

차륜형 이동로봇의 경로 계획과 자율 주행을 위한 하이브리드 시스템 모델과 제어

論 文

49D-1-5

Hybrid System Modeling and Control for Path Planning and Autonomous Navigation of Wheeled Mobile Robots

林美燮* · 林俊弘**

(Mee-Seub Lim · Joon-Hong Lim)

Abstract - In this paper, an integrated method for the path planning and motion control of wheeled mobile robots using a hybrid system model and control is presented. The hybrid model including the continuous dynamics and discrete dynamics with the continuous and discrete state vector is derived for a two wheel driven mobile robot. The architecture of the hybrid control system for real time path planning and following is designed which has the 3-layered hierarchical structure : the discrete event system using the digital automata as the higher process, the continuous state system for the wheel velocity controls as the lower process, and the interface system as the interaction process between the continuous system as the low level and the discrete event system as the high level. The reference motion commands for autonomous navigation are generated by the abstracted motion in the discrete event system. The motion control tasks including the feasible path planning and autonomous motion control with various initial conditions are investigated as the applications by the simulation studies.

Key Words : hybrid model, hybrid control system, path planning, nonholonomic constraints, mobile robot

1. 서 론

이동로봇의 응용 분야는 공장, 사무실, 가정 등으로 확대되고 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 실내 환경에 적용되어 왔으며 작업 환경은 동적(dynamic)이며 불규칙하다. 이동로봇의 동작제어의 중요한 요구사항 중의 하나는 목적 지점까지의 장애물과의 충돌을 회피하는 안정적인 주행이라 할 수 있다.

이동로봇의 동작제어 방법들은 계획-기반(plan-based)의 제어방법[1-3]들과, 센서-기반(sensor-based)의 충돌 회피(obstacle avoidance) 제어 방법[4-7]들로 분류할 수 있다. 계획-기반의 알고리즘들은 작업 환경의 모델 또는 지도를 구하여 현재 위치에서 목적지까지의 원하는 궤적을 계산하는 경로 계획(path planning)과 경로 추종을 위한 로봇의 동작을 계획(motion planning)하는 과정으로 구성되어 있다. 그러나 환경 지도(environmental map)를 얻기 위한 과정이 복잡하고 많은 계산량이 요구되며 얻어진 정보를 실제적으로 적용할

때 시간에 따라 작업 환경이 변하게 됨으로 계획된 궤적과 동작계획을 다시 생성해야 하는 문제점이 있다. 계획-기반의 방법들과는 달리 센서-기반의 충돌회피 알고리즘들은 주어진 환경에서 장애물에 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 효과적이나 이동로봇이 국부 최소점(local minimum)에 빠지게 되는 문제가 있다. 벡터 필드 알고리즘은 장애물들 사이에서 이동로봇의 연속적이며 빠른 동작 특성을 보일 수 있지만 복잡한 환경에서의 적용시에는 상위수준(high level)의 의사 결정이 필요하다[16].

일반적으로 이동로봇은 대표적인 논로노믹 시스템으로 자동차와 같은 동작 특성을 갖고 있다. 따라서 인간이 차량을 운전할 경우를 생각해 보면 다음과 같은 운전 특성을 관찰할 수 있다. 즉, 인간이 차량을 전 방향(forward direction)으로 운전할 경우 운전 특성은 직진과 좌회전 그리고 우회전으로 크게 구분되며, 직진, 좌회전, 우회전의 상태천이는 도로의 구조나 장애물 그리고 작업특성에 의해 결정된다. 인간은 목적지점까지의 전체적인 경로 계획에 의한 주행을 하기보다는 주어진 환경의 구조나 장애물에 의한 부분적인 경로를 계획하고 직진과 좌회전, 우회전의 적절한 조합에 의해 운전을 하게 된다. 인간의 주행 특성은 도로의 구조, 장애물, 작업의 특성에 따른 상위수준의 의사결정에 의해 직진과 좌회전, 우회전들 간의 조합들을 반복하면서 주어진 운전 작업을 수행

* 正 會 員 : 漢陽大 大學院 電子工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電子·컴퓨터 工學部 教授·工博

接受日字 : 1999年 6月 23日

最終完了 : 1999年 11月 27日

한다. 이와 같은 인간의 운전 특성을 이동로봇의 경로계획과 동작제어에 적용할 수가 있을 것이다.

본 논문에서는 차륜형 이동로봇 시스템의 자율적 경로 계획과 동작제어 그리고 주행을 위한 하이브리드 제어시스템 방법[8-12]을 도입한 새로운 동작 제어방법을 제안한다. 이를 위하여 이동로봇의 자율적 주행을 위한 3계층의 계층적 구조를 갖는 하이브리드 제어 시스템을 구성하였다. 즉, 상위에는 인간의 주행 특성을 기반으로 하는 이산상태변수를 정의하고 작업특성에 따른 논리적 의사결정 기능을 갖는 이산사건 시스템을 구성하였으며 하위에는 이동로봇의 두 바퀴 속도를 제어하기 위한 연속상태 시스템 그리고 중간 계층에는 상위와 하위의 서로 다른 상태 공간을 연결하고 주어진 환경에 따른 자율적 경로계획을 위한 인터페이스 시스템으로 구성되어 있다. 제안한 하이브리드 제어시스템은 상위 수준에서의 이산사건 시스템은 경로 계획과 동작 제어를 위한 이동로봇의 동작특성을 모델링하기 위하여 정의한 이산상태 변수를 기반으로 간략화 동작(abstracted motion)을 정의하였으며, 디지털 오토마톤(automaton)[11,12]을 이용하여 이산 사건 제어기를 설계하였다. 하위의 연속상태 시스템은 각 바퀴 구동 액츄에이터의 속도 제어를 위한 연속상태 제어기로서 입-출력 선형화 방법[13-15]을 이용하여 각 바퀴 속도를 출력변수로 하는 속도 제어기이다. 인터페이스 시스템은 센서들로부터 얻어진 환경정보를 이용하여 점과 직선으로 구성된 비선형 경로에 대하여 논홀로노믹 이동로봇이 추종 가능한 국부 경로(local path)를 생성하고 하위의 연속 상태 변수들로부터 이산사건을 발생시키는 역할을 담당한다. 또한 상위의 이산사건제어기의 출력을 각 바퀴의 기준 속도명령으로 변환한다. 제안한 하이브리드 제어방법을 이용하여 시뮬레이션 연구를 통하여 다양한 경로에 대한 우수한 자율적 주행성능을 보였다.

