

하이브리드 시스템의 기준동작 구성과 생성에 의한 차륜형 이동로봇의 자율 벽면-주행 알고리즘

Algorithm for Autonomous Wall-Following of Wheeled Mobile Robots Using Reference Motion Synthesis and Generation of Hybrid System

임 미 섭, 임 준 홍
(Mee-Seub Lim and Joonhong Lim)

Abstract : In this paper, we propose a new approach to the autonomous wall-following of wheeled mobile robots using hybrid system reference motion synthesis and generation. The hybrid system approach is introduced to the motion control of nonholonomic mobile robots for the indoor navigation problems. In the discrete event system, 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 for the nonholonomic mobile robots can combine the motion planning and autonomous navigation with obstacle avoidance for the indoor navigation problem. Simulation results show that hybrid system approach is an effective method for the autonomous navigation in indoor environments.

Keywords : mobile robot, reference motion specification, autonomous wall-following, hybrid system

1. 서론

이동로봇의 응용 분야는 공장, 사무실, 가정 등으로 확대 되고 또한, 작업들은 복잡, 다양해지고 있으며 지능적인 제어 성능을 요구하고 있다. 작업 공간의 확대와 다기능 로봇 시스템 개발의 필요성은 차륜형 이동로봇(wheeled mobile robot) 시스템에 대한 많은 관심과 연구를 가져왔다. 이동로봇을 이용한 작업들은 대부분 사무실, 공장과 같은 실내환경에 적용되었으며, 작업환경은 동적(dynamic)이며 불규칙하다. 또한 이동로봇의 동작제어의 중요한 요구사항 중의 하나는 목적지점까지의 장애물과의 충돌을 회피하는 안정적인 주행이라 할 수 있다.

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[1]-[3]. 그러나 부분적 또는 완전히 알고있는 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 충돌회피 경로를 구하기 위하여 많은 계산시간과 복잡한 과정이 필요하게 된다. 계획-기반의 방법들과는 달리 센서-기반의 충돌회피 알고리즘들은 주어진 환경에서 장

애물 에 대한 충돌을 회피하는 동작을 결정하기 위하여 센서 정보들을 이용한다[4]. 이러한 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[5][6]과 벡터 필드(vector field)를 이용한 방법[7]으로 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.

일반적으로 이동로봇은 논홀로노믹 시스템으로 자동차와 같은 동작특성을 갖고 있다. 인간이 벽면을 따라서 자동차를 운전할 경우를 생각해 보면, 인간은 벽면과의 일정한 거리를 유지하기 보다는 적절한 주행 영역을 설정해두고 주행 영역 내에서 자동차를 운전하게 된다. 즉, 장애물과 벽면으로 인한 구속조건을 만족하기 위하여 충돌을 회피하기 위한 한계점을 설정하고 한계점을 기준으로 주행 영역이 설정된다. 이와 같이 인간이 벽면을 따라 주행할 때의 중요한 동작 특성은 벽면과의 일정한 거리를 유지하기 위한 주행 동작 보다는 장애물과의 충돌을 회피하기 위한 주행 영역을 설정하고, 그 영역 내에서의 주행동작이 이루어진다는 것이다.

본 논문에서는 이러한 인간의 주행 동작 특성을 이동로봇의 벽면 주행에 적용하여 자율적 주행 성능을 얻기 위한 자율주행 알고리즘을 제안한다. 논홀로노믹(nonholonomic) 동작특성을 갖는 이동로봇의 실내 환경에서의 자율적 벽면 주행(autonomous wall following)을 위한 하이브리드 제어방법[8][9]은 이동로봇의 자율적인 벽면 주행을 위한 자율 동작제어 방법으로서,

접수일자 : 1999. 10. 28., 수정완료 : 2000. 4. 6.

임미섭 · 한양대학교 전자공학과

임준홍 · 한양대학교 전자컴퓨터공학부

상위 수준(high level)의 작업-수준(task-level)에서의 이동로봇의 벽면 주행특성을 이산상태 시스템 모델로 구하였으며 자율적 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어 시스템을 구성하였다. 제안된 이동로봇의 자율 벽면 주행 알고리즘은 3계층의 계층적 구조로, 상위의 이산상태 시스템과 하위의 연속 상태 시스템 그리고 이들간의 상호 작용과 자율적 동작제어를 위한 인터페이스 계층으로 구성되어 있다. 이산상태 모델에서는 벽면과 로봇의 위치에 따른 사용자 정의(user defined) 구속조건(constraints)을 이용하여 이산상태를 정의하였으며, 이를 디지털 오토마톤(automaton)을 이용하여 이산상태 시스템을 설계하였다. 인터페이스 계층에서는 상위의 이산상태 제어기와 하위의 연속상태 제어기간의 서로 다른 상태 공간을 연결하고, 연속 상태변수로부터 이산상태를 생성하게 된다. 또한 자율적 벽면 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 벽면 주행을 하게 된다.

본 논문에서 제안한 논홀로노믹 이동로봇의 실내 환경에서의 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어방법은 기존의 주행 알고리즘[1]-[7]에서 로봇과 장애물과의 거리를 일정하게 유지하는 방법과 달리 사용자 정의 구속조건을 만족하면서 충돌을 방지하기 위한 안전한 주행 영역(region) 내에서 자율적으로 벽면을 따라 주행하도록 하는 알고리즘이다. 또한, 기존의 알고리즘에서는 장애물 회피를 위하여 이동속도를 감속하거나 정지한 후에 주행을 하는 방법이 대부분 적용되었으나, 본 논문에서 제안하는 주행 알고리즘은 주어진 이동속도를 유지한 상태에서 벽면 주행에서의 성능을 보여줄 수 있으며 자율적인 주행이 가능하다. 즉, 환경에 대한 사전 정보 없이 센서 정보만으로 실시간 벽면 주행에 효과적이며 고속의 주행성능을 갖고 있다고 할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 실내환경에서의 자율적이며 고속의 벽면 주행 성능을 보였다.

