

퍼지를 이용한 자율 이동 로봇의 이동 경로 추종 및 고속 정밀 제어

Moving Path following and High Speed Precision Control of Autonomous Mobile Robot Using Fuzzy

*이원호, **이형우, ***김상헌, §정재영, §노태정

Won-Ho Lee, Hyung-Woo Lee, Sang-Heon Kim, Jae-Young Jung and Tae-Jung Roh

*부경대학교 메카트로닉스자동화정보공학과

**부경대학교 제어계측공학과

***동명정보대학교 컴퓨터공학과

§동명정보대학교 메카트로닉스공학과

요 약

일반적인 이동 로봇의 주된 관심은 경로 생성과 생성된 경로 추종에 있다. 그러나 일부 고속의 이동성이 필요로 하는 로봇의 경우 동역학적 제한 조건이 존재하며, 이러한 제한 조건 내에서 원하는 움직임에 대한 제어가 요구된다. 본 논문에서 환경 지도를 가지고 있지 않은 상태, 즉 미지의 환경에서 이동 로봇의 경로 추종에 있어서 빠른 이동시에 발생할 수 있는 이동 로봇의 미끄러짐이나 전복 현상을 막기 위해 이동 로봇의 동역학적 제한 조건을 퍼지 논리를 이용하여 기존 속도를 변화시켜 안전하고 빠른 경로 추종 성능을 얻고자 하였다.

특히, 라인 추종 이동 로봇을 모델링하여 실시간으로 변화하는 목표점에 대한 추종 제어기를 설계하고 퍼지 최적 속도 제한 제어기를 통해 연속적으로 변화하는 라인에 대해서 지능적으로 로봇의 속도를 제한하여 안정적인 추종 성능을 발휘함을 확인하였다.

Abstract

The major interest of general mobile robot is making a route and following a maked route. But, In the case of robot that is in need of movement of partial high speed, the condition of dynamic limitation is exist, and in these conditions, it demands controlling against movements we want. In this paper, in respect of the following a route at the situation that don't have the environmental map, that is, unknown environments, to prevent the slide of moving robot or the overturn that can happen for it moves fast, we organize the dynamic condition of limitation using the fuzzy logic, and we obtain more safe and fast route tracing ability by changing the standard velocity.

Especially, by modeling the line tracing mobile robot, we design the tracing controller against a realtime changing target, and using the fuzzy optimized velocity limitation controller, we confirm that our robot shows its stable tracing ability by limiting its velocity intelligently against the continuously changing line.

Key words : 퍼지 모델링, Mobile Robot, Navigation Algorithm(주행알고리즘), Fuzzy control(퍼지 제어)

1. 서 론

이동 로봇의 경로 생성(path planning)과 경로 추종(path tracking)은 많은 연구가 진행되어 왔으며 이를 이용한 장애물 회피(avoid obstacle)에 관한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 연구용 및 산업용으로 개발되는 이동 로봇 뿐만 아니라 가정용 또는 오락용으로의 로봇 개발이 활성화 되면서 로봇의 이동 성능 향상을 위한 동역학적인 제한 조건을 고려하여 최적의 이동 성능을 끌어내기 위한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 일반적인 두 바퀴 이동 로봇(2 wheel mobile robot)에 대한 동역학적 모델링을 통해 제한 조건을 구하고, 추종 제어기의 속도 출력을 퍼지 속도 제한 제어기의 입력으로 하여 회전 운동 시에 발생할 수 있는 미끄러짐이나 전복 현상을 막고 직선 운동 시에는 빠른 속도로 이동할 수 있도록 하는 것이 목표이다.

경로 추종을 위해서는 로봇이 이동하고자 하는 경로가 추종 목표로 설정되어야 한다. 본 연구에서는 어떤 외부 환경의 기하학적 지도를 가지고 있지 않은 상태에서 적외선 센서를 이용한 라인 추종 이동 로봇에 퍼지 추종 제어기와 퍼지 속도 제한 제어기를 적용하였다.

