

퍼지제어를 이용한 이동로봇의 주행법에 관한 연구

정 재 훈*, 홍 동 기*, 윤 태 혁*, 김 중 무*, 박 만 식*, 이 석 규*

A Study on Navigation Strategy of a Mobile Robot with Fuzzy Control

Jae-Hun Jung*, Dong-Ki Hong*, Tae-Hyuk Yun*, Jong-Mu Kim*, Man-Sik Park* and Suck-Gyu Lee*

ABSTRACT

This paper proposes a fuzzy algorithm for determining navigation path of an autonomous mobile robot in uncertain environment. The proposed fuzzy algorithm includes three type (MIN-TIME, ECONOMY, SAFETY) motion modes for the robot to get the ability to meet the ambiguous situation which the robot encounters. Each mode is applied to both static and dynamic environmental situation. This paper concludes by showing the efficiency of the proposed method through some computer simulation results.

Key words : Autonomous Mobile Robot (자율이동로봇), Fuzzy Control (퍼지제어), Obstacle Avoidance (장애물 회피), Navigation Strategy (주행법)

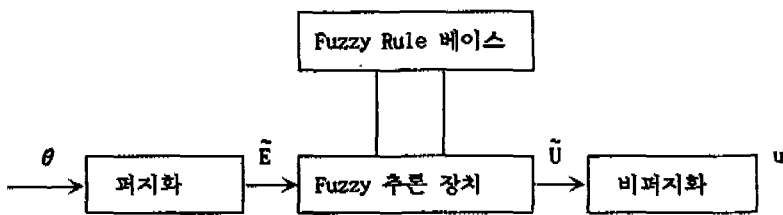
1. 서 론

현재 산업계에 실용화되고 있는 대부분의 이동로봇은 작업장 바닥에 설치된 연속적인 고정궤도를 따라서 운행되고 있다. 이러한 방식의 이동로봇은 항상 고정궤도를 감지하면서 주행하므로 위치 제어특성이 우수하여 지시된 작업 업무를 정확하게 수행 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 고정 궤도 설치에 많은 비용이 소요되고, 공정 라인의 변화에 따른 고정 궤도의 재편성 작업의 유연성이 현저하게 낮으며, 이동로봇이 자기 유도선, 광학 테이프 등을 인식할 수 있어야 만이 운행을

할 수 있으므로 고정궤도 이탈시에는 이동로봇의 정상적인 주행이 불가능하며, 돌발 사태에 대한 대응 능력이 현저하게 떨어지고, 작업장 바닥의 상태에 따라 고정 궤도를 설치하기가 불가능할 경우에는 이동로봇 주행 시스템의 설치가 곤란하다는 결점을 지니고 있다. 이와 같은 고정 궤도 방식의 단점을 극복하기 위하여, 스스로 주위 환경을 인식하고 상황에 대응한 행동을 계획하고 자율적으로 장애물을 회피하면서 주행하는 자율 행동 결정능력^{1,2)}을 갖는 고등지능 로봇에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔다.

Mikio Maeda,³⁾ T.Kasushi⁴⁾ 등은 직접 카메라를

* 영남대학교 전기공학과



\tilde{E}, \tilde{U} : Fuzzy 변수 θ : 입력 변수, u : 출력 변수

Fig. 1 Block Diagram of Fuzzy Controller

이용하여 여러 장애물을 인식하였고, 주행면에 그려진 주행라인이나 특정한 랜드 마크를 이용하여 특정 위치를 카메라로 인식하여 주행하는 방법을 제시하였다. Wei⁵⁾는 불확실한 환경에서의 이동로봇의 몇가지 주행법을 제시하였다. Gourley⁶⁾ 등은 초음파 센서와 적외선 센서를 사용하여 얻은 data를 융합하여 로봇가 빨리 주행을 할 수있는 Algorithm을 개발하였다.

본 논문에서는 초음파 센서를 사용한 경우를 가정하여, 로봇의 자율주행에 있어서 기존의 Robot control system의 여러 가지 복잡한 수식 모델의 많은 계산없이 보다 인간이 가지는 정성적 지식을 효과적으로 표현하는 Fuzzy control Algorithm을 사용하여 애매한 상황에서의 통로 넓이의 판별이나 장애물과의 충돌 회피에 있어서 보다 인간과 비슷하게 동작할 수 있도록 적용하였다. 특히 고정장애물에 대한 여러가지 경우를 고려한 algorithm을 개발하고, 이동장애물에 대해서는 장애물의 상황에 대한 로봇의 속도의 변화를 주어 보다 더 효과적인 주행을 simulation을 통하여 입증하였다.

