된다.

$$|r| > \frac{c_0^2}{4(K_f + B)k} \quad (34)$$

$$|\tilde{d}| > \frac{c_0}{k} \quad (35)$$

리아프노프 정리에 따라서, 오차가 (34)식의 오른쪽 항보다 크면 추적 오차는 감소한다. 이는 식(36)에서 실질적으로 추적 오차가 유계됨을 의미한다.

$$|r| \leq \frac{c_0^2}{4(K_f + B)k} \quad (36)$$

또한 리아프노프 확장 범위에서 데드존 유계 폭, $| \mathcal{D} |$ 는 식 (35)의 오른쪽 방향으로 근접해서 유계되어진다. PD 제어기에서, K_f 는 PD 제어기 설계에 의해 결정되고, 크기도 마음대로 늘릴 수 없다. 하지만, PD 제어기와 건설 항이 전체 시스템의 안전성을 유지하는 범위 내에서 K_f 의 증가는 추적오차의 범위를 감소시킬 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

컴퓨터 시뮬레이션과 실험으로 XY 테이블의 퍼지논리 데드존 보상기의 유효성을 설명한다. 실험에 관한 구조는 그림 3에 보여진다[25]. 위치테이블의 Y축은 X축 위에 위치한다. XY 테이블의 크기는 500*500 [mm]이고 테이블의 구동기는 DC모터 두개이다. 각각 모터는 같은 서보제어기에 의해 독립적으로 제어된다. 불나사 못은 모터에 연결하며 테이블이 움직일 수 있게 하고 IBM PC는 A/D와 D/A변환기를 통해 XY 위치 테이블에 신호를 전송한다. 위치신호는 엔코더를 통해 검출된다. 주 제어알고리즘은 486DX-66 마이크로프로세서가 장착된 IBM PC를 경유하는 100Hz 샘플링 비로 실행한다. 제안된 알고리즘은 C언어로 쓴다.

XY 위치 테이블의 파라미터는 X축 Y축 각각

$$J_x = 0.00143 [kg \cdot m^2] \text{ and } B_x = 0.945 [N \cdot m]$$

$$J_y = 0.00135 [kg \cdot m^2] \text{ and } B_y = 0.927 [N \cdot m]$$

(37)

이다. XY 위치 테이블의 이동 가능한 범위는 15[cm]이다. PD 제어기의 이득은 $K_f = 1.5$ 와 $\Lambda = 3$ 으로 선택한다. 데드존 비선형성을 보상하기 위하여 XY 위치테이블에서 PD 제어기를 이용하여 시뮬레이션 한다. 원하는 궤도는

$$x_d(t) = \begin{cases} 2 & 0 < t < 1 \\ 2 \cos \frac{\pi(t-1)}{2} & 1 < t < 5 \\ 2 & 5 < t < 6 \end{cases}$$

$$y_d(t) = \begin{cases} 2 & 0 < t < 1 \\ 2 \sin \frac{\pi(t-1)}{2} & 1 < t < 5 \\ 2 & 5 < t < 6 \end{cases} \quad (38)$$

이다. 데드존은 X축에 대해서 $d_1 = 0.03$ 과 $d_2 = 0.024$, Y축에 대해서 $d_1 = 0.036$ 과

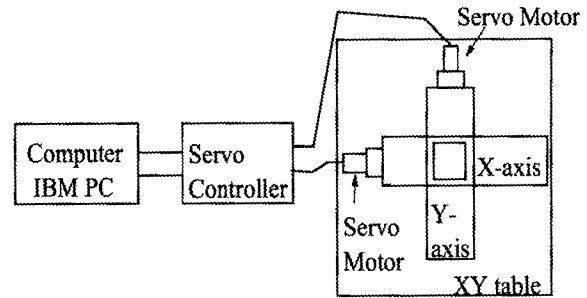


그림 3. XY 테이블 시스템.
Fig. 3. XY positioning table.