II. 자율 벽면 주行的 기준동작 구성

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

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

로 주어지며 여기서 $\mathbf{x}(t)$ 는 연속상태 벡터이며 $\mathbf{u}(t)$ 는 제어 입력 벡터이다. 상태 벡터는

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

로 정의한다. 여기서, x, y, ϕ 는 각각 기준 좌표계에서의 로봇의 중심점의 위치와 자세각을 나타내며 $\dot{}$ 는 벡터의 transpose를 나타낸다. 그림 1의 로봇 시스템은 논홀로노믹 구속조건을 만족해야 하며 독립적

로 모든 상태 변수들을 제어 할 수가 없다[3]. 따라서 작업 공간(task space)에서의 임의의 모든 경로를 추종할 수가 없다. 차륜형 이동 로봇의 θ_1, θ_2 는 관절변수로 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 회전각이다. 그리고 바퀴의 선속도 v_1 과 v_2 는 각 속도 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 에 바퀴의 반경 r 을 곱한 값으로 정의되며, 단위는 m/sec 이다. 차륜형 이동로봇의 제어변수는 각 바퀴의 가속도 \dot{v}_1 와 \dot{v}_2 이다. 차륜형 이동로봇의 기구적 상태 방정식은

$$\dot{x} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \cos(\phi), \quad (3)$$

$$\dot{y} = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \sin(\phi), \quad (4)$$

$$\dot{\phi} = \frac{(v_1 - v_2)}{b} \quad (5)$$

로 주어지고, 여기서 b 는 바퀴축의 길이이며 l 은 로봇의 세로 방향의 길이이다.

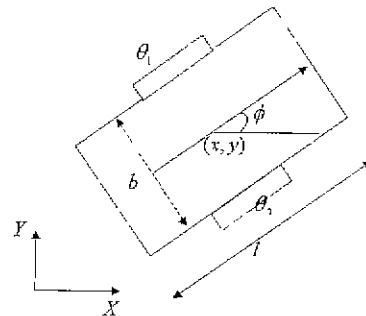


그림 1. 두 바퀴 구동형 이동로봇의 구성.

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

1. 벽면 주행을 위한 탐색 윈도우

실내 환경에서 이동로봇이 주행을 할 때 환경과 상호 작용을 하게 된다. 즉, (1)의 시스템은 장애물 또는 벽면과 같은 환경에 따른 구속조건에 의해 제한된다. 일반적으로 실내 주행에서 구속조건은 각 요소들은 로봇의 위치에서 장애물까지의 거리 함수와 같은 양(non-negative)의 값이다. 예를 들어 벽면 구속조건(wall constraint)은 로봇과 벽면간의 거리와 로봇의 속도를 포함한다. 구속조건에 의한 이동로봇의 벽면과의 충돌을 회피 할 수 있는 로봇의 속도와 벽면과의 관계에 있어서 벽면과의 충돌을 회피하기 위해서는 거리에 따라서 로봇의 속도를 줄여야 하며 이는 로봇의 주행속도를 떨어뜨리고 전체적인 주행 성능을 약화시키게 된다. 벽면에 의한 구속조건에 의한 로봇으로부터의 벽면간의 거리와 속도와의 관계는 이동로봇이 벽면을 향하여 접근할 때, 일반적인 벽면 주行的 목적은 벽면과의 충돌을 회피하며 주어진 속도로의 주행이다. 이를 위하여 본 연구에서는 인간의 주행 특성을 이용하여 이동로봇의 실내에서의 벽면 주행을 위한 방법으로 로봇의 중심점을

중심으로 하는 원으로 탐색 윈도우(search window) B 를 정의하고, 또한 사용자 정의 구속조건을 정의하여 자율적인 벽면 주행 모델을 그림 2와 같이 제안한다.

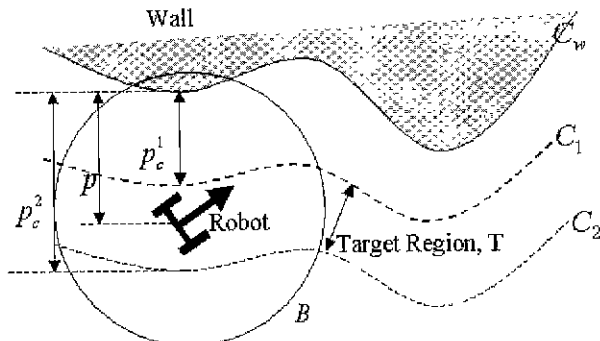


그림 2. 탐색 윈도우와 구속조건 p_c^1, p_c^2 에 의한 벽면 주행 모델.

Fig. 2. Model of wall-following with search windows and the user-defined constraints p_c^1 and p_c^2 .

그림 2의 벽면주행 모델에서 이동로봇의 중심점에서의 탐색 윈도우 $B(x(t))$ 는 벽면과의 거리를 결정하기 위한 탐색 윈도우로서 로봇 중심점에서의 벽면과의 거리 함수 $p(x(t))$ 는

$$p(x(t)) = \min_i \{p_i(x(t))\} \tag{6}$$

로 결정되며, 여기서 $p_i(x(t))$ 는 탐색 윈도우에 의해 결정된 장애물간의 거리들이다. (6)에 의해 로봇의 중심점으로부터 수직거리로 가장 가까운 벽면 지점까지의 거리를 $p(x(t))$ 로 결정된다. 로봇이 벽면과의 충돌없이 주행을 하기 위한 주행 영역을 설정하기 위하여 사용자 정의(user-defined) 구속조건 p_c^1 과 p_c^2 를

$$p_c^1 < p(x(t)) < p_c^2 \tag{7}$$

과 같이 정의한다. 여기서, $p_c^i, i=1,2$ 는 탐색 윈도우와 (6)에 의해 결정된 벽면 지점을 기준으로 정의된 거리 함수로서 사용자에게 의해 정의될 수 있으며 장애물과 벽면의 환경적 특성과 작업 종류에 의해 시변 함수 또는 상수로 정의될 수 있다. 본 논문에서는 상수로 정의하였다.