2. 주행제어

2-1 Fuzzy제어 이론

Fuzzy제어의 특징은 논리형 제어, 병렬형 제어, 언어적 제어와 같이 3가지로 들 수 있다. 따라서 제어대상의 수식 모델을 도출하는 것이 곤란 하거나 많은 시간과 투자를 필요로 하는 경우에 유효하다.

Fuzzy제어는 멤버십 함수와 제어 Rule을 사용하여 제어 알고리즘을 구성하고 있으며, 멤버십 함수는 상식적인 범위에서 모순이 없도록 주관적으로 결정되며 제어 Rule은 숙련된 오퍼레이터의 노하우를 적극적으로 도입한 형태로 결정된다. Fuzzy제어기 형식은 Fig. 1

과 같이 4가지로 구분할 수 있지만 이것들은 상호관련이 있고, 반드시 독립되지는 않는다. Fuzzy 추론 장치는 Fuzzy rule을 이용하여 Fuzzy입력에 대한 Fuzzy 출력을 추론해내는 장치이다.

2-2 방향 결정과 장애물 회피를 위한 Fuzzy추론

본 system에서는 로봇트 전방에 초음파 센서를 부착하여 좌우 120도씩 1도 간격으로 장애물의 유무를 감지하여 로봇트의 주행을 판단하게 된다. 이때의 알고리즘은 장애물에 능동적으로 대처하여 장애물과의 충돌을 방지할 수 있어야 하며, 로봇트의 최종 목적지까지 최소한의 시간에 도달할 수 있어야 한다. 이를 위해 고정된 규칙을 설정하여 회피하는 방법보다는 fuzzy알고리즘을 이용하여 자율 이동 로봇트의 장애물회피와 예정주행 방향을 결정하게 하였다. 입력에 의한 방향변경과 장애물 회피의 일반적인 fuzzy 추론 방식은 전건부와 후건부 형식(if-then형식)을 사용해서 아래와 같이 표현된다.

Rule i: if Angle is A_i and Distance is A_j ,
then Direction is B_{ij}

A_i : sensor로 측정된 장애물에 대한 각도 (fuzzy 입력 변수)

A_j : 장애물까지의 거리 (fuzzy 입력 변수)

B_{ij} : 이동 로봇트의 조향각 (fuzzy 출력 변수)

Fig. 2는 이동 로봇트가 고정 장애물 회피를 위한 방향 결정을 할때, 현재 장애물에 대한 거리(dist)와 각도(ang)에 대한 2개의 fuzzy입력 변수와 로봇트 주행 방향에 대한 fuzzy 출력(goal line)을 간단하게 그려 놓았다. 본 논문에는 Fig. 3과 같이 삼각형법을 사용하여 membership함수를 나타내었으며, 각 변수의 Fuzzification은 더욱 세분화할 수 있지만 5 degree

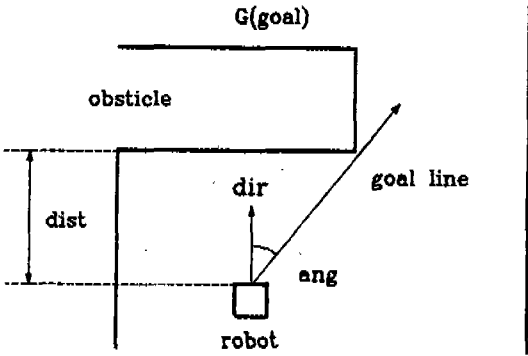


Fig. 2 Variables of Fuzzy Inference

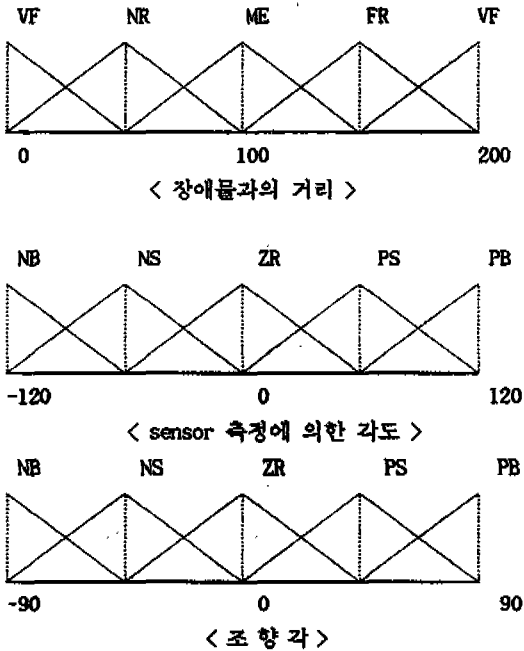


Fig. 3 Membership Function for Each Variables

로 하였다.

