

논문 2012-50-4-23

# 이동로봇의 퍼지 데드존 보상

## (FL Deadzone Compensation of a Mobile robot)

장 준 오\*

(Jun Oh Jang)

### 요 약

이동로봇의 역학 제어기와 퍼지 데드존 보상이 결합된 제어구조를 제안한다. 데드존 보상이 적응적이고 추적오차와 파라미터 추정치가 유계가 되는 퍼지논리 파라미터 동조알고리즘과 안정도 증명을 제시한다. 퍼지논리 데드존 보상을 이동로봇에 시뮬레이션 및 실험함으로써 데드존의 해로운 영향을 줄이는 효과를 보여준다.

### Abstract

A control structure that makes possible the integration of a kinematic controller and a fuzzy logic (FL) deadzone compensator for mobile robots is presented. 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 mobile robot to show its efficacy.

**Keywords :** Mobile robot, Deadzone, Fuzzy logic, Lyapunov stability, Feedback control

## I. 서 론

이동로봇은 구조화 및 비 구조화된 미지항을 포함하는 비선형 시스템으로 산업 및 서비스 분야에 다양하게 사용되고 있다. 안전, 수송, 조사, 행성 탐사 등의 여러 분야에 응용되고 있다. 이동로봇은 불완전 기계시스템의 일종으로 모델식으로 표현 할 수 없는 기계학적인 제한이 존재한다. 그러나 라그랑저 및 미분 기하학을 응용하여 이동로봇의 동력학적인 수식을 유도할 수 있다<sup>[1~3]</sup>. 궤적 추적문제에서 이동로봇은 미리 정하여진 경로를 추종하고, 이동로봇의 역학 모델을 사용하여 추적문제를 다룰 수 있다<sup>[4]</sup>. 먼저 지역 및 전역 추적 문제는 백스테핑에 기반을 둔 시변상태 피드백 방식을 사용

하여 이론적으로 풀 수 있다<sup>[5]</sup>. 또한, 이동로봇의 자세 제어와 궤적 추적문제에 피드백 선형화가 이용되었다<sup>[6]</sup>. 여기에 적응 건설 힘 제어 이론이 이동로봇 팔에 적용되었다<sup>[7]</sup>. 한편, 신경망과 퍼지제어 이론을 이용한 지능 제어가 비선형 제어분야에 적용되고 있다. 그 예로, Fierro 와 Lewis<sup>[8]</sup>는 피드백 속도제어와 토크제어를 결합한 인공 신경망 제어를 개발 하였다. Sousa등<sup>[9]</sup>은 웨이브렛 네트워크를 이용한 이동로봇의 적응제어를 제안하였다. 부가하여 퍼지논리는 미지의 로봇 다이내믹스를 근사화 하는데 또 다른 도구로 이용 될 수 있다. Das와 Narayan<sup>[10]</sup>은 바퀴 이동로봇의 적응 퍼지 제어기의 설계와 구현을 하였다. 또한, 이동로봇의 경로 추적 문제에 퍼지논리 접근 방식을 제안하였다<sup>[11]</sup>. 그러나 여러 방법들 중 속도나 토크형태의 역학제어기가 개발되었으나 구동기 비선형성은 고려되지 않았다. 구동기 비선형성은 시스템의 성능을 저하시키고 이를 고려하여

\* 정회원, 위덕대학교 소프트웨어공학과  
(Dept. of Software Eng. Uiduk University)  
접수일자: 2012년12월22일, 수정완료일: 2013년3월18일

제어기를 설계하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 구동기 비선형성을 이동로봇에 포함시켜 구동기 데드존 성분을 퍼지 보상기를 이용하여 보상하는 방법을 제안하였다. 동역학 추적 루프에 퍼지 데드존 보상기를 추가하여 증명과 함께 설계방법을 제시하였다. 이 논문에서는 II장에 이동로봇 모델을, III장에 퍼지 데드존 보상을, IV장에 추적문제, 제어기 설계, 안정도 해석을, V장에 제안된 제어기의 모의실험과 실험 결과를, VI장에 결론을 기술 하였다.

### II. 이동로봇

그림 1의 이동로봇은 불완전 기계 시스템의 대표적인 예이다. 양축의 두개의 바퀴와 전 방향 자유 바퀴 위에 장착된 차량 형태로 구성되어 있다. 이동과 방향을 위해 독립된 액추에이터인 모터가 바퀴에 토크를 공급한다. 이동 로봇의 방정식은

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (1)$$

이다. 여기서  $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 양 한정 관성 행렬이고,  $V(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 는 중심력과 코리올리력이다.  $F(\dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 는 마찰력 이고,  $G(q) \in R^{n \times 1}$ 는 중력이다.  $\tau_d$ 는 비구조화된 모델 다이내믹스와 외란이다.  $B(q) \in R^{n \times r}$ 는 입력 행렬이고  $\tau$ 는 입력이다.  $A(q) \in R^{m \times n}$ 는 입력제한 행렬이고  $\lambda \in R^{m \times 1}$  제한 힘 벡터이다<sup>[12-14]</sup>.

모든 역학 방정식 제한은 시간에 독립되어 있고

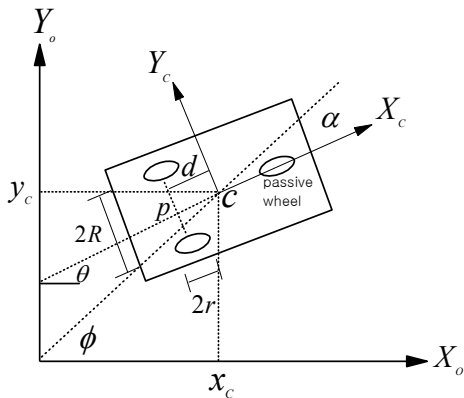


그림 1. 이동로봇  
Fig. 1. Mobile robot.

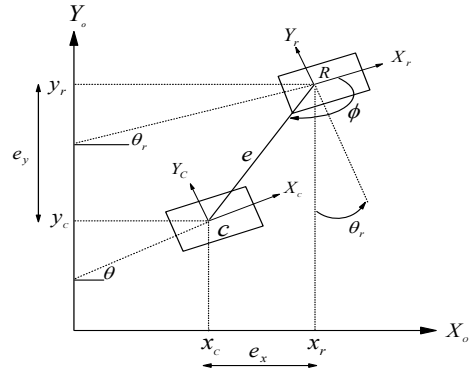


그림 2. 기준 및 축 시스템  
Fig. 2. Reference and coordinate system.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (2)$$

로 표현 가능하다.