이동로봇의 주행 동작은 사용자 정의 구속조건 p_c^1 과 p_c^2 에 의한 경계 내에서 주행하도록 이동로봇의 동작이 제한을 받게 된다. 그리고 또 하나의 구속조건은 이동로봇 무게중심점의 전방향 이동속도 v_m 을 원하는 이동속도 $v_m^d (>0, \text{전방향})$ 를 추종하도록 하는 것이다. 이동로봇이 벽면과 충돌없이 안전하게 주행하기 위한 주행 영역 $T(x(t))$ 는

$$T(x(t)) = \{(x, y) | p_c^1 \leq p(x(t)) \leq p_c^2\}, \tag{8}$$

로 결정되며 안전한 벽면 주행을 위해서는 벽면으로부터

터 이동로봇 중심점의 위치가 $(x, y) \in T$ 가 되도록 해야 하며, 로봇의 이동속도 $v_m = v_m^d$ 을 만족해야 한다. 결국, 이동로봇의 벽면 주행 작업은 아래의 두 가지 작업 목적을 동시에 만족해야 한다.

- 1) 작업 공간에서 구속조건 p_c^1 과 p_c^2 에 의한 경계 내에서 이동로봇이 주행하도록 해야 하며 즉, 로봇의 위치는 (7)을 만족해야 하며,
- 2) 전방향 이동속도 v_m 이 원하는 속도 v_m^d 을 추종하도록 해야 한다.

III. 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어

하이브리드 시스템 모델은 이산상태와 연속상태가 복합적인 시스템의 동작 특성의 구분(specification)과 결합된 특성을 표현할 수 있는 효과적인 모델 방법이다 [9]-[13]. 논홀로노믹 구속조건을 갖는 이동로봇이 벽면 주행시에 벽면에 의해 동작이 제한을 받게 되고, 특히 사용자 정의 구속조건에 의한 경계 내에서 주행을 해야 하는 제한동작(constrained motion) 로봇시스템을 모델링하고 전체적인 제어기를 구성하기 위하여 하이브리드 모델과 제어시스템을 도입한다. 실내에서의 자율적인 벽면 주행을 위해 제안한 하이브리드 제어기는 그림 3과 같이 3계층의 계층적 구조이다.

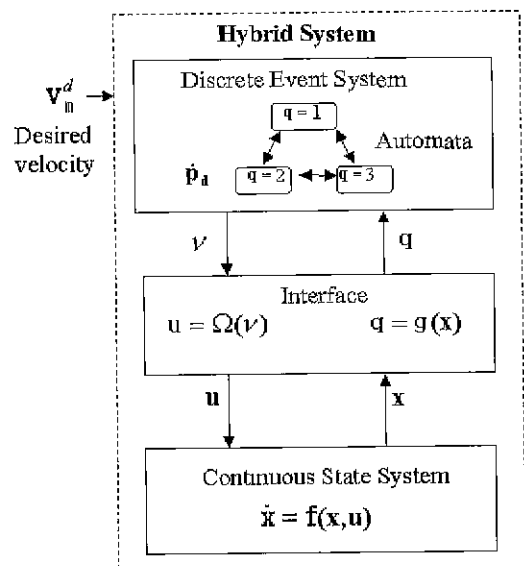


그림 3. 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어시스템의 구조.
Fig. 3. Hybrid control system structure for the wall following tasks.

상위에는 로봇의 기준 동작을 제어하기 위한 상위 수준(high level)의 이산상태 제어기와 하위에는 로봇의 각 바퀴의 속도를 제어하기 위한 하위 수준(low level)의 연속 상태 속도제어기, 그리고 상위와 하위의 상태 공간을 연결하고 환경과의 상호작용과 자율적 주행동작을 위한 인터페이스 제어기로 구성되어 있다.

일반적으로 하이브리드 시스템은 이산상태 변수에 의한 이산상태시스템에서의 논리적 판단과 의사 결정

(decision making)과 같은 상위 수준(high level)의 동작제어와 상위수준의 기준동작 명령에 의해 하위 수준(low level)의 로봇의 각 바퀴의 속도 제어, 그리고 상/하위 서로 다른 상태 공간의 연결과 로봇의 작업 환경과의 상호작용을 위한 인터페이스 제어로 구성되어 있다. 상위 수준의 이산상태 제어기는 디지털 오토마톤을 이용하여 구현되어 있으며 이동로봇의 기준 동작을 생성한다. 상/하위의 중간의 인터페이스 계층은 상위의 이산상태 공간의 이산상태시스템과 하위의 연속상태 공간의 연속상태 시스템을 연결한다. 즉, 연속 상태 변수에 의해 이산상태를 결정하고 이산상태 변수에 의해 로봇의 연속 상태 목표입력을 출력한다. 인터페이스는 두 가지 함수로 구성되어있다. (9)의 작업 환경에 대한 mapping $g(\cdot), g: R^6 \rightarrow Q$ 는 하위의 연속 상태 변수 $\mathbf{x}(t)$ 로부터 이산상태 q 를 발생하고 이를 상위의 이산상태 시스템의 입력으로 전달한다. 여기서 Q 는 이산상태 공간이며, 이산상태 변수는 $q \in Q = \{1, 2, \dots, N\}$ 로 정의하며, N 은 이산상태 개수로서 (9)로 표현된다.