장애물 회피를 위한 fuzzy 제어 규칙표는 아래 Table 1에 나타내었다.

2-3 통로 넓이 판별을 위한 Fuzzy 추론

이동 로봇트가 주행시 통행에 적당하지 않은 통로를 만날수도 있다. 이때 통로의 넓이는 초음파 센서의 측정 방향에 따라서 다르게 보이기 때문에 직접 알아내기가 어렵다. 그래서 통로에 대한 이동 로봇트의 위치와

Table 1 Table of Fuzzy Rules for Navigation

거리 각도	VF	FR	ME	NR	VN
NB	LS	LS	LB	LB	LB
NS	ZO	LS	LS	LS	LB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	RS	RS	RS	RB
PB	RS	RS	RB	RB	RB

Table 2 Table of Fuzzy Rules for Finding Path

sensor의 수	Position	LEFT	FORWARD	RIGHT		
		NB	NS	FO	PS	PB
VS (1- 25)		Na	Na	Na	Na	Na
S (26- 50)		Me	Na	Na	Na	Me
Me (51- 70)		Me	Me	Me	Me	Me
B (71- 90)		Wi	Wi	Me	Wi	Wi
VB (91-120)		Wi	Wi	Wi	Wi	Wi

Na: Narrow Me: Medium Wi: Wide

통로를 통과하는 센서의 수를 입력 변수로 하는 Fuzzy 추론을 하여 통로의 넓이 (Wide, Medium, Narrow)를 판단하게 하였다. 그리고 이를 위한 Fuzzy제어 규칙표는 Table 2와 같다.

2-4 Fuzzy 추론을 이용한 이동 장애물과의 충돌 회피

장애물은 크게 두가지로 분류되는데 하나는 경로상에 위치한 고정 장애물이고 다른 하나는 이동 장애물이다. fuzzy 제어 규칙표는 아래 Table 3에 나타내었다.

고정 장애물의 경우는 방향 결정과 장애물 회피를 위한 fuzzy 알고리즘을 이용하여 회피 동작을 하고, 이동 장애물일 경우는 이동 장애물과의 거리와 위치를 입력으로 하여 fuzzy 추론을 하게 하였다. 두 입력 변수 중 장애물과의 거리에 대한 fuzzification은 5 degree로 하였고, 장애물의 위치에 대한 정보는 좀더 정확하여야 하므로 fuzzification을 7 degree로 하여 좀더 세분화하였다.

2-5 Fuzzy 추론을 이용한 이동 로봇트의 속도 제어

이동 로봇트가 미지의 환경을 좀더 유연하게 주행을 하기 위해서는 반드시 속도를 조절할 필요가 있다. 단순히 초음파 sensor에 의해 얻어지는 장애물과의 거리 정보에 비례해서 속도를 조절할 경우 간단한 상황에서

Table 3 Fuzzy Rules for Collision Avoidance of moving Obstacles

거리 각도	Very Near	Near	Medium	Far	Very Far
Negative Big	Positive Big	Positive Medium	Positive Small	Zero	Zero
Negative Medium	Positive Big	Positive Medium	Positive Small	Positive Small	Zero
Negative Small	Positive Big	Positive Medium	Positive Medium	Positive Small	Positive Small
Zero	Zero	Zero	Zero	Zero	Zero
Positive Small	Negative Big	Negative Medium	Negative Medium	Negative Small	Negative Small
Positive Medium	Negative Big	Negative Medium	Negative Small	Negative Small	Zero
Positive Big	Negative Big	Negative Medium	Negative Small	Zero	Zero

는 더 정확하게 조절될 수도 있으나, 본 논문에서는 여러 상황에서의 주행에도 유연한 속도로 대처 할 수 있도록 하기 위하여 fuzzy algorithm을 이용하여 보다 유연한 속도 조절을 하였다.

