

퍼지 시스템을 이용한 이동로봇의 궤적제어

Tracking Control for Mobile Robot Based on Fuzzy Systems

박재혜, 이만형

(Jac-Hwae Park and Man-Hyung Lee)

Abstract : This paper describes a tracking control for the mobile robot based on fuzzy systems. Since the mobile robot has the nonholonomic constraints, these constraints should be considered to design a tracking controller for the mobile robot. One of the well-known tracking controllers for the mobile robot is the back-stepping controller. The conventional back-stepping controller includes the dynamics and kinematics of the mobile robot. The conventional back-stepping controller is affected by the derived velocity reference by a kinematic controller. To improve the performance of the conventional back-stepping controller, this paper uses the fuzzy systems known as the nonlinear controller. The new velocity reference for the back-stepping controller is derived through the fuzzy inference. Fuzzy rules are selected for gains of the kinematic controller. The produced velocity reference has properly considered the varying reference trajectories. Simulation results show that the proposed controller is more robust than the conventional back-stepping controller.

Keywords : nonholonomic constraints, mobile robot, dynamics, kinematics, fuzzy systems, back-stepping controller

I. 서론

최근 이동로봇(mobile robot)은 이동성과 기능적 다양성으로 인해 지난 몇 년 동안에 많은 연구가 진행 되어 왔다. 기존의 로봇은 그 작업공간의 한계로 인해 그 쓰임이 제한되었고, 특정한 작업에만 이용되는 경우가 대부분이다. 그러나 이동로봇은 이동을 하며 여러 가지 작업을 할 수 있기 때문에 산업계뿐만 아니라 사무실이나 가정에까지 그 응용범위가 광범위하다. 특히, 이동 로봇은 넓은 범위에서 작업 수행이 가능하므로 공장 설비의 점검 및 수리, 우주에서의 정보 수집, 그리고 원자력 시설의 점검 등 인간이 행하기 위험한 작업을 대신 할 수 있는 장점이 있다. 또한, 최근에는 건물내의 자동화 서비스를 제공하기 위해 이동 로봇이 스스로 판단하여 경로 생성 및 장애물 회피를 목적으로 하는 이동로봇의 적용범위가 확대되고 있다.

이동 로봇의 궤적 제어기는 이동 로봇을 구동할 때 필요한 기초적인 부분을 담당한다. 그러나 궤적 제어기는 이동 로봇이 구조적으로 nonholonomic 제약 특성을 가지고 있기 때문에, smooth time-invariant state feedback으로 안정성을 보장 받을 수 없다. 그러므로 이동로봇의 궤적제어기를 설계할 때 안정성 보장에 대한 연구를 중심으로 이루어졌다[1]. 이동로봇의 궤적 제어기를 설계하기 위해서 Kanayama et. al.은 이동로봇의 기구학만을 고려하여 자세(posture) 제어기를 제안하였다[1]. 그리고 Dixeon et. al.[2] 과 Fukao et. al.[3]은 이동로봇의 동역학을 고려하여 시스템의 안정도를 증명하였다. 또한, Zhong et. al.[7]와 Fierro et. al.[9]은 이동로봇의 동역학과 신경회로망 등을 이용하여 강인한 제어기를 구성하였다.

이동로봇의 기구학과 동역학을 동시에 고려하여 구성된 제어기의 대부분은 back-stepping 제어기를 기반으로 하여 이동로봇의 nonholonomic 구속 조건을 만족하면서 주어진 기준 궤적을 추종하는 제어기 중심으로 연구가 많이 진행되고 있

다[4]-[10]. 그러나 back-stepping 제어기를 구현하기 위해서 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫 번째는 동역학적인 문제점으로써, 기준 명령이 주어지면 기구학적인 자세 제어기에서 이동로봇의 속도명령 생성을 하게 되고, 실시간으로 이동로봇의 역 동역학식을 이용하여 이동로봇의 제어입력을 구하기 위해서는 2개의 바퀴에 의해서 구동이 되는 이동로봇의 동역학 방정식과 정확한 파라미터들을 필요로 한다. 그리고 두 번째는 기준 궤적이 주어졌을 때, 이동로봇의 기구학을 이용한 자세 제어기에서 생성되는 이동로봇의 속도명령을 생성하는 데에 대한 기구학적인 문제점을 갖고 있다.

위와 같은 back-stepping 제어기의 문제점을 보완하기 위해서 진행되어 온 연구는 대부분이 이동로봇의 동역학식과 파라미터들을 정확하게 구할 수가 없기 때문에 Qiuju et. al.[4], Zhong et. al.[7], Fierro et. al.[9], 그리고 김무진 등[10]은 실시간 또는 off-line 으로 이동로봇의 동역학식을 구하여 문제점을 해결하고자 하였다. 그리고 자세 제어기의 기구학적인 문제점을 다루기 위해서는 최근 김도우 등[8]은 Kanayama가 제안한 자세 제어기를 사용하지 않고, 이동로봇의 x 축, y 축에 대한 오차를 이용하여 퍼지 PID 제어기를 제안하였다.

