

센서 정보를 이용한 이동 로봇의 충돌 회피

법희락* 조형석
한국과학기술원 정밀공학과

A Sensor-based Obstacle Avoidance for a Mobile Robot

Hee Rak Beom Hyung Suck Cho
Department of Precision Engineering
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT: This paper proposes a sensor-based path planning method which utilizes fuzzy logic and neural network for obstacle avoidance of a mobile robot in uncertain environments. In order to acquire the information about the environment around the mobile robot, the ultrasonic sensors mounted on the front of mobile robot are used. The neural network, whose inputs are preprocessed by ultrasonic sensor readings, informs the mobile robot of the situation of environment in which mobile robot is at the present instant. Then, according to the situation class, the fuzzy rules are fired to make a decision on the mobile robot action. In addition, this method can be implemented real time since the number of fuzzy rules used to avoid the obstacle is small. Fuzzy rules are constructed based on the human reasoning and tuned by iterative simulations. The effective of the proposed avoidance method is verified by a series of simulations.

서론

경로계획은 이동로봇의 항법에서 매우 중요한 분야이다. 경로계획은 환경에 대한 정보가 이미 알려진 경우에 대하여 Off-Line으로 수행하는 대국적 경로계획(Global Path Planning)과 장애물과 환경에 대한 정보가 알려져 있지 않은 경우에 대하여 센서정보를 이용하여, 로봇 주위의 환경을 인식한 후 실시간으로 수행하는 국소적 경로계획(Local Path Planning)으로 분류할 수 있다. Global Path Planning을 실현하는 방법으로는 Configuration Space[1], Voronoi Diagram[2]과 Potential Field[3]가 있다. 그러나 이방법들은 환경이 변화하는 경우에는 적합하지 않으므로 센서정보에 근거한 국소적 경로계획이 필요하다.

국소적 경로계획은 초음파센서, 시각센서, 레이저 센서, 근접센서등과 같은 외부센서로 얻어진 정보를 이용한다. Brooks[4]는 초음파센서를 장착한 이동로봇에 Force Field개념을 이용하여 장애물 충돌회피를 실현하였고 Borenstein과 Koren[5]등은 벡터 Field 히스토그램을 이용하여 국소적경로계획을 구현하였으나 환경이 매우 복잡하여 수학적으로 표현할 수 없는 경우에는 로봇의 속도와 방향에 직접적으로 영향을 주는 Force의 계수를 결정하기가 어렵다.

위와같은 단점을 극복하기 위하여 Fuzzy Logic이 충돌회피에 사용되었다. Takeuchi[6]는 복도에 대한 영상으로부터 특징을 추출하여 복도를 주행하는 방법을 제안하였고 Ishikawa[7]는 건물안에서 주행하는 로봇에 대하여 Fuzzy Logic을 사용하여 충돌회피를 실현하였으며 효율적인 지식을 구축하는데 역점을 두었다. 그러나 복잡한 환경에서 Fuzzy Logic방법은 Rule을 구축하거나 Tuning하는데 어려움이 많다.

그러한 단점을 극복하기 위하여 Fuzzy Logic과 신경

회로망을 이용한 새로운 방법을 제안한다. 신경회로망은 로봇 주위의 환경을 판단하는 상황분류기의 역할을 수행하고 Fuzzy Logic은 분류된 상황과 연관된 규칙베이스(Rule Base)로부터 이동로봇의 거동을 결정해 주는 역할을 수행한다. 복잡한 환경을 단순한 형태의 Class들로 분류한 후에 충돌회피 규칙은 각각의 분류된 상황에 대하여 구축되며 Tuning된다. 이러한 형태의 충돌회피 구조는 KAIST의 제어및 자동화 실험실에서 개발한 이동로봇, LCAR에 사용하기 위하여 시뮬레이션 된다. 그림 1에서 보여준 것과 같이 LCAR은 26개의 초음파 센서와 스테레오 카메라 그리고 Dead reckoning을 위한 내부센서를 가지고 있다. 초음파 센서의 측정범위는 센서 제어기에 의해 10m이 내에서 조절될 수 있다. 시뮬레이션에서 제시된 방법의 타당성이 논의될 것이며 시뮬레이션 결과로서, 복잡한 환경에서도 제시된 방법은 장애물을 회피하는데 사용된 규칙이 비교적 적음을 알 수 있다.