라인 추종 이동 로봇은 명암 차이가 확연한 바닥과 라인에 적외선을 방출하여 이에 반사되는 적외선의 양을 적외선 수광 센서를 이용하여 받아 들여 라인의 위치를 알아내고 로봇 적외선 센서 중심과 라인과의 위치 차이를 오차 값으로

접수일자 : 2004년 9월 30일

완료일자 : 2004년 11월 25일

감사의 글 : 본 연구는 삼성전자 소프트웨어 멤버십의 지원을 일부 받았습니다.

하여 양 모터의 속도를 제어함으로써 라인을 추종하도록 하는 로봇이다. 이러한 라인 추종 이동 로봇의 빠른 이동을 위해서는 특히 적외선 센서 처리 기술이 중요하다. 센서부 중심과 라인과의 위치 오차를 제어기의 입력으로 사용하기 위해서 가중치를 부여하여 평균을 내는 방법인 WAM (Weight Average Method) 을 제안하고 이를 이용하였다.

퍼지 라인 추종 제어기는 WAM을 통해 얻은 오차 값과 오차 값의 미분값(현재값-이전값)을 입력하여 설계하였다. 이 두 입력에 대한 멤버십 함수를 결정하고 퍼지화-퍼지추론-비퍼지화 과정[그림 1]을 통해 양 모터의 속도비를 출력으로 얻는다.

퍼지 최적 속도 제한 제어기에서는 두 모터의 속도를 입력으로 하여 제한된 모터 속도를 출력으로 한다. 역시 퍼지화-퍼지추론-비퍼지화 과정[그림 1]을 거쳐서 출력을 얻어낸다.

이렇게 얻어진 최종 모터 속도를 라인 추종 이동 로봇의 모터에 적용하게 된다. 이러한 두 가지의 퍼지 제어기를 통해서 곡선에서는 속도를 줄이고 직선에서는 속도를 높여 최적화된 고속 추종 주행이 가능해지게 된다.

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기를 실제 라인 추종 이동 로봇에 적용하여 추종 성능을 확인하였으며, 실제 이동 성능 확인을 위해 주행 중 얻은 양 바퀴의 속도 데이터와 이동 로봇의 기구학 모델링을 통해 시뮬레이션 프로그램을 작성하고 그 결과를 2차원 평면 그래프로 주행 경로 수렴 여부를 확인할 수 있었다.

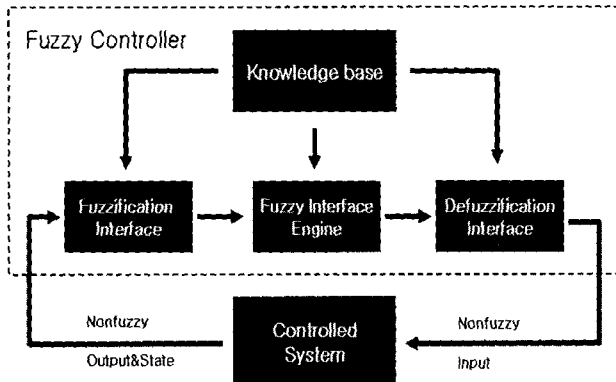


그림 1. 퍼지 제어기의 기본 구조.
Fig. 1. Base struct of fuzzy controller.

2. 라인 추종 이동 로봇의 기구학

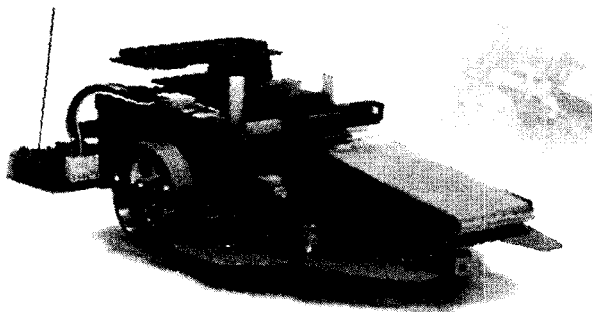


그림 2. 자율 이동 로봇 MECHAPIA M-04
Fig. 2. Intelligent Mobile Robot MECHAPIA M-04

그림 2는 자체 제작된 이동 로봇 MECHAPIA M-04 이다. 두 개의 스테핑 모터로 각 바퀴를 구동하며 보조 바퀴로는 핀치 롤러를 이용하였다. 로봇의 실제 움직임을 파악하기 위해 RF 무선 통신 또는 유선 RS-232C 시리얼 통신을 통하여 센서 값의 변화와 양 바퀴의 속도 변화를 데이터로 받을 수 있도록 구성하였으며, 라인 추종을 위해 적외선 센서 5조가 전면 센서 보드에 있다. 로봇의 주행 방향 제어는 두 개의 스테핑 모터의 속도 제어를 통해 이루어진다. 두 바퀴의 속도차로 인해 로봇의 주행 곡률이 결정되어 방향 제어가 가능해진다. 이러한 방법은 전형적인 두 바퀴 이동 로봇의 방향 제어 방법이다.

