

# 하이브리드 시스템 제어 방법을 이용한 이동로봇의 자율 주행 동작제어

論 文

51D-5-2

## Autonomous Navigation Motion Control of Mobile Robots using Hybrid System Control Method

李 容 美\* · 林 美 燮\*\* · 林 俊 弘\*\*\*

(Yong-Mi Lee · Mee-Seub Lim · Joonhong Lim)

**Abstract** - This paper presents a framework of hybrid dynamic control systems for the motion control of wheeled mobile robot systems with nonholonomic constraints. The hybrid control system has the 3-layered hierarchical structure: digital automata for the higher process, mobile robot system for the lower process, and the interface as the interaction process between the continuous dynamics and the discrete dynamics. In the hybrid control architecture of mobile robot, the continuous dynamics of mobile robots are modeled by the switched systems. The abstract model and digital automata for the motion control are developed. In high level, the discrete states are defined by using the sensor-based search windows and the reference motions of a mobile robot in low level are specified in the abstracted motions. The mobile robots can perform both the motion planning and autonomous maneuvering with obstacle avoidance in indoor navigation problem. Simulation and experimental results show that hybrid system approach is an effective method for the autonomous maneuvering in indoor environments

**Key Words** : mobile robot, autonomous maneuvering, obstacle avoidance, hybrid system

### 1. 서 론

이동로봇의 동작제어 방법들은 계획-기반(plan-based)의 동작제어 방법들과 센서-기반(sensor-based)의 충돌회피(obstacle avoidance) 제어 방법들로 분류할 수 있다. 계획-기반의 알고리즘들은 환경의 모델 또는 지도를 구하여 현재 위치에서 목적지까지의 원하는 궤적을 계산하는 경로 계획(path planning)과 이에 따른 이동로봇의 동작을 계획(motion planning)하는 과정으로 구성되어 있다. 그러나 부분적 또는 완전히 알고 있는 환경 정보는 실제적으로 대부분의 응용에서는 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 계획-기반 알고리즘에서 계획된 궤적과 동작들은 부정확할 수 있고 새로운 궤적의 생성과 동작의 계획이 필요하게 된다. 결국, 이러한 환경에서 계획-기반의 방법들은 충돌 회피 경로를 구하기 위하여 많은 계산시간과 복잡한 과정이 필요하게 된다. 계획-기반의 방법들과는 달리 센서-기반의 충돌회피 알고리즘들은 주어진 환경에서 장애물에 대한 충돌을 회피하는 동작을 결정하기 위하여 센서 정보들을 이용한다. 이러한 방법들은 이동로봇의 실내 주행을 위하여 실시간 제어 성능을 나타낼 수 있으며 계산 시간 면에서 효과적이다. 센서-기반 주행 방법들은 위치 필드(potential field)를 이용한 방법과 벡터 필드(vector

field)를 이용한 방법으로 구분 할 수 있다. 위치 필드 알고리즘은 계산적인 면에서는 효과적이거나 이동로봇이 국부 최소점(local minimum)에 빠지게 되는 문제가 있다. 벡터 필드 알고리즘은 장애물들 사이에서 이동로봇의 연속적이며 빠른 동작 특성을 보일 수 있지만 국부적 환경에 제한되며 다양한 작업특성을 표현하는데 한계가 있다.

자율 이동로봇 주행에 관한 연구는 실시간 충돌회피[1]에 관한 것과 자세 제어[2]에 관한 것들이 주를 이루고 있다. 이중 자세 제어는 이동로봇이 주행할 경로를 미리 알고 있다고 가정된 뒤에 정해진 경로를 안정적으로 추종할 수 있도록 이동로봇의 방향각이나 속도를 조절하는 일종의 경로 추종 방법을 말한다. 이러한 방법은 미리 주어진 작업 공간 지도를 이용하여 최적한 이동로봇의 최적 주행경로를 생성할 수 있다. 그러나 실제적인 환경에서는 이동로봇의 경로상의 변화가 생길 가능성이 있고, 주어진 공간지도상의 정보만으로는 로봇의 완전한 주행에 대한 계획을 할 수 없는 경우가 있다. 이러한 문제를 해결하는 기법으로 실시간 충돌 회피 방법들이 제안되고 있다. 그 중 Khatib[3]에 의해 제안된 위치 필드(potential field)는 알고리즘이 간단하기 때문에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 로봇에 근접 장애물에 대해서도 적용할 수 있으며 매우 빠르게 이동경로에 대한 계획을 할 수 있다. 그러나 이 방법은 국부 최소점에 빠질 가능성이 크기 때문에 이 알고리즘을 개선하기 위하여 다른 여러 가지 방법들이 제안되었다. 우선 Elfes[4]는 이동로봇의 전체 작업환경을 일정한 간격의 격자로 나눈 뒤 각 격자에 장애물이 존재할 확률 분포를 할당하여 장애물 회피에 사용하였다. 이 방법을 더욱 발전시켜 Borenstein은 벡터필드 히스토그램(vector field

\* 正 會 員 : 漢陽大學 電子컴퓨터工學部 大學院

\*\* 正 會 員 : 京畿工業大學 메카트로닉스科 助敎授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大學 電子컴퓨터工學部 敎授 · 工博

接受日字 : 2001年 5月 28日

最終完了 : 2002年 3月 30日

histogram)[5]방법을 개발하였다. 이 방법은 연속적으로 갱신되고 생성되는 로봇의 환경 모델링을 하는데 Occupancy Grid 방법을 사용하여 연속적인 초음파 센서의 데이터를 갱신하여 돌발성 잡음에 대처할 수 있도록 하였고, 점유된 격자의 정보를 이용하여 로봇이동의 방향과 속도를 계산하는데 사용하였다. 이 방법의 단점은 길끝(dead-end)상황에서의 트랩(trap)상태에 들어갈 경우가 있고, 트랩상태에서 제자리서 순환하는 동작(cyclic behavior)을 나타내는 경우가 있다. 이동로봇의 경로를 계획하는데 있어서 주요한 점은 고속으로 주행가능하며, 장애물 회피나 주행 중에 트랩상태에 들어가지 않아야 하며, 최적의 경로로 로봇의 주행이 이루어져야 한다는 것이다.