$A(q)$ 의 널(null) 공간에서 서로 독립인 벡터에 의해 형성되는 행렬  $S(q)$ 를 두면

$$S^T(q)A^T(q) = 0 \quad (3)$$

가 된다. (2)와 (3)식에 따라

$$q = S(\dot{q})v(t) \quad (4)$$

를 만족하는 보조 벡터 시간 함수  $v(t) \in R^{n-m}$ 를 찾을 수 있다.

이동로봇은 구동 바퀴 축 방향으로 이동하고 본체는 구름이나 미끄럼이 없다. 즉,

$$\dot{y}_c \cos\theta - \dot{x}_c \sin\theta - d\dot{\theta} = 0 \quad (5)$$

이다.  $S(q)$ 를 다시 쓰면

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이다. 선속도와 각속도의 형태로 (4)식을 쓰면

$$v = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -d\sin\theta \\ \sin\theta & d\cos\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (7)$$

이다. 여기서  $|v| \leq V_{max}$   $|w| \leq \Omega_{max}$ 이고,  $V_{max}$ ,  $\Omega_{max}$ 는 이동로봇의 최대 선속도와 각속도이다.

식 (7)은 이동로봇의 자세 역학 모델이다<sup>[15]</sup>. 이 모델은 극 좌표 형태로도 구할 수 있다. 즉, 자세 모델이

$(e, \phi, \alpha)$ 의 변수

$$\begin{cases} e = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \\ \phi = \tan^{-1}\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \\ \alpha = \theta - \phi \end{cases} \quad (8)$$

로 표현 가능하다. 절대좌표는

$$\begin{cases} x_c = e \cos(\phi) \\ y_c = e \sin(\phi) \end{cases} \quad (9)$$

를 이용하여 극 좌표로부터 얻을 수 있다. 여기서  $\dot{e}, \dot{\phi}$ 의 해를 구해 대입한다.

$$\dot{e} = \dot{x}_c \cos(\phi) + \dot{y}_c \sin(\phi) \quad (10)$$

와

$$\dot{\phi} = \frac{1}{e} (-\dot{x}_c \sin(\phi) + \dot{y}_c \cos(\phi)) \quad (11)$$

이다. 식(7)을 (10)과 (11)에 대입하고 (8)식을 미분하면 극좌표 형태의 역학 모델은

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} & -\frac{d \sin(\alpha)}{d \cos(\alpha)} \\ \frac{e}{\sin(\alpha)} & 1 - \frac{d \cos(\alpha)}{e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (12)$$

이다. 기준 좌표가  $(0,0,0)$ 와 같지 않을 때 좌표  $(e, \phi, \alpha)$ 는 (8)으로 계산되지 않는다. 이것은 시간에 따라 기준 좌표가 변하기 때문이다. 좀 더 엄밀하게 그림 2와 같은 경우에 오차는

$$e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \quad (13)$$

이다. 여기서  $[e_x \ e_y \ e_\theta]^T = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T - [x_c \ y_c \ \theta]^T$ 이다. 삼각형 COR은  $e_x, e_y$ 의 직교투영(projection)으로서 구할 수 있다. CO는  $e_x \cos(\theta_r) + e_y \sin(\theta_r)$ 로서 OR은  $-e_x \sin(\theta_r) + e_y \cos(\theta_r)$ 로 구할 수 있다. 그러므로

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{-e_x \sin(\theta_r) + e_y \cos(\theta_r)}{e_x \cos(\theta_r) + e_y \sin(\theta_r)}\right) \quad (14)$$

이고

$$\alpha = e - \phi \quad (15)$$

로 표현 가능하다. 문헌<sup>[16]</sup>에서 이동로봇 제어 구조는 위치 안정으로 제안되었다. 위치 안정보다 좀 더 넓게 추적 성능까지 고려한 극좌표 모델에서는 식(13)-(15)가 필요하다.

이동로봇의 동역학 식은 라그랑저(Lagrange) 폼으로 표현 가능하다. 이동로봇이 수평으로만 이동하므로  $G(q) = 0$ 로 놓는다. 그림 1의 이동로봇의 방정식은 식 (1) 형태로 표현 가능하다. 관련 행렬은

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & m d \sin \theta \\ 0 & m & -m d \cos \theta \\ m d \sin \theta & -m d \cos \theta & 1 \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m d \dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & 0 & m d \dot{\theta} \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = 0$$

$$B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ R & -R \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}, A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ -d \end{bmatrix}$$

$$\lambda = -m(\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta) \dot{\theta} \quad (16)$$

이다. 식(1)은 제어 목적으로 다른 식으로 변환 수 있다. 식 (4)를 미분하고, 이를 (1)식에 대입하고, 양변에  $S^T$ 를 곱하고  $A^T(q)\lambda$ 를 제거한다. 이동로봇 플랫폼 방정식은

$$\dot{q} = Sv \quad (17)$$

$$\begin{aligned} S^T M S \dot{v} + S^T (M \dot{S} + V S) v + \bar{F}(v) + \bar{\tau}_d \\ = S^T B \tau \end{aligned} \quad (18)$$

이다. 여기서  $v(t) \in R^{n-m}$ 는 속도벡터이다. 식 (18)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \bar{M}(q) \dot{v} + \bar{V}(q, \dot{q}) v + \bar{F}(v) + \bar{\tau}_d = \bar{B} \tau \\ \bar{\tau} \equiv \bar{B} \tau \end{aligned} \quad (19)$$

이다. 여기서  $\bar{M}(q) \in R^{r \times r}$ 는 양한정 관성 행렬,  $\bar{V}(q, \dot{q}) \in R^{r \times r}$ 는 코리올리 및 중심력이다.

$\bar{F}(v) \in R^{r \times 1}$ 는 마찰력,  $\bar{\tau}_d$ 는 비 구조화된 미지의 항 및 미지의 외란이다.  $\bar{\tau} \in R^{r \times 1}$ 는 입력이다. 만약  $r = n - m$  이면,  $\bar{B}$ 가 바퀴 반경  $r$ 과 바퀴사이의 거리  $R$ 과 관계되는 상수 행렬임이 쉽게 알 수 있다. 식(19)는 새로운 축의 함수로 이동로봇의 특성을 나타낸다. 즉,  $S(q)$ 는 이동로봇 축  $v$ 를 절대 축  $\dot{q}$ 로 전환하는 자코비안이다. 따라서 원래 이동로봇 특성은 새로운 축의 특성을 함축한다.

### III. 퍼지논리 데드존 보상

비대칭 데드존에 대해서 퍼지논리 보상기를 설계하려고 한다. 퍼지논리 접근법은 스위칭 논리와 지시함수(indicator function)를 포함하며, 멤버십 함수를 이용하여 좀 더 효율적인 보상이 되게 한다<sup>[17]</sup>. 따라서 이동로봇의 데드존 보상을 위한 퍼지논리 적용의 일반적인 기준을 제시한다.

