

## 동적환경에서 이동로봇의 지능적 운행 (Intelligent Navigation of a Mobile Robot in Dynamic Environments)

許花羅\*, 朴宰漢\*, 朴成現\*, 朴晉雨\*, 李章明\*

(Hwa Ra Hur, Jae Han Park, Sung Hyun Park, Jin Woo Park, and Jang Mung Lee)

### 요 약

본 논문에서는 이동로봇이 미지의 동적인 환경을 초음파센서로 인지하여 지능적으로 목표점을 찾아가는 운행 알고리즘을 제안한다. 센서로부터 환경모델을 구성하여 로봇의 궤적을 생성하는 센서융합(Sensor fusion) 방법과 달리 제안된 알고리즘은 로봇의 행동이 결과로 나타나는 명령 융합(Command fusion)의 형태를 가진다. 로봇의 주행에서 고려해야 할 문제들을 비용함수로 각각 표현하고 주위환경과 로봇의 상태에 따라 각 비용함수에 가중치를 인가하여 주어진 조건에서 최선의 행동을 선택하는 방법을 사용하였다. 제안된 알고리즘으로 시뮬레이션을 수행하고, 이의 검증을 위해 자체 제작한 이동로봇 ZIRO에 적용하여 실험하였다. 실험의 결과로서 제안된 알고리즘은 미지의 환경에서도 장애물 등 주변을 인식, 회피하여 목표점에 안전하게 도달하는데 적합함을 알 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we propose a navigation algorithm for a mobile robot, which is intelligently searching the goal location in unknown dynamic environments using an 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 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 is determined for an optimal trajectory in dynamic environments. For the evaluation of the proposed algorithm, we performed simulations in PC as well as real experiments with ZIRO. The results show that the proposed algorithm is apt to identify obstacles in unknown environments to guide the robot to the goal location safely.

### I. 서 론

이동로봇은 센서를 이용하여 주위환경을 파악하고 자율적으로 상황에 대처하며 인간을 대신하여 주어진 일을 수행하는 지능형 로봇으로 고정된 작업환경에서의 일반적인 매니플레이터와는 달리 작업환경이 유동

적이며 가변적이므로 그에 따른 지능적인 처리가 요구된다<sup>[1]</sup>. 이동로봇에 대한 연구는 1968년 Stanford Research Institute에서 SHAKEY를 제작한 이후로 지속적으로 이루어져 왔으며, 현재에도 광범위한 분야에서 활용성과 더불어 컴퓨터와 센서기술의 발달로 인하여 활발히 진행되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

이동로봇에 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 방

\* 正會員, 釜山大學敎 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Pusan National Univ.)

接受日字:1999年4月1日, 수정완료일:2000年1月21日

대하므로 실시간 처리를 위하여 고성능의 시스템을 필요로 한다. 또한 영상으로부터 환경을 인식하는 과정의 어려움으로 인하여 환경에 대한 사전정보를 필요로 한다<sup>[4,5]</sup>. 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.

이동로봇이 사전지식이 없는 동적인 환경에서 작업하기 위해서는 주위환경을 인지하여 로봇의 수행작업과 현재 환경조건에 적합한 동작을 취해야 한다. 이러한 처리를 위한 대표적 방법은 두 가지로 구분되는데 그림 1과 같이 센서융합(Sensor fusion)에 의한 방법과 명령융합(Command fusion)에 의한 방법이 있다.

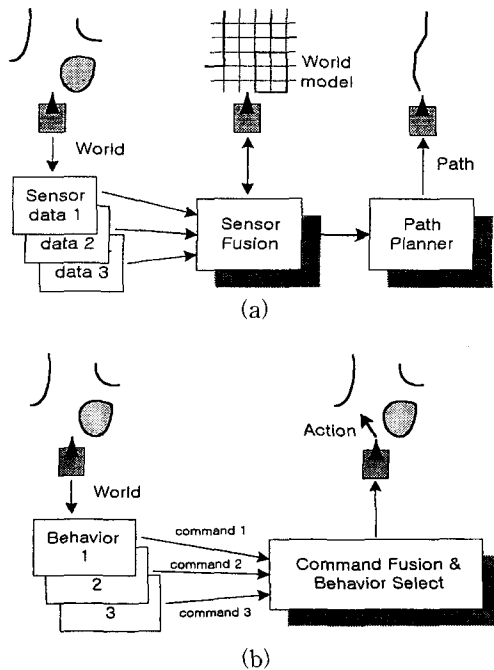


그림 1. 센서융합 방식과 명령융합 방식  
 (a) 센서융합에 의한 이동로봇의 경로계획  
 (b) 명령융합에 의한 이동로봇의 동작 결정  
 Fig. 1. Sensor Fusion vs. Command Fusion.  
 (a) Path plan by sensor fusion.  
 (b) Action select by command fusion.

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 요구된다<sup>[6]</sup>. 명령융합의 방법은 로봇의 동작에서 각각의 개별목적을 만족하는 여러 명령들 가운데서 전체목적에 위한 최선의 선택을 하는 방법으로 로봇의 행동에 기반을 둔 형태이다. 이 방법에서는 분산적으로 각 제어목적에 만족하는 행동결과가 나타나며 이를 융합하는 과정에서 인공지능의 기법이 유용하게 사용될 수 있다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서 제안한 이동로봇의 제어 알고리즘은 명령융합의 방법을 근거로 하여 각 행동명령은 비용함수의 형태로 나타나며, 이들의 융합은 퍼지논리로 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. 제안된 방법을 시뮬레이션과 자체 제작한 이동로봇 ZIRO에 적용하여 실험함으로써 그 유효성을 확인하였다.