본 논문에서는 논홀로노믹(nonholonomic) 동작특성을 갖는 이동로봇의 실내 환경에서의 자율적 주행을 위한 하이브리드 제어방법을 제안한다. 이동로봇의 자율적인 주행을 위한 자율 동작제어 방법으로서, 상위 수준(high level) 제어기에서는 작업-수준(task level)에서의 이동로봇의 주행특성을 이산상태 시스템 모델로 구하였으며 자율적 주행을 위한 하이브리드 제어 시스템[11][12][13]을 구성하였다. [11-13]의 연구결과에 의하면 이산 상태 제어기와 연속 상태 제어기의 결합에 의한 하이브리드 시스템과 하이브리드 제어기에 의한 로봇 제어 결과는 효과적임을 보였다. 제안된 이동로봇의 자율 주행 알고리즘은 3계층의 계층적 구조로, 상위의 이산상태 시스템과 하위의 연속 상태 시스템 그리고 이들 간의 상호 작용과 자율적 동작제어를 위한 인터페이스 계층으로 구성되어 있다. 이산상태 모델에서는 주변 환경과 로봇의 위치에 따른 사용자 정의(user defined) 구조조건(constraints)을 이용하여 이산상태를 정의하였으며, 이를 디지털 오토마톤(automaton)을 이용하여 이산상태 시스템을 설계하였다. 인터페이스 계층에서는 상위의 이산상태 제어기와 하위의 연속상태 제어기 간의 서로 다른 상태 공간을 연결하고, 연속 상태변수로부터 이산상태를 생성하게 된다. 또한 자율적 주행을 위하여 센서 정보와 이산상태 제어기의 출력들로부터 연속 상태 제어기의 원하는 제어입력 즉, 목표입력(desired control inputs)을 결정한다. 연속 상태 시스템은 하위 수준의 논홀로노믹 구속조건을 갖는 이동로봇 시스템으로 상위의 이산상태 제어기에 의해 주행을 하게 된다.

또한, 지역최소문제가 발생하여 트랩상태에 빠지지 않고 최적의 주행성능을 보이는 장애물 회피 알고리즘을 제안한다. 환경 인식을 위해서는 실시간 처리가 가능한 초음파 센서를 사용하였으며, 이렇게 인식된 환경정보는 윈도우 탐색법(Search Window Method)에 사용된다. 윈도우 탐색법은 윈도우내에 감지된 장애물의 점유된 형태에 따라 이동로봇의 방향각과 이동거리를 결정한다.

## 2. 이동로봇 시스템의 구조

### 2.1 이동로봇 시스템

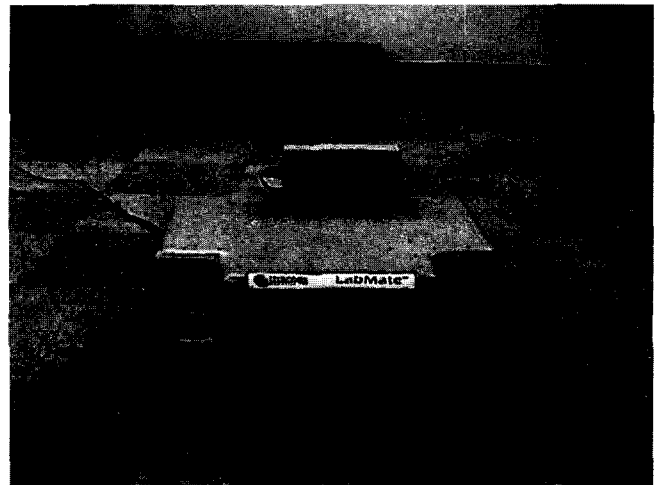
본 연구에서는 초음파 센서 시스템을 갖춘 LABMATE [8]를 이동로봇 시스템으로 이용하였으며, 이동로봇의 동작방식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

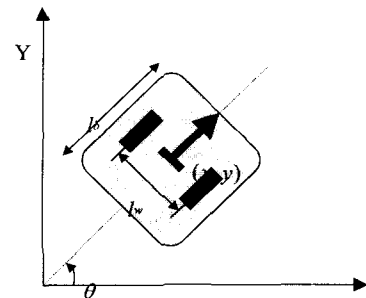
여기서  $x(t)$ 는 연속상태 벡터이며  $u(t)$ 는 제어 입력 벡터이다. 연속상태 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$x(t) = [x \ y \ \theta \ L]^T \quad (2)$$

여기서  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  와  $L$  은 로봇의 위치, 방향각 그리고 이동거리를 나타내며  $[\cdot]^T$ 는 행렬의 전치(transpose)를 나타낸 것이다.



(a)



(b)

그림 1 이동로봇 시스템 : (a)이동로봇 LABMATE의 외관, (b) 로봇의 구조와 좌표계

Fig. 1 Mobile Robot System : (a) mobile robot LABMATE (b) configuration and Coordinates

이동로봇 시스템은 이동거리와 방향각을 제어입력으로 하며, 그림 1과 같이 로봇의 중심점을 기준으로 로봇이 이동하거나 회전할 경우 로봇에 부착되어 있는 엔코더에 의해 이동로봇의 위치와 방향을 알 수 있다. 여기서  $L$ 은 로봇의 너비이며  $L_w$ 와  $L_h$ 가 로봇의 현재 위치이고  $(x_g, y_g)$ 가 목표위치라면 로봇의 방향각과 다음 이동할 위치는

$$\theta = \text{atan2}(y_g - y, x_g - x) \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x_N \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \cos(\theta) \\ L \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

으로 구할 수 있다. 여기서 로봇의 이동거리와 방향각은 장애물의 위치에 따라 직접 제어할 수 있다. 이동로봇이 현재 위치에서 이동하고자 하는 위치로 가기 위해서는 방향각과 이동거리가 필요하며 그림 2와 같다.