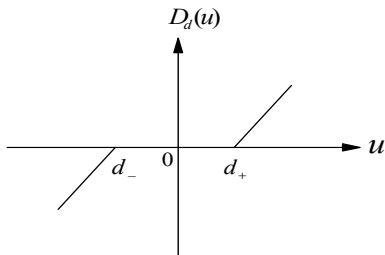


그림 3. 데드존 비선형성  
Fig. 3. deadzone nonlinearity.

그림 3의 비대칭 데드존 비선형성은

$$\bar{\tau} = N_d(u) = \begin{cases} u - d_-, & u < d_- \\ 0, & d_- \leq u < d_+ \\ u - d_+, & d_+ \leq u \end{cases} \quad (20)$$

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

$$\bar{\tau} = D_d(u) = u - sat_d(u) \quad (21)$$

로 표현 될 수 있고, 비대칭 포화 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$sat_d(u) = \begin{cases} d_-, & u < d_- \\ u, & d_- \leq u < d_+ \\ d_+, & d_+ \leq u \end{cases} \quad (22)$$

데드존의 나쁜 효과를 줄이려는 목적으로 그림 4와 같이전 보상이 이용된다. 여기서 보상의 원하는 함수는  $w$ 에서  $\bar{\tau}$ 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 적응, 증명과 실행의 예는 IV장에서 보여 줄 것이다. 퍼지논리 분류특성은 독립변수  $u$ 가 동작하는 영역에 따라 비선형성이 의존적일 때 두드러지게 강력해진다.

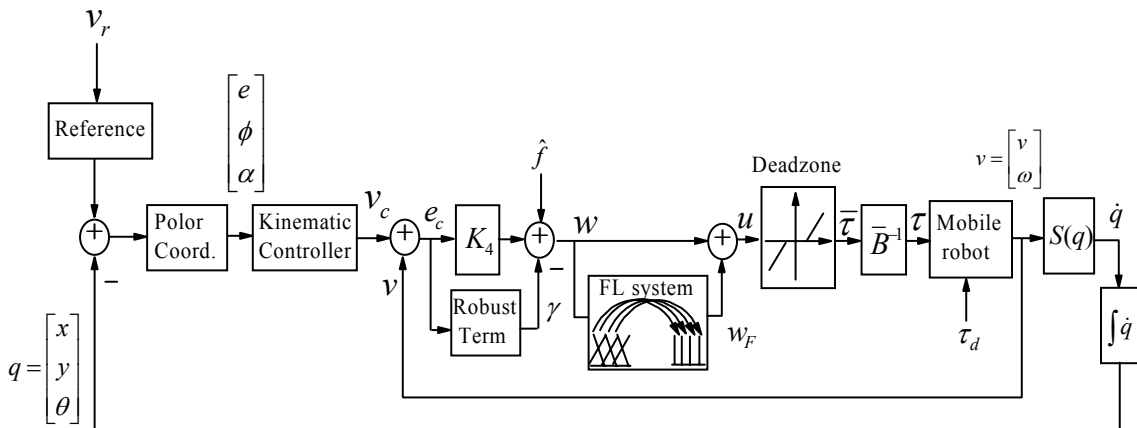


그림 4. 이동로봇의 퍼지 논리 데드존 보상기  
Fig. 4. Fuzzy logic deadzone compensation of a mobile robot.

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

$$\begin{aligned} \text{If}(w \text{ is positive}) \text{ then } (u = w + \hat{d}_+) \\ \text{If}(w \text{ is -ative}) \text{ then } (u = w + \hat{d}_-) \end{aligned} \quad (23)$$

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

수학적으로 멤버쉽 함수를 정의하면

$$\begin{aligned} X_+(w) &= \begin{cases} 0, & w < 0 \\ 1, & 0 \leq w \end{cases} \\ X_-(w) &= \begin{cases} 1, & w < 0 \\ 0, & 0 \leq w \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

가 되고, 보상기는

$$u = w + w_F \quad (25)$$

로 표현 가능하다. 여기서  $w_F$ 는 룰 베이스

$$\begin{aligned} \text{If}(w \in X_+(w)) \text{ then } (w_F = \hat{d}_+) \\ \text{If}(w \in X_-(w)) \text{ then } (w_F = \hat{d}_-) \end{aligned} \quad (26)$$

에 의해 주어진다. 룰 베이스에 의한 퍼지논리 시스템의 출력은

$$w_F = \frac{\hat{d}_+ X_+(w) + \hat{d}_- X_-(w)}{X_+(w) + X_-(w)} \quad (27)$$

가 된다. 추정치  $\hat{d}_+$ ,  $\hat{d}_-$  값은 각각  $X_+(w)$ 와  $X_-(w)$ 의 제어표시 값이다. 이는 (단,  $X_+(w) + X_-(w) = 1$ )

$$w_F = \hat{d}^T X(w) \quad (28)$$

가 된다. 여기서 퍼지논리 기본함수 벡터는

$$X(w) = \begin{bmatrix} X_+(w) \\ X_-(w) \end{bmatrix} \quad (29)$$

이고  $w$ 가 가지는 어떤 값에 의해 쉽게 계산된다<sup>[18]</sup>.

퍼지논리 보상기의  $w$  에서  $\bar{\tau}$  까지 합성한 값과 데드존을 합하면

$$\begin{aligned} \bar{\tau} = N_d(u) = \\ N_d(w + w_F) = w + [w_F - \text{sat}(w + w_F)] \end{aligned} \quad (30)$$

이다. 이에 따라 퍼지논리 보상기를 표현하면

$$u = w + w_F = w + \hat{d}^T X(w) \quad (31)$$

가 된다. 여기서  $\hat{d}$ 는 추정 데드존 폭이다.