## II. 이동로봇의 기구학

그림 2는 자체 제작된 이동로봇 ZIRO의 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 회전속도를 측정하여 로봇의 방향인지에 사용하고 1개의 초음파센서(Polaroid 6500)는 스텝 모터를 사용하여 180° 회전시킴으로써 주위환경을 인식한다.

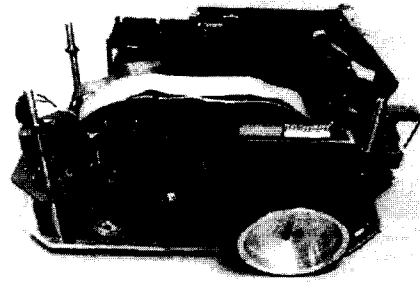


그림 2. 이동로봇 ZIRO  
 Fig. 2. Mobile robot, ZIRO.

그림 3과 같이 좌표계를 설정하면 이동로봇의 Jacobian 식 (1), (2)를 얻을 수 있다. 여기서  $v$ 는 이동로봇의 진행방향 속도이며  $\omega$ 는 로봇의 중심축에 대한 회전각속도를 나타낸다<sup>[8]</sup>.

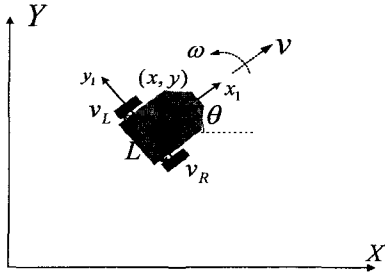


그림 3. 이동로봇을 위한 좌표계  
Fig. 3. Coordinate system for mobile robot.

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

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

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

$$q = Kv$$

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

여기서  $L$ 은 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.

### III. 로봇의 명령융합에 기반한 운행 알고리즘

이동로봇이 미지의 환경에서 주어진 작업, 즉 목표지점까지의 운행을 수행하기 위해서 매 순간 인식된 환경정보와 로봇의 상태정보를 이용하여 안전하게 목표점까지 도달할 수 있도록 방향 및 속도를 결정해야 한다. 이에 대한 연구로는 모서리를 검출하여 장애물을 회피하는 방법과 환경을 셀로 나누어 환경지도를

구성하면서 경로를 찾아내는 셀 분해방법<sup>[9]</sup>, 장애물에 가상의 밀어내는 힘을 부여하여 장애물과 먼 방향으로 이동하는 Potential Field를 이용한 방법<sup>[2]</sup> 등이 있다. 모서리 검출방법은 간단하고 직관적인데 비해 센서의 정확도에 대한 의존도가 크며, 셀 분해 방법은 센서값의 불확실성에 대한 이점은 있으나 많은 메모리량과 계산량이 요구되는 문제가 있으며, Potential Field 방법은 사전 환경지식을 필요로 하는 제약조건이 있다. 본 논문에서는 로봇의 운행에서 고려해야 할 목적을 만족하는 각 명령을 분산적으로 산출하여 이 명령들을 융합하는 방법에 기반한 알고리즘을 사용하였다. 이러한 구조는 센서정보에서 환경의 모델을 구성하는 복잡한 지도형성과정에 비중을 두지 않고 로봇의 행동에 기반하므로 동적인 환경에 대하여 더욱 유연하며, 빠르고 강인하게 대처할 수 있다<sup>[7,10]</sup>.

그림 4는 이동로봇 운행알고리즘의 구조를 나타낸다. 로봇의 운행시 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. 퍼지 알고리즘은 사람의 생각을 언어적 규칙으로 작성하여 그 값을 수치로 쉽게 나타낼 수 있는 장점이 있으며 불확실한 정보에 대하여 강인성을 가진다<sup>[3]</sup>. 제안된 방법에 의해 이동로봇은 조건에 따라 지능적으로 가중치를 변화하며 운행을 수행하게 되는데 결합된 비용함수를 탐색하여 최소값을 가지는 방향과 속도를 로봇은 최종결과로 선택한다.

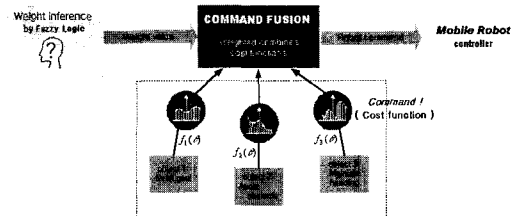


그림 4. 이동로봇 알고리즘의 전체 구조  
Fig. 4. Overall structure of navigation algorithm.

#### 1. 분산된 구조의 하부 로봇명령

(1) 목적지 방향을 향하는 명령

목적지로의 도착을 고려하는 명령으로서 이동로봇의

방향에 대한 명령이 목적지와 가장 가까운 결과로 나타난다. 명령결과는 식 (4)와 같이 로봇의 현재위치에서  $\theta$ 의 방향으로  $v$ 의 속도로 이동했을 때의 목적지와의 거리로서,  $\theta$ 와  $v$ 에 대한 비용함수로서 정의한다. 그림 5는 목적지 위치를 (5, 4)로 하여 (x,y) 공간에서 비용에 대한 평면을 나타낸다. 여기서  $x_d, y_d$ 는 목적지 좌표,  $x_c, y_c, \theta_c$ 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 나타난다<sup>[11]</sup>. 따라서 속도에 대한 명령은 회전운동에 대해서 반비례관계로 최고속도  $v_{max}$ 에서 회전운동에 대한 감속비  $k$ 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 6과 같이 방향  $\theta$ 에 따라  $v$ 의 크기로 이동했을 때의 비용평면에서의 값들이 된다.