만약 빠른 속도로 주행중인 로봇트가 회전을 할 경우, 특히 이동 로봇트 뒤에 짐마차가 달려있을 경우에 유연한 주행을 기대하기가 어려워진다. 그래서 fuzzy 추론의 입력 변수를 goal(subgoal)line방향에 위치한 장애물에 대한 이동 로봇트의 거리와 조향각의 변화분을 첨가하여 fuzzy algorithm을 구성하였다.

이동 로봇트의 속도 제어에 이용되는 fuzzy 제어 규칙표는 Table. 4에 나타내었다.

2-6 제어 system의 전체적인 흐름

자율 이동 로봇트가 출발하기 전에 여러 상황에 적합한 motion mode를 지정해 주면 각 mode에 맞게 주행을 시작하게 된다. 초음파 sensor로 부터 주위 환경에 대한 정보를 입력받아 최종 목표 지점까지 장애물과의 충돌없이 안전하게 주행하기 위하여 각 상태에 대한 적합한 Fuzzy algorithm을 적용하여 다음 상태까지 주행을 하게 된다. Fig. 4의 전체 주행 제어 system의 중심이 되는 각 중요부분의 기능과 작동은 아래와 같다.

1) motion mode 결정

이동 로봇트의 상태와 주행 목적에 따라 motion

Table 4 Table of Fuzzy Rules for Decision of Robot speed

거리 조향각	Very Near	Near	Medium	Far	Very Far
Very Small	Slow	Slow	Medium	Fast	Fast
Small	Slow	Slow	Medium	Fast	Fast
Medium	Slow	Slow	Medium	Fast	Fast
Big	Slow	Slow	Medium	Fast	Fast
Very Big	Slow	Slow	Slow	Medium	Medium

mode를 지정해 주어야 하는데 그 종류는 다음과 같다.

SAFETY : 안전한 운동을 원하는 경우

ECONOMY : 일반적인 상황으로 정상 주행을 경우

MIN-TIME : 빨리 목표 지점에 도착해야 하는 경우

2) sensor data 처리 장치

sensor에서 처리되는 data를 fuzzy 추론 장치를 관리하는 4개의 manager unit로 보냄으로써 각각의

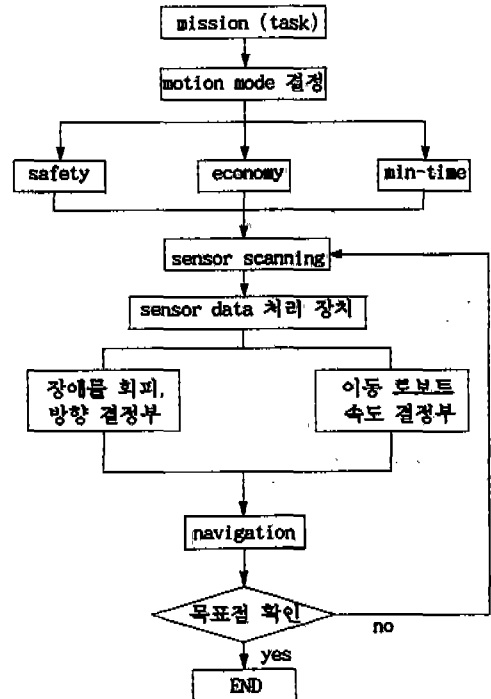


Fig. 4 Flowchart of the System

fuzzy추론을 가동시켜 이동 로봇의 방향과 속도를 결정하게 한다.

3) 장애물 회피, 방향 결정부

여기에서는 sensor data처리 장치에서 보내온 주위 환경의 정보를 이용하여 자율 이동 로봇의 주행 방향을 결정하게 된다. 그리고 주행 방향을 결정하기 위하여 통로 넓이 판단, 고정 장애물 회피, 이동 장애물 회피와 같은 3개의 fuzzy 추론 장치가 있다. 이들은 아래 Fig. 5 와 같이 구성되어 있으며 고정 장애물일 경우는 고정 장애물 회피 fuzzy 추론 장치를 이용하여 장애물 회피 주행을 하게되며, 2개 이상의 통로를 발견시

에는 통로 넓이 판단 fuzzy 추론 장치를 이용하여 통로 넓이를 결정한 다음 적당한 통로를 선택하게 된다. 그리고 이동 장애물이 측정되면, 이동 장애물 회피 fuzzy 추론 장치를 이용하여 장애물을 회피 주행하게 된다.

4) 이동 로봇 속도 결정부

여기에서는 sensor data처리 장치에서 조향각의 변화분과 거리 data를 받아들여 이동 로봇의 속도를 결정하는 장치이다.

