

# Nonholonomic 이동로봇의 호밍과 장애물 회피 알고리즘

論文

51D-12-8

## A Homing and Obstacle Avoidance Algorithm for Nonholonomic Mobile Robots

孔聖學\* · 徐一弘\*\*  
(Sung-Hak Kong · Il-Hong Suh)

**Abstract** - Homing operation can be defined as a series of actions which are necessary for a mobile robot to move from the current position with any arbitrary orientation to a desired position with a specified orientation, while avoiding possible obstacles. In this paper, a homing and obstacle avoidance algorithm for nonholonomic mobile robots is proposed. The proposed algorithm consists of a local goal generator, a discrete state controller, and local path tracking controller based on Aicardi's path following algorithm. In the discrete state controller, 4 states are defined according to the environmental conditions and 4 desired high-level command for the states are given as follows: avoid, wander, home and homing zones. The proposed local goal generator is designed to generate the desired local path by using weighted distance transforms which are newly made to satisfy the nonholonomic constraints of mobile robots. Here, subgoals are also found as vertices of the desired local path. To demonstrate result effectiveness and applicability of the proposed algorithm, computer simulations are illustrated and experimental results for a real mobile robot system are also provided.

**Key Words** : Homing, Obstacle Avoidance, Nonholonomic, Weighted Distance Transform, Local Target Path

### 1. 서 론

이동로봇에서 현재의 임의 위치 및 자세에서 필요한 로봇의 자세를 유지하면서 원하는 위치로 이동하는 동작을 호밍(homing) 또는 도킹(docking) 동작이라고 한다. 이러한 호밍 동작을 사용하는 예를 들면, 이동로봇이 작업 중에 전원 충전 공간(battery charge station)으로의 이동, 반도체 이송라인에서 이송로봇이 반도체 작업 공간의 이동, 산업용 지게차(fork lift)가 작업 공간으로의 이동 등 다양한 적용이 요구되는 동작이다. 그러나 이러한 작업들은 대부분 사무실, 공장과 같은 실내 환경에 적용되며, 작업 환경은 동적(dynamic)이며, 불규칙하다. 또한 이동로봇의 동작제어의 중요한 요구사항 중의 하나는 목적지점까지 장애물과의 충돌을 회피하면서 주어진 임무를 수행하기 위해서 정밀한 동작을 수행해야 한다는 것이다.

이와 관련된 연구들을 보면, Arkin, Murphy[12]등은 포텐셜 필드(potential field)를 기반으로 경로를 형성하는 영역 추종 알고리즘을 제안하였고, Vaughn, Arkin[25]등은 비전(vision) 센서를 이용해 물체의 에지(edge)를 찾아 주변을 인식하고, 장애물을 피해 경로를 생성하는 방법을 제안하였으며, Lueth, Nassal, Rembold[18]등은 조립라인의 로봇에 호밍 동작을 구현하기 위해 거리 센서(range sensor)와 비전을 혼합하여 전역적인 경로계획을 수립하는 알고리즘을 제안하였

으며. Mandel, Duffie[19]는 호밍 목표의 표면에 있는 특징을 인식하고 이를 로봇의 자세로 변환하는 알고리즘을 제안하였으며, Barnes, Liu[15]는 주변 물체들의 모델링을 통해 주변을 인식하고, 그것을 바탕으로 호밍 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이러한 알고리즘들은 실세계 좌표(world coordinate)에서 동작하는 다른 경로계획 기술들과 쉽게 조합하여 사용될 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 이러한 알고리즘들은 주로 전역적인 경로 계획을 바탕으로 경로 계획을 수립하기 때문에 이동 장애물과 같은 예상치 못한 환경 변화에 빠르게 대응하지 못하며, 센서정보를 실세계 좌표로 변환하는 과정에서 에러를 발생시킨다는 단점을 가지고 있다.

Santos-Vicotr, Sandini[22]는 호밍동작을 위한 능동적인 비전 시스템(active vision system)을 이용한 주행 알고리즘 제안하였고, Barends, Sandini[14][13][24]는 센서를 통해 입력된 정보를 직접적으로 동작제어에 사용하기 위한 로그-극좌표(log-polar coordinate)를 이용하는 알고리즘을 제안하였다. 이러한 방법들은 목표 물체를 추종하거나 영상내의 중앙에 고정시키는 방법을 사용하고, 능동적인 인식방법들을 이용해 센서로부터 정보를 얻는다. 이러한 정보는 F.O.V(Field Of View)로부터 목표 물체를 잃어버릴 수 있는 가능성을 줄인다는 장점을 가지고 있으나 영상 내의 위치 표적을 명시하기 위해 특별한 표식(landmark)들을 사용하여야 하며, 단지 목표 방향으로 직접 움직이게 되어, 장애물이 존재하는 경우 이를 피할 방법이 없다는 단점을 가지고 있다.

Arkin, MacKenzie[11]은 이동로봇의 자율주행을 위한 다양한 센서 정보를 활용한 행위기반 자율주행 알고리즘을 제안하였다. 이 방법에서는 호밍동작을 세 가지의 서브 문제(sub-problem)들로 표현하였다. 즉 첫째, 충돌의 위험이 없는

\* 正會員 : 漢陽大 電氣電子制御計測工學科 博士課程

\*\* 正會員 : 漢陽大 電氣電子制御計測工學科 教授 · 工博

接受日 : 2002年 9月 9日

最終完了 : 2002年 10月 9日

동안에 목표지점이 존재하는 곳으로 빨리 움직이는 문제, 둘째, 호밍 할 수 있는 조건에 만족되도록 조심스럽게 이동하는 문제, 셋째, 요구되어지는 정밀도를 만족하면서 목적지점으로 이동하는 문제로 정의하고, 첫째와 둘째 상황에서는 기존의 다중 모터 스키마(multiple motor schema) 기반 행위 제어를 통하여 장애물을 회피하며, 목표지점으로 이동하고, 목표지점 근처에 도착해서는 초음파 센서와 거리 센서를 이용해 요구되어지는 정밀도를 만족하도록 위치 및 자세 제어를 제어하는 연구를 수행하였다. 첫째와 둘째 상황에서 목표지점 근처에 도착하기 위해 모터 스키마를 기반으로 동작하기 때문에 이동로봇과 장애물의 크기에 의존성을 갖는다는 점과 셋째 상황에서 사용하는 포텐셜 필드 기반 알고리즘이 국지적 최소점(local minimum)에 빠질 수 있다는 문제가 있다.

그러나 이러한 연구들은 보면 주로 이동로봇이 Holonomic 특성이 있다는 가정을 하고 연구되고 있다. 그래서 본 논문에서는 Nonholonomic 이동로봇이 장애물이 존재하는 불확실한 환경에서도 호밍동작을 수행할 수 있는 하이브리드 형태의 이동로봇 제어시스템을 제안한다. 제안된 이동로봇 제어시스템은 크게 동작 상황을 판단/결정하는 상태 제어기, 국부적인 목표 경로를 생성하는 국부 목표 생성기, 장애물 회피를 위한 스키마 기반 제어기, 그리고 경로 추종 알고리즘을 이용한 국지적인 경로 추종 제어기로 구성되었으며, 제안한 알고리즘은 Nonholonomic 특성을 갖는 이동로봇이 다양한 경로와 여러 가지 장애물이 있는 복잡한 환경에서 장애물 회피를 수행하면서 호밍동작을 자율적으로 수행할 수 있는 Nonholonomic 이동로봇을 위한 제어 알고리즘이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 이동로봇의 경로 추종 알고리즘을 설명하고, 3절에서는 제안된 호밍 제어 및 장애물 회피 알고리즘을 서술하였다. 4절에서는 제안한 알고리즘의 유효성 및 타당성을 검증하기 위한 이동로봇에 대한 모의 및 실제 실험에 관하여 서술하였으며, 5절에서는 결론 및 추후과제를 기술한다.

## 2. Aicardi의 이동로봇 경로 추종 알고리즘

차륜바퀴 구동형 이동로봇(differential wheel driven mobile robot)은 대표적인 비선형 시스템(nonlinear system)으로, 시간에 대해서 적분되지 않는 속도 제약조건(constraints)을 갖는 Nonholonomic 시스템이다. 이러한 Nonholonomic 시스템은 제어 입력보다 시스템의 상태 변수가 많아서 전체적인 경로 추종 및 자세 제어가 불가능하며 부분적인 제어목적만이 가능하며, 주어진 상태변수에 의해서 시스템의 운동을 제어하기 위해서는 일반적인 smooth 상태 궤환을 이용하여 입력-상태 선형화가 불가능하지만 적당한 출력 벡터를 정함으로써 입력-출력 선형화가 가능하다 [34][35].

