

차륜형 이동로봇 시스템의 하이브리드 시스템 모델과 제어

An approach to hybrid system modeling and control for the mobile robot systems

°임진모, 임미섭, 임준홍

한양대학교 전자공학과(jmlim@aser1.hanyang.ac.kr)

Abstracts : We propose the hybrid control for the path control of wheeled mobile robot system. To develop the hybrid control of mobile robot, the continuous dynamics of mobile robot are modeled by the switched systems. The abstract model and digital automata for the path control are developed. This hybrid control system has the 3-layered hierarchical structure : digital automata as the higher process, mobile robot system as the lower process, and the interface as the interaction process between the continuous dynamics and the discrete dynamics. The control of following the desired-paths with edges are investigated as the applications by the computer simulation.

Keywords : hybrid dynamical systems, hybrid control, switched systems, digital automata, wheeled mobile robot, path control.

1. 서론

오늘날의 제어시스템들은 복잡한 구조와 함께 지능적인 제어 특성을 요구하고 있으며 컴퓨터에 의한 상위단계(the highest level)에서의 연산 및 논리적인 판단(decision-making)과 하위단계(the lowest level)에서의 연속변수 동적시스템(continuous variable dynamic system)들이 결합된 제어 구조를 갖는 계층적 구조를 나타내고 있다. 이러한 서로 다른 성질의 시스템들이 결합된 형태를 하이브리드 시스템이라 하며, 일반적으로 하이브리드 시스템은 연속상태변수와 이산상태변수들이 결합된 형태의 시스템을 말하며, 이러한 하이브리드 시스템의 전개(evolution)는 모든 변수들인 연속변수들과 이산변수들에 의한 운동방정식(motion equation)의 형태로 나타난다. 이러한 시스템의 연속변수 상태 동특성은 연속시간, 이산시간, 또는 혼합된 형태로 나타나며 미분방정식 또는 차분방정식의 형태로 주어진다. 또한, 이산 변수 상태 동특성(discrete-variable dynamics)은 digital automaton 또는 입력-출력 천이시스템(input-output transition system)으로 나타낼 수 있다. 이러한 두 가지 성질의 동특성들은 사건(event) 또는 trigger time에서 서로 상호작용을 하게 된다.

하이브리드 제어 시스템은 연속 및 이산 동특성과 연속 및 이산 제어 입력(control)들이 서로 연결되어 상호 작용하는 시스템이라 할 수 있으며 하이브리드 동적 시스템(hybrid dynamical systems)은 서로 다른 동적 시스템(dynamical system)들의 순서적 집합(indexed collection)을 이루는 시스템으로 주어진 상태조건에 의해 점프 또는 스위칭이 이루어지는 시스템이라 할 수 있다. 이에 관련된 연구는 현재 활발히 진행되고 있다.[1,2,3,4,5] 이러한 연구는 복잡한 생산 시스템과 공정 제어, 통신, 그리고 로봇 분야에서 시도되고 있다.

본 논문은 nonholonomic constraints를 갖는 이동 로봇의 하이브리드 제어를 통한 경로 및 자세 제어에 관한 연구로서, 현재까지 이러한 이동 로봇에 관한 경로 및 자세제어를 위한 많은 연구는 연속상태 변수 시스템에서의 연구 또는 이산사건식 접근 방법으로 진행되고 있지만 다양한 경로와 자세 제어의 적용에는 많은 문제점이 있다.[7]. 본 연구에서는 이동 로봇의 간략화된 모델(abstracted model)을 이용한 운동 특성을 표현하는 digital

automata를 설계 및 제안하였으며, automaton들로 구성된 이산 상태공간(discrete state space)의 디지털 제어기, 미분방정식으로 표현되는 연속 상태 공간의 이동 로봇 제어기, 그리고 두 가지 다른 시스템을 연결하는 인터페이스 제어기들로 구성된 하이브리드 제어를 제안하였으며 이를 이용한 다양한 모양의 경로와 자세를 제어할 수 있음을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이동로봇의 vehicle kinematic을 기초로 하여 이동로봇의 경로와 자세제어를 위한 하이브리드 시스템 모델을 구하였으며 3장에서는 주어진 경로와 자세 제어를 위한 하이브리드 제어를 제안 및 구성하였다. 4장에서는 다양한 경로에 대하여 하이브리드 제어를 이용한 경로 및 자세 제어를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 보였으며 5장에서는 결론 및 문제점 그리고 앞으로의 연구과제에 대하여 기술하였다.

