

## 차륜형 이동로봇의 자율 벽면-주행을 위한 하이브리드 제어

임미섭\*, 임준홍\*, 오상록\*

\*: 한양대학교 전자공학과, +: 한국과학기술연구원 지능제어연구센터,

### Autonomous Wall-Following of Wheeled Mobile Robots using Hybrid Control Approach

Mee-Seub Lim\*, Joonhong Lim\*, Sang-Rok Oh\*

\*: Dept. of Electronic Engineering, Hanyang Univ.,

+: Intelligent System Control Research Center, KIST

**Abstract-**In this paper, we propose a new approach to autonomous wall-following of wheeled mobile robots using hybrid control system. The hybrid control approach is introduced to the motion control of nonholonomic mobile robots in the indoor navigation problems. In hybrid control architecture, the discrete states are defined by the user-defined constraints, and the reference motion commands are specified in the abstracted motions. The hybrid control system applied to motion planning and autonomous navigation with obstacle avoidance in indoor navigation problem. Simulation results show that it is an effective method for the autonomous navigation in indoor environments.

### 1. 서론

이동로봇의 동작제어 방법들은 계획-기반(plan-based)의 제어 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[1]. 그러나 부분적 또는 완전히 알고 있는 주어진 환경은 실제적으로 대부분의 응용에서는 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 계획-기반 알고리즘에서 계획된 궤적과 동작들은 부정확하게 되고 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. 이 방법들은 이동로봇의 실내 주행을 위하여 실시간 제어 성능을 나타낼 수 있으며 계산 시간면에서 효과적이다. 센서-기반 주행 방법들은 위치 필드(potential field)를 이용한 방법[2-3]과 벡터 필드(vector field)를 이용한 방법으로 구분 할 수 있다. 위치 필드 알고리즘은 계산적인 면에서선 효과적이나 이동로봇이 국부 최소점(local minimum)에 빠지게 되는 문제가 있다. 벡터 필드 알고리즘은 장애물을 사이에서 이동로봇의 연속적이며 빠른 동작 특성을 보일 수 있다.

본 논문에서는 논홀로노믹 동작특성을 갖는 이동로봇의 실내 환경에서의 벽면 주행을 위하여 하이브리드 제어방법[4-6]을 도입하였다. 하이브리드 제어방법을 이용하여 이동로봇의 자율적인(alternative) 벽면 주행을 위한 새로운 동작제어 방법을 제안한다. 이를 위하여 작업-수준(task-level)에서의 이동로봇의 벽면 주행 특성을 이산사건 시스템 모델로 구하였으며 자율적 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어 시스템을 구성하였다. 제안한 이동로봇의 하이브리드 제어 시스템은 3계층의 계층적 구조로, 상위의 이산상태 시스템과 하위의 연속상태 시스템 그리고 인터페이스 계층에서는 상호 작용과 자율적 동작제어를 위한 인터페이스 계층으로 구성되어 있다. 이산사건 모델에서는 벽면과 로봇의 위치에 따른 사용자 정의(user-defined) 구속조건(constraints)을 이용하여 이산상태를 정의하였으며, 이를 디지털 오토마トン(automaton)[4]을 이용하여 이산사건 시스템을 설계하였다. 인터페이스 계층에서는 상위의 이산사건 제어기와 하위의 연속상태 제어기간의 서로 다른 상태공간을 연결하고 연속 상태변수로부터 이산상태를 생성하게 된다. 또한 자율적 벽면 주행을 위하여 센서 정보와 이산사건 제어기의 출력들로부터 연속 상태

제어기의 제어입력을 결정한다. 연속 상태 시스템은 하위 수준의 논홀로노믹 구속조건을 갖는 이동로봇 시스템으로 상위의 이산상태 제어기에 의해 장애물 회피와 벽면 주행을 하게 된다. 실내 환경에서의 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어방법은 주어진 이동속도를 유지한 상태에서 장애물을 회피하며 벽면을 자율적으로 주행하도록 하는 알고리즘으로, 환경에 대한 정보 없이 센서 정보만으로 실시간 벽면 주행에 효과적이며 고속의 주행성능을 갖고 있다 할 수 있다.

### 2. 벽면 주행을 위한 이산상태 모델

#### 2.1 이동로봇 시스템

본 논문에서는 그림 1과 같은 두 바퀴 구동형 이동로봇 시스템을 대상으로 한다. 이동 로봇의 동작 방정식은

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

으로 주어지며, 여기서  $x(t)$ 는 연속상태 벡터,  $u(t)$ 는 제어입력 벡터이다. 상태 벡터는

$$x = [x \ y \ \phi \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\phi}]^T \quad (2)$$

로서 정의할 수 있으며  $x, y, \phi$ 는 각각 기준좌표계에서의 로봇 중심점의 위치와 자세를 나타낸다.

