

동특성을 고려한 이동로봇의 궤적제어

고경석*, 이민중*, 최영규**

*부산대학교 전기공학과, **부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부

Path Tracking Control for Mobile Robot Considering Its Dynamics

Kyung-Suk Ko*, Min-Jung Lee*, Young-Kiu Choi**

*Dept. of Electrical Eng. Pusan National Univ.**School of Electrical & Computer Eng. PNU.

Abstract - In trajectory tracking methods, the error values of current position and velocity are compensated to follow the given reference path and velocity. The path tracking for a wheeled mobile robot is treated in this paper. It is very difficult to implement stable trajectory tracking algorithms because mobile robots have kinematically non-holonomic constraints. For solving this problem, a velocity controller is presented in this paper. This velocity controller is designed by a PID controller which could be easily employed. In this case, velocity errors caused by system uncertainties or internal and external disturbances could exist. A neural network is used for compensating the velocity errors. Input variables of this neural network compensator are defined by differences between the velocities of the posture controller and the real velocities of the mobile robot. Simulation results show the effectiveness of the proposed controller.

1. 서 론

이동로봇은 일정한 장소에서 고정되어 작업하지 않고 필요에 따라 이동해 가면서 자신에게 주어진 작업을 수행하는 시스템이다. 이런 이동로봇은 산업, 국방 등 다양한 분야에서 인간을 대신하기 위한 여러 형태의 연구가 있으며, 특히 위험지역의 탐사에 검사장비등을 이송하며 인간의 역할을 대신하는 바퀴구동로봇에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 그런데 이러한 바퀴구동로봇 주행에는 로봇의 위치, 속도의 불확실성 및 주행시 외란에 대한 강인성의 문제가 고려되어야하고 또한, 원하는 경로대로 제어하기 위한 위치 및 속도 추종제어가 필요하다.

제적 추종제어는 기준경로와 기준속도가 주어졌을 때 그것을 정확히 따라가도록 현재의 속도 및 위치오차를 보상해 주는 제어를 말한다. 그러나 이동로봇은 기구학적 nonholonomic 구속조건 때문에 state feedback을 통해서 안정화 할 수 없으므로 제어기의 설계가 어렵다 [1]. 이에 대한 제어 방법은 기구학과 동역학 2가지를 바탕으로 나누어 질 수 있다. 기구학적인 제어 방법은 정확한 속도 추정(perfect velocity tracking)이 이루어진다고 가정하기에 실제 플랜트에 적용시 외란이나, 마찰 등에 의해 추종성능이 떨어진다는 단점이 있다[2]. 동역학적인 방법은 동적모델의 계산의 어려움과 파라미터의 부정확성으로 인한 토크제어 구현의 문제 그리고 제시된 연구가 적다는 단점이 있다[3].

본 논문에서는 안정성이 보장된 기구학적 제어기와 더불어 신경회로망으로 보상된 PID 제어기에 의한 속도 제어기를 동시에 고려하는 제어구조를 제안한다. 자세 제어기는 속도 명령을 속도 제어기에 보냄으로써 로봇을 원하는 자세로 이동하게 하고 신경회로망으로 보상된 속도 제어기는 그 명령 속도를 따라가게 한다.

2. 이동 로봇의 모델링

2.1 기구학 방정식

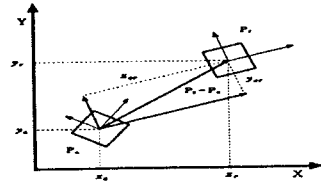


그림 1. 이동 로봇의 자세오차

그림 1은 직교 좌표에서 정의된 2차원 평면에 놓여진 로봇이다. 절대 좌표계 X-Y와 로봇의 중심점 C에 붙어 있는 움직이는 좌표계 x-y가 있으며, 이 두 좌표계의 관계는 $p=(x_c \ y_c \ \theta_c)^T$ 인 3자유도를 가진 벡터로 나타낸다. 방향각 θ_c 는 X축에서 로봇의 상대좌표 x축으로 반시계 방향으로 취해진 값이다. $p_r=(x_r \ y_r \ \theta_r)^T$ 은 기준자세(reference posture)로 우리가 원하는 자세이고, $p_c=(x_c \ y_c \ \theta_c)^T$ 는 현재자세(current posture)로 로봇의 현 위치다.

