

퍼지논리와 유전알고리즘을 이용한 차륜형 이동로봇의 제어기 설계

김대준, 최영규
부산대학교 전기공학과

A Design of Tracking Controller of Wheeled Mobile Robot using Fuzzy Logic and Genetic Algorithm

Dae-Jun Kim, Young-Kiu Choi
Dept. of Electrical Eng., Pusan National Univ.

Abstract - We design a stable controller for a mobile robot with variable gains and reference velocity in order to apply the proper gains and reference velocity, which are generated with fuzzy logic in on-line. The stability is guaranteed by the Lyapunov theory. The fuzzy logic rules is found in off-line with GA strategy which drives each object function to be the least. The proposed controller is applied smooth path tracking due to the local path planing. Simulation results show robust performances under a different initial conditions.

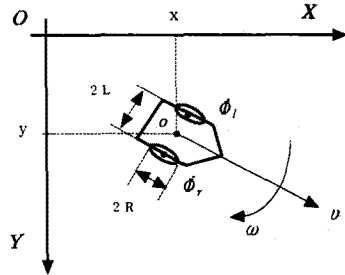


그림 1. 차륜이동로봇의 위치와 속도의 정의

1. 서론

산업현장의 다양한 분야에서 활용되고 있는 차륜형 이동로봇은 2자유도의 낮은 이동도를 갖지만 구조의 단순함과 신뢰성의 장점으로 많은 연구가 되어 왔다.

이동 로봇의 궤적제어기는 일반적으로 운동학을 이용한 posture tracking controller와 동역학을 이용한 velocity tracking controller로 구성하였다. 기존의 연구 방향들은 Kanayama et al [3]이 제안한 형태의 공칭 안정성이 보장된 posture tracking controller의 속도 출력값을 torque제어를 이용하여 빠른 시간내에 추종하는 문제에 많은 연구가 이루어졌다.[3] 그러나 하드웨어의 제한적인 특성에 의해 가속도와 속도의 제한을 갖게 된다. 이런 제약조건에도 불구하고 posture tracking controller의 최적화문제에 대한 연구가 상대적으로 적다.

본 논문은 이러한 속도와 가속도의 제한적인 가정하에 tracking controller를 기준속도와 계인을 포함하지 않는 Lyapunov 에너지함수를 사용하여 계인과 기준속도를 가변하여도 공칭안정도를 보장 받도록 설계 한다. 공칭안정도가 보장된 제어기 위의 기준속도와 계인을 로봇의 궤적 오차와 궤적의 곡률 변화에 적절한 값을 가지도록 퍼지 제어기를 이용하여 생성하고, 추적 문제를 기준경로의 기하학적인 궤적을 가능한 빠른 시간 내에 추적하는 문제로 하여 기준속도 궤적 추적기(Velocity regulation tracking controller)로 정의하고 두 개의 곡률을 가진 training 궤적 위에서 위치오차와 단위거리 당 걸린 시간을 포함하는 목적함수를 최소화 하도록 유전알고리즘에 기초한 오프 라인으로 최적화된 규칙을 가진 퍼지제어기를 이용해 각 상황에 적절한 계인을 생성하도록 설계한다. 이렇게 설계된 제어기를 동일한 조건에서의 training 궤적 위에서 같은 목적함수를 최소화하는 최적화된 고정 계인을 가진 제어기에 대한 비교실험을 통하여 본 연구에서 제안한 제어기의 성능을 평가하고자 한다.

2. 차륜형 이동로봇의 모델링

v는 로봇의 선속도, ω는 각속도, (x, y)는 로봇의 양 바퀴의 중심이면서 질량의 중심좌표, θ는 x축과 로봇의 진행방향과 이루는 각이고 φ_f, φ_r는 로봇의 양 바퀴의 회전각속도이다. 로봇의 운동학은 식(1)로 나타내고, 선속도와 각속도 성분은 다시 양바퀴의 속도 성분에 의해 식(2)의 운동학을 따른다.

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

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_f \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

로봇은 Pure rolling 조건인 식(3)과 Non-slipping 조건인 식(4)를 만족한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \dot{p}_c &= \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = J(\theta_c) u_c = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ \sin \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & \frac{R}{2} \\ \frac{R}{2L} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_f \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$y_c \cos \theta_c - x_c \sin \theta_c = 0 \quad (4)$$

궤적 추적 오차는 식(5)로 정의 된다.