2. 이동로봇의 하이브리드 시스템 모델

작업 환경과 장소를 이동하면서 다양한 환경에서 여러 종류의 작업을 수행할 수 있는 이동 로봇의 개발과 응용에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 특히 차륜형 이동 로봇(wheeled mobile robot)은 작업 반경이 넓고 이동 속도가 빠르면서도 구조가 단순하고 제어가 용이하다는 장점으로 많이 이용되고 있다. 한편 일반적으로 기계적 시스템의 운동은 n -차원의 일반화 좌표계(generalized coord.)와 외부로부터 인가되는 힘과 모멘트에 관련된 운동방정식으로 표현된다. 이때 일반화 좌표계의 m -차수가 운동방정식으로부터 제거될 수 있을 때 이를 m -holonomic constraints라 하며, k -nonholonomic constraints는 주어진 운동방정식이 일반화 좌표계로 k -차수 저차화(reduced)될 수 없을 경우를 말한다. 차륜형 이동로봇 또한 전형적인 nonholonomic 시스템으로 상태변수로 시스템의 운동을 제어하기 위해서는 주어진 시스템의 운동과 constraints 방정식을 상태변수 시스템으로 표현하기 위해 복잡한 과정을 거쳐야 한다. 즉, 일반적인 smooth-상태제어(state feedback)을 이용한 입력변수-상태변수 선형화가 불가능한 비선형 시스템을 제어목적에 따라서 출력벡터를 적절히 선정하는 입력변수-출력변수 선형화 과정[7]을 거쳐야 한다.

일반적으로 이동로봇의 경로제어는 목표지점에 대한 주행 경로를 결정하는 경로-계획(path-planning)과 경로-추종(path-following), 그리고 결정된 경로에 대한 속도 및 가속도 제어를 위한 궤적-추종(trjectory-tracking)으로 구분할 수가 있다. 즉, 연속상태 공간에서의 경로제어에서는 제어목적에 따른 출력 벡터의 선정을 통해 제한적인 제어만이 가능하다고 할 수 있으며, 이산사건식의 접근방법인 Petri-net 등과 같은 이산상태 공간에서의 경로제어는 주어진 작업에 국한되는 단점이 있다.

차륜형 이동로봇은 각각의 바퀴들이 독립적으로 구동되기 때문에 각 바퀴의 속도 차이에 의하여 이동방향의 진행각도(ϕ)가 바뀌게 된다. 본 연구에서 사용한 이동로봇 시스템은 구동 바퀴가 두개이며 지지용 바퀴가 하나인 전형적인 차륜형 이동로봇 시스템이다. 그림 1.에서는 이동로봇의 구조와 각각의 파라미터들을 나타낸 것이다.

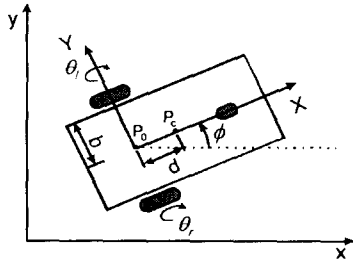


그림 1. 이동로봇의 구조와 파라미터
Fig. 1. The structure and parameters of the mobile robot.

차륜형 이동로봇의 기구학과 vehicle기구학은 아래 식(1,2)로 나타낼 수 있으며

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, ω_1 과 ω_2 는 각 바퀴의 각속도이고, v 는 이동로봇의 무게중심에서의 이동속도, ϕ 는 기준좌표계 x -축과 이동로봇과 이루는 전 방향 각도를 나타낸다. x_1 과 x_2 는 각각 이동로봇의 위치 (x, y)를 나타낸다. 위의 식(1,2)를 보면 이동로봇의 자세와 위치는 입력인 두 바퀴의 속도차이에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그리고 이동로봇의 동력학은 연속변수 상태공간 방정식(3)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) &= E(q)u - A^T(q)\lambda, \\ A(q)\dot{q} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $M(q) \in R^{n \times n}$ 인 inertia 행렬이며, $V(q, \dot{q}) \in R^{n \times 1}$ 의 위치 및 속도에 의한 힘 벡터이며, $E(q) \in R^{n \times r}$ 의 input transformation 행렬이다. 또한 u 는 r -차원의 제어 입력벡터이며 $A(q)$ 는 구속조건 방정식(constraints equation)으로 $n \times n$ -차원의 자코비안 행렬, λ 는 구속 조건 힘(constraints force) 벡터로 Lagrange multiplier라 하며 이를 소거하여 출력변수를 선정하여 구하면 식(4)를 얻을 수 있다[10].

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (4)$$

여기서, $f(x) = [-(S^T MS)^{-1}(S^T MS \eta + S^T V)]$, $g(x) = [(S^T MS)^{-1}]$, $x = [x_1 \ x_2 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \omega_1 \ \omega_2]^T$, $u = [r_1 \ r_2]^T$, $\eta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$, 그리고 $S(q)$ 는 $A(q)$ 의 null space이다.