그림 3은 M-04의 라인 추종 시뮬레이션을 위한 기구학적 파라미터들을 표시하였으며 표 1은 각 파라미터에 대한 설명을 나타내었다.

표 1. 이동 로봇의 기구학 파라미터
Table 1. Kinematics parameters for modeling.

err	추종 목표점과 센서 중앙과의 오차
Φ	이동 로봇의 각 오차
d	이동 로봇의 거리 오차
T	두 바퀴 사이의 거리
L	센서부와 회전축과의 거리

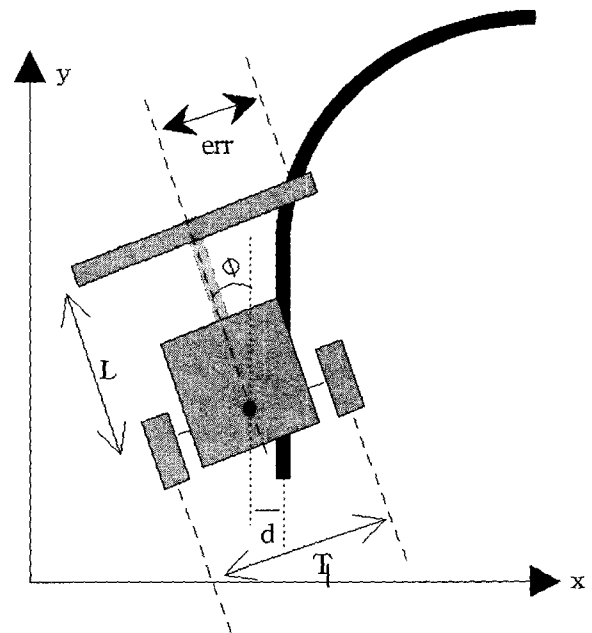


그림 3. 이동 로봇의 기구학 모델링
Fig. 3. Kinematics modelling of Mobile Robot

로봇 중심에서의 선속도와 각속도는 다음과 같이 구해진다.

$$v = \frac{V_R + V_L}{2} \quad (1)$$

$$w = \frac{V_R - V_L}{T}$$

라인 추종 이동 로봇에서 T와 L이 추종 성능에 미치는 영

향력은 매우 크다. 이에 대한 영향을 확인하기 위해 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 확인하였다.

3. 퍼지 라인 추종 제어기

라인 추종을 위해서 변수 e와 de에 대해 그림 4와 같은 멤버십 함수를 구성하고 퍼지화(fuzzification)을 시킨다. 이때 e를 얻기 위해서 센서의 진압을 ADC를 통해 얻은 광량 값을 오차 값으로 변환하는 기법이 요구되는데 본 논문에서는 자체 개발한 가중치 부여 평균법인 WAM(Weight Average Method) [식2]를 제안한다.

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (\text{단, } e \neq \emptyset) \quad (2)$$

- e : 각 오차
- w : 센서 가중치
- v : 정규화 된 센서값
- n : 적외선 센서의 수

WAM을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 물리적인 라인과 로봇 센서 보드 중심과의 오차를 논리적인 오차로 Mapping 할 수 있다는 점이다. 이는 기존의 라인 추종 이동 로봇이 OP-AMP나 Threshold 지정을 통한 비교기 방식이라는 점에서 실제 제어 입력으로 사용할 수 있는 값의 범위가 매우 작으며, 센서의 물리적인 위치에 많은 문제가 있기 때문에 유연한 추종 성능을 구현하는데 많은 문제점이 있다. 게다가 Threshold값 사이의 순간적인 센서 값의 변화에 대해 매우 민감하기 때문에 라인 이탈이나 주행 불안 요소가 상당히 많이 있다. WAM의 경우 ADC를 이용하는 광량형 방식인데다가 평균화 기법을 이용하기 때문에 이러한 문제점들을 해결할 수 있다. 다만, 이동 로봇에 사용된 8bit MCU에서 처리해야할 양이 기존의 ON-OFF 방식에 비해서 매우 많기 때문에 고속 주행 시에 연산 시간 부족이 다소 문제가 되는 부분이다.