로봇의 이동은 시간함수인 선속도 v 와 각속도 ω 로 제어되고 이때 p 의 속도와 $q=(v \ \omega)^T$ 의 관계는 자코비안 행렬 J 에 의해 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \dot{p} = Jq = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

p_c 와 p_r 사이의 오차를 나타내는 로봇 기준 자세오차(robot based error posture) p_{ec} 는 다음과 같다.

$$p_{ec} = \begin{bmatrix} x_{ec} \\ y_{ec} \\ \theta_{ec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (p_r - p_c) \quad (2.2)$$

이들의 미분값, 즉 자세오차의 속도성분은 식(2.3)이다.

$$\dot{p}_{ec} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{ec} \\ \dot{y}_{ec} \\ \dot{\theta}_{ec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ec}\omega_c - v_c + v_r \cos \theta_{ec} \\ -x_{ec}\omega_c + v_r \sin \theta_{ec} \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

기구학에 의한 제어목적은 로봇의 현 자세를 기준 자세와 일치시켜 오차를 0으로 만드는 것이다. 이를 위해 로봇을 제어하기 위한 제어 입력이 필요하며 이는 곧 로봇의 속도 및 각속도 명령값이 된다.

2.2 동역학 방정식

로봇의 구조는 그림 2와 같다. 무게중심은 로봇중심 C가 아니라 G에 바퀴를 제외한 모든 질량이 집중된 것으로 하고 다음을 가정한다.

1. 로봇은 강체로만 이루어져 있다.
2. 바퀴의 회전축은 바닥의 수직성분과 직교한다.
3. 로봇은 2차원 평면에서만 움직인다.
4. 바퀴와 바닥사이의 접촉면에서 pure rolling과 non-slipping조건을 만족 한다.

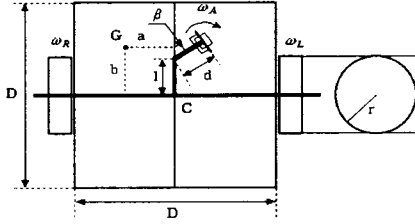


그림 2. 이동 로봇의 모델.

가정 4)에 의하여 기구학적 구속조건들이 유도된다. pure rolling에 의해 다음 식이 유도된다.

$$v_c + \frac{D}{2} \omega_c = r\omega_r$$

$$v_c - \frac{D}{2} \omega_c = r\omega_L \quad (2.4)$$

$$\cos \beta v_c + l \sin \beta \omega_c = r_A \omega_A$$

non-slipping 조건을 이용하여 다음식이 유도된다.

$$d\beta + (d + l \cos \beta) \omega_c - \sin \beta v_c = 0 \quad (2.5)$$

본 논문에서는 Lagrangian 방법을 사용하여 동역학식을 유도한다[4][5].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{s}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial s_i} + \frac{\partial U}{\partial s_i} = Q_i \quad (2.6)$$

로봇의 이동은 7개의 일반화된 좌표에 의해 완전하게 나타내어진다.

$$s(t) = (x \ y \ \theta \ \beta \ \phi_R \ \phi_L \ \phi_A)^T \quad (2.7)$$

원하는 동역학의 형태는 공급하는 힘과 로봇 속도와의 관계이므로 기구학적 조건식들을 사용하여 운동에너지를 q, β 의 함수로 변환, 동역학식을 유도하면 다음과 같다.

$$\tau = H(\beta) \dot{q}_c + G(\beta, q_c)$$

$$\dot{x}_c = v_c \cos \theta$$

$$\dot{y}_c = v_c \sin \theta$$

$$\dot{\theta}_c = \omega_c$$

$$\dot{\beta} = \frac{1}{d} (\sin \beta v_c - (d + l \cos \beta) \omega_c) \quad (2.8)$$

H 는 관성 질량행렬로 무게중심의 영향은 이 행렬에서 만 나타난다. G 는 원심력, 진향력에 관한 행렬로 전적으로 보조바퀴의 영향력에 의한 것이다. 마지막 항으로 마찰력 F 가 추가될 수 있으며, 이 항은 동역학에서의 점성 마찰, 바퀴와 바닥 접촉면에 존재하는 정지, 운동 마찰력, 구름저항등에 기인한 마찰력으로 이루어질 수 있다.