2. 이산사건 모델과 제어기 구성

본 논문에서는 그림 1과 같은 두 바퀴 구동형 이동로봇 시스템을 대상으로 한다. 이동로봇 시스템은

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

로 표현 할 수 있으며, 여기서 $\mathbf{x}(t)$ 는 연속 상태 벡터이며 $\mathbf{u}(t)$ 는 제어 입력 벡터이다. 상태 벡터는

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

로 정의 할 수 있다. 여기서 x, y, ϕ 는 각각, 기준 좌표계 (X, Y) 에서의 로봇의 중심점의 위치와 자세각을 나타낸다. 그림 1의 이동로봇 시스템은 논홀로노믹 구속 조건을 만족해야 하므로 독립적으로 모든 상태변수를 제어 할 수 가 없다. 이는 작업 공간(task space)에서의 임의의 모든 경로를 추종 할 수가 없음을 의미한다[15]. 차륜형 이동로봇의 θ_1, θ_2 는 관절 변수로서 왼쪽과 오른쪽 바퀴의 회전각이다. 그리고 바퀴의 선 속도 v_1, v_2 는 각 속도 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 에 바퀴의 반경 r 을 곱한 값으로 단위는 m/sec 이며 여기서 b 는 바퀴 축간의 거리이다. 좌표계 (x, y) 는 로봇 중심점의 국부 좌표계(local coordinate)이며 (X, Y) 는 기준 좌표계(world coordinate)이

다. 차륜형 이동로봇의 제어 변수는 각 바퀴의 가속도 \dot{v}_1 와 \dot{v}_2 로서. 차륜형 이동로봇의 기구적 상태 방정식은

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

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

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

으로 주어진다.

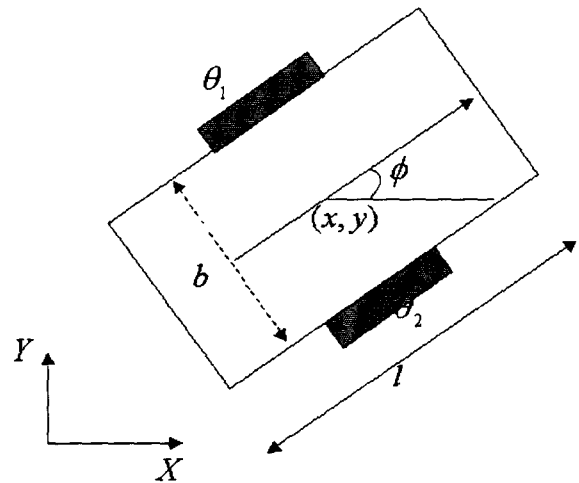


그림 1 두 바퀴 구동형 이동로봇 모델

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

일반적으로 이동로봇이 2차원 평면을 주행할 때 추종해야 할 경로는 직선과 곡선의 조합으로 이루어진다. 이때 이동로봇의 궤적은 두 바퀴의 속도의 조합에 의해 결정된다. 즉, 이동로봇의 자세와 위치는

$$\begin{bmatrix} v_m \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

로 결정됨을 알 수 있다. 여기서 v_m, ω_m 는 각각 이동로봇의 중심점 (x, y) 에서의 선 속도와 각 속도이다. 식(6)은 이동로봇의 이동속도와 위치는 결국 두 바퀴의 기준 속도에 의하여 로봇의 위치와 자세가 결정됨을 보여 주고 있다. 따라서 각 바퀴의 속도 비율을 제어함으로써 위치와 자세를 제어 할 수가 있다. 이는 이동로봇의 동작제어의 문제를 단순화하여 각 바퀴의 속도 비율 $k(t) = v_1/v_2$ 를 이산사건 시스템에서 결정 할 수 가 있다. 이를 간략화 동작으로 표현하면

$$k_1 v_1 = k_2 v_2 \quad (7)$$

으로 이동로봇의 동작을 정의할 수 있다. 여기서 $k_1, k_2 \in R$ 의 상수이다. 식(7)의 특성을 그림2와 같이 표현 할 수 있다. 그림 2에서는 로봇의 각 바퀴 속도 v_1, v_2 에 의해 이동로봇의 주행

