

# 자기구성 퍼지제어기를 이용한 이동로봇의 구동제어

배강열<sup>#</sup>

## A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to the Driving Control of a Mobile Robot

Kang Yul Bae<sup>#</sup>

### ABSTRACT

A robust motion controller based on self-organizing fuzzy control (SOFC) and feed-back tracking control technique is proposed for a two-wheel driven mobile robot. The feed-back control technique of the controller guarantees the robot follows a desired trajectory. The SOFC technique of the controller deals with unmodelled dynamics of the vehicle and uncertainties. The computer simulations are carried out to verify the tracking ability of the proposed controller with various driving situations. The results of the simulations reveal the effectiveness and stability of the proposed controller to compensate the unmodelled dynamics and uncertainties.

**Key Words :** Mobile robot(이동로봇), Nonholonomic constraint(비홀로노믹 구속), Dynamic parameter(동적 인자), Tracking control(궤적제어), Self-organizing fuzzy control(자기구성 퍼지제어)

### 1. 서론

바퀴구조를 가진 자율주행 이동로봇은 공간 이동성과 특수 기능성을 기반으로 공장자동화, 사무실자동화, 설비관리, 무인탐사 등 다양한 분야에 응용이 가능하다. 특히 인간을 대신하여 작업을 할 수 있는 시스템의 개발에 자율주행 로봇의 활용이 다양한 형태로 연구되고 있고, 이를 통한 개발 후 실 적용 사례도 급증하고 있다.<sup>1,2</sup> 응용분야에 따라 차이가 있으나, 조향과 구동능력에 의해 지배되는 자율주행 이동로봇의 성능과 안정성은 응용의 확대를 결정하는 중요한 요소가 된다.<sup>3</sup> 이동로봇이 가지는 동적 불확실성과 외란 등에 대

응하기에 PID 제어기로 써는 한계가 있어, 이를 극복하고자 강건한 PID 제어기를 연구한 사례와 PID의 이득을 신경망을 이용하여 자기동조할 수 있는 방법 등이 제안되고 있다.<sup>4,5</sup> 나아가 제어계수가 설정되는 제어기법보다는 상황의 인식에 기반한 정보로써 제어하는 방법이 더욱 효과적으로 판단하여, 인공망과 퍼지로직 제어를 이용하여 이동로봇의 동적 불확실성과 외란에 대응하는 방법이 제안되고 있다. Zhang, Fierro 등은 두 개의 주행바퀴로 구성된 주행로봇에서 back stepping 방법에 기반한 위치제어기법을 제안하고 신경망 기법으로 속도제어를 하였고,<sup>6,7</sup> Moran 등은 퍼지-신경망 제어기법을 이용하여 주행로봇의 위치제어

접수일: 2006년 5월 1일; 개재승인일: 2006년 11월 1일  
# 교신 저자: 진주산업대학교 메카트로닉스공학과  
E-mail kybae@jinju.ac.kr Tel. (055) 751-3384

정도를 개선한 결과를 보였다.<sup>8</sup> 비선형 동특성, 마찰, 모델 불확실성 등이 충분하게 고려되지 않은 제어기법의 유용성은 한계가 있게 된다. 실 적용에 있어 자율주행 이동로봇의 동역학적 모델은 구동속도와 가반 부하 등으로 야기되는 동특성의 변화를 포함할 수 있다. 이동로봇이 주어진 경로를 설정된 속도로 추적함에 있어, 부하의 변화가 찾게 발생하는 경우에 위치 또는 속도제어를 위해 퍼지제어 기법을 제안한 사례도 있다.<sup>9,10</sup> 그러나 퍼지 제어기에서 적합한 언어적 제어규칙을 선택하는 것은 매우 어려워, 제어기에 제어규칙을 생성하고 변경할 수 있는 능력을 부여하고 플랜트제어에 필요한 지식을 제어기가 스스로 학습하도록 하는 기법이 요구된다. 대표적으로는 자기구성 퍼지제어기(SOFC, Self-Organizing Fuzzy Controller)를 활용할 수 있다.<sup>11</sup> 이를 활용하여 자율 이동로봇의 성능향상을 시도한 사례를 찾기 어려우나, 성능향상을 위해 적합한 시도로 판단된다.

본 연구에서는 SOFC 기법을 활용한 제어기를 제안하여, 구동 2축을 가진 이동로봇에서 부하 변화, 구동속도 변화 등 동적모델의 파라미터 변화와 바퀴의 미끄러짐 등의 외란에 대한 강건성을 확보하고자 하였다. 이동로봇의 제어는 크게 위치제어와 속도제어로 분리하여 고려할 수 있는 바, 위치제어에서는 이동로봇이 계획된 경로를 추적할 수 있는 설정속도를 현재 오차를 고려하여 간신히 되고, 속도제어에서는 바퀴의 속도가 설정속도에 수렴하도록 제어하게 된다. 이동로봇의 위치제어는 궤환제어 방법을 적용하고,<sup>6</sup> 속도제어를 위해 자기구성 퍼지제어 기법을 활용하게 된다. 제안된 이동로봇의 운동특성과 제어특성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 특히 초기 위치 및 방향 오차를 가진 상황에서, 이동로봇이 주어진 경로를 추적하는 성능과 부하의 변화 및 미끄러짐의 발생 등에 따른 추적성을 평가하고자 하였다.

