

동적 환경에서 퍼지 추론을 이용한 이동로봇의 다중센서기반의 자율주행

진태석[#], 이장명^{*}

Multisensor-Based Navigation of a Mobile Robot Using a Fuzzy Inference in Dynamic Environments

Tae-Seok Jin[#], Jang-Myung Lee^{*}

ABSTRACT

In this paper, we propose a multisensor-based navigation algorithm for a mobile robot, which is intelligently searching the goal location in unknown dynamic environments using multi-ultrasonic sensor. Instead of using "sensor fusion" method which generates the trajectory of a robot based upon the environment model and sensory data, "command fusion" method by fuzzy inference is used to govern the robot motions. The major factors for robot navigation are represented as a cost function. Using the data of the robot states and the environment, the weight value of each factor using fuzzy inference is determined for an optimal trajectory in dynamic environments. For the evaluation of the proposed algorithm, we performed simulations in PC as well as experiments with IRL-2002. The results show that the proposed algorithm is apt to identify obstacles in unknown environments to guide the robot to the goal location safely.

Key Words : Mobile robot(이동로봇), Navigation (주행), Obstacle avoidance (장애물회피), Multisensor fusion (다중센서 융합), Fuzzy inference (퍼지추론)

1. 서론

이동로봇이 주위 환경을 파악하고 자율적으로 주행하기 위해 사용되는 센서로는 비전, 레이저, 적외선, 초음파 센서 등이 있으며 이 중에서 비전 또는 초음파를 이용한 많은 연구가 진행되고 있으나, 비전을 이용한 이동로봇은 입력된 영상으로부터 필요로 하는 정보를 얻기 위한 알고리즘이 복잡하고 데이터량이 방대하므로 실시간 처리를 위하여 고성

능의 시스템을 필요로 한다. 또한 영상으로부터 환경을 인식하는 과정의 어려움으로 인하여 환경에 대한 사전정보를 필요로 한다^{1,2}. 따라서 본 논문에서는 구조적으로 간단하고 낮은 성능의 시스템에서도 실시간 처리가 가능한 초음파센서를 사용하여 미지의 환경을 인식하고, 이동로봇의 위치보정을 위하여 자이로 센서로부터 데이터를 취합하여 이동로봇의 지능적 자율주행에 필요한 정보로 사용하였다.

접수일: 2003년 4월 11일; 게재승인일: 2003년 7월 11일
교신저자: 부산대학교 전자공학과 지능로봇실�헬실
E-mail: jintse@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-1696
* 부산대학교 전자공학과

이동로봇이 사전지식이 없는 동적인 환경에서 작업하기 위해서는 주위환경을 인지하여 로봇의 수행작업과 현재 환경조건에 적합한 동작을 취해야 한다. 이러한 처리를 위한 대표적 방법은 두 가지 방법, 센서융합(Sensor fusion)에 의한 방법과 명령융합(Command fusion)에 의한 방법이 있다.

센서융합의 방법은 로봇의 여러 센서정보에 의해 환경모델을 구성하여 로봇의 최적의 경로를 계획하고 로봇은 주어진 궤적을 추종하도록 하는 방법이다. 이러한 방법은 여러 센서의 정보에서 정확한 환경모델을 구성하는 것이 매우 중요하며 또한 이를 위하여 많은 양의 계산도 요구된다³. 명령융합의 방법은 로봇의 동작에서 각각의 개별 목적을 만족하는 여러 명령들 가운데서 전체 목적을 위한 최선의 선택을 하는 방법으로 로봇의 행동에 기반을 둔 형태이다. 이 방법에서는 분산적으로 각 제어 목적을 만족하는 행동결과가 나타나며 이를 융합하는 과정에서 인공지능의 기법이 유용하게 사용될 수 있다⁴.

본 논문에서 제안한 이동로봇의 제어 알고리즘은 명령융합의 방법을 근거로 하여 각 행동명령은 비용함수의 형태로 나타나며, 이들의 융합은 퍼지 논리로 추론한 가중치를 각 명령에 인가하여 결합한 비용함수로 최선의 선택을 취하는 방법이다. 명령융합의 과정에서 가중치를 추론하는 퍼지논리부의 입력으로는 이동로봇과 장애물과의 거리 및 이동로봇의 속도와 같은 환경과 로봇의 상태에 대한 변수로서, 주위환경과 로봇의 상태 조건에 따라서 각 비용함수의 가중치를 변화하여 행동을 결정함으로써 미지의 환경에 지능적으로 대처할 수 있도록 하였다.

2. 이동로봇의 기구학

그림 1은 자체 제작된 이동로봇 IRL-2002의 외형이다. 두 개의 DC 모터로 각 바퀴를 구동하며 보조바퀴로 볼캐스터를 사용하였다. 부착된 센서로는 모터의 엔코더 이외에 자이로센서(Gyro-sensor, ENV-05D)와 초음파 센서가 있다. 자이로센서는 주행중에 발생하는 두 바퀴의 속도차에 의한 이동로봇의 회전속도를 측정하여 로봇의 방향인자에 사용하고, 16개의 초음파센서(Polaroid 6500) 모듈은 41cm에서 최대 10m까지의 거리 검출이 가능하다. 로봇 중심으로부터의 최소 측정가능거리는

56cm 이다. 각각의 초음파 센서는 1/3초마다 거리 측정을 하고, 상호간의 대화현상을 제거하기 위해 한번에 4개씩만 구동한다. 모의 실험에서는 로봇에서 6m이상의 거리에 벽이 있다고 측정될 경우에는 잘못된 정보라고 가정하고 6m이상 측정된 거리 정보는 무시하였다.