속도 $v_m(t)$, 궤적 (x, y) 과 자세(ϕ)가 결정됨을 나타낸 것이다. 예를 들면 전 방향 좌회전의 경우, 식(7)의 두 바퀴의 속도 비율 $k=k_2/k_1$ 가 $0.0 < k < 1.0$ 의 범위에서 이동로봇의 궤적과 자세가 결정된다. 이는 다시 말해서, 로봇의 좌우 바퀴의 속도 $v_1(t), v_2(t)$ 의 조합에 의해 주행 경로와 자세가 결정된다 할 수 있다. 이와 같은 두 바퀴 속도 비율에 의해 결정되는 이동로봇의 동작 특성을 이산상태로 정의하고 상위 수준의 이산사건 시스템 모델을 구하기 위한 각각의 이산상태변수를 다음과 같이 정의한다. 즉, 이산사건적 동작 특성을 **출발(Start)모드**, **직진(Moving Straight, SM)모드**, **좌회전(Turning Left, TL)모드**, **우회전(Turning Right, TR)모드**, **정지(Stop)모드**로 이산 동작 모드 S_q 를 정의할 수 있다. 식 (7)과 그림2의 이동로봇의 동작특성에 대하여 이산상태 모델을 구하기 위한 이산상태 변수 q 는 전방향(forward) 이동만을 고려할 때 각 제어모드의 이산적 동작특성은 다음과 같다. 여기서 이산상태 변수 $q \in Q = \{1, 2, \dots, M\}$ 는 이산상태 공간 Q 의 이산상태 변수들이며 N 은 이산상태 제어 모드의 숫자이다.

- 1) 이산상태 $q=1$ 은 **출발모드(Start Mode, Start, S_1)**로서 정지 상태에서 각 바퀴의 기준 속도 명령(reference velocity command), $v_i^d > 0, i=1,2$ 를 추종하기 위한 각 바퀴의 기준 속도 명령을 생성한다. 이산제어 특성(discrete control behavior)은

$$\dot{v}_1^d = \dot{v}_2^d = \lambda, \quad (8)$$

이다. 즉, 정지상태에서 주어진 초기자세를 유지하며 바퀴의 속도를 $v_i^d = \lambda$ 가 될때까지 증가시킨다. 여기서 $\lambda \in R^+$ 인 상수이다.

- 2) 이산상태 $q=2$ 는 **직진모드(Moving Straight Mode, SM, S_2)**로서 두 바퀴의 기준 속도 명령을 $v_1^d = v_2^d$ 로 생성하여 로봇 중심점의 궤적이 직선이 되도록 동작을 제어하기 위한 속도 제어 모드이다. 이산제어 특성은

$$\dot{v}_1^d = \dot{v}_2^d = 0, \quad k=1 \quad (9)$$

이다.

- 3) 이산상태 $q=3$ 은 **좌회전 모드(Turning Left Mode, TL, S_3)**로서 각 바퀴의 속도(v_1, v_2)를 $v_1 < v_2$ 의 일정한 비율의 기준 속도 명령을 추종하도록 하여 좌회전 동작을 제어하기 위한 제어 모드이다. 이산상태는 $q=3$ 이고 이산 제어 특성은

$$v_1^d = kv_2^d, \quad 0 < k < 1. \quad (10)$$

이다.

- 4) 이산상태 $q=4$ 는 **우회전모드(Turning Right Mode, TR, S_4)**로서 각 바퀴의 속도(v_1, v_2)를 $v_1 > v_2$ 의 일정한 비율의 기준 속도 명령을 추종하도록 하여 우회전 동작을 제어하기 위한 제어 모드이다. 이산상태는 $q=4$ 이고

이산 제어 특성은

$$v_1^d = kv_2^d, \quad k > 1. \quad (11)$$

이다.

- 5) 이산상태 $q=5$ 는 **정지모드(Stop Mode, Stop, S_5)**로서 각 바퀴의 기준 속도 명령은 $v_i^d = 0$ 이 되고 바퀴속도를 감속시켜 정지상태가 되도록 한다. 이산상태는 $q=5$ 이고 이산 제어 특성은

$$\dot{v}_1^d = \dot{v}_2^d = -\lambda \quad (12)$$

이다.

