

퍼지를 이용한 Vehicle의 조향각 및 속력을 고려한 충돌회피 제어

우지민*, 김훈모**

A Control for Obstacle Avoidance with Steering and Velocity of a Vehicle Using Fuzzy

Jimin Woo*, Hunmo Kim**

ABSTRACT

In this paper, we present an ultrasonic sensor based path planning method using fuzzy logic for obstacle avoidance of an intelligent vehicle in unknown environments. Generally, Robot navigation in unknown terrains is a very complex task difficult to control because of the great amount of imprecise and ambiguous sensor information that has to be considered. In this case, fuzzy logic can satisfactorily deal with such information in quite efficient manner. In this study, we propose two fuzzy logic controller which is composed of steering controller and velocity controller respectively. Our object is to develop a fuzzy controller that can enable a mobile robot to navigate from a start point to a goal point without collisions, in the least possible travel time. The ability and effectiveness for the proposed algorithm will be demonstrated by simulation and experiment.

Key Words : Path Planning (경로계획), Obstacle Avoidance (장애물회피), Intelligent Vehicle (지능형 vehicle), Fuzzy Logic Controller (퍼지논리 제어기)

1. 서론

이동로봇이 다양한 형태의 작업공간에서 임무를 수행하기 위해서는 목표점 도달과정에서 장애물을 인식하고 이를 피해갈 수 있는 경로계획(path planning)이 필요하다. 이동로봇의 경로계획에 관한 연구는 크게 주행환경에 대한 정보가 주어진 경우와 미지의 환경에서의 두가지로 구분할 수 있다.^(1,2,3,4,5) 주행 환경에 대한 정보가 주어진 경우의 이동로봇 주행에 관한 문제는 이미 많은 연구가 이루어진 상태이나 미지의 환경에서 이동로봇의 주행

에 관한 문제는 아직 효율적으로 검증되고 있지 않다. 그 이유는 미지의 환경에서 이동로봇이 환경을 인식하기 위해서는 많은 양의 부정확하고 애매모호한 센서 데이터를 고려해야 하는데 이를 이용한 알고리즘이 매우 복잡하고 만들어진 알고리즘 또한 유연성을 갖기가 어렵다는 여러 가지 문제점들 때문이다.

이러한 일련의 문제들을 해결하기 위한 수단으로 1990년 이래로 복잡한 이동로봇의 경로 계획 알고리즘에 인간의 지능구조를 이용한 인공지능을 적용시키는 연구가 증대되고 있다.^(6,7,8,9)

* 성균관대학교 대학원 기계설계학과

** 성균관대학교 기계공학부

이들 가운데에서 퍼지 논리 제어기(fuzzy logic controller)는 부정확하고 애매모호한 데이터의 처리와 기존의 수학적 모델에 의해 해결하기가 어려운 복잡한 경로계획문제에 인간의 경험적인 지식을 이용한다는 점과 실시간 결정(real-time decision) 능력 등의 여러 가지 장점들이 있기 때문에 실시간 자율 행동 결정능력(autonomous behavior decision ability)이 필수적인 미지의 환경에서 이동로봇의 경로계획 문제에 다양하게 적용되어 왔다. Kai-Tai Song⁽⁷⁾은 이동로봇의 주행을 위한 모터의 상대속도 제어에 퍼지 논리를 적용하였으며 이를 이용하여 간단한 장애물 회피에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. B.R. Beom⁽⁸⁾등은 복잡한 환경인식을 위해서 인공신경망을 이용하여 몇 가지의 장애물의 패턴을 학습시키고 이를 이용하여 장애물 회피문제에 퍼지 제어를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그러나 이들이 장애물 회피문제를 위해 사용한 퍼지 제어기는 장애물 회피를 위해 고려할 많은 입·출력 변수들을 하나의 제어기를 통해 구축하였기 때문에 규칙이 매우 복잡하여 퍼지 규칙 수정이 어렵다는 단점이 있다. 또, B. Beaufre⁽⁹⁾등은 목표점 도달(reaching a goal)과 장애물 회피문제에 각각 퍼지 논리를 적용하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 그러나 이들에 의해 제시된 퍼지 논리 제어기는 작업환경에서 이동로봇의 주행시에 로봇의 속력을 고려하지 않아 전역적인 경로계획 과정에서 작업공간이 넓을 경우 주행시 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 본 논문에서는 미지의 환경에서의 이동로봇의 목표점 도달과 장애물 회피를 위한 실시간 충돌 회피 경로계획에 이동로봇의 조향각과 속력을 고려한 병렬구조의 퍼지 제어기를 각각 독립적으로 구축하고 목표점 도달을 위한 주행 과정에서 로봇속도의 가·감속을 통한 주행시간 단축을 기하려 한다. 본 논문은 2장에서는 실험을 위해 제작한 지능형 Vehicle 시스템의 구조 및 특징에 대하여 설명하였으며, 3장에서는 퍼지 논리를 이용한 경로계획문제를 설명하였다. 4장에서는 구축된 퍼지 제어기를 통한 모의 시뮬레이션에 대하여, 5장에서는 실제주행실험을 통한 결과를 나타내었다.