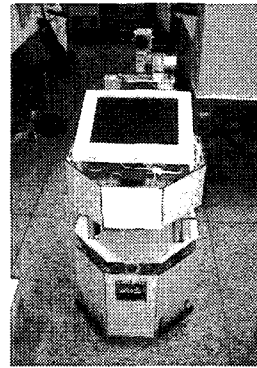


Fig. 1 Mobile robot, IRL-2002

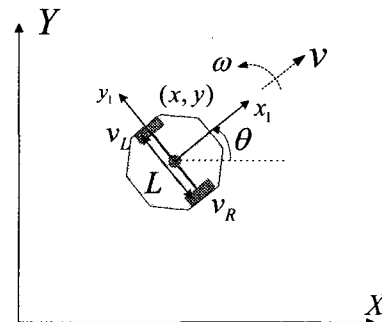


Fig. 2 Coordinate system for mobile robot

그림 2와 같이 좌표계를 설정하면 이동로봇의 Jacobian 식 (1), (2)를 얻을 수 있다. 여기서 v 는 이동로봇의 진행방향 속도이며 ω 는 로봇의 중심축에 대한 회전각속도를 나타낸다⁵.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

또한 식 (1), (2)를 실제의 바퀴의 각속도의 관계로 나타내기 위하여 식 (3)을 사용한다.

$$q = Kv$$

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_R \\ v_L \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 L은 두 바퀴 사이의 거리이다. 이동로봇의 기구학에 의해 각 구동 바퀴의 엔코더 신호로부터 로봇의 위치를 계산한다. 또한, 제어에서 계산되는 로봇의 진행속도와 회전속도 명령은 역기구학에 의해 각 바퀴의 속도명령으로 변환되어 로봇의 위치와 방향을 제어한다.

3. 명령융합기반의 주행 알고리즘

이동로봇이 미지의 환경에서 주어진 작업, 즉 목표지점까지의 운동을 수행하기 위해서 매 순간 인식된 환경정보와 로봇의 상태정보를 이용하여 안전하게 목표지점까지 도달할 수 있도록 방향 및 속도를 결정해야 한다. 본 논문에서는 로봇의 운동에서 고려해야 할 목적을 만족하는 각 명령을 분산적으로 산출하여 이 명령들을 융합하는 방법에 기반한 알고리즘을 사용하였다. 이러한 구조는 센서정보에서 환경의 모델을 구성하는 복잡한 지도형성과정에 비중을 두지않고 로봇의 행동에 기반하므로 동적인 환경에 대하여 더욱 유연하며, 빠르고 강인하게 대처할 수 있다^{4,6}.

그림 3은 이동로봇 운행알고리즘의 구조를 나타낸다. 로봇의 주행시 고려되는 목적을 목적지 방향, 장애물 회피, 회전운동 최소화의 3가지로 정의하고 각 목적을 만족하는 결과를 비용함수의 형태로 표현하여 이들의 융합과정은 각 결과, 즉 비용함수에 가중치를 인가하여 결합하는 구조를 가진다. 명령의 융합과정에서는 인공지능의 기법을 사용하여 각 명령의 가중치를 퍼지 알고리즘을 사용하여 추론하였다. 제안된 방법에 의해 이동로봇은 조건에 따라 지능적으로 가중치를 변화하며 운동을 수행하게 되는데 결합된 비용함수를 탐색하여 최소값을 가지는 방향과 속도를 로봇은 최종결과로 선택한다.

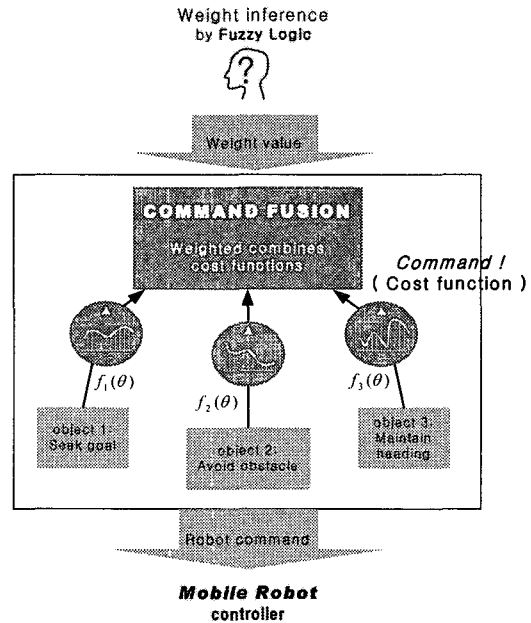


Fig. 3 Overall structure of navigation algorithm

3.1 분산구조의 하부 로봇명령

3.1.1 목적지의 방향결정 명령

목적지로의 도착을 고려하는 명령으로서 이동로봇의 방향에 대한 명령이 목적지와 가장 가까운 결과로 나타난다. 명령결과는 식 (4)와 같이 로봇의 현재위치에서 θ 의 방향으로 v 의 속도로 이동했을 때의 목적지와 거리로서, θ 와 v 에 대한 비용함수로서 정의한다. 그림 4는 목적지 위치를 (5, 4)로 하여 (x,y) 공간에서 비용에 대한 평면을 나타낸다. 여기서 x_d, y_d 는 목적지 좌표, x_c, y_c, θ_c 는 현재 로봇의 위치와 방향을 나타내며 v 는 로봇의 속도로서 $v = v_{max} - k*|\theta_c - \theta|$ 이다. 동일한 입력에 대해서 이동로봇의 회전운동이 클수록 진행방향에 대한 운동은 작게 나타난다⁷. 따라서 속도에 대한 명령은 회전운동에 대해서 반비례관계로 최고속도 v_{max} 에서 회전운동에 대한 감속계수 k 의 감속관계로 설정하였다.

$$E_d(\theta) = \{x_c + v*\Delta t*\cos(\theta_c + \theta) - x_d\}^2 + \{y_c + v*\Delta t*\sin(\theta_c + \theta) - y_d\}^2 \quad (4)$$

따라서 명령으로 표현되는 비용함수는 그림 5와

같이 방향 θ 에 따라 v 의 크기로 이동했을 때의 비용평면에서의 값들이 된다.