이동로봇의 경로 및 자세제어를 위해서 주어진 경로를 정해진 속도로 주행하며 자세를 제어하기 위하여 식(1,2,4)를 이용하여 이동로봇의 각 바퀴의 속도를 입력으로 하는 스위칭 시스템 (switching system)을 아래와 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_i, \quad i \in Q = \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

일반적으로 하이브리드 동적시스템은 아래 식(5)로 표현할 수가 있다.

$$H = [Q, \Sigma, A, G] \quad (5)$$

여기서, $Q \in Z_+$ (nonnegative real)이며 순서정렬(index) 이산상태 변수 공간, $\Sigma = \{\Sigma_q\}_{q \in Q}$ 는 동적 시스템들의 집합이며 $\Sigma_q = [X_q, \Gamma_q, f_q]$ 는 각 동적시스템으로 $X_q \in R^n$ 는 Σ 의 상태 공간이며 Γ_q 는 transition semigroup으로 시간변수와 같은 것이라 할 수 있다. 그리고 $f_q: X_q \times \Gamma_q \rightarrow X_q$ 는 천이함수(transition function)이다. $A = \{A_q\}_{q \in Q}$ 는 jump set으로 $A_q \in X_q$ 이다. $G = \{G_q\}_{q \in Q}$ 은 jump transition map으로 $G_q: A_q \rightarrow \bigcup_{q \in Q} X_q \times \{q\}$ 이다. 식(4)로 주어진 이동로봇의 연속 상태 공간 시스템의 출력인 자세와 궤적은 입력벡터 u_i 에 의하여 결정되게 된다. u_i 에 의해 이루어지는 스위칭은 상태변수가 주어진 조건 (A_q)을 만족할 때 이루어지는 autonomous스위칭과 제어입력에 의한 스위칭인 controlled 스위칭으로 분류할 수 있다[6]. 이를 하이브리드 동적 시스템 모델로 나타내면, 먼저 autonomous스위칭 하이브리드 동적시스템은 식(6)으로 모델되며

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), q(t)), \\ q^+(t) &= v(x(t), q(t)). \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $x(t) \in R^n$, $q(t) \in Q = \{1, 2, \dots, N\}$, $f(\cdot, q) \rightarrow R^n \rightarrow R^n$, $q \in Q$ 이고 Lipschitz연속인 연속변수 동특성(continuous dynamics)이며, $v: R^n \times Q \rightarrow Q$ 은 시스템의 이산 동특성(discrete dynamics)이다. 또한 controlled 스위칭 하이브리드 동적시스템은

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), q(t), u(t)), \\ q^+(t) &= v(x(t), q(t), u(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 제어입력벡터, $u(t) \in R^r$ 이다.

아래 그림 2.의 (a)와 같이 비선형 경로가 주어져 있을 때 각각의 경로는 서로 다른 운동방정식으로 주어지며 이동로봇의 속도가 일정하게 후진을 제외하고는 정지함이 없이 이동을 하려 한다면 주어진 경로를 추종할 수는 없을 것이다. 일정한 속도로 이동하면서 주어진 경로와 자세를 제어하기 위해서는 비선형 edge를 갖는 서로 다른 전개함수(evolve function)를 이산상태변수인 $q_i(t)$ 에 따라서 이동로봇이 주어진 경로를 추종하도록 제어하여야 한다. 이동속도를 유지하며 회전을 하기 위해서는 연속

변수 스위칭(continuous switching)으로 만이 가능하다.

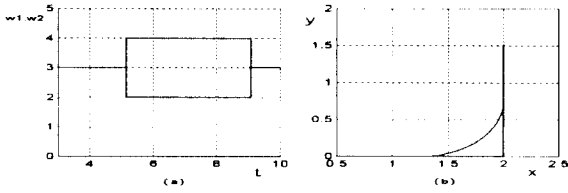


그림 2. 비선형 경로(b)와 제어입력(a)에 의한 경로.

Fig. 2. The given nonlinear path and output path by wheel velocity.

위의 그림 2.(a)와 (b)를 보면 두 바퀴의 속도차이에 의해서 경로와 궤적이 결정된다. 이를 이동로봇의 속도 v , 제어입력 ω_1, ω_2 를 이동로봇의 abstract 모델로 나타내면 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{r}{2}(\omega_1 + \omega_2), \quad \omega_1 = \frac{k_2}{k_1}\omega_2, \quad k_1, k_2 \in R \quad (8)$$

경로의 불연속(edge)에 따른 digital automata는 그림 3과 같이 5개의 automata들로 구성 할 수 있다.