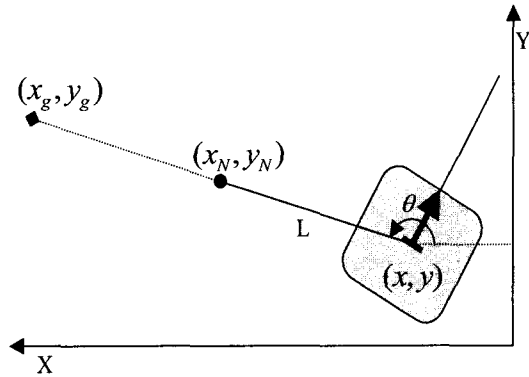


그림 2 이동로봇의 위치와 방향각  
Fig. 2 Position and direction angle of the mobile robot

2.2 초음파 센서 시스템을 이용한 윈도우 탐색

본 논문에서 제안한 로봇의 장애물 회피와 경로 계획은 윈도우 탐색법(Search Window Method)이다. 이 방법은 윈도우내의 이동로봇과 장애물의 분포와 위치 따라 로봇의 방향각과 이동거리가 결정된다.

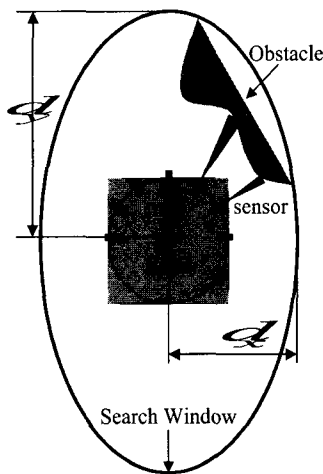


그림 3 이동로봇의 윈도우 탐색  
Fig. 3 Search window method

그림 3에서 센서에서 받아들인 장애물의 위치를 윈도우 탐색법으로 표현하였다. y축 반지름  $d_y$ 와 x축 반지름  $d_x$ 를 가진 타원형 탐색 윈도우는 y축 반지름  $d_y$ 를 좌우측 길이  $d_x$ 보다 크게 함으로써 전 방향에서 발견된 장애물 회피를 효율적으로 만든다. 이러한 탐색 윈도우에 장애물이 들어오면 이동로봇에 배치된 초음파 센서로 장애물의 유무를 결정하게 된다. 장애물 발견시 사용되는 초음파 센서는 그림 3에서와 같이 배치되며 각 센서가 이루는 중심각은

$$\phi = \frac{180}{n-1} \tag{5}$$

로 된다.

각각의 센서는 중심각  $\phi$ 만큼 이동로봇의 전면에서 n개를 배치할 수 있고, 센서의 수가 많을수록 중심각  $\phi$ 가 줄어들어 좀더 정확한 장애물의 유무를 발견할 수 있다. 각각의 센서로 받아들인 장애물 정보는 이동로봇의 이동거리 L와 이산상태변수  $q_i$ 를 구하는데 사용된다.

2.3 이동거리와 이산상태변수 결정

이동거리는 타원형 탐색 윈도우의 크기에 따라

$$L = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta_i}{cd_y}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta_i}{cd_x}\right)^2}} \tag{6}$$

로 결정되며 직진상태로 전진시 최대크기를 가진다. 여기서  $\theta_i$ 는 이동로봇이 현재 위치에서 다음 위치로 회전한 사이각도이며, 이 각도는 초음파 센서 중심각의 배수로 정한다. 예를 들어 그림 4에서 왼쪽은 이동로봇의 처음 위치이며 오른쪽은 장애물을 피하기 위한 이동로봇의 다음 동작을 표현하였다. 여기서 c는 이동거리를 결정할 0과 1사이의 상수이다. 즉,  $c \in [0, 1] \subset R$ 이다. c 값이 크면 이동거리도 증가하게 되며, c 값이 작아지면 이동로봇의 속도 또한 줄어들게 된다. 또한  $d_x, d_y$ 의 크기는 이동로봇의 주행 속도와 동특성, 그리고 초음파 센서의 주파수에 따라 장애물과 충돌을 피할 수 있는 충분한 크기로 설정 하였다. 반지름  $cd_y, cd_x$ 를 가진 타원-거리윈도우(Distance Window)을 결정하고 난 후, 이동로봇은 장애물을 피하기 위해  $2\phi$ 만큼 회전하였다. 따라서 회전각  $\theta_i = 2\phi$ 로 결정되며 (6)식에 의해 로봇의 이동거리가 결정되어 진다.