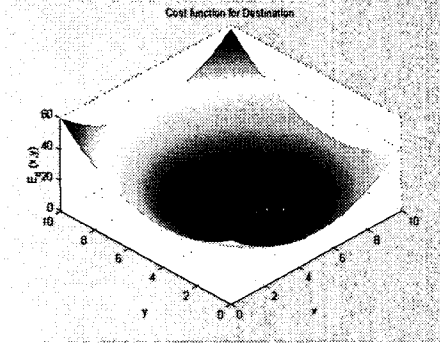


Fig. 4 Surface of cost function which direct to destination

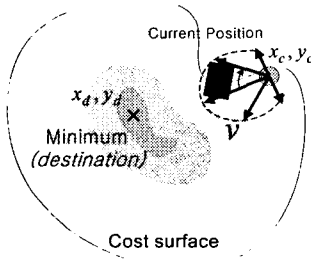


Fig. 5 Function of θ, v in cost surface

3.1.2 장애물 회피 명령

이동로봇의 장애물 회피를 위한 비용함수로서 센서정보에 기반한 주위 장애물 거리를 히스토그램 형태로 나타내는 방법을 사용한다. 장애물에 대한 거리 정보를 식 (5)와 같이 2차 형태의 에너지로 표현하고 이를 모든 θ 에 대하여 조사하여 비용으로 나타낸다. 초음파 센서는 자체적으로 상당히 불확실성을 가지는데 Kuc은 이러한 불확실성을 가우시안 분포의 확률함수로 모델링 할 수 있음을 보였다⁶. 따라서 센서정보의 불확실성 문제를 보완하기 위하여 측정된 값에 확률밀도함수를 곱하고 식 (6)의 형태의 가중합(Weighted Sum)을 취하여 각 방향에서의 장애물 에너지의 기대값을 구하면 Borenstein과 Koren이 제안한 VFH (Vector Field Histogram)의 형태의 장애물 회피를 위한 비용함수를 얻는다⁸.

$$E_o(\theta) = d_{sensor}^2(\theta) \quad (5)$$

$$E_o'(\theta_k) = \sum_{i=k-l+1}^{k+l-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{i-k}{\sigma}\right)^2} E_o(\theta_i) \quad (6)$$

$$\left(\sigma = \frac{\sqrt{l}}{2}\right)$$

동적인 환경에서 이동로봇이 작업하기 위해서는 동적인 변화를 인식하고 그에 대한 동작이 필요하다. 즉 이전시점에서 구성된 주위 환경과 현재의 주위환경의 모델에서 변화를 검출한다. 로봇의 위치는 계속 이동하므로 이전의 좌표계와 현재의 좌표계 사이의 변환관계가 정의되어야 한다.

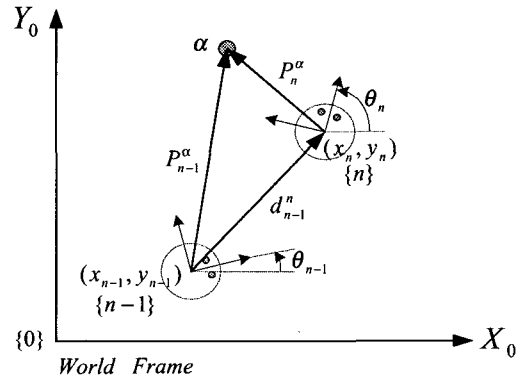


Fig. 6 Transformation of frame for mobile robot

그림 6에서 이동로봇이 $n-1$ 시점에서의 위치, 즉 $\{n-1\}$ 좌표계를 기준으로 α 를 향한 벡터를 P_{n-1}^α 이라고 정의하고, n 시점에서의 $\{n\}$ 좌표계를 기준으로 α 를 향한 벡터를 P_n^α 이라고 하면 P_{n-1}^α 과 P_n^α 의 관계는 식 (7)로 얻어진다.

$$P_n^\alpha = R_{n-1}^n (P_{n-1}^\alpha - d_{n-1}^n) \quad (7)$$

여기서 R_{n-1}^n 은 $\{n-1\}$ 좌표계에서 $\{n\}$ 좌표계로의 회전으로 식 (8)의 형태이며 d_{n-1}^n 은 $\{n-1\}$ 좌표계를 기준으로 $\{n\}$ 좌표계로의 이동을 나타내며 식 (9)로 정의한다.

$$R_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1}$$

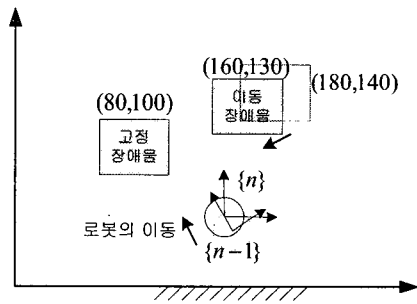
$$d_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos \theta_{n-1} & \sin \theta_{n-1} \\ -\sin \theta_{n-1} & \cos \theta_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n - x_{n-1} \\ y_n - y_{n-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (7)에 의해서 {n-1} 좌표계에서 n-1 시점에 측정된 환경정보는 {n} 좌표계를 기준으로 다시 나타낼 수 있다. 따라서 W_{n-1} , W_n 을 각각 n-1과 n의 시점에서 측정된 극좌표계의 환경정보라고 하면 W_{n-1} 을 {n}좌표계로 기준을 일치시키고 식 (10)에 의해 움직이는 물체를 검출할 수 있다⁹.

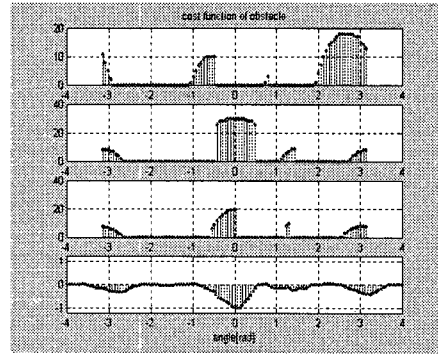
$$movement = W_{n-1} * (W_{n-1} - W_n) \quad (10)$$

그림 7. (a)는 로봇의 좌표가 {n-1}에서 (155, 40, 120o), {n}에서 (150, 50, 90o)로 변화할 때 이동하는 장애물의 검출을 나타낸 것이다. 장애물 1은 고정하였으며 장애물 2는 {n-1}에서 (180, 140)이며, {n}에서 (160, 130)으로 로봇에 접근하는 방향으로 변화를 주었다.

