

## 신경망을 이용한 이동로봇 궤적제어기 성능개선

### A Performance Improvement for Tracking Controller of a Mobile Robot Using Neural Networks

박재혜, 이만형, 이장명\*

(Jae-Hwae Park, Man-Hyung Lee, and JangMyung Lee)

**Abstract :** A new parameter adaptation scheme for RBF Neural Network (NN) has been developed in this paper. Even though the RBF Neural Network (NN) based controllers are robust against both un-modeled dynamics and external disturbances, the performance is not satisfactory for a fast and precise mobile robot. To improve the tracking performance as well as robustness, all the parameters of RBF NN are updated in real time. The stability of this control law is rigorously proved by following the Lyapunov stability theory and shown by the experimental simulations. The fact that all of the weighting factors, width and center of RBF NN have been updated implies that this scheme utilizes all the possibilities in RBF NN to make the controller robust and precise while the mobile robot is following un-known trajectories. The performance of this new algorithm has been compared to the conventional RBF NN controller where some of the parameters are adjusted for robustness.

**Keywords :** RBF neural network, lyapunov stability, mobile robot.

#### 1. 서론

인간의 간섭 없이 지능적으로 이동할 수 있는 이동로봇은 적용 범위가 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. 그러나 정확하게 알 수 없는 동역학을 가지며 불확실성 및 비 모델화된 외란에 영향을 받는 이동로봇을 어떻게 효과적으로 제어하는가 하는 것은 많은 전문가들로부터 관심을 끄는 공개된 문제들이다. 많은 제어방법들이 이동로봇의 이동제어를 위해 제안되어 왔다[1-14]. 계산토크제어법은 이동로봇의 미세제어를 달성할 수 있지만, 미지의 외란, 마찰, 부하의 갑작스런 변화, 구조적인 결함 등 실제로 거의 알아내기가 불가능한 정확한 동역학 모델을 알아야 한다는 것이다. 적응제어기는 부분적으로 알려지지 않은 이동로봇 동역학으로 미세제어를 성취할 수 있지만 이들 알려지지 않은 동역학의 복잡한 온라인 추정을 필요로 한다. 모델 기반 접근법이 실패한 어떤 영역에 상당히 성공적인 뉴럴 기반 제어기들이 많이 있다 [6][10]. Fierro 및 Lewis[6]는 Backstepping 추종기법과 토크제어기를 결합함으로써 뉴럴기반 모델을 개발하였는데 이때 on-line 학습에 의해 이동로봇의 동역학(dynamic)을 학습할 수 있는 다층 feedforward 뉴럴네트워크를 이용하였다. Yang과 Meng[9]은 로봇 매니플레이터를 위해 단층 뉴럴기반제어기를 제안하였다. 이 접근법은 어떤 nonholonomic 기구학을 포함하지 않았으므로 기구학적 제약을 가진 로봇에 대해서는

사용될 수 없다. 게다가 안정성은 어떠한 모델링 되지 않은 외란이 없다는 가정하에서 증명되었다. Kanayama et al.은 이동로봇의 기구학만을 고려하여 자세(posture)제어기를 제안하였다[1]. 그리고 Fukao et al[2]은 이동로봇의 동역학을 고려하여 시스템의 안정도를 증명하였다. 또한, Zhong et al.[5]은 이동로봇의 동역학과 신경회로망 등을 이용하여 강인한 제어기를 구성하였다.

이동로봇의 기구학과 동역학을 동시에 고려하여 구성된 제어기의 대부분은 Backstepping 제어기를 기반으로 하여 이동로봇의 nonholonomic 구속 조건을 만족하면서 주어진 기준 궤적을 추종하는 제어기 중심으로 연구가 많이 진행되고 있다[3][5][6].

Backstepping 제어기를 구현하기 위해서는 기준 명령이 주어지면 기구학적인 자세 제어기에서 이동로봇의 속도명령 생성을 하게 되고, 실시간으로 이동로봇의 역 동역학식을 이용하여 이동로봇의 제어입력을 구하게 되는데 2개의 바퀴에 의해서 구동이 되는 이동로봇의 동역학 방정식과 정확한 파라미터들을 필요로 한다. 위와 같이 이동로봇의 동역학식과 파라미터들을 정확하게 구할 수가 없기 때문에 Qiuju et al.[3], Zhong et al.[5], Fierro et al.[6]은 신경망을 이용하여 실시간 또는 off-line으로 이동로봇의 동역학식을 근사적으로 추정함으로써 문제점을 해결하고자 하였다.

본 논문에서는 기존 Backstepping 제어기를 사용한 신경망 시스템에 RBF신경망을 이용한 새로운 제어기를 제안하였다. 제어기의 안정성을 엄격하게 증명하였고 기존 신경망제어기와 성능을 비교하였다. 이를 위해, 2장에서는 이동로봇의 동역학을 간단히 소개하였고 3장에서는 RBF신경망을 사용한 새로운 제어기를 설계 및 안정도를 검증하였으며, 4장에서는 제안된 제어기의 성능비교를 위해 Fierro 및 Lewis[6]의 실험 조건을 가지고 시뮬레이션을 수행하여 제안된 제어기의 성능이 우수함을 보였다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 9. 25., 채택확정 : 2004. 10. 13.