그래서 본 논문에서는 이동로봇의 경로 추종을 위해 시스템 상태 변수들을 특별하게 선택함으로써, 전역적인 안정성(global stability property)들이 smooth 궤환 제어 규칙에 의해 보장됨을 증명한 Aicardi[3]의 경로 추종 알고리즘을 사용하고자 한다. 여기서, 행위기반 제어 알고리즘에 용이하도록 주변 상황만을 입력받아 경로를 추적하도록 하는 경로 추종에 관한 알고리즘을 사용하였다.

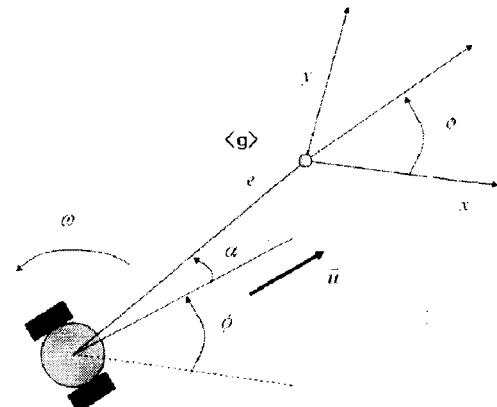


그림 1 목표 프레임에 대한 이동로봇의 좌표계

Fig. 1 The coordinate of mobile robot with respect to the goal frame

Aicardi의 이동로봇 경로 추종 방법을 살펴보기 위해서, 그림 1을 고려하자. 여기서, 일반적인 이동로봇의 기구학적 모델링에서 목표 프레임(goal frame)  $\langle g \rangle$ 에서 거리가 영이 아닌 곳에 unicycle 형태의 이동로봇이 위치해 있다고 하면 이동로봇의 움직임은 각속도  $\omega$ 와 선속도 벡터  $u$ 의 조합으로 나타내어진다.

그러면 Nonholonomic 제약조건을 만족하는 기구학 식은 다음과 같고, 이는 이동로봇의 직교좌표계상의 위치  $x, y$ 와 이동로봇의 방향  $\phi$ 를 내포하고 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos \phi \\ \dot{y} &= u \sin \phi \\ \dot{\phi} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $u$ 는 단순히 벡터  $\bar{u}$ 방향의 성분이고,  $x, y$  그리고  $\phi$ 는 목표 프레임  $\langle g \rangle$ 를 기준으로 측정되어진 것들이다.

이동로봇의 위치를 프레임  $\langle g \rangle$ 에 대한 오차 거리(error distance)  $e > 0$  와 이동로봇의 방향각(orientation)  $\theta$ 로 표현함으로써, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= -u \cos(\theta - \phi) \\ \frac{d\theta}{dt} &= u \frac{\sin \alpha}{e} \\ \frac{d\phi}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 이동로봇 진행 방향과 오차거리 벡터  $e$  사이의 각도라 하면,  $\alpha = \theta - \phi$ 라 할 수 있고, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= -u \cos \alpha \\ \frac{d\alpha}{dt} &= -\omega + u \frac{\sin \alpha}{e} \\ \frac{d\theta}{dt} &= u \frac{\sin \alpha}{e} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3) 상태 변수들이  $[e, \alpha, \phi]'$ 이며, 찾고자하는 제어 규칙(control law)은  $[u, \omega]' = g(e, \alpha, \theta)$ 이며, 제어목표는  $\lim_{t \rightarrow \infty} [e, \alpha, \phi] = [0, 0, 0]$  이게 되도록 하는 것이다.

상기 제어문제를 풀기 위해, 다음의 Lyapunov 함수를 생각하기로 한다.

$$V = V_1 + V_2 = \frac{1}{2} \lambda e^2 + \frac{1}{2} (a^2 + h\theta^2); \quad \lambda, h > 0 \quad (4)$$

여기서  $V_1, V_2$ 는 오차거리 벡터  $e$ 와 정렬오차 벡터인  $[a, \sqrt{h}\theta]$ '의 squared weighted norm을 나타낸다.

이제 식 (4)을 미분하고 식 (3)을 대입 정리하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{dV_1}{dt} + \frac{dV_2}{dt} \\ &= \lambda e \frac{de}{dt} + (a \frac{da}{dt} + h\theta \frac{d\theta}{dt}) \\ &= -\lambda e \cos \alpha + a[-\omega + u \frac{\sin \alpha}{\alpha} \frac{a+h\theta}{e}] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 선속도  $u$  와 각속도  $\omega$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$u = (\gamma \cos \alpha) e \quad \gamma > 0 \quad (6)$$

$$\omega = ka + \gamma \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{\alpha} (a + h\theta) \quad (k > 0) \quad (7)$$

이때,  $\frac{dV_1}{dt}$  와  $\frac{dV_2}{dt}$  는

$$\frac{dV_1}{dt} = -(\lambda \cos^2 \alpha) e^2 \leq 0 \quad (8)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = a[-\omega + \gamma \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{\alpha} (a + h\theta)] = -ka^2 \leq 0 \quad (9)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -ka^2 \leq 0 \quad (10)$$

가 된다. 따라서

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_1}{dt} + \frac{dV_2}{dt} = -\lambda(\gamma \cos^2 \alpha) e^2 - ka \leq 0 \quad (11)$$

위의 결과로부터 Lyapunov 함수  $V$ 는 항상 시간에 대해 증가하지 않고, 항상 영보다 작기 때문에 점근적으로 수렴하게 된다.

제어 법칙인 식(6)과 (7)에서 양 파라미터(positive parameter)인  $h, \gamma, k$ 들이 제어 결과로 나타나는 경로의 회전 반경(curvature)를 결정하게 된다.

### 3. 이동로봇의 호밍 제어 알고리즘

호밍동작이란 현재의 위치에서 원하는 자세와 위치를 유지하면서 안전한 경로로 이동하는 것이라고 정의될 수 있으며 [12], 이동로봇의 최종 위치와 자세는 각각의 임무(task)에 따른 허용오차를 만족시켜야한다. 산업용 포크리프트, 생산현장에서의 이송로봇 등은 어떤 물체에 접근하거나, 그것을 이동시킬 수 있는 능력이 요구된다. 이러한 호밍 상황들을 살펴보면 대상물체는 고정되어 있고, 이동로봇의 위치는 이차원 정보를 갖는다. 또한 이동로봇의 자세는 일차원의 회전으로 볼 수 있다(그림 2 참조).

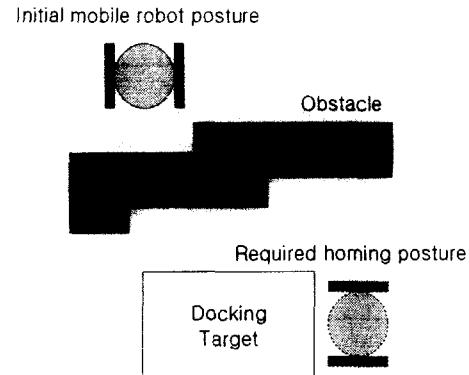


그림 2 호밍동작의 개념도

Fig. 2 Schematic of a homing operation

본 논문에서는 Nonholonomic 이동로봇이 장애물이 존재하는 불확실한 환경에서도 호밍동작을 수행할 수 있는 하이브리드 형태의 이동로봇 제어시스템을 제안한다.

제안된 제어 시스템은 크게 동작 상황을 판단/결정하는 상태 제어기(State Controller), 국부적인 목표 경로를 생성하는 국부 목표 생성기, 장애물 회피를 위한 스키마 기반 제어기, 그리고 앞 절에서 설명한 경로 추종 알고리즘을 이용한 국지적인 경로 추종 제어기(Local Path Tracking Controller)로 구성된다. 제안한 제어기의 전체구성은 그림 3과 같다.