3. 자세 제어기와 안정도

그림 3은 Kanayama의 논문[4]에서 제안된 기구학 제어 구조이며 제어 법칙은 식 (3.1)과 같다.

$$q = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_{ec} + K_x x_{ec} \\ \omega_r + v_r (K_y y_{ec} + K_\theta \sin \theta_{ec}) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$K_x > 0, K_y > 0, K_\theta > 0, v_r, \omega_r$ 은 목표점의 원하는 속도다.

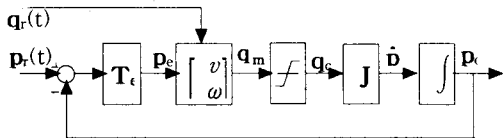


그림 3. 자세 제어기(속도 제어기가 이상적일 경우).

[4]에 의해 주어진 제어입력을 곧바로 낼 수 있다는 (perfect velocity tracking assumption)가정하에서 전개한다. 즉 속도제어기는 이상적인 제어기로서 주어진 명령속도가 바로 로봇의 속도가 된다. 이 가정과 제어법칙 (3.1)을 사용하면 로봇의 위치 오차는 점근적으로 영으로

간다. 제어기의 안정성 판별은 Lyapunov 방법을 이용하였으며 Lyapunov 함수는 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2} (x_{ec}^2 + y_{ec}^2) + (1 - \cos \theta_{ec}) / K_y \quad (3.2)$$

$$\dot{V} = -K_x x_{ec}^2 - v_r K_\theta \sin^2 \theta_{ec} / K_y \leq 0 \quad (3.3)$$

y_{ec} 가 포함되지 않았으므로 이는 $p_e=0$ 가 단지 안정하다는 것만을 보여줄 뿐이다. 이를 Lyapunov indirect method을 사용하여 $p_e=0$ 가 점근 안정점임을 보인다. $p_e = 0$ 부근에서 오차 미분 방정식을 선형화 한다.

$$\dot{p}_e = A p_e \quad (3.4)$$

$$A = \begin{bmatrix} -K_x & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & 0 & v_r \\ 0 & -v_r K_y & -v_r K_\theta \end{bmatrix}$$

특성 방정식은 $a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0$ 이며, Routh-Hurwitz 안정도 평가 방법을 이용하면 $v_r > 0$ 이므로 위 시스템은 안정하다. 따라서 p_e 는 점근 안정점이다.

4. 속도 제어기와 보상기

속도제어기는 자세제어기의 명령을 수행하는 부분으로 3장의 제어법칙을 사용하면 로봇을 원하는 자세로 보낼 수 있지만, 명령속도가 로봇의 실제속도로 바로 변환된다는 가정을 사용하였다. 그러나, 속도제어기는 이상적으로 구성될수 없고 모터의 특성상 속도제한과 가속도제한이 생긴다. 실제 시스템에서는 속도제어기로 PID 제어가 많이 쓰인다. 이 경우에 시스템 불확실성, 내,외부 외란에 기인한 속도오차가 있게 된다.

속도제어기가 마찰력, 미지의 동역학적 계수등 동역학적인 문제들에 잘 적응하도록 신경회로망을 이용한 보상기를 사용한다. 이런 신경망 보상기는 구배 강하법 (steepest descent method)을 이용한 역전파 방법을 이용하여, 이동 로봇의 PID 제어기 앞단에서 직렬로 보상함으로써 속도명령을 잘 추종하게끔 보상하고 이를 on-line으로 학습을 한다.

4.1 신경 회로망 보상기의 설계

그림 4와 같이 신경망을 기존의 제어기에 직렬로 연결, 기존 속도명령과 신경 회로망에서 출력되는 속도명령 변화분을 합하여 최종 속도명령을 조절하여 보상하는 방법이다. 속도명령을 신경망에 인가하고, 속도명령과 보상기 출력이 PID 시스템 전단에서 합해져서, 이동로봇 시스템의 출력이 속도명령을 잘 추종하도록 신경망이 학습되면서 속도명령을 발생시킨다. 이때 외란이 들어오거나 파라미터들이 변화하면 제어능성이 저하되는 데 이것을 보상하기 위해, 속도 명령과 시스템 출력사이의 오차가 최소화되도록 신경망을 on-line으로 학습시킨다.