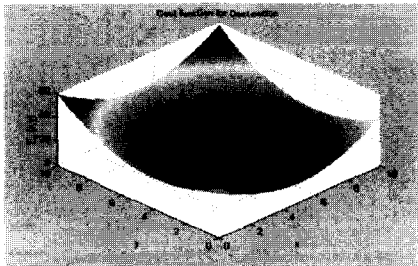


그림 5. 목적지에 대한 비용함수의 평면  
Fig. 5. Surface of cost function which direct to destination.

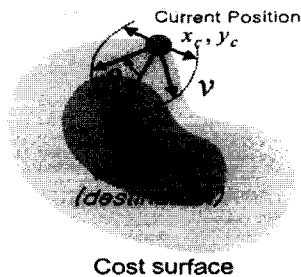


그림 6. 비용평면에서의  $\theta, v$ 의 함수  
Fig. 6. Function of  $\theta, v$  in cost surface.

(2) 장애물 회피를 위한 명령

이동로봇의 장애물 회피를 위한 비용함수로서 센서

정보에 기반한 주위 장애물 거리를 히스토그램 형태로 나타내는 방법을 사용한다. 장애물에 대한 거리 정보를 식 (5)와 같이 2차 형태의 에너지로 표현하고 이를 모든  $\theta$ 에 대하여 조사하여 비용으로 나타낸다. 초음파 센서는 자체적으로 상당히 불확실성을 가지는데 Kuc은 이러한 불확실성을 가우시안 분포의 확률함수로 모델링 할 수 있음을 보였다<sup>[12]</sup>. 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 얻는다<sup>[13]</sup>.

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

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

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

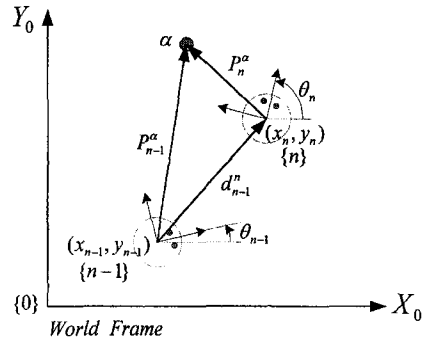


그림 7. 이동로봇의 좌표변환관계  
Fig. 7. Transformation of frame for mobile robot.

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

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

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.

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

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

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 있다<sup>[4]</sup>.

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

그림 8. (a)은 로봇의 좌표가 {n-1}에서 (155, 40, 120°), {n}에서 (150, 50, 90°)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.

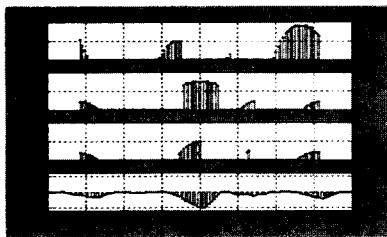
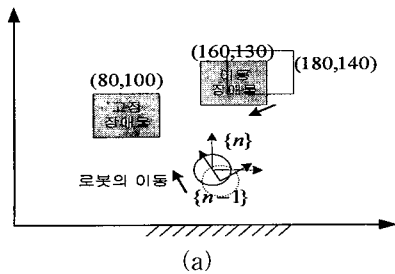


그림 8. 이동장애물의 검출

- (a) 로봇과 환경의 움직임
- (b) 환경정보 및 이동검출정보

Fig. 8. Moving obstacle detection.

- (a) Movement of robot and environment.
- (b) Environment data and movement data.

그림 8. (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.

(3) 회전운동을 최소화하는 명령

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

$$E_c(\theta) = (\theta_c - \theta)^2 \theta_c : \text{현재 로봇 각도} \quad (11)$$

2. 가중치 부여에 의한 각 명령의 융합

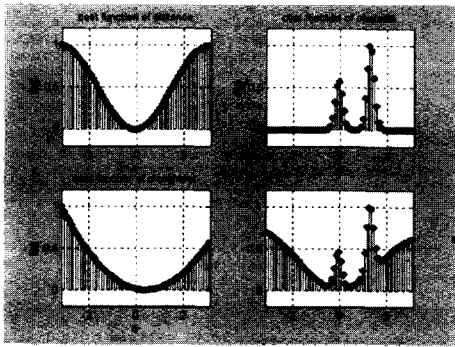
앞서 정의한 3가지 결과로 나타나는 비용함수형태의 명령은 각 목적에 맞도록 분산적으로 구한 것이다. 이들 비용함수는 상반된 목적을 가질 수 있으며 모든 목적을 동시에 만족시키는 결과를 찾을 수는 없다. 따라서 이들 비용함수에 식 (12)와 같이 가중치를 부여하여 결합함으로써 최종결과에서 각 명령의 기여도를 다르게 할 수 있다.

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

그림 9. (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  $\theta$ 는 26.26°로 그림 9. (b)와 같다. 그림 10. (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  $\theta$ 는 14.8°로 그림 10. (b)와 같다.

같은 상황에서도 각 비용함수의 가중치에 따라 이동로봇의 진행방향 결정시 고려되는 변수들의 중요도가 달라지며 그로 인해 그림 9와 그림 10의 결과와 같이 진행방향이 다르게 결정된다. 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.