5) Fuzzy 추론장치

Manager unit에서 보내진 정보를 가지고 fuzzy제

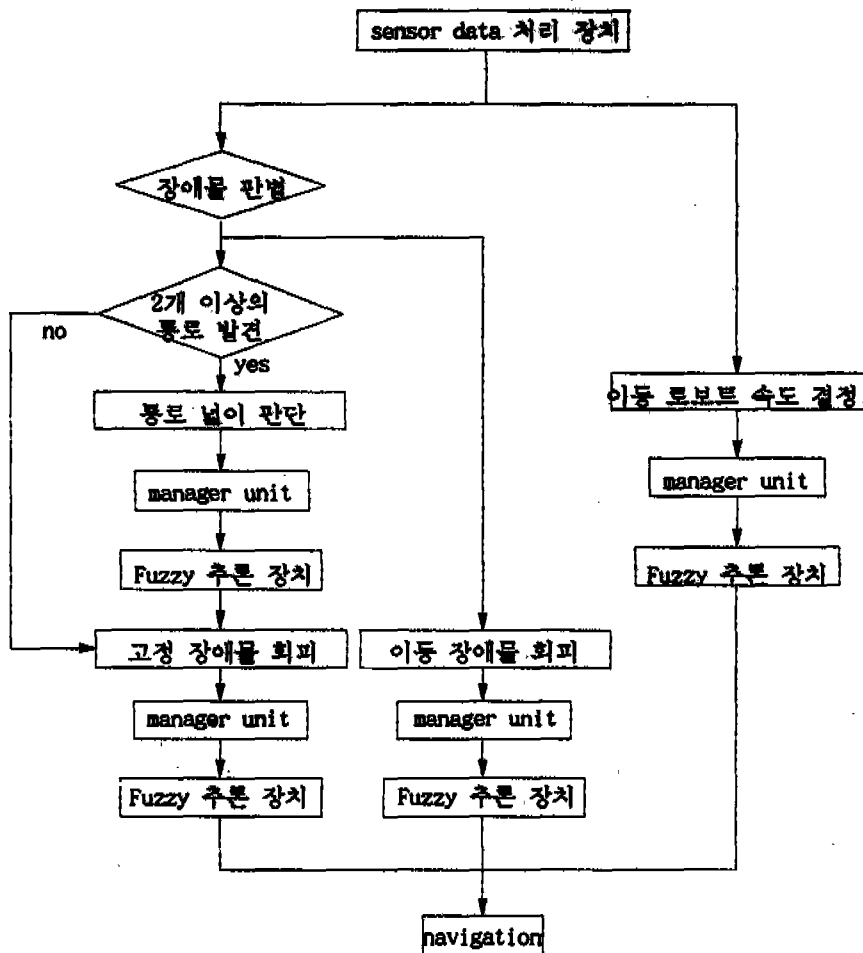


Fig. 5 Control Algorithm for Collision Avoidance and Speed Decision

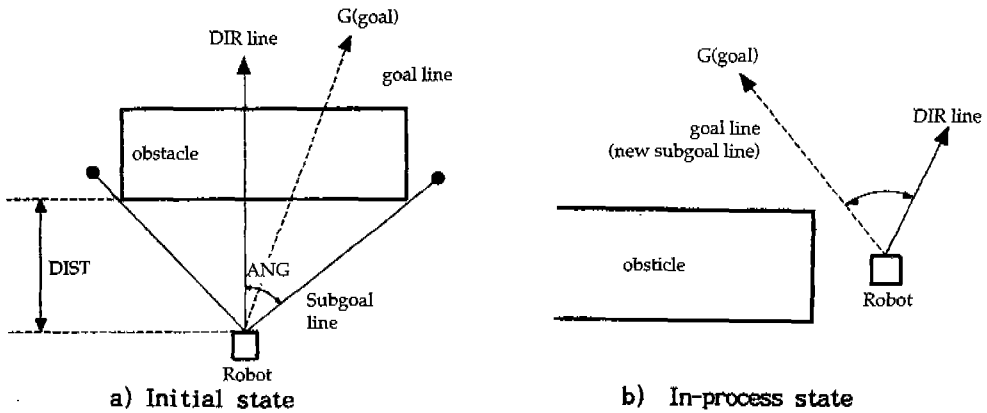


Fig. 6 Collision and Navigation States

어 rule base의 내용과 비교 선택하여 주행에 필요한 동작 방향의 규칙과 membership함수를 적용하여 각각의 fuzzy추론을 함으로써 로봇에게 주행 결정을 내린다.