$$q = g(\mathbf{x}(t)) \tag{9}$$

제어입력 mapping $\Omega(\cdot), \Omega: R^6 \times R \rightarrow R$ 는 이산상태시스템의 출력을 로봇의 각 바퀴에 대한 목표입력으로 변환한다. 이동로봇이 작업환경으로부터 동작의 제한을 받을 때 (9)는 이산상태를 결정하게 되고, 이산상태 시스템에서 생성된 기준 동작 명령들은 원하는 로봇의 각 바퀴 속도입력으로 변환되며 제어입력 \mathbf{u} 는

$$\mathbf{u}(t) = \Omega(\mathbf{x}(t), v). \tag{10}$$

로 주어진다. 여기서, v 는 이산상태 제어기의 출력으로 로봇의 기준동작 명령이다. 하위의 연속상태 시스템은 각 바퀴 속도에 대한 PD제어기를 포함하고 있다.

실내 환경에서의 이동로봇의 자율적 벽면 주행을 위하여 제안된 하이브리드 제어시스템은 다음의 제어 특성들을 동시에 얻을 수 있는 구조이다. 첫째, 상위의 이산상태 시스템의 기준 동작들의 상태 천이는 이동로봇의 위치와 환경에 의한 구속조건에 의해 결정된다. 따라서, 로봇의 벽면 주행은 작업별로 외부로부터 설정된 동작 순서(motion sequence)없이 자율적으로 이루어진다. 이는 기존의 동작 계획과 경로 생성 과정없이 자율적인 벽면 주행성능을 보장할 수 있다. 둘째, 제한한 벽면 주행 방법은 이산상태 시스템에서 로봇의 기준 동작의 생성기(generator) 역할을 하면서 로봇의 정지 없이 주행이 가능하므로 고속 주행작업에 확장될 수 있다. 셋째, 제한한 알고리즘은 작업 환경에 대한 모델 정보를 전혀 필요로 하지 않기 때문에 자율적으로 실시간 장애물 회피 성능을 갖게 된다.

IV. 이산상태 시스템

1. 벽면 주행을 위한 기준 동작 생성

이동로봇이 벽면과의 충돌없이 위에서 설명한 두 가지 작업목적을 만족하기 위해서는 로봇이 설정된 주행

영역 T 의 경계 내에서 주행하여야 한다. 이를 위해 상위 수준(high level)의 기준 동작(reference motion)이 필요하다. 주행 영역의 범위 경계 내에서 주행 하기 위한 기준동작 명령은 로봇의 위치에 의해 3부분으로 구분 된다. 사용자 정의 구속조건 $p_c^1 < p(\mathbf{x}(t)) < p_c^2$ 에 의한 이동로봇의 동작영역은

$$p(\mathbf{x}(t)) \leq p_c^1 \tag{11}$$

$$p_c^1 < p(\mathbf{x}(t)) < p_c^2 \tag{12}$$

$$p(\mathbf{x}(t)) \geq p_c^2 \tag{13}$$

로 구분될 수 있다. (11-13)의 각 영역은 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며 각 영역에서 작업 목적을 만족하기 위한 기준 동작 명령은 다음과 같다. 첫째, $p(\mathbf{x}(t)) \leq p_c^1$ 인 경우 이동로봇은 충돌을 피하기 위하여 벽면으로부터 떨어져야 하며 둘째, $p_c^1 < p(\mathbf{x}(t)) < p_c^2$ 인 경우에는 주어진 속도와 방향을 유지하면 된다. 그리고 셋째로, $p(\mathbf{x}(t)) \geq p_c^2$ 인 경우에는 벽면으로 가까워지도록 기준 동작 명령을 생성하여야 한다. 그리고 구속조건에 의한 이동로봇의 동작 특성을 기반으로 벽면 주행 작업을 위한 이산상태 모델을 구하기 위한 이산상태 변수 q 를 다음과 같이 정의한다.

1) 이산상태 $q=1$ 은 Receding Motion으로 이동로봇의 위치가 $p(\mathbf{x}(t)) \leq p_c^1$ 일 때, 구속 조건 p_c^1 에 의해 벽으로부터 멀어지도록 하는 이산 동작 제어모드(control mode)이다. 이때 인베리언트 $Inv(q) = p(\mathbf{x}(t)) \leq p_c^1$ 이다.

2) 이산상태 $q=2$ 는 Straightening Motion으로 이동로봇이 $p_c^1 < p(\mathbf{x}(t)) < p_c^2$ 일 때 즉, 이동로봇이 $(x, y) \in T$ 주행영역 내에서 주행 할 때의 이산동작 제어 모드이다. 이때 인베리언트 $Inv(q) = p_c^1 < p(\mathbf{x}(t)) < p_c^2$ 이다.

3) 이산상태 $q=3$ 는 Approach Motion으로 이동로봇이 $p(\mathbf{x}(t)) \geq p_c^2$ 일 때 구속 조건 p_c^2 에 의해 이동로봇이 벽으로 가까워지도록 하는 이산 동작 제어모드이다. 이때 인베리언트, $Inv(q) = p(\mathbf{x}(t)) \geq p_c^2$ 이다.