박재혜 : 한국전기안전공사(pawh@hitel.net)

이만형 : 부산대학교 기계공학과(mahlee@pusan.ac.kr)

이장명 : 부산대학교 전자공학과(jmlee@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 과학기술부 지방연구중심대학 육성사업에 의한 연구결과입니다.

II. 본론

본 논문에서 사용한 이동로봇 시스템의 동역학 방정식과 기구학 방정식 그리고 이동로봇의 nonholonomic 구속조건을 간단하게 살펴보면 다음과 같다.

1. 이동로봇의 동역학

2개의 바퀴를 이용하여 구동하는 n차원 이동로봇의 동역학은 라그랑지 방정식(Lagrange formulation)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[3][8][11].

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

여기서,

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

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

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}, \quad A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ -d \end{bmatrix}, \quad \lambda = -m(\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta)\dot{\theta}$$

으로 정의되며,  $M(q) \in R^{n \times n}$  은 대칭이고 양의 한정인 관성모멘트 행렬이고,  $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$  는 centripetal/Coriolis 행렬이다.  $F(\dot{q}) \in R^n$  는 표면 마찰력을 나타내며,  $G(q) \in R^n$  은 중력성분을 나타낸다.  $\tau_d$  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 1은 전형적인 nonholonomic 이동로봇의 시스템을 나타낸다. 이동로봇은 같은 축상으로 연결되어 있는 2개의 구동바퀴로 구성되어있으며, 독립적인 구동기에 의해서 이동과 방향을 제어한다. 그리고 이동로봇의 위치는 전역 좌표계  $\{O, X, Y\}$ 를 기준으로 이동로봇의 중심점의 좌표  $\{P, X_c, Y_c\}$ 로 나타낼 수 있다.

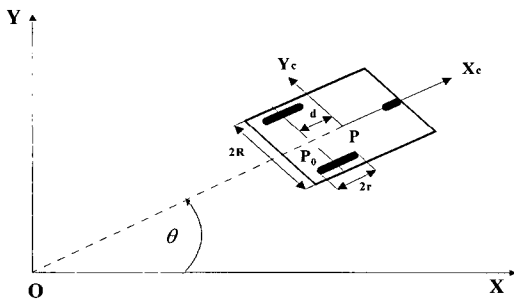


그림 1. Nonholonomic 이동로봇 시스템.  
Fig. 1. A nonholonomic mobile platform.

또한 이동로봇은 기구학적으로 nonholonomic 구속조건을 가지고 있기 때문에 궤적 제어기를 구성할 때 선형화한 상태제어환제어기로는 안정성을 보장 받을 수 없다. 이동로봇이 기구학적 구속 조건은 이동로봇은 구동바퀴의 축을 기준으로 직각으로 순수한 rolling 운동을하면서 이동을 하고 미끄러지지 않는다는 것이다. 이와 같은 구속조건을 수식적으로 표현하면 다음과 같다[1][6][8].

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

이동로봇의 운동은 선속도  $v$ 와 회전 각속도  $\omega$ 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  $S$ 에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있고, 이를 steering 시스템 또는 자세 제어기라고 한다[1].

$$\dot{q} = S(q)v(t) \quad (3)$$

여기서,

$$\dot{q} = [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{\theta}]^T$$

$$S = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \end{bmatrix}, \quad v = [v \ w]^T$$

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

3. 이동로봇의 nonholonomic 구조적 특성

이동로봇은 논홀로노믹 시스템이므로 다음 (4), (5)와 같이 기구학적 제약을 가진다.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (4)$$

$$A(q)S(q) = 0 \quad (5)$$

제약을 받는 속도는 항상  $A(q)$ 의 Null공간에 있기 때문에 (4)와 (5)으로부터 속도  $v(t)$ 를 찾을 수 있다.

$$\dot{q} = S(q)v(t) \quad (6)$$

이동로봇의 궤적은 수평면에서 제약이 있고 마찰이 없다고 가정하면, (1)은 제어 목적을 위해 보다 적절한 수식으로 변환된다. (1)에  $S^T$ 를 좌측에 곱하고 (6)를 미분해서 (1)대입하면 nonholonomic 이동로봇의 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$S^T M S \dot{v} + S^T (M \dot{S} + C S)v + S^T \tau_d = S^T B \tau \quad (7)$$

$\bar{M} = S^T M S$ ,  $\bar{C} = S^T (M\dot{S} + CS)$ ,  $\bar{\tau}_d = S^T \tau_d$ ,  $\bar{\tau} = S^T B \tau$  라고 정의하며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{M}(q)\dot{v} + \bar{C}(q, \dot{q})v + \bar{F}(v) + \bar{\tau}_d = \bar{B}\tau = \bar{\tau} \quad (8)$$

(8)은 다음과 같은 특성을 가진다.