추종 제어기에 사용된 멤버십 함수는 그림 4, 5, 6이며 퍼지 규칙은 표 2와 같다. 식의 PD 제어기의 목표치 중심의 심한 흔들림과 수렴 과정에서 D 제어[식 3]에 따른 음의 영향을 막을 수 있도록 규칙을 설계했다.

$$\begin{aligned} V_R &= V - K_p \cdot e - K_d \cdot \dot{e} \\ V_L &= V + K_p \cdot e + K_d \cdot \dot{e} \end{aligned} \quad (3)$$

언어 변수인 'err', 'derr' 그리고 'out'의 언어항은 각각 {NB, NM, ZO, PM, PB}, {DNB, DNM, DZO, DPM, DPB}, {N5, N4, N2, N1, Z, P1, P2, P3, P4, P5} 이다. 입력 변수와 출력 변수의 멤버십 함수는 그림 4, 5 그리고 6과 같다.

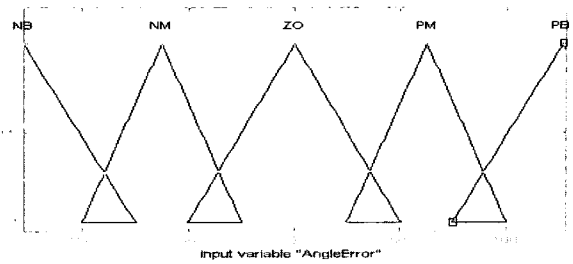


그림 4. WAM - err 에 대한 멤버십 함수
Fig. 4. A membership function of WAM - err

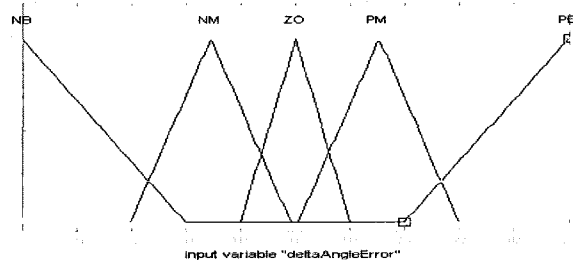


그림 5. WAM - derr 에 대한 멤버십 함수
Fig. 5. A membership function of WAM - derr

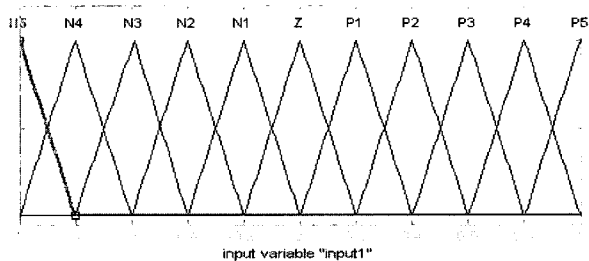


그림 6. 출력에 대한 멤버십 함수
Fig. 6. A membership function of Output

퍼지 추론 과정은 Max-Min법을 사용하였으며 비퍼지화(Defuzzification) 과정은 무게 중심법(Center of Mass)을 사용하였다. 출력 결과 값[그림 7]은 모터 속도 상수인 Kf 이다. 속도 상수 Kf를 이용한 양 바퀴 모터의 속도[식4]는 퍼지 최적 속도 제한 제어기의 입력으로 사용된다.

$$\begin{aligned} V_R &= V - K_f \cdot e \\ V_L &= V + K_f \cdot e \end{aligned} \quad (4)$$

라인 추종성 향상을 위해서는 I 제어를 추가로 요구가 되기도 한다. 특히 회전 라인의 경우 이를 추종할 때 제어기는 항상 일정 에러를 입력으로 주어지기 때문에 센서부의 정중앙으로 라인을 추종하지 못하게 된다. 따라서 I 제어를 추가함으로써 해서 에러를 적분하여 추가적인 에러를 가함으로써 추종성을 향상시킬 수도 있으나 본 연구에서는 PD 제어기만을 사용하기로 한다. I 제어로 인한 불안정한 요소가 실험 중 많이 발견되었기 때문이다.

