

퍼지 알고리즘을 이용한 차륜형 이동로봇의 경로추종제어

오 정 석* · 하 윤 수**

Path Tracking Control for a Wheeled Mobile Robot using Fuzzy Algorithm

J. S. OH · Y. S. HA

Key words : Wheeled Mobile Robot(차륜형 이동로봇), Path Tracking Control(경로추종제어), Power Wheeled Steering(구동륜에 의한 조타), Fuzzy Logic Control(퍼지로지제어)

Abstract

This paper describes the path tracking control for a mobile robot which has two casters at the front and rear to keep balance and two driving wheels on the left and right sides of its body. Power wheeled steering method is adapted to control heading of the robot. It is very difficult to find appropriate feedback gains when linear regulator control scheme is adapted to path tracking control of this type of robot. Therefore in this paper we propose the path tracking control algorithm using the fuzzy logic control scheme for this type of robot. Simulation to prove the validity of the proposed two algorithms is performed. The results are reported at last part in this paper.

1. 서 론

현대의 모든 산업분야에서는 컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 제2의 산업혁명이라 할 수 있는 자동화 문제에 많은 관심이 집중되고 있다. 일반적으로 제조업 분야에서의 자동화를 위해 현재 산업현장에서 사용되고 있는 대부분의 로봇은 일정한 장소에 고정 배치되어 작업을 수행하는 고정형이기 때문에 작업영역이 한정되어진다. 이러한 로봇의 작업영역의 제한성을 극복하기 위해서는 임의의 작업공간에서 원하는 위치로 이동이 가능한 이동로

봇의 개발이 절실하다. 이동로봇의 종류는 크게 이동 방법에 따라 차륜형 이동로봇과 보행형 이동로봇으로 나눌 수 있다. 후자의 경우, 주행시 지면의 돌출장애물에 대해 큰 영향을 받지 않는다는 장점을 가지는 반면, 로봇의 구조가 복잡해지고 동적 안정화를 위한 제어가 쉽지 않다는 문제점을 가지고 있다. 이에 비해 차륜형 이동로봇은 보행형에 비해 이동을 위한 기구가 간단하고 항상 바뀌어 지면과 접촉하고 있어 로봇의 안정성에 대한 고려는 설계에 포함되지 않기 때문에 제어가 비교적 용이하다. 또한 실제 응용 분야도 광범위하므로 현재

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과(원고접수일 : 99년 2월)

** 한국해양대학교 자동차·정보공학부

개발중인 로봇의 상당부분을 차지하고 있다.

이동로봇이 임의의 환경에서 주어진 임무를 성공적으로 수행하도록 하기 위해서는 사전에 계획된 임무를 수행하거나 주행 중 자신의 환경인식 시스템으로부터 실시간으로 주어지는 목표경로를 따라 주행하도록 하는 경로추종제어를 포함한 주행제어시스템에 관한 충분한 연구가 진행되어야 할 것이다. 종래에는 별도의 조향장치 없이 좌우의 구동륜을 독립적으로 제어함으로써 로봇의 진행 방향을 제어하는 PWS(Power Wheeled Steering) 방식을 채택한 차륜형 이동로봇의 경로추종제어 알고리즘에는 선형 레플레이터 문제에 근거한 방법을 많이 이용하여 왔다¹⁾²⁾³⁾⁴⁾. 이 방법은 간단한 계산식에 의해 제어입력을 구할 수 있는 장점은 있으나 적절한 피드백 계인을 설정하기 위해 여러 번의 시행착오를 거쳐야 하고, 로봇의 현재 방위와 목표경로 방위의 차와 현재 경로와 목표경로의 차의 크기를 제한하여야 하는 점 등이 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 퍼지 로직을 이용한 경로추종제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증한다.

2. 대상 시스템 및 문제설정

본 논문에서 취급할 로봇의 전제는 다음과 같은 이동체이다.