본 논문에서는 back-stepping 제어기에서 기구학적인 문제점을 해결하고 기존의 back-stepping 제어기의 성능을 향상시키기 위해 퍼지시스템을 이용하였다. 기구학적인 자세 제어기는 Kanayama[1] 등이 제안하였는데, Kanayama가 제안한 자세 제어기는 내부 게인 값이 양의 값을 가지면 시스템이 안정하다는 것을 수학적으로 증명하였다. 그렇지만 자세 제어기의 양의 게인 값을 선정하는 문제점을 안고 있다. 그래서 back-stepping 제어기를 설계할 때, 대부분의 경우 시행착오의 방법으로 게인 값을 구하였다. 또한, 기존의 자세 제어기의 경우, 내부 게인 값이 고정되어 있기 때문에 이동로봇의 궤적이 일정하지 않고, 시간에 따라 계속해서 변화되었을 때, 자세 제어기에서 생성되는 속도명령이 궤적변화를 반영하지 못하기 때문에 back-stepping 제어기의 궤적 추적 성능이 저하되는 문제점을 안고 있다.

논문접수 : 2003. 1. 23., 채택확정 : 2003. 5. 12.

박재혜 : 부산대학교 메카트로닉스과정(pawh@hite1.net)

이만형 : 부산대학교 기계공학부.(mahlee@pusan.ac.kr)

본 논문에서는 퍼지 시스템을 이용하여 위에서 제시한 기존의 back-stepping 제어가 갖고 있는 자세 제어기의 문제점을 보완함으로써 궤적추적 성능을 개선하고자 한다. 퍼지 시스템은 이미 비선형 제어기로 많이 사용되고 있으며, 사람의 생각을 언어적인 변수로 표현할 수 있는 능력을 갖고 있다. 본 논문에서는 기구학적 자세 제어기에서 기준 속도명령을 생성할 때 퍼지 시스템을 이용하여 변화하는 기준 궤적을 기준 속도명령에 반영하고, 실시간으로 적절하게 변화시킴으로써 기존의 back-stepping 제어기의 성능을 개선한다. 다양한 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제안하는 방법의 우수성을 증명하였다.

II. 이동 로봇 시스템

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 이동 로봇 시스템에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 이동로봇 시스템의 동역학 방정식과 기구학 방정식 그리고 이동로봇의 nonholonomic 구속조건을 간단하게 살펴보면 다음과 같다.

1. 이동로봇의 동역학

2개의 바퀴를 이용하여 구동하는 n 차원 이동로봇의 동역학은 라그랑지 방정식(Lagrange formulation)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[2][3][7].

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

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & md \sin \theta \\ 0 & m & -md \cos \theta \\ md \sin \theta & -md \cos \theta & I \end{bmatrix},$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & md\dot{\theta} \cos \theta \\ 0 & 0 & md\dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ R & -R \end{bmatrix},$$

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

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

여기서, $M(q) \in R^{n \times n}$ 은 대칭이고 양의 한정인 관성모멘트 행렬이고, $V_m(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 는 centripetal/coriolis 행렬이다. $F(\dot{q}) \in R^n$ 는 표면 마찰력을 나타내며, $G(q) \in R^n$ 은 중력성분을 나타낸다. τ_d 는 동역학 모델에 포함되어있는 비선형 성분을 나타낸다. 그리고 $B(q) \in R^{n \times r}$ 와 $\tau \in R^r$ 은 입력 변환 행렬과 제어입력을 각각 나타내며, $A(q) \in R^{m \times n}$ 와 $\lambda \in R^m$ 은 구속조건과 관련된 행렬과 이동로봇의 nonholonomic 구속력을 나타낸다.

2. 이동로봇의 기구학과 nonholonomic 구속조건

그림 1 은 전형적인 nonholonomic 이동로봇의 시스템을 나타낸다. 이동로봇은 같은 축상으로 연결되어 있는 2 개의 구동 바퀴로 구성되어있으며, 독립적인 actuator 에 의해서 이동과 방향을 제어한다. 그리고 이동로봇의 위치는 전역 직교 좌표계 $\{O, X, Y\}$ 를 기준으로 이동로봇의 중심점의 좌표 $\{P, X_c,$

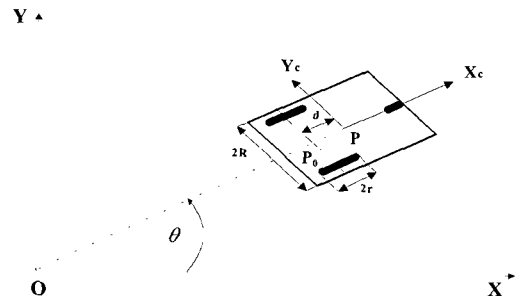


그림 1. Nonholonomic 이동로봇 시스템.
Fig. 1. A nonholonomic mobile platform.

$Y_c\}$ 로 나타낼 수 있다.