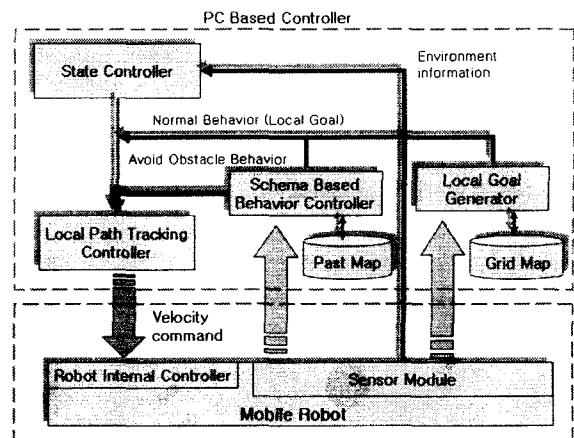


그림 3 제안한 알고리즘의 구성도

Fig. 3 Block diagram of the proposed algorithm

일반적으로 이동로봇의 호밍 동작은 다음과 같은 세 가지의 상황, 첫째 충돌의 위험이 없는 동안에는 목표지점이 존재하는 곳으로 빨리 움직여야 하는 상황, 둘째 호밍 할 수 있는 조건에 만족되도록 조심스럽게 이동해야 하는 상황, 셋째 요구되어지는 정밀도를 만족하면서 목적지로 호밍동작을 수행하는 상황이 주어진다[11]. 그러나 이러한 상황은 항상 순차적으로 주어지는 것이 않으며, 주변 환경 및 임무에 따라 각각 다른 상황이 주어진다. 따라서 이동로봇이 자율적으로 각각의 상황에 적절히 대응할 수 있는 능력이 필요하며, 이를 위해 본 논문에서는 이산상태로 모델링된 상태 제어기에서는 이동로봇의 센서 정보를 통해 로봇이 처한 상황과 수행 중인 임무를 고려하여 적절히 대응할 수 있는 이동로봇의 동작 상

태를 결정하도록 하였다.

또한 제안한 제어 알고리즘에서는 상태 제어기에서 결정된 로봇의 동작 상태에 따라 국부 경로 목표 생성기에서는 필요한 목표 경로들을 생성하도록 하였다. 만약 이동 로봇이 주어진 임무 또는 호밍 동작하는 경로 상에 장애물이 존재한다면, 갑작스러운 이동 장애물이 존재한다면 장애물 회피를 위한 스키마 기반 제어기에서 장애물을 회피할 수 있는 새로운 경로를 생성하도록 하였다. 이런데 생성된 국부 경로 목표는 앞 절에서 설명한 경로 추종 알고리즘을 이용한 국지적인 경로 추종 제어기(Local Path Tracking Controller)에서 경로를 추종하도록 동작한다.

### 3.1 상태 제어기(State Controller)

본 논문에서는 이동로봇이 각각의 상황에 적절히 대응할 수 있도록 하기 이동로봇이 직면하는 상황을 상태(state)로 정의하였고, 각 상태를 이산상태로 모델링 하였다. 즉 주어진 작업을 간략화 개념에 따라 이산상태로 모델링 하였다. 이러한 이산상태를 이용한 모델링의 장점은 다음과 같다.

- 1) 유한 상태 기계의 구성 방법에 따라 다양한 제어가 가능하다.
- 2) 하이브리드의 개념을 이용하면, 구현하기 어려운 복잡한 작업들을 구현하기 용이한 형태들로 변환시켜 인터페이스를 통해 다양한 작업을 수행할 수 있다.
- 3) 비선형 경로에 대한 추종은 기존의 제한된 제어 방법으로 불가능하며 이에 대한 대책으로써, 이벤트마다 다른 제어 방법을 적용할 수 있다.

이산상태 시스템 모델링을 위해 이동로봇의 주변 영역을 그림 4와 같이 영역 분할하였다.

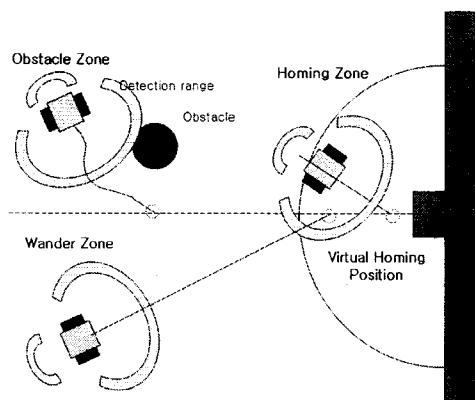


그림 4 이동로봇의 주변 영역 분할

Fig. 4 Schematic of region segment

여기서 자유 작업 영역(Wandering zone)은 로봇이 주어진 임무를 수행할 수 있는 영역, 장애물 지역(Obstacle zone)은 로봇이 장애물을 감지하고 현재 하던 동작을 멈추고 장애물을 회피해야하는 영역, 호밍 영역(Homing zone)은 호밍 동작을 수행해야하는 영역을 의미한다.

그러면 이동로봇이 호밍을 하면서 대응해야하는 상황은 다음과 같이 이산상태로 모델링 된다.

- 1) 자유작업상태(Wandering State) : 이동로봇이 주어진 임무를 수행하며, 작업하는 주변에서 장애물이 감지되지 않은 상태
- 2) 호밍 준비 상태(Moving Homing Zone State) : 이동로봇이 임무를 수행하기 위하여 호밍지역으로 이동하는 상태
- 3) 장애물회피상태(Avoid Obstacle State) : 이동로봇이 임무를 수행하는 도중에 장애물이 감지되어, 현재 수행하던 임무를 보류하고 장애물을 회피하여야 하는 상태
- 4) 호밍상태(Homing State) : 이동로봇이 호밍지역으로 이동하여서 호밍을 시도하고 있는 상태

각 상태에서 다른 상태로의 천이는 이동로봇이 동작 주변에 장애물 또는 호밍 명령이라는 이벤트에 따라 천이가 발생한다. 즉 로봇이 주어진 임무를 수행하고 있는 상태인 자유작업상태에서 로봇이 센서를 통해 장애물을 감지했다면 로봇은 하던 임무를 중지하고 장애물을 회피해야하는 장애물회피상태로 천이가 일어나 이동로봇이 장애물을 회피하는 동작을 수행하도록 하였다.

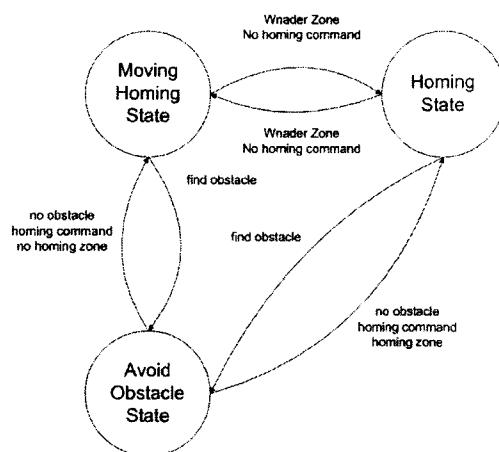


그림 5 호밍의 상태천이

Fig. 5 State transition of a homing operation

그림 5는 호밍 명령에 따라 이동로봇이 호밍 목표지점으로 이동 중에 갑자기 감지된 센서에 따라 수행하던 호밍 동작에 우선하여 장애물을 회피하는 동작을 수행하는 상태 천이를 보여주고 있다.

### 3.2 국지적인 목표 경로 생성 알고리즘

기존의 목표 경로 생성 알고리즘들은 로봇의 주변 정보를 모두 알고 있는 상황에서만이 경로 생성이 가능하다. 그러나 로봇의 주변 모든 정보를 로봇이 알고 있는 상황을 구현하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 국부적인 목표 생성기 개념을 도입하였다. 도입된 국부적인 목표 생성기 개념은 미지의 환경에 이동로봇이 놓이더라도 로봇이 자율적으로 주변을 이동하면서, 이동로봇이 이동 중에 경험한 탐색 정보를 활용하여

새로운 경로를 생성하는 알고리즘이다. 이를 위해 본 연구에서는 전역적인 경로계획과 국지적인 경로 계획의 장단점을 상호 보완하기 격자 지도(grid map)를 기반으로 전역 경로계획에 따라 Nonholonomic 이동로봇이 이동할 수 있는 국지적인 경로 목표점을 생성하도록 구현하였다. 이때 사용하는 격자 지도 정보는 주변의 모든 정보를 알고 있다는 가정 하에서 구성된 것이 아니라, 이동로봇이 이동하면서 탐지하는 주변 정보에 따라 생성되는 격자 지도이다. 이러한 격자 지도 생성에 온라인(On-Line)상에서 이루어지며, 환경 정보 갱신에 관련된 처리 흐름은 그림 6과 같이 수행된다.