2. 지능형 Vehicle 시스템

2.1 기구학 모델

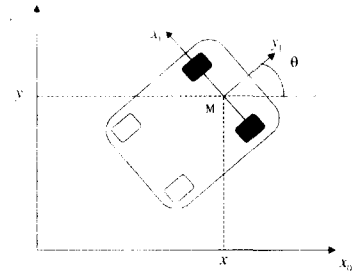


Fig. 1 Coordinates of the vehicle

본 논문에서 고려하는 vehicle은 상단부에 2개의 구동바퀴(driving wheel)와 하단부에 2개의 보조바퀴(free wheel)를 지닌 4바퀴 2 자유도(4 wheeled 2 DOF) 형태의 이동로봇이다. 구동바퀴는 두 개의 모터를 사용하였고 이들의 상대 속도를 제어함으로써 이동로봇을 구동할 수 있다. Fig. 1에서 좌표계(x0,y0,z0)는 이동로봇의 절대위치를 지정하는 기준 좌표계(reference coordinate)이며 두 개의 구동바퀴의 중앙의 점 M에 이동로봇의 몸체좌표계(object coordinate) (x1, y1, z1) 이동로봇은 x-y평면상에서 이동하므로 위치와 방향을 표시하려면 두 개의 위치변수 x, y와 방향변수 theta가 필요하다. 두 구동바퀴에 각각 인크리멘탈 인코더(incremental encoder)를 사용하므로 이동로봇은 직접 기준좌표계의 절대 위치를 추종할 수는 없고 기준 좌표계로부터 몸체 좌표계까지의 상대 좌표로 제어된다. 이러한 이동로봇시스템은 인코더 정보만을 이용하여 제어 입력을 발생하게 되므로 제어입력 구성과정은 인코더의 정보를 이용하여 이동로봇의 자세와 속도를 추정하는 추측항법(dead reckoning) 과정을 필요로 한다.

Δ_R 과 Δ_L 은 샘플링주기(sampling period) 동안 변화한 각 바퀴의 주행거리라 하고 Δ_θ 를 샘플링 주기 (δ) 동안의 이동로봇의 방향변화라고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Delta_R = 2\pi \cdot R \cdot \frac{z_R}{P \cdot G} \quad (1)$$

$$\Delta_L = 2\pi \cdot R \cdot \frac{z_L}{P \cdot G} \quad (2)$$

$$\Delta\theta = \frac{\Delta R - \Delta L}{W} \quad (3)$$

여기서, P 는 인코더(encoder)의 1회전당 펄스 수, G 는 기어의 비례상수, z_R 과 z_L 은 δ 시간 동안의 각 바퀴의 인코더 펄스 수 그리고 W 는 이동로봇의 폭을 나타낸다. 위의 수식으로부터 이동로봇의 선속도와 회전속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \frac{(\Delta R + \Delta L)}{2\delta}, \quad \omega = \frac{\Delta\theta}{\delta} \quad (4)$$