## 2. 이동로봇의 운동모델

Fig. 1은 제안된 주행 이동로봇으로, 대차와 2개의 주행바퀴로 구성되어 있다. 로봇의 진행방향에서 오른쪽 바퀴의 주행운동을  $\theta_1$ , 왼쪽 바퀴의 주행운동을  $\theta_2$ 로 나타내었다. 대차 중앙에 무게 중심이 위치하고, 중심점에서 주행바퀴까지는  $d$ 의 길이를 갖고, 두 주행바퀴 사이의 거리는  $2w$ ,

바퀴의 반경은  $r$ 이다. 위치추적 과정에서 이동로봇의 중심점을 추적점이 놓여야 할 위치로 설정하였다. 제안된 이동로봇의 평면운동을 묘사하기 위해 고정좌표계  $\{X, Y\}$ 를 설정하고, 이동로봇의 중심점을  $(x, y)$ , 이동로봇의 방향을  $\Phi$ 로 나타내었다. 이동로봇에서의 상대운동을 묘사하기 위해 이동로봇에 고정된 상대좌표계  $\{x, y\}$ 를 별도로 설정하였다.

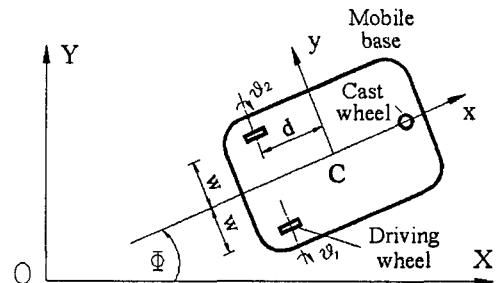


Fig. 1 Mobile robot platform

이동로봇의 구동바퀴에서 순수히 구동만이 수행되고 미끄러짐이 없다고 가정하면, 즉 이동로봇이 구동바퀴 축에 직각방향으로만 움직인다고 가정하면, 상대속도 및 좌표계 관계에 의해서, 주행바퀴의 운동은 다음과 같이 표현된다.

주행바퀴 1의 주행방향과 주행축 방향의 속도를 나타내면

$$\dot{\theta}_1 = x \cos \Phi + y \sin \Phi + w \dot{\Phi} \quad (1.a)$$

$$-x \sin \Phi + y \cos \Phi - d \dot{\Phi} = 0 \quad (1.b)$$

주행바퀴 2의 주행방향 속도를 나타내면,

$$\dot{\theta}_2 = x \cos \Phi + y \sin \Phi - w \dot{\Phi} \quad (2)$$

방정식(1)과 (2)에서, 이동로봇 중심점의 운동을 각 구동바퀴의 각속도로 나타낸, 즉 바퀴의 구동에 의해 이동로봇의 운동이 결정되는 운동학적 관계식인 nonholonomic 구속조건을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = \frac{r}{2} \cos \Phi (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \frac{r}{2w} d \sin \Phi (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (3.a)$$

$$\dot{y} = \frac{r}{2} \sin\Phi(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \frac{r}{2w} d \cos\Phi(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (3.b)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{r}{2w}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (3.c)$$

이동로봇의 동적 운동방정식은 라그랑지의 정식화 방법을 이용하여 다음과 같이 유도하였다.<sup>12</sup>

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (4.a)$$

$$q = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (4.b)$$

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T \quad (4.c)$$

$$L = \frac{1}{2} m(x^2 + y^2) + \frac{1}{2} I_w(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2} I_c \dot{\Phi}^2 \quad (5)$$

여기서,  $q$ 는 자세 변수 벡터,  $\tau$ 는 토크 벡터,  $L$ 은 운동에너지를 나타내고,  $m$ 은 이동로봇의 질량,  $I_w$ 는 이동로봇의 수직축에 대한 질량관성모멘트,  $I_c$ 는 바퀴의 회전축에 대한 질량관성모멘트를 나타낸다. 식 (5)에서, 바퀴의 질량에 의한 운동에너지 효과는 무시하였다. 운동에너지는 자세 변수 벡터  $q$ ,  $\dot{q}$ , 시간 등에 의해 미분되어야 하므로, 식 (5)에 나타난 이동로봇의  $x$ ,  $y$ 방향 속도, 회전 방향 속도 등을 방정식 (3)에 나타난 구속조건과 (3)식의 시간에 대한 미분식을 이용하여 변환하였다.

결과적으로, 식 (4.a)에서, 다음과 같은 이동로봇의 시스템 방정식(Mobile robot)을 도출할 수 있다.

$$D(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) = \tau \quad (6)$$

여기서, 관성행렬  $D$ 는  $2 \times 2$ 의 요소, 상당하중 벡터  $F$ 는  $2 \times 1$ 의 요소를 가지며, 각각의 요소를 부록에 나타내었다.

### 3. 이동로봇의 위치 및 속도 제어

Fig. 2는 이동로봇의 경로 추적운동을 제어하는 제어구조를 나타내고 있다. 위치제어는 운동학적 추적제어기를 사용하였고, 이동로봇시스템의 동적 구동을 위해서는 자기구성 퍼지제어기를 각

각 구현하여 설정된 속도와 위치의 안정적 출력을 얻고자 하였다.

여기서  $X_r$ 은 설정된 경로상의 위치를 나타내고,  $X_c$ 는 이동로봇의 현재 위치를 나타낸다. 동적 제어기의 입력은 구동바퀴의 설정된 각속도  $q_d$ 이고, 출력은 실제 구동바퀴의 각속도  $q$ 이다. 시스템 출력  $q$ 를 적분하면 바퀴의 구동 위치를 구할 수 있고, 또 이를 이동로봇의 위치로 변환(Position transformation)하여 현재의 위치를 산출할 수 있다.