(a)

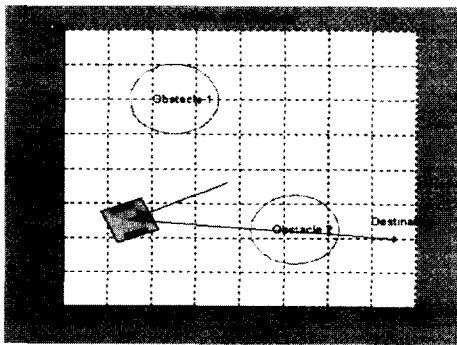
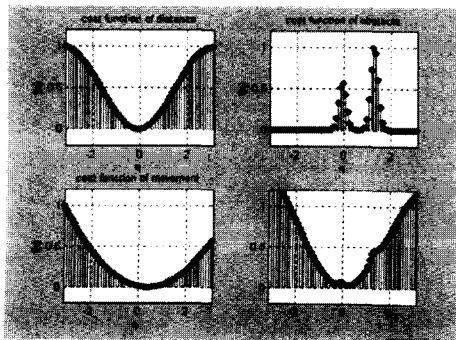


그림 9. 가중치  $\omega_1=0.5$ ,  $\omega_2=0.8$ ,  $\omega_3=0.3$ 에 대한 각 명령과 결과

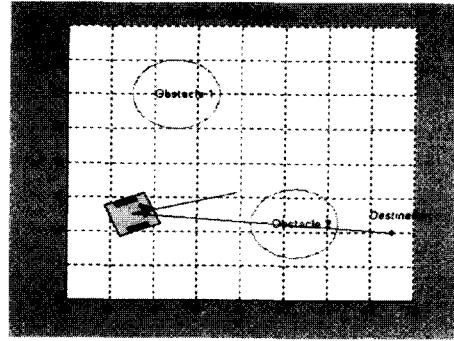
- (a) 각 비용함수와 가중치 결합된 비용함수
- (b) 이동로봇의 진행방향 결과

Fig. 9. 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.



(a)



(b)

그림 10. 가중치  $\omega_1=0.7$ ,  $\omega_2=0.8$ ,  $\omega_3=0.3$ 에 대한 각 명령과 결과

- (a) 각 비용함수와 가중치 결합된 비용함수
- (b) 이동로봇의 진행방향 결과

Fig. 10. 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.

### 3. 퍼지 규칙에 의한 비용함수의 가중치 추론

이동로봇의 가중치를 추론하는 도구로 퍼지 알고리즘을 사용한다. 퍼지 알고리즘을 사용하게된 주된 이유는 사람의 생각을 쉽게 규칙으로 나타낼 수 있으므로 사람의 지능적인 대처를 쉽게 로봇에 반영할 수 있다는 이점 때문이다<sup>[15,16]</sup>. 각각의 상황을 설정하고 그에 알맞은 적절한 가중치 값을 추론하는 퍼지규칙을 작성하여 가중치를 구하고 최선의 선택을 하도록 한다. 그림 11에 퍼지 방식에 의한 가중치 추론구조에 대하여 나타내었다. 이동로봇의 주위 환경과 상태를 퍼지 추론기의 입력변수로 정의하였으며 그에 따라 각 비용함수의 가중치를 추론해 낸다. 추론된 가중치는 비용함수에 인가되어 로봇방향을 결정하며, 회전운동의 크기에 따라 속도명령도 구한다. 이렇게 얻은 결과를 이동로봇의 역기구학으로 관절 각 속도값을 구하여 이동로봇을 제어한다.

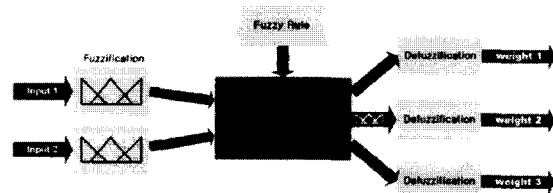


그림 11. 퍼지추론부의 구조

Fig. 11. Structure of fuzzy inference system.

퍼지 추론기의 입력변수로 로봇주위의 가장 가까운 장애물의 거리와 현재 로봇의 속도를 설정하였다. 장애물에 대한 변수는 그림 12. (a)와 같이 3개의 소속함수(membership function : M.F)로 구분하여 “가깝다, 보통이다, 멀다”의 언어변수로 표현하였다. 또한 로봇의 속도에 대한 변수는 그림 12. (b)와 같이 3개의 소속함수로 구분하여 “느리다, 보통이다, 빠르다”의 언어변수로 표현하였다.

퍼지 추론기의 출력으로는 각 명령의 가중치  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 이며 더욱 세밀한 구분을 위해 그림 12. (c)와 같이 5개의 소속함수로 구분하였다. 각 비유함수의 가중치를 “매우 낮다, 낮다, 보통이다, 높다, 매우 높다”의 언어변수로 표현하여 가중치 값을 추론하게 된다. 퍼지추론에서 비퍼지화는 일반적인 Mamdani의 무게 중심법을 사용하였다.

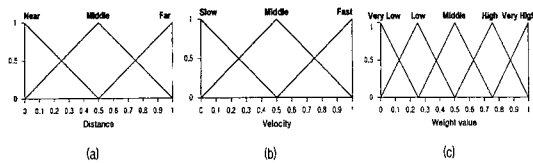


그림 12. 가중치 추론에 사용된 퍼지 입,출력변수  
 (a) 가장 가까운 장애물에 대한 입력변수의 소속함수 (b) 로봇의 속도에 대한 입력변수의 소속함수 (c) 추론되는 가중치의 소속함수

Fig. 12. Fuzzy input, output variables for inference weight. (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.

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

표 1. 가중치 1의 추론규칙

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

표 2. 가중치 2의 추론규칙

Table 2. Inference rule of weight 2.