그림 7. (b)의 첫 번째 그래프는 {n-1}에서 검출한 극좌표계의 환경정보이며, 두 번째는 {n}에서 검출한 정보를 나타낸다. 세 번째 그래프는 {n-1} 정보를 {n} 좌표계로 변환한 정보로서 식 (10)의 움직임 검출의 결과는 네 번째 그래프이다. {n} 좌표계를 기준으로 방향 0° 근처에서 거리정보가 음으로 큰 값이 나타나므로 다가오는 물체가 있음을 나타낸다. 움직이는 장애물이 검출되면 로봇은 동작을 중지하고 장애물의 이동 방향을 검출한 후, 진행할 방향을 판단한다. 로봇의 속도를 20 [cm/sec]로 설정하고 움직이는 장애물에 대하여 시뮬레이션한 결과, 장애물의 속도가 40[cm/sec] 이하에 대해서는 검출가능 하였다.



(a) Movement of robot and environment



(b) Environment data and movement data

Fig. 7 Moving obstacle detection

3.1.3 회전운동의 최소화 명령

회전운동을 최소화하는 명령은 급격한 회전운동을 억제하여 바퀴회전의 최소화와 로봇의 부드러운 동작을 목적으로 한다. 회전운동의 비용함수는 현재방향에서 최소값을 가지며 회전각 θ 의 증가에 따라 2차 형태의 함수로 식 (11)로 정의하였다.

$$E_r(\theta) = (\theta_c - \theta)^2 \quad \theta_c: \text{현재 로봇각도} \quad (11)$$

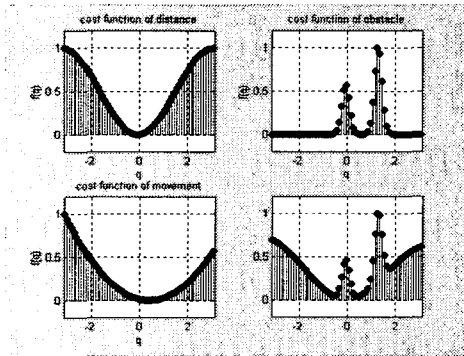
3.2 가중치를 이용한 명령들의 융합

앞서 정의한 3가지 결과로 나타나는 비용함수 형태의 명령은 각 목적에 맞도록 분산적으로 구한 것이다. 이들 비용함수는 상반된 목적을 가질 수 있으며 모든 목적을 동시에 만족시키는 결과를 찾을 수는 없다. 따라서 이들 비용함수에 식 (12)와 같이 가중치를 부여하여 결합함으로써 최종결과에서 각 명령의 기여도를 다르게 할 수 있다.

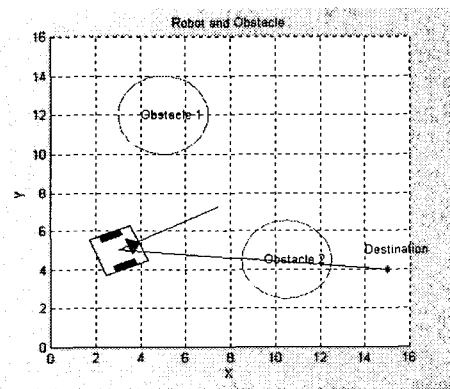
$$E(\theta) = w_1 * E_d(\theta) + w_2 * E_o(\theta) + w_3 * E_r(\theta) \quad (12)$$

그림 8. (a)는 이동로봇에 대한 3가지의 비용함수와 $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.8$, $w_3 = 0.2$ 로 설정하였을 때의 전체 비용함수이고, 이 결과로 구해진 θ 는 26.26°로 그림 8. (b)와 같다. 그림 9. (a)는 이동로봇에 대한 3가지의 비용함수와 $w_1 = 0.7$, $w_2 = 0.1$, $w_3 = 0.8$ 로 설정하였을 때의 전체 비용함수이고, 이 결과로 구해진 θ 는 14.8°로 그림 9. (b)와 같다.

같은 상황에서도 각 비용함수의 가중치에 따라 이동로봇의 진행방향 결정시 고려되는 변수들의 중요도가 달라지며 그로 인해 그림 8과 그림 9의 결과와 같이 진행방향이 다르게 결정된다.

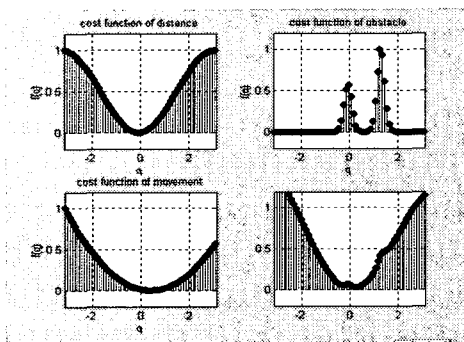


(a) Cost functions and combined function

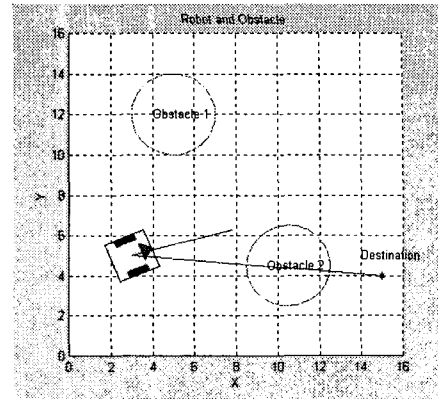


(b) Result direction of mobile robot

Fig. 8 Commands and result for weight value $\omega_1=0.5$, $\omega_2=0.8$, $\omega_3=0.3$



(a) Cost functions and combined function



(b) Result direction of mobile robot

Fig. 9 Commands and result for weight value $\omega_1=0.7$, $\omega_2=0.1$, $\omega_3=0.8$

따라서 목적지와 가까운 방향으로 가는 것을 우선적으로 고려하는 경우, 장애물 회피를 중요시 고려해야 하는 경우 또는 두 가지 이상의 목적을 동시에 고려해야 하는 경우 등과 같이 각 상황에 따라 각 비용함수의 가중치를 절충하여 최선의 선택을 할 수 있는 지능적 처리가 필요하다.