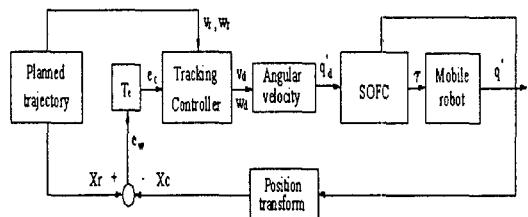


Fig. 2 Schematic diagram of motion-control structure for mobile robot

#### 3.1 위치 제어

이동로봇이 주어진 경로를 따라 이동해야 할 추적위치가 설정되고 현재 이동로봇의 위치를 파악할 수 있게 되면, 주어진 경로와 현재 위치의 차인 추적오차( $e_w$ )를 산출할 수 있다. 추적오차를 변환행렬( $T_e$ )로써 이동로봇상의 상대좌표계의 크기로 변환하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_c = [e_x \ e_y \ e_\phi]^T = T_e e_w \quad (7)$$

$$\text{여기서, } T_e = \begin{bmatrix} \cos\Phi & \sin\Phi & 0 \\ -\sin\Phi & \cos\Phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad e_w = [e_x \ e_y \ e_\phi]^T,$$

$e_x$ 는 주행방향 오차,  $e_y$ 는 측방향 오차,  $e_\phi$ 는 회전방향 오차를 나타낸다.

이동로봇의 운동은 선속도  $v$ 와 회전각속도  $w$ 의 두 제어입력으로 조정된다. 이로써는 로봇의 위치와 방향을 동시에 제어하기에는 어려움이 있다. 또한 입력과 출력의 관계가 비선형적 nonholonomic 제약을 가지고 있어, 시간의 경과에 따라 위치오차를 제거할 수 있는 수정된 속도입력

이 요구된다. Nonholonomic 제약으로 측방향의 오차가 직접 제어될 수 없어, 제안된 궤환제어 기법인 back-stepping 기법을 사용하였다. 따라서 추적제어기는 페루프 시스템을 안정화할 수 있는 적절한 속도제어 입력을 도출하는 기법으로, 본 연구에서는 이동로봇의 경로추적 및 위치제어(Tracking controller)를 위해, Zhang이 back stepping 방법에 근간하여 제안한 다음과 같은 궤환제어기법을 이용하였다.<sup>6</sup>

$$\begin{bmatrix} v_d \\ w_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 e_x + v_r \cos e_\phi \\ w_r + k_2 (e_\phi + \alpha e_y) + \alpha v_r \sin e_\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $v_r$ 는 이동로봇의 설정 속도,  $w_r$ 는 설정 각속도이고,  $v_d$ 는 수정된 설정속력,  $w_d$ 는 수정된 설정각속도,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\alpha$ 는 비례계수들이다. 제어법칙 (8)을 이용하여 이동로봇의 위치 오차를 고려하여 이동로봇이 움직여야 할 속도와 각속도를 수정하고, 관계식 (3)을 이용하여, 이동로봇의 좌, 우 바퀴의 각속도로 변환 설정(Angular velocity)하게 된다.

### 3.2 속도 제어

이동로봇의 속도제어는 바퀴의 설정된 각속도를 확보하기 위하여 시스템 입력 토크의 크기를 결정하는 기능으로, 이동로봇의 비선형 동적거동을 극사화하기 위해 퍼지 제어기법을 이용하였다. 퍼지 제어기의 입력은 각속도차( $E$ )와 각속도차의 변화( $dE$ )로 선정하고, 각 바퀴의 구동토크( $U$ )를 출력으로 설정하였다.

$$e(n) = w(n)_{ref} - w(n) \quad (9)$$

$$de(n) = (w(n)_{ref} - w(n)) - (w(n-1)_{ref} - w(n-1)) \quad (10)$$

$$E = G_e \times e(n) \quad (11)$$

$$dE = G_d \times de(n) \quad (12)$$

$$U = G_u \times u(n) \quad (13)$$

여기서,  $w_{ref}$ 는 설정된 각속도,  $w$ 는 실제 각속도,  $u(n)$ 은 토크이고,  $G_e$ ,  $G_d$ ,  $G_u$ 는 각각 실제 공정변수값과 퍼지변수값 사이의 관계를 나타내는 계수이다. 먼저 퍼지분할을 위하여, 계획된 이동로봇의 정상속도에서 구동바퀴의 각속도를 구

하고, 이동로봇의 계획된 가속도와 운동방정식에서 토크를 계산하여 퍼지영역을 설정하였다. 각속도차는 각각 퍼지 공간을 zero(ZO), small(S), medium(M), big(B) 등의 부분집합으로 분할하였고, 크기가 양이면 positive(P), 음이면 negative(N)로 구분하였다. 각속도차의 변화는, 각각 zero, small, middle(M), big, very big(VB)인 부분집합으로 분할하였다. 이동로봇의 제어입력인 토크는 각각 -N ~ +N까지 1의 간격으로 퍼지공간을 분할하였고, 퍼지변수의 애매도를 나타내는 멤버십 함수는 삼각형 형태를 사용하였다.

Table 1과 같은 7 x 9 행렬로 표현되는 퍼지규칙베이스는 각속도차가 커지면 토크를 증가시키되, 각속도차와 그 변화량의 정도에 따라 토크의 크기 정도가 적절히 설정되도록 구성하였다. 각속도차와 각속도차이의 변화가 모두 음의 방향으로 크게 나타나면, 즉 좌측 상단의 경우에는 음의 큰 토크가 요구됨을 나타내고, 반면에 우측 하단의 경우는 양의 큰 토크가 요구됨을 나타낸다. 퍼지규칙베이스는 다수의 PID 해석을 통하여 오차와 오차의 변화율과 토크와의 관계를 이용하여 분할하였다. 퍼지추론을 위한 연산자는 Mamdani의 min-max기법을 사용하였으며, 영역중심법을 이용하여 퍼지 연산결과를 비퍼지화하였다.<sup>13</sup> 공정입력 값  $u(n)$ 은 식 (13)을 이용하여 산출할 수 있다.