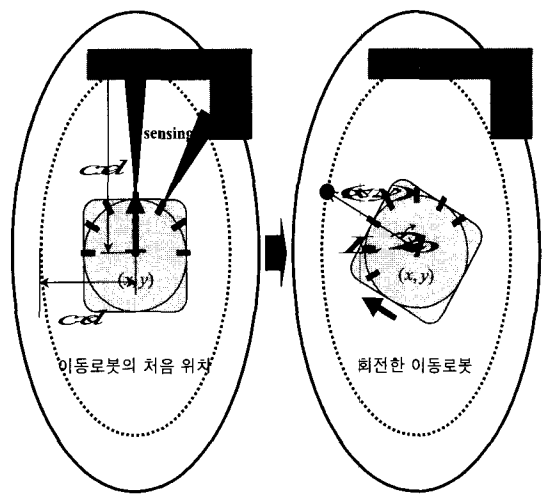


그림 4 이동로봇의 거리정보  
Fig. 4 Distance information for the mobile robot

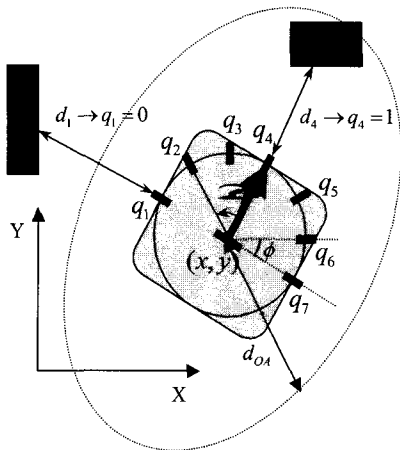


그림 5 이산상태 변수값 결정  
Fig. 5 Determination of discrete-state variable values

그림 5는 7개의 초음파 센서의 배치와 장애물 그리고 이산상태변수 값을 표현한 것이다. 이산상태변수  $q_i$ 는 그림 5와 같이 각각의 센서가 발견한 장애물의 유무에 따라 1 혹은 0으로 결정된다. 여기서  $i$ 는 정수이며 초음파 센서 장치 번호이다. 만약  $i$ 번째 센서에 의해 측정된 장애물과의 거리  $d_i$ 가 탐색 윈도우의 거리  $d_{OA}$ 보다 작다면, 이산상태변수는  $q_i=1$ 로 놓는다. 반대로  $d_i$ 가  $d_{OA}$ 보다 크다면 이산상태변수는  $q_i=0$ 로 놓는다. 여기서 탐색윈도우의 거리변수  $d_{OA}$ 는 센서가 위치한 각도  $\theta_i$ 에 따라 변하는 거리이며

$$d_{OA} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \theta_i}{d_y}\right)^2 + \left(\frac{\sin \theta_i}{d_x}\right)^2}} \quad (7)$$

으로 구할 수 있다.

장애물의 존재여부를 측정하는 상태변수  $q_i$ 는 그림 6의 오토마타로 모델화된다.

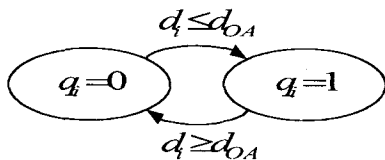


그림 6 오토마타 모델  
Fig. 6 Automata model

### 3. 하이브리드 시스템 구성

하이브리드 시스템 모델은 이산상태와 연속상태가 복합적인 시스템의 동작 특성의 구분(specification)과 결합된 특성을 표현할 수 있는 효과적인 모델 방법이다. 이동로봇이 자율 주행 시에 장애물에 의해 동작이 제한을 받게 되는 로봇 시스템을 모델링 하고[6] 전체적인 제어를 구성하기 위하여 하이브리드 모델과 제어시스템을 도입한다. 실내에서의 자율

적인 주행을 위해 제안한 하이브리드 제어기는 그림 7과 같이 3계층의 계층적 구조이다. 상위에는 로봇의 기준 동작을 제어하기 위한 상위 수준(high level)의 이산상태 제어기와 하위에는 로봇의 거리와 방향을 제어하기 위한 하위 수준(low level)의 연속 상태 제어기, 그리고 상위와 하위의 상태 공간을 연결하고 환경과의 상호작용과 자율적 주행동작을 위한 인터페이스 제어기로 구성되어 있다.

하위 수준의 연속상태 시스템은 이산상태 시스템의 기준 동작명령에 의해 이동로봇을 제어한다. LABMATE 이동로봇은 이러한 기준 명령치 즉 회전각  $\theta$ 과 이동거리  $L$ 를 입력 값으로 받는다.

#### 3.1 장애물 발견시 제어모드

이산상태 시스템은 로봇의 기준 명령치를 결정하는 상위 수준 과정이다. 기준 명령치는 장애물을 발견 시 모드와 장애물이 없는 모드로 나누어지는 제어모드에 의해 결정된다.

이산상태 시스템에서는 연속상태가 어떤  $\{q_i=1\}$ 의 집합으로 들어왔을 때 표1과 같이 장애물을 피하는 이산상태 제어모드로 전환한다.

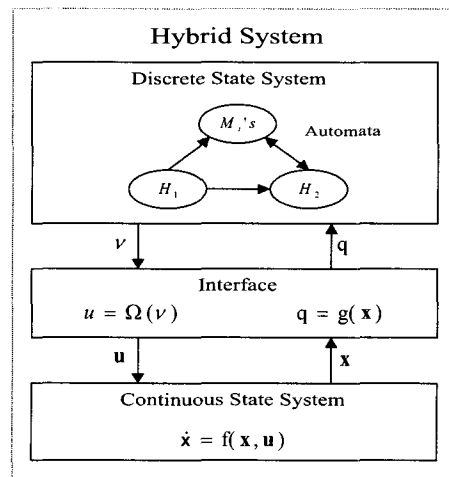


그림 7 하이브리드 시스템 구조  
Fig. 7 Structure of the hybrid system

표 1 장애물 발견 시 이산상태 제어모드

Table 1 Discrete-state control mode when obstacles are found.  $M_2$   $M_3$   $M_3$   $M_2$   $\phi$

제어모드	감지 장애물의 위치
$M_1$ (직진 동작)	좌측과 우측 그리고 후방
$M_2$ ( $\phi$ 좌회전 동작)	우측 앞부분
$M_3$ ( $\phi$ 우회전 동작)	좌측 앞부분
$M_4$ ( $2\phi$ 좌회전 동작)	전방과 우측 방향
$M_5$ ( $2\phi$ 우회전 동작)	전방과 좌측 방향
$M_6$ ( $3\phi$ 좌회전 동작)	전방과 우측과 우측 앞부분
$M_7$ ( $3\phi$ 우회전 동작)	전방과 좌측과 좌측 앞부분
$M_8$ (180도 후진 동작)	센서의 전방, 오른쪽과 왼쪽 부분