3. 모의실험

Fuzzy algorithm을 적용한 이동 로봇의 주행을 시험하기 위하여 제한된 공간의 여러 가지 상황에서 simulation을 하였다.

3-1 통로 주행 모의실험

Fig. 6은 이동 로봇이 고정 장애물을 회피하는 상태를 보여준다. a)와 같은 초기 출발 상태에서는 장애물에 의해서 목표 지점(G)을 향한 주행은 불가능하게 되어 있다. 그러므로 장애물을 회피하면서 목표지점에

도달하기 위해서는 목표 지점과 장애물 간의 좌우 편차 각이 적은 쪽으로 방향을 결정한 다음, 장애물에 대한 각도와 거리 data를 Fuzzy추론 입력으로 받아 로봇의 주행방향을 결정한다. b)의 중간 과정에서처럼, 장애물을 회피하고 난 다음에는 초음파 sensor로 부터 Fuzzy추론 입력 변수로써 새로운 각도와 거리 data를 받아서 목표 지점으로 새로운 방향을 결정하게 된다.

아래의 simulation결과들은 MIN-TIME MODE와 SAFETY MODE로 각각 simulation한 결과이며, 이동 로봇은 그림의 좌측 하단부분을 출발하여 우측 상단부분을 최종 목표로 주행을 하게 되어있고, 우측의 menu는 각상황에 있어서의 로봇의 위치와 속도및 현재의 각도, 그리고 sensor로 측정된 장애물과의 각도와 거리, fuzzy추론의 결과인 조향각과 현재 주행중인 로봇의 motion mode를 나타내고 있다.

아래의 그림을 자세히 살펴보면, 이동 로봇은 주행

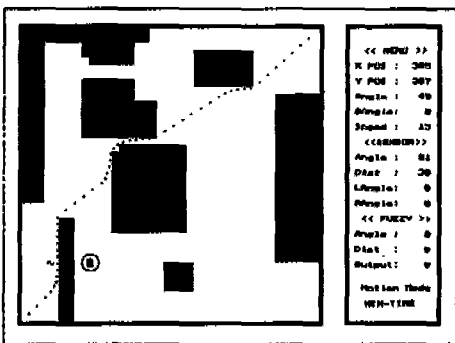


Fig. 7 Simulation Result of MIN-TIME MODE

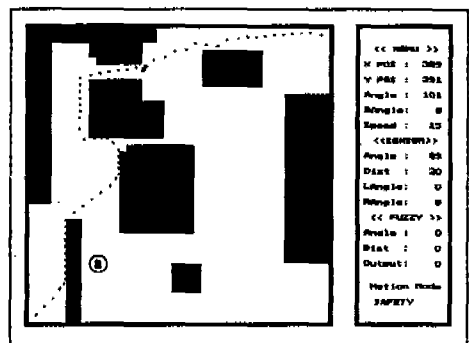


Fig. 8 Simulation Result of SAFETY MODE

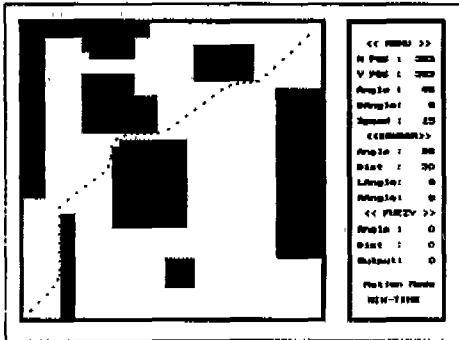


Fig. 9 Simulation of Enhanced MIN-TIME MODE

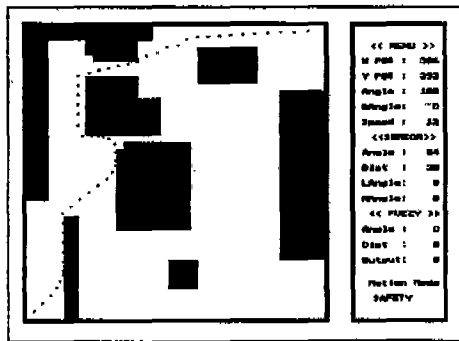


Fig. 10 Simulation of Enhanced SAFETY MODE

을 계속하다가 ③지점에서 두 갈래의 통로를 발견하게 된다. 그래서 MIN-TIME MODE에서는 좁은 통로의 위험에도 불구하고 ③지점에서 최적 경로인 우측으로 주행을 하였고, SAFETY MODE일 경우에는 안전을 위하여 ③지점에서 좌측의 넓은 통로를 찾아 우회 주행을 하였다.