특성 1:  $\bar{M}(q)$ 는 대칭양안정행렬이다.

특성 2:  $\bar{M}(q)$ ,  $\|\bar{C}(q, \dot{q})\|$  및  $\tau_d$ 는 bounded 되었다

특성 3: 행렬  $\bar{M} - 2\bar{C}$ 는 스쿼-대칭이다.

### III. 신경망 제어기 설계

#### 1. RBF 신경망

RBF 신경망은 일반 역진과 학습규칙을 사용하는 다층퍼셉트론에 비해 수렴속도가 빠르고 구조가 단순하다. 은닉층의 노드수는 사용자에게 의해 결정되며, 같은 형태의 radial basis function 으로 구성되어 있고, Gaussian 함수, triangular 함수, trapezoidal 함수 등이 사용되어 있다. 그림 2는 Gaussian 함수를 사용한 일반적인 RBF 신경망을 나타낸 그림이다.

입력벡터  $x$ 에 신경망 출력벡터  $y$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$y = W^T \sigma(V^T x + b) + \varepsilon \quad (9)$$

여기서,  $\varepsilon$ 은 근사특성에러를  $b$ 는 임계치를 나타낸다. 활성화함수는 다음과 같다.

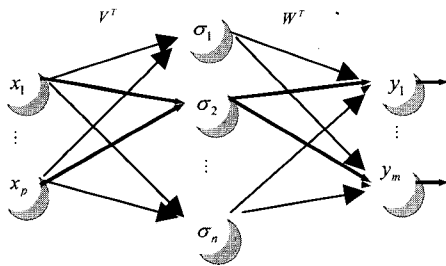


그림 2. RBF 신경망 선도.

Fig. 2. RBF neural network diagram.

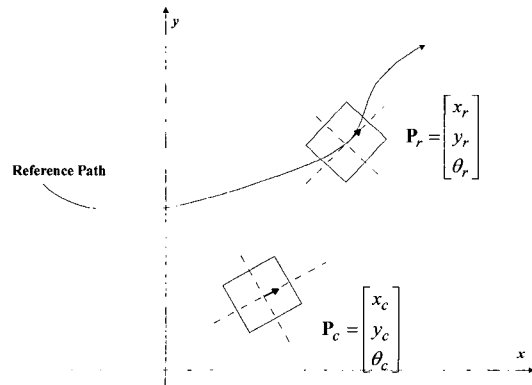


그림 3. 이동로봇의 기준 위치와 현재 위치.

Fig. 3. Reference and current position of a mobile robot.

$$\sigma(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c\|^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

여기서  $c$ 는 활성화함수의 중심이고,  $\delta$ 는 중심폭이다.

#### 2. 속도제어기

속도명령  $q_c(t)$ 를 구하기 위해서, 그림 3과 같이 기준 로봇 속도  $q_c(t)$ 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.

$$P_e = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (P_r - P) \quad (11)$$

그리고 이동로봇의 자세 오차  $P_e$ 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos\theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin\theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

이동로봇의 궤적을 제어 하기 위한 목적은 기준 위치  $P_r$ 와 현재 이동로봇의 위치  $P$ 를 일치시켜 위치 오차  $P_e$ 를 0으로 만드는 것이다. 이와 같은 제어목적을 위해서 Kanayama는 다음과 같은 기구학적 속도 제어기를 제안하였다.

$$v_c = \begin{bmatrix} v_r \cos\theta_e + K_1 x_e \\ \omega_r + K_2 v_r y_e + K_3 v_r \sin\theta_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$V_1(t) = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + \frac{(1 - \cos\theta_e^2)}{K_2} \quad (14)$$

(14)를 미분하여,

$$\dot{V}_1(t) = x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{\sin\theta_e}{K_2} \dot{\theta}_e \leq 0 \quad (15)$$

의 안정조건을 구하였다.

(12)를 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_1(t) = -K_1 x_e^2 - \frac{K_3}{K_2} v_r \sin^2\theta_e \leq 0 \quad (16)$$

여기서, Kanayama[1]의 논문에서 제어이득  $K_1, K_2, K_3$ 가 모두 0 이상이면 시스템은 안정된다.

#### 3. RBF신경망을 이용한 제안된 제어기

속도에러  $e_c$ 를 이용하여 필터 된 추종에러  $r$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$r = e_c + \Lambda \int e_c dt \quad (17)$$

$$\dot{r} = \dot{e}_c + \Lambda e_c \quad (18)$$

단,  $\Lambda$ 는 설계된 대각 양정치행렬이며,  $e_c = v_c - v$ 이다.