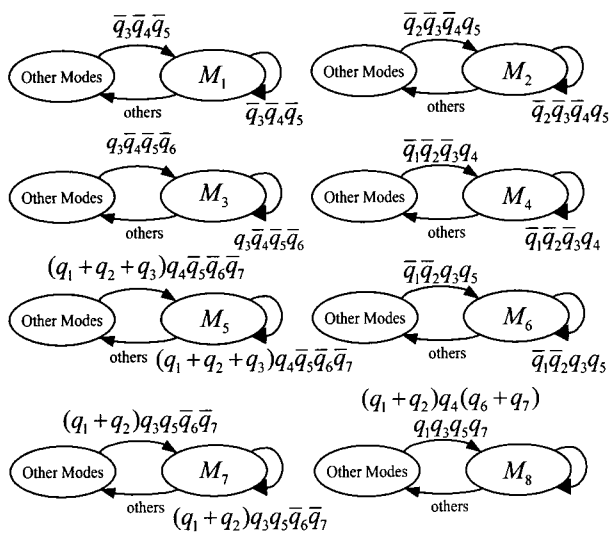


그림 8 장애물 발견시 제어모드 오토마타  
Fig. 8 Automata for discrete-state control modes

3.2 장애물 미발견 시 제어 모드

이산상태는 연속상태 모든 ( $q_i=0$ )의 집합으로 들어왔을 때 장애물이 없는 제어모드로 전환한다.

- 제어모드  $H_1$ (목표점 동작): 이동로봇이 출발할 때 초기 방향각  $\theta_0$ 는 목표점 방향으로 결정되며 이동로봇의 초기 방향각  $\theta_0$ 과 방향각  $\theta_h$ 이 같을 때, 즉 목표점으로 전진할 때 이 모드를 사용한다. 이동로봇의 방향각  $\theta_h$ 는 제어모드  $M_i$ 에 의해 결정된다.
- 제어모드  $H_2$ (보상 동작): 이동로봇의 방향각  $\theta_h$ 는 임시방향각  $\Delta\theta$ 을 사용하여 초기방향각  $\theta_0$ 으로 돌아가야 한다. 임시방향각  $\Delta\theta$ 은  $\theta_0$ 와  $\theta_h$ 를 비교함으로써

$$\theta_h > \theta_0 \text{이면 } \Delta\theta = -\phi \tag{8}$$

$$\theta_h < \theta_0 \text{이면 } \Delta\theta = \phi \tag{9}$$

으로 얻을 수 있다. 로봇은 초기방향각  $\theta_0$ 이 방향각  $\theta_h$ 과 같을 때까지 임시회전각  $\Delta\theta$ 으로 회전한다. 이동로봇의 방향각  $\theta_h$ 은  $\theta_h + \Delta\theta \rightarrow \theta_h$ 로 보상 된다.

3.3 이상상태 시스템

자율주행과 장애물 회피를 위한 이산상태 시스템은 제어모드  $M_i, H_1, H_2$ 와 집합  $\{q_i\}$ 로 구성되어 있다. 이동로봇은 목표점 동작  $H_1$ 을 초기 제어모드로 한다. 그리고 이산상태는  $q_i$ 의 상태에 따라 이동로봇의 제어모드를  $H_1$ 에서  $M_i$ 으로 변화시킨다. 제어모드  $M_i$ 는 집합  $\{q_i\}$ 에 의해 그림 9와 같이 변화한다.

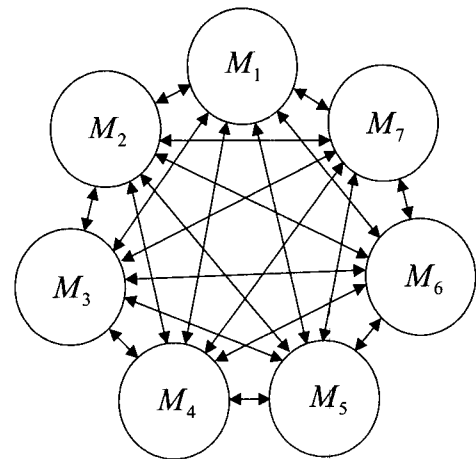


그림 9 제어모드  $M_i$   
Fig. 9 Control mode  $M_i$

반대로 모든  $q_i=0$ 일 때 제어모드는 그림 10과 같이  $M_i$ 에서  $H_2$ 로 변화된다. 또한 초기방향각  $\theta_0$ 가 방향각  $\theta_h$ 과 같을 때 제어모드는  $H_2$ 에서  $H_1$ 로 변화된다.

본 논문에서 제시한 하이브리드 제어방법에서의 자율 주행의 범위는 로봇에게 출발점과 도착점을 알려준 후, 그 중간 주행 과정은 로봇 스스로가 자율적으로 수행함을 의미한다. 특히, 동작계획은 상위 이산상태 제어기에서 기준 명령을 자율적으로 생성함으로 동작계획이 이루어지고, 경로계획은 특별한 계획 없이 상위 이산상태 제어기의 기준명령을 수행하고 하위의 연속상태 제어기에서 센서와 로봇의 동작에 따라 결정된다.

