

**Nonholonomic 모바일 로봇의 퍼지 PID제어**

김 도우\*, 양 해원, 정 원철, 황 영호, 김 흥필\*\*

하양 대학\* 전기공학부\* 경일 대학\*\* 전기공학부\*\*

**A Fuzzy PID Control of Nonholonomic Mobile Robot**

Do-woo Kim\*, Hai-won Yang, Won-chul jung, Yong-ho Hwang, Hong-phil Kim\*\*

Dent of Elec Eng Hanvana University\* Dent of Elec Eng Kyungill University\*\*

**Abstract** - In this paper, A PID motion controller based on the fuzzy concept is discussed for nonholonomic mobile robot. The difficulties in controlling such a Mobile robot vehicle lies in the fact that it usually has only two degrees of freedom for motion control in a tracking mode. It makes the control of speed and steering possible to decompose the error between the reference posture and the current posture. The Gyro compass is used to measure the position of robot. The proposed nonholonomic mobile robot is shown to follow the reference trajectory and compensate the dynamics. Simulation results are provided to validate the proposed controller. Experiments have been used to verify the effectiveness and robustness of the motion controller.

**1. 서 론**

최근 국내에서는 산업, 국방 등 다양한 분야에서 인간을 대신하기 위한 여러 형태의 로봇연구가 진행되고 있으며, 특히, 위험 지역의 탐사에 검사장비등을 이송하며, 인간의 역할을 대신하는 바퀴구동로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그런데, 이러한 바퀴구동로봇 주행에는 로봇의 위치, 진입속도의 불확실성 및 주행 시 외란에 대한 강인성의 문제가 고려되어야하고 또한, 원격지에서 원하는 경로대로 주행과 조향 속도를 제어하는 위치/속도 추종제어가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 두 개의 AC 서보 모터를 로봇 후륜에 장착하여 차동으로 바퀴를 구동함으로써 조향과 주행속도를 제어하는 Nonholonomic 모바일 로봇을 제작하였다. 일반적으로 연구되고 있는 Nonholonomic 모바일 로봇의 제어에서는 로봇 구동축의 중심점과 로봇의 무게중심점이 일치하는 이상적인 경우를 가정으로 제어를 설계한다[1],[2],[3],[4],[5]. 그러나, 본 로봇은 차체의 폭과 길이가 크기 때문에 양 중심점의 거리차를 무시하는 일반적 가정에 대하여 설계된 제어 이론을 적용할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 양 중심점 사이의 거리차( $d$ )를 포함하여 기구학적 모델링을 수행하고, 이를 고려함으로써 로봇 조향각 및 속도의 응답에 발생하는 과도상태 오차를 해결한다. 이를 위하여, 비선형 시스템에 적용이 용이하며, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는 퍼지 제어를 도입하여 기존의 PID 이득을 조정하는 데 사용하였다 [6]. 본 논문의 구성은 2절에서 설계 제작된 Nonholonomic 모바일 로봇 제어 시스템을 간략히 설명하고, 거리차를 포함한 기구학적 모델링을 수행한다. 3절에서는 운동좌표상 오차를 퍼지 입력으로 하여, 주행 조향 시 실시간으로 PID이득을 조정하는 퍼지 PID제어를 설계하고, 4절에서는 제안한 주행/조향 속도퍼지 PID제어의 성능을 각각 기준 직선운동과 원운동에 대해 백스텝핑 제어[2]와 비교하여 제안한 제어기의 성능을 검증한다.