3.3 퍼지규칙에 의한 비용함수의 가중치추론

이동로봇의 가중치를 추론하는 도구로 퍼지 알고리즘을 사용한다. 퍼지 알고리즘을 사용하게 된 주된 이유는 사람의 생각을 쉽게 규칙으로 나타낼 수 있으므로 사람의 지능적인 대처를 쉽게 로봇에 반영할 수 있다는 이점 때문이다^{10,11}. 그리고 무게 중심법(COG)을 사용함으로써 연산구조가 간결하고 이동로봇의 주행하면서 데이터를 처리할 수 있는 처리시간에 유리한 상황을 설정할 수 있다. 그리고 그에 알맞는 적절한 가중치 값을 추론하는 퍼지규칙을 작성하여 가중치를 구하고 최선의 선택을 하도록 하는데 가장 적합하다. 그림 10에 퍼지 방식에 의한 가중치 추론구조에 대하여 나타내었다. 이동로봇의 주위 환경과 상태를 퍼지 추론기의 입력 변수로 정의하였으며 그에 따라 각 비용함수의 가중치를 추론해 낸다. 추론된 가중치는 비용함수에 인가되어 로봇방향을 결정하며, 회전운동의 크기에 따라 속도명령도 구한다. 이렇게 얻은 결과를 이동로봇의 역기구학으로 구동축의 각속도값을 구하여 이동로봇을 제어한다.

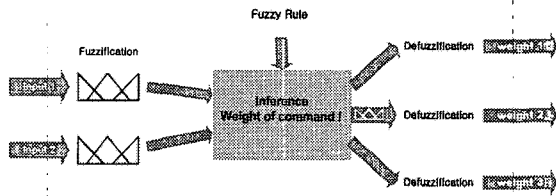
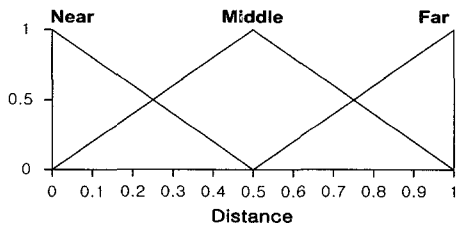


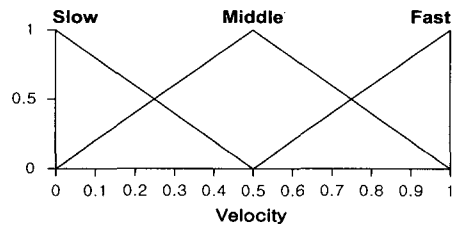
Fig. 10 Structure of fuzzy inference system

퍼지 추론기의 입력변수로 로봇주위의 가장 가까운 장애물의 거리와 현재 로봇의 속도를 설정하였다. 장애물에 대한 변수는 그림 11. (a)와 같이 3개의 소속함수(membership function : M.F)로 구분하여 “가깝다, 보통이다, 멀다”의 언어변수로 표현하였다. 또한 로봇의 속도에 대한 변수는 그림 11. (b)와 같이 3개의 소속함수로 구분하여 “느리다, 보통이다, 빠르다”의 언어변수로 표현하였다.

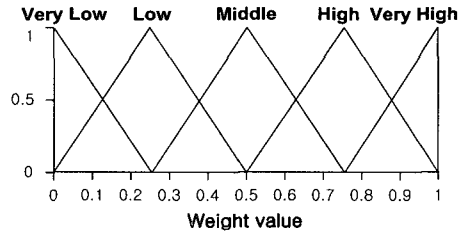
퍼지추론기의 출력으로는 각 명령의 가중치 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 이며 더욱 세밀한 구분을 위해 그림 11. (c)와 같이 5개의 소속함수로 구분하였다. 각 비용함수의 가중치를 “매우 낮다, 낮다, 보통이다, 높다, 매우 높다”의 언어변수로 표현하여 가중치 값을 추론하게 된다. 퍼지추론에서 비퍼지화는 일반적인 Mamdani의 무게중심법을 사용하였다.



(a) M.f. of input variable for nearest distance



(b) M.f. of input variable for robot velocity



(c) M.f. of output variable for command weights

Fig. 11 Fuzzy input, output variables for inference weight

입력변수에 대하여 상황을 구분하고 그에 적절한 가중치의 규칙을 인간의 생각에 근거한 판단으로 설정하였다. 기본적인 구상은 가장 가까운 장애물이 멀리 있으면 장애물 비용함수의 가중치는 낮추고 다른 비용함수들은 상대적으로 높은 값을 부여하여 중요성을 높인다. 또한 로봇속도에 근거하여 회전운동 비용함수의 가중치를 조정한다. 이러한 개념에서 상황에 맞도록 표 1~3의 퍼지규칙을 작성하였다.

Table 1 Inference rule of weight 1

dist \ vel	Near	Middle	Far
Slow	low	very high	very high
Middel	low	high	very high
Fast	very low	middle	high

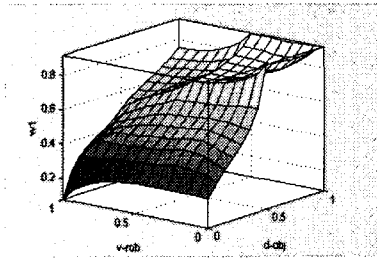
Table 2 Inference rule of weight 2

dist \ vel	Near	Middle	Far
Slow	very high	low	very low
Middel	very high	low	very low
Fast	high	low	very low

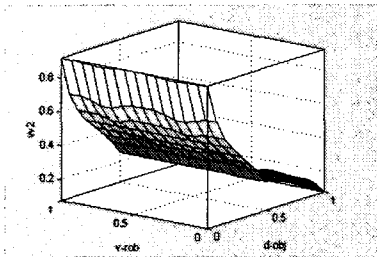
Table 3 Inference rule of weight 3

dist \ vel	Near	Middle	Far
Slow	low	low	middle
Middel	very low	middle	high
Fast	very low	middle	very high

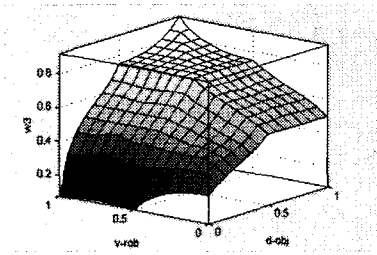
입력변수에 대해 추론된 출력결과를 그림 12에 입출력 평면으로 나타내었다. 그림 12. (a)의 ω_1 출력평면 결과에서 장애물의 거리가 멀고 로봇의 속도가 빠를수록 ω_1 이 높은값을 가짐을 알 수 있다.