식(26)과 같은 룰 베이스로 퍼지논리 보상기가 주어지면, 보상기와 데드존을 합하면

$$\bar{\tau} = w - \tilde{d}^T X(w) + \tilde{d}^T \delta \quad (32)$$

가 된다. 여기서 데드존 구간 근사 에러는

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (33)$$

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

#### IV. 이동로봇의 적응 퍼지 데드존보상

이 장에서는 이동로봇의 역학제어기 (kinematic controller)와 퍼지 데드존보상을 위한 동역학 제어기 (dynamic controller)를 다룬다. 그림 4는 이동로봇 추적 제어 시스템을 보여준다. 이동로봇의 데드존에 대하여 퍼지논리 데드존 보상기의 설계과정을 보여준다. 퍼지논리 데드존 보상기는 식(31)에 의해 주어진다. 데드존 폭 추정치  $\hat{d}$ 의 동조(tuning)을 통해 추적오차는 줄어들고 모든 내부 상태는 유계됨을 증명한다. 이는 퍼지논리 데드존 보상기가 적응적임을 보여준다. 따라서, 구동식 (17)을 제어하는  $v(t)$ 로부터  $\tau(t)$ 를 유도한다. 통상적으로 불완전 추적문제는 시스템 동력학 (18)을 무시하고 구동식(17)만으로 단순화 한다. 즉,  $v(t)$ 는 식 (17)이 기준 궤적을 추종하도록 결정한다. 완전 속도추종,  $v = v_c$ 이라 가정하면 (18)로부터  $\tau(t)$ 를 계산할 수 있다. 이러한 접근법에는 세 가지 문제가 있다. 먼저 완전 속도 추종은 실제로 존재하지 않는다. 둘째로 외란  $\tau_d$ 는 고려대상이 아니다. 마지막으로 로봇 동력학을 모두 알아야 한다. 이러한 비실제적인 접근에 퍼지 보상 방식을 제안한다. 특별히 [4]에서 발표된 시스템 추적문제에 대한 해법이 사용가능하다고 가정한다. 식 (17), (18)을 위한  $\tau(t)$ 는 잘 모르는 시스템 파라미터와 외란  $\bar{\tau}_d$  에도 불구하고 견실 추종을 보장한다.

#### 4.1. 역학제어기(kinematic controller)

중심축과 바퀴간의 거리  $d = 0$ 로 식(12)를 고려하자. 이것은 안정도 증명에는 요구되지 않으나 역학 제어기로서 이용된다. 리아프노프 후보함수로

$$V_k(e, \phi, \alpha) = \frac{1}{2}(e^2 + \alpha^2 + h\phi^2) \quad (34)$$

를 정의하자. 여기서  $h$ 는 양수이다. 미분하면

$$\dot{V}_k(e, \phi, \alpha) = e\cos(\alpha)v + \alpha\left(\omega - \frac{\sin(\alpha)}{e\alpha}(\alpha - h\alpha)v\right) \quad (35)$$

선형 가속도  $v$ 와 각속도  $\omega$ 가 피드백 신호

$$v_c = \begin{cases} v_c - \gamma_1 e \cos(\alpha) \\ \omega_c = -\gamma_2 \alpha - \gamma_1 \cos(\alpha) \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} (\alpha - h\phi) \end{cases} \quad (36)$$

에서 만들어지는 명령신호  $v_c$ 와  $\omega_c$ 를 추적한다면  $\dot{V}_k(e, \phi, \alpha) \leq 0$ 가 된다. 이는  $e$ 와  $\alpha$ 가 유계됨을 의미한다. 여기서  $\gamma_1$ 는  $\gamma_2$ 는 양수이다. 리아프노프 함수를 두 번 미분하면

$$\begin{aligned} \ddot{V}_k(e, \phi, \alpha) &= 2\gamma_1 e^2 [\cos^4(\alpha) + \cos^2(\alpha)\sin^2(\alpha)] \\ &\quad + 2\gamma_2^2 \alpha^2 - 2\gamma_1 \gamma_2 h \phi \cos(\alpha) \sin(\alpha) \\ &\leq 4\gamma_1 e^2 + 2\gamma_2^2 \alpha^2 \end{aligned} \quad (37)$$

이다. Barbalat 정리<sup>[19]</sup>에 의해  $e$ 와  $\alpha$ 는 0으로 수렴한다. (12)와 (15)식으로부터  $\dot{e}$ 와  $\dot{\phi}$ 는 0으로 수렴함을 의미한다. 그러면  $\phi$ 는 유한한 값  $\bar{\phi}$ 로 수렴한다. 부가적으로  $\dot{\alpha} = \gamma_1 h \bar{\phi}$ 이다. 그러므로  $\ddot{\alpha}$ 이 존재하고 유계된다. 그러면  $\dot{\alpha} \rightarrow 0$ 이고 이것은  $\phi$ 가 0으로 수렴한다.

#### 4.2. 동역학 제어기(dynamic controller)

시스템의 입력  $\bar{\tau}(t)$ 는 데드존을 통하여 제어입력  $u(t)$ 와 연관된다.

$$\bar{\tau} = N_d(u) = u - \text{sat}_d(u) \quad (38)$$

미지의 데드존 폭은 어떤 스칼라  $d_M$ 에 대해서

$$|d| < d_M \quad (39)$$

로 가정하고, 데드존 폭은 정수라고 가정하면

$$\dot{d} = 0 \quad (40)$$

기준속도  $v_c(t)$ 가 주어지면 보조 속도 추적오차는

$$e_c = v_c - v \quad (41)$$

로 정의한다. 위 식을 미분하고 식(19)를 이용하면 이동로봇 다이나믹스는 속도 추적오차

$$\bar{M}(q)\dot{e}_c = -\bar{V}(q, \dot{q})e_c - \bar{\tau} + f(x) + \bar{\tau}_d \quad (42)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 비선형 이동로봇 함수는

$$f(x) = \bar{M}(q)\dot{v}_c + \bar{V}(q, \dot{q})v_c + \bar{F}(v) \quad (43)$$

이다.  $f(x)$ 를 구하기 위한  $x \equiv [v^T \ v_c^T \ \dot{v}_c^T]^T$ 로 정의된다. 함수  $f(x)$ 는 중량, 관성, 마찰계수 등을 포함한다. 이러한 양은 완전히 잘 모르고 결정이 쉽지 않다. 여기서  $\bar{\tau}_d < \tau_M$ 이고  $\tau_M$ 은 양수이다.

비선형 로봇 함수  $f(x)$ 는 적어도 부분적이지만 잘 모른다. 따라서 속도 추적을 위한 제어입력은

$$\bar{\tau} = \hat{f} + K_4 e_c - \gamma \quad (44)$$

와 같이 주어진다. 여기서  $K_4$ 는 대각 양 이득 행렬이고  $\hat{f}$ 는 비선형 함수  $f(x)$ 의 추정치이다. 건설항  $\gamma(t)$ 는 미지의 비구조화된 외란 보상항이다.

데드존 보상은

$$u = w + \hat{d}^T X(w) \quad (45)$$

로 쓸 수 있고  $X(w)$ 는 식(29)에 의해 주어진다.