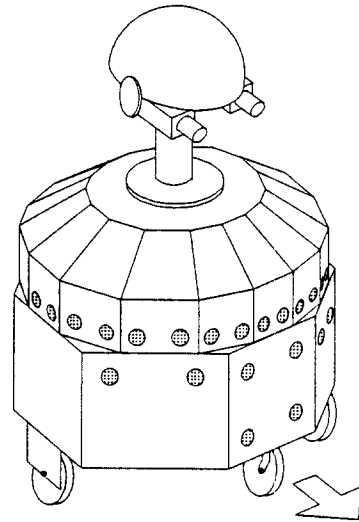


Fig.1 The mobile robot, LCAR.

장애물 회피 제어기의 구조

장애물 회피제어기의 구조는 그림2와 같다. 이 제어기는 Global Path Planner와 Mission Planner로 이루어진 Higher Level Planner로부터 $(x,y,0)_{cm}$ 와 Lower Level Planner로부터

현재의 로봇의 위치 $(x, y, \theta)_{robot}$ 를 받는다. 그리하여 이 제어기는 측정가능한 범위내에 존재하는 중간목표점에서의 로봇의 자세 $(x, y, \theta)_{ref}$ 를 Reckoner라 불리는 Lower Level Controller에 전달해 준다. 내부센서를 이용하는 Lower Level Controller는 이동로봇이 목표점까지 도달할 수 있도록 제어한다. 충돌회피 제어기는 세가지 Level로 이루어진다. 첫째 Level에서는 장애물의 정보가 초음파 센서에 의해 얻어지며 둘째 Level에서는 현재 로봇이 놓여 있는 환경의 분류가 이루어지고 셋째 Level에서는 분류된 상황에 해당하는 규칙베이스로부터 충돌회피거동이 결정된다.

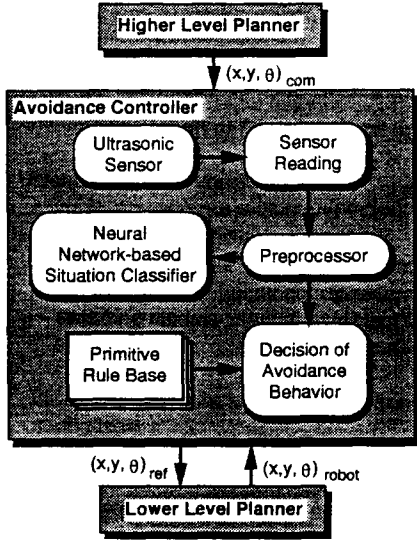


Fig.2 The structure of avoidance controller.

환경정보의 추출

이 논문에서는 환경정보를 얻기위하여 18개의 초음파 센서가 사용된다. 그림3은 이동로봇의 주위에 설치된 초음파 센서의 배열을 보여주고 있다. 초음파 센서는 μ -controller에 의해 제어되며 센서 제어기는 초음파를 발생시키는 Transmitter와 Echo신호를 받기 위한 Receiver/Gain Controller, 측정방식에 따라 임의로 센서를 선정해 주는 Switching Module로 이루어진다. 이러한 거리감지기의 기능도가 그림4에 나타나 있다. 그림3에서 보는 바와 같이 이동로봇의 중심으로 부터 장애물까지의 거리 d 와 장애물의 방향 ϕ 는 로봇좌표계 $\{R\}$ 에 대하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$d^2 = x_{oi}^2 + y_{oi}^2 \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1}(y_{oi}/x_{oi}) \quad (2)$$

$$x_{oi} = R \cos(\eta_i) + \delta_i \cos(\eta_i - 0.5(-1)^i(a-\gamma)) \quad (3)$$

$$y_{oi} = R \sin(\eta_i) + \delta_i \sin(\eta_i - 0.5(-1)^i(a-\gamma)) \quad (4)$$

$$\eta_i = \gamma(i-1.5) \quad (5)$$

여기서 γ 는 인접한 센서사이의 각이며 R 은 이동로봇의 반경이다. 또한 이동로봇의 좌표계 $\{R\}$ 의 y 축은 이동로봇이 움직이는 방향과 일치하도록 선정되었다. 또한 벽과 같은 장애물의 경우의 d 와 ϕ 는 다음과 같이 계산된다.