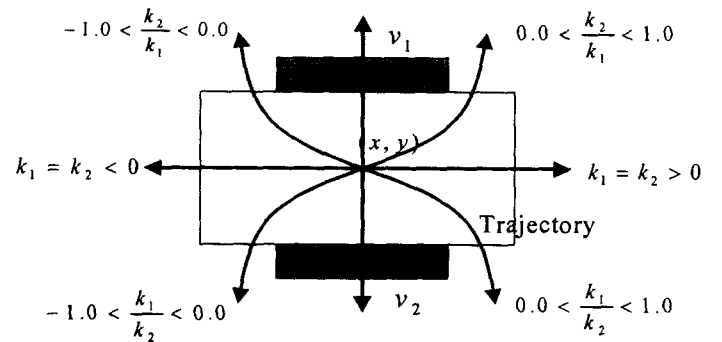


그림 2 이동로봇의 간략화 동작 특성

Fig. 2 Abstracted motions of mobile robot for path following

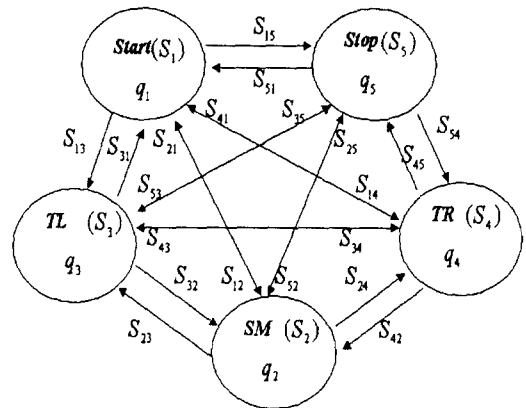


그림 3 하이브리드 오토마타를 이용한 이산상태 제어기

Fig. 3 Discrete-state system using hybrid automata

상위 수준의 각 이산상태에서의 제어모드들은 오토마톤(automaton)을 이용하여 이산사건 시스템을 구성할 수 있으며 이는 그림 3과 같이 구성 할 수 있다. 그림 3의 이산상태 제어기는 상위수준에서 이동로봇의 각 바퀴에 대한 기준 속도 명령을 생성 및 출력하여 이동로봇의 동작을 결정하게 한다. 각 오토마톤 간의 이산상태 천이는 하위의 연속상태 변수에 의해 논리적 판단 또는 이산사건이 발생 하여 각 이산상태 간의 상태천이가 이루어진다. 결국 상위의 이산사건 시스템에 의해 하위의 이동로봇이 추종해야 할 각 바퀴의 속도가 결정된다. 그림 3에서 S_{ij} 는 이산상태 천이를 위한 천이 조

건이며 아래첨자 i, j 는 각각의 이산상태를 표시한다. 이산상태 천이조건은 다음 장에서 구체적으로 설명하기로 한다.

그림 3의 이산사건 제어기는 하이브리드 제어기의 상위계층에서 이동로봇의 주행을 위한 각 바퀴의 기준 속도를 생성하는 각 바퀴의 기준 속도 생성기이다. 이산상태의 천이는 하위의 연속상태 변수와 경로에 의해 결정되며 이는 인터페이스 시스템에서 결정된다. 이산사건제어기의 오토마톤은 5개의 요소를 갖는 (E, Q, S, Y, h) 로 구성되어있다. 여기서 E 는 이산사건 집합이며, Q 는 이산상태변수 공간이다. 그리고 $S: Q \times E \rightarrow Q$ 는 이산상태 천이 함수이고 Y 는 출력 변수 집합이며 $h: Q \times E \rightarrow Y$ 는 오토마톤의 출력함수이다.

3. 하이브리드 시스템 모델과 제어 구조

일반적으로 차륜형 이동로봇 시스템은 논홀로노믹 구속조건으로 인하여 모든 상태 변수를 독립적으로 제어 할 수가 없다[13,14,15]. 따라서 주행 공간상의 주어진 모든 경로를 추종할 수가 없다. 이는 시스템의 제어 입력 변수에 비하여 제어해야 할 변수가 많기 때문이며, 주어진 초기 조건에 따른 시스템의 평형점이 달라지며 평형점을 구하기가 어렵기 때문이다. 그리고 로봇에 요구되어지는 작업 공간이 복잡하고 시변(time-varying)일때 작업 수행을 위한 논리적 판단과 같은 이산적 동작 특성이 포함되어 있다. 결국 다양한 작업환경에서의 실시간 제어성을 갖는 경로계획과 동작제어를 위한 효율적인 시스템 모델과 제어 구조가 필요하다. 한편, 이동로봇의 자율적 주행을 위한 하이브리드 시스템 모델[16]은 이산상태와 연속상태가 결합된 모델로서 이동로봇의 주행을 위하여 경로 계획과 동작 제어를 위하여 효과적이다.

본 논문에서는 이동로봇의 경로 계획과 동작 제어를 위하여 하이브리드 제어 방법[8-11]을 도입하였다. 이동로봇의 주행작업은 센서 정보로부터 얻어진 환경 정보로부터 이동로봇이 추종 가능한 경로 계획과 동작제어로 나눌 수 있다. 앞장에서 구한 이산상태 모델을 이용하여 로봇의 기준 동작을 계획하고 각 바퀴의 속도 명령을 생성하는 상위의 이산사건 제어기와 하위 수준의 바퀴 속도 제어를 위한 연속 상태 제어기, 그리고 상위와 하위의 제어기를 연결하고 자율적 주행을 위한 인터페이스 제어기를 결합한 이동로봇의 하이브리드 제어 구조를 제안한다.

이동로봇의 주행을 위한 제어 시스템의 설계는 주어진 이산상태 q 와 각각의 제어모드에서 하위의 연속 상태 제어기의 제어입력을 구하는 것으로, 위의 그림 3의 이산 상태 제어 모드인 오토마톤간의 이산 상태천이를 효과적으로 모델링하고 이산상태 제어기와 연속 상태제어기와 결합된 형태의 하이브리드 시스템 모델은 다음과 같다. 그림 2의 이동로봇 시스템의 식(1)과 (2)로 표현된 연속상태 시스템은 그림 3의 이산사건 시스템과 결합한 하이브리드 제어기의 구조는 그림 4에 표현되어 있으며 하이브리드 모델은

$$\dot{x}(t) = f_q(x(t), q, u(t)), \quad (13)$$

$$q = g(x(t)), \quad (14)$$

으로 표현 할 수 있다. 여기서 $x(t) \in X \subset R^n$ 는 연속상

태 공간 X 에서의 연속 상태 벡터이며, $u(t) \in U \subset R^m$ 는 제어입력 벡터이다. $f_q(\cdot): X \times Q \times U \rightarrow X$ 는 주어진 이산상태 q 에서의 연속 상태 벡터에 의한 시스템이 전개(evolve)되는 궤적으로 이산상태변수와 연속 상태변수에 의해 결정된 벡터 필드이다. 이산상태 천이 함수 $g(\cdot): X \rightarrow Q$ 이다.