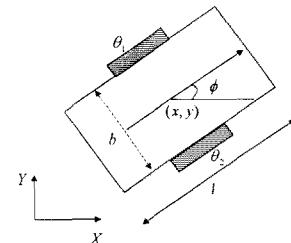


그림 1 두 바퀴 구동형 이동로봇의 구성.

Fig.1: Configuration of two wheel driven mobile robot.

그림 1의 로봇 시스템은 논홀로노믹 구속조건을 만족해야 하며 독립적으로 모든 상태 변수들을 제어 할 수가 없다. 따라서 작업 공간에서의 임의의 모든 경로를 추종할 수가 없다. 차륜형 이동 로봇의  $\theta_1, \theta_2$ 는 관절변수로 각 바퀴의 회전각이며 바퀴의 속도  $\omega_1, \omega_2$ 는 각 속도  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 에 바퀴의 반경  $r$ 을 곱한 것이다. 차륜형 이동로봇의 제어변수는 각 바퀴의 가속도  $\ddot{\omega}_1, \ddot{\omega}_2$ 이 된다. 한편 기구적 상태 방정식은

$$\dot{x} = \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} \cos \phi \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} \sin \phi \quad (4)$$

$$\dot{\phi} = (\omega_1 - \omega_2) \quad (5)$$

으로 주어지고  $b$ 는 바퀴축의 길이이다.

## 2.2 이산상태 모델

이동로봇이 주행을 하면서 환경과 상호 작용을 하게 된다. 즉, 식(1)의 시스템은 환경에 의해 동작의 제약을 받게 된다. 이동로봇의 환경에 의한 구속 조건

$$C(x(t)) > 0 \quad (6)$$

에 의해 동작의 제한을 받게되고, 일반적으로 실내 주행에서 구속조건의 각 요소들은 로봇의 위치에서 장애물까지의 거리 함수와 같은 양(non-negative)의 값이다. 실내 주행을 위하여 그림 2와 같은 벽면 주행 작업을 고려해 볼 수 있다.

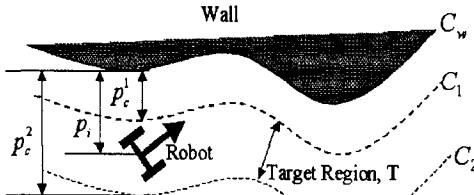


그림 2 사용자-정의 구속조건 경계 내에서의 벽면 주행.  
Fig. 2: Wallfollowing within the boundaries by the user-defined constraints.

그림 2의 작업공간에서 사용자-정의 구속조건  $C_1, C_2$ 에 의한 경계 내에서 로봇이 이동속도  $v_m > 0$ 을 유지하며 주행함에 벽면 주행의 목적이라 할 수 있다. 즉, 로봇과 벽면과의 거리 함수인  $p_i(t)$ 가 각각의 구속조건인  $C_1$ 에 의한 거리 함수  $p_c^1(t)$ 와  $C_2$ 에 의한 거리 함수  $p_c^2(t)$ 가 결정된다. 따라서 이동로봇이 벽면과 충돌 없이 안전하게 주행하기 위한 주행 영역은  $p_i$ 는  $p_c^1 \leq p_i \leq p_c^2$ 로 결정된다. 결국, 이동로봇의 벽면 주행작업은 다음의 작업목적을 동시에 만족해야 한다.

- i) 작업공간에서의 사용자-정의 구속조건  $C_1, C_2$ 에 의한 경계 내에서 벽면을 주행해야 하며,
- ii) 전방향 이동속도  $v_m > 0$ 을 유지해야 한다.