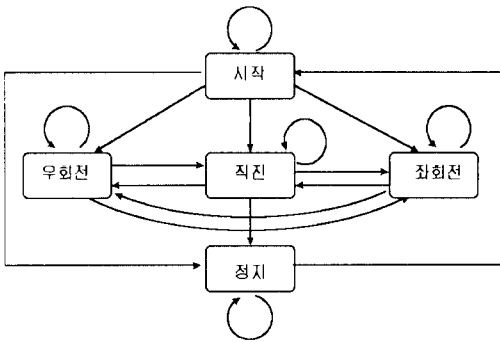


그림 3. Digital automata의 구성

Fig. 3. Digital automata for path control

각각의 automaton들의 기능은 다음과 같다.

시작 (q_1): 정지상태에서 출발할 경우

$$\begin{aligned} \omega_1 = \omega_2 = a, \\ a \in R, \omega(0) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

직진 (q_2): 초기조건을 그대로 유지하며 이동속도를 유지한다.

$$\begin{aligned} k_1\omega_1 = k_2\omega_2, \\ k_2 = k_1 \end{aligned} \quad (10)$$

우회전 (q_3): 이동로봇의 진행각도가 선형적으로 두 바퀴의 속도차이에 의해 우측으로 회전을 하게된다.

$$\begin{aligned} \omega_1 = \frac{k_2}{k_1}\omega_2, \\ k_1 < k_2. \end{aligned} \quad (11)$$

좌회전 (q_4): q_3 와 반대 방향으로 진행각도가 회전하며 이동한다.

$$\omega_1 = \frac{k_2}{k_1}\omega_2.$$

$$k_1 > k_2. \quad (12)$$

정지 (q_5): 이동중인 로봇이 장애물 또는 작업에 따라서 정지를 필요로 할 때 현재의 속도를 감속하여 정지하게 한다.

$$\omega_1 = \omega_2 = -at, \quad a \in R \quad (13)$$

주어진 경로가 그림 (b)로 주어졌을 때 digital automata에 의한 각 바퀴의 속도는 그림 (a)로 같이 제어 될 수 있다.

3. 이동로봇의 하이브리드 제어기

이동로봇의 경로제어는 경로-계획(path planning)과 경로추종(path-following), 그리고 궤적제어(trjectory tracking)로 구분된다. 2장에서 이동로봇의 기구학을 기본으로 한 abstract model을 통하여 간단한 digital automata를 이용한 기본적인 경로제어를 위한 하이브리드 모델을 구하였다. 전체적인 하이브리드 제어기의 구조는 그림4.에 주어져 있다.

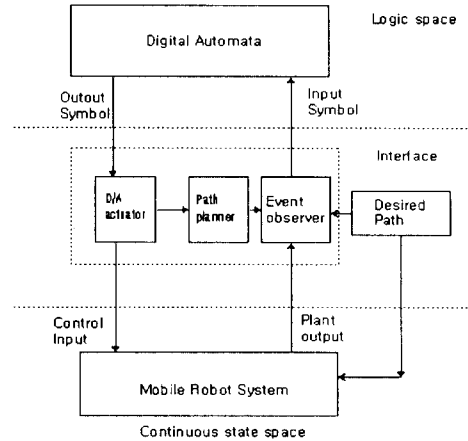


그림 4. 경로제어를 위한 하이브리드 제어기.

Fig.4. The hybrid controller for path-control.

하이브리드 제어기는 3층의 계층적 구조를 갖고 있다. finite automata로 구성된 digital automata layer는 이산 상태변수 공간으로 이산사건에 의한 스위칭 또는 점프조건(A_q)에 의해 automaton간의 스위칭이 일어난다. interface layer는 digital automata layer로 부터의 이산상태변수 출력을 연속 상태변수 시스템의 입력신호로 변환하여 주며, 반대로 연속신호 출력을 주어진 조건에 따라 이산사건 신호로 변환하여 이산상태변수 시스템의 입력신호로 전달한다. 연속 상태변수 시스템은 미분 방정식의 형태로 표현되고 입력신호에 따라서 연속신호를 출력한다.