- (a) 좌우에 DC모터에 의해 독립적으로 구동되는 구동륜과, 전후에 로봇의 자세를 보조하며 자유롭게 회전이 가능한 자세보조륜을 가진다.
- (b) 좌우의 구동륜은 각각 감속기어를 거쳐 구동모터에 연결되어 있으며, 엔코더나 타코제너레이터와 같은 속도검출센서를 통해 구동륜의 속도를 검출한다.
- (c) 방향전환은 별도의 조향장치 없이 좌우동륜의 속도차에 의해 이루어진다. 다음 Fig. 1은 이상의 특성을 갖는 이동체의 구조를 나타내고 있다.

이와 같은 구조를 가지는 이동로봇의 2차원 평면상에서의 위치는 Fig. 2에서와 같이 로봇 중심 C

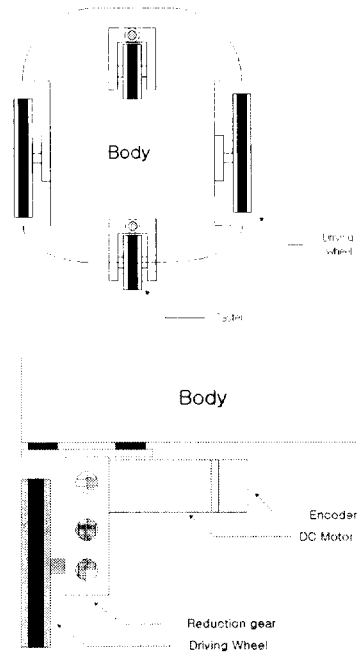


Fig. 1 Configuration of a robot vehicle

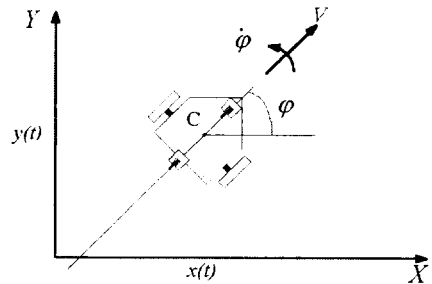


Fig. 2 Locomotion variables on the x-y coordinates

의 병진속도 $V(t)$ 와 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 에 의해 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x(t) &= x_0 + \int V(t) \cos \phi(t) dt \\
 y(t) &= y_0 + \int V(t) \sin \phi(t) dt \\
 \phi(t) &= \phi_0 + \int \dot{\phi}(t) dt
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 x_0, y_0 는 로봇의 초기위치이고 ϕ_0 는 초기 방위각이다.

따라서 로봇이 임의의 위치에서 원하는 목표위치까지 주어진 경로를 따라 이동하도록 하는 것은, 병진속도 V 와 회전각속도 $\dot{\phi}$ 를 적절히 제어함으로써

가능하다는 것을 알 수 있다¹⁵⁾.

로봇의 목표경로에는 직선, 곡선 등의 여러 형태의 경로를 가질 수 있으나 곡선경로의 경우는 짧은 직선경로의 연결로 근사화 할 수 있고 실제 미지의 작업영역에서의 환경센서를 이용한 주행시 곡선경로의 파악은 거의 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 로봇에 주어지는 목표경로는 직선경로인 경우에만 취급하기로 한다. 또한 회전시 로봇 중심의 병진속도 $V(t)$ 는 변화시키지 않는 것으로 한다. 따라서 본 논문에서는 목표경로 추종을 위해 요구되어지는 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 를 현재의 위치와 목표경로로부터 결정하는 문제를 다룬다.

3. 경로추종제어

3.1 제어전략

Fig.3에서와 같이 현재의 로봇 위치와 방위를 $(x(t), y(t), \phi(t))$ 라 할 때 속도 $V(t)$ 로 주행하는 로봇을 좌표 (x_0, y_0) 를 지나고 X축과 ϕ_0 를 이루는 유향 직선에 추종시키는 문제를 생각하자