결과적으로 MIN-TIME MODE와 SAFETY MODE의 전체 주행 시간을 비교해보면 MIN-TIME MODE가 약 1.6배 정도 빠르게 최종 목표 지점에 도착하였다.

앞의 simulation결과에서 장애물과 밀착하여 주행할 때를 살펴보면 비능률적으로 주행을 하고 있다. 이때의 이동 로봇트는 장애물과의 충돌 위험이 거의 없으므로 속도를 줄일 필요가 없다.

그래서 다음에 나타나는 Fig. 9과 10에서는 위의 MIN-TIME MODE와 SAFETY MODE의 주행 시간을 줄이고 좀더 유연하고 효율적인 주행을 위하여,

주위 환경을 저장하여 다음 주위 환경과 변화가 없을시에는 fuzzy추론으로 결정된 속도보다 좀더 빠른 속도로 주행을 하게 한 simulation결과이다.

보완된 MIN-TIME MODE와 SAFETY MODE의 전체 주행 시간을 비교해보면 앞의 simulation결과와 비슷하게 약 1.6배 정도 MIN-TIME MODE가 빨랐으나, 각각의 mode별로 비교를 하면 보완된 주행이 주행 거리에 비례하여 전체 주행 시간이 약 1.2배정도 빨랐다.

3-2 이동 장애물 회피 모의 실험

본 절에서는 통로와 같이 장애물들이 고정되어 있고, 랜덤하게 혹은 일정한 경로를 따라 움직이고 있는 불규칙한 환경에서 이동 로봇트가 목표 지점을 향하여 주행하는 경우에 대한 것이다.

아래 그림은 자율이동 로봇트가 여러 가지 속도와 크기를 가진 이동 장애물을 회피하며 최종 목적지로 주행을 할 때의 simulation을 나타내었다.

위의 simulation결과를 보면, 이동 로봇트는 6 step까지 최대 속도로 주행중 7 step에서 첫번째 이동 장애물 O_1 을 발견하게 된다. O_1 은 Positive Small의 위치에서 Medium의 거리로 초음파 sensor에 감지되었다. 그래서 이동 로봇트는 두 입력 변수를 fuzzy추론을 하여 Negative Medium으로 subgoal line을 결정하고, 속도도 역시 fuzzy추론을 하여 거의 반으로 줄여 8 step으로 회피 주행을 하였다. 또한 15 step에서는 이동 로봇트는 Positive Small Zero의 중간 지점에서 가까운 거리를 두고 O_3 를 발견하게 된다. 그래서 Negative방향으로 느린 속도로 주행을 하였으나 이동 로봇트가 갑자기 우측으로 방향을 바꾸게 되어 16, 17, 18 step과 같은 주행을 하게 된다. 위의 Fig. 12는 속도 결정 fuzzy algorithm을 사용하지 않고, 극히 위험한 상황없이 단조로운 일반적인 상태에서의 simulation한 결과인데 두 결과를 비교하기 위해서 나타내었다. 위의 결과를 살펴보면 일정하게 빠른 속도로 움직이기 때문에 주행 시간이 좀 더 단축되었다. 그러나 Fig. 11과 같은 상황에서 simulation을 해본 결과 목표 지점까지 주행을 하지 못하고 결국 이동 장애물 O_3 와 충돌을 하였다. 그리고 다음과 같이 이동 장애물 회피가 불가능한 경우도 있다. 예를 들어 이동 장애물이 아주 빠른 속도로 다가와서 충돌을 하는 경우, 그리고 자율 이동 로봇트가 초음파 sensor로 측정을 했을