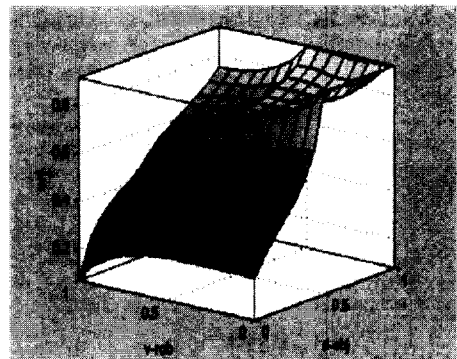
dist \ vel	Near	Middle	Far
Slow	very high	low	very low
Middel	very high	low	very low
Fast	high	low	very low

표 3. 가중치 3의 추론규칙

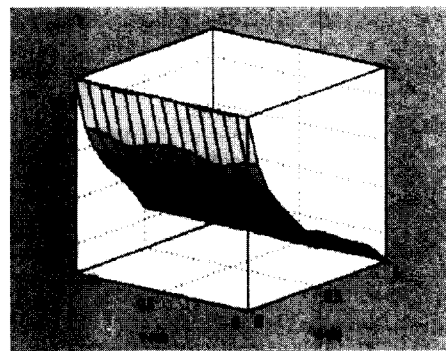
Table 3. Inference rule of weight 3.

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

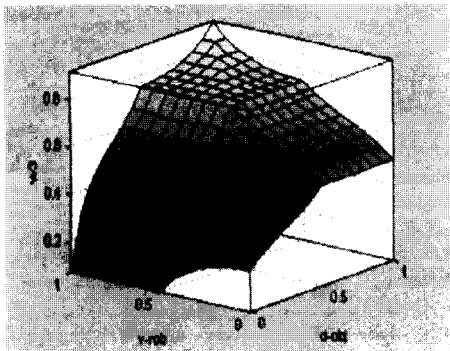
입력변수에 대해 추론된 출력결과를 그림 13에 입 출력 평면으로 나타내었다. 그림 13. (a)의  $\omega_1$  출력평면 결과에서 장애물의 거리가 멀고 로봇의 속도가 빠를수록  $\omega_1$ 이 높은값을 가짐을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 13. 가중치 추론부의 입출력 평면  
 (a)  $w_1$ 의 평면 (b)  $w_2$ 의 평면 (c)  $w_3$ 의 평면  
 Fig. 13. Input-output surface of weight inference system.  
 (a) Surface of  $w_1$  (b) Surface of  $w_2$   
 (c) Surface of  $w_3$

그림 13. (b)의  $w_2$  출력 평면 결과는 로봇의 속도 와는 상관관계가 없고 장애물의 거리에 대해 반비례 관계를 나타낸다. 그림 13. (c)의  $w_3$  출력 평면 결과는 장애물과의 거리가 멀고 로봇의 속도가 빠를수록 높은 값을 나타낸다. 또한 각 비용함수는 다른 목적을 나타내므로 입출력 평면이 서로 상반된 형태를 나타낼 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

선행연구<sup>[17]</sup>를 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.

1. 시뮬레이션

시뮬레이션의 구성은 그림 14와 같다.

그림 15는 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 안

전하게 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 제한한 주행 알고리즘의 가장 큰 장점은 주위상황에 따라 지능적으로 정의한 세 가지 목적을 절충해가면서 그 상황에서 최적의 판단을 한다는 것이다.

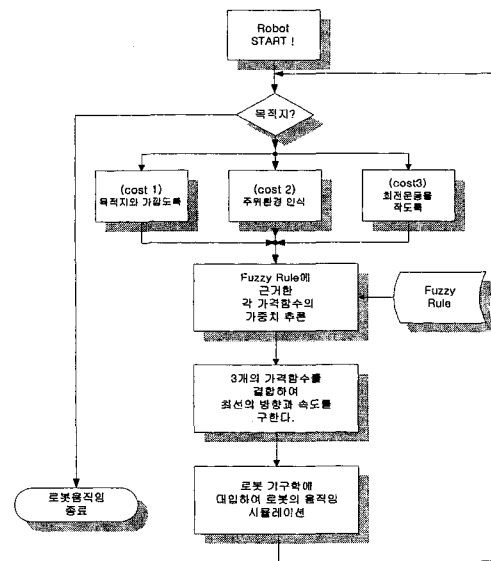


그림 14. 이동로봇 시뮬레이션 흐름도  
 Fig. 14. Flow chart of mobile robot navigation.

그림 16은 좁은 입구와 고정된 장애물이 있는 환경에서의 이동로봇의 주행 시뮬레이션 결과이다. 좁은 입구에 대해서도 벽면을 추적하여 찾아내며 목적지까지 안전하게 도착함이 확인된다.

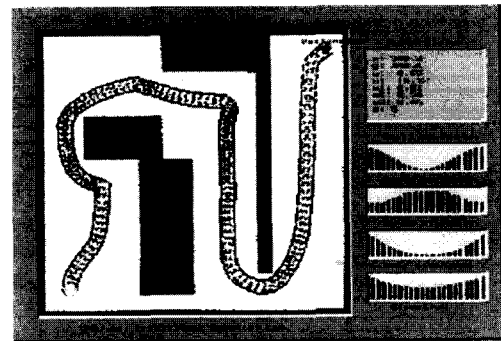


그림 15. 주행 시뮬레이션 1  
 Fig. 15. Simulation of navigation 1.