여기서, 임의의 시간에서의 vehicle의 자세벡터의 각 성분은 다음과 같다.

$$\theta = \theta_{old} + \Delta\theta \quad (5)$$

$$x = x_{old} + \frac{(\Delta R + \Delta L)}{2} \cos(\theta_{old} + \frac{\Delta\theta}{2}) \quad (6)$$

$$y = y_{old} + \frac{(\Delta R + \Delta L)}{2} \sin(\theta_{old} + \frac{\Delta\theta}{2}) \quad (7)$$

여기서 $(x_{old}, y_{old}, \theta_{old})$ 는 δ 시간 이전의 이동로봇의 자세이다.

2.2 전체 시스템의 구성

본 논문에 사용된 vehicle 시스템의 전체 구성은 대략적으로 Fig. 2와 같다. 제작한 vehicle 시스템은 크게 vehicle 구동시스템과 초음파 센서시스템, 컴퓨터 시스템으로 나뉜다. Vehicle을 구동하기 위한 구동시스템은 모터부와 모터를 구동하기 위한 서보 드라이버로 구성되어 있으며 구동모터는 50W DC brushless 모터이며 기어비 15의 기어박스를 붙여서 사용하였다. 자기위치인식을 위하여 2048p/r의 인코더를 사용하였다.

주행환경을 인식하기 위한 센서로는 Fig. 3과 같이 vehicle의 전면부에 12°의 빔각을 갖는 Polaroid 초음파센서 8개를 장착하여 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 센서의 개수가 많을수록 근거리에서 더 정확한 환경인식이 가능하나 측정시간이 오래 걸려실시간성이

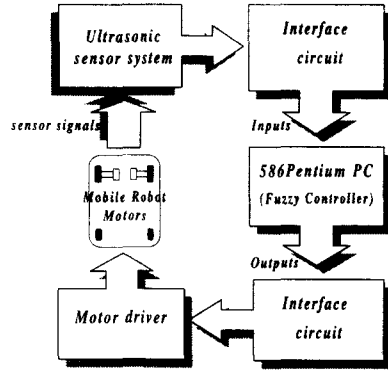


Fig. 2 Overall system structure

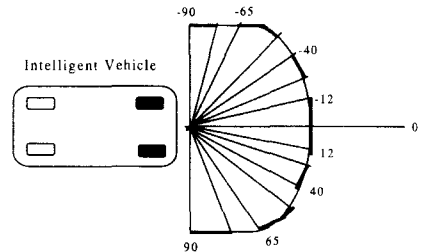


Fig. 3 Perception area by ultrasonic sensors

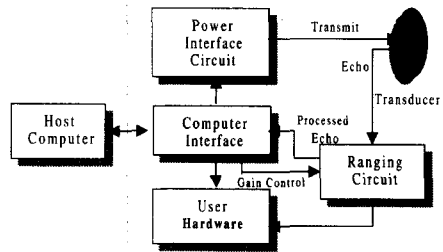


Fig. 4 Block diagram of ultrasonic sensor system

저하되므로 센서의 수를 제한하였다. Fig. 4는 센서 unit의 블록다이어그램으로 0.15 ~ 10.7m 거리에 있는 장애물을 측정할 수 있다. 센서의 신호처리와 모터제어를 위한 상위제어기로서는 586 pentium PC를 사용하였다. 센서 입력값에 대한 정보를 기초로 PC에 구현된 퍼지 제어 알고리즘을 수행하고 이동로봇의 속도와 조향각을 결정하기 위해 각각의 모터에 제어신호를 보낸다. 센서신호 입력과 모터의 제어출력 등을 위해 A/D, D/A, DIO multi-function card를 사용하였다.

Fig. 5는 제작된 Vehicle System의 사진이다.