$d_2 = 0.031$ 로 한다. 이것들은 실제로 XY 위치 테이블에서 실행하기 위해 근사적으로 측정된 값이다. 그림 4의 궤적 (i)에서 데드존에 의해 성능이 저하됨을 볼 수 있다. 따라서 데드존 효과를 보상하기 위해서 PD 제어기에 데드존 보상기를 이용한다. 데드존 보상기에 의한 XY 위치 테이블의 시뮬레이션 결과는 그림 4의 궤적 (ii)에서 보여진다. 실험 결과는 그림 5에서 보여진다. 각 축의 궤도도 그림 4와 그림 5에서 볼 수 있다. 실험 및 시뮬레이션 결과가 유사함을 볼 수 있다. 이는 제안된 방법이 궤적과 궤도응답 비교에서 PD 제어기보다 개선되었음을 보여준다.

아래와 같이 변형시킨 원에도 모의실험 및 실험을 행하였다.

$$x_d(t) = \begin{cases} 2.4 & 0 < t < 1 \\ 2 \cos \left[\frac{\pi(t-1)}{2} \right] + \frac{2}{5} \left[\cos \frac{5\pi(t-1)}{2} \right] & 1 < t < 5 \\ 2.4 & 5 < t < 6 \end{cases}$$

$$y_d(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 2 \sin \left[\frac{\pi(t-1)}{2} \right] + \frac{2}{5} \left[\sin \frac{5\pi(t-1)}{2} \right] & 1 < t < 5 \\ 0 & 5 < t < 6 \end{cases} \quad (39)$$

그림 6의 시뮬레이션과 그림 7의 실험에는 변경된 원의 결과를 보여준다. 보상기가 없는 PD 제어기의 궤적은 데드존 효과 때문에 원하는 궤적과는 차이가 있음을 알 수 있다. 그렇지만 제안된 방법의 궤적은 원하는 궤도를 거의 가까이 추적하므로, 이는 제안된 방법이 데드존 효과를 보상했음을 의미한다. 그림 8에서 데드존 추정치가 수렴함을 볼 수 있다. 제안된 방법의 결과는 원하는 궤도 점선을 근접하게 추적한다 점에서 PD 제어기보다 보상기가 있는 방법이 우수하다고 판정 내릴 수 있다.