(a) Surface of ω_1



(b) Surface of ω_2



(c) Surface of ω_3

Fig. 12 Input-output surface of weight inference system

그림 12. (b)의 ω_2 출력 평면 결과는 로봇의 속도와는 상관관계가 없고 장애물의 거리에 대해 반비례 관계를 나타낸다. 그림 12. (c)의 ω_3 출력 평면 결과는 장애물과의 거리가 멀고 로봇의 속도가 빠를수록 높은 값을 나타낸다. 또한 각 비용함수는 다른 목적을 나타내므로 입출력 평면이 서로 상반된 형태를 나타냄을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

선행연구¹²를 바탕으로 제안된 경로계획 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 다양한 환경에서 주행 시뮬레이션을 수행하고, 임의의 장애물 및 벽을 배치하여 이동로봇이 목적지까지 충돌없이 안전하게 경로를 계획하여 주행하는지를 실험하였다.

4.1 시뮬레이션

시뮬레이션의 구성은 그림 13과 같다.

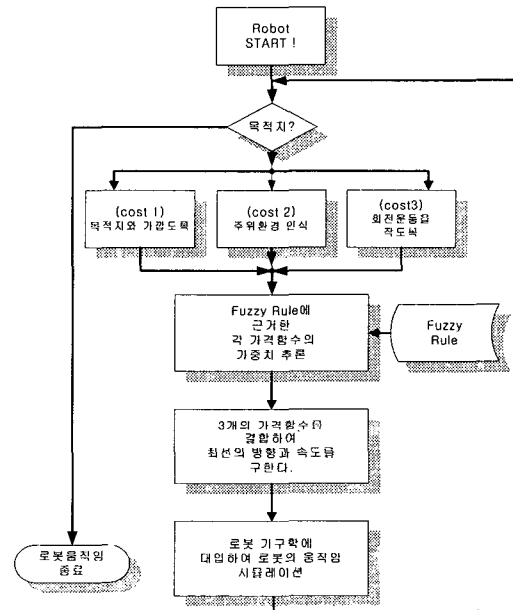


Fig. 13 Flow chart of mobile robot navigation

그림 14는 고정된 벽이 있는 환경에서 이동로봇의 주행을 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 프로그램의 오른쪽 상단에는 로봇의 상태와 추론된 각 비용함수의 가중치를 나타내었으며 하단에는 3가지 비용함수의 히스토그램과 가중치가 인가되어 결합된 전체 비용함수를 각각 나타내었다.

결과에서 나타난 이동로봇의 궤적에서 알 수 있듯이 우회해서 목적지까지 찾아가야 하는 환경에 대해서 안전하게 목적지에 도착함을 알 수 있다. 실제 로봇의 주행과정 중 주위에 장애물이 가까이 있는 경우에는 퍼지규칙에서 설정한 대로 목적지를 향하는 목표와 움직임을 적게 하는 목표는 낮은 가중치에 의해 경미하게 고려되고 장애물을 회피하는 목표가 중요하게 고려되므로 우회해서 진행함을 알

수 있다. 여기서 제안한 주행 알고리즘의 가장 큰 장점은 주위상황에 따라 지능적으로 정의한 세 가지 목적을 절충해가면서 그 상황에서 최적의 판단을 한다는 것이다.

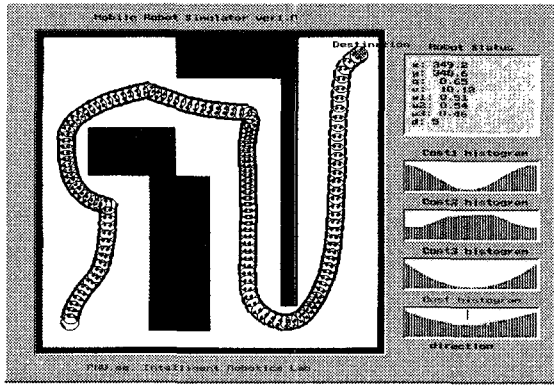


Fig. 14 Simulation of navigation 1

그림 15는 벽과 고정된 장애물 및 움직이는 장애물이 있는 환경에서의 이동로봇의 주행을 시뮬레이션한 결과이다. 주행할 궤적에 이동하는 장애물이 가로막고 있는 경우 먼저 다른 경로를 탐색하고 이후에 다시 장애물이 가로막던 경로를 조사하였다. 이때 장애물의 속도가 느려서 경로를 계속 가로막고 있으면 다른 길로 우회하고, 경로가 생성되면 그 경로로 진행하였다. 이동로봇의 궤적을 살펴보면 움직이는 장애물로 인하여 여러번 경로를 수정했음을 알 수 있으며 이동 장애물에 대해서도 지능적으로 최적의 경로를 선택함을 알 수 있다.