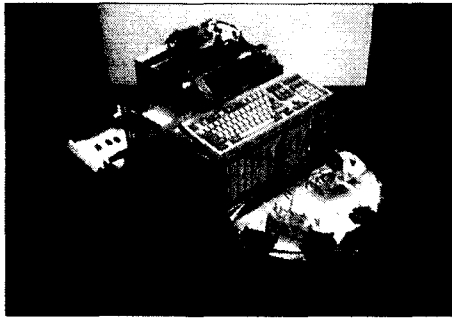


Fig. 5 Front view of vehicle system

3. 퍼지제어기를 이용한 경로계획

이동로봇의 주행은 최종목표점까지 도달하기 위한 일련의 중간목표점(sub goal)까지의 이동과정이라 할 수 있다. 이 과정에서 필요한 현재위치 파악 및 장애물 인식과 회피동작을 위하여 퍼지 제어기를 사용하였다. Fig. 6은 퍼지 제어기를 이용한 전역적 관점에서의 경로계획과정을 나타낸다.

본 논문에서 제안된 퍼지 제어기에는 주행의 효율성을 높이기 위하여 이동로봇의 주행중 가속을 고려하였다. 즉, 목표점으로 주행시에 장애물이 검출되지 않은 경우 이동로봇은 퍼지 규칙에 의하여 속도를 증가시켜 가고 장애물이 검출되면 속도를 줄여서 주행시간의 단축을 도모하려 하는 것이다. Fig. 7은 주행문제를 나타내는 기하학적 형상이다. 즉, 퍼지 제어기 설계시 고려하는 입·출력 테

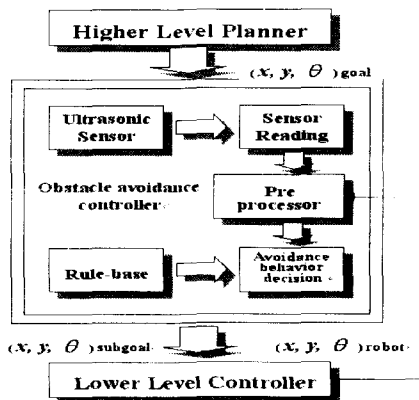


Fig. 6 Global path planner using fuzzy controller

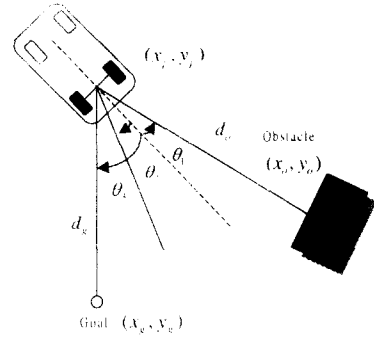


Fig. 7 Geometrical figure considering path variables

이터를 나타낸다. 이러한 입·출력 데이터는 목표점 도달과 장애물 회피의 모든 과정을 고려하여 선정되었다.

여기서 d_g 는 이동로봇으로부터 목표지점까지의 거리 (distance from the robot to the goal)이고 d_o 는 로봇으로부터 장애물까지의 거리(obstacle distance), θ_1 은 로봇에서 바라본 장애물까지의 각도 (obstacle angle), θ_2 는 이동로봇의 조향각(steering angle), θ_3 는 로봇을 기준으로 한 목표지점까지의 각도(error angle)이다. 전역적인 경로계획과정에서 장애물이 감지되면 θ_2 를 변화시켜 θ_1 을 크게 해야한다. 장애물을 회피한 후에는 θ_3 를 작게 하여 목표점으로 접근한다. 이러한 주행기법을 퍼지 제어기를 이용하여 구현할 수 있다.

본 논문에서는 퍼지 규칙 수정과정을 용이하게 하기 위해서 속력과 조향각을 각각 고려한 2개의 퍼지 제어기를 설계하였다. Fig. 8은 제안된 두 개의 퍼지 제어기의 입·출력관계를 나타낸다.