**2. Nonholonomic 모바일 로봇 제어시스템**

본 논문의 모바일 로봇은 워 휠 구동의 몸체부, 조향 센서부의 구조로 설계하였고, 로봇 몸체는 구동 시 모터의 관성모멘트를 작게하기 위해 FRP로 제작되었으며, 구동 모터(삼성CSM-01B)와드라이버(삼성 CSM-01B)를 몸체의 후방에 장착하였다. 따라서, 로봇은 두 개의 별도 구동되는 후륜바퀴에 의하여 주행 및 방향전환을 하며 각각의 바퀴에는 감속비 60:1의 워 기어가 장착되어 있다. 몸체 내부에는 로봇의 pitch(조향각)를 측정하는, Precision Navigation사의 자이로컴패스(TCM2)를 탑재하여 RS-232C통신으로 제어 PC와 접속한다. 그리고, 구동모터의 출력신호는 Motion Engineering사의 다측제어보드(PCX/DSP-400)를 이용한다. 따라서, 그림 1은 본 논문에서 설계 제작한 구동로봇 제어시스템 개요도이다

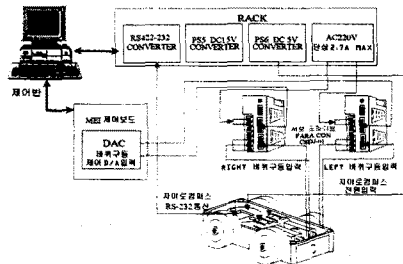


그림 1. Nonholonomic 모바일 로봇 제어시스템

본 Nonholonomic 모바일 로봇은 변형되지 않는 바퀴를 장착하여 로봇의 위치/속도 변위 문제에 대해 현재 자세를 판단하여 기준 제계에 따라 조향하며 주행하는 것을 목적으로 한다. 따라서, 이와 같은 로봇의 주행/조향제어를 위해 로봇의 중심점에 대해 기구학적 모델링을 한다[1][2]. 그림 2는 로봇의 중심점  $P = [x, y, \theta]^T$ 에 대한 기구학적 모델링을 위해 위치좌표계를 나타낸 그림이다.

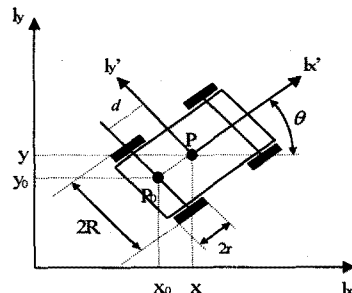


그림 2. Nonholonomic 모바일 로봇 위치좌표계

그림 2에서  $x, y$ 는 고정좌표계  $\{l_x, l_y\}$ 의 로봇 중심점,  $\theta$ 는 고정좌표계의  $l_x$ 축에 대한 로봇의 운동좌표계  $\{l_x, l_y\}$

의 방위각을 나타낸다. 그리고,  $P_0$ 는 구동축의 중심점으로 초기 측정 가능한 위치점이다.  $d$ 은 로봇의 중심점  $P$ 와 구동축의 중심점  $P_0$ 사이의 거리차이다. 따라서, 그림에 의한 Nonholonomic 모바일 로봇의 기구학적 위치상태식은 다음과 같다.

$$y \cos \theta - x \sin \theta - d \theta = 0 \quad (1)$$

그런데, 일반적으로 Nonholonomic 모바일 로봇의 기구학적 모델링에서는 구동축의 중심점을 로봇의 중심점과 일치한다고 가정하고  $P$ 와  $P_0$ 사이의 거리차를  $d=0$ 으로 하는 이상적인 경우를 통하여 제어 입력을 설계한다 [1][2][3]. 그러나, 본 Nonholonomic 모바일 로봇은 차체 폭과 길이가 크기 때문에 거리차를 무시하는 일반적 가정에 대한 적용이 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 제작된 Nonholonomic 모바일 로봇의 주행/조향제어의 영향을 미치는 거리차  $d$ 를 포함하여 식(1)의 기구학적 위치상태식을 주행 선속도와 조향 각속도의 제어입력  $v=[v, \omega]^T$ 에 의한 중심점  $P$ 의 상태 행렬로 식(2)와 같이 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