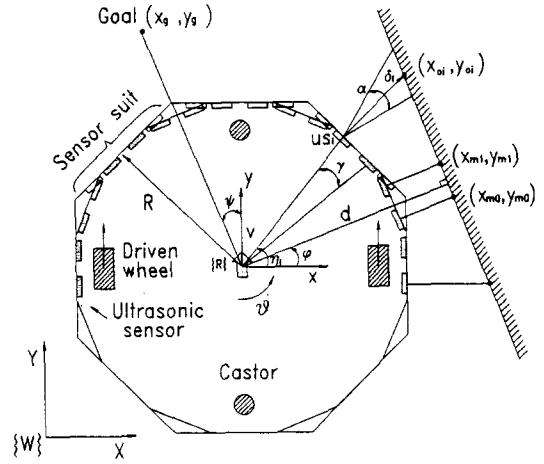


Fig.3 The arrangement of ultrasonic sensors and coordinate frames of workspace.

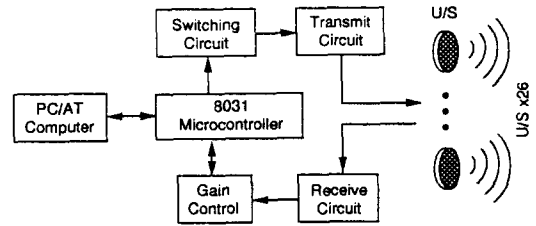


Fig.4 The block diagram of ultrasonic range finder.

$$d = x_{oi} \cos(\phi) + y_{oi} \sin(\phi) \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1}((x_{oi} - x_{o0}) / (y_{oi} - y_{o0})) \quad (7)$$

여기서 (x_{oi}, y_{oi}) 와 (x_{o0}, y_{o0}) 는 로봇중심에서 차별로 가장 가까운 거리를 나타내는 좌표값들이다.

환경 분류

이동로봇이 복잡한 환경을 통과할 때 여러가지 상황으로 로봇 주위에 나타날 수 있다. 이동 로봇에게 그상황에 가장 적절한 충돌 회피 거동을 제공하기 위하여 환경을 몇가지 단순한 Class로 분류하는 것이 필요하다. 센서에 의해 측정된 거리에 의해 형성된 영상의 형태는 이동 로봇에게 그 지역을 충돌하지 않고 통과할 수 있는 영역인가를 알려준다. 복잡한 상황을 단순한 형태의 것으로 분류하기 위하여 Open Space, 즉 이동로봇이 충돌없이 통과할 수 있는 영역이 사용된다. 만약 두 장애물 사이에 Open Space가 존재하지 않은 경우에 두 장애물은 하나의 장애물로 간주된다. 그리하여 본 논문에서는 환경을 거리 영상 Pattern의 형태에 따라 그림5에서 보여주는 바와 같이 7가지로 분류하였다. 첫째와 둘째 Class는 측정 범위 내에 다각형 형태의 장애물이 하나 혹은 두개가 존재하는 경우이며 셋째와 넷째 Class는 측정 범위 내에 벽과 같은 형태의 장애물이 하나 혹은 두개가 존재하는 경우이다. Class 5는 복도와 같은 환경에 다각형 형태의 장애물이 놓여 있는 경우이고 Class 6은 이동로봇의 전방에 Open Space가 존재하지 않는 경우이고 Class 7은 장애물이 존재하지 않는 경우에 해당한다.

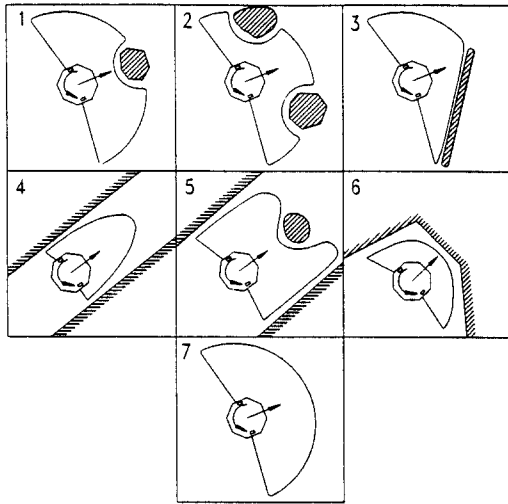


Fig.5 The typical classes of environmental situations.