$(x(t), y(t), \phi(t))$ 는 기존의 X-Y 좌표계가 (x_0, y_0) 만큼 병진하고 ϕ_0 만큼 회전한 새로운 η - ξ 좌표계상의 $(\eta(t), \xi(t), \alpha(t))$ 로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \xi(t) \\ \eta(t) \\ \alpha(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_0 & \sin\phi_0 & 0 \\ -\sin\phi_0 & \cos\phi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t)-x_0 \\ y(t)-y_0 \\ \phi(t)-\phi_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 이동로봇을 목표경로에 추종시키는 것은 새로운 η - ξ 좌표계상의 ξ 축에 추종시키는 문제로 생각 할 수 있다. 즉 새로 생성된 η - ξ 좌표계에서 $\eta(t)$ 와 $\alpha(t)$ 의 값이 점근적으로 "0"이 되도록

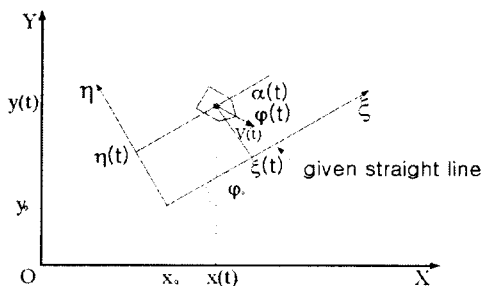


Fig. 3 Strategy of straight line tracking control

로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 를 결정하는 문제와 같아 진다¹⁶⁾. 이러한 제어목적은 만족시키기 위한 방법으로 기존의 선형 레귤레이터 문제에 근거한 알고리즘에서는 Δt 초후의 로봇의 회전각속도를 결정하는데 있어 식(3)을 사용한다.

$$\dot{\phi}(t + \Delta t) = -k_\eta \eta(t) - k_\alpha \alpha(t) \quad (3)$$

이와 같은 방법으로 이동로봇을 목표경로에 추종시키는 것은 피드백계인 k_η, k_α 을 적절히 결정하기 위하여 여러번의 시행착오를 거쳐야 하고 k_η, k_α 가 결정되더라도 $\eta(t), \alpha(t)$ 의 크기에 따라 회전방향이 달라질 수 있으므로 $\eta(t), \alpha(t)$ 의 범위를 제한해야 하는 등의 문제점들을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이동로봇을 목표경로에 추종시키기 위하여 퍼지로직을 이용하여 경로추종제어기를 다음과 같이 설계하도록 한다.

3.2 퍼지로직을 이용한 제어기 설계

목표직선에 대한 로봇의 위치와 방위를 Fig.4와 같이 몇 가지의 경우로 나타낼 수 있다. 여기서 목표직선은 Fig.3에서의 ξ 축과 같다. 로봇의 위치가 목표직선 위에 있을 경우 로봇과 목표직선이 이루는 거리 $\eta(t)$ 는 (+)값을 가지고, 목표직선의 아래에 있을 경우 (-)값을 가진다고 가정하고, 로봇의 현재 진행 방향과 목표직선이 이루는 각도 $\alpha(t)$ 는 (1)과 같은 경우 (-)값을, (2)와 같은 경우 (+)값을 가진다고 가정하자

먼저 (1)과 (2)의 경우는 거리성분 $\eta(t)$ 가 "0"이기 때문에 방위각 $\alpha(t)$ 가 "0"이 되도록 로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 조정하면 목표직선을 직진하게 된다는 것을 알 수 있고, 이에 반해 (4)와 (7)의 경우는 방위각 $\alpha(t)$ 는 "0"이므로 거리 $\eta(t)$ 가 "0"이 되도록 로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 을 조정해 주면 목표직선상