(44)와 (32)식을 (42)식에 대입하면 추적 시스템은

$$\bar{M}(q)\dot{e}_c = -(K_4 + \bar{V})e_c + \hat{d}^T X(w) - \hat{d}^T \delta + \tilde{f} + \bar{\tau}_d + \gamma \quad (46)$$

이다. 여기서 속도 추적오차는 함수 추정오차  $\tilde{f} = f - \hat{f}$ 에 의해 구동된다. 일반적으로 추정값  $\hat{f}$ 은 많은 방법에 의해 제공되었다<sup>[18, 18]</sup>. 최근에 지능제어기법에 의해 추정

되기도 하였다<sup>[20~21]</sup>. 함수 추정오차는 어떤 미지의 유계 함수  $f_M(q)$ 에 대해 유계된다고 가정하면

$$|\tilde{f}| \leq f_M(q) \quad (47)$$

가 된다.

다음 정리는 데드존 보상기를 동조하기 위한 알고리즘이다.

정리 1 : 이동로봇 시스템 (17) 과 (18)을 고려하고, 제어입력은 추적제어기 (44)와 데드존 보상기 (45)식을 합한 것을 선택한다. 여기서  $X(w)$ 는 (29)에 의해 주어진다. 건설한 신호

$$\gamma(t) = -(f_M(x) + \tau_M) \frac{e}{|e_c|} \quad (48)$$

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

$$\dot{\hat{d}} = X(w)e_c - k\hat{d}|e_c| \quad (49)$$

이다. 여기서 스칼라  $k > 0$  이다. 그러면 추적오차  $e_c$ 는 실질적인 유계

$$|e_c| \leq \frac{c_0^2}{4K_4k} \quad (50)$$

를 얻는다.

증명 : 리아프노프 후보함수

$$V(e, \phi, \alpha, e_c, \tilde{d}) = V_k + V_1 \quad (51)$$

를 고려하자. 여기서

$$V_1 = \frac{1}{2} [e_c^T \bar{M} e_c + \tilde{d}^T \tilde{d}] \quad (52)$$

이다. 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_k + \dot{V}_1 = e\dot{e} + h\phi\dot{\phi} + \alpha\dot{\alpha} + \dot{V}_1 \\ &= e\cos(\alpha)v + \alpha \left\{ w - \frac{\sin(\alpha)}{e\alpha} (\alpha - h\phi)v \right\} + 4\dot{V}_1 \end{aligned} \quad (53)$$

이다.  $V_1$ 을 미분하고 (46)식을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -e_c^T K_4 e_c + \frac{1}{2} e_c^T (\dot{\bar{M}} - 2\bar{V}) e_c + \tilde{d}^T (X(W)e_c \\ &\quad - \delta e_c + \dot{\tilde{d}}) + e_c^T (\delta + \gamma + \bar{\tau}_d) z \end{aligned} \quad (54)$$

이다. 두 번째 항은 비균형 대칭 성질  $\dot{\bar{M}} - 2\bar{V} = 0$ 에 의해 소멸되고  $\dot{\tilde{d}} = -\hat{d}$ 와 조정알고리즘 (49)와 건설항 (48)에 의해

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= -e_c^T K_4 e_c + \tilde{d}^T (-\delta e_c + k(d - \tilde{d})|e_c|) + e_c^T [\tilde{f} + \gamma + \bar{\tau}_d] \\ &= -e_c^T K_4 e_c + \delta_M |\tilde{d}| |e_c| + k d_M |\tilde{d}| |e_c| - k |\tilde{d}|^2 |e_c| \end{aligned} \quad (55)$$

가 된다. 여기서 어떤 스칼라  $\delta_M$ 에 대해서  $|\delta| < \delta_M$ 와 유계(bound) 성질이 이용되었다.

식(55)와 (36)식을 (53)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\gamma_1^2 e^2 \cos^2(\alpha) - \gamma_2 \alpha^2 - e_c^T K_4 e_c + \delta_M |\tilde{d}| |e_c| \\ &\quad + k d_M |\tilde{d}| |e_c| - k |\tilde{d}|^2 |e_c| \end{aligned} \quad (56)$$

이다. (56)식의 첫 번째 두 항은 음수이다 따라서

$$\dot{V}_1 \leq -|e_c| [K_4 |e_c| - c_0 |\tilde{d}| + k |\tilde{d}|^2] \quad (57)$$

이고 여기서  $c_0 = \delta_M + k d_M$ 이다. 다음 조건을 만족하면 항상 음이 된다. 즉,

$$\|e_c\| \gg \frac{c_0^2}{4K_4k} \quad (58)$$

이거나

$$|\tilde{d}| > \frac{c_0}{k} \quad (59)$$

이다. 리아프노프 정리에 따라서, 오차가 (58)식의 오른쪽 항보다 크면 추적 오차는 감소한다. 이는 식(60)에서 실질적으로 추적 오차가 유계됨을 의미한다.

$$|e_c| \leq \frac{c_0^2}{4K_4k} \quad (60)$$

또한 리아프노프 확장 범위에서 데드존 유계 폭,  $|\tilde{d}|$ 는 식 (59)의 오른쪽 방향으로 근접해서 유계되어진다. PD 제어기에서,  $K_4$ 는 PD제어기 설계에 의해 결정되고, 크기

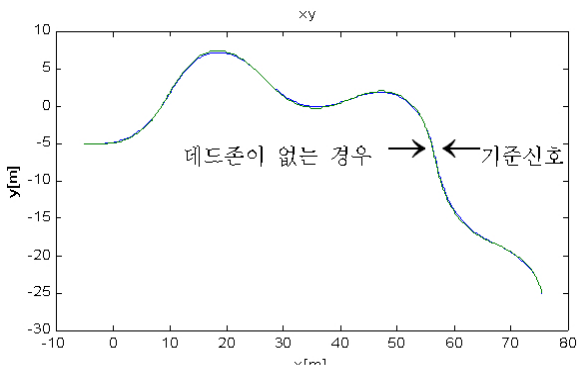
도 마음대로 늘릴 수 없다. 하지만, PD제어기와 견실 항이 전체 시스템의 안전성을 유지하는 범위 내에서  $K_4$ 의 증가는 추적오차의 범위를 감소시킬 수 있다.