그리고, 식(5)의 중심점  $P=[x \ y \ \theta]^T$ 가 기준점  $P_r=[x_{ref}, y_{ref}, \theta_{ref}]^T$ 을 추종하는 식(3)의 고정 좌표계의 오차 벡터  $e_p$ 를 식(4)의 천이행렬  $T_c$ 에 의해 식(5)과 같이 운동좌표에 대한 오차 벡터로 정의한다.

$$e_p = P_r - P = (e_x \ e_y \ e_\theta)^T \quad (3)$$

$$T_c = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$e_p^c = T_c e_p = (e_x^c \ e_y^c \ e_\theta^c)^T \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} e_x^c \\ e_y^c \\ e_\theta^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x \cos \theta + e_y \sin \theta \\ -e_x \sin \theta + e_y \cos \theta \\ e_\theta \end{pmatrix}$$

여기서,  $e_p^c$ 는 운동좌표  $(l_x, l_y)$ 상의 오차로  $e_x$ 는 구동방향 오차,  $e_y$ 는  $e_x$ 에 수직하는 측면방향 오차 그리고,  $e_\theta$ 는 회전각 오차를 나타낸다. 그리고, 식(5)의 운동좌표상의 오차를 시간  $t$ 에 대해 미분하면 식(6)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_x^c \\ \dot{e}_y^c \\ \dot{e}_\theta^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_y - v + v_{ref} \cos e_\theta - d \omega_{ref} \sin e_\theta \\ -e_x - d \omega + v_{ref} \sin e_\theta + d \omega_{ref} \cos e_\theta \\ \omega_{ref} - \omega \end{pmatrix} \quad (6)$$

식(6)으로부터  $e_x$ 는 로봇의 주행 선속도( $v$ ),  $e_y$ ,  $e_\theta$ 는 로봇의 조향각속도( $\omega$ )에 관련된 오차임을 알 수 있고, 특히,  $e_x$ 와  $e_y$ 는 거리차( $d$ )에 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 거리차에 영향을 받는 오차에 대해 주행/조향 제어시 강인성을 갖는 제어입력  $v=[v, \omega]^T$ 을 구하여야 한다. 2.2절에서는 이와 같은 제어를 설계하기 위하여, 비선형 시스템에 적용이 용이하며, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는 퍼지 제어기를 도입하여 기존의 PID 이득을 조정하는 데 사용한다.

### 3. Nonholonomic 모바일 로봇의 퍼지 PID 제어

일반적으로 PID 제어는 구조가 간단하여 구현이 용이하지만 제어대상의 특성이 변화되는 제어환경에 적응능력이 부족하다. 그리고, 퍼지 제어는 인간 사고와의 유사성으로 실제계의 근사적이고 불확실한 현상을 효과적으로 기술하기 때문에 정확한 모델에 근거하여 설계된 제어기보다 비선형 시스템에 적용이 용이하고, 외란에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는다. 따라서, 본 절에서는 이러한 외란에 대해 강인성을 보장하기 위해 실시간으로 PID이득을 조정하

는 퍼지 PID제어기를 설계한다. 퍼지 PID제어기는 식(10)과 같이 일반적 PID제어기와 같다[6].

$$G_c(s) = K_p^j + \frac{K_i^j}{s} + K_d^j s \quad (7)$$

여기서  $K_p^j, K_i^j, K_d^j$  ( $j=p, v$ )는 각각 비례, 적분, 및 미분 이득값을 나타내며,  $j=p$  및  $j=v$  경우는 각각 조향 각속도 및 주행선속도의 제어 경우를 나타낸다. 그리고 식(10)의 주행/조향 PID제어이득에 대한 퍼지시스템을 구성하기 위해  $K_p^j, K_d^j$ 를 식(8), 식(9)와 같이 0과 1사이로 정규화하고

$$K_p^{j'} = \frac{(K_p^j - K_{pmin}^j)}{(K_{pmax}^j - K_{pmin}^j)} \quad (8)$$

$$K_d^{j'} = \frac{(K_d^j - K_{dmin}^j)}{(K_{dmax}^j - K_{dmin}^j)} \quad (9)$$

적분 사상수  $T_i^j$ 가 미분사상수  $T_d^j$ 에 의해  $T_i^j = \alpha^j T_d^j$ 로 정의할 때 적분이득  $K_i^j$ 를 식(10)과 같이 구성한다.