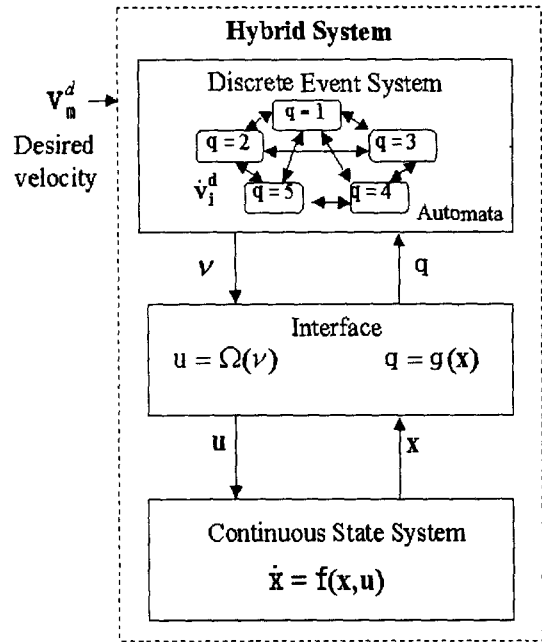


그림 4 하이브리드 제어시스템의 구조.
Fig. 4 Hybrid control system for mobile robot.

식(13)과 (14)로 주어진 하이브리드 시스템의 동작 특성은 먼저, 초기조건 $(x_0, q_0) \in I_0 \subset X_0 \times Q_0$ 에서 초기 시간 t_0 에서 출발한 연속상태 벡터 x 의 궤적인 $\dot{x} = f_q(x, q, u)$ 에 의해 결정된다. 즉, 주어진 이산상태 $q=i$ 라면, 상위의 이산상태 제어기의 기준 속도 출력값에 따라 결정된 제어입력 벡터 u 에 의해 궤적이 결정되며 이때 이산상태는 $q=i$ 를 유지하게 된다. 연속상태변수가 상태 천이 조건 S_{ij} 의 점 또는 영역(region)에 도달(hit or intersect)하게되면 이산상태의 상태 천이가 발생된다. 즉, $x \in \partial S_{ij}$ 일 때 이산상태는 $q=i$ 에서 $q=j$ 로 천이를 하게 된다. 상태천이 순간의 연속 상태 변수 값들이 초기값이 되며 시간 t 는 0으로 초기화된다.

그림 4에 표현된 하이브리드 제어 시스템의 구조는 3계층의 계층적 구조로 상위 수준의 이산상태 제어기는 디지털 오토마톤을 이용하여 구성되어 있으며 이동로봇의 경로 추종을 위한 각 바퀴의 기준 속도를 생성한다. 즉, 이동로봇의 각 바퀴에 대한 기준 제어입력을 결정한다. 상위와 하위 시스템 사이의 인터페이스 계층은 두 가지 연결 함수로 구성되어 있다. 첫째, 이산사건 발생 함수 $g(\cdot)$ 는

$$q = g(x(t)) \quad (15)$$

로 주어지며 연속상태 변수들로부터 이산상태를 결정하고, 이를 상위의 이산사건 시스템의 입력으로 전달한다. 상위의 기준 동작 명령을 하위의 각 바퀴 속도로의 제어입력 변환 함수 $\Omega(\cdot)$ 는 이산사건 시스템의 기준동작을 로봇의 각 바퀴에 대한 제어입력으로 변환해 준다. 식(16)에 의해 각 바퀴에 대한 제어입력을 결정하게 되며

$$u(i) = \Omega(v_i), \quad (16)$$

으로 표현된다. 여기서 $v_i, i \in Q$ 는 이산사건 제어기의 출력이다. 인터페이스 계층의 다른 중요한 역할은 경로 계획이다. 일반적으로 경로계획은 전체 또는 부분적인 환경의 지도를 구한 다음 추종 가능한 경로를 계산하는 방법을 사용한다. 그러나 많은 메모리와 계산량으로 인하여 비효율적이며 시변 환경에 대해서는 새로운 경로를 구해야 하는 문제가 있다. 초음파 센서, 카메라 등을 이용해 얻게 되는 주행공간의 정보는 일반적으로 2차원 공간정보이며 각각의 탐지점들을 연결한 직선형태이다. 이러한 경로는 논홀로노믹 이동로봇이 추종하기 위해서는 추종 가능한 경로를 계획하여야 한다. 또한, 실시간으로 경로를 계획하기 위해서는 국부 경로를 계획하여야 한다. 실시간 경로 계획을 위하여 부분적 작업 공간에 대한 경로 계획 방법은 다음과 같다. 그림 5와 같이 센서로부터 각각의 탐지점들을 연결한 직선으로 구성된 작업 공간의 국부 경로 P_s 를 얻을 수 있고 국부 경로 P_s 의 비선형점인 B점과 교차각 α 는 주어진다 가정하자. 로봇이 논홀로노믹 구속조건을 만족하면서 정지 없이 P_s 를 추종 할 수 없으므로 경로 계획이 필요하다. 직선과 원의 조합으로 구성된 새로운 경로를 P_n 이라 한다면 A지점과 C지점을 접하는 반지름 R인 원을 쉽게 구할 수 있다. 원의 중심점을 구하기 위하여 B지점과 A지점의 거리 $d=B-A$ 와 반지름 R은

$$d = R \tan \alpha, \quad R = \frac{k+1}{k-1} b, \quad (17)$$

로 결정된다. 여기서 k 는 각각의 이산상태 제어모드에서 결정된 각 바퀴의 속도 비율로 식(8-12)에서 주어진다. 그림 5의 경로에 대한 로봇의 위치와 자세로 표현하면

$$P_n : (x_0, y_0, \phi_0) \rightarrow A(x_a, y_a, \phi_a) \rightarrow B(x_b, y_b, \phi_b - \alpha) \rightarrow (x_f, y_f, \phi_f - \alpha) \quad (18)$$