신경회로망을 이용한 상황 분류기

신경회로망의 구조

로봇 주위의 환경에 대한 상황이 인식될 수 있다면 충돌회피에 사용되어야 할 변수들은 분류된 상황으로부터 쉽게 추측되기 때문에 충돌회피 거동을 쉽게 결정해 줄 수 있다. 본 논문에서의 신경회로망의 역할은 로봇 주위의 상황을 분류해 주는 것으로서 그것의 입력은 18개의 초음파 센서에 의해 형성된 거리가 되며 출력은 환경에 관한 Class가 된다. 사용된 신경회로망의 구조는 그림6에 나타나 있으며 1개의 Input Layer와 3개의 Hidden Layer 그리고 1개의 Output Layer로 구성된다. Input Layer와 Output Layer는 각각 18개의 뉴런과 7개의 뉴런으로 되어 있으며 Hidden Layer는 차례로 10개, 5개와 12개의 뉴런으로 이루어져 있다. 사용된 신경회로망은 Input Layer와 두번째 Hidden Layer사이에는 부분적으로 연결되어 있으며 나머지 부분은 모든 뉴런들이 서로 연결되어 있다. 그리고 Output Layer를 구성하는 뉴런들중에서 단지 하나의 뉴런만이 활성화 된다.

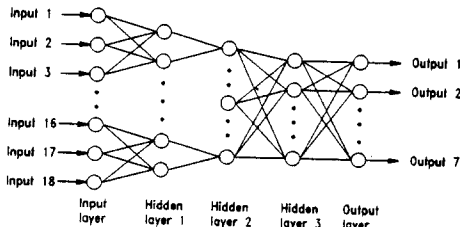


Fig.6 The structure of the neural network used as situation classifier.

신경회로망의 학습

신경회로망을 학습시키기 위하여 학습에 필요한 표본 데이터를 추출하는 것이 중요하다. 학습 표본 데이터를 최대한 줄이기 위하여 감지영역을 그림7-(a)처럼 분할한다. 두꺼운 선으로 둘러싸인 영역은 하나의 센서 Suite에 의해 장애물이 감지될 수 있는 영역을 나타낸다. 그 영역은 Threshold 값을 이용

하여 다시 9개 혹은 12개의 영역으로 분할된다. Threshold값 d_{th1} 은 로봇이 충돌없이 지나갈 수 있는 Open Space의 폭을 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$d_{th1} = R(1+\epsilon)\cot(\pi/8) \quad (8)$$

여기서 ϵ 은 0.1로 고정된 충돌 안전률이다. Threshold값 d_{th2} 은 Threshold 값 d_{th1} 의 2배로 선정한다. 선정된 Threshold 값에 의하여 각각의 영역들의 이동로봇의 중심으로부터 정수 인 0, 1, 2로 나타내진다. 이렇게 하여 학습하는데 필요한 표본은 추출되며 예를 들어 그림7-(b)와 같은 상황에 대하여 설명하면 학습 데이터는 입력으로서 (2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 0 0 0 2 2 2)이 되며 출력으로는 (0 1 0 0 0 0)이 사용된다.

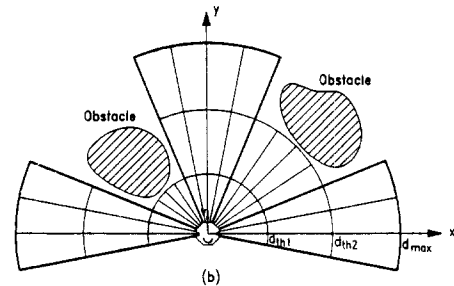
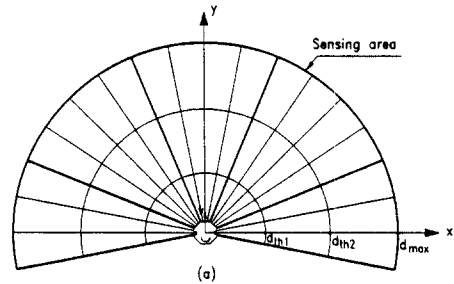


Fig. 7 An example of training sample pattern.
(a) An example of class 2. (b) The divided sensing area.