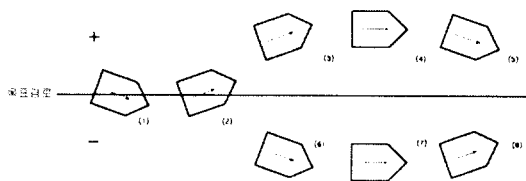


Fig. 4 Mobile robot positions and angles to a given straight line

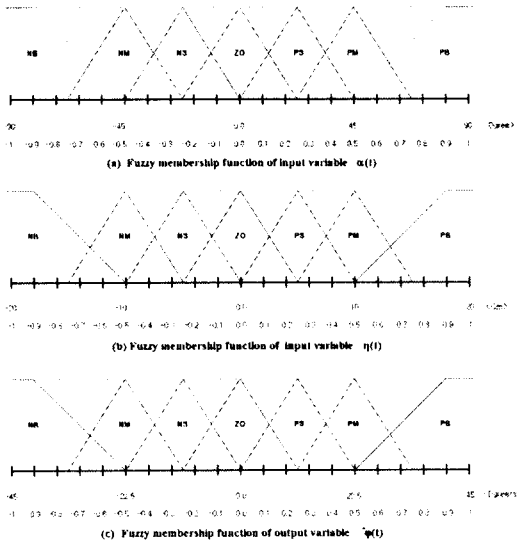


Fig. 5 Fuzzy membership function of input/output variable

을 주행하게 된다는 것을 알 수 있다. 그 외의 경우는 두가지 모두를 고려하여 로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 를 조정해 주어야 만이 목표직선상을 주행하게 된다. 단 로봇은 목표직선이 지향하는 방향으로만 이동한다. 여기서 $\eta(t)$, $\alpha(t)$ 를 제어목표에 따른 오차성분으로 생각하고 각 오차의 크기와 부호의 조건에 따라 제어입력인 로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 의 크기와 부호를 조정해 주는 제어를 생각 할 수 있다. 예를들어 Fig.4의 (5)와 같은 경우 제어입력은 최초(-)값을 가지는 큰 입력을 발생하여 거리성분의 오차값을 줄이고 어느 시점에 이르면 방위각성분의 오차를 감소시켜 두 성분의 오차가 "0"으로 수렴되도록 하는 것이다. 따라서 오차성분인 $\eta(t)$, $\alpha(t)$ 를 입력변수로 하고, 로봇의 회전각속도 $\dot{\phi}(t)$ 를 출력변수로 하는 퍼지논리제어(FLC : Fuzzy Logic Control)를 생각 할 수 있다. 퍼지로지제어를 수행하기 위하여 각각의 변수를 퍼지화하여 퍼지 소속 함수를 Fig.5와 같이 구성할 수 있다⁷⁾.

퍼지제어 규칙의 구조는 위치형 알고리즘을 적용하고 정성적인 고찰에 의해 제어 입력을 결정하면 퍼지규칙은 다음과 같이 나타내어진다.

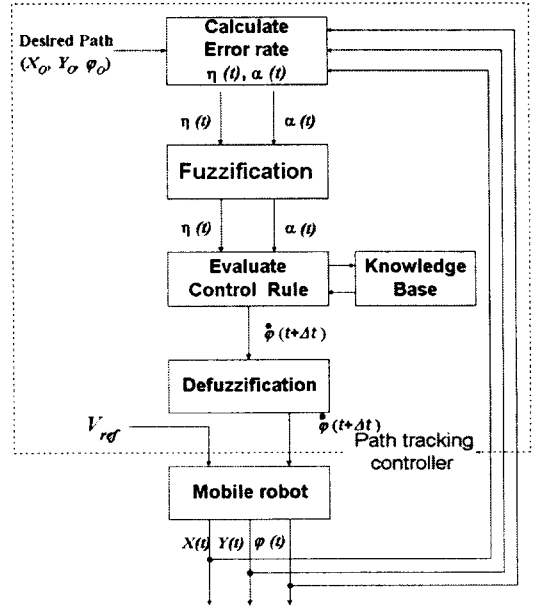


Fig. 6 Path control system based on a FLC

- $R_1 : \text{IF } \eta(t)=\text{PB AND } \alpha(t)=\text{NB Then Control_U}=\text{ZO}$
- $R_2 : \text{IF } \eta(t)=\text{PB AND } \alpha(t)=\text{PB Then Control_U}=\text{NB}$
- ⋮
- $R_l : \text{IF } \eta(t)=\text{NB AND } \alpha(t)=\text{NB Then Control_U}=\text{PB}$

단, l : 퍼지규칙의 개수

이상과 같은 퍼지로지제어기(FLC : Fuzzy Logic Controller)를 포함하는 경로제어시스템의 구성은 Fig.6과 같다. 이때 퍼지추론 방법은 Sup-min의 방법을 사용하였고 비퍼지화 방법은 무게중심법을 사용하였다⁷⁾

5. 시뮬레이션 및 검토

5. 1 시뮬레이션 조건

본 연구의 시뮬레이션에 이용된 차륜형 이동로봇의 파라미터는 Table.1과 같다.