위에서 정의한 이산상태 변수들은 자율적 벽면 주행을 위한 이동로봇의 기본동작(behavior) 제어모드(control

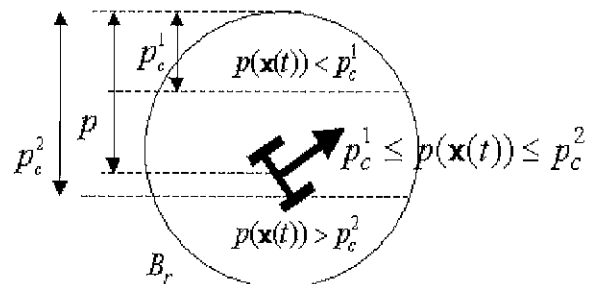


그림 4. 탐색 윈도우와 구속조건 p_c^1, p_c^2 에 의한 주행 영역 구분.

Fig. 4. Navigation regions on the search windows and the user-defined constraints p_c^1 and p_c^2 .

mode)를 나타낸 것으로 벽면과 로봇의 거리에 따라서 로봇의 동작을 제어하기 위한 기준 동작(reference motion)이다. 각각의 이산상태에서 벽면과의 충돌 없이 로봇의 위치를 주행영역 T 내에서 주행하도록 하기 위한 것이다. 예를 들어, 로봇이 이산상태 $q=1$ 일 때(즉, 로봇과 벽면과의 거리가 $p(x(t)) < p_c^1$ 일 경우) 로봇의 기준동작은 벽면으로부터 멀어지도록 해야 한다. 멀어진다는 의미는 벽면과 로봇과의 거리 변위량 $p(x(t))$ 이 양의 값을 유지하도록 하는 것을 의미한다.

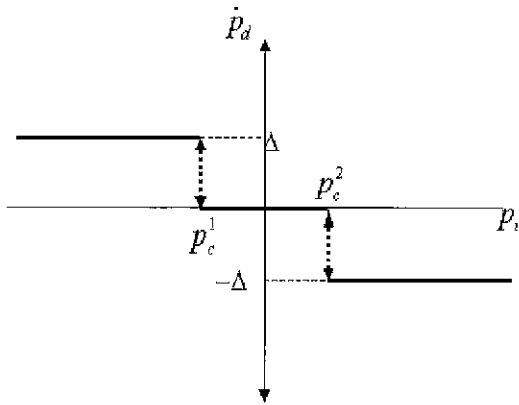


그림 5. $p(x(t))$ 에 대한 다중치 함수 $\dot{p}_d(x(t))$
 Fig. 5. Multi-valued function $p_d(x(t))$ with respect to $p(x(t))$.

각 이산상태에서의 기본 동작들을 벽면과 이동로봇 간의 기준 거리 $p_d(\cdot)$ 에 대한 시간 미분 함수 $\dot{p}_d = dp_d/dt$ 를 다중치(multi-valued) 함수

$$\dot{p}_d(x(t)) = \begin{cases} \Delta, & p(x(t)) \leq p_c^1 \\ 0, & p_c^1 < p(x(t)) < p_c^2 \\ -\Delta, & p(x(t)) > p_c^2 \end{cases} \quad (14)$$

로 정의되며 그림 5와 같이 표현된다. 여기서 상수 Δ 는 양수이며 \dot{p}_d 는 정의된 각각의 이산상태에서의 안전한 벽면 주행을 위하여 이동로봇의 원하는 기준동작이 된다.

(14)와 그림 5의 다중치 함수는 이동로봇과 벽면과의 거리의 순간 변위량으로, 여기서 $\dot{p}_d(\cdot)$ 는 자율적 벽면 주행을 위한 이동로봇의 원하는 기준 동작으로 벽면과 이동로봇 간의 거리에 의해 결정되며, 이동로봇의 동작은 벽면과의 거리 p_c^1 과 p_c^2 에 의해 구속된다. 예를 들어, 이산상태 $q=2$ 에서 $q=1$ 로의 상태 천이는 연속 상태 변수인 로봇의 위치 (x, y) 에 의한 벽면과의 거리 $p(x(t))$ 가 구속조건 p_c^1 에 대하여 벽면과의 거리가 $p(x(t)) < p_c^1$ 일 때 이산상태는 $q=2$ 에서 $q=1$ 로의 천이가 일어난다. 즉, 연속 상태 변수 x 에 의해 이산상태가 결정되고 상태천이를 일으킨다.

위에서 모델링한 벽면 주행을 위한 기본동작 특성들을 디지털 오토마톤[11]-[12]을 이용하여 구성한 이산상태 시스템은 그림 6과 같다.

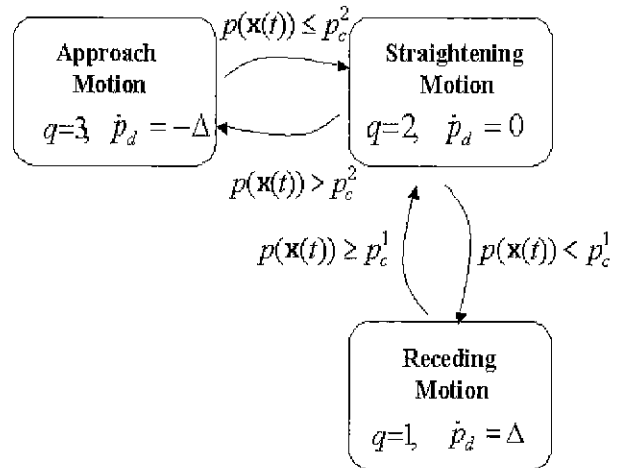


그림 6. 디지털 오토마톤을 이용한 이산상태 시스템.
 Fig. 6. Discrete event system using by digital auto-maton.