또한 이동로봇은 기구학적으로 nonholonomic 구속조건을 가지고 있기 때문에 궤적 제어기를 구성할 때 smooth time-invariant state feedback으로는 안정성을 보장 받을 수 없다. 이동로봇의 기구학적 구속 조건은 이동로봇은 구동바퀴의 축을 기준으로 직각으로 pure rolling 하면서 이동을 하고 미끄러지지 않는다는 것이다. 이와 같은 구속조건을 수식적으로 표현하면 다음과 같다[1][9].

$$\dot{y}_c \cos \theta - \dot{x}_c \sin \theta - d\dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

이동로봇의 운동은 선속도 v 와 회전 각속도 ω 의 두 가지 제어 입력으로 조정된다. 여기서 $|v| \leq V_{max}$ 와 $|\omega| \leq W_{max}$ 을 만족하고, V_{max} 와 W_{max} 는 이동로봇의 최대 선속도와 각속도를 나타낸다. 이동로봇의 기구학 방정식은 자코비안 행렬 J 에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있고, 이를 steering 시스템 또는 자세 제어기라고 한다[1].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J} \mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{q}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

이동로봇은 2개의 제어입력 (v, ω) 로 (x_c, y_c, θ) 를 가지는 이동로봇을 제어하고자 하는데 어려움이 있으며 (v, ω) 와 $(\dot{x}_c, \dot{y}_c, \dot{\theta})$ 의 관계가 비선형적인 nonholonomic 제약을 가지고 있기 때문에, Brockett의 정리에 따라 오차를 점근적으로 수렴시키는 smooth하고 시 불변적인 피드백제어가 불가능하다[1]. 이러한 제약조건을 극복하고 안정적인 제어를 설계하고자 하는 연구가 지속적으로 진행되어왔다.

III. 이동로봇 제어기 설계

III절에서는 nonholonomic 구속조건을 만족하면서 이미 이동로봇의 궤적제어기로 잘 알려진 back-stepping 제어기에 대한 내용과 문제점을 간단히 언급하고 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서 제안하는 퍼지 시스템을 이용한 이동로봇의 궤적제어기를 설명한다.

1. Back-stepping 제어기

그림 2는 back-stepping 제어기의 블록선도를 나타내었다.

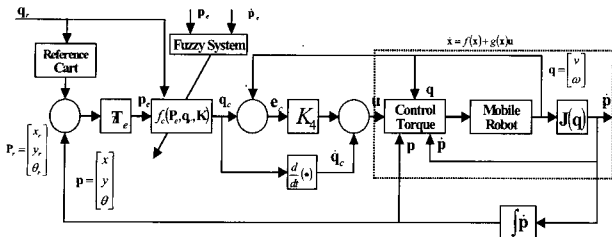


그림 2. Back-stepping 제어기.
Fig. 2. Back-stepping controller.

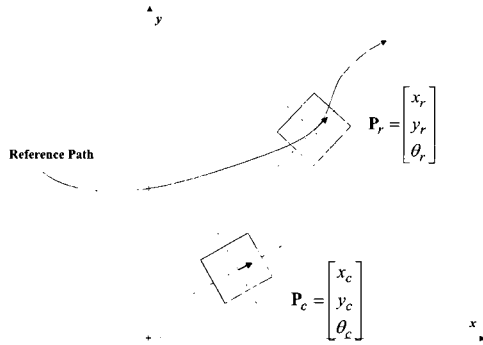


그림 3. 이동로봇의 기준 위치와 현재 위치.
Fig. 3. Reference and current position of a mobile robot.

그림 2로부터 back-stepping 제어기는 먼저 (3)의 자세 제어기를 이용하여 이동로봇을 제어하기 위한 속도명령 $q_c(t)$ 를 수식적으로 생성한다. 그리고 생성된 속도명령 $q_c(t)$ 를 입력으로 속도 제어기를 구성한다. 그리고 속도 제어기에서 생성된 속도 명령을 이용하여 이동로봇 시스템의 제어입력을 계산한다 [7][9].

속도명령 $q_c(t)$ 를 구하기 위해서, 그림 3과 같이 기준 로봇 속도 $q_r(t)$ 가 주어지면 (3)을 이용하여 기준 로봇의 위치 $p_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ 를 계산 할 수 있다. 기준 로봇의 위치와 현재 이동로봇의 위치 $p = [x \ y \ \theta]^T$ 를 이용하여 이동로봇의 위치 오차 P_e 를 구하면 다음과 같다.