본 논문에서는 순수한 경로추종제어기의 성능만을 고찰하기 위하여 감속기어를 포함한 좌우 차륜계의 특성은 동일하다고 가정하며 이들에 대한

Table. 1 Parameters and variables of the mobile robot

Parameters	values
Size L×W×H	410×370×500 [mm]
Weight of Body	10.2 [kg]
Radius of Wheel	50 [mm]
Distance Between Left and Right Wheel	300 [mm]
Reduction ratio of Gear	1/25

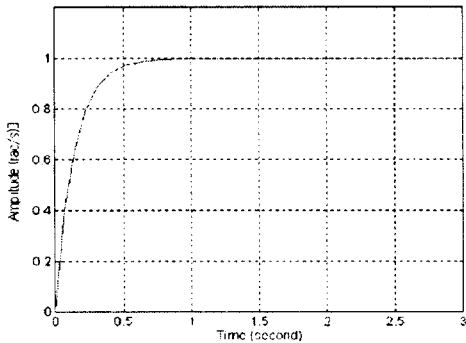


Fig. 7 Step response of the wheel speed control system

회전속도제어 시스템은 계단상의 목표치에 대해 Fig.7 과 같은 응답특성을 갖도록 설계되어진 것으로 가정한다.

시뮬레이션은 선형 레귤레이터(LQ)에 근거한 제어기와 퍼지로지제어기(FLC)를 갖는 시스템에 대하여 동일한 조건하에서 실시하므로 추종성능을 비교한다. 이때 LQ제어기의 피드백게인 k_η, k_α 은 반복 시뮬레이션을 통하여 구하여 졌으며 그 값은 각각 0,872와 0.8이다.

시뮬레이션 프로그램을 위한 언어는 C를 사용하였으며 프로그램 내부의 샘플링 시간은 실제로 로봇시스템을 고려하여 5 msec로 하였다.

5. 2 시뮬레이션 결과

Fig.8과 Fig.9는 로봇의 중심속도가 10 cm/sec 이고 방위각이 30 인 로봇이 4초간 주행한 시점에서 목표경로를 X축으로 변경한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