V. 시뮬레이션 및 실험결과

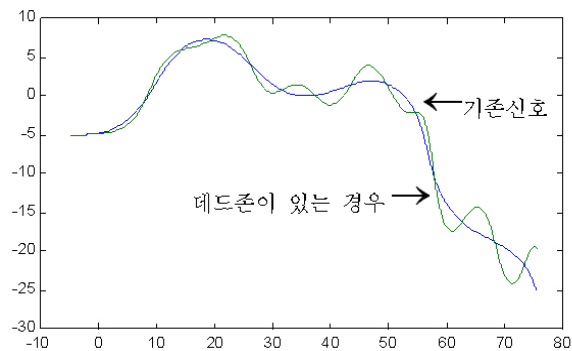
이 장에서는 이동로봇의 제안된 퍼지 보상기의 효과에 대해 입증한다. 먼저 컴퓨터 시뮬레이션 변수로  $m = 10 [kg]$ ,  $I = 5 [kg \cdot m^2]$ ,  $2R = 0.35 [m]$ ,  $r = 0.05 [m]$ 이다. 제어기 이득  $K_4 = diag\{5, 5\}$  로 한다. 기준 점은 동력학 모드에서 만들어지고 속도는

$$v_r = 0.7 [m/sec]$$

$$\omega_r = -1 + 5sin(t/10)[deg/sec] \quad (61)$$



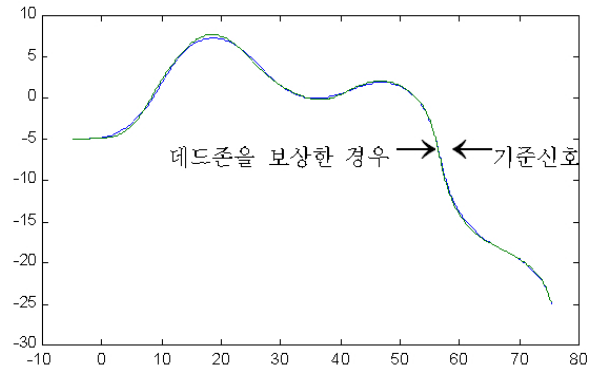
(a)



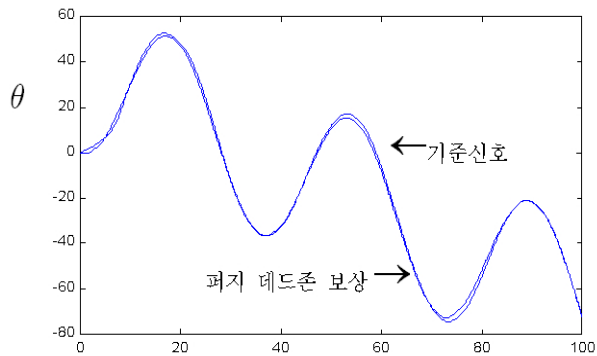
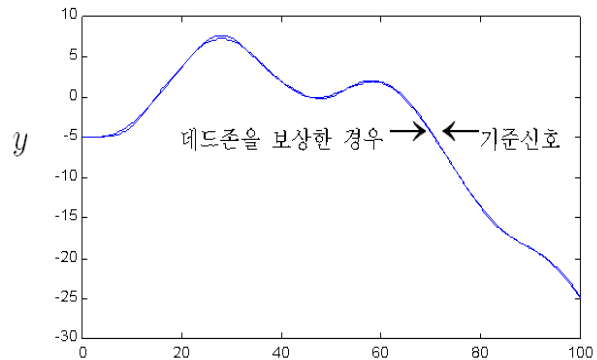
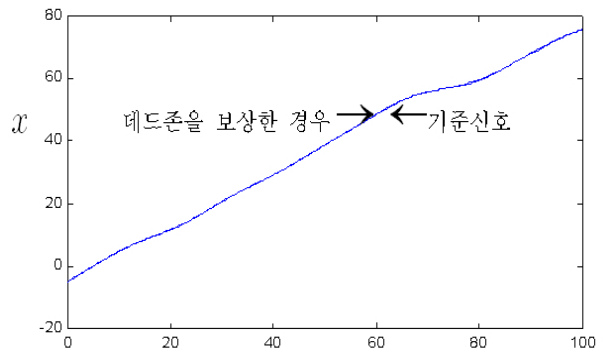
(b)

그림 5. 이동로봇의 추종응답 (a) 데드존이 없는 경우 (b) 데드존이 있는 경우.

Fig. 5. Tracking response of a mobile robot (a) without and (b) with deadzone.



(a)



(b)



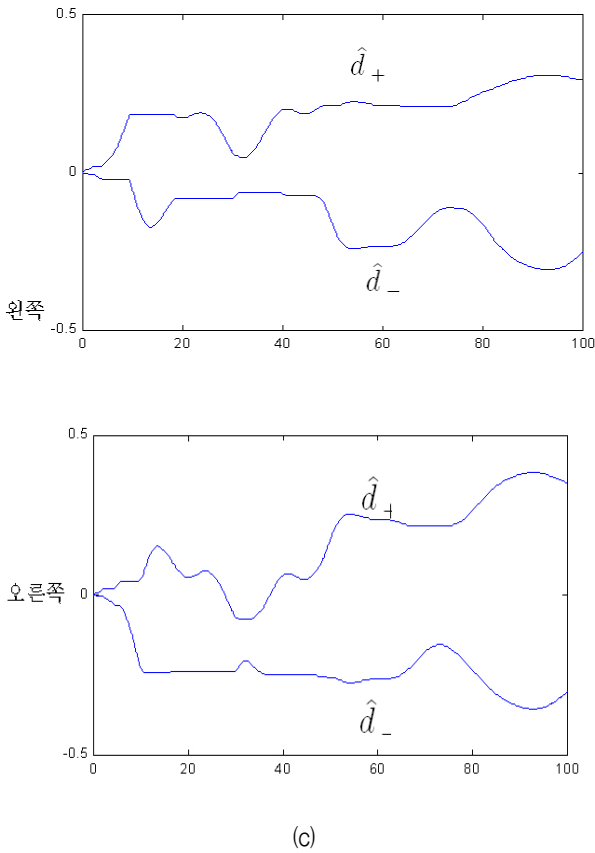
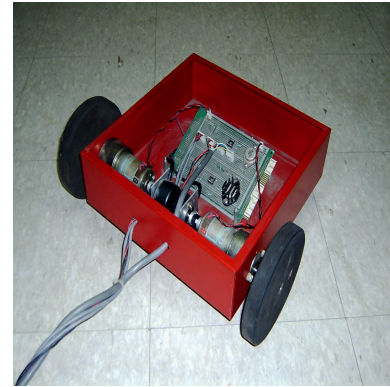


그림 6. (a) 퍼지 보상기에 의한 이동로봇의 추종응답 (b)  $x, y, \theta$  의 궤적 (c) 데드존 추정치

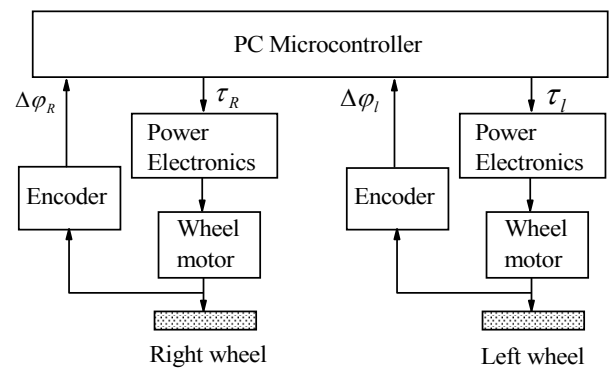
Fig. 6. (a) Tracking response of a mobile robot with deadzone compensation. (b) Time evolution of  $x, y, \theta$  and (c) estimates of deadzone width.