표 2. 퍼지 라인 추종 제어기 퍼지 규칙

Table 2. Fuzzy rule of fuzzy line following controller

err derf	NB	NM	ZO	PM	PB
DNB	N5	N4	N2	P1	P3
DNM	N5	N3	N1	P2	P3
DZO	N4	N2	Z	P2	P4
DPM	N3	N2	P1	P3	P5
DPB	N3	N1	P2	P4	P5

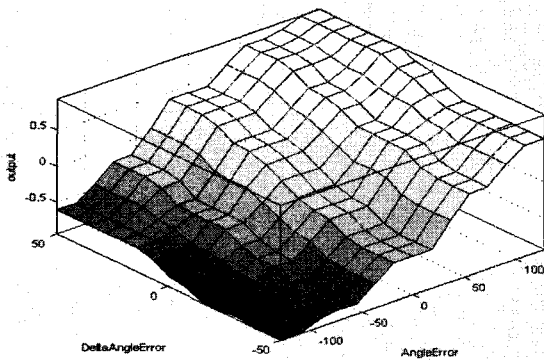


그림 7. 퍼지 라인 추종 제어기 제어 표면

Fig. 7. Control Surface of fuzzy line following controller

4. 퍼지 최적 속도 제한 제어기

이동 로봇이 빠른 속도로 추종할 시에 미끄러짐과 전복 현상을 막기 위해서 속도 제한이 필요할 수 있다. 로봇이 회전을 하게 되면 구심력이 작용하며, 이로 인한 관성으로 원심력을 로봇 자체가 받게 됨으로 해서 로봇에 작용하는 여러 힘들이 바깥쪽 바퀴 접촉점을 기준으로 작용하는 모멘트의 영향으로 안쪽 바퀴가 뜨게 됨으로서 전복 또는 마찰력 부족으로 인해 미끄러지게 된다. 고속의 회전일수록 회전 각속도가 커지고 따라서 법선 가속도의 영향으로 인한 영향이 커지므로 속도 제한을 통해 위험 요소를 제거할 수가 있게 된다. 이러한 속도 제한 조건을 구하기 위해 로봇에 작용하는 힘의 작용을 <식 5>와 같은 제한 조건을 구할 수 있다. 이 때 실제 제한 속도는 로봇의 마찰력과 질량, 무게 중심의 높이 등의 예도 사용된 모터의 구동 능력(해당 속도에 따른 토크)에 따라 결정된다. 본 연구에서 사용된 로봇 M-03의 경우 스테핑 모터를 이용하였으며 스테핑 모터의 경우 고속 회전 시에 토크 특성이 급격히 떨어지는 것을 감안하여 급격한 회전에 탈조가 나지 않는 수준의 속도를 제한 조건으로 하였다. 본 연구에서 사용한 스테핑 모터는 Shinano Kenshi 사의 SST42HD1100 이다. 그림 8과 그림 9는 각각 속도 제한기의 입력(양 바퀴 속도)과 출력(제한 속도)에 대한 멤버십 함수이며, <표 3>은 퍼지규칙, 그림 10은 제어면을 나타내었다.

$$vw \leq \sqrt{(\mu mg)^2 - A_m^2} = R_{m1}$$

$$vw \leq \frac{L}{2h} g = R_{m2}$$

$$vw \leq R_m = \text{MAX}(R_{m1}, R_{m2}) \quad (5)$$

- v : 로봇의 속도
- w : 로봇의 회전 각속도
- u : 바퀴와 지면 사이의 마찰계수
- m : 로봇의 질량
- h : 질량 중심의 높이

식 5의 제한 조건을 만족시키는 제한 영역을 실시간으로 계산하여 로봇에 적용하기에는 많은 연산 능력이 요구된다. 따라서 실제 로봇에 이러한 제한 조건을 적용하기에는 퍼지 제어를 이용하게 되면, 더욱 빠른 시간 내에 제한 조건을 만족하는 속도를 구할 수 있게 된다.