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (P_r - p) = T_e (P_r - p) \quad (4)$$

그리고 이동로봇의 자세 오차 P_e 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

이동로봇의 궤적을 제어하기 위한 목적은 기준 위치 P_r 와 현재 이동로봇의 위치 P 를 일치시켜 위치 오차 P_e 를 0으로 만드는 것이다. 이와 같은 제어목적에 위해서 Kanayama는 다음과 같은 기구학적 자세 제어기를 제안하였다.

$$q_c = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + K_1 x_e \\ \omega_r + K_2 v_r y_e + K_3 v_r \sin \theta_e \end{bmatrix}, \quad q_c = f_c(P_e, q_r, K) \quad (6)$$

여기서, Kanayama[1]의 논문에서 제어게인 $K_1, K_2, K_3 \geq 0$ 을 만족하면 시스템은 안정된다고 한다. 그리고 그림 2에서 이동로봇의 제어입력을 구하기 위한 비선형 궤환 속도제어기 입력은 다음과 같다[7].

$$u = \dot{q}_c + K_4 (q_c - q) \quad (7)$$

여기서, $K_4 = K_4 I$

마지막으로, (7)에서 생성된 속도 명령 u 는 이동로봇의 동역학 방정식 (1)을 이용하여 제어입력을 계산하게 된다.

Kanayama가 제안한 자세 제어기 (6)을 이용하여 back-stepping 제어기를 설계할 때, 일반적으로 자세 제어기의 내부 게인 K_1, K_2, K_3 의 값을 시행착오를 거쳐서 결정하게 된다. 그리고 자세 제어기의 내부 게인 값들이 고정되어 있어서, 변화되는 이동로봇의 기준 궤적의 값을 반영하기가 어렵다. 그래서 본 논문에서는 퍼지 시스템을 이용하여 자세 제어기의 내부 게인 값들을 실시간으로 변화를 시킴으로써, 시행착오를 거치지않고 게인 값들을 이동로봇의 기준궤적을 반영하여 변화를 시킬 수 있다.

2. 퍼지 시스템을 이용한 제안된 제어기

기존의 back-stepping 제어기에서 비선형 궤환 속도 제어기 (7)은 기구학적 자세 제어기에서 수식적으로 생성되는 속도명령 q_c 에 따라 영향을 받는다. 자세 제어기 (6)에서 생성되는 q_c 는 기준 속도가 주어 졌을 때, 이동로봇의 위치에러를 최소화하기 위해서 생성된 임의의 기준 속도라고 생각할 수 있다. Kanayama의 논문[1]에서 제시한 기구학적 자세 제어기의 경우 게인 값이 양의 값을 가질 때 시스템이 안정함을 증명하였다. 그러나 이동로봇의 궤적이 임의로 변화를 하고 있을 때 고정된 게인 값을 이용할 경우 이동로봇 궤적 제어기의 안정도는 보장하지만 궤적 제어기의 성능이 저하될 수 있다.

본 논문에서는 그림 4와 같이 기준 로봇 궤적이 임의로 변화를 할 때, 퍼지 시스템을 이용하여 기구학적 자세 제어기 (6)의 게인을 실시간으로 변화시키고, 자세 제어기에서 생성되는 속도 명령 값이 변화되는 궤적을 적절히 반영함으로써 이동로봇의 전체 궤적 제어기의 성능을 개선 시키고자 한다.

기준 로봇 궤적변화에 따른 기구학적 제어기의 게인을 변화시키기 위해서 본 논문에서 사용한 퍼지 시스템은 일반적

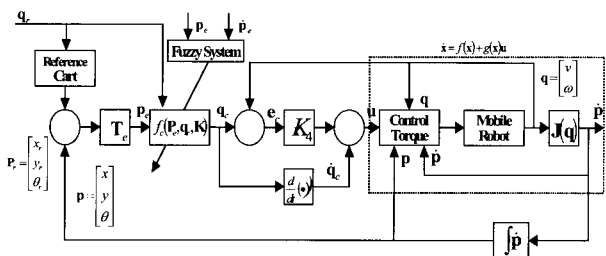


그림 4. 제안된 제어기.
Fig. 4. Proposed controller.

으로 많이 사용되는 Mamdani의 추론 방법 [11][12]을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 퍼지입력은 (4)와 (5)에서 계산된 이동로봇의 위치오차와 위치오차의 미분 값을 사용하였고, 퍼지 출력은 자세제어기의 게인 값(K_1, K_2, K_3)을 나타내었다. 그리고 퍼지시스템의 입력측과 출력측의 소속함수는 그림 5와 그림 6과 같이 삼각형 소속함수를 사용하였다. 또한 퍼지 입력과 출력 공간을 각각 5개의 퍼지 소속함수를 사용하여 퍼지분할을 함으로써 이동로봇의 움직임을 세분화 하였다. 또한 퍼지 추론을 하기 위해서 사용된 퍼지 규칙은 x축, y축, 그리고 θ 축의 에리 값들을 최소화하는 방향으로 퍼지 규칙을 세웠다. 표 1, 표 2, 표 3은 퍼지추론을 하기 위한 퍼지규칙을 나타내었다.

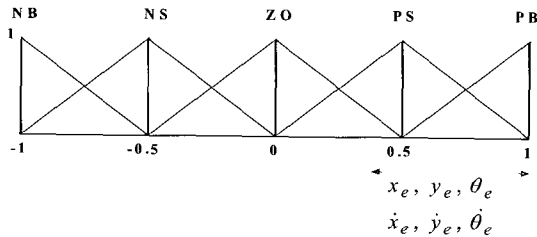


그림 5. 입력 멤버십 함수.
Fig. 5. Input membership function.