예를 들어,  $C_1 : p_c^1(t) = a, C_2 : p_c^2(t) = b, a, b \in R_+$ 로 했을 때 로봇의 주행 동작은

$$p_i(t) = [0, a], \quad \text{if } p_i(t) < C_1, \quad (7)$$

$$p_i(t) = [a, b], \quad \text{if } C_1 \leq p_i(t) \leq C_2, \quad (8)$$

$$p_i(t) = [b, \infty], \quad \text{if } p_i(t) > C_2, \quad (9)$$

들로 구분할 수 있다. 식(7-9)의 동작 특성을 이산상태 변수  $q \in Q = \{1, 2, \dots, M\}$ 는 여기서  $Q$ 는 이산상태 공간으로  $q$ 로 정의하면

- 1) 이산상태  $q=1$ 은 Receding Motion으로  $p_i < p_c^1$  일 때  $C_1$ 에 의해 벽으로부터 멀어지도록 하는 이산 동작 제어모드(control mode)이다.
- 2) 이산 상태  $q=2$ 는 Straightening Motion  $p_c^1 \leq p_i \leq p_c^2$  주행영역 내에서 주행 할 때의 이산 동작 제어모드이다.
- 3) 이산상태  $q=3$ 은 Approach Motion으로  $p_i < p_c^2$  일 때  $C_2$ 에 의해 이동로봇이 벽으로 가까워지게 하는 이산 동작 제어모드이다.

위에서 정의한 이산상태 변수들은 자율적 벽면 주행을 위한 이동로봇의 기본 동작(basic behavior)을 나타낸 것으로 각각의 이산상태에서의 로봇의 자율적 벽면주행을 위한 기준 동작(reference motion)이 된다. 즉, 벽면과의 충돌 없이 주어진 구속조건을 만족하면서 주행하기 위한 원하는 동작(desired motion)들이다. 이를 거리함수  $p_i(\cdot)$ 의 시간 미분함수  $\dot{p}_i/dt$ 를 다중치(multi-valued) 함수로 정의하면

$$\dot{p}_i^d(t) = \begin{cases} \Delta, & p_i < p_c^1 \\ 0, & p_c^1 \leq p_i \leq p_c^2 \\ -\Delta, & p_i > p_c^2 \end{cases} \quad (10)$$

로 그림3과 같이 주어진다. 여기서  $\Delta \in R$ 이다.

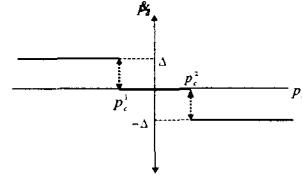


그림 3 로봇과 벽면과의 거리에 대한 시간미분함수.

Fig. 3: Multi-valued function with respect to distance function.

이를 식(10)과 그림 3은 이동로봇의 기준동작으로

$$\dot{p}_i(t) = g(p_i(t)) \quad (11)$$

같은 함수로 정의한다. 식(11)은 이동로봇의 각각의 이산상태의 이산동특성(discrete dynamics)이다. 이를 디지털 오토마トン을 이용하여 구성한 이산사건 시스템은 그림 4와 같다.

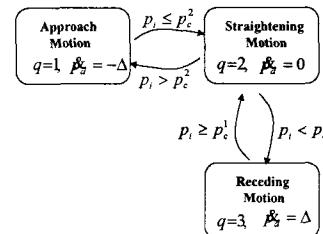


그림 4 디지털 오토마トン에 의한 이산 사전 시스템.

Fig. 4: Discrete event system using by digital automaton.

## 2.3 자율 벽면주행 알고리즘

사용자-정의 구속조건들에 의한 경계 내에서 주행 할 때 이동로봇의 동작 방정식들을

$$\begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/b & -1/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

로 주어지며, 여기서  $v_m$ 과  $\omega_m$ 은 로봇 중심점  $(x, y)$ 의 속도 각속도이다. 식(12)로 부터 로봇의 위치와 자세는 각 바퀴의 속도  $\omega_1, \omega_2$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 두 바퀴의 속도 비율  $k(t) = \omega_2/\omega_1$ 을 식(13)과 같이 정의한다.

$$k(t) = \exp(\dot{p}_i(t) - \dot{p}_c^d(t)) \quad (13)$$

여기서  $\dot{p}_c^d$ 는 그림3의 기준동작 명령이며  $\dot{p}_i$ 는 로봇과 벽면과의 순간거리 변위량이다. 벽면 주행 시에 구속 조건들에 의한 경계 내에서 안전한 벽면주행을 위한 기준동작들인 Approach, Receding, 그리고 Straightening의 이산상태 제어모드들은 그림 4의 디지털 오토마톤들의 이산적 상태천이를 통하여 결정된다. 식(12-13)을 이용한 로봇의 각 바퀴의 원하는 제어속도인  $\omega_1^d, \omega_2^d$ 은

$$\omega_1^d(t) = \frac{2k(t)}{k(t)+1} v_m^d(t) \quad (14)$$

$$\omega_2^d(t) = \frac{2}{k(t)+1} v_m^d(t) \quad (15)$$

여기서  $v_m^d, \omega_1^d, \omega_2^d$ 는 각각 로봇의 중심점, 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 원하는 속도이다.