Fuzzy Logic을 이용한 충돌회피

본 논문의 목적은 Fuzzy Logic을 이용하여 충돌회피 제어기를 구현하는데 있다. 먼저 입력과 출력변수를 Fuzzy화하고 규칙 베이스를 구축한 후 추론과정을 거쳐 출력값을 추출해 낸다.

입출력 변수의 Fuzzy화

충돌회피의 목적은 이동로봇이 장애물과 충돌하지 않고 목적지에 도달하도록 하는 것이다. 이를 실현하기 위하여 장애물의 위치와 그림3에서 보여준 좌표계 {W}에 대한 이동로봇의 자세를 고려하여 이동로봇을 제어하여야 한다. 이동로봇의 운동은 조향각과 선속도를 제어함으로써 실현될 수 있다. 그리하여 입력변수로서는 d_i, ϕ_i, ψ_i 가 선정되고 출력변수로서는 $\Delta\theta$ 와 v 가 선정된다. 첨자 i 는 감지된 장애물의 갯수를 나타낸다. 변수 d_i 와 ϕ_i 는 Class 1과 Class 2인 경우에 식(1)과 (2)에 의해 계산되며 Class 3과 Class 4인 경우에는 식(6)과 (7)에 의하여 계산된다. ψ 는 이동로봇의 진행방향과 목적지의 방향차를 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$\psi = \tan^{-1}\{(y_k - y)/(x_k - x)\} - \pi/2 \quad (9)$$

여기서 (x_{ϕ}, y_{ϕ}) 는 좌표계 $\{W\}$ 에 대한 목표지점의 좌표값이다. 입력 변수 d_i, ϕ_i, φ 는 각각 Linguistic Fuzzy Set으로 (VN,NR,FR), (NB,NS,ZZ,PS,PB), (NB,NS,ZZ,PS,PB)와 같이 표현되며 출력변수 $\Delta\theta, v$ 는 (ZZ,PS,PM,PB), (NB,NM,NS,ZZ,PS,PM,PB)로 표현할 수 있다. 여기서 Linguistic Fuzzy Set의 의미는 다음과 같다.

VN: very nearest	NR: near
FR: far	NB: negative big
NM: negative medium	NS: negative small
ZZ: zero	PS: positive small
PM: positive medium	PB: positive big

위와 같은 Fuzzy Set의 Membership 함수는 그림8에 보여지고 있으며 함수의 모양은 계산의 단순화를 위하여 삼각형 형태로 표현한다.

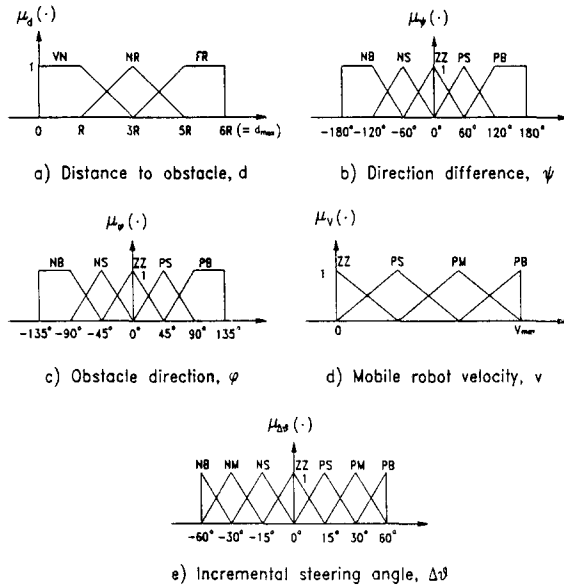


Fig.8 The membership functions of fuzzy variables.