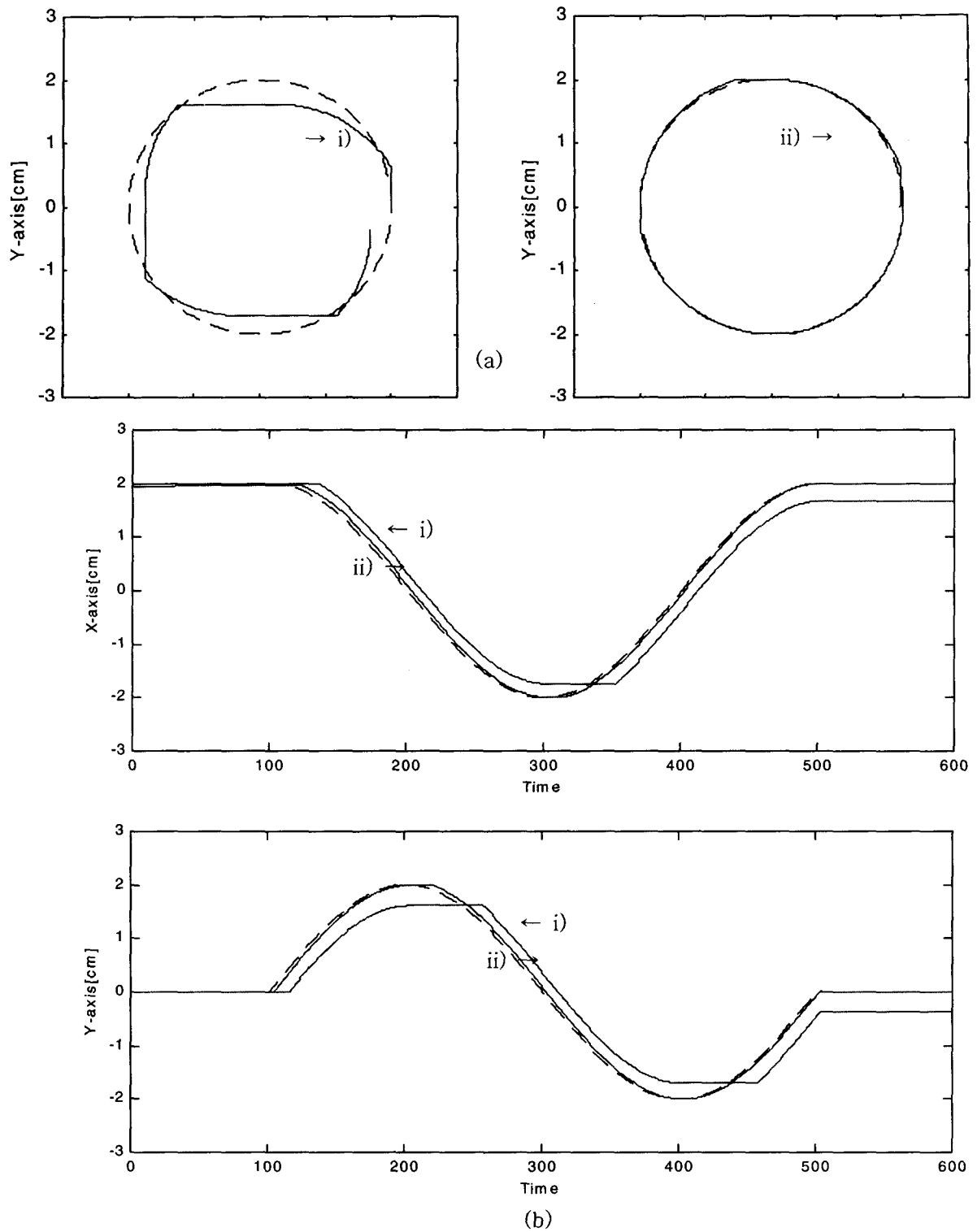


그림 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 (a) 궤적 (b) X축, Y축 대한 응답.
(점선 : 기준 신호, i) 보상기가 없는 경우, ii) 보상기가 있는 경우)

Fig. 4. Simulation results for circle (a) locus and (b) trajectory.
(dotted line : desired, i) without compensation, ii) with compensation).