이 경우 로봇이 최초 4초간 주행한 후의 거리성분과 방위각성분이 그리 크지 않기 때문에 LQ에 근거한 제어기를 갖는 경로추종제어시스템에서도

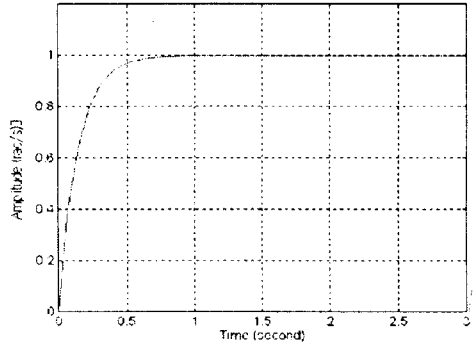


Fig. 8 Simulation result(1) of the straight line tracking control using FLC

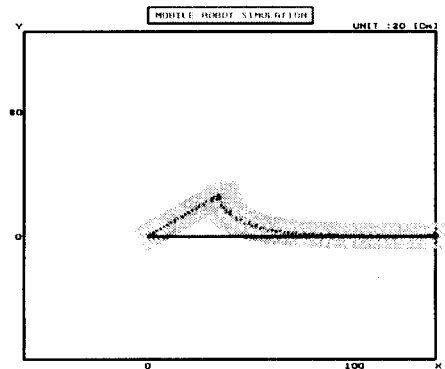


Fig. 9 Simulation result(2) of the straight line tracking control using LQ

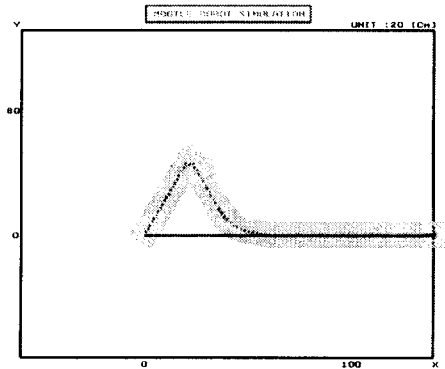


Fig.10 Simulation result(3) of the straight line tracking control using FLC

퍼지로직을 이용한 방법과 같이 로봇이 목표직선 경로를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. Fig.10과 Fig.11은 중심속도가 10cm/sec 이고 방위각이 60

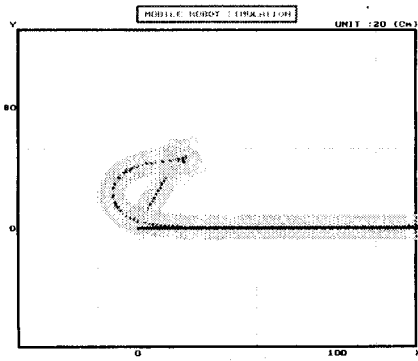


Fig. 11 Simulation result(4) of the straight line tracking control using LQ

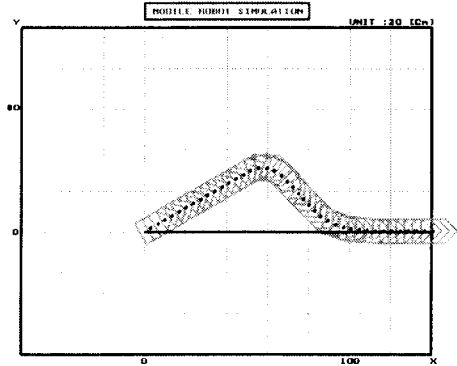


Fig. 13 Simulation result(6) of the straight line tracking control using FLC

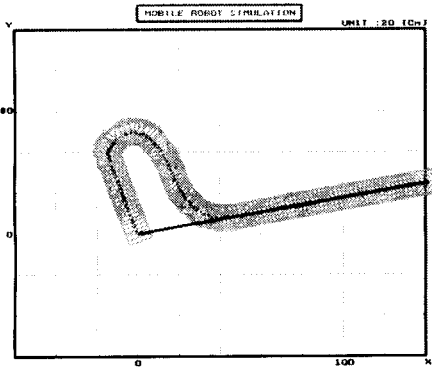


Fig. 12 Simulation result(5) of the straight line tracking control using FLC

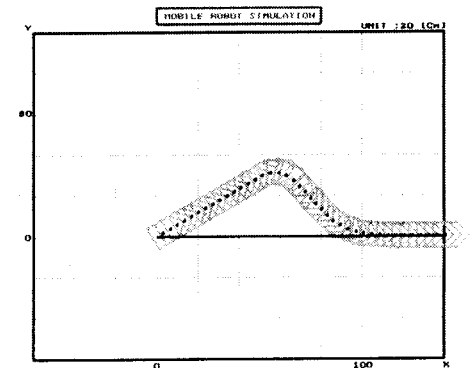


Fig. 14 Simulation result(7) of the straight line tracking control using FLC

인 로봇이 4초간 주행한 시점에서 로봇에 X축을 목표경로로 주었을 때의 응답을 나타낸다.

Fig.10의 FLC를 갖는 경로추종제어시스템에 대한 결과는 목표직선경로를 양호하게 추종하는 반면, Fig.11의 LQ에 근거한 제어기의 시뮬레이션 결과는 로봇이 4초간 주행한 시점에서 $\eta(t)$, $\alpha(t)$ 값의 음양관계 및 대소관계에 의해 다음 제어입력이 $\phi(t+\Delta t) < 0$ 되어 뒤로 한바퀴를 돌아서 추종할 수 있음을 나타낸다.