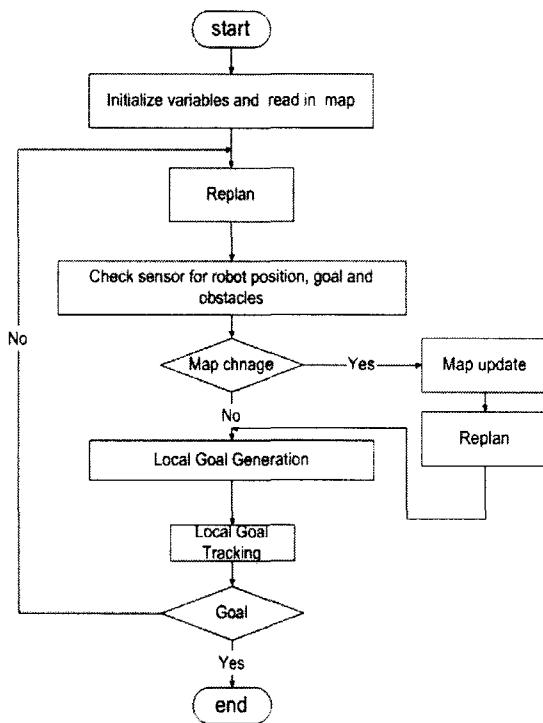


그림 6 경로 생성 알고리즘의 흐름도

Fig. 6 Flowchart of the proposed path planning algorithm

일반적으로 전역적인 경로 계획 방법에 관한 연구들을 보면 주변 환경을 격자로 표현하고, 격자 공간상에서 최적 경로를 찾는 위해 A\* 알고리즘[37], Dijkstra 알고리즘[38], 거리 변환(Distance Transform) 알고리즘[36] 등을 사용하여 최적 경로를 찾는 방법들이 연구되었다. 그러나 A\* 알고리즘과 Dijksta 알고리즘은 정다각형 물체들의 정점들(vertices of the polygonal objects)에 따라 계산되므로 장애물이 정다각형이 아닌 경우 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 이에 비해 Balch[36]가 제안한 거리 변환을 이용한 격자 기반 경로계획 방법은 최단경로를 생성하면서도 목표지점에 대해 수렴함을 입증하였다. Balch의 알고리즘은 그림 7과 같이 각 격자와 목표 지점까지의 거리 함수(Distance Transform) 값을 셀값 (cell cost)으로 계산하고 현재 위치에서 기울기가 가장 큰 셀을 따라 경로를 생성하는 방법이다. 그림 7에서 R은 이동로봇의 현재 위치이고, G는 목표 지점을 나타낸다.

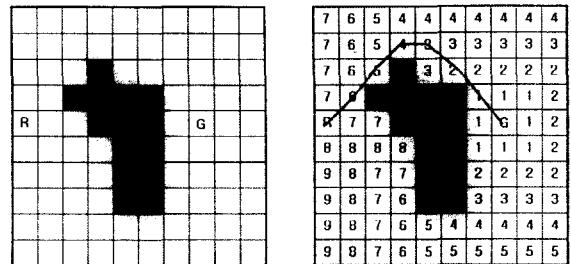


그림 7 격자기반 경로 생성 알고리즘

Fig. 7 Grid based path gerenation algorithm

그러나 이러한 Balch가 제시한 방법은 단순히 로봇의 위치 정보만을 사용해 경로를 계산하므로 Nonholonomic 특성을 갖는 이동로봇이 이동할 수 없는 경로를 생성하는 단점이 있다. 즉 이동로봇이 이웃한 셀과의 단순히 거리만을 고려한식(13)으로 이웃 셀값을 계산하여 갱신한다. 이에 따른 이웃 셀들의 갱신이 그림 8과 같이 된다.

$$\cos t \ update(i, j) = cell\_cost(i, j) \quad (13)$$

여기서  $cell\_cost(i, j) = \sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2}$ 로 계산한다.

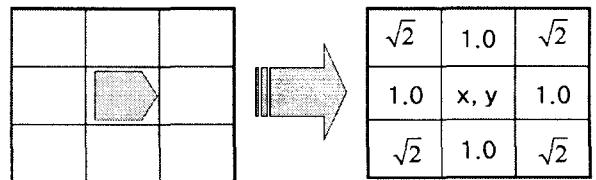


그림 8 Balch가 제안한 이웃 셀들의 갱신 값

Fig. 8 Update a neighbor cell value using the Balch's method

그림 7과 같은 격자 지도에 Balch가 제안한 경로생성 알고리즘을 적용하면 그림 9에서와 같이 이동로봇의 진행 방향에 대해 90도 회전하는 경로를 생성하여 Nonholonomic 이동로봇에 적용할 수 없는 경로를 생성한다.

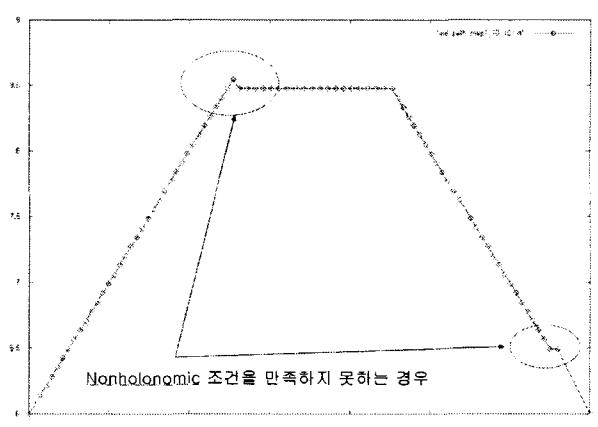


그림 9 Balch가 제안한 방법에 따른 경로 생성

Fig. 9 Path generation using the Balch's algorithm

이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 거리 변환 계산할 때 단순히 위치 좌표만을 고려하지 않고, 이동로봇의 현재 자세와 목표지점과 향하도록 하는 자세에 가중치를 주는 거리변환(weighed distance transform)을 수행하도록 방법을 제안한다. 즉 셀값 계산할 때 진행 방향 기준으로 셀값이 큰 값을 같도록 하였다.

$$\cos t \text{ update}(i, j) = \text{cell\_cost}(i, j, \theta_{\text{Robot}}, \theta_{\text{Goal}}) \quad (14)$$

여기서  $\text{cell\_cost}(i, j)$ 는 이동로봇의 자세와 목표 지점에 대한 각도차에 따라 그림 10에 있는 가중치를 준 거리 변환 마스크를 적용하여 이웃 셀값을 계산한다. 제안된 가중치를 준 거리 변환 마스크는 이동로봇의 Nonholonomic 특성을 고려하여 가중치를 부여하였다. 부연된 가중치는 이동로봇이 전진과 후진을 할 수 있는 능력을 고려하여 전방과 후방의 가중치를 같도록 설정하였으며, 경로 생성의 목표를 Nonholonomic 이동로봇이 이동 가능한 최단 경로를 생성하도록 마스크를 설계하였다.

$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 135^\circ$
1 0.5 1 0.5 1.0 1.5 1.5 x,y 1.5 1 0.5 1	0.5 1.0 1.5 1.0 x,y 1.0 1.5 1.0 0.5 1 1.5 1	1 1.5 1 0.5 x,y 0.5 1 1.5 1 0.5 1.5 1.0	1.5 1.0 0.5 1.0 x,y 1.0 0.5 1.5 1.0 0.5 1.5 1.0
$\theta = 180^\circ$	$\theta = 225^\circ$	$\theta = 270^\circ$	$\theta = 315^\circ$
1 0.5 1 1.5 x,y 1.5 1 0.5 1	0.5 1.0 1.5 1.0 x,y 1.0 1.5 1.0 0.5 1 1.5 1	1 1.5 1 0.5 x,y 0.5 1 1.5 1 0.5 1.5 1.5	1.5 1.0 0.5 1.0 x,y 1.0 0.5 1.5 1.0 0.5 1.5 1.5

그림 10 가중치를 준 거리 변환 마스크

Fig. 10 Weighted distance transform mask

제안한 방법을 Balch의 알고리즘과 비교하기 위해 그림 7의 격자 지도에 적용한 결과 그림 11과 같은 셀값을 계산하였다.

3.328	2.828	2.386	1.886	1.914	1.886	1.914	1.886	1.914	1.886
3.300	2.857	2.357	1.914	1.414	1.443	1.414	1.443	1.414	1.443
3.328	2.828	2.386		1.443	0.943	0.971	0.943	0.971	0.943
3.300	2.857					0.471	0.5	0.471	0.971
R (3.328)	3.024	3.190				0.5	G	0.5	0.943
3.495	3.190	3.024	2.719			0.471	0.5	0.471	0.971
3.662	3.162	2.857	2.552			0.971	0.943	0.971	0.943
3.633	3.190	2.690	2.386			1.414	1.443	1.414	1.443
3.661	3.162	2.719	2.219	2.052	1.886	1.914	1.886	1.914	1.886
3.633	3.190	2.690	2.524	2.357	2.386	2.357	2.386	2.357	2.386

그림 11 제안한 방법에 따라 계산된 셀값들

Fig. 11 Update a neighbor cell value using the proposed method

계산된 셀값을 바탕으로 경로 계획을 수행하여 그림 12와 같은 결과를 얻었으며, 생성된 경로는 이동로봇이 Nonholonomic 특성에 따라 이동할 수 있는 경로를 생성함을 보인다.