3.1 연속상태변수 시스템

하이브리드 제어기의 최하위 계층에 속한 연속상태변수 시스템은 스위칭 시스템으로 표현된다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u_i, \quad i \in Q = \{1, 2, \dots, n\} \quad (14)$$

u_i 는 digital automata에 의해 결정된 심볼(symbol)신호인 (ω_1, ω_2) 를 interface layer에서 연속상태신호로 변환하여 식 (14)로 입력되고 이때 출력은 위치와 자세 (x, y, ϕ) 를 출력하게 된다. 위의 식(8)과 그림2.와 그림3.을 기준으로 보면 시스템의

입력신호는 ω_1, ω_2 의 조합인 5가지 형태로 주어지며 각각 식 (14)의 입력으로 결정되어 시스템의 동특성이 스윗칭하게 된다. 이때 시스템의 초기 조건들은 각각 reset된다. 이동로봇의 위치 및 속도 제어기는 일반적으로 많이 사용하는 PD-제어형태의 computed-torque 제어기를 사용하였다. 아래 그림5는 이동로봇의 제어기의 구조를 나타낸 것이다.

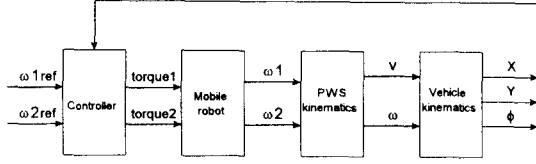


그림 5. PD형태의 computed-torque 제어기.
Fig. 5. PD-type computed-torque controller.

이동로봇의 연속상태 동특성은 위의 식(3,4,5)에 주어져있다.

3.2 Digital automata

digital automata는 event, 트리거 입력(trigger input) 또는 제어입력 심볼들에 의해 abstract time동안 전개(evolve)되는 이산 상태변수 시스템이다. 즉, $q_{k+1} = v(q_k, i_k)$, $o_k = s(q_k, i_k)$ 에 k-천이(transition)에 시간을 도입하면 식(15)로 표현된다.

$$\begin{aligned} q_{k+1} &= v(q(t_k), i(t_k)), \\ o_k &= s(q_k(t_k), i(t_k)) \end{aligned} \quad (15)$$

결국 이러한 automaton-식(8-13)-들은 상태변수, 입력변수, 출력변수 심볼들이 각각 piecewise right- or left- 연속함수로서 일반적으로 연속 시간에서 동작한다고 생각 할 수 있다[5,6]. 이동로봇의 전 방향 진행각도 ϕ 는 연속적으로 변하는 출력변수로서 서로 다른 상태공간 시스템의 상호작용은 이산 상태변수 시스템의 이산동특성과 연속 상태변수 시스템의 동특성을 식(15)에 의해 아래 식(16,17)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} q^+(t) &= v(q(t), i(t)), \\ o(t) &= s(q(t), i(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)), \\ i(t) &= h(x(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

각각의 스윗칭 시간에서의 이산시스템의 동특성은 연속시스템의 출력 $i(t)$ 에 의해 상호작용하고 연속시스템의 상태변수 $x(t)$ 는 입력 $u(t)$ 에 의해 결정된다. 그리고 $u(t)$ 는 이산시스템의 출력에 의해 결정됨을 알 수 있다. 경로제어를 위한 그림 3.의 각각의 automaton들은 상태변수가 주어진 스윗칭 조건인 A_q 에 포함되면 스윗칭하는 autonomous 스윗칭과 event나 제어입력에 의한 controlled 스윗칭이 가능하다.

3.3 Interface layer

서로 다른 상태공간의 제어기가 서로 상호 작용하는 하이브리드 제어기는 그림4.에서처럼 계층적 구조를 갖게되며 이산변수와 연속변수를 연결하는 interface계층이 필요하며 주어진 연속변수 시스템의 특성과 작업의 성질에 따라서 기능이 달라지게 될 것이다. 이러한 interface계층은 전체 하이브리드 제어기의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이동로봇의 비선형

경로에 경로추종과 궤적제어를 위하여 interface 계층을 다음과 같이 설계하였다. 먼저 이동로봇은 등속도로 주어진 비선형 경로를 주행해야 하지만 경로의 비선형 edge 부분은 주어진 자세와 위치를 함께 만족하면서 경로를 제어할 수 없다. 그림5.에서 처럼 주어진 경로와 edge에서의 로봇의 자세와 위치 조건들을 나타내고 있다.