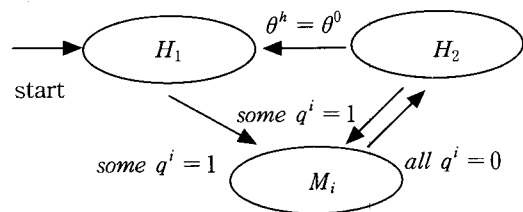


그림 10 이산상태 시스템 모델링  
Fig. 10 Discrete-state system modelling

4. 시뮬레이션 및 실험결과

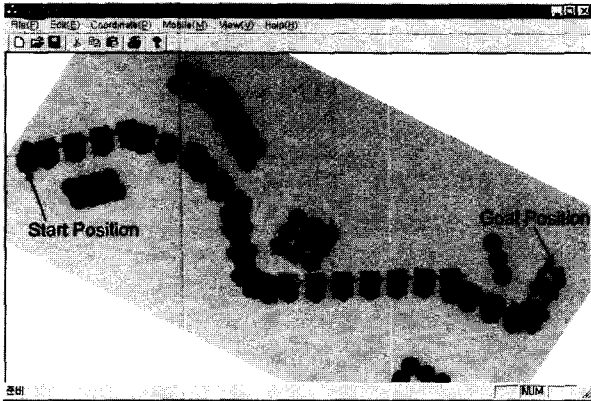
본 연구에서 제안한 지능적 동작 계획과 자율주행을 위한 하이브리드 시스템을 이용한 이동로봇의 장애물회피와 주행성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 평가하였다. 기존의 벡터필드를 이용한 장애물 회피방식은 국부 최소점에 빠지는 심각한 문제를 가지고 있다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법은 초음파 센서로 장애물을 발견하고 장애물이 탐색원도우안에 존재하면 장애물 발견시 제어모드로, 그렇지 않으면 장애물 미발견시 제어모드로 국부 최소점에 빠지지 않으면서도 가장 가까운 경로를 설정한다. 또한 장애물을 발견 시에는 거리원도우를 따져서 이동로봇의 이동거리를 결정하였으며, 장애물이 없을 시에는 최고속도로 이동하는 장점이 있다.

실험에 사용된 이동로봇은 LABMATE [8] 로서 그림 1을 기준으로 설명하면 각 파라미터들은 표 2과 같다.

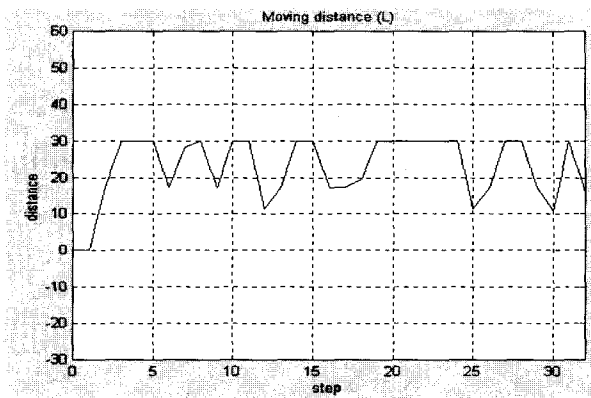
표 2 이동로봇의 파라미터값

Table 2 Parameters of the mobile robot

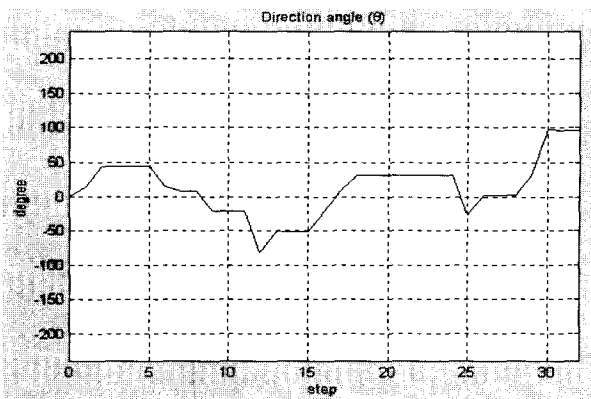
로봇의 너비 $l_b$	75 cm
두 바퀴사이 길이 $l_w$	25 cm



(a)



(b)



(c)

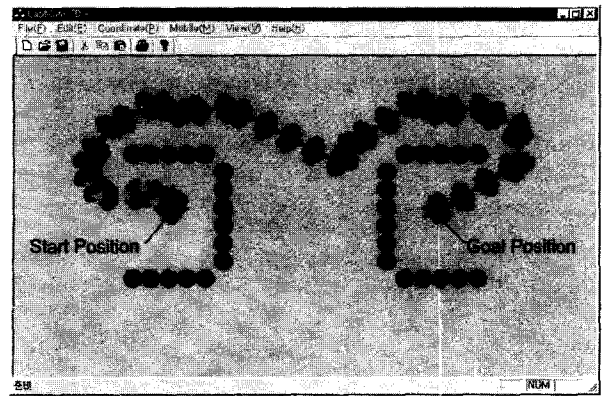
그림 11 지역 경로 계획 알고리즘 수행 결과 : (a) 이동로봇의 주행경로, (b) 이동로봇의 이동거리 변화, (c) 이동로봇의 이동거리와 방향각 변화

Fig. 11 Navigation results of the mobile robot  
(a) navigation path (b) moving distance (c) direction angle

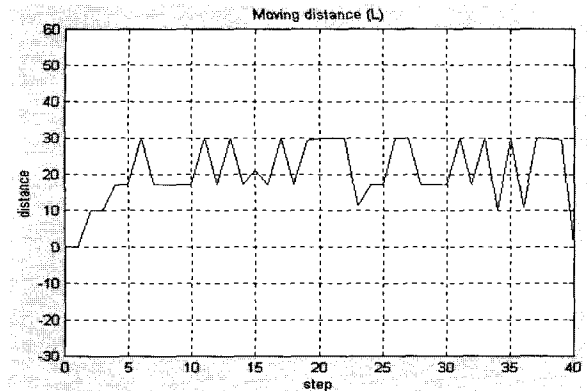
그림 11은 가로 21.6m, 세로 9.6m의 밀폐된 공간에 5개의 장애물이 불규칙하게 흩어져 있는 상황을 가정하였으며, (a)와 (b), 그리고 (c)에 이동로봇의 주행경로와 제어입력인 이동거리, 방향각을 각각의 단계에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 탐색윈도우가 장애물을 발견하였다면 장애물을 피하는 모드로 전환하며 미발견시에는 보상동작을 이용함으로써 안전한 주행을 보장하고 있다. 또한 타원형인 탐색윈도우와 거리윈도우는 회전 시에는 이동거리를 짧게 하며 전진시에는 이동거리를 크게 하여 최적의 주행속도를 보장하고 있다.