Table 1 Fuzzy rule base

Change of angular velocity difference(dE)

	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	
Angular velocity difference (E)	NB	-168	-156	-144	-132	-120	-108	-96	-84	-72
	NM	-128	-116	-104	-92	-80	-68	-56	-44	-32
	NS	-88	-76	-64	-52	-40	-28	-16	-4	8
	ZO	-48	-36	-24	-12	0	12	24	36	48
	PS	-8	4	16	28	40	52	64	76	88
	PM	32	44	56	68	80	92	104	116	128
	PB	72	84	96	108	120	132	144	156	168

퍼지 제어기는 여러 개의 언어적 제어규칙을 가지고 이 규칙을 통해 플랜트를 제어하므로 환경이나 플랜트 파라미터의 변화에 덜 민감하다. 그러나 퍼지 제어기에서 적합한 언어적 제어규칙을 선택하는 것은 매우 어려워, 제어기에 제어규칙을 생성하고 변경할 수 있는 능력을 부여하여 플랜트

제어에 필요한 지식을 제어기가 학습하도록 하는 방법이 필요하고, 대표적으로는 자기구성 퍼지제어기(SOFC)를 활용할 수 있다.<sup>11</sup> 여기서, 공정 출력에 대한 퍼지 제어기의 성능은 원하는 출력값과 실제 출력값의 차에 의해 측정되고, 출력에 요구되는 보정량을 얻을 수 있다. Fig. 3은 자기구성제어기의 구성도이고, 퍼지추론기구와 퍼지규칙기반으로 구성된 기본적인 퍼지제어기에, 제어기의 성능을 평가하고 성능향상을 위해 규칙을 스스로 변경할 수 있는 자기구성 부분을 더한 형태이다.

이동로봇은 출력의 응답을 오차  $E$ 와 오차의 미분  $dE$ 로 용이하게 관측할 수 있다. 입력 보정값  $F$ 를 퍼지변수로 나타내고, Fig. 4에 보인 바와 같은 소속함수와 부분집합을 갖도록 하였다.

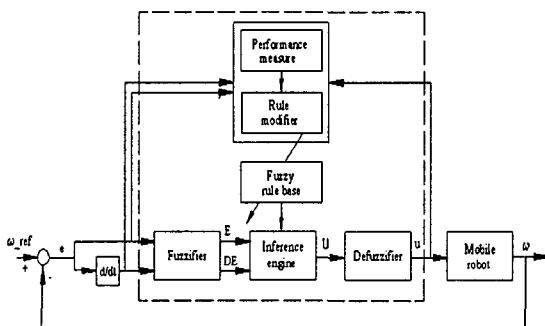


Fig. 3 Block diagram of self-organizing fuzzy control system

이때 구동 성능평가결과는  $E$ 와  $dE$ 의 정보로부터 출력에 대한 보정치를 내는 결정자(decision maker)의 형태가 된다. 이동로봇에 대한 SOFC의 구현을 위해 Table 2와 같은 성능평가표를 작성할 수 있다.  $E$ 와  $dE$ 는 성능 평가표가 매 제어 사이클마다 이용되어 입력보정값  $F$ 를 불러 올 때 사용되고, 표에서 보정값 ZO는 제어입력의 교정이 필요가 없음을 나타낸다. 설정값과의 차이가 크게 나면, 입력의 보정도 커지게 된다. 표는 대각선을 기준으로 대칭이고, 좌측 상단의 입력보정은 제어 규칙에서 공정입력(토크)을 감소해야 함을 나타내고, 반면 우측 하단의 값은 공정입력을 더 증가해야 함을 나타낸다. 규칙변경 절차는 다음과 같다. 현재의 성능에 영향을 미치는 직접적 효과는 직전

사이클의 제어행위에 의한 것이라 가정한다.  $E(n-1)$ 과  $dE(n-1)$ 이 직전 값이 되고 그 때의 제어출력이  $U(n-1)$ 이 되었을 것이다. 따라서 원하는 출력은  $U(n-1)$  대신에  $U(n-1) + F(n)$ 이고, 여기서  $F(n)$ 은 성능평가표에서 얻어지는 입력 보정값이다. 따라서 퍼지규칙에서  $E(n-1)$ 과  $dE(n-1)$ 에 의해  $U(n-1)$ 이 얻어지는 현재 제어기의 관계( $R'(n)$ )을 제거하고,  $U(n-1) + F(n)$ 이 얻어지는 관계( $R''(n)$ )를 삽입하게 된다. 따라서 새로 보정된 관계행렬을 퍼지 집합기호로 나타내면 다음과 같고, 각 제어 시점에 이 과정이 반복되게 되어 퍼지 규칙이 변경된다.<sup>14</sup>

$$R(n+1) = R(n) \cap \overline{R'(n)} \cup R''(n) \quad (14)$$

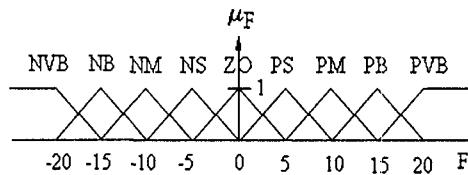


Fig. 4 Membership functions of fuzzy subsets for input reinforcement

Table 2 Fuzzy control improving table

Change of angular velocity difference(dE)

	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
NB	NVB	NVB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NVB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
NS	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
ZO	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PS	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PVB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PVB	PVB

#### 4. 시뮬레이션

이동로봇의 크기에서  $w$ 는 0.3m, z축에 대한 이동로봇의 질량관성모멘트는 2.25kgm<sup>2</sup>, 바퀴의 반경은 0.05m, 바퀴의 질량관성모멘트는