로 결정된다. 여기서 (x_0, y_0, ϕ_0) 와 (x_f, y_f, ϕ_f) 는 각각 로봇의 초기위치와 자세, 최종점의 위치와 자세이다. 식(18)의 계획된 경로 P_n 에 대한 동작 계획은 간단하게 이산상태 제어모드를 이용하여 정의하면

$$q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_2 \quad (19)$$

로 결정되며 이산상태 천이 조건 S_{ij} 는 S_{23} 과 S_{32} 로서 식(17)의 로봇의 위치와 자세 그리고 식(18)의 동작 순서에 의해 발생한다. 예를 들어 S_{23} 은 로봇의 연속상태 변수 x 가 A지점 (x_A, y_A, ϕ_A) 에서 이산상태 천이가 일어난다. 즉, 상태변수 x 가 (x_A, y_A, ϕ_A) 의 영역에 도달하게 되면 이산상태 변수 q_2 는 q_3 로 상태천이를 하게 된다.

하위 수준의 연속 상태 시스템은 각 바퀴의 속도제어를 위한

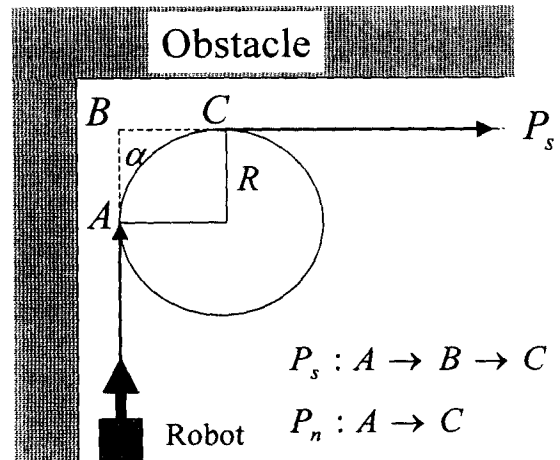


그림 5 경로 계획과 동작계획

Fig. 5 Path planning and motion planning

PD형의 속도 제환제어기로 구성되어 있다. 입력-출력 선형화 방법을 이용하여 출력 변수를 v_1, v_2 로 선정하고 계산-토크(computed-torque) PD-제환 속도제어기는

$$\tau = B_s^{-1}(x)((\ddot{x}_1^d - f_s(x)) - k_d(\dot{x}_1 - \dot{x}_1^d) - k_p(x_1 - x_1^d)) \quad (20)$$

과 같이 얻을 수 있다[16]. 식(20)은 출력변수를 각바퀴의 속도 v_1 과 v_2 로 정하여 입력-출력 제환 선형화방법[16]을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 상세한 과정은 생략하기로 한다. 여기서 $x_1 = [\theta_1 \ \theta_2]^T, x_2 = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ 이다. 각 바퀴의 속도 제어를 위한 제환 제어기의 구조는 그림 6에 주어져 있다.

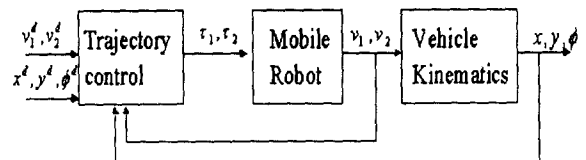


그림 6 속도 제어를 위한 연속상태 시스템의 구조

Fig. 6 Continuous-state system for wheel velocity controls

4. 인터페이스 제어기와 자율주행

본 장에서는 앞에서 제안한 이동로봇의 하이브리드 제어 방법을 세 가지의 작업들에 대한 적용을 통하여 성능을 평가하고 적용 가능성을 살펴보았다.

첫째로 그림 7(b)에서와 같이 직선으로 구성된 비선형 경로를 주어졌을 때 로봇이 이동 속도 $v_m^d > 0$ 를 유지하면서 주행해야 하는 경우를 생각해보자. 먼저, 주어진 비선형 경로 P_s 에 대하여 로봇이 추종 가능한 경로 P_n 은 원과 직선의 조합으로 경로를 계획 할 수 있다. 계획된 경로의 궤적 추종은 이산사건 시스템의 간략화 동작 특성인 이산상태 변수의 상태 천이 순서는 $q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_2$ 로 결정된다. 계획된 경로 P_n 을 로봇의 위치와 자세 (x, y, ϕ) 로 표현하면

$$P_n : A([x_0, x_a], y_0, 0) \rightarrow B([x_a, x_b], [y_a, y_b], [0, \pi/2]) \rightarrow C(x_c, [y_b, y_c], \pi/2) \quad (21)$$