그림 12는 이동로봇의 처음위치와 목표점의 위치가 장애물에 둘러싸여 있을 때 무사히 회피하고 있음을 보여준다. 이동로봇은 이러한 데드 엔드(dead-end)상황을 극복하여 무사히 목표점까지 도달할 수 있음을 알 수 있다.

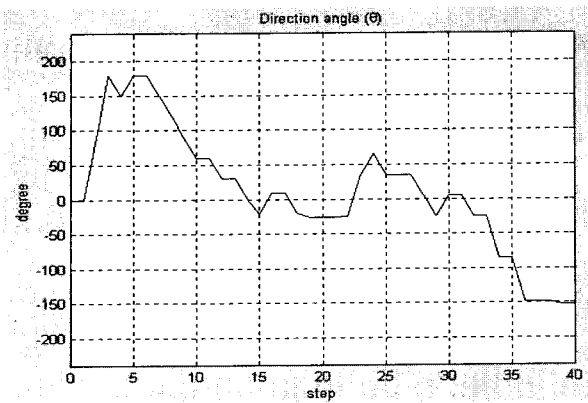
그림 13은 미로처럼 복잡한 경로를 지닌 좁은 복도를 주행한 결과이다. 한편 실험에서 초음파 센서를 이용한 주변 환경의 측정 시에 센서 특성에 의한 noise에 가까운 신호들이 측정되었다. 이는 장애물의재질의 특성과 표면의 거칠기 상태에 따라서 반사 신호의 감도가 크게 의존적임을 알 수 있었으며 측정 알고리즘에서 High-pass filter를 적용하여 일차적 noise를 차단하였으며 실험시 초음파 센서의 특성을 고려하여 장애물과 주변의 재질들을 배치하여 noise의 발생을 최소화 하였다.



(a)



(b)

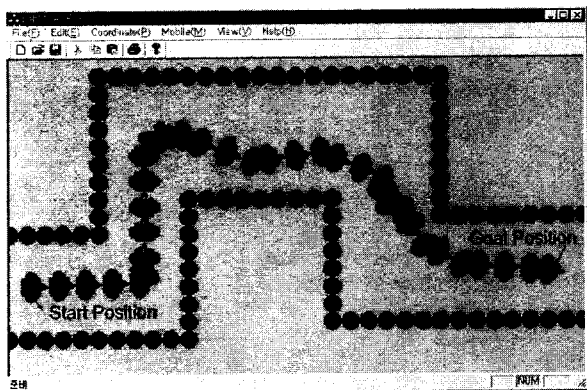


(c)

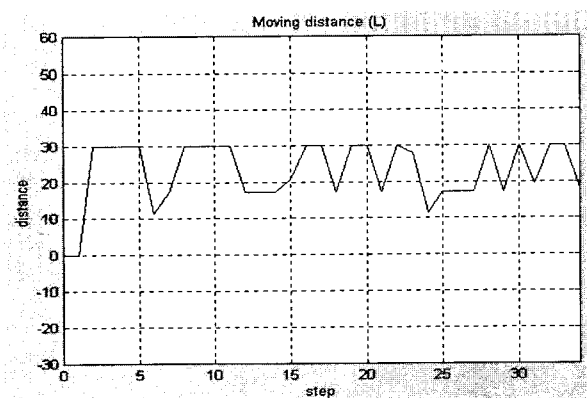
그림 12 트랩 및 데드-앤드 상황시 주행경로 : (a) 'ㄷ' 모양의 장애물을 가진 자율주행결과, (b) 이동로봇의 이동거리 변화, (c) 이동로봇의 방향각 변화

Fig. 12 Navigation results of the mobile robot for the path with dead-ends (a) navigation path (b) moving distance (c) direction angle

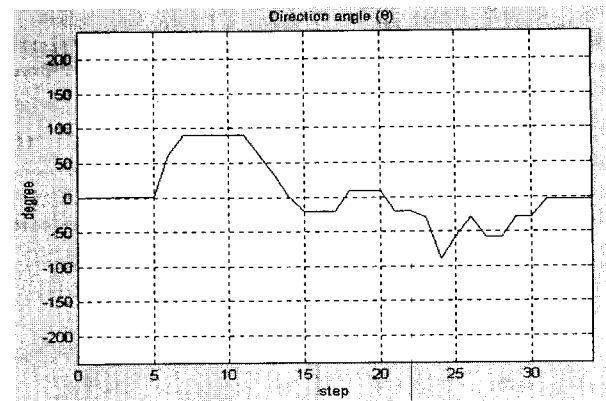
그림 12의 실험 결과는 이동로봇의 처음위치와 목표점의 위치가 장애물에 둘러싸여 있을 때 무사히 회피하고 있음을 보여준다. 이동로봇은 이러한 데드-앤드(dead-end) 상황을 극복하여 무사히 목표점까지 도달할 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 13 미로형 좁은 복도의 주행 : (a) 미로모양의 장애물을 가진 자율주행결과, (b) 이동로봇의 이동거리 변화, (c) 이동로봇의 방향각 변화

Fig. 13 Navigation results of the mobile robot for maze-type narrow path (a) navigation path (b) moving distance (c) direction angle