0.001kgm<sup>2</sup>로 각각 설정하였고, 해석의 편의상  $d$ 는 0으로 가정하였다. 이동로봇은 가속, 등속, 감속의 구간을 갖도록 경로계획을 하였고, 가감속 시간은 각각 2sec, 샘플링 시간은 0.02sec로 두었다. 위치오차를 보정하기 위한 제어기에서  $k_1$ 은 10,  $k_2$ 는 2,  $a$ 는 4를 각각 선정하였다.<sup>6</sup> 퍼지 제어기와 제어성능을 비교하기 위한 PID 제어방법에서, 주행바퀴의 토크 산출을 위한 PID 게인은, 이동로봇을 1차 시스템( $P(s) = e^{-T_s/s}$ )으로 가정할 경우, Ziegler-Nichols 방법<sup>4</sup>을 이용하면 비례게인 6.0, 미분게인 0.5, 적분게인 17.9로 각각 산출 가능하였다. 그러나 산출된 값을 이용하여 30kg 중량, 0.1m/s 속도, 각각 10mm의 진행방향, 측방향 위치오차 상태에서 수행된 이동로봇의 PID제어 결과, 출력값의 진동이 과도하게 나타났다. 따라서 출력이 안정되고 위치 추종이 최적으로 수행될 수 있도록, 시행착오방법으로 비례게인은 2.0, 미분게인은 0.01, 적분게인은 0.3을 각각 최종 선정하였다. 퍼지 변수의 선정은 오차, 오차변화 그리고 각각의 경우에 출력 토크를 분석하여 PID 제어 결과를 이용하여 분할하였고, 이때  $G_e$ 는 2.0,  $G_d$ 는 4.0,  $G_u$ 는 66.7로 설정하였다.

이동로봇의 시스템 파라미터와 주행조건 변화를 얻기 위해, 가반 하중의 변화는 이동로봇의 질량과 합산하여 각각 30, 90, 150kg으로 설정하였고, 등속구간에서의 속력을 0.1, 0.3, 0.5m/s로 변화하여 해석하였다. 이동경로는 직선과 원의 2가지 형태로 각각 설정, 추적성능을 평가하고자 하였다. 직선 경로의 경우,  $Y=0$ 인 직선의 이동경로를 갖고, 이동 목표점까지의 거리는 9m인 구간을 갖는다고 가정하였다. 초기 위치오차는  $Y$  방향으로 100mm, 초기 각도 오차를 10°로 가정하였다. 특히 직선 경로의 경우, 모델링이 어려운 외란 효과의 사례로 미끄러짐이 발생하는 것을 상정하여,<sup>15</sup> 기동 후 8초의 시점에서 좌측 바퀴가 2초간 미끄러져 구동이 정지되는 경우를 해석하였다. 반경 1m인 원형 경로의 추적은 초기 이동로봇은  $X$ 방향으로 100mm,  $Y$ 방향으로 100mm의 초기 오차를 가지고 있다고 가정하였다.

이동로봇의 추적 궤적은, 초기오차를 고려하고 이동로봇의 이동상황을 누적하여, 추적위치를 생성함으로써 파악하였다. 따라서 이동로봇이 이동해야 할 경로와 실제 이동로봇의 추적 경로사이의 오차를 주행 중에 산출 가능하게 된다. 경로

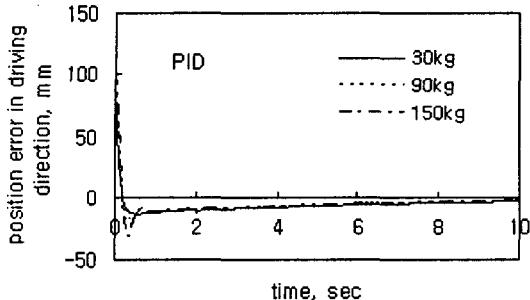
추적제어 해석은 다음과 같은 제어정보를 산출하는 과정으로 구성된다. 먼저 각 제어 단계에서 위치오차를 구하고 이에 따라 이동로봇의 설정 주행 속도를 개선하고 개선된 속도를 얻기 위한 제어변수인 각 바퀴의 각속도를 개선한다. 이와 같은 속도변화를 추적하기 위한 각 바퀴의 토크를 구하게 된다. 구해진 토크는 이동로봇시스템의 입력이 되고, 이에 따른 각 바퀴의 각각속도가 산출된다. 이를 적분하면 제어 출력인 각속도를 산출 가능하게 된다. 각 경우에 대하여 PID, 퍼지, SOFC를 적용하여, 구동 상황변화에 대한 적응 여부와 추적성능을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 이동로봇과 운동제어기법은 MATLAB™을 이용하여 구현하였고, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 검증하였다.

## 5. 결과 및 고찰

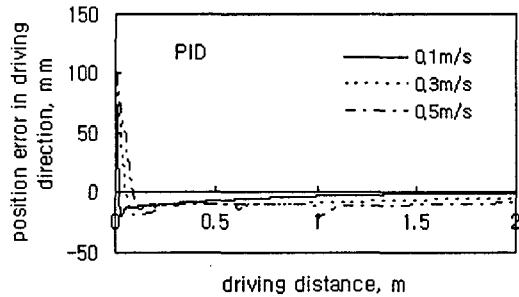
Fig. 5(a)는 초기 위치오차가 진행방향 100mm, 측방향 100mm를 가진 이동로봇의 부하가 변화하는 상황에서, PID 제어방법을 적용한 경우에 나타나는 진행방향의 위치오차를 보여주고 있다. 초기 오차의 크기에도 불구하고 추적제어가 양호하게 수행되고 있음을 알 수 있다. 진행방향의 경우, 부하에 관계없이 속응성은 빠르나, 정상상태오차의 저감이 느리게 나타나고 있고, 부하가 커질수록 천이영역에서의 오버슈트가 발생하는 현상을 보인다.