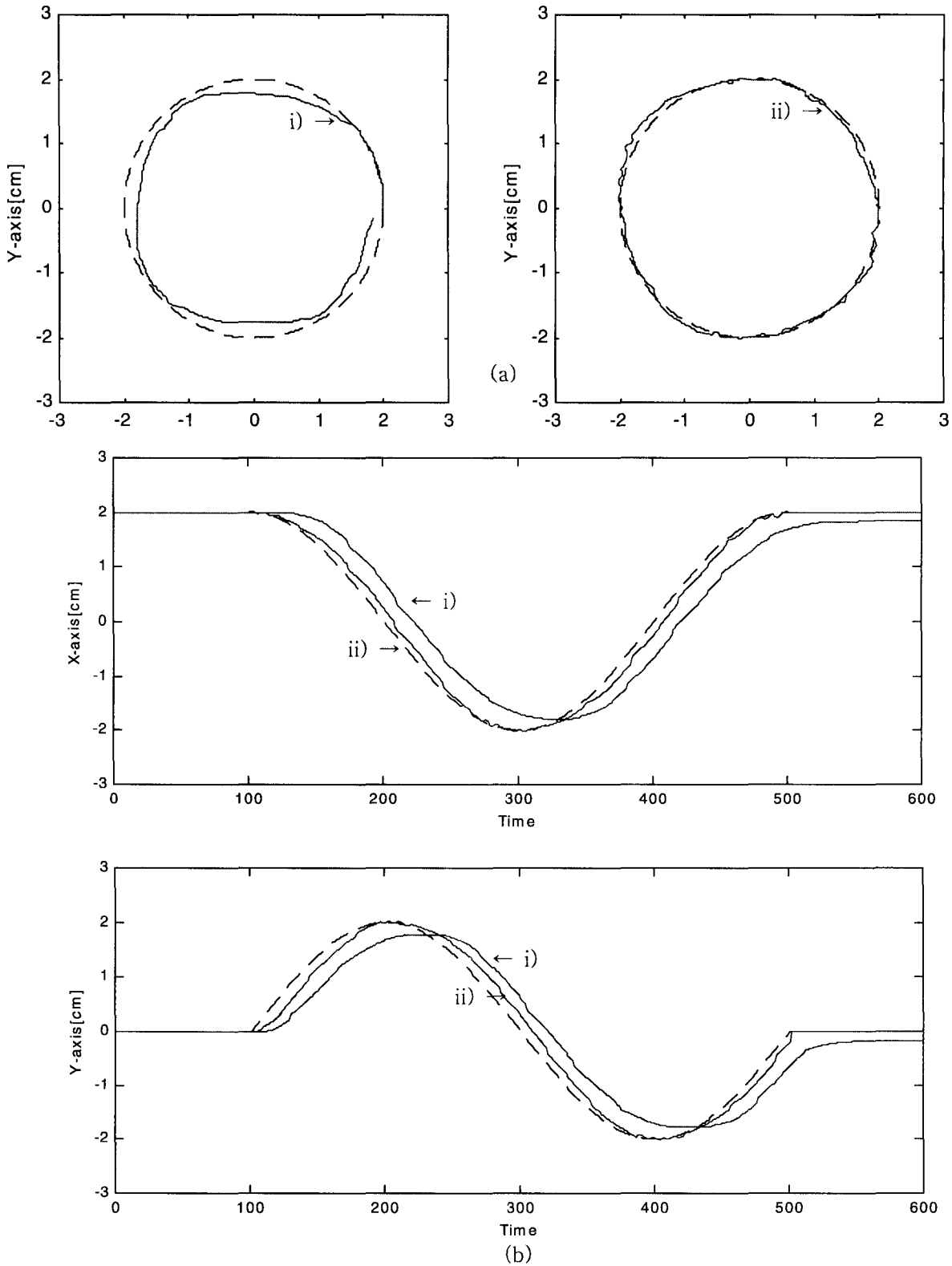


그림 5. 실험 결과, (a) 궤적 (b) X축, Y축 대한 응답.
 (점선 : 기준 신호, i) 보상이 없는 경우, ii) 보상이 있는 경우)
 Fig. 5. Experimental results for circle (a) locus and (b) trajectory.
 (dotted line : desired, i) without compensation, ii) with compensation).