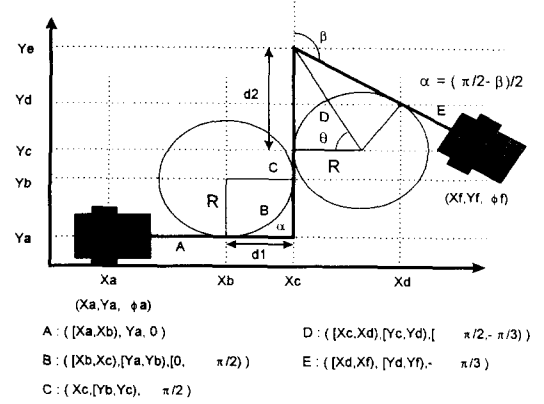


그림 6. 경로와 상태 천이 조건
Fig. 6 The path and state transition

그림6.의 비선형 경로를 자세와 위치 그리고 속도를 유지하면서 경로를 제어하기 위해서는 이에 적절한 경로-계획이 필요하다. 그림4.에서 "path-planner"는 주어진 비선형 경로 p_{ref} 를 연속상태 스윗칭이 가능한 경로, p_{gen} 를 생성하게된다. 이를 이동로봇의 위치와 전 방향각(x, y, ϕ)으로 나타내면 다음과 같다. 그림6.에 경로의 상태변수 A,B,C,D,E에 대한 p_{gen} 는

$$\begin{aligned} A &: ([X_a, X_b], Y_a, 0) \\ B &: ([X_b, X_c], [Y_a, Y_b], [0, a]), \\ C &: (X_c, [Y_b, Y_c], a), \\ D &: ([X_c, X_d], [Y_c, Y_d], [a, a - \beta]), \\ E &: ([X_d, X_f], [Y_d, Y_f], a - \beta). \end{aligned}$$

이때, p_{ref} 에서 회전점(turning point)는 회전 반경, R 과 회전점, a 는 다음과 같다.

$$R = \frac{p+1}{p-1} \cdot b$$

$$d = R \cdot \tan a$$

$$\text{여기서 } p = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \text{ if } \omega_1 > \omega_2$$

$$p = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \text{ if } \omega_1 < \omega_2$$

한편, Interface계층에서는 연속시스템인 이동로봇의 출력변수들을 상위계층인 digital automata 제어기로 연속 신호를 이산신호로 변환하여야 하며, 이를 위하여 "event observer"를 두어서 이산신호로의 변환과 event들을 처리하게 된다. 회전을 위한 각 automaton들의 천이조건, A_q 과 event는 다음과 같다.

$$q_1 : \omega \geq v_{ref}, \text{ then event } q_2,$$

$$q_2 : p_{ref} > p_{\geq n}, \text{ then event } q_3,$$

$q_3 : \phi \geq \phi_{ref}$, then event q_2

Interface계층에서는 서로 다른 상태공간의 신호들을 변환하기 위하여 이산시스템의 상태전이와 연속시스템의 동특성의 스위칭을 이동로봇의 경로제어를 위하여 설계되었다.

4. 이동로봇의 경로제어

이동로봇의 경로제어는 크게 경로-계획과 경로-추종, 그리고 제적-추종으로 구분된다. 그림4의 하이브리드 제어기는 경로-계획은 Interface계층에서, 경로-추종은 digital automata, 그리고 제적-추종은 이동로봇시스템에서 제어하게 된다. 이를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하였다

4.1 경로제어

그림4의 하이브리드 제어기에는 경로발생기, 인터페이스, 플랜트로 나누어 비선형 경로를 추종하기 위하여 두 가지 형태의 automaton을 구성하였다. (a)는 임펄스 형태의 스위칭에 의한 출력이며 (b)는 상태변수의 연속적 스위칭에 의한 출력이다. 이동로봇의 위치 (x, y) 와 전방향각 (ϕ) 는 입력인 (ω_1, ω_2) 에 의해 비선형적으로 스위칭을 할 수 가 없다. 이는 비행기의 예[5]에서도 알 수 있다. 즉, (a)와 같이 이동로봇이 진행을 하다가 제어기로부터 회전하라는 신호를 받았을 때, 각 바퀴의 각속도인 ω_1 과

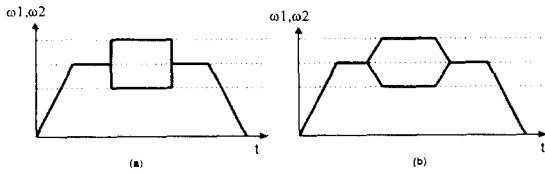


그림 7. 회전을 위한 digital automata 출력.

Fig. 7. The symbol output for turning.

ω_2 가 불연속적으로 바뀌는 경우이고, (b)는 실제로 이동로봇 시스템에 적용할 수 있는 경우로 각 바퀴의 각속도가 연속적으로 변하는 경우이다. 이에 따른 digital automata의 구성은 각각 그림 8.과9.와 같다. 여기서 (a)의 경우 스위칭 순간에 연속 상태별 heading수 시스템에서의 동특성으로 인하여 제어입력이 유한입력(bounded)의 범위를 넘게 되고 이는 시스템의 성능을 떨어뜨리게 된다.