Fig. 5(b)는 초기오차를 가진 이동로봇의 속도가 변화되는 경우, 진행방향 위치 오차를 보이고 있다. 속도가 증가할수록 속응성이 낮아지고 정상상태 오차가 증가하는 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6은 퍼지 제어방법을 적용하여 초기오차를 가지고 직선경로를 이동하는 이동로봇의 속도를 제어한 결과를 보이고 있다. 정상상태 오차가 나타나지 않으나, 속응성이 PID의 경우에 비하여 다소 낮고, 부하가 증가하면 진행방향에서 오버슈트가 크게 나타나는 현상을 보이고 있다. 속도가 증가하는 경우, 속응성은 더욱 낮아지는 결과를 보이고, 진행방향으로는 오차의 진동이 나타나고 있다. 이는 퍼지제어 규칙을 도출한 시스템상태나 오차의 크기 범위를 벗어난 상태의 환경에서는 규칙의 변화가 필요함을 보이고 있다.

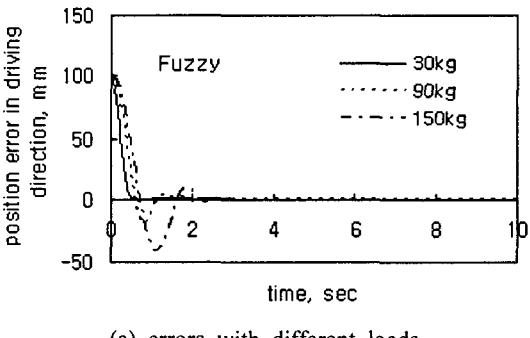


(a) errors with different loads

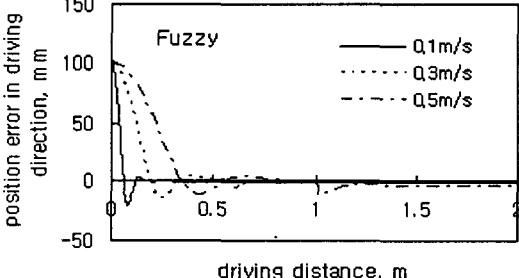


(b) errors with different velocities

Fig. 5 Straight line tracking errors in PID control

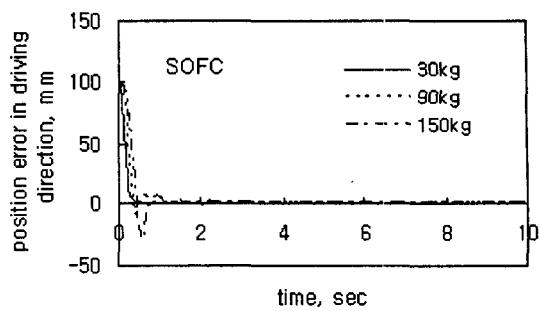


(a) errors with different loads

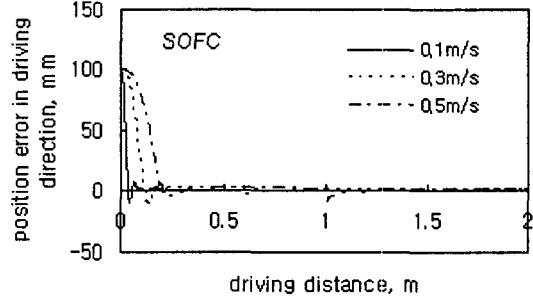


(b) errors with different velocities

Fig. 6 Straight line tracking errors in Fuzzy control



(a) errors with different loads



(b) errors with different velocities

Fig. 7 Straight line tracking errors in Self-Organizing Fuzzy control

Fig. 7은 SOFC를 이용한 속도제어 결과를 보이고 있다. 천이영역에서 경로오차의 제거가 빠르게 수행되고, 정상상태에서의 오차가 나타나지 않고 있다. 특히 퍼지 제어에 비하여 속응성이 향상되고, 오버슈트와 진동특성이 크게 개선된 결과를 보이고 있다. 이는 SOFC의 학습기구에 의해 제어 규칙을 새로운 상황에 적합하게 변화한 결과로 해석할 수 있다.

Fig. 8은 부하가 90kg인 이동로봇이 속도 0.3m/s로 이동하여, 기동 후 8초가 경과한 시점에서, 좌측 바퀴가 2초간 미끄러지는 경우에 나타나는 위치오차를 보이고 있다. 진행방향오차는 대략 300mm 정도로 나타나고, SOFC 제어에서 오차의 2차 진동 진폭이 가장 낮게 나타나고 있다. 측방향 오차는 대략 700mm 정도가 나타나는 데, 역시 SOFC의 경우가 미끄러짐 상황이 종료된 후 자시된 궤적으로의 속응성이 가장 높게 나타나고 있다.

Table 3은 미끄러짐이 나타나는 상황에서 최종적으로 적용된 퍼지성능지수표를 보이고 있다. 이

는 고정된 퍼지규칙표에서 성능지수와 식(14)의 논리를 적용한 결과이다. 표에서는 각속도차이가 음의 방향으로 크고 각속도차의 변화가 음의 방향으로 크게 나타날 때 출력의 값인 토크의 퍼지값을 역방향으로 크게 증가시키는 결과를 보이고 있다. 이는 미끄러짐 발생 상황 전후에서의 각속도차이가 크게 나타나 이를 제거하기 위한 출력의 증가로 해석할 수 있다.

Fig. 9는 초기에 -100mm, -100mm의 위치 오차를 가진 이동로봇이 반경 1m의 원 경로를 추적하는 경우에 이동속도의 변화에 따라 나타나는 위치오차의 변화를 보이고 있다. PID 제어 결과는 정착시간까지 다소의 시간이 소요되고 위치오차의 요동이 나타나고 있고, 이는 제어 이득이 고정되어 경로 상황의 변화에 대응이 느리게 나타난 결과로 판단된다. SOFC의 경우는 천이영역에서의 오차가 작고, 이동로봇의 부하가 증가하면 진행방향 오버슈트가 발생하는 현상이 나타나나, 진행방향과 측방향 공히 정상상태에 빠르게 도달하는 결과를 보이고 있다. 따라서 제안된 제어기가 효과적이고 강건하다고 판단할 수 있다.