지식 베이스 구축

충돌회피 규칙은 인간의 경험을 기본으로하여 구축된다. 복잡한 환경이 단순한 상황들로 분류되었기 때문에 각각의 상황에 대하여 충돌회피 규칙들을 결정한다. 규칙들을 효율적으로 구축하기 위하여 각각의 Class와 관련된 중요한 요소들을 생각해 보자.

(1) Class 1과 Class 2:

1개의 다각형 장애물이 존재하는 경우이다. 규칙 베이스를 구축하는데 사용되는 변수는 d, ϕ, φ 이며 항상 Open Space가 존재한다.

(2) Class 2:

2개의 다각형 장애물이 존재하는 경우이다. 규칙 베이스를 구축하는데 사용되는 변수는 d_i, ϕ_i, φ ($i=1,2$) 이며 항상 Open Space가 존재한다.

(3) Class 3과 Class 4:

1개 또는 2개의 벽과 같은 형태의 장애물이 존재하는 경우이다. 규칙 베이스를 구축하는데 사용되는 변수는 d_i, ϕ_i, φ

($i=1,2$) 이며 항상 Open Space가 존재한다. $i=1$ 인 경우는 가장 가까운 장애물의 위치를 나타낸다. 이 경우의 충돌회피 동작은 벽과의 안전거리를 유지하면서 벽을 따라간다.

(4) Class 5:

이 경우는 복도와 같은 환경에서 다각형 장애물이 존재하는 경우로써 규칙 베이스는 Class 1과 Class 4의 규칙들로 이루어진다.

(5) Class 6:

이 경우의 충돌회피 동작은 가상의 목표점에 도달할때 까지 장애물과 안전거리를 유지하며 장애물 벽면을 따라간다. 가상의 목표점은 Class 6이 발생한 지점과 목표점을 연결한 직선상에 존재하며 가상의 지점에 로봇이 도달하면 Class 6의 상황은 소멸된다.

(6) Class 7:

감지 영역내에 장애물이 존재하지 않는 경우이며 이동 로봇은 최대의 속도로 주행하게 된다.

위와 같은 요소들을 고려하여 규칙 베이스가 구축되며 그 규칙들은 IF-THEN으로 다음과 같이 표시된다.

$${}^jR_k: \text{IF } (\varphi = \varphi_k) \text{ AND } (d_i = D_{ik}) \text{ AND } (\phi_i = \phi_{ik}) \\ \text{THEN } (v = V_k) \text{ OR } (\Delta\theta = \Delta\theta_k)$$

여기서 jR_k 는 j 번째의 Class와 관련된 규칙 베이스의 k 번째의 규칙을 나타내며 $\varphi_k, D_{ik}, \phi_{ik}, V_k, \Delta\theta_k$ 는 Universe of Discourse 인 $X_\varphi, X_{d_i}, X_{\phi_i}, X_v, X_{\Delta\theta}$ 에서 정의되는 Fuzzy 집합이다. 이러한 규칙 jR_k 는 규칙 ${}^jR_k(v)$ 와 ${}^jR_k(\Delta\theta)$ 로 나누어진다. j 번째 상황에 대한 규칙 베이스는 4 Dimension으로 된 Fuzzy Relation으로 아래와 같이 표현된다.

$${}^jR_k(v) = \Psi_k \times D_{ik} \times \Phi_{ik} \times V_k \quad (10)$$

$${}^jR_k(\Delta\theta) = \Psi_k \times D_{ik} \times \Phi_{ik} \times \Delta\theta_k \quad (11)$$

위와 같은 규칙들로 구성된 충돌회피 알고리즘은 각각의 Relation들을 Union함으로써 계산된다. ${}^jR_k(v)$ 와 ${}^jR_k(\Delta\theta)$ 은 각각의 Membership값들로 구성된 행렬을 이루며 Membership값들은 다음과 같다.

$$\mu_{{}^jR(v)}(\psi, d_i, \phi_i, v) = \bigvee_k \{ \mu_{\Psi_k}(\psi) \wedge \mu_{D_k}(d_i) \\ \wedge \mu_{\Phi_k}(\phi_i) \wedge \mu_{V_k}(v) \} \quad (12)$$

$$\mu_{{}^jR(\Delta\theta)}(\psi, d_i, \phi_i, \Delta\theta) = \bigvee_k \{ \mu_{\Psi_k}(\psi) \wedge \mu_{D_k}(d_i) \\ \wedge \mu_{\Phi_k}(\phi_i) \wedge \mu_{\Delta\theta_k}(\Delta\theta) \} \quad (13)$$