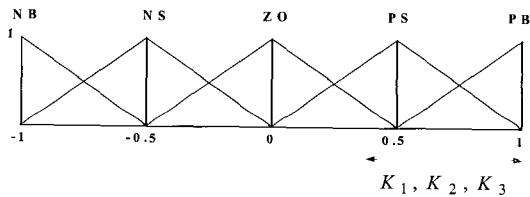


그림 6. 출력 소속 함수.
Fig. 6. Output membership function.

표 1. 게인 K1에 대한 퍼지 규칙.
Table 1. Fuzzy rule for gain K1.

| | | | | | | |
|-------------|----|-------|----|----|----|----|
| | | x_e | | | | |
| | | NB | NS | ZO | PS | PB |
| \dot{x}_e | NB | PB | PB | PS | PS | ZO |
| | NS | PB | PS | PS | ZO | NS |
| | ZO | PS | PS | ZO | NS | NS |
| | PS | PS | ZO | NS | NS | NB |
| | PB | ZO | NS | NS | NB | NB |

표 2. 게인 K2에 대한 퍼지 규칙.
Table 2. Fuzzy rule for gain K2.

| | | | | | | |
|-------------|----|-------|----|----|----|----|
| | | y_e | | | | |
| | | NB | NS | ZO | PS | PB |
| \dot{y}_e | NB | PB | PB | PS | PS | ZO |
| | NS | PB | PS | PS | ZO | NS |
| | ZO | PS | PS | ZO | NS | NS |
| | PS | PS | ZO | NS | NS | NB |
| | PB | ZO | NS | NS | NB | NB |

표 3. 게인 K3에 대한 퍼지 규칙.

Table 3. Fuzzy rule for gain K3.

| | | | | | | |
|------------------|----|------------|----|----|----|----|
| | | θ_e | | | | |
| | | NB | NS | ZO | PS | PB |
| $\dot{\theta}_e$ | NB | PB | PB | PS | PS | ZO |
| | NS | PB | PS | PS | ZO | NS |
| | ZO | PS | PS | ZO | NS | NS |
| | PS | PS | ZO | NS | NS | NB |
| | PB | ZO | NS | NS | NB | NB |

본 논문에서 사용한 비퍼지화(defuzzification)은 다음과 같다 [11]. 여기서, α 는 scale factor를 나타내고, z 는 support를 나타낸다.

$$K1, K2, K3 = \alpha \left(\frac{\int \mu(z)zdz}{\int \mu(z)dz} \right) \quad (8)$$

IV. 이동로봇의 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 이동로봇의 기준 궤적을 다르게 주어서 제안된 제어기의 강인성을 증명하고자 한다. 시뮬레이션에서는 uni-circle 형태의 이동로봇을 사용하였다. Uni-circle 형태의 이동로봇은 로봇 축구에 사용하는 이동로봇과 같은 형태로 그림 1에서 이동로봇의 구동축과 중심점사이의 거리 $d = 0$ 이다. 그러므로 동역학 방정식 (1)에서 centripetal/coriolis 항렬 V_m 와 중력성분 G 의 값은 0이다[6]. 시뮬레이션에 사용한 이동로봇의 동역학 방정식의 파라미터는 $m = 10 [kg]$, $I = 5 [kg - m^2]$, $R = 0.5 [m]$, $r = 0.05 [m]$, $F = diag\{10, 10\}$ 이다.

본 논문에서 제안하는 방법이 우수함을 증명하기 위해서 다음의 3가지 서로 다른 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 방법과 기존의 back-stepping 방법과 제어 성능을 비교하였다. 그리고 기존의 back-stepping 방법에서 사용된 자세 제어기 게인 값은 Fierro[9] 사용했던 제인을 사용하였다.

조건 1: 기준속도가 $x = 1, y = 2$ 그리고 각도 26.56° 의 전역 직교 좌표계 초기위치에서 선속도 $v_r = 0.5 [m/s]$ 와 각속도 $\omega_r = 0 [rad/s]$ 의 속도로 직선으로 변화하는 궤적이 주어지고, 현재의 이동로봇은 $x = 2, y = 1$, 그리고 각도 10° 의 초기위치에 있다고 가정한다.

조건 2: 조건 1에서 기준속도의 각속도가 $\omega_r = 0.5 [rad/s]$ 로 회전하는 궤적.

조건 3: 기준속도가 $x = 1, y = 3$ 그리고 각도 0° 의 전역 직교 좌표계 초기위치에서 선속도 $v_r = 0.5 [m/s]$ 와 각속도 $\omega_r = 0 [rad/s]$ 의 속도로 직선으로 변화하는 궤적이 주어지고, 현재의 이동로봇은 $x = 1, y = 1.5$, 그리고 각도 0° 의 초기위치에 있다고 가정한다.