$$K_i^j = \frac{K_p^j}{\alpha^j T_d^j} = \frac{K_p^{j'2}}{\alpha^j K_d^{j'}} \quad (10)$$

따라서,  $K_p^{j'}, K_d^{j'}, \alpha^j$ 는 퍼지 시스템에 의해 조정, 출력되는 파라미터로서 이들을 결정하기 위해  $x_i = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [e_x, e_y, \dot{e}_x, \dot{e}_y]$ 를 퍼지입력으로 하고 입력소속함수를 정한다. 그런데, 설정된 입력은 로봇의 중심점  $P$ 와 구동 차동축의 중심점  $P_0$ 사이의 거리차와 같은 비선형성과 기구학적 근사에 의한 불확실성에 영향을 받으므로 본 논문에서는 입력 값의 확률적 특성을 적절히 퍼지숫자로 변환시켜주는 식(11)의 삼각형 소속함수에 의해 입력 소속함수를 정한다.

$$\mu(x_i) = 1 - \frac{2|x_i - C_i|}{W_i} \quad (i=1, \dots, 4) \quad (11)$$

여기서,  $x_i$ 는 입력값,  $C_i$ 는 소속함수의 중심값,  $W_i$ 는 소속함수의 폭을 나타낸다. 따라서, 식(11)의 삼각형 소속함수식에 의해 정한 입력 소속함수는 그림3와 같다.

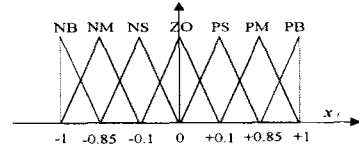


그림 3 입력 소속함수

또, 퍼지출력  $K_p^j, K_d^j, \alpha^j$ 에 대한 출력소속함수를 그림 4와 같이 정한다.

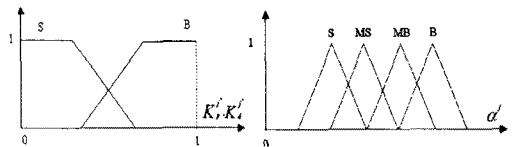


그림 4  $K_p^j, K_d^j, \alpha^j$ 의 출력소속함수

따라서, 이상의 입, 출력 소속함수에 대해 운동좌표상의 오차  $e_y$ 와  $e_\theta$ 의 상한 관계와 운동좌표상의 오차  $e_x$ 로부터 조향과 주행속도제어를 위한 퍼지 If-Then 규칙을 정한다. 조향각 제어의 경우에는 로봇의 조향을 결정하는 조향각 오차( $e_\theta$ )와 y방향의 위치오차( $e_y$ )가  $e_y > 0, e_\theta > 0$ 인 경우와  $e_y < 0, e_\theta < 0$ 인 경우에서 기준궤적을 따라 이동할 때 조향각 오차가 큰 경우로 PID제어에서는 과도상태로 볼 수 있다. 따라서, 과도 상태에서는 조향 비례이득

( $K_b^p$ )과 조향 적분이득( $K_i^p$ )은 크게, 조향 미분이득( $K_d^p$ )은 작게 하여야 하고, 조향 적분이득은  $\alpha^p$ 에 반비례하므로  $\alpha^p$ 는 작게 하여야 한다. 따라서, 퍼지입력  $e_y$ 에 대한 조향 PID 제어이득의 퍼지 규칙을 다음과 같이 정할 수 있다.