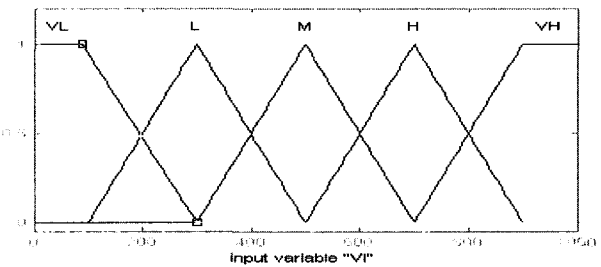


그림 8. 최적 속도 제한기의 입력 퍼지 집합

Fig. 8. Input fuzzy set of optimizing velocity controller

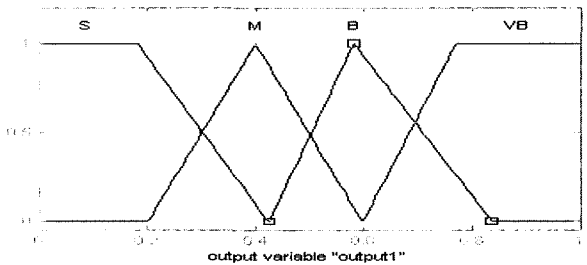


그림 9. 최적 속도 제한기의 출력 퍼지 집합

Fig. 9. Output fuzzy set of optimizing velocity controller

표 3. 최적 속도 제한기 퍼지 규칙

Table 3. Fuzzy rule of optimizing velocity controller

Vr Vl	VL	L	M	H	VH
VL	VB	VB	VB	OM	S
L	VB	VB	VB	OM	OM
M	VB	VB	VB	B	B
H	OM	OM	B	VB	VB
VH	S	OM	B	VB	VB

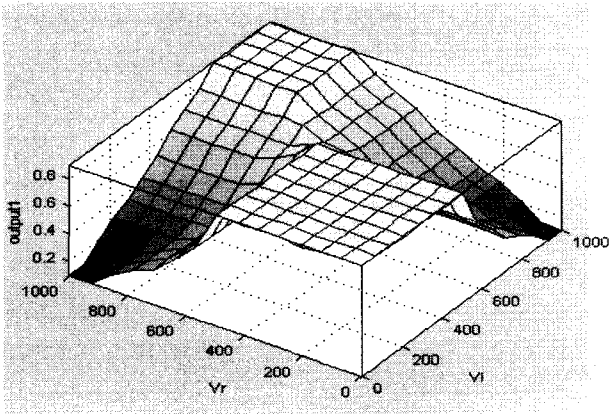


그림 10. 퍼지 속도 제한기 제어 표면
Fig. 10. Control surface of optimizing fuzzy velocity controller

5. 실제 구현 및 결과

퍼지 라인 추종 제어기의 성능 확인을 위해 실제 검정색 바탕에 흰색으로 구성된 라인을 구성하여 주행 했을 때 로봇의 위치 변화를 확인하였다. 로봇에 RF 무선 통신 기능을 장착하고 이를 PC에서 RS-232C 시리얼 통신으로 수신 후 그 데이터를 이용하여 경로를 생성하였다. 그림 11과 같이 정확한 라인 추종 성능을 보여주고 있음을 확인 할 수 있다.

이와 동시에 기준 속도를 설정한 후 주행했을 시에 회전 시에 퍼지 최적 속도 제한기에 의해 감속하여 회전함을 확인 할 수 있었다.