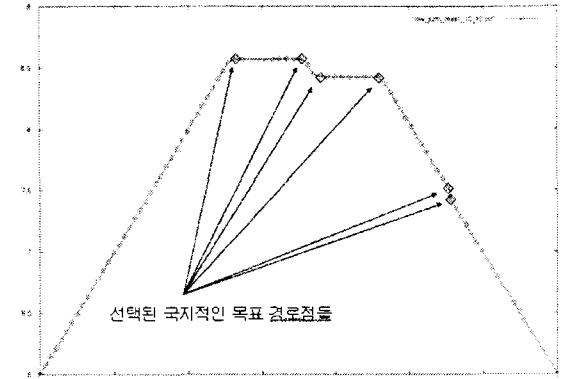


그림 12 제안한 방법에 따른 경로 생성 결과

Fig. 12 Path generation using the proposed algorithm

생성된 경로에서 꽂지점들을 국지적인 경로 목표로 선택하였으며, 선택된 국지적인 목표 경로를 경로 추종 제어기에서 추종하도록 동작한다.

### 3.2 장애물 회피를 위한 스키마기반 행위제어기

행위 기반 이동 로봇(Behavior based Mobile Robot) 제어 알고리즘은 요즘 가장 주목 받고 있는 연구 분야 중의 하나이다. 이동로봇이 수행할 수 있는 모든 동작(Action)을 일정한 형태의 행위(Behavior)로 구분하고, 각각의 상황에 따라 정의된 행위들을 선택 또는 조합하여 로봇의 동작을 결정하는 반사적인 응답으로 동작하는 방식으로, 주변 정보가 부족한 상황, 동적인 주변 환경 변화 등에 빠르게 대응한다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이러한 행위 기반 방식의 제어 방법은 주로 전역적인 정보를 이용하지 않고 국지적인 정보만을 이용하므로 교착상태에 빠지는 경우가 많거나, 많은 시행착오를 거친 다음에 벗어나는 등 최적 경로를 따르지 않는 경우가 많다[8].

본 논문에서는 다양한 장애물 환경에서도 주어짐 임무를 수행하기 위해 행위 기반 제어 알고리즘이 가지고 있는 장점인 주변 상황에 대한 반사적인 응답 특성을 이동 장애물과 같은 장애물 회피 동작에 적용하였다. 이를 위해 본 논문에서는 Arkin[6] 등이 제안한 스키마 기반 행위제어(Schema-Based Behavior Control) 행위제어 알고리즘을 사용하였다. 즉 Move-To-Goal Schema, Avoid-Obstacle Schema, Noise Schema, Avoid-past Schema 등 모두 4가지의 스키마를 사용하여 이동로봇이 장애물을 회피하면서 움직여야 할 가상적인 목표 위치 및 자세를 계산하여 이를 추종하도록 하는 제어 구조를 사용하였다. 기존의 연구에서는 국지적인 정보만을 이용하여 전역적인 목표를 추종할 방법을 연구하였으나, 그림 13과 같은 경우처럼 교착상태에 빠지는 단점이 있다.

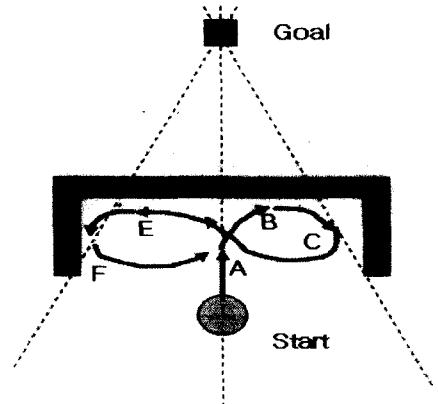


그림 13 전역적인 목표를 따라가다 교착상태에 빠진 로봇  
Fig. 13 Wandering path under the Global Target Oriented Path

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 스키마 기반 행위 제어기를 전역적인 목표가 아닌 국지적인 목표 생성기(Local Target Generator)에서 생성된 국지적인 목표에 따라 동작하도록 하였다.

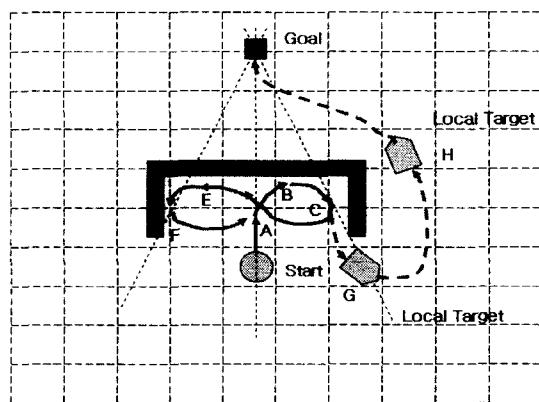


그림 14 국지적인 목표를 따라 이동하는 이동로봇  
Fig. 14 Local target path tracking scheme

즉 그림 14에서와 같이 이동로봇이 장애물을 만난을 경우 최종 목적지를 목표로 각각의 스키마에 대한 값을 계산한 후에 이를 스키마 기반 행위 제어기의 출력으로 계산하는 것이 아니라, 본 논문에서 제안한 제어 시스템에 구현된 국지적인 목표 생성기에서 생성된 국지적인 목표 경로점을 기준으로 스키마 출력을 생성하도록 하여, 이동로봇이 이렇게 생성된 경로점 G와 H를 따라 최종 목표에 도착하도록 구현하였다.

#### 4. 모의실험 및 제어기 구현

본 논문에서는 제안한 알고리즘을 유효성을 검증하기 위해 다양한 모의실험을 수행하였으며, 모의실험과 실제 실험 환경을 일치시키기 위하여 ActiveMedia Robotics사의 Amigobot의 실제 파라미터를 표 1과 같이 모의실험의 파라미터들로 사용하였다.

표 1 모의실험 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

파라미터 명	값	단위
Robot Width	280	mm
Robot Length	340	mm
Max Angular Velocity	300	deg/sec
Max Linear Velocity	1000	mm/sec
Sampling Time	10	msec
Work Space	10000	mm

#### 4.1 경로 추종 모의실험

본 논문에서 사용한 경로 추종 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여 그림 15와 같은 구조를 갖는 제어기를 구현하여 모의실험 하였다.

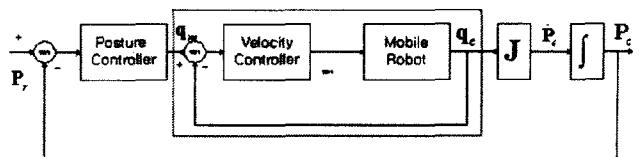


그림 15 구현된 경로 추종 제어기기의 구성도  
Fig. 15 Control Block diagram of path tracking system

앞 절에서 서술한 경로 추종 알고리즘을 능력을 실험하기 위하여 Matlab에서 모의실험 하였다. 이동로봇의 초기 위치를  $(x, y, \phi) = (-260, -270, 135)$ 에 위치하고 있다고, 목표 위치는  $(x, y, \phi) = (100, 100, 70)$ 이다. 또한 경로 추종 제어기에 사용된 파라미터를  $\gamma=3, h=1$  그리고  $k=1$ 로 설정하고 모의 실험한 결과 그림 16과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

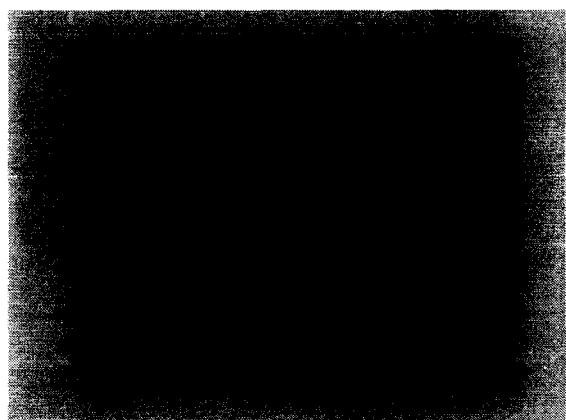
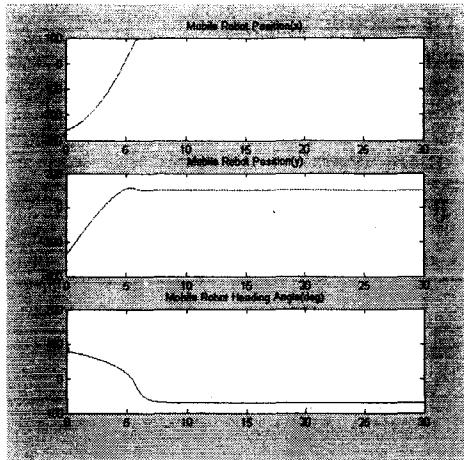
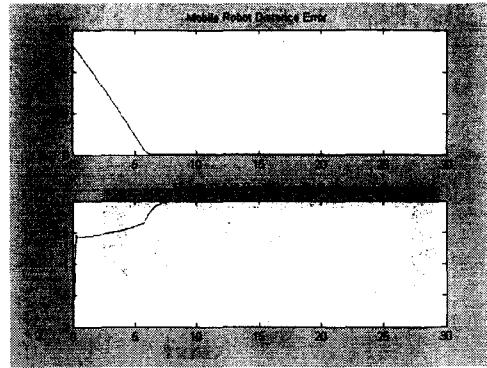