로 정의된다. 또한 이산상태의 천이 조건은 $S_{23} \rightarrow S_{32}$ 이다. 이산사건은 연속 상태 x 가 S_{ij} 의 점 또는 영역에 도달하면 이산상태의 천이가 발생하게 된다. 그림 7(a)는 이산사건 제어기의 각 바퀴의 기준 속도 출력이며 오토마톤을 이용한 이산사건 제어기에서의 오토마톤간의 이산상태 천이 $q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_2$ 로 결정되며 그림 8과 같이 표현 할 수 있다

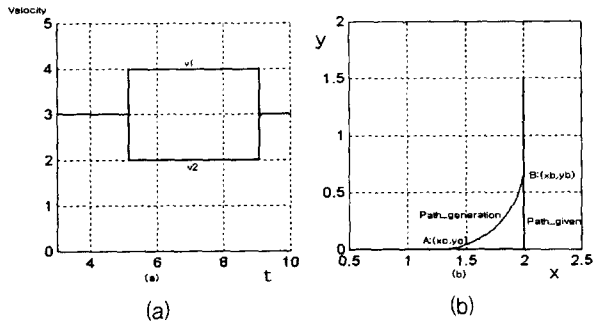


그림 7 (a) 이산상태 제어기의 기준 속도 출력, (b) 이동로봇의 궤적
Fig. 7 (a) Reference velocity output of discrete state controller, (b) Trajectory of robot

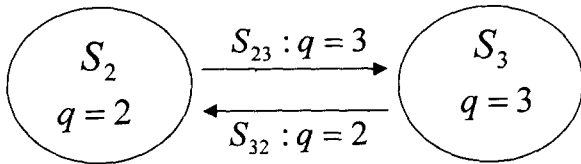


그림 8 오토마톤을 이용한 이산상태 제어모드의 구성과 상태 천이
Fig. 8 Design of discrete state control mode and state transition using automata

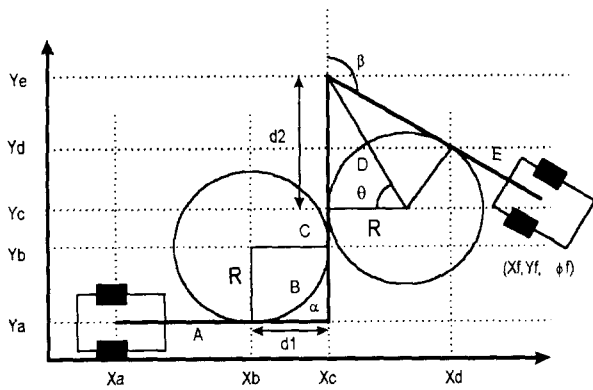


그림 9 센서로부터의 비선형 경로와 새로운 경로 생성
Fig. 9 Nonlinear path from sensors and newly planned path generation

둘째로, 좀더 복잡한 환경에서의 유연한 자율 주행 특성을 평가하기 위하여 센서로부터 얻어진 그림 9와 같은 경로 P_s : ($A-C-E$)에 대한 하이브리드 제어 방법을 적용해보기로 한다. 먼저 이동로봇이 추종 가능한 경로 P_n 은 직선과 원으로 구성된 새로운 경로 P_n : ($A-B-C-D-E$)를 얻을 수 있다. 경로 P_n 을 추종하기 위한 이산 제어모드는 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4 \rightarrow S_5$ 로 결정되며 이산상태 천이의 순서는 $S_{12} \rightarrow S_{23} \rightarrow S_{32} \rightarrow S_{24} \rightarrow S_{42} \rightarrow S_{25}$ 로 주어진다. 이동로봇의 중심의 위치와 자세에 대한 P_n 은

$$P_n : A([x_a, x_b], y_a, 0) \rightarrow B([x_b, x_c], [y_a, y_b], [0, \alpha]) \rightarrow C(x_c, [y_b, y_c], \alpha) \rightarrow D([x_c, x_d], [y_c, y_d], [\alpha, \alpha - \beta]) \rightarrow E([x_d, x_f], [y_d, y_f], \alpha - \beta) \quad (22)$$

으로 결정된다.

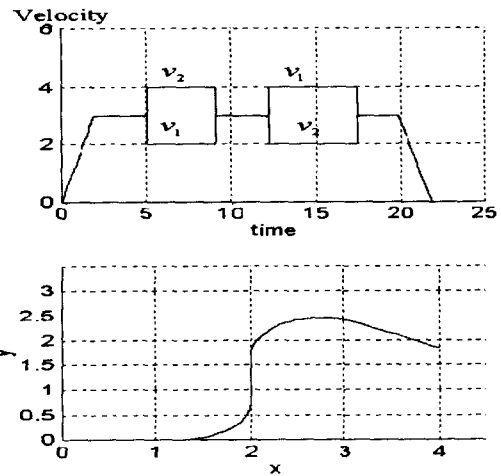


그림 11 오토마타의 기준 속도 출력(위)과 로봇의 궤적(아래)
Fig. 11 Reference wheel velocities of automata and trajectory of robot

이산상태 천이조건 S_{ij} 는 식(16)에 의해 손쉽게 구할 수 있다. 기준 속도 $v_m^d = 3 \text{ m/sec}$ 에서의 모의 실험에서 이산상태 제어기의 출력과 실제 바퀴 속도와 로봇의 궤적은 그림 10에 주어져 있다

셋째로, 이동로봇의 두 지점간의 이동을 위한 위치와 자세 제어에 대하여 대해서 제안한 하이브리드 제어방법을 적용해보기로 한다. 자유공간에서 그림 11과 같이 로봇이 임의의 지점에 $z_0 = (x_0, y_0, \phi_0)$ 로 놓여 있을 때 기준 이동속도 v_m^d 를 유지하며 원하는 이동지점 $z^d = (x^d, y^d, \phi^d)$ 로의 자세와 궤적 추종의 문제라 할 수 있다.