그림 7, 8, 9 그리고 10은 시뮬레이션 조건 1의 상황에서 수행한 결과를 나타낸다. 그림 7은 전역 좌표계로 표현한 이동로봇의 궤적을 나타낸다. 그림 7과 같이 본 논문에서 제안하는 방법으로 back-stepping 제어기의 게인을 자동으로 변화시킴으로써 보다 좋은 성능을 나타낸다. 그리고 그림 8은

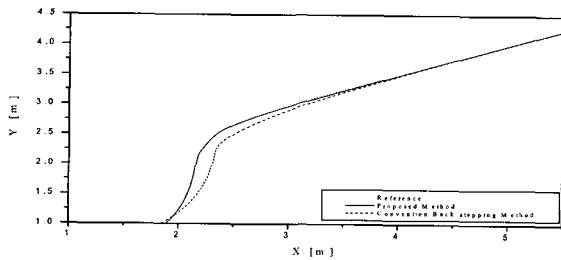
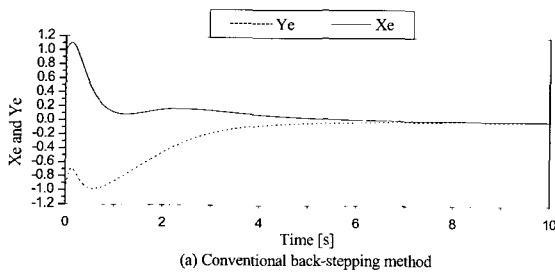
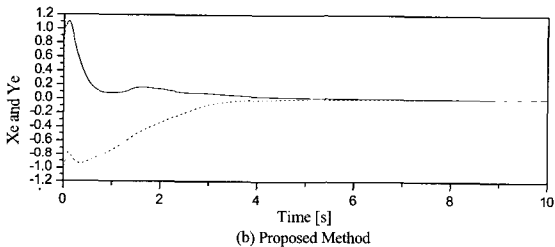


그림 7. 조건 1에 대한 이동로봇의 궤적.
Fig. 7. Mobile robot trajectory for case 1.

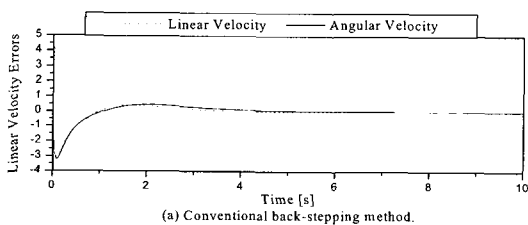


(a) Conventional back-stepping method

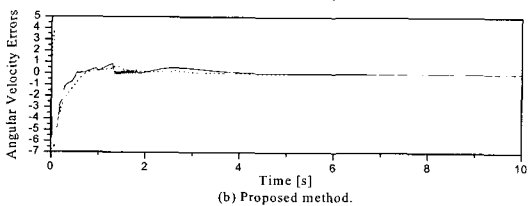


(b) Proposed Method

그림 8. 조건 1에 대한 이동로봇의 궤적에러.
Fig. 8. Trajectory errors of mobile robot for case 1.



(a) Conventional back-stepping method.



(b) Proposed method.

그림 9. 조건 1에 대한 이동로봇의 속도 에러.
Fig. 9. Velocity errors of mobile robot for case 1.

X축과 Y축에 대한 궤적 에러를 나타내었다. 그림 7과같이 그림 8에서 수렴하는 궤적에러는 기존의 back-stepping 방법보다 빠른 수렴속도를 나타낸다. 하지만 그림 9를 보면, 과도 상태에서 각속도의 변화가 기존의 back-stepping 방법보다 많은 변화가 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 10은 자세 제어기의 게인 변화 추이를 나타내었다. 그림 10에서 이동로봇이 기준 궤적에 수렴하기 직전까지의 과도상태에서는 자세 제어기의 게인 값의 변화가 크기 때문에 그림 9에서 나타난 것과 같이 과도상태에서 각속도의 추종 에러에서 채터링이 나타나고 있다.

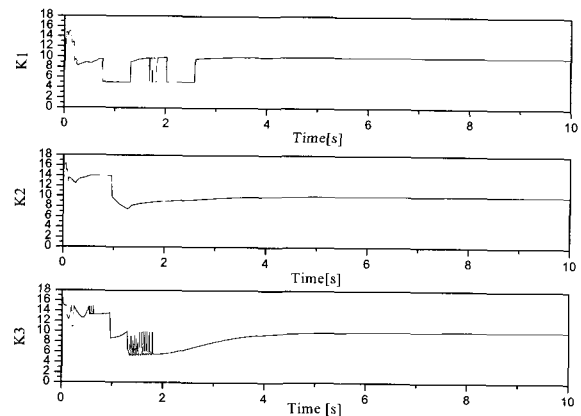


그림 10. 조건 1에 대한 자세 제어기의 게인 추이.
Fig. 10. Trend of the posture controller gains for case 1.