(17), (18)를 변형하면 다음과 같다.

$$\dot{v} = v_c + \Lambda \int e_c dt - r \tag{19}$$

$$\dot{v} = \dot{v}_c + \Lambda e_c - \dot{r} \tag{20}$$

(17), (18)을 (7)에 대입하면

$$\bar{M}r = -\bar{C}r + f(x) + \bar{\tau}_d - \bar{\tau} \tag{21}$$

단,  $f(x) = \bar{M}(\dot{v}_c + \Lambda e_c) + \bar{C}(v_c + \Lambda \int e_c dt) + \bar{F}$ ,  
 $x = [e_c^T \int e_c^T dt \ v_c^T \ \dot{v}_c^T \ v^T]^T$  이다.

신경망(NN)의 “universal approximation property”에 따라 2층 신경망은 다음과 같다.

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon, \quad \|\varepsilon\| < \varepsilon_N \tag{22}$$

단,  $\varepsilon$  은 근사특성 에러로 유한값이며,  $W, V$ 는 시스템의 이상적인 목표 가중치(weighting)이다.  $f(x)$  의 신경망 근사는 다음과 같이 된다.

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) \tag{23}$$

$\hat{W}, \hat{V}$  는 신경망 가중치의 추정값이고 가중치 추정에러는  $\tilde{V} = V - \hat{V}$ ,  $\tilde{W} = W - \hat{W}$  이다.

RBF 신경망의 중심값  $c$  및 중심폭  $\delta$  의 추정값은  $\hat{c}, \hat{\delta}$  이고 추정에러는  $\tilde{c} = c - \hat{c}$ ,  $\tilde{\delta} = \delta - \hat{\delta}$  이다.

또한, 제어입력은 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{\tau} = \hat{f} + K_4 r \tag{24}$$

여기서,  $K_4$  는 설계된 양의 대각행렬이다.

(21)에 (24)를 대입하면,

$$\bar{M}r = -(\bar{C} + K_4)r + W^T \sigma(V^T x) - \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + \bar{\tau}_d + \varepsilon \tag{25}$$

또한,  $\hat{\sigma} = \sigma(\hat{V}^T x)$  라고 정의하면,

$$\bar{M}r = -(\bar{C} + K_4)r + W^T \hat{\sigma} + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + (\bar{\tau}_d + \varepsilon) \tag{26}$$

와 같고  $\sigma(V^T x)$  를 테일러 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$\sigma(V^T x) = \sigma(\hat{V}^T x) + \sigma'(\hat{V}^T x)(\tilde{V}^T x) + O(\hat{V}^T x)^2 (\tilde{V}^T x)^2 / 2 \tag{27}$$

단,  $\sigma'(z) = \frac{\partial \sigma(z)}{\partial z} \Big|_{z=z}$ ,  $\hat{\sigma}' = \text{diag}\left\{\frac{\|z-c\|}{\delta^2}\right\} \text{diag}\{\hat{\sigma}(z)\}$  이다.

(27)의 오른쪽 마지막 항은 2차식까지만 표기하였으며 고차항은 무시하였다. 그러므로 2차식 이상의 고차항을  $O(\hat{V}^T x)^2$  로 표기하면  $\tilde{\sigma}$  는 다음과 같이 된다.

$$\tilde{\sigma} = \sigma'(\hat{V}^T x)\tilde{V}^T x + O(\hat{V}^T x)^2 \tag{28}$$

(28)을 (26)에 대입하면,

$$\bar{M}r = -(\bar{C} + K_4)r + (\hat{W}^T + \tilde{W}^T)\sigma'(\hat{V}^T x)\tilde{V}^T x + \tilde{W}^T \hat{\sigma} + \varphi \tag{29}$$

단,  $\varphi = \tilde{W}^T \hat{\sigma} \tilde{V}^T x + \bar{W}^T O(\hat{V}^T x)^2 + (\bar{\tau}_d + \varepsilon)$  이다.

정리 1 : 신경망에 대한 (24) 제어법칙을 선택하고 다음의 가중치 갱신법칙을 적용하면 (29)의 페루프시스템은 점근적으로 안정된 시스템이 된다.

$$\dot{\hat{W}} = k_1 \Gamma_1 \hat{\sigma} r^T \tag{30}$$

$$\dot{\hat{V}} = k_2 \Gamma_2 x r^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' \tag{31}$$

$$\dot{\hat{c}} = -\alpha \Psi_1 \|r\| \hat{c} \tag{32}$$

$$\dot{\hat{\delta}} = -\alpha \Psi_2 \|r\| \hat{\delta} \tag{33}$$

$k_1, k_2, \alpha$  는 설계된 양의 상수이고,  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Psi_1, \Psi_2$  는 설계된 양의 대각행렬이다.

증명 : Lyapunov 함수후보를 다음과 같이 정한다.