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c & 0 \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

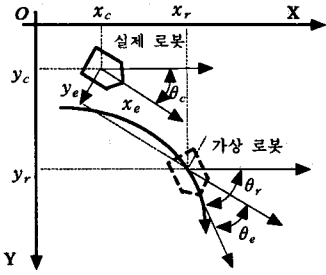


그림 2. 지역 좌표계의 궤적추적 오차

x_e (forward error)는 로봇의 순간 속도(V_c) 방향과 일치하고, y_e (lateral error)는 순간 각속도($\dot{\theta}_c$) 방향과 일치한다. θ_e (angular path error)는 로봇의 진행방향과 목표점의 접선방향과의 차이를 의미한다. 궤적추적 문제는 기준경로 위에서 동력학적 구속을 받지 않는 가상의 기준이동로봇을 실제 이동로봇이 허용오차 범위에서 추적하는 문제로서 $t \rightarrow \infty$, $\|(x_e, y_e, \theta_e)\| < \epsilon$ 를 만족하는 적절한 $[V_r, W_r]$ 를 설계하는 것이다.

3. Tracking Controller의 설계

식(3)~(5)로부터 다음의 식(6)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= V_r \cos \theta_e - V_c + \dot{\theta}_e y_e \\ \dot{y}_e &= V_r \sin \theta_e - \dot{\theta}_e x_e \\ \dot{\theta}_e &= \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_c \end{aligned} \quad (6)$$

위 식(6)으로부터 다음의 상태방정식이 유도된다

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} 0 & \dot{\theta}_c & \frac{V_r(\cos \theta_e - 1)}{\theta_e} \\ -\dot{\theta}_c & 0 & \frac{V_r(\sin \theta_e - 1)}{\theta_e} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} p_e + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u_e \quad (7)$$

$$\text{단, } V_r = \dot{x}_r \cos \theta_r + \dot{y}_r \sin \theta_r$$

$$u_e = u_r - u_c = \begin{bmatrix} V_r - V_c \\ \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_c \end{bmatrix}$$

V_c 은 V_r 과 x_e 에 비례하며 θ_e 와 반비례하고, $\dot{\theta}_c$ 은 $\dot{\theta}_r$ 과 $\sin(\theta_e/2)$ 에 비례하는 사실로부터 식(8)과 같은 제어를 설계한다

$$u_c = \begin{bmatrix} V_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r \cos \theta_e + K_x x_e + g(x_e, y_e, \theta_e) \\ \dot{\theta}_r + K_\theta \sin \frac{\theta_e}{2} + f(x_e, y_e, \theta_e) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Lyapunov 에너지 함수에 계인과 V_r 이 포함되지 않도록 아래와 같이 제안한 다음, $V(p_e) \leq 0$ 되도록 $g(x_e, y_e, \theta_e)$ 와 $f(x_e, y_e, \theta_e)$ 를 찾으면 제어기는 식(9)와 같이 구해진다.

$$u_c = \begin{bmatrix} V_r \cos \theta_e + K_x x_e \\ \dot{\theta}_r + K_\theta \sin \left(\frac{\theta_e}{2}\right) + 2V_r y_e \cos \frac{\theta_e}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

제어기의 전역적인 안정성을 조사하면

$$\dot{V} = -K_x x_e^2 - K_\theta \sin^2 \frac{\theta_e}{2} = 0. \text{ 에서}$$

$$\text{Case 1 : } x_e = y_e = \theta_e = 0.$$

: zero tracking errors를 의미.

$$\text{Case 2 : } x_e = 0, \theta_e = 0, y_e \neq 0.$$

: y_e 가 0이 아닌 평형점이 존재할 수 있다.

계인과 기준속도를 양의 범위에서 온라인으로 변화시켜도 전역적으로 점근적 안정성을 가진 제어기가 된다.

4. 기준 속도 생성기 설계

본 논문에선 제어기의 공칭 안정성을 기반한 nonlinear feedback 제어기 위에 경로의 곡률과 로봇의 오차를 입력 변수로 하는 기준속도 생성기를 설계하여 각 구간에서 적절한 기준속도를 생성하도록 설계한다.

가능한 빠른 시간으로 기준 경로를 이동하는 문제로 목적함수는 다음과 같다.

$$J_T = K_x \sum x_e^2 + K_y \sum y_e^2 + K_\theta \sum \theta_e^2 + K_I \sum T_{ave}^2 \quad (10)$$

단, $T_{ave} = \frac{t_{total}}{d_{total}}$

실제 주어진 경로를 추적하는 문제에서 로봇은 경로의 곡률과 자신의 현재 위치에 따라 기준속도와 기준점을 적절하게 선택함으로써 안정한 제어 목적을 달성할 수 있다.

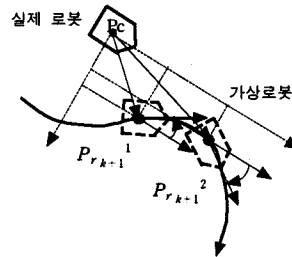


그림 3. 안내형 가상이동로봇을 가진 궤적추적 문제

기준속도의 선택은 다음 샘플링구간의 기준점의 좌표를 결정하게 되므로 외부에서 주어진 기준 경로 위로 적절한 지역적 직선 경로를 생성하는 의미가 되므로 동력학적 구속을 덜 받는 smooth path tracking을 의미한다. 이를 위하여 K_x, K_θ, V_r 을 퍼지 로직을 이용하여 적절한 값을 내는 생성기를 설계한다.