이다. 출발점 벡터는  $(-5, -5, 0^\circ)$ 이고 목표는 궤적 추적이다. 그림 5(a)는 이동로봇의 기준 추적 응답이다. 데드존이 이동로봇에 포함되는 그림 5(b)와 같이 추적 오차가 발생한다. 여기서 데드존 성분은 오른쪽 바퀴는  $d_+ = 0.28, d_- = -0.29$ 이고, 왼쪽 바퀴는  $d_+ = 0.3, d_- = -0.29$ 이다. 그림 6은 퍼지 보상기가 데드존 효과를 보상하는 결과를 보여준다. 퍼지 보상기의 실험도 하였다.

그림 7(a)는 이동로봇의 실험 장치이다. 바퀴의 반경은  $r = 0.05 [m]$ 이고, 바퀴사이의 거리  $2R = 0.35 [m]$ 이다. 모터토크  $3000 [rpm]$ 과  $24 [V]$ 에  $20 [mN \cdot m]$ 이다. 각 모터에  $600 [pulse/turn]$ 의 엔코더와 기어가 장착되어 있다. 그림 7(b)에서 제어 알고리즘은  $100 [Hz]$ 로 PC와 연결되어 있다. PWM 이중 사이클 명령이 로봇으로 전송되고, 엔코더는 샘플링시



(a)



(b)

그림 7. (a)이동로봇의 실험장치 (b) 제어구조

Fig. 7. (a) Experimental setup for a mobile robot and (b) control architecture.

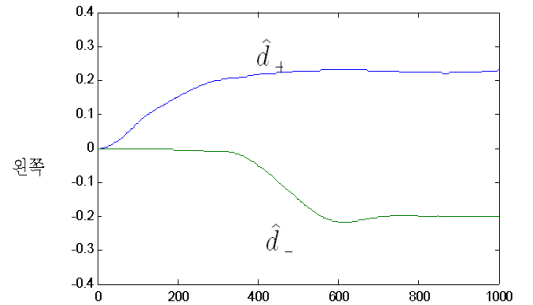
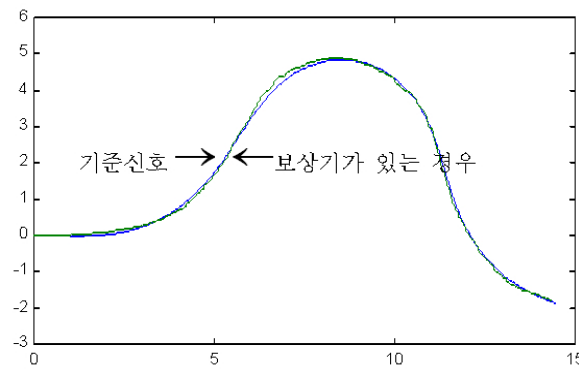
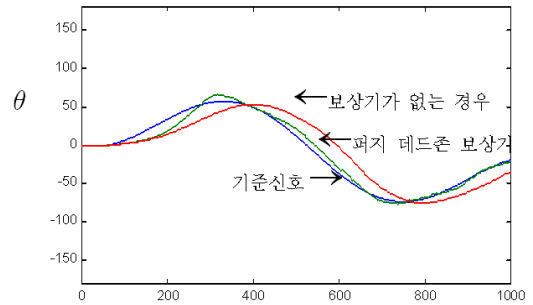
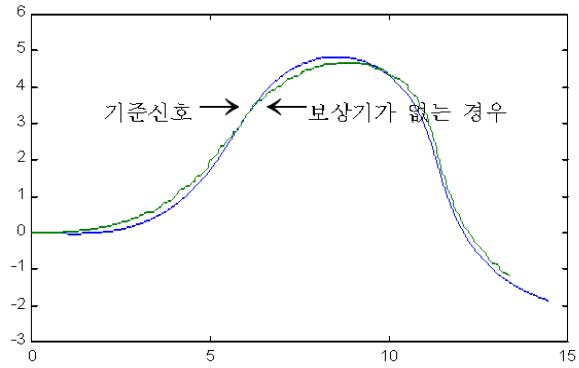
간  $T_s$  동안 각  $\Delta\phi_R$ 과  $\Delta\phi_L$ 을 측정한다. 로봇의 선속도 가속도는  $\Delta s = (r/2)(\Delta\phi_R + \Delta\phi_L)$ 이고  $\Delta\theta = (r/2R)(\Delta\phi_R - \Delta\phi_L)$ 이다. 시간  $t_k = kT_s$ 에 추정 궤적 위치는

$$\hat{q}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \\ \hat{\theta}_k \end{bmatrix} = \hat{q}_{k-1} + \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta}_k & 0 \\ \sin \bar{\theta}_k & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (62)$$

이다. 여기서,  $\bar{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + \Delta\theta/2$ 이다. 실험에서 기준 궤적은

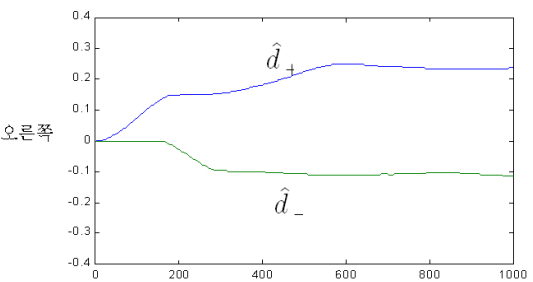
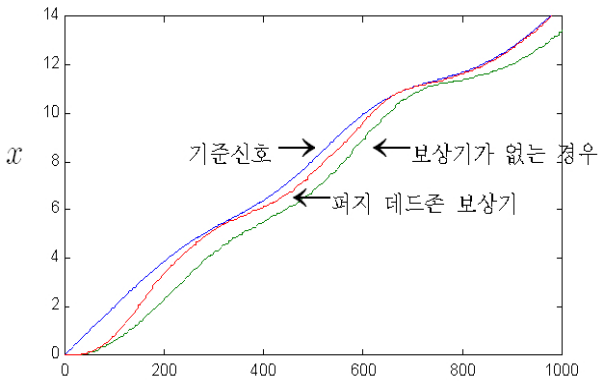
$$\begin{aligned} v_r &= 1.1 [m/sec] \\ w_r &= -5.7 + 28 \sin(t/2) [degree/sec] \end{aligned} \quad (63)$$