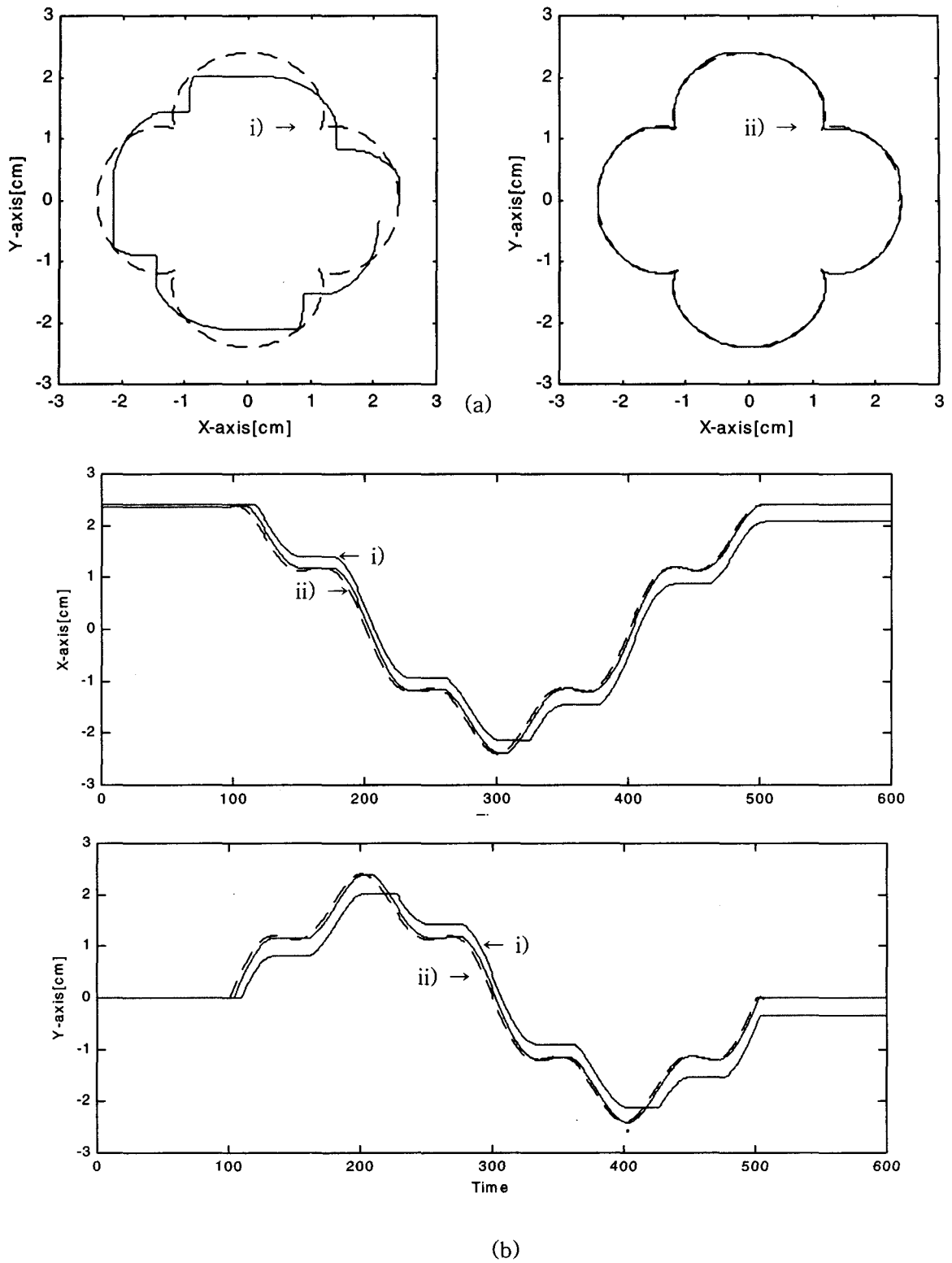


그림 6. 시뮬레이션 결과, (a)궤적 (b) X축, Y축 대한 응답.
 (점선 : 기준 신호, i) 보상기가 없는 경우, ii) 보상기가 있는 경우)
 Fig. 6. Simulation results for modified circle (a) locus and (b) trajectory.
 (dotted line: desired, i) without compensation, ii) with compensation).