추론 과정

충돌회피 동작을 결정하는 v 와 $\Delta\theta$ 는 센서로부터 얻은 데이터를 이용하여 규칙 베이스로부터 추론과정에 의 결정된다. 추론 메카니즘은 Minimum-Maximum Operation을 이용하여 회피동작은 아래와 같이 결정된다.

$$\mu_v(v) = \bigvee_{(\psi, D_i, \phi_i)} \{ \mu_{{}^jR(v)}(\psi, d_i, \phi_i, v) \wedge \mu_\psi(\psi) \\ \wedge \mu_{D_i}(d_i) \wedge \mu_{\phi_i}(\phi_i) \} \quad (14)$$

$$\mu_{\Delta\theta}(\Delta\theta) = \bigvee_{(\psi, D_i, \phi_i)} \{ \mu_{{}^jR(\Delta\theta)}(\psi, d_i, \phi_i, \Delta\theta) \wedge \mu_\psi(\psi) \\ \wedge \mu_{D_i}(d_i) \wedge \mu_{\phi_i}(\phi_i) \} \quad (15)$$

위의 관계는 이동로봇의 속도와 조향각을 나타내는 Fuzzy Subset V 와 $\Delta\theta$ 을 정의해 준다.

출력 변수의 Defuzzification

Fuzzy Subset V와 $\Delta\theta$ 로부터 이동로봇을 제어하기 위한 출력값은 면적중심법을 사용하여 아래와 같이 결정된다.

$$\bar{v} = \left(\sum_{m=1}^p \mu_v(v_m) \cdot v_m \right) / \left(\sum_{m=1}^p \mu_v(v_m) \right) \quad (16)$$

$$\bar{\Delta\theta} = \left(\sum_{m=1}^q \mu_{\Delta\theta}(\Delta\theta_m) \cdot \Delta\theta_m \right) / \left(\sum_{m=1}^q \mu_{\Delta\theta}(\Delta\theta_m) \right) \quad (17)$$

여기서 p와 q는 Linguistic Fuzzy Subset의 수를 나타낸다.

시뮬레이션

앞의 과정을 예증하기 위하여 임의로 10개의 장애물로 구성된 환경에 대하여 일련의 시뮬레이션을 행하였다. 위의 환경에서 신경회로망에 의해 분류될 수 있는 환경의 Class는 7가지가 된다. 이동로봇의 반경 R은 0.2m로 가정하였고 환경의 크기는 40mx40m로 가정하였으며 센서의 최대 감지거리는 6R로 하였다. 전 절에서 구축한 규칙 베이스를 이용하여 회피동작이 추론된다. 그림9는 초기에 형성한 규칙 베이스를 사용했을 때의 회피 동작을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이동로봇은 장애물과 충돌을 일으킨다. 위의 예에서 환경에 관한 Class는 2, 3, 4, 5, 2, 1, 4의 순으로 발생한다. 그림에서 보는 바와 같이 Class 1에 대한 규칙 베이스를 조절함으로써 충돌을 방지할 수 있으며 조절된 규칙 베이스를 사용했을 경우에 대한 결과가 그림10에 나타나 있다. 그림에 나타난 결과는 비교적 만족할만한 결과를 나타내지만 복도와 같은 환경하에서 이동로봇의 움직임이 매끄럽지 못하다. 그리하여 Class 4에 대한 규칙 베이스를 조절한 후의 결과가 그림11에 나타나 있다. 출발점과 목표점을 달리하여 이동로봇을 주행한 경우의 결과가 그림12에 나타나 있으며 그림13은 Class 6이 발생했을 경우의 충돌회피를 보여주고 있다.