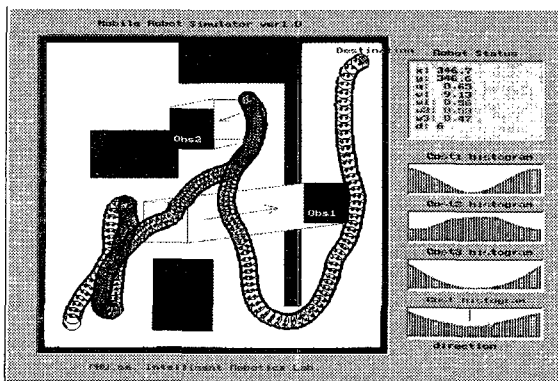
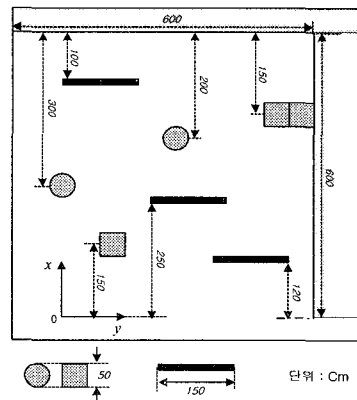


Fig. 15 Simulation of navigation 2

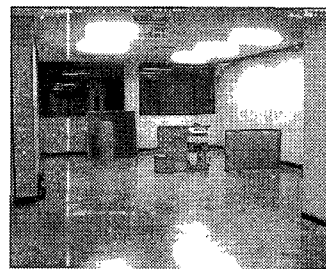
4.2 실험

실험에 사용된 이동로봇 IRL-2002의 전체 시스템 구성을 그림 2와 같으며 주행 실험은 두 가지 환경에 대하여 실시하였다. 먼저 그림 16. (a),(b)의 정방형의 자유공간에서 장애물을 임의로 두고 목적지를 찾아가도록 하였다. 로봇의 시작점은 원점이며 방향은 '0'으로, 그리고 목적지는 (400, 500)으로 설정하였다. 여기서 단위는 'cm'이다. 그림 16. (c)에 로봇의 궤적을 그림 16. (d)에는 로봇의 방향과 속도를 결과로서 나타내었다. 이동로봇의 궤적에서 장애물이 가까이 접근하면 장애물 회피의 가중치를 높여 장애물을 회피하면서 목적지로 지능적으로 안정하게 주행함이 확인된다.

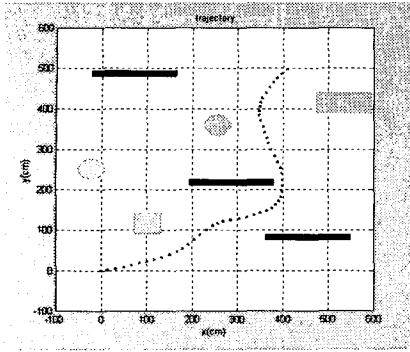
로봇의 진행방향 속도는 전체적으로 20[cm/sec]로 운동하며 로봇의 방향의 변화가 심한 경우에 감소한다. 기구학 계산에 의해 구한 로봇의 위치와 실제 위치 사이의 오차는 방향계산의 오차누적에 의해 심각하게 발생되었는데, 이는 자이로센서에 의해 현저히 감소되었다¹³.



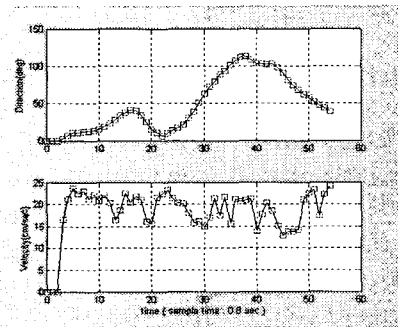
(a) Diagram of navigation environment



(b) Environment of experiment



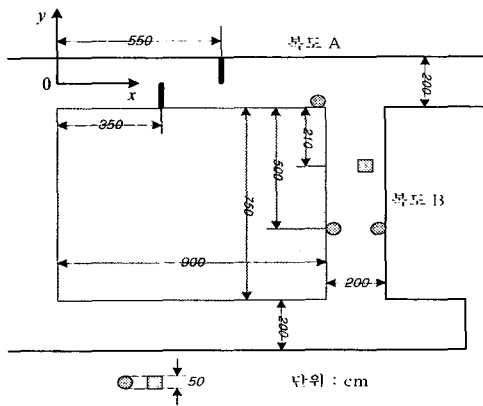
(c) Trajectory of mobile robot



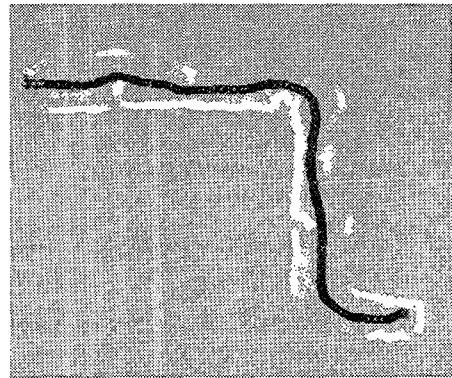
(d) Direction and Velocity of mobile robot

Fig. 16 Navigation of robot in square environment

다음으로 그림 17. (a)와 같이 폭 2m의 복도에 장애물을 배치한 환경에서 주행하도록 실험하였다. 그림 17. (b)는 (1300, -950)까지 주행하면서 검출된 센서값에서 신뢰성있는 정보만을 나타낸 것인데 실제 환경과 유사하게 지도가 형성되었음을 알 수 있었다.