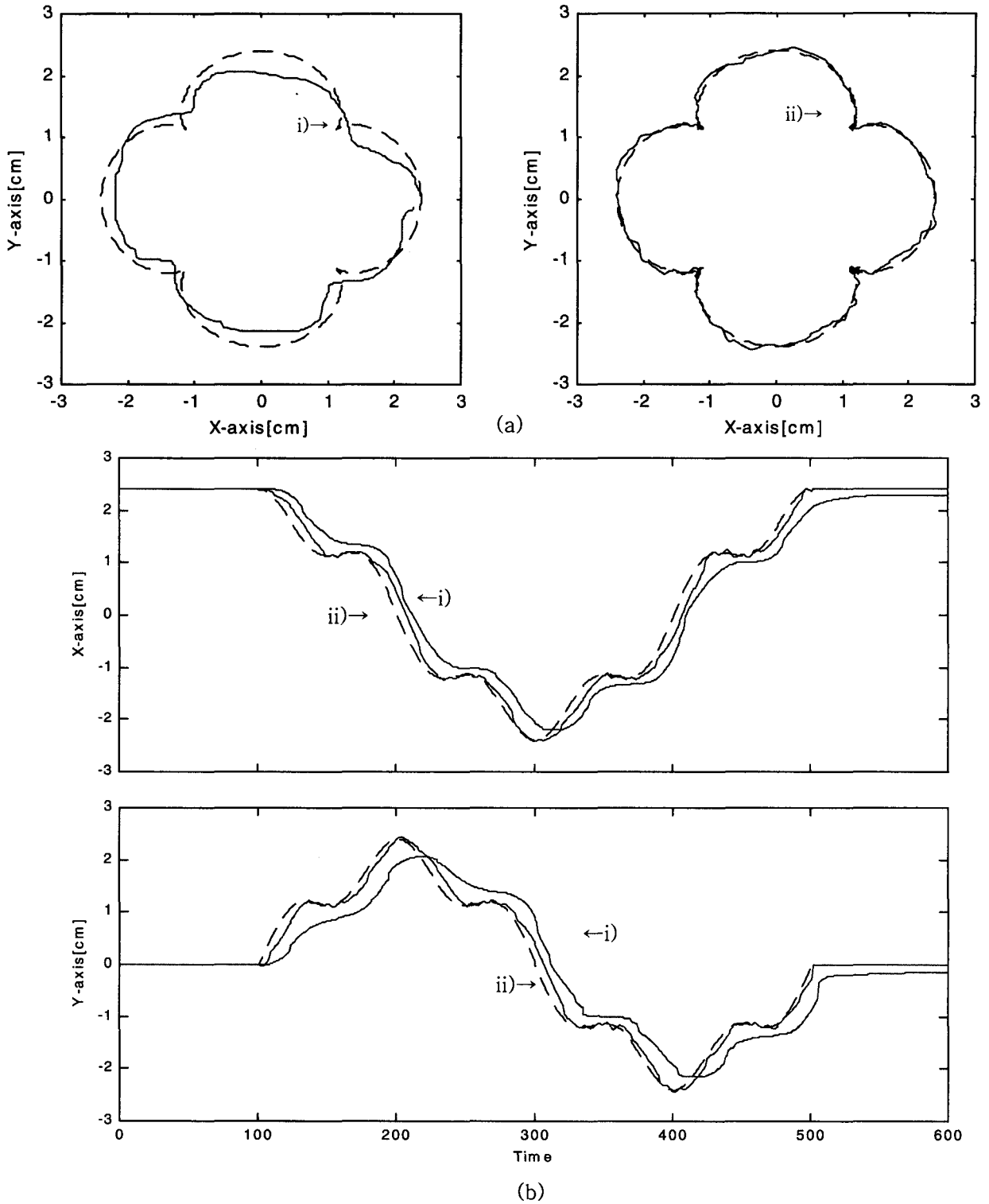


그림 7. 실험 결과 (a) 궤적 (b) X축, Y축 대한 응답.
 (점선 : 기준 신호, i) 보상이 없는 경우, ii) 보상이 있는 경우)
 Fig. 7. Experimental results for modified circle (a) locus and (b) trajectory.
 (dotted line: desired, i) without compensation, ii) with compensation)

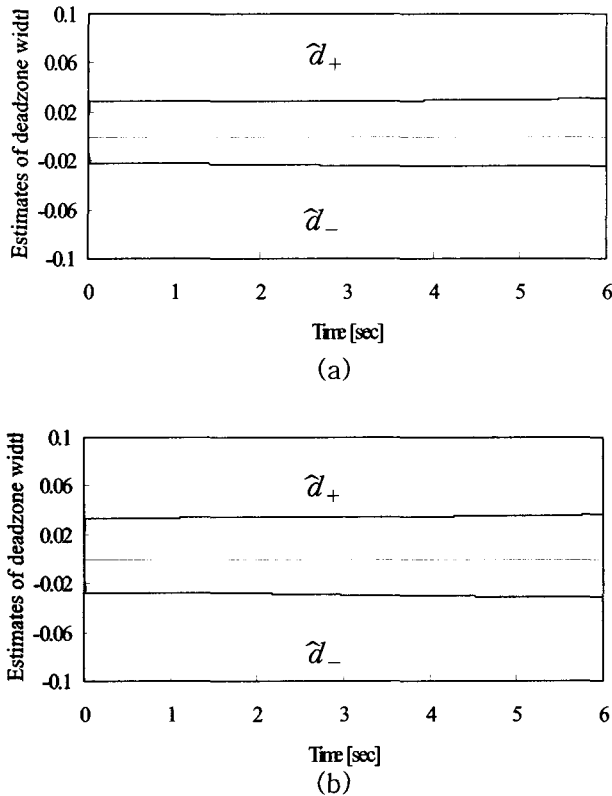


그림 8. 데드존 파라미터 추정치. (a) X축, (b) Y축
Fig. 8. Estimates of deadzone widths. (a)X-axis, (b)Y-axis