V. 제어입력 구성과 연속상태 시스템

실내 환경에서 이동로봇의 동작 특성들은

$$\begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/b & -1/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

로 주어지며, 여기서 v_m 와 ω_m 는 이동로봇의 중심점 (x, y) 에서의 선속도와 각속도이며, $v_i, i=1,2$ 는 각 바퀴의 속도이다. (15)로 부터 이동로봇의 위치와 자세는 각 바퀴의 속도 v_1 과 v_2 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서, 각 바퀴의 속도비율을 제어함으로써 위치와 자세를 제어할 수 있다. 이는 이동로봇의 동작제어의 문제를 단순화하여 2절에서 정의한 사용자 정의 구속조건에 따른 이산상태 제어모드에서 결정된 기준동작 \dot{p}_d 를 추종하기 위한 각 바퀴의 속도 비율, $k(t) = v_1/v_2$ 를 결정하기 위하여 인터페이스 제어기에서는 두 바퀴의 속도차이를 나타내는 비선형 함수 $k(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$k(t) = \exp(\dot{p}_d(x(t)) - \dot{p}(x(t))) \quad (16)$$

여기서 \dot{p}_d 는 이산상태 시스템으로부터 결정된 이동로봇의 기준동작 명령(reference motion command)이며, \dot{p} 는 현재 로봇과 벽면과의 순간 거리 변위량으로 연속 상태 변수 x 에 의해 결정된다. (16)의 지수함수는 각 바퀴의 기준속도 차이를 가능하면 지수적으로 스윕칭하기 위함이며 (16)의 동작 특성을 예를 들어 설명하면 다음과 같다 첫째, 로봇과 벽면과의 거리가 $p(x(t)) \leq p_c^1$ 인 경우 즉, 이산상태 $q=1$ 일때 이산상태 제어기에서의 로봇의 기준 동작 명령은 $\dot{p}_d = \Delta$ 가 되어 (16)에 의해 로봇의 각 바퀴 기준 속도 비율이 결정되어 로봇은 벽면으로부터 멀어지게 된다. 둘째, 로봇의 위치가 $p_c^1 < p(x(t)) < p_c^2$ 에서 주행 할 때, 이산상태 천이 순간의 초기 값 x_0 를 유지하게 되고, 이때의 각 바퀴의 기준 속도는 이산상태 천이 순간의 전방향 자세각 $\phi_0 \in x_0$ 을 유지하도록 결정된다. 이때의 기준동작 명령

은 $\dot{p}_d = 0$ 이다. 셋째, 로봇이 사용자 정의 구속조건에 따른 주행 영역을 벗어나 벽면으로부터 멀어지게 되면 즉, 벽면으로 부터의 위치가 $p(x(t)) \geq p_c^2$ 일때 이산상태 제어기의 이산상태는 $q=3$ 으로 상태천이를 하게 되고 이산상태 제어기는 로봇을 벽면으로 가까워지도록 기준 동작 명령을 $\dot{p}_d = -\Delta$ 를 생성하며 인터페이스 제어기는 (16)에 의해 로봇의 각 바퀴 속도 비율을 결정한다. 이와 같이 결정된 각 바퀴의 기준 속도 비율에 의해 하위의 연속 상태 제어기에 입력될 바퀴의 기준 속도는 (15)과 (16)에 의해 이동로봇의 원하는 각 바퀴의 목표 입력 v_1^d 과 v_2^d 는 (17)과 (18)로 결정된다.

$$v_1^d(t) = \frac{2k(t)}{k(t)+1} v_m^d(t) \quad (17)$$

$$v_2^d(t) = \frac{2}{k(t)+1} v_m^d(t) \quad (18)$$

여기서, $v_m^d(t)$ 는 사용자에게 의해 주어진 작업 공간에서의 이동로봇의 원하는 이동 속도이며 v_i^d , $i=1,2$ 는 각 바퀴의 원하는 기준 속도이다.

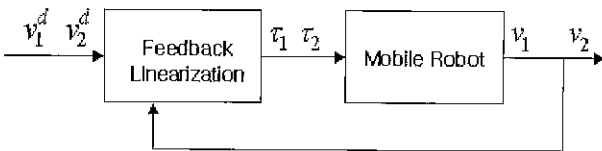


그림 7. 이동로봇의 궤환 선형화를 이용한 속도 제어기의 구성도.

Fig. 7. Block diagram for velocity controller using feedback linearization.

하위 수준의 연속 상태 시스템은 각 바퀴의 속도제어를 위한 PD형의 속도 궤환 제어기로 구성되어 있다. 입력-출력 선형화 방법 [14]을 이용하여 출력 변수를 각 바퀴의 선 속도인 v_1 과 v_2 로 선정하고, 계산-토크 (computed-torque) PD궤환 속도제어기는

$$\tau = B_s^{-1}(x)(\ddot{x}_1^d - f_s(x) - k_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_1^d) - k_p(x_1 - x_1^d)) \quad (19)$$

과 같이 얻을 수 있다 [14]. (19)는 출력변수를 각 바퀴의 선속도 v_1 과 v_2 로 정하여 입력-출력 궤환 선형화 방법을 이용하여 구할 수 있다. 구체적인 과정은 [14]의 입력-출력 선형화 방법을 기반으로 하였으며, 여기서 k_p 와 k_d 는 궤환 이득상수이다. 각 바퀴의 속도제어를 위한 하위 수준의 연속상태 시스템의 구조는 그림 7에 주어지 있다. 구체적인 내용은 참고문헌 [14]와 [15]를 인용하고 본 논문에서는 생략하기로 한다.