( $e_y > 0, e_\theta > 0$ 인 경우) If  $e_{y,0}$  is PB and  $e_y(t)$  is ZO

Then  $K_b^p$  is B,  $K_d^p$  is S,  $\alpha^p$  is S

( $e_y < 0, e_\theta < 0$ 인 경우) If  $e_{y,0}$  is NB and  $e_y(t)$  is ZO

Then  $K_b^p$  is B,  $K_d^p$  is S,  $\alpha^p$  is S

그리고 이 두 경우가  $e_y = 0, e_\theta = 0$  근처에 도달된 정상 상태 경우에는 과도응답이 커지는 것을 방지하기 위해 제어 신호가 작아야하므로, 비례이득  $K_b^p$  작고, 미분이득  $K_d^p$ 와  $\alpha^p$ 는 커져야한다. 따라서, 다음과 같은 퍼지규칙을 설정한다.

( $e_y = 0, e_\theta = 0$ 인 경우) If  $e_{y,0}$  is ZO and  $e_y(t)$  is NB

Then  $K_b^p$  is S,  $K_d^p$  is B,  $\alpha^p$  is B

주행 속도제어의 경우에서도, 주행속도를 결정하는 오차( $e_x$ )가  $e_x > 0, e_x < 0$ 인 경우는 과도상태로 볼 수 있고,  $e_x = 0$ 에 근처일 때는 정상상태로 볼 수 있다. 따라서,  $e_x$ 에 대한 주행 PID 제어이득의 퍼지규칙도 조향시의 규칙과 같이 유사하게 설계할 수 있다. 이와 같은 과정으로 설계한  $e_x, e_y$ 에 의한 주행/조향 제어 이득  $K_b^j, K_d^j, \alpha^j$ 에 대한 퍼지규칙은 표1, 표2, 및 표3과 같다. 여기서,  $i = 1, 2, j = p, v$ 이다

표 1. 주행/조향 비례이득  $K_b^j$ 에 대한 퍼지규칙

$x_{i+2}(t)$ $x_i(t)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

표 2. 주행/조향 미분이득  $K_d^j$ 에 대한 퍼지규칙

$x_{i+2}(t)$ $x_i(t)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

표 3.  $\alpha^j$ 에 대한 퍼지규칙

$x_{i+2}(t)$ $x_i(t)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
NM	MS	MS	S	S	S	MS	MS
NS	MB	MS	MS	S	MS	MS	MB
ZO	B	MB	MS	S	MS	MS	B
PS	MB	MS	MS	S	MS	MS	MB
PM	MS	MS	S	S	S	MS	MS
PB	S	S	S	S	S	S	S

비퍼지화 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심을 구하여, 그에 해당하는 제어값을 제어입력으로 취하는 최대평균법을 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$K_b^j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t)) \cdot B^i_{K_b}}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t))}$$

$$K_d^j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t)) \cdot B^i_{K_d}}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t))}$$

$$\alpha^j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t)) \cdot B^i_{\alpha}}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{e^i}(x_i(t)) \mu_{\Delta e^i}(x_{i+2}(t))}$$

여기서,  $e^i$ 와  $\Delta e^i$ 는 그림 5의 입력 퍼지집합이고,  $B^i_{K_b}, B^i_{K_d}, B^i_{\alpha}$ 는 그림 6과 그림 7의 출력 퍼지 집합의 중심 값이다. 따라서, 퍼지시스템으로 조정, 출력되는 PID이득( $K_b^j, K_d^j, \alpha^j$ )에 의한 모바일 로봇의 주행속도 제어입력( $v$ )과 조향 각속도 제어입력( $\omega$ )은 다음과 같다.

$$v = K_b^v e_x(t) + \int_0^t K_d^v e_x(t) dt + K_{\alpha}^v \frac{de_x(t)}{dt}$$