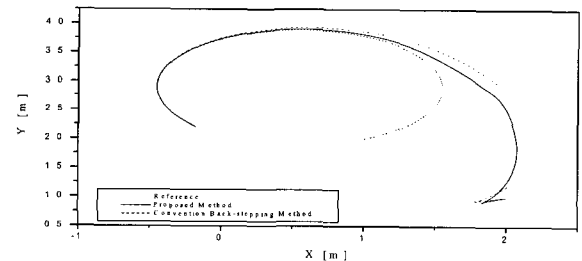
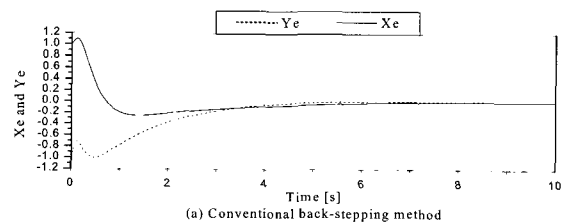
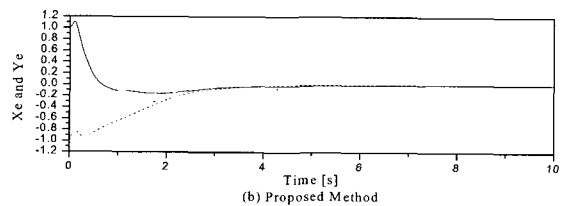


그림 11. 조건 2에 대한 이동로봇의 궤적.
Fig. 11. Mobile robot trajectory for case 2.



(a) Conventional back-stepping method



(b) Proposed Method

그림 12. 조건 2에 대한 이동로봇의 궤적에러.
Fig. 12. Trajectory errors of mobile robot for case 2.

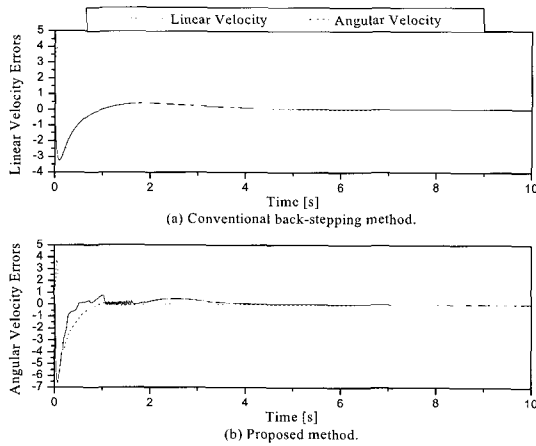


그림 13. 조건 2에 대한 이동로봇의 속도 에러.
Fig. 13. Velocity errors of mobile robot for case 2.

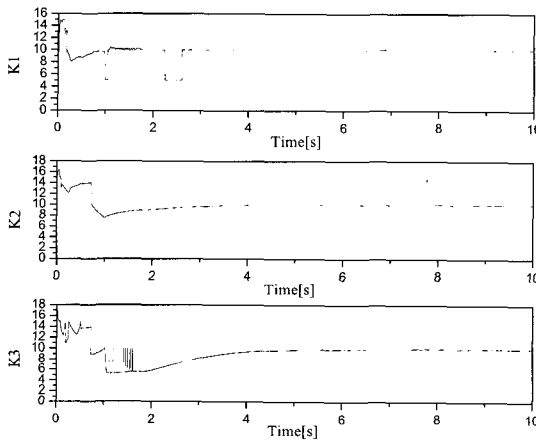


그림 14. 조건 2에 대한 자세 제어기의 게인 추이.
Fig. 14. Trend of the posture controller gains for case 2.

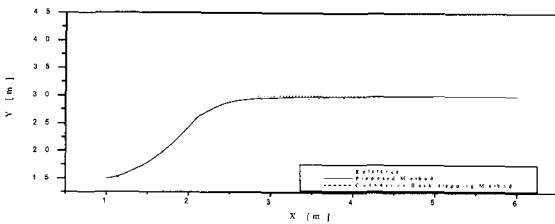


그림 15. 조건 3에 대한 이동로봇의 궤적.
Fig. 15. Mobile robot trajectory for case 3.

그림 11, 12, 13 그리고 14는 시뮬레이션 조건 2의 상황에서 수행한 결과를 나타낸다. 그림 11은 기준 궤적이 회전을 할 때의 전역 직교 좌표계로 표현한 이동로봇의 궤적을 나타내고, 그림 12는 궤적에러를 나타낸다. 그림 11과 12에서 기준궤적의 변화에도 기존의 back-stepping 방법은 시스템이 궤적을 추적하는 안정성을 보여주고 있지만, 본 논문에서 제안한 방법으로 게인 값을 변화시킴으로써 보다 빠른 수렴속도를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 그림 13은 이동로봇의 속도에러를 나타낸다. 또한 그림 14는 자세 제어기의 게인 변화 추이를 나타내었다