## 3. 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어

이동로봇의 동작제어기 설계는 각각의 이산상태에서의 제어입력을 구하는 것이라 할 수 있다. 하이브리드 시스템 모델은 이산상태와 연속상태가 결합된 복합시스템의 동작 특성의 구분(specification)과 특성을 표현할 수 있는 효과적인 모델 방법이다[4-5]. 본 논문에서는 논olu로노믹 구속조건을 갖는 이동

봇이 벽면 주행 시에 벽면에 의한 제한 동작과, 특히 사용자-정의 구속조건에 의한 경계 내에서 주행을 해야 하는 제한동작 (constrained motion) 로봇시스템을 모델링하고 전체적인 제어기구를 구성하기 위하여 하이브리드 모델과 제어시스템을 도입한다. 하이브리드 시스템은 이산상태 변수에 의한 이산사건시스템에서의 논리적 판단과 같은 상위 수준(high level)의 동작제어, 그리고 상위수준의 기준동작 명령에 의해 하위 수준(low level)의 로봇 제어, 그리고 상/하위 서로 다른 상태 공간의 연결과 로봇의 작업 환경과의 상호작용을 위한 인터페이스 제어로 구성되어 있다.

그림 2에 주어진 로봇 시스템의 동작을 하이브리드 시스템 모델로 정의하면

$$\dot{x}(t) = f_q(x(t), q(t)), \quad (16)$$

$$u(t), q(t) = g(p_i(t)) \quad (17)$$

로 표현할 수 있다. 식(16)과 (17)에서  $x$ 는 연속 상태벡터,  $u$ 는 제어입력 벡터이다.

실내환경에서의 로봇의 자율적 벽면주행을 위하여 구성한 하이브리드 제어시스템은 다음과 같은 성능을 얻을 수 있는 구조이다. 첫째, 상위의 이산사건시스템의 제어모드간의 이산 상태천이는 이동로봇의 위치와 구속조건  $C_1, C_2$ 에 의해 결정된다. 따라서, 벽면 주행은 작업별로 외부로부터 설정된 동작 순서(motion sequence) 없이 자율적으로 이루어진다. 둘째, 제안한 하이브리드 제어기는 상위의 이산사건 시스템에서 로봇의 기준동작의 생성기(generator)역할을 하면서 로봇의 정지 없이 주행이 가능토록 함으로 고속 주행작업에 광장될 수 있다. 셋째, 제안한 알고리즘은 작업 환경에 대한 모델 정보를 전혀 필요로 하지 않기 때문에 자율적으로 실시간 장애물 회피 성능을 갖고 있다. 그림 5는 이동로봇의 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어시스템의 구조를 보여주고 있다.

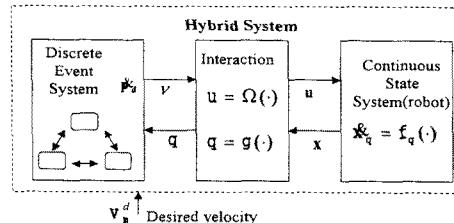


그림 5 벽면주행을 위한 하이브리드 제어기 구조.  
Fig. 5: Hybrid control system for a wall following task.

하이브리드 시스템은 3계층의 계층적 구조로 되어 있으며 상위의 이산사건 시스템과 하위의 연속상태 시스템, 그리고 인터페이스 시스템으로 구성되어 있다. 상위의 이산사건 시스템과 하위의 연속상태 시스템, 그리고 인터페이스시스템으로 구성되어 있다. 이산상태제어기는 디지털 오토마톤을 이용하여 구성되었으며 이동로봇의 기준동작을 생성한다. 연속상태제어기는 각 바퀴에 대한 속도제어이며 인터페이스 계층은 상/하위의 서로 다른 상태공간을 연결하고 연속상태변수로부터 이산사건을 발생하는 함수인  $g(\cdot)$ 와 이산사건시스템의 기준 동작 출력을 로봇의 각 바퀴에 대한 제어입력을 결정하는  $\Omega(\cdot)$ 함수로 구성되어 있다. 한다.

이동로봇이 환경으로부터 동작의 제한을 받을 때 식(17)에 의해 이산상태를 결정하고, 이산사건 시스템의 기준동작은 식(13-15)으로부터 원하는 로봇의 각 바퀴 속도 기준

$$u(t) = \Omega(x, v) \quad (18)$$

로 주어지며 여기서  $v$ 는 이산사건 제어기의 출력이다. 식(14-15)은  $\Omega(\cdot)$ 를 나타낸다. 하위의 연속상태 시스템은 각 바퀴 속도에 대한 PD-제어기를 포함하고 있다.