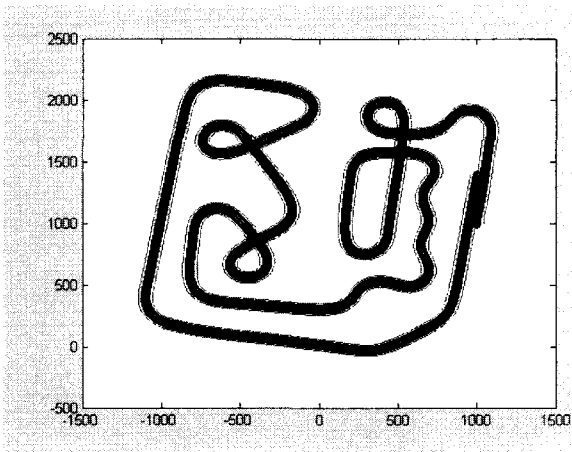


그림 11. 퍼지 제어기를 이용한 주행 결과
Fig. 11. Result of robot tracing using fuzzy controller

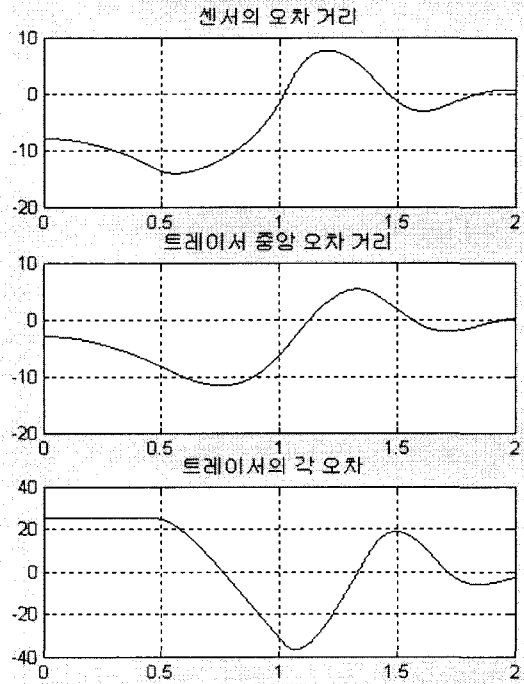


그림 12. 잘못된 퍼지 제어기를 이용한 주행 결과
Fig. 12. Performance of tracing using wrong fuzzy controller

퍼지 라인 추종 제어기는 기존의 PD 제어기를 퍼지 제어기로 구현한 형태이기 때문에 여기서 사용한 퍼지 집합은 PD 제어기 상수인 K_p , K_d 를 결정하게 된다. 일반적인 PD 제어기를 사용할 때 K_p 와 K_d 상수 결정에 따라서 제어기의 안정성과 성능이 결정이 되는데 그림 12는 불안정한 라인 추종 성능을 보인 경우이며, 그림 13은 안정되고 빠른 추종 성능을 보이는 제어기를 나타낸다. 본 연구에서는 이렇게 시뮬레이션을 통해 얻은 상수값을 기반으로 퍼지 집합을 결정함으로써 해서 퍼지 제어기의 신뢰성을 확보하도록 노력했다. 이러한 라인 추종 제어기를 시뮬레이션 하는 프로그램을 작성하기 위해 앞서 언급한 이동 로봇의 기구학 모델링을 이용하였다.

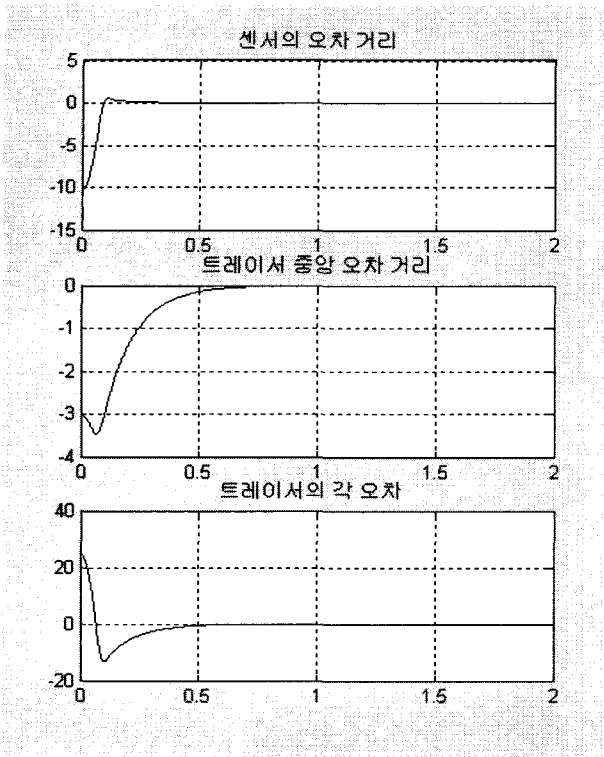


그림 13. 올바른 퍼지 제어를 이용한 추종 성능
 Fig. 13. Performance of tracing using good fuzzy controller