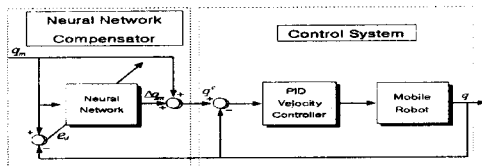


그림 4. 속도제어기를 보상하는 신경회로망 보상기.

4.2 학습 알고리즘

신경망은 그림 5와 같이 multi-layer neural network 이고 활성화 함수 $a(\cdot)$ 는 hyperbolic tangent function을 사용한다. 그리고 학습방법은 back propagation learning algorithm을 사용하여, 로봇 시스템의 출력이 속도입력을 잘 추종하도록 신경회로망의 가중치를 학습한다. 로봇 시스템을 속도 제어하기 위해서는 입력이 선속도와 각속도이고 출력이 양바퀴 속도이므로 2입력 2출력이다.

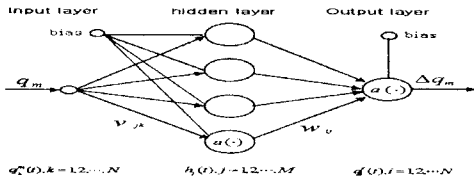


그림 5. 사용된 신경 회로망의 구조.

출력층의 입력과 출력은 다음과 같다(은닉층도 비슷).

$$net_i^m(t) = \sum_{j=1}^M w_{ij}(t) h_j(t) \quad (4.1)$$

$$\Delta q_i^m(t) = a(net_i^m(t)) \quad (4.2)$$

제어 시스템에는 속도 명령과 신경 회로망에서 출력되는 외란에 대한 속도명령의 변화분(4.2)이 합해져 입력 명령으로 인가된다.

$$q_i^c(t) = q_i^m + \Delta q_i^m \quad (4.3)$$

은닉층과 출력층 사이의 가중치는 다음과 같다.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t) \quad (4.4)$$

가중치 변화 $\Delta w_{ij}(t)$ 는 연쇄법칙을 사용하면

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}(t) &= -\xi_1 \frac{\partial E(t+1)}{\partial w_{ij}(t)} \\ &= -\xi_1 \frac{\partial net_i^m(t)}{\partial w_{ij}(t)} \cdot \frac{\partial q_i^c(t)}{\partial net_i^m(t)} \cdot \frac{\partial E(t+1)}{\partial q_i^c(t)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

단, ξ_1 는 학습률(learning rate)이다.

원래의 제어기는 완전하지는 않지만 tracking과 decoupling 특징이 있으므로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{\partial q_k(t+1)}{\partial q_i^c(t)} \cong c_{ki} \quad (4.6)$$

c_{ki} 는 양의 어떤 값이지만, 학습률 η 에 반영될 수 있으므로 간단히 1로 놓는다. 그리고 한 샘플링 시간동안, 제어오차의 부호가 바뀌지 않을 정도로 샘플링 시간이 작게 잡혀 있다면, $\epsilon(t+1)$ 를 $\epsilon(t)$ 로 대신할 수 있다.

그러므로 학습 규칙(4.5)을 정리하면 아래와 같다.

$$\Delta w_{ij}(t) = \eta_1 \delta_i^c(t) h_j(t) \quad (4.7)$$

$$\delta_i^c(t) = \epsilon_i(t) a'(net_i^m(t)) \quad (4.8)$$

입력층과 은닉층의 학습규칙도 마찬가지로 구해진다.