이다. 그림 8(a)는 데드존이 있는 추적응답이다. 데드존에 의해 성능이 저하되었음을 볼 수 있다. 그러나 제안된 퍼지 보상기 응답에서 피드백 제어기에 비해 상당히 성



(a)

(b)



(c)

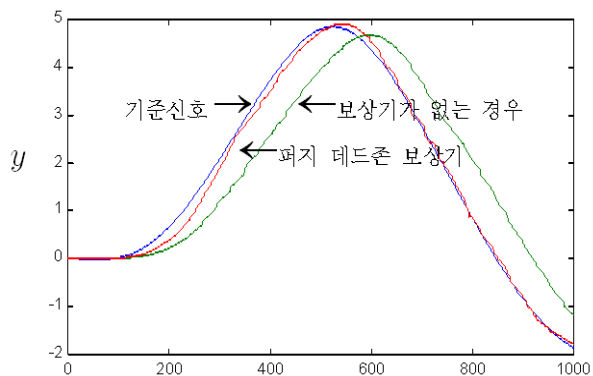
그림 8. (a) 퍼지 데드존 보상기에 의한 이동로봇의 실험응답 (b) 궤적 시간응답 (c) 데드존 추정치

Fig. 8. (a) Experimental tracking response of a mobile robot with FL deadzone compensation. (b) Time evolution of  $x, y, \theta$ , and (c) estimates of deadzone width.

능이 향상되었음을 볼 수 있다. 위치 변수의 시간응답과 데드존 폭의 추정치는 그림 8(b)-(c)에서 볼 수 있다

### VI. 결 론

이동로봇의 추적 제어를 위해 동력학 제어기와 퍼지 보상기가 결합된 방식을 제안하였다. 사실상 이동로봇의 모든 정보를 알 수 없다. 예를 들면 데드존은 상용의 방법으로는 모델화하기가 쉽지 않다. 이러한 것을 극복



하기 위해서 성능이 보장되는 퍼지 보상기를 유도하였다. 퍼지 보상기가 테드존을 추정하므로 이동로봇의 모든 사전정보를 필요로 하지 않는다. 이동로봇의 실험, 모의실험, 이론적인 증명으로 제안된 제어가 근사적으로 안정화됨을 보였다. 제안된 퍼지 테드존 보상은 이동로봇의 구동기 비선형성을 문제를 해결 하였으므로 여타 로봇 및 정밀제어에 유용할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. D. Luca and G. Oriolo, "Modeling and control of nonholonomic mechanical systems," in *Kinematics and Dynamics of Multi-body Systems*, J. Angeles and A. Kecskemethy, Eds. New York: Springer-Verlag, 1995, vol. 360, ch. 7, pp. 277-342.
- [2] 이종호, 김동원, "퍼지 시스템과 포텐셜 필드를 이용한 이동로봇의 충돌회피 최적 경로," *대한전자공학 회 논문지*, 제47권 IE편, 제 2호, pp. 66-72, 2010.6
- [3] 이형직, 정슬, "두 바퀴로 구동하는 이동로봇 시스템의 균형제어," *대한전자공학회 논문지*, 제 48권 SC 편, 제 6호, pp.1-7, 2011. 11.
- [4] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noquchi, "A stable tracking control ethod for autonomus mobile robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, Sacramento, vol. 1, Cincinnati, OH, May 1990, pp. 384-389.
- [5] Z. Ping and H. Nimejer, "Tracking control of mobile robots: A case study in backstepping," *Automatica*, vol. 33, no. 7, pp. 1393-1399, 1997.
- [6] G. Oriolo, A. De Luca, and M. Vendittelli, "WMR control via dynamic feedback linearization: design, implementation and experimental validation," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 835-852, Nov. 2002.
- [7] Z. Li, S. S. Ge, and A. Ming, "Adaptive robust motion/force control of holonomic constrained nonholonomic mobile manipulators," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics B*, vol. 37, no. 3, pp. 607-616, June 2007.
- [8] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 589-600, July 1998.
- [9] C. D. Sousa, J. E. M. Hemerly, and R. K. H. Galvao, "Adaptive control for mobile robot using wavelet networks," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics B*, vol. 32, no. 4, pp. 493-504, Aug. 2002.
- [10] T. Das and I. Narayan, "Design and implementation of an adaptive fuzzy logic based controller for wheeled mobile robots," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 501-510, May 2006.
- [11] G. Antonelli, S. Chiaverini, and G. Fusco, "A fuzzy logic based approach for mobile robot path tracking," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 211-221, April 2007.
- [12] R. C. Luo and Kuo L. Su, "Multilevel multisensor based intelligent recharging system for mobile robot," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 270-279, Jan. 2008.
- [13] I. Baturone, F. J. Moreno-Velo, V. Blanco, and J. Ferruz, "Design of embedded DSP-based fuzzy controllers for autonomous mobile robots," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 55, no. 2, pp. 928-936, Feb. 2008.
- [14] J. Barraquand and J. C. Latombe, "Nonholonomic multibody mobile robots: controllability and motion planning in the presence of obstacles," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, Sacramento, CA, 1991, pp. 2328-2335.
- [15] G. Campion, G. Bastin, and B. D. A. Novel, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," *IEEE Tans. Robot. Automat.*, vol. 12, pp. 47-62, Feb. 1996.
- [16] M. Aicardi, G. Casalino, A. Bichhi, and A. Balestrino, "Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques," *IEEE Robot. Automat. Mag.*, vol. 2, pp. 27-35, Mar. 1995.
- [17] D. A. Recker, P. V. Kokotovič, D. Rhode, and J. Winkelman, "Adaptive nonlinear control of systems containing a deadzone," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Brighton, UK, 1991, pp. 2111-2115.
- [18] G. Tao and P. V. Kokotovič, "Adaptive control of plants with unknown dead-zones," in *Proc. American Control Conf.*, Chicago, IL, 1992, pp. 2710-2714.
- [19] J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1991.
- [20] J. O. Jang, H. T. Chung, and G. J. Jeon, "Neuro-fuzzy controller for a XY positioning table," *Intelligent Automation and Soft*

*Computing*, vol. 13, no. 2, pp.153-169, April 2007.

- [21] J. O Jang, "Adaptive neuro-fuzzy network control for a mobile robot," *J. Intelligent & Robotic Systems*, vol. 62, no. 3, pp. 567-586, June 2011.

---

— 저 자 소 개 —

---



장 준 오(정회원)

1998년 경북대학교 전자공학과  
공학박사

1999년-현재 위덕대학교 소프트  
웨어공학과 교수

<주관심분야 : 로봇공학, 지능제  
어, 소프트웨어>