그림 16 국지적인 경로 추종 모의실험 환경  
Fig. 16 Configuration of local path tracking

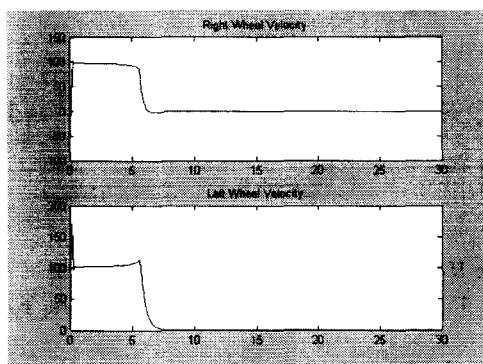


(a) 위치 및 자세 응답  
(a) Response of position and angle

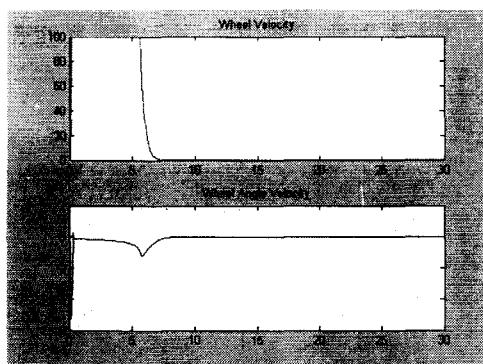


(d) 선속도 및 각속도 응답  
(d) Response of linear and angular velocity

그림 17 경로 추종 모의 실험 결과  
Fig. 17 Simulation result of path tracking



(b) 속도 제어기에 내려진 속도 명령 응답  
(b) Response of velocity command



(c) 거리 및 자세 오차 응답  
(c) Response of distance and angle Error

그림 16에서와 같이 원하는 자세로 경로 추종을 하는 것을 확인할 수 있었으며, 경로 추종을 위한 사용된 제어 파라미터들의 변화는 그림 17의 그래프와 같았다. 또한 이러한 모의 실험을 임의의 위치 및 자세에 대해 수행하였며 같은 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4.2 국지적인 목표 경로 생성 알고리즘의 모의실험

본 논문에서는 제안한 국지적인 목표 경로 생성 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 모의실험을 시행하였다. 모의실험을 위해 그림 18과 같은 격자 지도를 사용하였다.

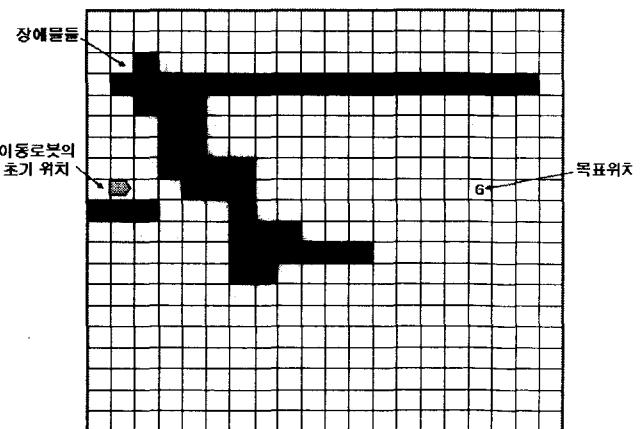


그림 18 모의실험에 사용된 격자지도 예(20X20 지도)  
Fig. 18 Sample grid map(20X20 Map)

Balch의 알고리즘과 제안한 방법의 경로 생성 결과는 그림 19와 같다.

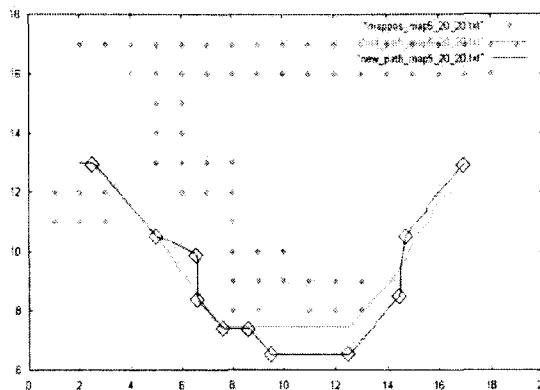


그림 19 국지적인 목표 경로 생성 모의실험 결과  
Fig. 19 Local target generation result with the proposed algorithm

그림 19에서 다이아몬드 모양이 있는 위치가 생성된 국지적인 목표 경로점들 표시한다. 또한 생성된 경로에 대한 Nonholonomic 특성 위반이 일어나는지를 모의 실험하였다. 모의실험에 사용된 지도는 표2와 같이 19개의 지도에 대해 모의실험 하였다.

표 2 모의실험에 사용한 지도 개수

Table 2 Number of used map for simulation

지도의 크기	개 수
12 X 12	6
13 X 12	2
20 X 20	4
40 X 40	7

Nonholonomic 특성 위반은 그림 20과 같이 진행 방향에 대한 순간적으로 이동해야 하는 회전 방향을 가지고 판단하였으며, 다음과 같은 조건으로 구분하여 모의실험 하였다.

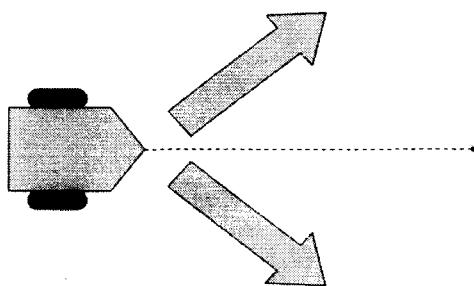


그림 20 Nonholonomic 특성 정의  
Fig. 20 Definition of Nonholonomic Property

Nonholonomic 특성 위반 판단 조건

- 조건 1 : 진행 방향에 대해 순간적으로  $\pm 60$  도 회전
- 조건 2 : 진행 방향에 대해 순간적으로  $\pm 45$  도 회전

위와 같은 조건으로 모의 실험한 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3 Nonholonomic 특성 위반 비교 실험 결과

Table 3 Result of compare the proposed algorithm with normal algorithm

Map 이름	기존 방법		제안한 방법	
	조건 1	조건 2	조건 1	조건 2
map1_12_12.map	0	4	0	0
map2_12_12.map	0	1	0	0
map3_12_12.map	0	5	0	0
map4_12_12.map	1	2	0	0
map5_12_12.map	1	4	0	0
map6_12_12.map	0	1	0	0
map1_13_12.map	0	7	0	0
map2_13_20.map	2	2	0	0
map1_20_20.map	1	5	0	0
map2_20_20.map	1	4	0	0
map3_20_20.map	0	5	0	0
map4_20_20.map	0	8	0	0
map1_40_40.map	1	7	0	0
map2_40_40.map	0	5	0	0
map3_40_40.map	0	5	0	0
map4_40_40.map	0	6	0	0
map5_40_40.map	0	6	0	0
map6_40_40.map	0	5	0	0
map7_40_40.map	0	4	0	0

위의 모의실험 결과로 제안한 방법은 Nonholonomic 특성을 만족함을 볼 수 있었다.

#### 4.3 행위 기반 장애물 회피 및 호밍 제어 알고리즘의 모의실험

본 논문에서는 제안한 호밍 제어 알고리즘의 유효성을 검증하고자 이동로봇의 장애물 회피 및 호밍 제어 알고리즘에 관한 모의실험도 시행하였다. 구현된 이동로봇의 호밍 동작 모의실험은 원도우 환경 하에서 Visual C++로 구현하였다. 구현된 모의실험기의 외형은 그림 20과 같으며, 제어 알고리즘의 동작되는 상태를 모니터링하기 위한 실험자 관측 환경도 함께 구현하였다.