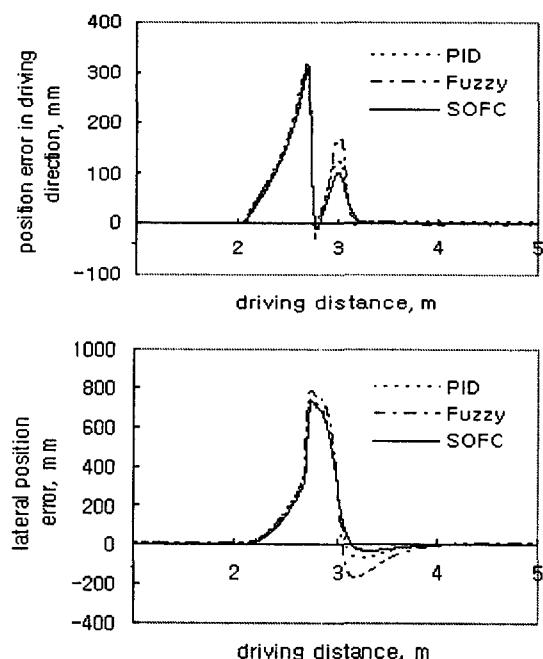


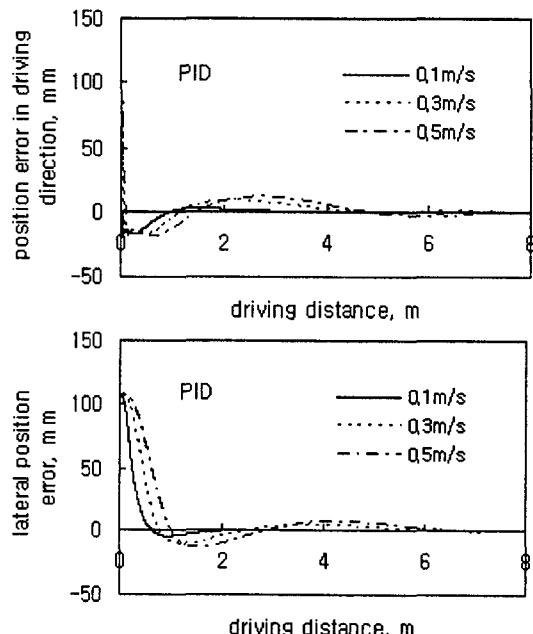
Fig. 8 Straight line tracking errors with slip condition

Table 3 Final rule base for self-organizing fuzzy controller with slip condition

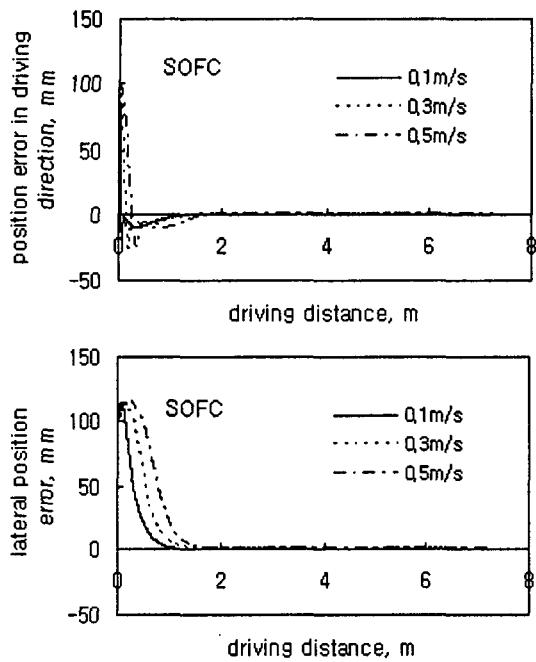
Change of angular velocity difference(dE)

	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	
Angular velocity difference (E)	NB	-168	-156	-171	-257	-144	-176	-128	-84	-72
	NM	-128	-116	-112	-190	-139	-68	-56	-44	-58
	NS	-88	-76	-48	-128	-69	-125	-59	-56	8
	ZO	-48	-36	-24	9	-2	-40	6	26	30
	PS	-8	4	16	28	76	60	64	76	88
	PM	32	44	56	68	80	92	104	116	128
PB	72	84	96	108	120	132	144	156	168	

Fig. 10은 SOFC를 이용한 이동로봇(위치 및 방향을 보이고자 삼각형 표시)이 원 경로를 추적한 궤적을 보이고 있다. 출발위치는  $x=1m$ ,  $y=0m$  위치이고, 일정 시간간격으로 로봇의 위치를 보이고 있으나, 초기 및 종기는 가감속으로 인하여 로봇의 점유 수가 다소 높게 나타나고 있다. 주어진 경로를 정확하게 추적한 결과를 보이고 있다.



(a) PID control



(b) Self-organizing Fuzzy control

Fig. 9 Circle tracking errors with different velocities

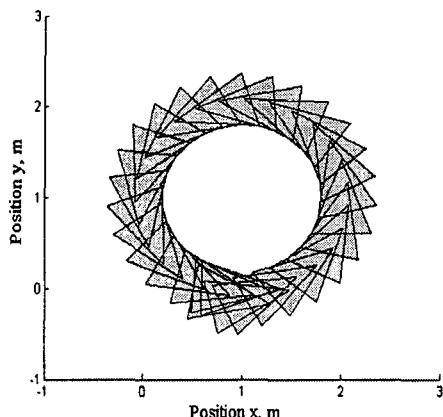


Fig. 10 Circle tracking trajectory

## 6. 결론

주행바퀴 2개로 구성된 자율주행 이동로봇의 모델링을 통한 운동방정식을 유도하고 궤환추적제어 기법을 이용한 위치제어 방법과 자기구성 퍼지제어 기법을 이용한 속도제어 방법을 제안하였다.