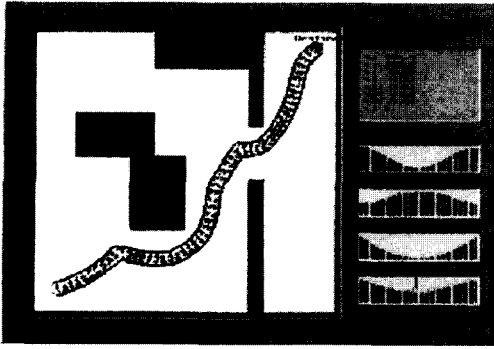


그림 16. 주행 시뮬레이션 2  
Fig. 16. Simulation of navigation 2.

그림 17은 국부최소점에 대한 성능을 보여준다. 센서정보가 지역적인 경우 국부최소점에 대한 문제가 제기되는데 결과에서는 목적지 방향으로 진행하는 길에 U자 형태의 데드-엔드(Dead-end) 조건과 'ㄱ'자 형태의 환경에서도 국부최소점에 빠지지 않고 목적지에 도착함이 확인된다. 그러나 센서정보가 지역적이라는 한계가 있으므로 폭이 넓은 U자의 환경에서는 국부최소점에 빠질 수 있으며 이 경우에는 로봇의 목적지를 지정할 때 중간 경유점을 함께 지정하여 목적지에 도착하도록 해야 한다.

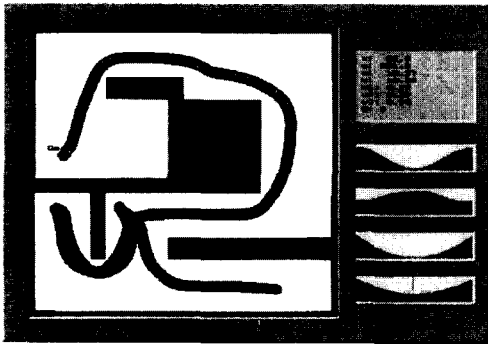


그림 17. 주행 시뮬레이션 3  
Fig. 17. Simulation of navigation 3.

그림 18은 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 인하

여 여러번 경로를 수정했음을 알 수 있으며 이동 장애물에 대해서도 지능적으로 최적의 경로를 선택함을 알 수 있다.

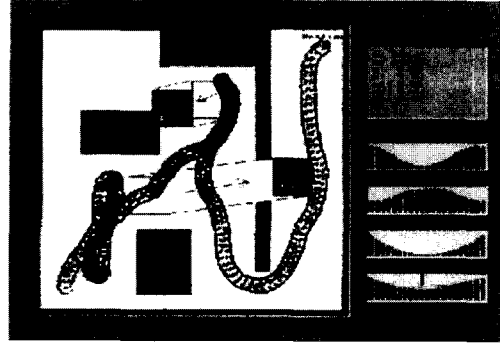


그림 18. 주행 시뮬레이션 4  
Fig. 18. Simulation of navigation 4.

## 2. 실험

실험에 사용된 이동로봇 ZIRO의 전체 시스템 구성을 그림 19에 나타내었다.

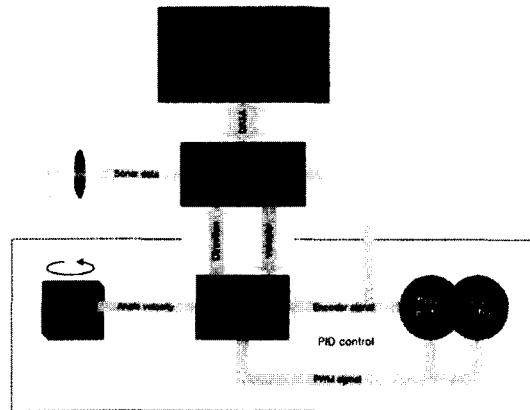


그림 19. 이동로봇의 시스템 구성도  
Fig. 19. System diagram of mobile robot.

주 제어기로는 펜티엄 MMX-233 프로세서를 사용하였으며 관절 제어기로는 80C196KC 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. 주 제어기는 센서정보와 로봇의 정보를 바탕으로 진행방향과 속도를 결정하며, 그에 따라 계산되는 각 바퀴 속도명령은 관절제어기로 전송되어 제어된다. 바퀴구동은 PID제어를 적용하여 독립 관절 제어방식을 구현하였으며, 이동로봇의 지능적 주행에 관한 전체 제어 알고리즘은 주 제어기가 담당한다. 각 모터의 엔코더 신호는 바퀴 속도의 피드백과

기구학에 의한 로봇의 위치계산에 사용되어진다. 또한 자이로 센서값은 80C196KC가 처리하여 로봇의 현재 방향을 계산하고 그 결과를 주 제어기로 전송한다. 사용한 자이로 센서는 MURATA사의 ENV-05D로서 회전각속도에 비례한 전압이 출력된다. 분해능은 0.1 deg/sec이며 로봇의 방향은 회전각속도를 적분한 값으로 식 (13)의 형태로 구한다. 식 (13)에서 K는 척도상수로서 실제 계산에서의 값은 0.036이며, m은 잡음제거를 위한 이동평균필터의 차수로 6차를 사용했다.

$$\theta(n) = K \sum_{k=0}^n \left( \frac{1}{m} \sum_{i=n-m}^n V_{sample} - offset \right) \Delta t \quad (13)$$