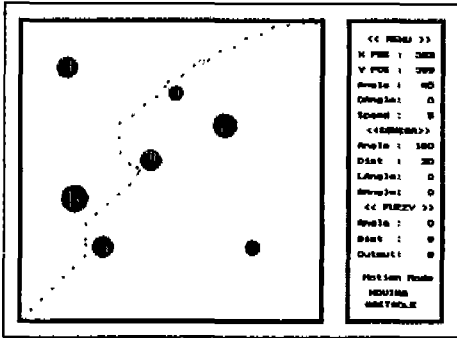


Fig. 11 Simulation Result with speed variation

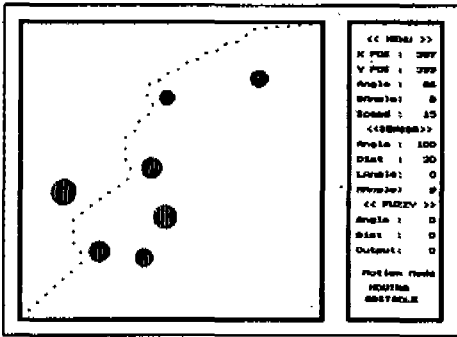


Fig. 12 Simulation without Speed Variation

때 회피 동작은 제일 가까운 장애물을 우선적으로 회피하게 되어 있으므로 제일 가까운 장애물의 회피동작 중 가까이 있는 다른 장애물이 접근해도 미처 회피하지 못한 경우 등 여러 상황이 있을 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 이동 로봇트가 초음파 sensor를 통하여 얻은 data를 기본으로, fuzzy 제어 algorithm을 이용하여 로봇트 주행에 있어 보다 자율적으로 행동함으로써 그 실용성을 보이고 있다. 통로 주행 simulation에 있어서, MIN-TIME MODE와 SAFETY MODE로 실행된 Simulation을 보면 거의 인간의 주행과 비슷한 결과를 보여 주고 있다. SAFETY MODE일 경우에는 좁은 길을 회피하여 안전하게 목적지점까지 주행을 하였고, MIN-TIME MODE 일 경우에는 목표지점까지 좀 더 짧은 시간에 도착하기 위하여

좁은 길에서의 위험에도 주행하였다. 그리고 이동 장애물일 경우의 simulation 결과를 역시 살펴보면, 주행 중인 로봇트 전방에 각기 다른 움직이는 장애물이 나타났을 때에도 충돌 없이 무사히 목표지점까지 도착하였다.

현재 이러한 분야에 많은 연구가 진행이 되고 있으나, 실용화가 지연되고 있는 이유 중에는 주위 환경을 정확하게 인식할 수 있는 센서의 개발 혹은 data분석에 문제가 있기 때문이다. 따라서 새로운 센서의 개발 또는 여러 개의 동일한 sensor, 혹은 이중의 센서를 통한 데이터 융합기법에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. T.Kaiiwara, et al, "development of a mobile robot for security guard" Proc. of the 15th ISIR, pp.271-278, 1985.
2. Yoichiro Meada, et al., "Hierarchical Control for Autonomous Mobile Robots with Behavior-Decision Fuzzy Algorithm", Proc. of IEEE Intl. conf. on Robotics and Automation, pp.117-122, 1992.
3. Mikio Maeda, Yasushi Maeda, and Shuta Murakami, "Fuzzy Drive Control of an Intelligent Robot", 6th Fuzzy System Symposium, pp. 45-48, 1990.
4. T. Kakeuchi, et al., "Fuzzy Control for Guidance of a mobile Robot", Proc. of 5th Fuzzy System Symposium, pp.71-76, 1989.
5. Wei Li, "Fuzzy Logic-Basic 'Perception-Action' Behavior Control of a Mobile Robot in Uncertain Environment", IEEE Conf. on Fuzzy Systems, pp.1626-1631,1994.
6. C.Gourley, and M.Trivedi, "Sensor Based Obstacle Avoidance and Mapping for Fast Mobile Robots", IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1306-

- 1311, 1994.
7. A. Zelinsky. "Mobile Robot Map Making Using Sonar", *Journal of Robotic System*, pp. 557-577, 1991.
 8. 추 봉조, 김 영택, "Fuzzy Controller에 의한 Robot Navigation의 Direction결정에 관한 연구", *한국정보과학회 가을 학술발표논문집*, Vol. 18, No. 2, pp. 293-296, 1991.
 9. E. Palma-Villalon, and P. Dauchez, "World representation and path planning for a mobile robot", *Robotica*, Vol. 6, pp. 35-40, 1988.
 10. M. Maeda, S. Murakami, Araki, and Y. Maeda, "Fuzzy Drive Expert System for an Automobile", 12th IFAC, pp. 161-164, 1993.
 11. Young-Hoon Joo, et al, "A Study on Fuzzy Controller for Autonomous Mobile Robot" *Trans. of KIEE*, Vol. 40, No. 9, pp. 1071-1083, 1992.
 12. S. H. Ji, "Tracking Navigation using Fuzzy Inference and Sonar-Based Obstacle Avoidance", *Proc. of IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and System*, pp. 898-903, 1993.