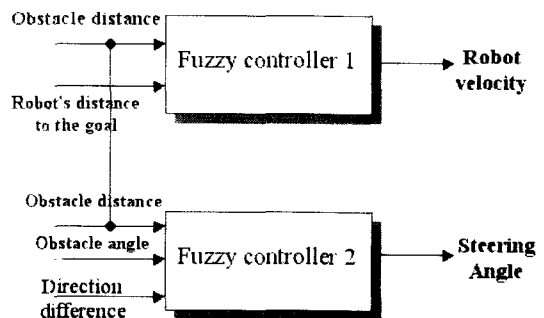


Fig. 8 I/O relations for fuzzy controller

본 논문에서 2개의 퍼지제어기에 사용된 언어 변수는 다음과 같다.

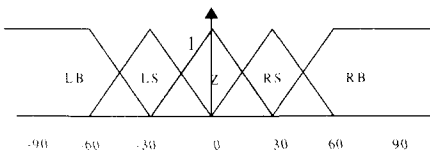
- LB(Left Big), LS(Left Small)
- RB(Right Big), RS(Right Small)
- F(Fast), M(Medium), S(Slow), VS(Very Slow)
- N(Near), RE(Regular), FA(Far)
- Z(Zero)

Table 1은 속도와 조향각 퍼지제어기의 출력값에 대한 언어적인 표현과 범위를 나타내었다.

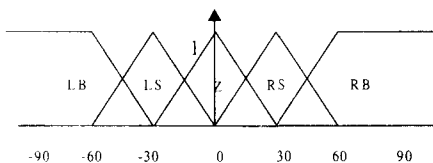
Table 1 Linguistic expression and range for steering angle and velocity

steering angle	range (rad)	velocity	range (m/sec)
LB	-0.52 ~ -0.18	Z	0
LS	-0.35 ~ 0	VS	0 ~ 0.06
Z	-0.18 ~ 0.18	S	0.03 ~ 0.09
RS	0 ~ 0.35	M	0.06 ~ 0.12
RB	0.18 ~ 0.52	F	0.09 ~ 0.15

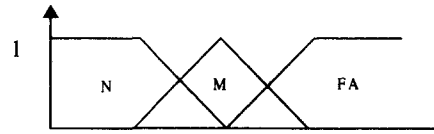
위에 설정된 언어변수로 만들어진 각각의 입·출력 변수에 대한 소속함수를 Fig. 9에 나타내었고, Table 2에 조향을 위한 퍼지제어기의 제어규칙의 일부를 예로서 나타내었다.



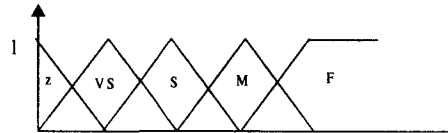
(a) Obstacle angle



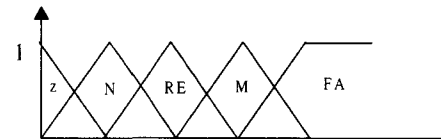
(b) Error angle



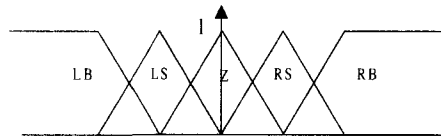
(c) Obstacle distance



(d) Distance from robot to the goal



(e) Vehicle velocity



(f) Vehicle steering angle

Fig. 9 Membership function for input & output of fuzzy controller

Table 2 Fuzzy control rule base

steering angle	error angle				
	LB	LS	Z	RS	RB
obstacle angle	LB	LS	Z	RS	RS
	LS		Z		
	Z			Z	
	RS	LB	LS		
	RB			Z	

(case 1 : obstacle distance = FA)

4. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 퍼지 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 실험에 앞서 vehicle의 모의 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Turbo C++3.0을 사용하였으며 시뮬레이션 환경은 가로 300 세로 350으로 설정하였고 초음파센서에 의한 최대 거리측정범위는 vehicle의 크기의 5배로 설정하였다. vehicle의 한쪽 바퀴의 최대 선속도는 0.15m/s이며 시뮬레이션을 위해 vehicle의 두 구동 바퀴는 지면과의 미끄러짐(Slip)이 없고 조향을 할 때에도 미끄러짐이 없는 속도차를 가지고 조향을 한다고 가정하였다. 또 주행환경인식을 위한 vehicle의 전방향 초음파센서 데이터는 모두 검출 가능하다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 초기에 vehicle의 목표지점이 정해지면 현재위치를 기

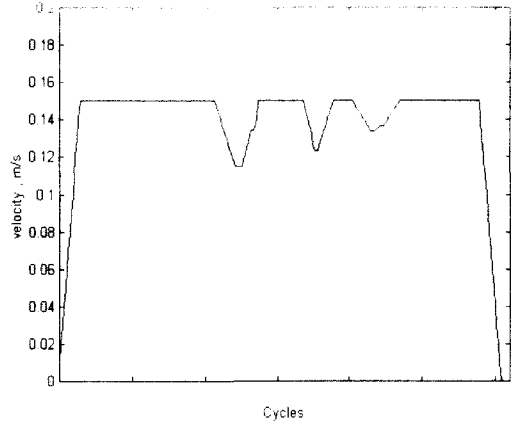


Fig. 11 Vehicle's navigation velocity

준으로 목표지점까지의 거리와 vehicle의 중심축에서 목표지점까지의 각도를 결정하게 되고 목표지점까지의 거리와 각도를 최소화하기 위한 주행이 시작된다. 이러한 전역적인 경로계획 과정에서 장애물이 발견되기 전까지는 vehicle은 속도를 최대한로 증가시켜 가다가 장애물이 발견됐을때는 구동 바퀴의 속도를 줄여가며 이들의 상대속도 차이에 의해 조향을 하게 되고 장애물 회피 후 다시 속도를 증가시키게 된다. 속도제어를 위한 퍼지 제어기에 사용된 제어규칙은 총 12개이고 조향각 제어를 위한 퍼지 제어기에 사용된 제어규칙은 총 55개이다. Fig. 10은 임의의 주행환경에서의 vehicle의 주행시뮬레이션 결과이다. Fig. 11은 Fig. 10 (b)에 나타난 시뮬레이션 과정에서 vehicle의 속도변화에 대한 결과이다. 위에 제시된 시뮬레이션 결과에서와 같이 제안된 퍼지 알고리즘을 통해서 vehicle은 장애물과의 충돌없이 목표지점까지 도달 가능하며 주행과정 중 가속·감속을 고려함으로써 주행시간 단축이 가능함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 Simulation results for vehicle's autonomous navigation

5. 주행실험

제안된 vehicle의 자율주행을 위한 퍼지제어의 성능을 검증하기 위하여 구축된 퍼지제어 규칙을 바탕으로 제작한 vehicle시스템의 간단한 주행실험을 수행하였다. 주행실험은 5 × 10m의 실내환경에서 수행하였으며 주행시 vehicle의 조향과정에서 바퀴의 미끄러짐에 의한 방향오차를 최소화하기 위