VI. 성능 평가

본 장에서는 논홀로노믹 이동로봇에 대하여 제한한 자율적 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어 방법을 적용

하여 실내 환경에서의 벽면 주행 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 sonar와 같은 거리 측정 센서들 이용하여 로봇과 벽면과의 거리정보는 얻을 수 있다고 가정하였으며, 전체적인 실내 환경에 대한 정보는 주어지지 않았다. 또한 바퀴의 미끄러짐은 없다고 가정하였다. 이동로봇은 그림 1과 같은 논홀로노믹 구속조건을 갖는 두 바퀴 구동형 로봇이며, 이동로봇의 사양은 그림 1의 로봇을 기준으로 표 1에 주어지 있다.

자율적 벽면 주행을 위하여 (14)의 다중치 함수 p_d 의 $\Delta=0.4$ 로 하였으며, 이동로봇의 초기 위치는 주행 영역이 아닌 위치로 초기위치 $x_0=0.0$, $y_0=1.65$ (m), 초기자세는 $\phi_0=0.0$ (rad)로 주어졌으며, 초기 속도는 $v_m=0$ 인 정지 상태이다. 벽면 주행시에 측정된 벽과의 거리에 대한 사용자 정의 구속조건은

$$p_c^1 = 0.5(m), \quad p_c^2 = 0.6(m) \quad (20)$$

로 정의하였으며, 원하는 이동속도는 $v_m^d = 2m/sec$ 이다. 컴퓨터 시뮬레이션에서의 제어 목적은 벽면을 사용자 정의 구속조건에 따른 주행 영역 T 의 경계 내에서 원하는 이동속도를 유지하면서 벽면과의 충돌 없이 자율적으로 주행 하는 것이다. 그림 8은 “ㄷ” 자형의 실내 환경에서

표 1. 이동로봇의 주요 파라미터.

Table 1. Parameters of mobile platform.

구동축간의 거리(b)	1.5 m
구동바퀴의 반경(r)	0.1 m
로봇의 길이(l)	0.6 m
구동바퀴와 모터질량(m_w)	1.5 kg
m_w 를 제외한 로봇의 질량	30.0 kg

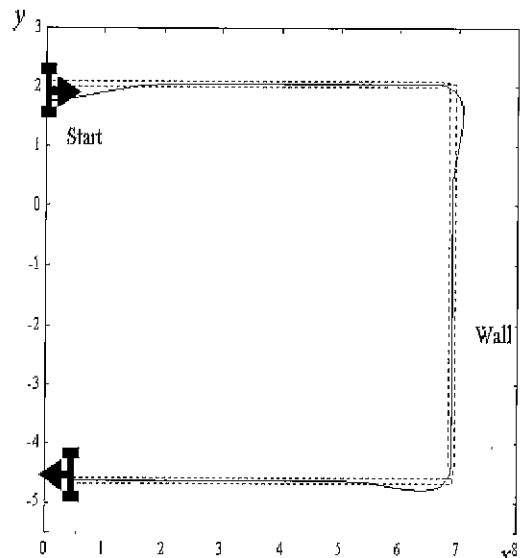


그림 8. ‘ㄷ’자형 실내 환경에서의 자율 벽면 주행 결과.
Fig. 8. Autonomous wall-following result in the ‘ㄷ’-type indoor environment.

의 벽면 주행 결과를 보여 주는 것이다. 정의된 주행 영역 내에서의 실시간 벽면주행 성능을 보여주고 있다.

그림 8에서 점선은 사용자 정의 구속조건에 의한 주행 영역을 나타내고 있다. 그림 9는 이동로봇의 자세인 ϕ 에 대한 제어 결과를 보여 주고 있다. 로봇의 자세 각 ϕ 가 주행 영역으로 수렴됨을 볼 수 있다. 그림 10은 이동로봇의 각 바퀴에 대한 기준 제어 입력을 보여주고 있다. 일정한 전방향 이동속도를 유지하면서 벽면과의 충돌을 피할 수 있도록 로봇의 동작을 제어하기 위한 바퀴 속도로서 (17)과 (18)에 의해 결정된 바퀴 속도 제어 입력이다. 그림 11은 (16)에 의해 결정된 두 바퀴의 기준 속도 비율로서 구속조건에 의한 주행 영역을 유지하기 위하여 각각의 이산상태에서 각 바퀴의 속도 입력이 다르게 주어짐을 알 수 있다.

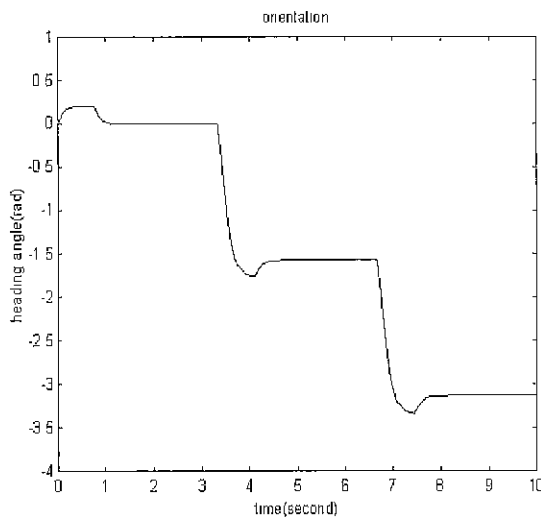


그림 9. 벽면 주행을 위한 이동로봇의 자세각.
Fig. 9. The orientation ϕ of robot on the wall-following task.