본 논문에서의 제시한 이동로봇의 자율 주행을 위한 하이브리드 제어방법은 기존의 제어방법 가운데 실시간 충돌 회피 방법 중에서 trap 과 dead-end 를 회피하면서, 이산상태 제어기와 연속상태 제어기를 결합한 계층적 구조의 제어기이다. 이는 주변 환경의 정보가 전혀 필요 없는 방법으로 출발점과 도착점만을 로봇에게 알려주면 그 나머지 주행 동작은 이동로봇 스스로 자율적으로 수행하기 위한 제어 방법이다. 따라서 본 연구에서의 주행 알고리즘은 동작 계획과 경로계획을 포함할 수 있다. 또한, 실제 적용 가능성은 로봇에게 작업수준(task level)의 중간 지점들의 집합과 순서를 로봇에게 입력한다면 순차적으로 이를 수행 할 수 있을 것이라 판단된다. 이동로봇의 이동 속도는 0 m/sec 에서부터 0.7 m/sec 까지 장애물과 주변 환경, 그리고 탐색 윈도우의 크기에 따라 가변적으로 결정된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 이동로봇의 지능적 동작 계획과 자율적 주행을 위한 하이브리드 제어방법을 제안하였다. 3계층의 하이브리드 시스템에서 상위 수준의 동작 계획을 위하여 이산상태와 동작제어모드를 정의하였으며 이를 이산상태 모델로 장애물 회피 주행 알고리즘을 설계하였다. 자율적 주행을 위한 이산상태 시스템은 하위의 이동로봇의 연속상태 제어기의 상태변수로부터 이산상태가 결정되고 이산상태에 의해서 상위 수준에서의 기준 동작 명령을 생성하게 하였다. 제안한 자율 주행 알고리즘과 하이브리드 제어기의 성능을 보이기 위하여 차륜형 이동로봇 시스템에 대한 실험을 통하여 주행 성능을 보였다. 앞으로의 연구과제는 복잡한 환경에서의 자율적 장애물 회피와 주행을 위한 알고리즘의 보완과 동적 시변 환경으로의 확대 연구가 필요하다고 하겠다. 또한 상위의 이산상태 시스템의 이산상태 천이에 따른 안정도의 해석과 전체적인 하이브리드 시스템의 안정도 해석을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y. D. Kwon and Jin. S. Lee, "An Obstacle Avoidance algorithm for Mobile Robot:Weight Safety Vector Field Method", Proc. of ASCC, June, 1994
- [2] R. A. Brooks, "A Robot that walks: Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network", Neural Computation, 1989
- [3] O. Khatib, "Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", The Int. Journal of Robotics Resarch, Vol. 5, No. 1, 1986
- [4] A. Elfes, "Sonar based real mapping and navigation systems", Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp 1151-1156, 1986
- [5] J. Borenstein and Y. Koren, "Real time obstacle avoidance for fast mobile robots", IEEE Trans. Systems Man Cybern, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, Sept./Oct. 1989.
- [6] M. Branicky, "Universal Computation and other Capabilities of Hybrid and Continuous Dynamical Systems," Theoretical Computer Science, Special Issue on Hybrid Systems, vol. 138, no. 1, pp. 67-100, 1995.
- [7] R. Brockett, "Hybrid Models for Motion Control Systems," Essay on Control: Perspectives in the Theory and Its Applications, H. L. Trentelman and J. C. Willems, Eds. Boston, MA:Birkhauser, pp. 29-53, 1993.
- [8] LABMATE User Manual Version 5.21L-f.
- [9] M.-S. Lim, J. Lim and S.-R. Oh, "A Hybrid System Approach to Motion Control of Wheeled Mobile Robots", IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 210-215, 1998.
- [10] X. Nicolin, A. Olivero, J. Sifakis, and S. Yovine, "An Approach to the Description and Analysis of Hybrid Systems," in LNCS 736, pp.149-178, Springer-Verlag, 1993.
- [11] Mee-Seub Lim, Jung-Hyun Moon, and Youngjo Cho, "The Environment and Motion Specifications Using Hybrid System Approach for the Autonomous Indoor Maneuvering Problems", ISR'2001, 32nd International Symposium on Robotics, p. 14, April 19-21, 2001
- [12] Mee-Seub Lim, Sang-Rok Oh, and Joonhong Lim, "High-Speed Indoor Navigation of Mobile Robots using Hybrid Dynamic Control Approach," Proc. of IFAC Workshop on Mobile Robot Technology, 2001.
- [13] 임미섭, 오상록, 임준홍, 유범재, 윤인식, "초음파센서를 이용한 이동로봇 시스템의 고속 실내 주행을 위한 하이브리드 시스템 제어기의 구현", 제어.자동화.시스템 공학 논문지 제 7권 제 9호, 2001.

## 저 자 소 개



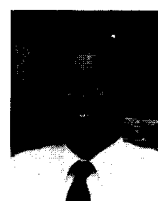
## 이 용 미 (李容美)

1999년 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 공학사. 2001년 동 대학원 전자공학과 공학석사. 2001-현재 삼성전자 근무. 관심 분야는 로봇 제어와 자동제어



## 임 미 섭 (林美燮)

1986년 한국항공대학교 전자공학과 공학사. 1989년 동대학원 공학석사. 2000년 한양대학교 전자공학과 공학박사. '91년 - 2001년 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 선임연구원. 2001년-현재 경기공업대학 메카트로닉스과 교수. 관심분야는 로봇제어, 휴먼로봇, 하이브리드 시스템.



## 임 준 홍 (林俊弘)

1979년 서울대학교 전자공학과 공학사, 1981년 한국과학기술원 전자공학과 공학석사. 1986년 Iowa 대학교 공학박사. '89년-'91년 한국항공대학교 전자공학과 조교수. 1991년-현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 자동제어, 로봇제어, 자동화 네트워크.