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t)$$

여기서,

$$V_1(t) = \frac{1}{2} r^T \bar{M} r + \frac{1}{2k_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \tilde{W}) + \frac{1}{2k_2} \text{tr}(\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \tilde{V}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \tilde{c}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \tilde{\delta})$$

이다, 상기 식을 미분하면,

$$\dot{V}_1(t) = -K_1 x_c^2 - \frac{K_3}{K_2} v_c \sin^2 \theta_c \leq 0 \tag{34}$$

$$\dot{V}_2(t) = \frac{1}{2} r^T \bar{M} \dot{r} + \frac{1}{2k_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{2k_2} \text{tr}(\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \dot{\tilde{c}}) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \dot{\tilde{\delta}}) \tag{35}$$

(29)를 (35)에 대입하면,

$$\dot{V}_2(t) = \frac{1}{2} r^T (\bar{M} - 2\bar{C})r - r^T K_4 r + r^T \tilde{W}^T \hat{\sigma} + r^T \tilde{W} \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + r^T (\varphi + \Phi) + \frac{1}{k_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}}) + \frac{1}{k_2} \text{tr}(\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}}) + \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \dot{\tilde{c}}) + \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \dot{\tilde{\delta}}) \tag{36}$$

$(\bar{M} - 2\bar{C})$  는 skew symmetric 이므로 0이다. 따라서,

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= -r^T K_4 r + r^T \tilde{W}^T \hat{\sigma} + r^T (\tilde{W} + \hat{W}) \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + r^T (\varphi + \Phi) + \frac{1}{k_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}}) + \\ &\quad \frac{1}{k_2} \text{tr}(\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}}) + \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \dot{\tilde{c}}) + \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \dot{\tilde{\delta}}) \\ &= -r^T K_4 r + r^T \tilde{W}^T \hat{\sigma} + r^T \tilde{W} \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + r^T \hat{W} \hat{\sigma}' \tilde{V}^T x + r^T (\varphi + \Phi) + \frac{1}{k_1} \text{tr}(\tilde{W}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}}) \\ &\quad + \frac{1}{k_2} \text{tr}(\tilde{V}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}}) + \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \dot{\tilde{c}}) + \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \dot{\tilde{\delta}}) \\ &= -r^T K_4 r + \text{tr}(\tilde{W}^T \left\{ \frac{1}{k_1} \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{W}} + \hat{\sigma} r^T \right\}) + \text{tr}(\tilde{V}^T \left\{ \frac{1}{k_2} \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{V}} + x r^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' \right\}) + r^T (\varphi + \Phi) \\ &\quad + \text{tr}(\tilde{c}^T \Psi_1^{-1} \dot{\tilde{c}}) + \text{tr}(\tilde{\delta}^T \Psi_2^{-1} \dot{\tilde{\delta}}) \end{aligned} \tag{37}$$

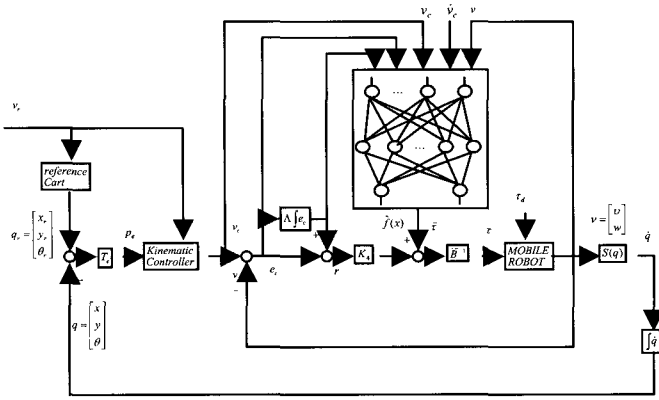


그림 4. 제안된 제어기 선도.  
Fig. 4. Proposed controller block diagram.

와 같이 정리되고 또한,  $\dot{\tilde{w}}^T = -\dot{\tilde{w}}^T, \dot{\tilde{v}} = -\dot{\tilde{v}}, \dot{\tilde{c}} = -\dot{\tilde{c}}, \dot{\tilde{\delta}} = -\dot{\tilde{\delta}}$ 이므로 (30)-(33)을 (37)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= -r^T K_4 r + r^T \varphi + \alpha \|r\| \{tr(\tilde{c}^T \tilde{c}) + tr(\tilde{\delta} \tilde{\delta})\} \\ &= -r^T K_4 r + r^T \varphi + \alpha \|r\| \{tr(\tilde{\Delta}(\tilde{\Delta} - \tilde{\Delta}))\} \end{aligned} \quad (38)$$

단,  $\tilde{\Delta} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & \delta \end{bmatrix}$ ,  $\|\tilde{\Delta}\|_F \leq \Delta_B, \|\varphi\|_F \leq \varphi_B, \|\cdot\|_F$  는 Frobenius norm,

여기서,  $tr(\tilde{\Delta}(\tilde{\Delta} - \tilde{\Delta})) = \langle \tilde{\Delta}, \tilde{\Delta} \rangle_F - \|\tilde{\Delta}\|_F^2 \leq \|\tilde{\Delta}\|_F \|\Delta_B\|_F - \|\tilde{\Delta}\|_F^2$  이므로