결론

복잡한 환경에서 로봇의 충돌회피를 위하여 센서 정보를 이용하는 방법이 제시되었다. 제시한 충돌회피 방법은 이동로봇의 주위환경을 인식하기 위하여 신경회로망이 사용되었고 인식된 상황에 적합한 규칙 베이스가 선정된 후 Fuzzy Logic에 의하여 회피동작이 추론된다. 이와 같은 접근방법은 규칙을 구축하거나 규칙을 조절하는데 효과적이며 추론과정에서 사용되는 규칙의 수가 줄어 들기 때문에 실시간으로 추론할 수 있다. 추후 과제로서는 규칙을 스스로 생성하고 환경을 인식하는 방법에 대하여 연구가 진행될 것이다.

참고 문헌

- [1] Tomas Lozano-perez and M. Wesley, "An algorithm for planning collision free paths among the polyhedral obstacles", Communication of the ACM, Vol.22, No.10, pp560-570, Oct. 1979.
- [2] R.brooks, "Solving the find path problems by good representation of free space", IEEE Trans. Sys., Man and Cyb., Vol.13, No.3, pp190-197, Mar./Apr. 1983.
- [3] O. Takahashi and R.J.Schilling, "Motion planning in a plane using generalized Voronoi diagram", IEEE Trans. Robotics and automation, Vol.5, No.2, pp143-150, 1989.
- [4] R.A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot", IEEE J. Robotics and Automation, Vol.2, No.1, pp.14-23, 1986.
- [5] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle

avoidance for fast mobile robot", IEEE Trans. Sys., Man and Cyb, Vol.19, No.5, pp1179-1187, Sept./Oct., 1989.

[6] Tomoyoshi Takeuchi, "An autonomous fuzzy mobile robot", J. Robotic soc. Japan, Vol.6, No.6, pp549-556, Dec.,1988.

[7] Shigeki Ishikawa, "A method of indoor mobile robot navigation by fuzzy control", Int. Workshop Intell. Robotics and Sys. IROS'91, pp 1013-1018, Dec., 1991.

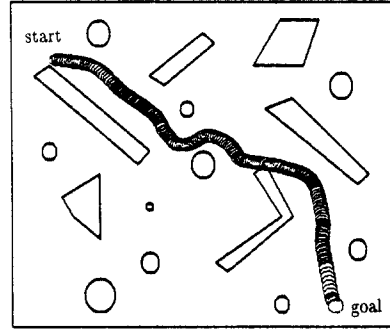


Fig.9 The failure case of obstacle avoidance.

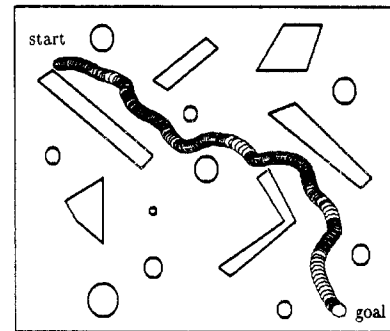


Fig.10 The successful case of obstacle avoidance.

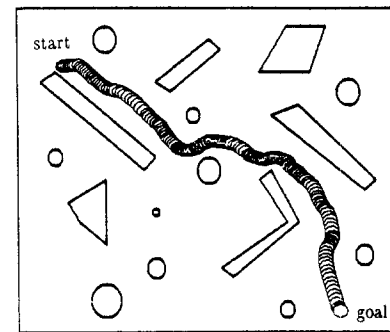


Fig.11 An obstacle avoidance using the more improved rules.

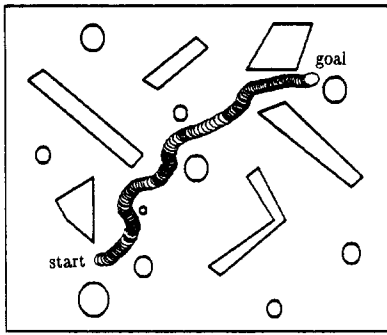


Fig.12 An example for different start and goal position.

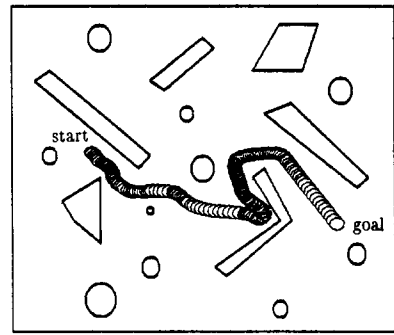


Fig.13 Obstacle avoidance in case of the dead alley.