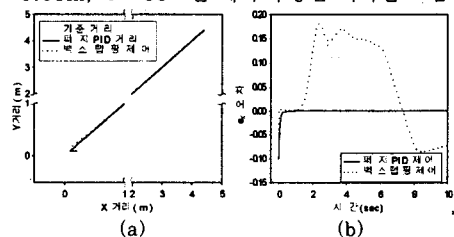
$$\omega = K_b^p e_y(t) + \int_0^t K_d^p e_y(t) dt + K_{\alpha}^p \frac{de_y(t)}{dt}$$

#### 4. 모의 실험

본 절에서는 P와 P<sub>0</sub>사이의 거리차  $d$ 가 0.13m인 후륜 구동 모바일 로봇에 대해 설계된 주행/조향 속도 퍼지 PID제어기의 성능을 검증하기 위하여, 로봇의 직선주행시의 경우[사례 1]와 로봇의 원운동에 대한 추종경우[사례 2]에 대해 각각 전산모사를 수행하고 이의 결과를 백스텝핑 로봇 구동 제어[2] 결과와 비교하였다. 전산모사에서 PID제어이득( $K_b^j, K_d^j, \alpha^j$ )의 범위는 각각 선속도 이득으로  $K_b^v \in [30, 1], K_d^v \in [5, 1]$ 와  $\alpha^v \in [20, 23]$ 같이 정하였고, 각속도 이득으로  $K_b^p \in [15, 1], K_d^p \in [5, 1]$ 와  $\alpha^p \in [20, 23]$ 같이 정하였다. 그리고, 백스텝핑 제어[2]의 제어이득은  $\alpha = 2, k_1 = 10, k_2 = 4$ 를 사용하였다.

[사례 1] 직선주행의 경우

사례1에서는 로봇의 직선운동에 대한 추종 결과를 살펴보기 위해 기준 선속도( $v_{ref}$ )의 최고속도를 0.6m/sec인 사다리꼴 형태로 설정하고, 기준 각속도( $\omega_{ref}$ )는 0으로 하였다. 주행전에 로봇의 초기 위치 및 자세각이  $x = 0.2m, y = 0.05m, \theta = 60^\circ$  일 때의 추종을 나타낸 그림이다.



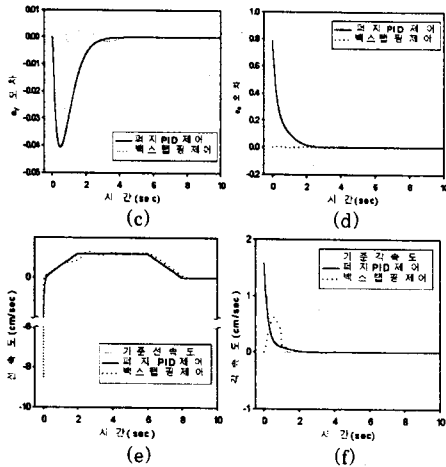


그림 9. 거리차  $d$ 를 고려한 직선 운동에서의 퍼지 PID 제어와 백스텝핑 제어(1) 비교 (a)  $x_{ref}, y_{ref}$  추종 결과 비교 (b) 운동좌표상의 거리오차  $e_x$  비교 (c) 운동좌표상의 거리오차  $e_y$  비교 (d) 운동좌표상의 각도오차  $e_\theta$  비교 (e) 기준 선속도 추종 비교 (f) 기준 각속도 추종 비교)

[사례 2] 원 주행의 경우

다음으로 로봇의 원운동에 대한 추종 결과를 살펴보기 위해 기준 선속도  $v_{ref}$ 와 기준 조향 각속도  $\omega_{ref}$ 가 각각 0.3 m/sec 일 때 기준위치  $x_{ref}=0.1m, y_{ref}=0.1m, \theta_{ref}=\pi/4$ 를  $P$ 와  $P_0$ 사이의 거리차  $d$ 가 0.13m인 Nonholonomic 모바일 로봇의 위치  $x=0.2m, y=0.05m, \theta=0$  일 때의 추종을 나타낸 그림으로서 제안한 퍼지 PID 제어는 로봇 시스템의 특성이나 부하 변화에 대해 이득 조정규칙을 결합함으로써 PID 이득을 온라인으로 조정하였다.