초기오차, 경로변화, 미끄러짐, 부하, 속도변화 등의 동적 구동상황이 변화된 상태에서, 제안된 제어방법의 경로추적제어성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 고정된 이득을 가지는 PID 제어기는 이동로봇이 필연적으로 갖는 모델의 동적변화, 외란 등에 제어성이 둔화되는 결과를 보였다.
- (2) 퍼지 제어기는 제어규칙이 확립된 상황에서는 추적성이 양호하나, 규칙을 확보한 시스템의 특성, 오차 및 오차의 변화가 범위를 벗어나면 추적성이 확보되지 않고, PID 제어기법보다 안정성이 더 낮음을 보였다.
- (3) 자기구성 퍼지 제어기를 이용함으로써 부하변화 및 속도변화에도 불구하고, 오차의 변동폭이 PID제어방법에 비해 현저히 감소되었고, 퍼지제어기법의 활용성을 강화할 수 있었다.
- (4) 자기구성퍼지 제어를 이용함으로써 미끄러짐 현상의 발생에서도 이동로봇의 위치추적성이 PID나 퍼지제어방법에 비하여 우수한 결과를 보였다.

한편, 제안된 제어방법의 실용성 확보와 성능향상을 위해서 별도의 실험적 연구가 후속될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Ikusawa, K., Sata, T., Hayashi, H. and Hurukawa, T., "Development of Mobile Grinding Robot," IKK tech. report, No. 152, pp. 60-64, 1995.
2. Miyazaki, T., Mihara, Y. and Hebaru, K., "The Development of Robot Origin Transfer Unit for Multi-Articulated Type NC Welding Robot," HHI technical review, Vol. 50, No. 1, pp. 28-34, 1994.
3. Fritzinger, D. D., "Designing a Better Steering System," Machine Design, pp. 118-120, 1996.
4. NormeyRico, J. E., Alcala, I., Comez-Ortega, J. and Camacho, E. F., "Mobile Robot Path Tracking using a Robust PID Controller," Control Engineering Practice, Vol. 17, No. 9, pp. 1209-1214, 2001.
5. Ju, J.-H. and Lee, J.-M., "High Speed Precision Control of Mobile Robot using Neural Network in

## 부 록

- Real Time," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 95-104, 1999.
6. Zhang, Q., Shippen, J. and Jones, B., "Robust Backstepping and Neural Network Control of a Low Quality Nonholonomic Mobile Robot," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 7, pp. 1117-1134, 1999.
  7. Fierro, R. and Lewis, F. L., "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 9, No. 4, pp. 589-600, 1998.
  8. Moran, A., Tokunaga, N. and Hayase, M., "Autonomous Motion Control of Mobile Robots Using Fuzzy-Neural Networks," 3rd Int. Conf. on Motion and Vibration Control, pp. 104-109, 1996.
  9. Kim, E.-S. and Joo, K.-S., "Moving Path Following of Autonomous Mobile Robot using Fuzzy," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 84-92, 2000.
  10. Bae, K.-Y., "An Analysis of the Motion of a Wheel-driven Transfer Carriage," J. of Ind. Tech. Res. Inst. of Jinju National University, Vol. 7, No. 1, pp. 217-227, 2000.
  11. Park, J.-J. and Choi, K.-S., "Fuzzy System," Kyo Woo Press, pp. 164-172, 2001.
  12. D'Souza, A. F. and Garg, V. K., "Advanced dynamics," Prentice-Hall, Ch. 5, 1984.
  13. Lee, K.-H. and Oh, K.-R., "Fuzzy Theory and Applications : Vol. II," Hong Reung Science Press, Ch.5, pp. 55-70, 1991.
  14. Kim, J.-W. and Na, S.-J., "A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to Arc Sensor for Weld Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints," Welding Journal, Vol. 72, No.2, pp. 60s-66s, 1993.
  15. Yoo, W.-S., Kim, J.-D. and Na, S.-J., "A Study on a Mobile Platform-Manipulator Welding System for Horizontal Fillet Joints," Mechatronics, Vol. 11, No. 7, pp. 853-868, 2001.

$$\begin{aligned}
 D(q)\ddot{q} + F(q, \dot{q}) &= \tau \\
 D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} &\quad F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \\
 d_{11} &= m\left(\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \left(\frac{rd}{2w}\right)^2\right) + \left(\frac{r}{2w}\right)^2 I_c + I_{w1} \\
 d_{12} &= m\left(\left(\frac{r}{2}\right)^2 - \left(\frac{rd}{2w}\right)^2\right) - \left(\frac{r}{2w}\right)^2 I_c \\
 d_{21} &= m\left(\left(\frac{r}{2}\right)^2 - \left(\frac{rd}{2w}\right)^2\right) - \left(\frac{r}{2w}\right)^2 I_c \\
 d_{22} &= m\left(\left(\frac{r}{2}\right)^2 + \left(\frac{rd}{2w}\right)^2\right) + \left(\frac{r}{2w}\right)^2 I_c + I_{w2} \\
 f_1 &= \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 m r^3 d / (4w^2) - \dot{\theta}_2^2 m r^3 d / (4w^2) \\
 f_2 &= \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 m r^3 d / (4w^2) - \dot{\theta}_1^2 m r^3 d / (4w^2)
 \end{aligned}$$