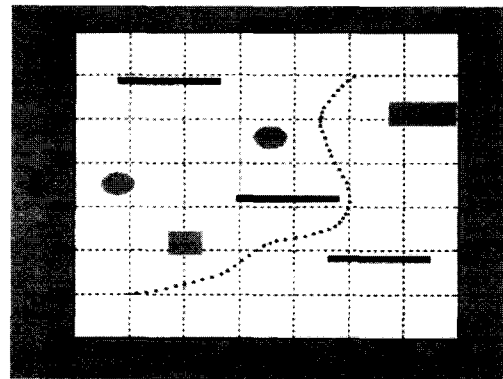
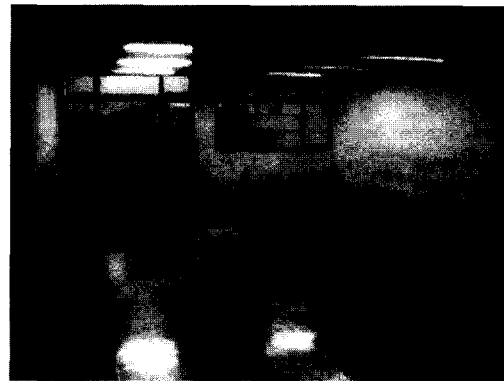
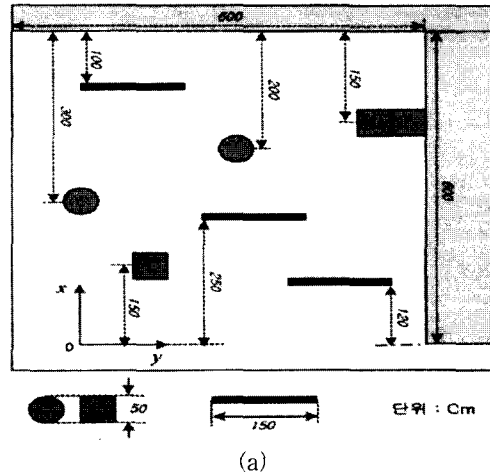
주행 실험은 두 가지 환경에 대하여 실시하였다. 먼저 그림 20. (a), (b)의 정방형의 자유공간에서 장애물을 임의로 두고 목적지를 찾아가도록 하였다. 로봇의 시작점은 원점이며 방향은 '0'으로 그리고 목적지는 (400, 500)으로 설정하였다. 여기서 단위는 'cm'이다. 그림 20. (c)에 로봇의 궤적을 그림 20. (d)에는 로봇의 방향과 속도를 결과로서 나타내었다. 이동로봇의 궤적에서 장애물이 가까이 접근하면 장애물 회피의 가중치를 높여 장애물을 회피하면서 목적지로 지능적으로 안정하게 주행함이 확인된다.

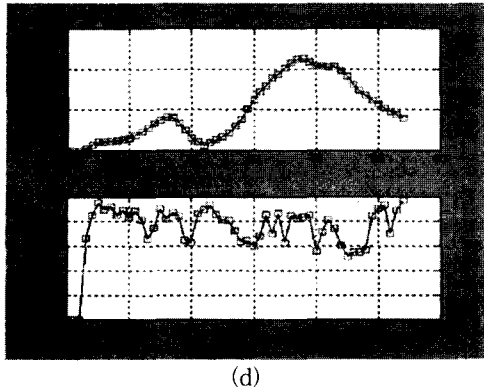
로봇의 진행방향 속도는 전체적으로 20[cm/sec]로 운동하며 로봇의 방향의 변화가 심한 경우에 감소한다. 기구학 계산에 의해 구한 로봇의 위치와 실제 위치 사이의 오차는 방향계산의 오차누적에 의해 심각하게 발생되었는데, 이는 자이로센서에 의해 현저히 감소되었다<sup>[18]</sup>.

다음으로 그림 21. (a)와 같이 폭 2m의 복도에 장애물을 배치한 환경에서 주행하도록 실험하였다. 그림 21. (b)는 (1300, -950)까지 주행하면서 검출된 센서 값에서 신뢰성있는 정보만을 이용하여 구성한 지도와 로봇의 궤적을 나타낸 것으로서 실제 환경과 유사하게 지도가 형성되었으며 로봇이 안전하게 목적지에 도착함이 확인된다.

다음으로 이동장애물에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 22 (a)와 같은 정방형의 공간에서 로봇의 초기상태는 (550, 80, 0°)이며 목적지는 (100, 550)으로 설정하였다. 로봇의 주행중에 사람이 로봇과 같이 움직이면서 경로를 방해하는 형태로 실험환경을 조성하였다. 그림 22 (b)의 결과에서 동적 장애물의 환경에서도 빠

르게 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.

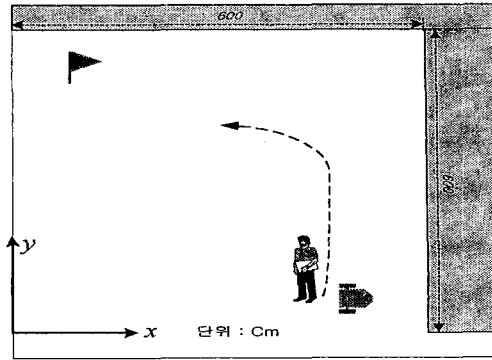




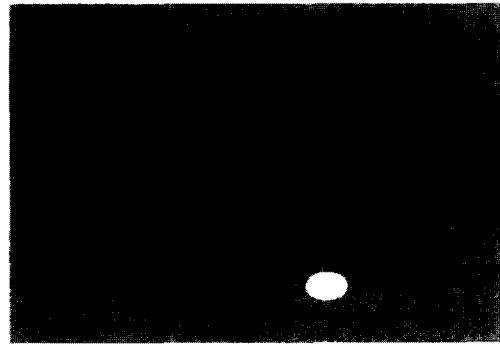
(d)

그림 20. 정방형의 환경에서의 로봇의 주행  
(a) 주행환경도 (b) 실험환경 (c) 이동로봇의 궤적 (d) 이동로봇의 방향과 속도

Fig. 20. Navigation of robot in square environment. (a) Diagram of navigation environment. (b) Environment of experiment. (c) Trajectory of mobile robot. (d) Direction and Velocity of mobile robot.