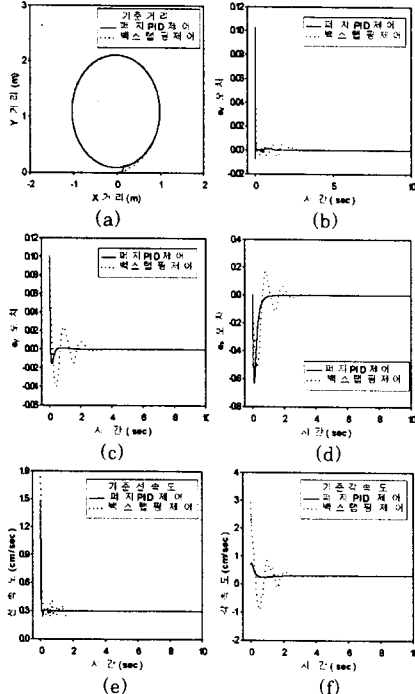


그림 10. 거리차  $d$ 를 고려한 원운동에서의 퍼지 PID 제어와 백스텝핑 제어(1) 비교 (a)  $x_{ref}, y_{ref}$  추종 결과 비교 (b) 운동

좌표상의 거리오차  $e_x$  비교 (c) 운동좌표상의 거리오차  $e_y$  비교 (d) 운동좌표상의 각도오차  $e_\theta$  비교 (e) 기준 선속도 추종 비교 (f) 기준 각속도 추종 비교)

5. 결 론

본 논문에서는 기 제작된 Nonholonomic 모바일 로봇의 위치제어를 위하여 위치추정 센서인 자이로컴파스를 이용 측정된 로봇 중심점  $P$ 에서 구성된 정적위치상태가 기준위치  $P_0$ 를 추종하는데 있어 본 논문에서는 두 차동축의 중심점  $P_0$ 와 측정된 로봇 중심점  $P$  사이의 거리차를 고려함으로써 로봇의 주행과 조향을 제어하는 제어 입력  $v=(v \ \omega)^T$ 을 퍼지 PID알고리즘을 이용 설계하였다. 그리고 제안된 퍼지 PID 제어의 성능을 각각 기준 직선운동과 원운동에 대해 모의실험으로 살펴보았다. 이를 통해 본 논문에서 제안된 퍼지 PID알고리즘이 Nonholonomic 모바일 로봇의 위치제어에 있어 초기 추종 특성이 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 로봇의 근사모델에 의한 비선형성에 적용이 용이하며, 보다 더 자유도가 높고, 기준제적 추종에 따른 로봇의 센서 측정잡음, 외란과 불확실성 문제에 대하여 강인한 제어 특성을 갖는것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Qiuju Zhang, James Shippen, Barrie Jones, "Robust backstepping and neural network control of a low quality nonholonomic mobile robot", International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 39, pp.1117-1134, 1999.
- [2] Zhong Ping, Jiang and Henk Nijmeijer, "Tracking control of mobile robot : a case study in backstepping", Automatica, Vol. 33, No. 7, pp.1393-1399, 1997.
- [3] B. d'Andrea Novel, G. Bastin, and G. Campion, "Control of nonholonomic wheeled mobile robots by stste feedback linearization", The International Journal of Robotics Research, Vol. 14, No. 6, pp.543-559, 1995.
- [4] B. d'Andrea Novel, G. Bastin, and G. Campion, "Modelling and control of nonholonomic wheeled mobile robots", Proceedings of The 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, pp.1130-1135, April 1991.
- [5] Z. Y. Zhao, M. Tomizuka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controller", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cyber, No. 5, pp.1392-1398, 1993.
- [6] Kevin M. Passino, and Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, 1998.