4.3 제안된 제어기

이동로봇 시스템의 제어는 속도제어와 자세제어를 하는 두 개의 제어구조로 구성된다. 그래서 기준자세 p_c 과 그때의 속도 q_c 를 주면, 제어목적은 로봇이 목적지까지 도착했을 때, 원하는 속도를 가지면서 궤적을 추종하도록 하는 것이다. 자세제어기는 속도제어기에 명령 속도 q_m 의 속도로 가도록 명령을 내리고, 속도제어기는 그 명령을 수행 한다. 원하는 제어목적을 이루기 위해 속도제어기는 동역학 방정식에 근거하여 토크제어를 위해 구현하기 간단한 PID로 구성하고, 자세 제어기는 3장에서 구성된 것을 사용하며 이 제어기의 출력은 신경회로망에 의해 보상되어 속도제어기의 입력이 된다. 그림 6은 제안된 제어기로 구성된 전체 시스템 구성도를 나타낸다.

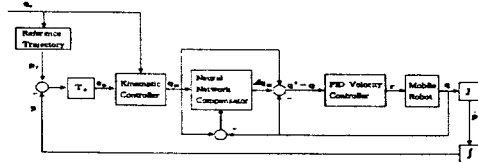


그림 6. 제안된 제어기 구조

5. 모의실험

시뮬레이션 상황을 실제와 비슷하게 만들기 위해 명령 속도에 제한을 둔다. 즉 최대 선속도 1.5m/s, 최대 가속도 5m/s²로 제한된다.

· 기준 속도 30 cm/s, 초기 오차 = (0, 20, 45).

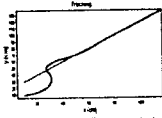


그림 7. PID 제어기.

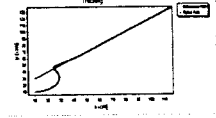


그림 8. 신경망 보상기

· 기준 속도 30 cm/s, $\Delta v = 20$ cm의 경우.

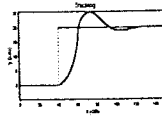


그림 9. PID 제어기.

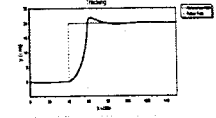


그림 10. 신경망 보상기.

연속한 직선경로에 대한 로봇의 궤적은 초기 방향오차로 인해서 진동이 나타나며 가속도 제한이 있기 때문에 실제속도는 바로 명령속도를 따라가지 못한다는 것을 알 수 있다. 그리고 신경망으로 보상함으로써 이동로봇이 더 적은 진동으로 경로를 더 잘 추종하고 조금더 빨리 수렴함을 알 수 있다. 불연속 직선의 경우로 신경망으로 보상됨으로써 시스템이 좋은 성능을 보임을 알 수가 있다. 초기의 봉우리는 갑작스런 경로의 변경에 따른 것이 다.

6. 결 론

본 연구에서는 자세 제어기와 속도 제어기를 이용한 이동로봇의 경로제어를 다루었다. 속도제어기를 구성하기 위해서 이동로봇의 동역학 방정식을 구했으며 실제 토크제어를 위해서 구현하기 간단하고 많이 사용되는 PID 제어기를 사용하였다. 그리고 동역학을 고려한 이동로봇의 제어기에서도 제어 입력은 기구학에 근거하여 주어지므로 기구학 제어기의 안정성이 고려되었다.

속도 제어기를 보상하기 위해 신경 회로망을 직렬로 연결하고, 외란이나 부하변동이 있을 경우 신경망 보상기가 입력명령의 변화분을 적절히 출력하도록 하였다. 그리고 바퀴 속도명령과 신경 회로망에서 출력되는 바퀴 속도명령 변화분을 합하여 최종 바퀴 속도명령을 조절하여 보상하였다. 이와같이 신경회로망을 이용한 보상기를 사용하여 이동로봇의 경로를 안정하게 제어할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] I. Kolmanovsky and N.H. McClamroch, "Developments in nonholonomic control problems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 15, pp. 20-36, Dec. 1995.
- [2] Y. Kanayama, Y. Kimura and F. Miyazaki, "A stable tracking control method for an autonomous mobile robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, pp 384-389, 1990.
- [3] R. Fierro and F.L. Lewis "Control of a non-holonomic mobile robot using neural networks," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 9, No. 4, July 1998.
- [4] B. d'Andrea-Novet, G. Bastin and G. Campion, "Modeling and control of non-holonomic wheeled mobile robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.* pp. 1130-1135, 1991.
- [5] H.-S. Shin and J.-H. Kim, "Robust adaptive control for non-holonomic wheeled mobile robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology*, China. pp. 245-249. 1994.