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &\leq -K_{4min} \|r\|^2 + \alpha \|r\| \|\tilde{\Delta}\|_F (\Delta_B - \|\tilde{\Delta}\|_F) + \|r\| \|\varphi\| \\ &\leq -\|r\| \left[ K_{4min} \|r\| - \alpha \|\tilde{\Delta}\|_F (\Delta_B - \|\tilde{\Delta}\|_F) - \varphi_B \right] \\ &\leq -\|r\| \left[ K_{4min} \|r\| + \alpha \left( \|\tilde{\Delta}\|_F - \frac{\Delta_B}{2} \right)^2 - \frac{\alpha \Delta_B^2}{4} - \varphi_B \right] \end{aligned} \quad (39)$$

$K_{4min}$  는 행렬  $K_4$  의 가장 작은 고유값을 나타낸다. 여기서,

$\|r\| > \frac{\alpha \Delta_B^2 / 4 + \varphi_B}{K_{4min}}$  및  $\|\tilde{\Delta}\|_F > \frac{\Delta_B}{2} + \sqrt{\frac{\Delta_B^2}{4} + \frac{\varphi_B}{\alpha}}$  를 만족하게 파라미터 값들을 정해주면,  $\dot{V}_2(t) \leq 0$  이 되고 전체 시스템은  $\dot{V}(t) \leq 0$  이므로  $\|r\|$  과  $\|\tilde{\Delta}\|_F$  는 UUB(uniformly ultimately bounded)가 되고 Lyapunov 안정성이론에 의해 시스템은 전역적으로 안정하게 된다. 또한  $K_{4min}$  을 크게 하면 할수록 더 작은 영역으로 bounded됨을 알 수 있다. ■

IV. 이동로봇의 시뮬레이션 및 결과.

본 논문에서는 이동로봇을 사용하여 제안된 제어기의 외부 및 내부외란에 대한 강인성을 증명하고자 한다. 시뮬레이션에서는 단위원 형태의 이동로봇을 사용하였다. uni-circle 형태의 이동로봇은 로봇 축구에 사용하는 이동로봇과 같은 형태로 그림 1에서 이동로봇의 구동축과 중심점사이의 거리  $a=0$ 이다.

시뮬레이션에 사용한 이동로봇의 동역학 방정식의 파라미터는  $m=10[kg], I=5[kg-m^2], R=0.5[m], r=0.05[m]$

$r=0.05[m], \Gamma_1 = \Gamma_2 = 10I_{10 \times 10}, \Psi_1 = \Psi_2 = 0.1I_{10 \times 10}, k_1 = k_2 = 0.5, \Lambda = I_{2 \times 2}, \alpha = 0.05, K_1 = 1, K_2 = 5, K_3 = 4, K_4 = 40$  이다.

본 논문에 제안하는 방법이 우수함을 증명하기 위해서 다음의 2가지 서로 다른 조건에 대하여 외란이 존재하는 경우 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 실험에서  $3 \leq t \leq 5 \text{ sec}$  사이에  $5 * \text{sgn}(q) * 2 * \text{md}$ 의 외란을 첨가하였다. 제안된 방법을 기존의 RBF 신경망제어기와 비교하였다.

실험 1 : 기준속도가  $x = 1, y = 2$ , 각도  $26.56^\circ$ 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  $x = 2[m], y = 1[m]$ , 그리고 각도  $10^\circ$ 의 초기위치에 있다고 가정.

실험 2 : 실험1에서 기준속도의 각속도가  $\omega_r = \pi / 4 [rad/s]$ 로 회전을 하는 궤적.

그림 5, 6 및 7, 8은 외란이 존재하는 경우의 직선궤적 및 회전궤적에 대한 추종성능을 나타낸 그림이다. 선형적인 구간에서는 기존 RBF신경망제어기와 제안한 제어기의 추종에러 차이가 별로 없다. 그러나 외란이 존재하는 회전구간에서는 일부 파라미터만 조정되는 기존 RBF신경망제어기는 곡선 주행 등 빠르게 회전할 때 정밀한 궤적추종이 모든 파라미터를 사용한 제안한 제어기보다 추종에러가 증가함을 알 수 있