(a)

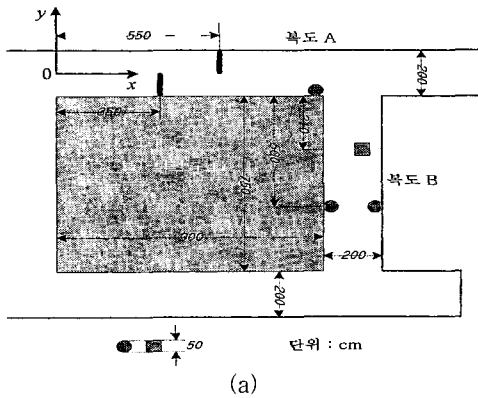


(b)

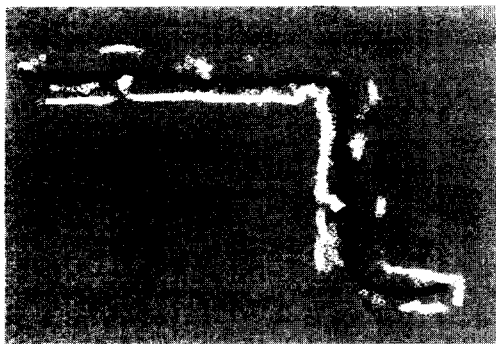
그림 22. 동적환경에서의 로봇의 주행  
(a)주행환경 (b) 이동로봇의 궤적

Fig. 22. Navigation of robot in dynamic environment.

(a) Diagram of navigation environment. (b) Trajectory of mobile robot.



(a)



(b)

그림 21. 복도의 환경에서의 로봇의 주행  
(a) 주행환경도 (b) 작성된 환경지도와 궤적  
Fig. 21. Navigation of robot in corridor environment.

(a) Diagram of navigation environment. (b) Composed world map and trajectory.

### V. 결론

본 논문에서는 미지의 환경에서 이동로봇이 자율적으로 목적지까지 안전하게 이동할 수 있는 장애물 회피 및 경로 계획을 위한 알고리즘을 제안하고 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 의한 시스템은 초음파센서와 자이로 센서만을 사용하므로 구조적으로 간단하면서도 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 환

경에서 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.

### 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] T. Hessburg and M. Tomizuka, "Fuzzy logic control for lateral vehicle Guidance," *IEEE Control Systems*, vol. 14, no. 4, 1994.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] J. Agullo, S. Cardona and J. Vivancos, "Kinematics of vehicles with directional sliding wheels," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 22, pp. 295-301, 1987.
- [9] H. P. Moravec and A. Elfes, "High Resolution Maps from Wide Angle Sonar," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, pp. 116-121, 1985.
- [10] 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.
- [11] 진태석, 박재한, 이장명, "프리즈마틱 축을 갖는 3자유도 이동로봇의 최적 설계", *한국통신학회 대한전자공학회 부산·경남지부 춘계 합동 학술 발표회* Vol. 8 No. 1, 부경대학교, pp. 213-218, 1999
- [12] R. Kuc and M. W. Siegel, "Physically Caused Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. PAMI-9, no. 6, pp. 776-778, Nov 1987.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(1): 28-44, January 1973.
- [16] H. Kamada, S. Naoi and T. Goto, "A Compact Navigation System Using Image Processing and Fuzzy Control," *IEEE*

Southestcon, New Orleans, April 1990.  
 [17] 허화라, 박재한, 박성현, 박진우, 이장명, "환경조건을 고려한 이동로봇의 지능적 행동에 관한 연구," 대한전자공학회 부산·경남지부 학술논문 발표회, Vol. 7, No. 2, pp.318-322, 1998

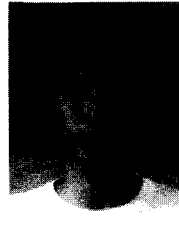
[18] Kiyoshi Komoriya and Eimei Oyama, "Position Estimation of a Mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope," 日本ロボット學會誌 vol. 14, no. 4, pp.532-532, 1996.

저 자 소 개



許花羅(正會員)

1991년 2월 동아대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학석사). 1999년 8월 부산대학교 전자공학과 박사과정 수료. 주관심분야는 Time-Delay, 모델예측제어, 원격제어로봇 등임. 현재 송호대학 정보산업계열 전임강사



朴宰漢(正會員)

1998년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 3월~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 자율이동로봇, 지능제어, 다변수제어 등임



朴成現(正會員)

1998년 2월 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 3월~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 석사과정. 주관심분야는 Visual servoing, 마이크로 프로세서 응용 등임

응용 등임



朴晋雨(正會員)

1996년 2월 동의대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 동의대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1998년 9월~현재 부산대학교 대학원 전자공학과 박사과정.

주관심분야는 이동로봇, Controller Area Network, DSP 응용 등임



李章明(正會員)

1980년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1982년 2월 서울대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1990년 12월 USC(남가주대학)

공학박사학위 취득(Computer Engineering 전공). 현재 부산대학교 전자공학과 부교수, 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신 연구소 전자기술부장. 주관심 분야는 다관절 로봇 시스템의 설계 및 제어,  $\mu$ -processor 응용 시스템 설계, Motor 구동방식 및 제어 등임