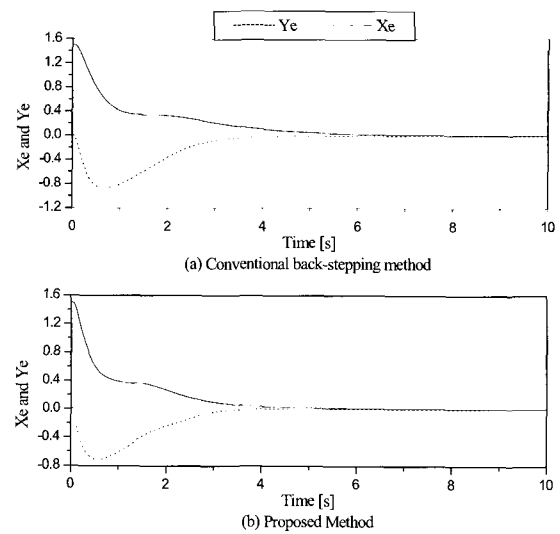


그림 16. 조건 3에 대한 이동로봇의 궤적에러.
Fig. 16. Trajectory errors of mobile robot for case 3.

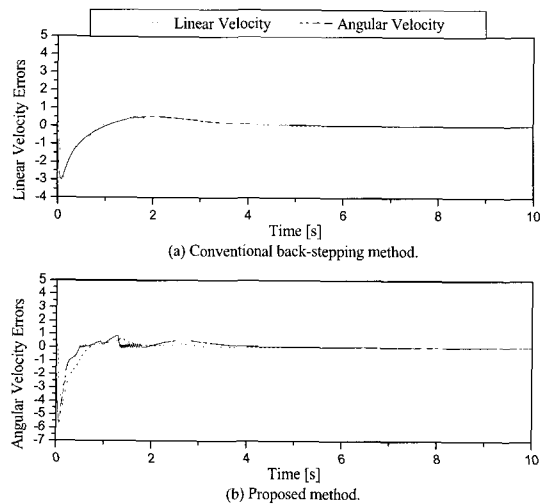


그림 17. 조건 3에 대한 이동로봇의 속도 에러.
Fig. 17. Velocity errors of mobile robot for case 3.

그림 15, 16 그리고 17은 조건 3의 상황에서 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타낸다. 그림 15, 16 그리고 17에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방법이 보다 우수한 성능을 보여 준다

V. 결론

본 논문에서는 기존의 back-stepping 제어기의 성능을 높이기 위해 퍼지 시스템을 이용하였다.

기존의 back-stepping 궤적 제어기는 크게 기구학적 자세 제어기와 속도 제어를 포함하고 있다. 기존 명령이 주어졌을 때, 속도 제어기는 자세 제어기에서 생성되는 속도명령에 영향을 받는다.

본 논문에서는 기존의 제어기에서 사용되는 기구학적 자세 제어기의 고정된 게인 값을 퍼지 시스템의 추론을 이용하여 실시간으로 변화를 시켰다. 시뮬레이션을 통하여 변화하

는 기준궤적이 주어졌을 때 자세 제어기의 게인 값을 실시간으로 적절하게 변화 시킴으로써 기존의 back-stepping 제어기보다 우수한 성능을 얻을 수 있었다

참고문헌

[1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot and Automation*, pp. 384-389, 1990.

[2] W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu and A. Behal, *Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots*, Springer, 2001.

[3] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 609-615, Oct. 2000.

[4] Q. Zhang, J. Shippen, B. 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.

[5] B. d'Andrea Novel, G. Bastin, and G. Campion, "Control of nonholonomic wheeled mobile robots by state

feedback linearization", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 14, no. 6, pp.543-559, 1995.

[6] B. d'Andrea Novel, G. Bastin, and G. Campion, "Modeling 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.

[7] Z. Ping, J. and H. Nijmeijer, "Tracking control of mobile robot : a case study in backstepping," *Automatica*, vol. 33, no. 7, pp. 1393-1399, 1997.

[8] 김도우, 양해원, and 유지섭, "관로 검사로봇 자세의 퍼지 PID제어", *대한전기학회 논문지*, vol. 49D, no. 8, pp. 473-480, Aug. 2000.

[9] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. On Neural Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 589-600, July, 1998.

[10] 김무진, 이영진, 박성준, and 이만형, "신경회로망을 이용한 이동로봇의 정밀제어," *제어·자동화·시스템 공학회 논문지*, vol. 6, no. 8, pp. 689-696, Aug. 2000.

[11] J. Yen and R. Langari, *Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information*, Prentice-Hall, 1999.

[12] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall, 1997.



박재휘

1964년 9월1일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 부산대 대학원 메카트로닉스과정 석사(1998), 동대학원 박사과정 수료(2002), 현재 전기안전기술교육원 교수부장. 관심분야는 메카트로닉스, 이동로봇, 전력전자.



이만형

1946년 10월18일생. 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1971), 미국 Oregon 주립대학교 전기컴퓨터공학과 박사(1983). 1975년 ~ 현재 부산대학교 기계공학부 교수, POSCO 석좌교수, 2002년 ~ 현재 부산대학교 공과대학장. 관심분야는 메카트로닉스, 확률제어, 랜덤 프로세서, 이동로봇 등.