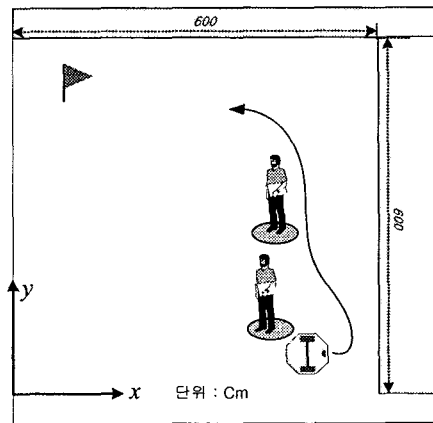
(a) Diagram of navigation environment



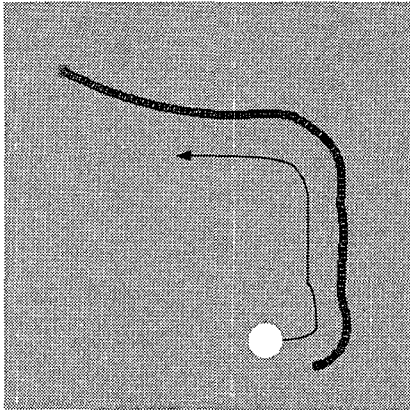
(b) Composed world map

Fig. 17 Navigation of robot in corridor environment

다음으로 이동장애물에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 18 (a)와 같은 정방향의 공간에서 로봇의 초기상태는 (550, 80, 0)이며 목적지는 (100, 550)으로 설정하였다. 로봇의 주행중에 사람이 로봇과 같이 움직이거나 진행방향의 정면위치에서 서서 경로를 방해하는 형태로 실험환경을 조성하였다. 그림 18 (b)는 그 결과에서 동적 장애물의 환경에서도 빠르게 대처하면서 목적지에 도달했음을 알 수 있다. 로봇의 센서정보의 주기가 800 msec이므로 이동 장애물의 변화가 빠르면 상황에 대처하지 못하는 경우가 발생한다. 그러나 센서정보의 주기를 빠르게 하면 더욱 동적인 환경에서도 잘 대처할 것이다.



(a) Diagram of navigation environment



(b) Trajectory of mobile robot

Fig. 18 Navigation of robot in dynamic environment

5. 결론

본 논문에서는 미지의 동적환경에서 이동로봇이 자율적으로 목적지까지 안전하게 이동할 수 있는 장애물 회피 및 경로 계획을 위한 알고리즘을 제시하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 이동로봇이 여러 목적을 동시에 달성하기 위하여 각각의 비용함수를 정의하고 퍼지규칙에 의해 각 비용함수의 가중치를 조절하여 상황에 따라 지능적으로 처리할 수 있도록 하였다. 제안한 알고리즘에 의해 시스템은 다중 초음파센서와 자이로 센서만을 사용하므로 구조적으로 간단하면서 높은 제어 성능을 가지며, 요구되는 목적을 유연하게 부가할 수 있어 퍼지규칙에 의해 언어와 같은 쉬운 방법으로 이들을 결합할 수 있는 장점이 있다. 시뮬레이션 및 실험 결과에서 이동로봇은 미지의 환경에서 주위 여건에 따라 적절하게 대처하며, 목적지를 최적의 경로로 찾아감이 확인되었으며, 유동적으로 변화하는 이동장애물에 대해서도 충돌을 회피하며 목적지에 도달할 수 있었다. 그러나 로봇의 주행 속도 이상으로 다가오는 이동장애물이나 고속의 불규칙적인 이동 장애물에 대해서는 강인한 결과를 얻기 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 적절한 예측제어 알고리즘을 개발하여 강인한 성능을 얻을 수 있는 연구와 비전 시스템과의 센서융합에 의해 지역적인 정보의 한계를 벗어나 국부최소점 문제를 극복하는 연구가 계속 되어야 할 것이다.

참고문헌

1. J. Miura and Y. Shirai, "Vision and Motion Planning for a Mobile Robot under Uncertainty," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 806-825, December 1997.
2. A. Ohya, A. Kosaka and A. Kak, "Vision-Based Navigation by a Mobile Robot with Obstacle Avoidance Using Single-Camera Vision and Ultrasonic Sensing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 6, pp. 969-978, December 1998.
3. N. C. Rowe, "Obtaining Optimal Mobile-Robot Paths with Nonsmooth Anisotropic Cost Functions Using Qualitative-State Reasoning," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 375-399, June 1997.
4. R. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23, 1986.
5. J. Agullo, S. Cardona and J. Vivancos, "Kinematics of vehicles with directional sliding wheels," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 22, pp. 295-301, 1987.
6. J. Rosenblatt, "DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation," *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 9, No. 2/3, pp. 339-360, April-September 1997.
7. Jin Taeseok, Park Jaehan, and Lee Jangmyung, "An Optimal Design of 3 DOF Mobile Robot with a Prismatic Axis," *Proc. of Communication, IEEK Summer Conferences*, Vol. 8 No. 1, pp. 213-218, 1999.
8. J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, 1994.
9. D. Nair and J. K. Aggarwal, "Moving Obstacle Detection from a Navigation Robot," *IEEE Transaction on robotics and automation*, Vol. 14, No. 3, pp. 404-416, June 1998.
10. L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Sytems and Decision Processes," *IEEE Transactions on Systems, Man,*

- and Cybernetics, 3(1):28-44, January 1973.
11. H. Kamada, S. Naoi and T. Goto, "A Compact Navigation System Using Image Processing and Fuzzy Control," IEEE Southeastcon, New Orleans, April 1990.
 12. Hur Hwa-Ra, Park Jae-Han, Park Sung-Hyun, Park Jin-Woo, and Lee Jang-Myung, "A Study on Intelligent Motion Planning of Mobile Robot Considering Environmental Condition," Proc. of IEEE Winter Conferences, Vol. 7, No. 2, pp. 318-322, 1998.
 13. Kiyoshi Komoriya and Eimei Oyama, "Position Estimation of a Mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope," 日本 ロボット 學會誌 Vol. 14, No. 4, pp.532-532, 1996.
 14. Y. Arai, T. Fujii, H. Asama and Y. Kataoka, "Adaptive behavior acquisition of collision avoidance among multiple autonomous mobile robots," Proc. IROS, pp. 1762-1767, 1997.
 15. J. Borenstein and Y. Koren, "Potential field methods and their inherent for mobile robot navigation," In Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1398-1404, 1991.
 16. T. Hessburg and M. Tomizuka, "Fuzzy logic control for 1 lateral vehicle Guidance," IEEE Control Systems, Vol. 14, No. 4, 1994.
 17. J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 278-288, 1994.
 18. Joung In-Soo, Cho Hyung-Suck, "Self-localization for Mobile Robot Navigation using an Active Omni-direction Range Sensor," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 253-264, 1999.