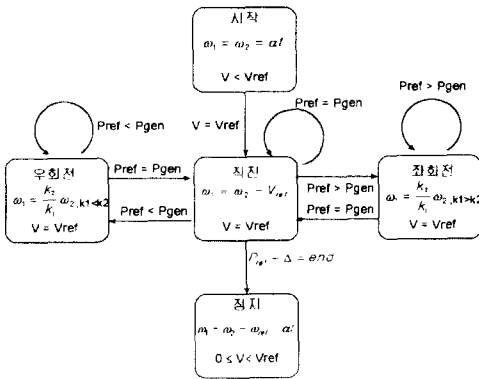


그림 8. digital automata : 임펄스 스위칭(a).

Fig.8. Digital automata : Impulse switching(a).

그림 6.의 주어진 경로에 대한 위치 및 자세제어 결과는 그림10.에 보여주고 있다.

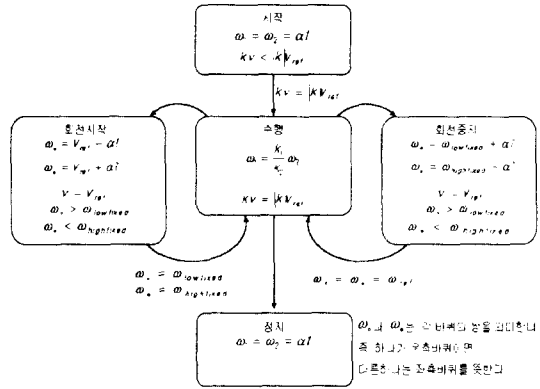


그림 9. digital automata : 연속 스위칭(b).

Fig.9. Digital automata : continuous switching(b).

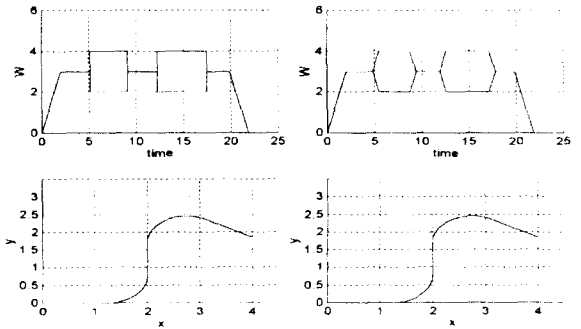


그림 10. Automata 출력과 이동로봇의 위치.

Fig. 10. The output of automata and robot position.

4.2 Parallel parking

본 절에서는 이동로봇의 하이브리드 제어기를 이용하여 일렬주차(parallel parking)에 대한 경로제어의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 결과들을 보일 것이다.

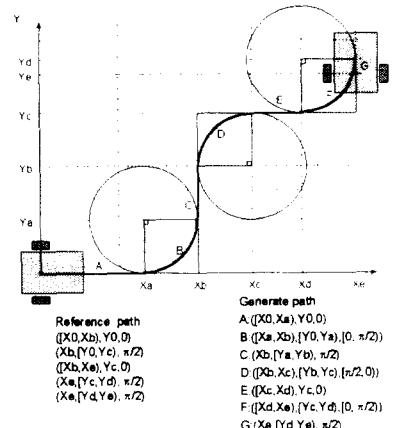


그림 11. 일렬주차 경로의 위치와 자세.

Fig. 11. The position and heading angle for parallel parking.

그림11.은 일렬주차 작업에 경로의 구성과 상태천이를 나타낸 것이다.

먼저, 연속 상태변수 동적시스템은 식(14)의 스윗칭 시스템으로 주어지고 digital automaton은 연속 상태 스윗칭을 위한 형태로 그림 12.와 같이 주어진다. 각 automaton들은 autonomous 스윗칭과 controlled 스윗칭이 가능하다. path-planner는 주어진 경로에 대하여 Lipschitz를 만족하는 연속경로를 생성하고 이에 따른 event의 스윗칭 조건(A_e)과 순서를 결정한다. 아래 그림 12.은 digital automaton의 구성을 보여주고 있다.

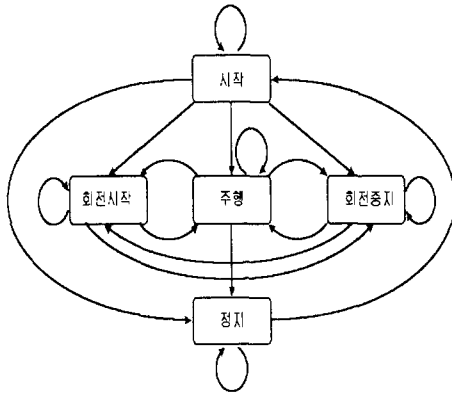


그림 12. digital automaton.
Fig.12. The digital automaton.