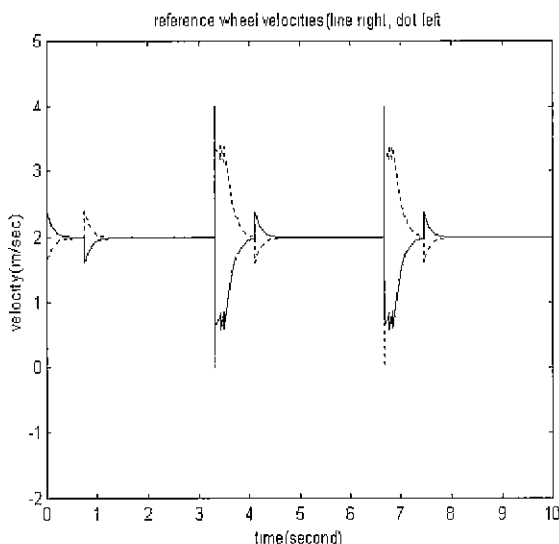


그림 10. 이동로봇의 각 바퀴 속도 제어 입력.
Fig. 10. Wheel velocities as the control inputs.

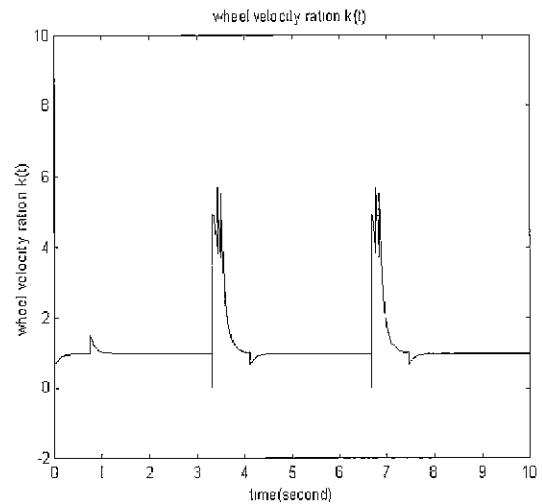


그림 11. 각 바퀴 기준 속도비율 $k(t)$.
Fig 11. The ratio of reference wheel velocities $k(t)$.

VII. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 논홀로노믹 이동로봇의 실내에서의 자율적 벽면 주행을 위한 하이브리드 제어방법을 제안하였다. 실시간 벽면 주행을 위하여 사용자 정의 구속조건을 이용하여 이산상태를 정의하였으며 이를 이산상태 모델로 벽면 주행 알고리즘을 설계하였다. 자율적 벽면 주행을 위한 이산상태 시스템은 하위의 이동로봇의 연속상태 제어기의 상태변수로부터 이산상태가 결정되고 이산상태에 의해서 상위 수준에서의 기준 동작 명령을 생성하게 하였다. 하이브리드 시스템은 3계층의 계층적 구조로 상위에는 기준동작 명령의 생성을 위한 이산상태시스템과 하위에는 이동 로봇의 제어를 위한 연속상태 시스템, 그리고 가운데에는 두 가지 서로 다른 상태공간의 연결과 함께 이동로봇의 연속 상태 변수와 벽면과의 상호 작용에 따른 이산상태의 상태 천이를 결정하고, 상위의 기준동작 명령에 대한 로봇의 각 바퀴 제어 입력을 결정하게 되는 인터페이스 제어기로 구성하였다. 제한한 자율 벽면 주행 알고리즘과 하이브리드 제어기의 성능을 보이기 위하여 ‘C’ 자형의 실내 환경에서의 자율적 벽면 주행 시뮬레이션을 통하여 성능을 보였다.

앞으로의 연구과제는 벽면 주행을 포함한 복잡한 환경에서의 자율적 장애물 회피와 주행을 위한 알고리즘의 보완과 동적 시변 환경으로의 확대 연구가 필요하다고 하겠다. 또한 상위의 이산상태 시스템의 이산상태 천이에 따른 안정도와 reachability 해석과 전체적인 하이브리드 시스템의 안정도 해석을 위한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] John J. Leonard, Hough F. Durrant-Whyte, and Ingemar J. Cox, "Dynamic map building for an autonomous mobile robot", *Intl. J. of Robotics Research*, vol. 11, no. 4, pp. 286- 298, August, 1992.

- [2] Wonyun Choi and Jean-Claude Latombe, "A reactive architecture for planing and executing robot motions with incomplete knowledge," *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligence Robots and Systems*, vol. 1, pp. 24-29, 1991.
- [3] J.-P. Laumond, Paul E. Jacobs, Michel Taix, and Richard M. Murray, "A motion planner for non-holonomic mobile robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 577-592, October, 1994.
- [4] Oussama Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", *Intl. J. of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [5] Maher Khatib and Raja Chatila, "An extended potential field approach for mobile robot sensor-based motions", *Intl. Conf. on Intelligent Autonomous Systems*, pp. 490-496, 1995.
- [6] D. E. Koditschek, "Exact robot navigation by means of potential functions: some topological considerations," *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1-6, 1987.
- [7] Johann. Borenstein and Yoram Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, June, 1991.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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] R. Alur, C. Courcoubetis, T. Henzinger, and P. H. Ho., "Hybrid automata: an algorithmic approach to the specification and verification of hybrid system." in *LNCS 736*, pp. 209-229, Springer-Verlag, 1993.
- [12] A. Puri, *Theory of Hybrid Systems and Discrete Event Systems*, Ph.D Thesis, UC Berkeley, 1995.
- [13] M. Zefran, J. Desai, and V. Kumar, "Continuous motion plans for robotic systems with changing dynamic behavior," *Robotic Motion and Manipulation*, pp. 113-128, Wellesley, MA: A K Peters, 1997.
- [14] 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.
- [15] 임미섭, 임준홍, "차륜형 이동로봇의 경로계획과 자율주행을 위한 하이브리드 시스템 모델과 제어". 대한 전기학회 논문집 48A-11-13, pp. 1448-1456, 1999.

임 미 섭

제어.자동화.시스템공학 논문지 제5권, 제6호. 참조.

임 준 홍

제어.자동화.시스템공학 논문지 제5권, 제6호. 참조.