6. 결론 및 향후 연구 과제

본 논문에서는 퍼지 제어를 이용한 추종 제어기 및 속도 제어를 구성하였고 이를 이용하여 라인 추종 로봇에 적용하여 보았다. 물론 이러한 제어기는 퍼지 제어를 사용하지 않더라도 구현할 수 있으며 본 논문에서와 같이 두 개의 제어를 이용하지 않고 한 개의 제어기로도 원하는 성능을 발휘하도록 설계할 수도 있을 것이다. 이는 퍼지 제어가 전문가적인 룰 기반 특성을 가지기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 이러한 제어를 분리해서 구성하여 각각의 성능을 확인해보았으며 퍼지 제어기의 비선형 시스템의 제어 성능을 확인할 수 있었다. 또한 미지의 환경에서의 이동 로봇의 퍼지 추종 제어기 적용이 매우 효과적임을 보여주었다.

이동 로봇이 점차 인간 친화적인 로봇 시스템의 플랫폼으로서 이용하기 위해서는 인간 거주 환경과 같이 복잡한 환경 속에서도 그 성능을 충분히 발휘할 수 있어야 한다. 퍼지 제어기는 그러한 복잡한 상황에서도 적절하게 원하는 결과를 제공할 수 있으며, 향후 이와 연관된 연구가 계속 이루어져야 한다.

참고 문헌

[1] Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tasi Sun, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing", Prentice-Hall International, Inc, 1997
 [2] 김용수, "MATLAB 입문과 활용", 높이깊이, pp

15-367, 2002
 [3] 이상배, "퍼지-뉴로제어 시스템", 교학사, pp. 3-108, 1999.
 [4] 김은석, 주기세, "퍼지를 이용한 자율이동로봇의 이동경로 추종", 한국정밀공학회지 제17권 제5호, 2000.
 [5] 강훈, 심귀보, "지능 정보 시스템", 대영사, pp 1-60, 2001.
 [6] 김종환, "로봇축구 시스템", 대영사, 2000
 [7] 변증남, "퍼지 논리 제어", 홍릉출판사, 1997

저 자 소 개



이원호(Won-Ho Lee)
 1998년~현재 : 부경대학교 메카트로닉스
 자동화정보공학과 4학년
 재학
 2004년~현재 : 삼성소프트웨어멤버십 14기
 관심분야 : Embedded System, Robotics,
 Image Processing

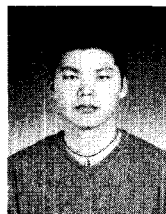
Phone : 019-507-2784
 Fax : 051-636-1544
 E-mail : apursuer@dreamwiz.com



이형우(Hyung-Woo Lee)
 1999년~현재 : 부경대학교 제어계측공
 학과 3학년 재학
 2004년~현재 : 삼성소프트웨어멤버십 14기

관심분야 : Embedded System, Robotics,
 Image Processing
 Phone : 011-9263-1018

Fax : 051-636-1544
 E-mail : ispade99@hotmail.com



김상헌(Sang-Heon Kim)
 1997년~현재 : 동명정보대학교 컴퓨터 공
 학과 4학년 재학
 2004년~현재 : 삼성소프트웨어멤버십 14기

관심분야 : Embedded System, Robotics,
 Image Processing
 Phone : 011-9904-1143

Fax : 051-636-1544
 E-mail : honey1321@nate.com



정재영 (Jae-Young Jung)

1998년~현재 : 동명정보대학교 메카트로
닉스공학과 4학년 재학

2004년~현재 : 삼성 소프트웨어 멤버십
14기

관심분야 : Embedded System, Robotics,
Image Processing

Phone : 010-2569-2230

Fax : 051-636-1544

E-mail : jjy11200@hanmail.net



노태정 (Tae-Jung Lho)

1992년 : 한국과학기술원, 정밀기계공학 박사

1999년~현재 : 동명정보대학교 공과대학
메카트로닉스공학과 조교수

1986~1999년 : (주)삼성중공업 기전연구소

관심분야: 반도체/FPD 물류자동화, 산업용
로봇, Microprocessor 응용, 플랫폼 제어

E-mail : tjlho@tit.ac.kr