Fig.12는 $\phi(t)$ 가 둔각일 경우에 있어서의 응답을 관찰하기 위하여 중심속도 및 방위각이 각각 10 cm/sec, 110° 인 로봇이 4초간 주행한 시점에서 로봇에 임의의 직선목표경로 (x, y 의 초기좌표를 (0, 0), 기울기 $\phi_0 = 10^\circ$)를 주었을 때의 결과를 나타낸다. 이 경우에 있어서 FLC를 갖는 경로추종제어시스템은 목표경로를 잘 추종하고 있음을 알 수 있

다.

Fig.13과 Fig.14는 로봇의 중심속도를 달리했을 때의 추종성을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과이다. Fig.14는 중심속도가 20 cm/sec 이고 방위각이 30 인 로봇이 3초간 주행한 후 목표경로가 X축인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이고, Fig.15는 중심속도가 15 cm/sec 이고 방위각이 40 인 로봇이 4초간 주행한 시점에서 목표경로로서 임의의 직선목표경로 (x, y 의 초기좌표를 (0, 0), 기울기 $\phi_0 = 30^\circ$)를 주었을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 퍼지로직을 이용한 방법의 경로추종제어시스템은 로봇중심의 속도를 달리했을 경우에도 주어진 경로를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과에서 퍼지로직을 이용한 방법의 경로추종제어시스템은 기존의 선형 레귤레이터 문제에 근거한 방법의 문제점으로 지적되어온 퍼

이드백 계인 설정상의 번거러움, 비선형특성으로 인한 영향 등을 개선함과 동시에 로봇중심의 속도 변화에도 양호한 추종성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는, PWS기구학을 갖는 차륜형 이동로봇의 경로추종제어에 있어서 선형 레귤레이터에 근거한 방법을 이용했을 때 문제점으로 지적되어온 피이드백 계인 설정상의 번거러움, 비선형특성으로 인한 영향 등의 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 퍼지 로직을 이용한 방법을 제안하였다. 이에 대한 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 실시한 결과, 로봇의 현재 방위와 목표경로의 방위의 차가 큰 경우에도 목표경로를 잘 추종하고, 피이드백계인 설정의 번거러움이 없는 등, 기존의 선형레귤레이터에 근거한 경로추종방법에서의 문제점들을 개선하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Hemami, H. and Wyman, B. F. "Modeling and control of constrained dynamic system with application to biped locomotion in the frontal plane", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-24, no. 4, pp.526~535, August 1979.

[2] Borenstein, J. and Feng, L. "Where am I? Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Positioning-1996 Edition". 1995.c

[3] Yun-Su, Ha. and Shin' ichi, Yuta. "Trajectory Tracking control for Navigation of Self-contained Mobile Inverse Pendulum", *Pro. IEEE/RJS Int. conf. Intelligent Robots and Systems.*, pp.1875~1882, 1994.

[4] Kamga A, Simeu. and E. "A Straight Lines Path Following Strategy Applied to the tricycle Vehicle", *Pro. of the 3rd IFCA Int. symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications(SCICA 97)*, Annecy, France, pp 339~344, 1997

[5] Borenstein, J, et al. 1987 "Motion control Analysis of a Mobile Robot", *J. of Dynamic Systems, Measurement and Control* vol. 109/73, 1987.

[6] Yun-Su, Ha. and Shin' ichi, Yuta. "Trajectory Tracking control for Navigation of The Inverse Pendulum Type Self-contained Mobile Robot", *Int. Journal of Robotics and Autonomouse system* Vol.17, pp. 65~80, 1996.

[7] Tso, S.K. Fung, Y.H. and Chung, Y.P. "Fuzzy-Logic Control for Differential-wheel-drive AGVs Using Liner Opto-sensor Arrays", *Pro. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Auto.* pp. 2816~2821, 1996.

저 자 소 개



오정석(吳貞錫)

1971년 10월생, 1997년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 1999년 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사), 1999년~현재 한국해양대학교 자동차·정보 공학부 시간강사.



하윤수(河潤秀)

1962년 4월생, 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1990년 동 대학원 졸업(석사), 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(박사), 1996년~현재 한국해양대학교 자동차·정보 공학부 조교수.