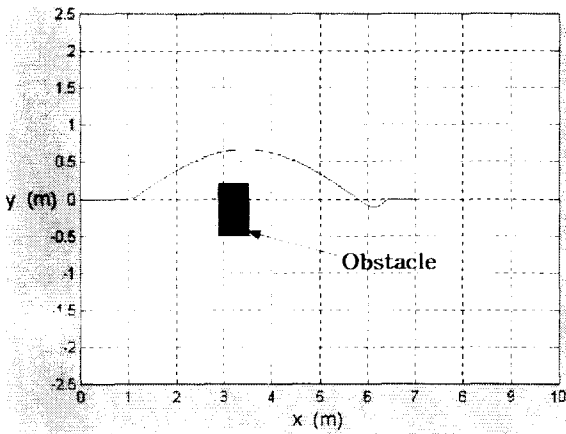


Fig. 12 Experimental result for simple obstacle avoidance

하여 각 바퀴의 최대 선속도를 0.15m/s로 제한하였다. 퍼지 제어를 위한 제어주기(sampling period)는 100Hz이며 장애물의 인식을 위한 초음파센서의 최대 측정거리는 2m로 최소측정거리는 40cm로 설정하였다. Fig. 12는 단일 장애물 회피에 대한 주행 실험결과를 나타낸다. 직선경로 주행과정중 초기에 초음파센서로부터 장애물까지의 거리가 측정되면 조향각 퍼지 제어기에 의해 장애물 회피과정이 시작되고 초음파센서로 이후에 목표지점까지의 거리와 각도를 최소화하기 위한 보상이 시작된다. Fig. 12에 나타난 실험결과에서는 각 바퀴의 최대 선속도를 최대한으로 줄여 목표계적으로의 복귀를 보여 주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 미지의 환경에서 초음파센서를 이용한 이동로봇의 경로계획 문제에 퍼지제어기를 사용하여 시뮬레이션과 주행실험을 수행하였다. 결과적으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 퍼지제어기는 미지환경에서 복잡한 이동로봇의 경로계획문제에 인간의 정성적이며 경험적인 지식을 이용하므로 효율적인 제어시스템의 구현이 가능하다.

- 2) 경로계획과정에서 환경에 대한 다중 입력에 대해 조향과 속도에 대한 병렬구조의 퍼지제어기를 설계하였으므로 퍼지 규칙 수정시에 수정이 용이하다는 장점이 있다.
- 3) 전역적인 경로계획 과정 중에 이동로봇의 가감속을 고려한 속도퍼지 제어기를 설계하였으므로 작업공간이 넓은 경우 주행시간을 단축할 수 있으리라 기대된다.
- 4) 차동식 이동로봇의 조향과정에서 바퀴의 미끄러짐으로 인해 위치오차와 방향오차가 커지므로 이를 방지하기 위하여 정확한 방향측정을 위한 여분의 바퀴를 이용하는 방법이나 좀 더 정확한 환경인식이 가능한 센서들의 사용을 통한 방법이 필요할 것이라고 생각된다.

향후의 연구과제로는 장애물의 정확한 위치나 형상측정이 어려운 초음파센서를 보완하기 위해 이미지 센서등의 비전시스템을 병용하여 복잡한 환경에 대한 인식능력을 향상시키고, 실제 산업현장과 같은 동적환경에 적용할 경우 정지해 있는 장애물 뿐만 아니라 움직이는 장애물도 존재하므로 제어기의 유연성을 높이기 위해서 이동장애물의 회피문제를 고려하여야 하겠다.

참고문헌

1. Elfes, A., "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, pp. 249-265, June 1987.
2. H. P. Moravec, A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, Washington DC, pp. 116-121, 1985.
3. O. Khatib, "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulator and Mobile Robot," The Int. J. Robotics Research, Vol. 5, No. 1, Spring, 1986.
4. J. Borenstein, Y. Koren, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robot," IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics, Vol. 19, No. 5, pp. 1179-1187, 1989.
5. J. Borenstein, Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Journal Robotics and Automation,

- Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, 1991.
6. T. Takeuchi, Y. Nagai, & Y. Enomoto, "Fuzzy Control of a Mobile Robot for Obstacle Avoidance," *Information Sciences*, 45(2), pp. 231-248, 1988.
 7. Kai-Tai Song, Jen-Chau Tai, "Fuzzy Navigation of a Mobile Robot," *Proceeding of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Raleigh, NC, pp. 621-627, July 7-10, 1992.
 8. H. R. Beom and H. S. Cho, "A Sensor-based Obstacle Avoidance Controller for a Mobile Robot Using Fuzzy Logic and Neural Network," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1470-1475, 1992.
 9. B. Beaufre and S. Zegloul, "Navigation Method for a Mobile Robot Using a Fuzzy based Method : Simulation and Experimental Aspects," *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 3, 1995.
 10. Polaroid, "Ultrasonic components," 1995.