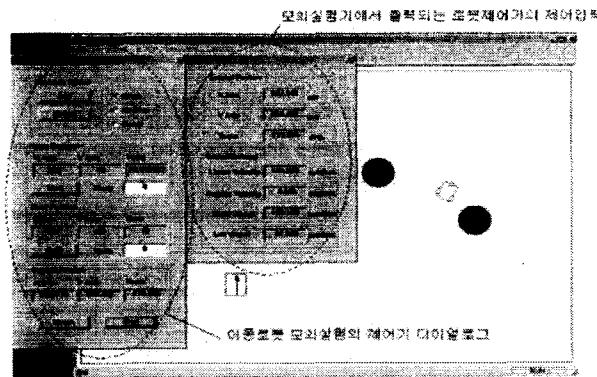


그림 21 구현된 호밍 제어 알고리즘의 모의 실험기  
Fig. 21 Implemented simulation of the proposed homing algorithm

구현된 모의실험기의 이동로봇은 Nonholonomic 제약조건에 구속되도록 구현하였다. 제안한 호밍 제어 알고리즘이 장애물이 있는 다양한 환경에서도 호밍 동작을 수행하는가를 확인하기 위해 실험하였다. 수행된 모의실험은 그림 22와 같이 장애물이 존재하는 환경 하에서 모의실험을 하였다.

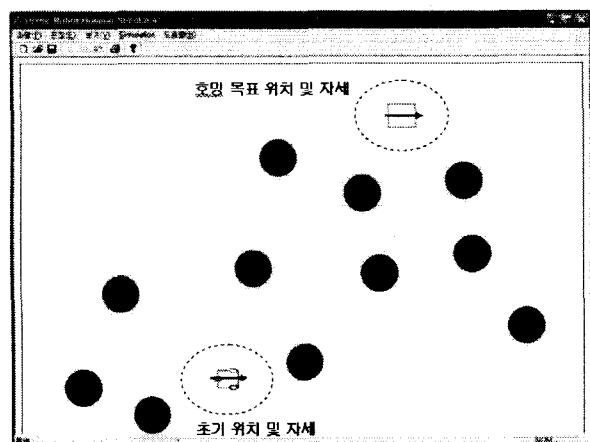


그림 22 장애물 있는 모의실험 환경  
Fig. 22 Simulation configuration with Obstacles

모의실험을 수행한 환경은 이동로봇의 초기 위치로  $(x, y, \phi) = (348.0, 527.0, -0.638)$  호밍 목표 위치로  $(x, y, \phi) = (634.0, 527.0, 0.0)$ 로 설정하였으며, 국지적인 목표 경로 생성기를 위해 전체 작업 영역을 격자 간격 10으로 하여 실험하였다. 본 실험에서 생성된 국지적인 목표 경로 생성 결과 그림 22와 같은 경로를 생성하였으며, 8개의 국지적인 경로 목표 점들을 계산하였다. 그림 26에서 다이아몬드 표시된 점들이 계산된 목표 경로 점들이다.

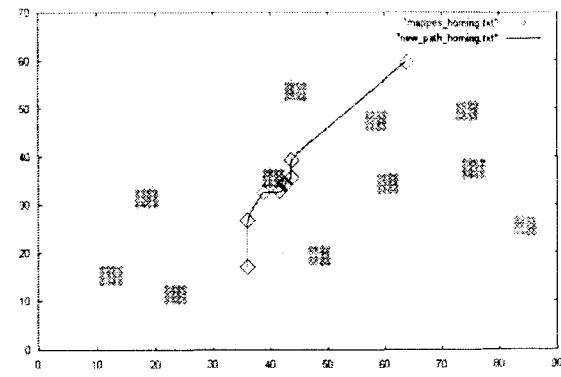


그림 23 국지적인 경로 생성 모의실험 결과  
Fig. 23 Simulation result of local target path

또한 그림 23에 국지적인 경로 생성을 위해 사용된 격자지도의 각 셀값을 3차원 그래프로 표시하였다.

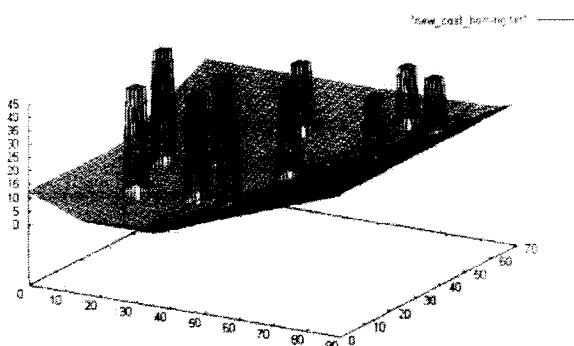


그림 24 각 격자값들의 3차원 도표  
Fig. 24 3D surface graph of grid cell values

모의실험 결과는 그림 25과 같이 장애물을 회피하며, 호밍 동작을 수행하였다.

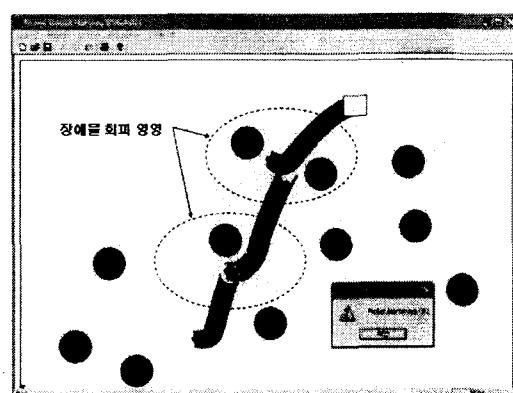


그림 25 장애물 있는 환경에서의 모의 실험 결과  
Fig. 25 Simulation result with Obstacles

#### 4.4 Nonholonomic 이동로봇을 위한 이동로봇 제어기 구현

제안한 호밍 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 차륜 구동형인 Amigobot의 이동로봇에 이동로봇 제어기를 구현하였다. 그림 26는 실험에 사용된 이동로봇의 모습이다.

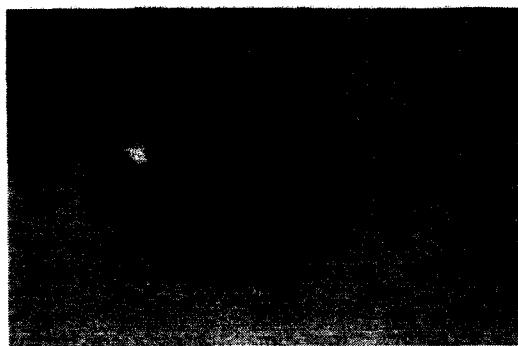


그림 26 실험에 사용한 이동로봇(Amigobot)  
Fig. 26 Experimental Mobile Robot(Amigobot)

구현된 이동로봇 제어기의 구성은 그림 26과 같다. 제어기는 IBM PC상에서 구현하였으며, 이동로봇에 내장된 제어기는 단순히 모터제어 기능만을 수행하도록 구현하였다. 제안한 알고리즘이 구현된 제어기와 실제 이동로봇 제어기 사이의 통신은 50msec를 주기로 RF 모뎀 통신을 통해 제어하였다. 제안한 제어 구조 및 알고리즘이 다양한 이동로봇 시스템에 적용되게 하기 위하여, 구현된 이동로봇 제어기의 출력을 속도 제어 값으로 계산하도록 구현하였다.

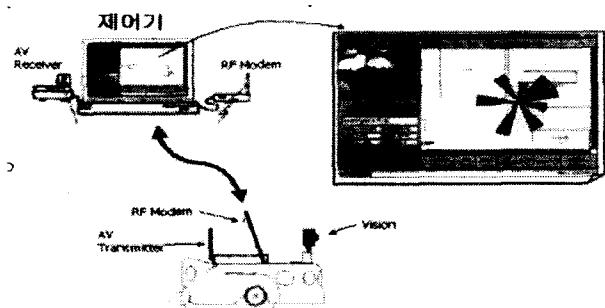


그림 27 실험 환경  
Fig. 27 Experimental Setup

한편 구현된 이동로봇 제어기의 경로 추종 제어기에서는 제어 파라미터를  $\gamma=3$ ,  $h=1$  그리고  $k=1$ 로 설정하여 경로 추종을 수행하도록 구현하였으며, 조작자의 편의성을 고려하여 사용자들에게 친숙한 그래픽 사용자 인터페이스로 구현하였다.

구현된 이동로봇 제어기를 이용하여 장애물이 없는 환경(그림 28)과 장애물이 있는 환경(그림 29)에서의 호밍 동작 실험을 수행하였다.