경로와 event에 따라서 digital automaton은 nondeterministic 하다. 그림 13.와 14.는 경로에 대한 이동로봇의 위치 및 자세 출력과 digital automaton의 심볼 출력에 대한 결과이다.

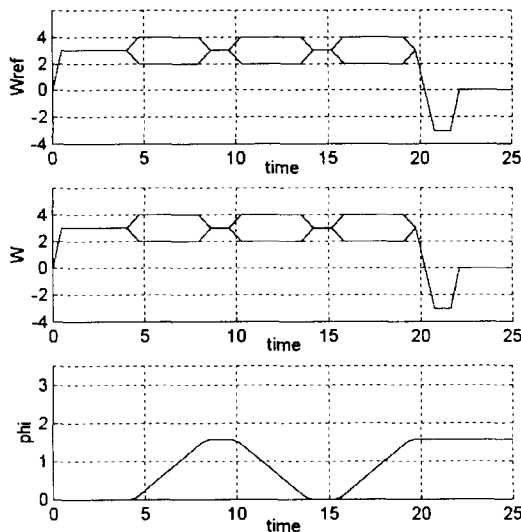


그림 13. digital automata출력과 이동로봇의 전 방향 각.

Fig.13. The output of digital automata and heading angle of mobile robot.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 이동로봇의 경로제어를 위한 하이브리드 제어기를 구성하였다. 이를 위하여 3계층의 hierarchical구조의 제어기를 구성하였으며, 상위제어기로 digital automata, 하위제어기

로 연속 스윗칭 시스템, 그리고 상,하위 시스템의 상호작용을 처리하기 위한 interface계층으로 구성하였다. 하이브리드제어기를 이용하여 비선형 edge가 포함된 경로에 대하여 경로-계획과 경로-추종, 그리고 제적-제어를 통하여 그 성능을 보였다. 앞으로, 일반화된 경로제어를 위한 하이브리드 제어기의 구성에 대한 연구와 제어기의 autonomous를 증가시키기 위한 지능제어에 대한 연구가 필요할 것이다.

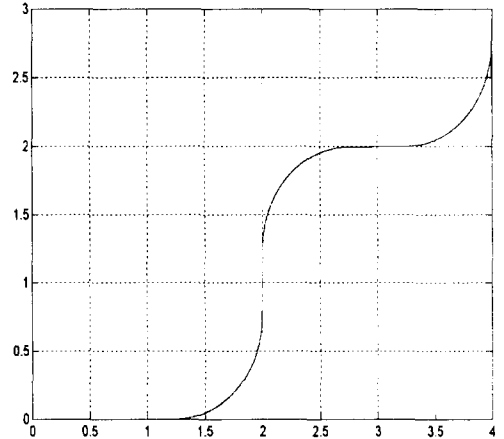


그림 14. 이동로봇의 출력(x,y).
Fig.14. The position (x,y) of mobile robot.

참고문헌

- [1] Hans. S. Witsenhausen, "A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems." IEEE Trans. on Automatic Control,11(2),pp. 161-167,1966.
- [2] Lucio Taverini, "Differential automata and their discrete simulators", Nonlinear Analysis, Theory, Methods, and Applications, 11(6),pp.665-683,1987.
- [3] Allen back, John Guckenheimer, and Mark Myers, "A dynamical simulation facility for hybrid systems". Hybrid system,pp.225-267,1995.
- [4] Alain Bensoussan and Jacques-Louis Lions, "Impulse control and Quasi-variational inequalities, Gauthier-Villars, Paris, 1984.
- [5] Panos J, Antsalis, Michael D. Lemmon, and James A Stiver, "Hybrid system modeling and event identification", Technical report of the ISIS group, univ. of Norte Dame,1993.
- [6] Michael S. Branicky, Vivek Borkar, and Sanjoy K. Mitter, "A Unified framework for hybrid control," In Cohen and Quadrat,pp 352-358,1994.
- [7] N.Sarkar, X.Yun, V.Kumar,"Control of Mechanical Systems With Rolling Constraints : Application to Dynamic Control of Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 13, No. 1, pp.55-69,1994
- [8] Robert L. Grossman, "*Hybrid Systems*", Springer-Verlag, 1993
- [9] Zexiang Li, "Nonholonomic Motion Planning", Kluwer Academic Publishers, 1993
- [10] 최종석, "이동로봇의 효율적 운행 제어 시스템에 대한 연구", KACC'95, pp.459-462, 1995