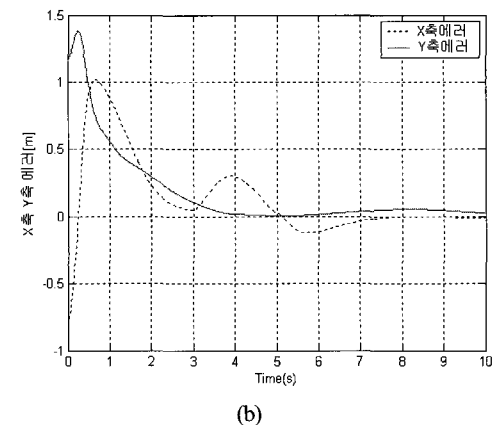
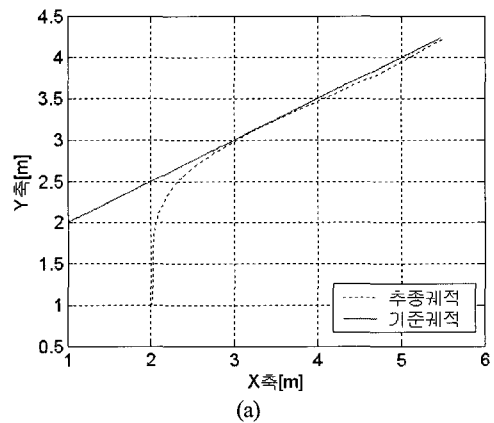
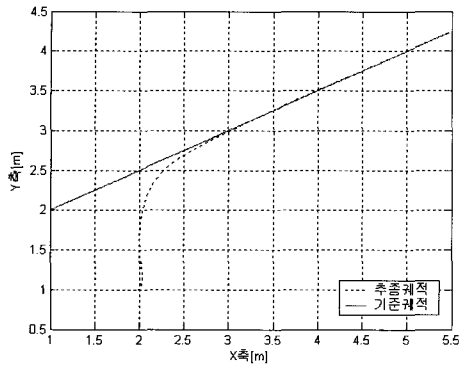
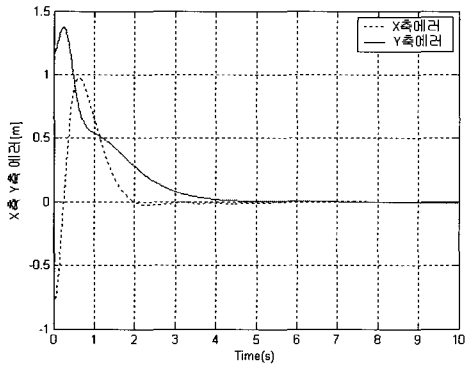


그림 5. 기존제어기[실험 1] (a) 궤적 (b) 위치에러.  
Fig. 5. Conventional controller: (a) trajectory (b) position error.



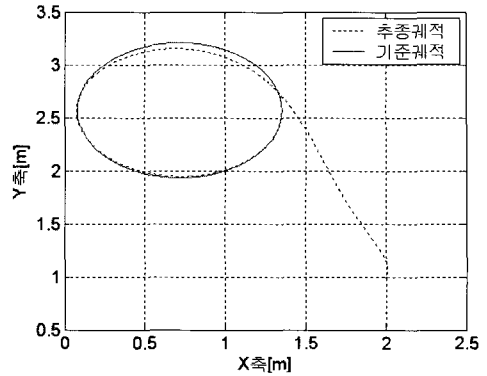
(a)



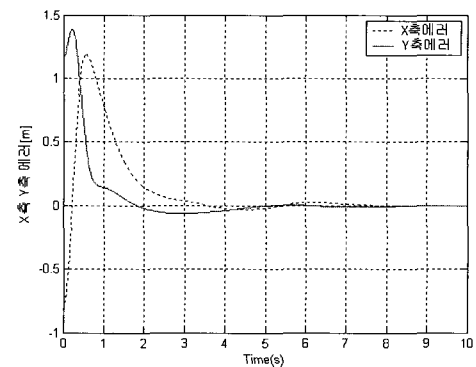
(b)

그림 6. 제안한 제어기(실험1)(a) 궤적 (b) 위치에러.

Fig. 6. Proposed controller. (a) trajectory (b) position error.



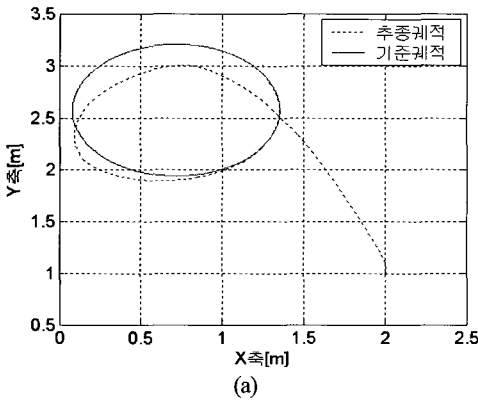
(a)



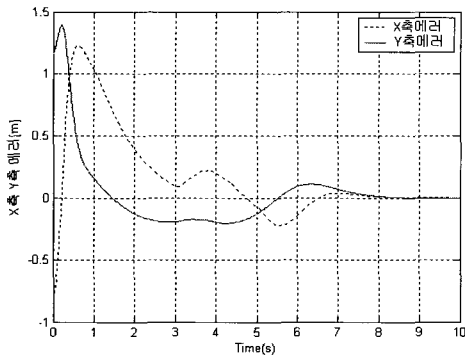
(b)

그림 8. 제안한 제어기(실험2)(a) 궤적 (b) 위치에러.

Fig. 8. Proposed controller. (a) trajectory (b) position error.



(a)



(b)

그림 7. 기존제어기(실험2)(a) 궤적 (b) 위치에러.