그림 28 장애물이 없는 실험환경  
Fig. 28 Experiment wih no Obstacle Environment



그림 29 장애물이 있는 실험환경  
Fig. 29 Experiment wih Obstacle Environment

실험 결과 본 논문에서 제안한 알고리즘이 장애물이 없는 경우나 장애물이 있는 경우에도 호밍 동작을 수행하는 것을 확인하였다.

#### 5. 결론 및 추후과제

본 논문에서 차륜구동형 이동로봇의 구속 조건인 Nonholonomic 특성을 만족하면서 다양한 상황 하에서도 호밍 동작을 수행할 수 있는 이동로봇 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 주어진 상황에 적절히 대응하기 위한 상태 제어부와 호밍 동작을 위한 경로 생성 및 추종하는 알고리즘으로 구성된 하이브리드 형태의 제어 알고리즘으로 구성되었고, 제안된 제어 알고리즘을 PC를 기반으로 한 이동로봇 호밍 제어기로 구현하였다. 모의실험 및 구현된 제어기의 장애물 회피 및 호밍 동작 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성 및 실효성을 검증하였다. 앞으로 구현된 제어기의 동작 실험에서 나타난 통신 지연에 따른 이동로봇의 동작 및 명령 지연 문제점 등에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 보다 복잡한 환경에서의 장애물 회피를 위한 다중 센서 시스템을 구축하고, 거기에 적합한 형태로의 알고리즘의 확대, 보완하는 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2001년도 한양대학교 교내연구비 지원으로  
연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] J. Borenstein and Y. Koren, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance of Mobile Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7 No. 3, pp.278-288, June 1991.
- [2] H. S Sim and Y. G. Sung, "A Posture Control for Two Wheeled Mobile Robots," Trans. on Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 2 No. 3, pp.201-206, September 2000.
- [3] M. Aicardi, G. Gasalino, A. Balestrino and A. Bicchi, "Closed loop smooth steering of unicycle-like vehicles," Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control, pp. 2455-2458, 1994.
- [4] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for Autonomous Mobile Robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1315-1317, 1989.
- [5] R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-2, pp. 14-23, 1986.
- [6] Roland C. Arkin, "Motor Schema-Based Mobile Robot Navigation," International Journal of Robotics Research, Vol. 8, No. 4, pp.92-112, August 1989.
- [7] Roland C. Arkin, "Behavior-Based Robot Navigation for Extended Domains," International conference on Robotics and Automation, pp. 936-941, May 1990.
- [8] W. L. Xu and S. K. Tso, "Sensor-Based Fuzzy Reactive Navigation of a Mobile Robot Through Local Target Switching," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 29, pp. 451-459, August 1999.
- [9] R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 9, No. 4, pp. 589-600, July 1998.
- [10] AmigoBot Technical Manual, Version 2.0, September 1990.
- [11] R. C. Arkin and D. MacKenzie, "Temporal coordination of perceptual algorithms for mobile robot navigation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 3, pp. 276-286, June 1994.
- [12] R. C. Arkin and R. R. Murphy, "Autonomous navigation in a manufacturing environment," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 4, pp. 445-454, August 1990.
- [13] N. M. Barnes and G. Sandini, "Active docking based on the rotational component of log-polar optic flow," ACCV2000 - Proc. Asian Conference on Computer Vision, Taiwan, pp. 955-960, Jan 2000.
- [14] N. M. Barnes and G. Sandini, "Direction control for an active docking behaviour based on the rotational component of log-polar optic flow," ECCV2000 - Proc. European Conference on Computer Vision, Dublin, Ireland, Vol. 2, pp. 167-181, June 2000.
- [15] N. M. Barnes and Z. Q. Liu, "Vision guided circumnavigating autonomous robots," International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol. 14, No. 6, pp. 689-714, Sept. 2000.
- [16] G. Garibotto, S. Masciangelo, M. Ilic, and P. Bassino, "Service robotics in logistic automation: Robolift: Vision based autonomous navigation of a conventional fork-lift for pallet handling," 8th International Conference on Advanced Robotics. Proceedings. ICAR'97, pp. 781-6, 1997.
- [17] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 396-404, 1986.
- [18] T. C. Leuth, U. M. Nassal, and U. Rembold, "Reliability and integrated capabilities of locomotion and manipulation for autonomous robot assembly," Robotics and Autonomous Systems, No. 14, pp. 185-198, 1995.
- [19] K. Mandel and N. A. Duffie, "On-line compensation of mobile robot docking errors," IEEE Int. Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 6, pp. 591-598, Dec. 1987.
- [20] R. R. Murphy and R. C. Arkin, "Adaptive tracking for a mobile robot," Proc. 5th In. Symp. on Intelligent Control, pp. 1044-1049, Philadelphia, PA, 1990.
- [21] P. Questa and G. Sandini, "Time to contact computation with a space-variant retina-line c-mos sensor," Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, 1996.
- [22] J. Santos-Victor and G. Sandini, "Visual behaviours for docking," Computer Vision and Image Understanding, Vol. 67, No. 3, pp. 223-28, Sept. 1997.
- [23] M. E. Stieber, C. P. Trudel, and D. G. Hunter, "Robotic systems for the international space station," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3068-3073, April 1997.
- [24] M. Tistarelli and G. Sandini, "On the advantages of polar and log-polar mapping for direct estimation of time-to-impact from optical flow," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 4, pp. 401-410, April 1993.
- [25] D. L. Vaughn and R. C. Arkin, "Workstation recognition using a constrained edge-based hough

- transform for mobile robot navigation," Proceedings SPIE:Sensor Fusion III:3D Perception and Recognition, pp. 503~514, 1990.
- [26] J. Slotine and W. Li, Applied nonlinear control, Prentice Hall, 1991.
- [27] R. W. Brockett, Brockett, R. S. Millman and H. J. Sussmann, "Asymptotic stability and feedback stabilization," Differential Geometric Control Theory, pp. 181~191, 1983.
- [28] G. Campion, B. d'Andrea Novel and G. Bastin, "Controllability and state feedback stabilization of nonholonomic wheeled mechanical systems," Advanced Robotic Control (Canadas DeWit, Ed), pp. 106~124, 1991.
- [29] C. Canudas, de Wit and O. J. Sordalen, "Exponential stabilization of mobile robots with nonholonomic constraints," IEEE Trans. on AC, Vol. 37, No. 11, Nov. 1992.
- [30] D. Tilbury and A. Chelouah, "Steering a three-input nonholonomic system using multi-rate controls," University of California, Berkeley, Nov. 1992.
- [31] C. Samson, "Time-varying feedback stabilization of car-like wheeled mobile robots," International Journal of Robotics Research, Vol. 12, pp. 55~65, 1993
- [32] R. M Murray and S. S. Sastry, "Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 38, No. 5, pp. 700~716, May 1993.
- [33] E. Badreddin and R. Mansour, "Fuzzy-tuned state feedback control of a nonholonomic mobile robot," IFAC World Congress, Sidney, Australia, Vol. 6, pp. 577~580, 1993.
- [34] N. Sarkar, X. Yun and V. Kumar, "Control of Mechanical Systems with Rolling Constraints : Application to Dynamic Control of Mobile Robot," The International Journal of Robotics Research, Vol. 13, No. 1, pp. 55~69, 1994.
- [35] X. Yun, V. Kumar, N. Sarkar, and E. Paljug, "Control of multiple arms with rolling constraints," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2193~2198, 1992.
- [36] T. Balch, "Grid-based Navigation for Mobile Robot," The Robotics Practitioner, Vol 2, No. 1, 1996.
- [37] R. A. Jarvis, "Growing Polyhedral Obstacle for Planning Collision-Free Paths," The Australian Computer Journal, Vol 15, No. 3, pp. 103~111, 1983.
- [38] E. Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, 6th ed, John Wiley & Sons, Inc, pp.1144, 1988

## 저 자 소 개



### 공 성 학(孔 聖 學)

1965년 5월 9일 생. 1990년 한양대 전자공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1992~1997년 LG산전 중앙연구소(선임 연구원) 근무. 1998~현재까지 한양대 전기전자제어계측학과 박사과정

Tel : +82-31-400-4082

Fax : +82-31-408-5083

email : shkong@incrl.hanyang.ac.kr



### 서 일 흥(徐 一 弘)

1955년 4월 16일 생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 졸업(공박). 1982~1985년 대우중공업 기술 연구소 근무. 1987~1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대 전기전자제어계측학과 교수

Tel : +82-31-400-5172

Fax : +82-31-408-5083

email : ihsuh@hanyang.ac.kr