### 3.1 자율벽면 주행

제안한 하이브리드 제어방법을 평가하기 위하여 논술로노믹 이동로봇에 대하여 시내에서의 자율적 벽면 주행 작업에 적용하여 주행 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 초음파센서와 같은 거리 측정 센서를 이용하여 로봇과 벽면과의 거리정보는 얻을 수 있다고 가정하였으며

전체적인 실내 환경에 대한 정보는 주어지지 않았다. 또한 바퀴의 미끄러짐은 없다고 가정하였다.

시뮬레이션에서  $|d| = 0.4$ , 초기위치  $(0.0, 1.95) m$ , 초기자세와 속도는  $\phi_0 = 0.0 (rad)$ ,  $v_m(0) = 0$ 로 하였으며 원하는 이동속도  $v_m^d = 2.0 m/sec$ 로 하였다. 벽면 주행 시에 측정된 벽과의 거리에 대한 사용자-정의 구속조건은

$$C_1(t) < 0.2, \quad C_2(t) > 0.3(m), \quad \forall t > 0 \quad (19)$$

로 정의하였다. 그림 6은  $\exists$  자형의 실내 환경에서의 벽면 주행 결과를 보여 주는 것으로 정의된 목적 주행 영역 내에서의 실시간 벽면 주행 성능을 보여주고 있다. 그림 6의 결과는 사용자-구속조건과 이동속도 구속조건을 만족하면서 자율적인 벽면주행의 적용 가능성을 보였다 할 수 있다.

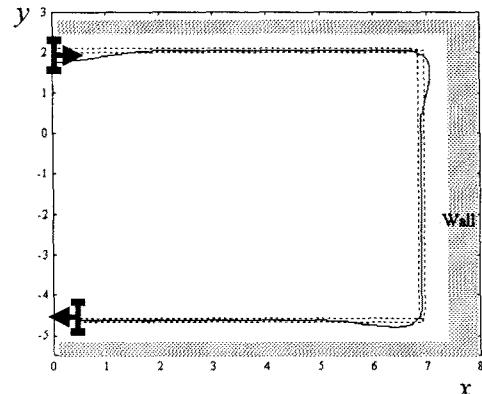


그림 6 자율벽면 주행 결과.  
Fig. 6: Result of autonomous wall following.

### 4. 결론

본 논문에서는 이동로봇의 실내에서의 자율적 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어방법을 제안하였다. 이를 위하여 실시간 벽면 주행을 위한 사용자-정의 구속조건을 이용하여 이산상태를 정의하였으며 이산사건 모델을 구하였다. 또한, 이를 오토마톤을 이용하여 이산상태 제어기를 설계하였다. 자율적 벽면 주행을 위한 이산사건 시스템은 이동로봇의 상위 수준에서의 기준동작 명령을 생성하게 하였다. 제안한 하이브리드 제어 시스템은 3계층의 계층적 구조로 상위에는 기준동작 명령의 생성을 위한 이산사건 시스템, 하위에는 이동 로봇의 제어를 위한 연속상태 시스템, 그리고 가운데에는 서로 다른 상태공간의 연결과 함께 이동로봇의 연속 상태 변수와 벽면과의 상호작용에 따른 이산상태의 상태 천이를 결정하고 상위의 기준동작 명령에 대한 로봇의 각 바퀴 제어입력을 결정하게 되는 인터페이스로 구성하였다. 제안한 자율 벽면 주행 알고리즘과 하이브리드 제어기의 성능을 보이기 위하여  $\exists$  자형의 실내 환경에서의 자율적 벽면 주행 시뮬레이션을 통하여 성능을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] John J. Leonard, Hough F. Durrant-Whyte, and Ingemar J. Cox, "Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot," Int'l. J. of Robotics Research, Vol. 11, No. 4, pp. 286- 298, August 1992.
- [2] Oussama Khatib, "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int'l. J. of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
- [3] Maher Khatib and Raja Chatila, "An Extended Potential Field Approach for Mobile Robot Sensor-based Motions," Int'l. Conf. on Intelligent Autonomous Systems", pp. 490-496, 1995.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M.-S. Lim, J. Lim, and S.-R. Oh, "A Hybrid System Approach to Motion Control of Wheeled Mobile Robots", IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 210-215, 1998.