퍼지 제어기의 규칙은 여러 세대를 반복해 같은 training 궤적을 수행시켜서 목적함수를 최소화하는 GA를 통해 적절한 값을 찾는다.

$$\begin{aligned} K_x &= \text{fuzzy}_x(x_e, \theta_e), \\ K_\theta &= \text{fuzzy}_\theta(y_e, \theta_e) \\ V_r &= \text{fuzzy}_V(x_e, \psi) \end{aligned} \quad (11)$$

단, ψ : 기준경로의 곡률변화율

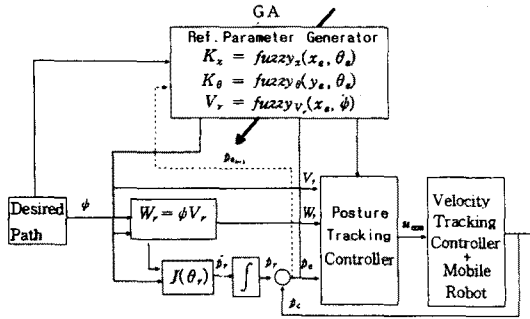


그림 4. 생성기를 포함한 제적제어기의 전체 블록도

5. 모의 실험

모의실험은 고정 계인인 경우와 본 논문에서 설계한 파라미터 생성기를 적용한 경우를 비교하였다. 실험의 공정성을 기하기 위해 고정계인은 GA로 찾은 최적계인을 사용하였다. 실험은 2가지 경우로 이루어졌는데, 그림 5는 학습시에 사용한 동일한 초기치에서 실험한 결과이며, 그림 6은 초기치를 달리한 경우를 각각 비교하여 보았다. 모의실험한 결과를 비교해 보면 생성기로 제어한 결과가 다른 초기치에서 더 강인하며, 같은 시간에 더 먼 거리를 주행함을 알 수 있다.

□ 실험 조건

- 최대 속도 : 1.1 m/s
- 최대 가속도 : 4 m/s²
- 고정 기준 속도 : 0.7 m/s
- 샘플링 주기 : 0.033 s
- △은 이동로봇이고, ●은 가상 기준 로봇

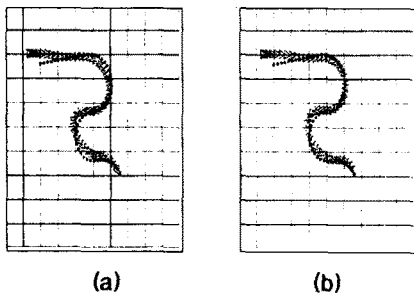


그림 5. 학습시 사용된 초기치에서의 실험
(a) 고정계인을 적용한 경우
(b) 파라미터 생성기를 적용한 경우

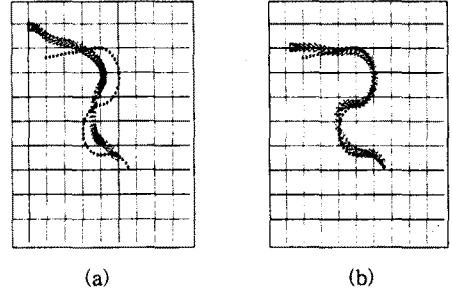


그림 6. 초기치가 다른 경우
(a) 고정계인을 적용한 경우
(b) 파라미터 생성기를 적용한 경우

6. 결 론

본 논문에서는 제적추적기의 계인과 기준속도값을 퍼지 로직을 이용해 온라인으로 적절한 값을 생성하는 제어기 설계하였고, 이 제어기를 이용하여 모의실험한 결과, 설계된 제어기가 고정된 최적 계인 제어기보다 우수할 수 있었다. 앞으로 퍼지규칙의 수와 입력변수에 대한 최적화 문제와 동역학을 고려한 속도제어기에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Jong-Hwan Kim and Hyun-Sik Shim, "Evolutionary programming-based optimal robust locomotion control of autonomous mobile robots," in *Proc. of the Fourth Annual Conf. on Evolutionary programming*, 1995.
- [2] 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.
- [3] 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. Automat.*, pp. 384-389, 1990.
- [4] Y.L. Zhang, S.A. Velinsky, X. Feng, "On the Tracking Control of Differentially Steered Wheeled Mobile Robots," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 119, 1997.
- [5] Ollero and Garcia-Cerezo, "Fuzzy tracking methods for mobile robots," *Applications of fuzzy logic* (Jamshidi/Moham-mad), Prentice-Hall PTR, 1997.