Fig. 7. Conventional controller. (a) trajectory (b) position error.

다. 즉, 제안한 제어기가 빠르고 정밀한 이동로봇에 대해서는 강인하고 추종성능이 우수함을 보여준다.

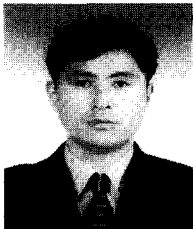
**V. 결론**

본 논문에서는 RBF 신경망 제어기가 가지고 있는 모든 가중치, 중심 폭 및 중심 값을 실시간에 updating 하여 이동로봇이 미지의 동역학인 외란에 강인한 제어특성을 가질 수 있도록 하였다. 기존의 RBF신경망을 이용한 제어 시스템에서는 일부 파라미터의 조정에 의하여 외란에 강인한 특성을 얻고자 하였으나 이동로봇이 곡선 궤적을 빠르게 주행할 때 정밀한 동작을 할 수 없음을 시뮬레이션으로 확인하였으며, 본 연구에서는 모든 파라미터를 사용하여 이를 개선하였다. 조정하는 파라미터의 증가에 의하여 제어법칙이 복잡해질 수도 있으나 프로세서의 성능이 급속히 발전하는 관계로 이러한 계산 량의 산술적인 증가는 이동로봇 제어사이클을 변화시키지 않고 실시간에 구현이 가능함을 확인하였다. 제안한 제어기의 안정성을 Lyapunov 안정성이론을 사용하여 엄밀히 증명하였으며, 기존의 RBF 제어기를 사용하는 경우와 비교하여 외란이 존재할 경우 제안한 제어기의 추종특성이 우수함을 보였다.

향후, 외란의 종류에 따라 어떤 파라미터의 조정이 지배적인 영향을 미치는 지를 파악하여 파라미터 조정의 비중이나 우선순위를 결정하는 기법을 연구할 것이다.

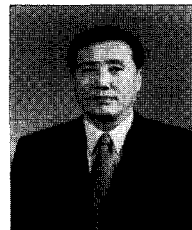
**참고문헌**

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Z. Ping, Jiang and H. Nijmeijer, "Tracking control of mobile robot : a case study in backstepping," *Automatica*, vol. 33, no. 7, pp. 1393-1399, 1997.
- [6] 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.
- [7] W. S. Lu and Q. H. Meng "Regressor formulation of robot dynamics: computation and application", *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 9 (3), pp. 323-333. 1993.
- [8] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot: Backstepping kinematics into dynamics," in *Proc. IEEE Conf. Decision Contr., New Orleans, LA*, pp. 3805-3810. 1995.
- [9] S. X. Yang and M. Meng "Real-time fine motion control of robot manipulators with unknown dynamics", *Dynamics in Continuous, Discrete and Impulse Systems, Series B*. In press. 2001.
- [10] L. Boquete, R. Garcia, R. Barea and M. Mazo "Neural control of the movements of a wheelchair", *J. Intelligent and Robotic Systems*, 25: 213-226. 1999.
- [11] E. Zalama, P. Gaudiano and J. L'opez Coronado "A real-time, unsupervised neural network for the low-level control of a mobile robot in a nonstationary environment", *Neural Networks*, 8, 103-123. 1995.
- [12] Y. Yamamoto and X. Yun "Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator", in *Recent Trends in Mobile Robots, Edited by Y. F. Zheng. Singapore: World Scientific*, pp. 157-181. 1993.
- [13] D.-H. Kim and J.-H. Oh, "Tracking control of a two-wheeled mobile robot using input-output linearization", *Control Engineering Practice*, 7, pp. 369-373. 1999.
- [14] T. S. Liu and W. S. Lee "A repetitive learning method based on sliding mode for robot control", *Trans. ASME*, 122 (3), pp. 40-48. 2000.



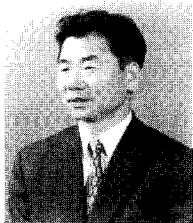
**박재휘**

1964년 9월 1일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 부산대 대학원 메카트로닉스과정 석사(1998), 동대학원 박사과정 수료(2002), 현재 전기안전기술교육원 교수부장. 관심분야는 메카트로닉스, 이동로봇, 전력전자 등.



**이만형**

1946년 10월 18일생. 1969년 부산대 전기공학과 졸업. 동 대학원 석사(1971), 미국 Oregon 주립대학교 전기컴퓨터공학박사(1983). 1975년~현재 부산대학교 기계공학부 교수, 2002년~2004년 부산대학교 공과대학장. 관심분야는 메카트로닉스, 확률제어, 랜덤 프로세서, 이동로봇 등.



**이장명**

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업 동대학원 졸업(1982), USC(남가주대학교) 공학박사(1990), 2004년 현재 부산대학교 정교수, 주 관심분야는 다 관절 로봇 시스템의 설계 및 제어, 마이크로 프로세서 응용, 시스템 설계, 모터 구동방식

및 제어 등.