V. 결론

XY 테이블의 퍼지 데드존 보상기를 제안하였다. 퍼지 논리 특성을 이용하여 구동기 비선형성에 의한 효과를 감쇄시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 미지의 데드존 파라미터를 온라인으로 학습시켜 동조하게 하며 적응적인 데드존 보상기가 되게 하였다. 비선형 증명 방법을 사용하며 추적 오차 방정식으로부터 추적 오차의 범위를 구하였고 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 증명하였다. 제안한 퍼지논리 보상기는 여타의 정밀위치 보상 기법에 확장 가능성이 충분함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] W. Li and X. Cheng, "Adaptive high-precision control of positioning tables—Theory and experiment," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 2, pp. 265–270, 1994.
- [2] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 1, pp. 48–55, 1996.
- [3] S. Goto, M. Nakamura, and N. Kyura, "Accurate contour control of mechatronic servo systems using gaussian networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 4, pp. 469–476, 1996.
- [4] M. Mahfouf, C. H. Kee, M. F. Abbod, and D. A. Linkens, "Fuzzy logic based anti-sway control design for overhead cranes," *Neural Computing & Applications*, vol. 9, pp. 38–43, 2000.
- [5] J. O. Jang, "Implementation of indirect neuro-control for a nonlinear two robot MIMO system," *Contr. Eng. Pract.*, vol. 9, no. 1, pp. 89–95, 2001.
- [6] C. A. Desoer and S. M. Shahruz, "Stability of dithered nonlinear systems with backlash or hysteresis," *Int. J. Control*, vol. 43, no. 4, pp. 1045–1060, 1986.
- [7] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, pp. 23–36, 1993.
- [8] G. Tao and P. V. Kokotović, "Adaptive control of plants with unknown dead-zones," in *Proc. American Control Conf.*, Chicago, IL, pp. 2710–2714, 1992.
- [9] G. Tao and P. V. Kokotović, "Discrete-time adaptive control of systems with unknown deadzones," *Int. J. Contr.*, vol. 61, no. 1, pp. 1–17, 1995.
- [10] D. A. Recker, P. V. Kokotović, D. Rhode, and J. Winkelmann, "Adaptive nonlinear control of systems containing a deadzone," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Brighton, UK, pp. 2111–2115, 1991.
- [11] M. Tian and G. Tao, "Adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown deadzones," in *Proc. IFAC World Congr*

- ess, San Francisco, CA, 1996, pp. 209-214.
- [12] X. S. Wang, H. Hong and C. Y. Su, "Model reference adaptive control of continuous time systems with an unknown input deadzone," IEE Proceedings, Control theory and Applications, vol. 150, no. 2, pp. 261-266, May 2003.
- [13] M. Letizia Corradini and G. Orlando, "Robust stabilization of nonlinear uncertain plants with backlash or deadzone in the actuator," IEEE Trans. on Control systems technology, vol. 10, no. 1, pp. 158-166, Jan. 2002.
- [14] M. Jamshidi, N. Vadiiee, and T. J. Ross, Fuzzy Logic and Control, Englewood Cliffs, NJ: PrenticeHall, 1993.
- [15] J. H. Kim, J. H. Park, S. W. Lee, and E. K. P. Cheng, "A two layered fuzzy logic controller for systems with deadzones," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 41, pp. 155-162, Apr. 1994.
- [16] F. L. Lewis, W. K. Tim, L. Z. Wang, and Z. X. Li, "Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control," IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 7, no. 6, pp. 731-742, Nov. 1999.
- [17] S. Y. Oh and D. J. Park, "Design of new adaptive fuzzy logic controller for nonlinear plants with unknown or time-varying dead zones," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 6, no. 4, pp. 481-492, Nov. 1998.
- [18] B. Kosko, "Fuzzy systems as universal approximator," IEEE Trans. Comput., vol. 43, pp. 1-4, Oct. 1994.
- [19] L. X. Wang and J. M. Mendel, "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 3, pp. 807-814, Sept. 1992.
- [20] L. X. Wang, Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [21] H. Ying, "Sufficient conditions on general fuzzy systems as function approximators," Automatica, vol. 30, no. 3, pp. 521-525, 1994.
- [22] X. J. Zeng and M. G. Singh, "Approximation theory of fuzzy systems-MIMO case," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 3, pp. 219-235, May 1995.
- [23] J. O. Jang and G. J. Jeon, "A parallel neuro-controller for DC motors containing non linear friction," Neurocomputing, vol. 30, no. 1-4, pp. 233-248, 2000.
- [24] J. O. Jang, "A deadzone compensator of a DC motor system using fuzzy logic control," IEEE Trans. Syst., Man, Cybernet. C, vol. 31, no. 1, pp. 42-48, 2001.
- [25] J. O. Jang, "Neuro-controller for a XY positioning table," Proc. ICCAS, pp. 581-586, Oct. 2003.

저 자 소 개

장 준 오(정회원)

현재 위덕대학교 컴퓨터멀티미디어공학부 조교수