먼저, 두 지점간 추종 가능한 경로를 생성을 하여야 한다. 이를 위하여 주어진 두 지점을 이동로봇 중심점 (x_c, y_c) 을 지나며 자세 ϕ 와 평행되는 직선에 대하여 수직되는 접선상의 반지름 r 의 원을 설정한다. 그림 11.에 나타낸 것과 같이

중심점이 c_f, c_i 인 두 개의 원은

$$c_i(x_i, y_i) = (x_0 + r\cos(\phi_0 + \pi/2), y_0 + r\sin(\phi_0 + \pi/2)), \quad (23)$$

$$c_f(x_f, y_f) = (x_d + r\sin\phi_d, y_d - r\cos\phi_d), \quad (24)$$

들로 구할 수 있다. 여기서 $\gamma = \frac{k+1}{k-1}b$ 이며 β 는 기준 좌표계 (X, Y) 에 대하여 c_i 와 c_f 를 지나는 직선과의 각도로서

$$\beta = \pi - \tan^{-1}\left(\left|\frac{y_0 - y_f + 2r}{x_0 - x_f}\right|\right) \quad (25)$$

로 쉽게 구할 수 있다. 생성된 경로 $P_n : P_{c_i} - P_2 - P_{c_f}$ 에 대한 이산상태 제어모드의 순서는 $S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4$ 로 결정되며 이산상태 천이 순서는 $S_{32} \rightarrow S_{24}$ 이다. 기준 이동속도 $v_m^d = 6m/sec$ 와 초기 위치 $z_0 = (7, 1, 45^\circ)$ 에서 이동지점 $z^d = (3, 5, 45^\circ)$ 까지의 하이브리드 제어 결과는 각각 그림 12와 그림13에 주어져 있으며 위치와 자세의 단위는 각각 m 와 각도이다.

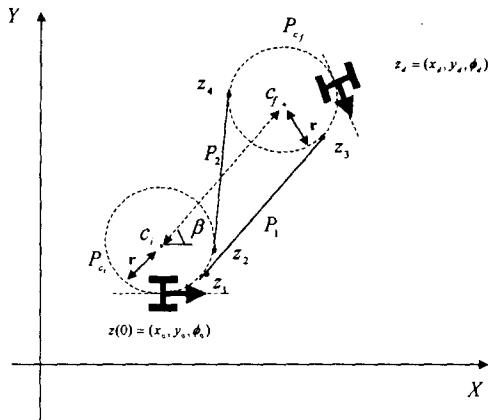


그림 11 두 지점간의 경로 계획 및 동작제어
Fig. 11 Path planning and motion control from one point to another

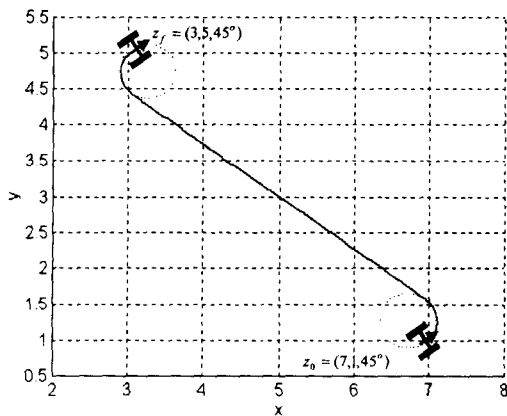


그림 12 두 지점간의 궤적과 자세제어 결과
Fig. 12 Results of trajectory and orientation control

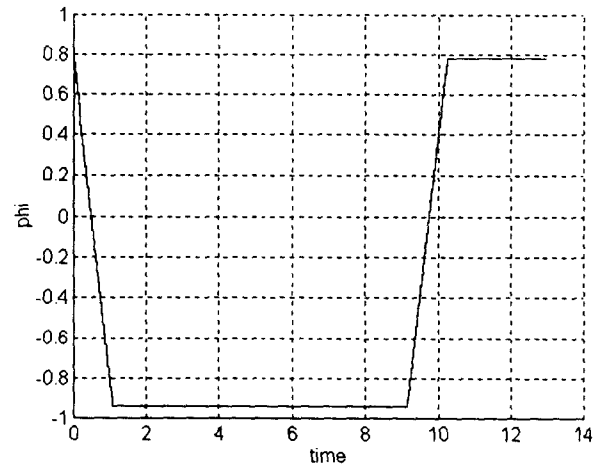


그림 13 이동로봇의 전 방향 각의 제어 결과
Fig. 13 Control of heading angle of mobile robot

5. 결론

본 논문에서는 논홀로노믹 구속조건을 갖는 바퀴 구동형 이동로봇 시스템의 자율 주행을 위한 하이브리드 제어 시스템 모델과 제어기를 제안하였으며 경로 계획과 동작 제어를 위한 하이브리드 제어 알고리즘을 제안하였다. 하이브리드 제어기는 3-계층의 계층적 구조로 상위 수준의 이산사건 제어기와 하위 수준의 연속상태 제어기, 그리고 상/하위 제어기의 상태 공간의 연결과 상호작용을 고려한 인터페이스 제어기로 구성되어있다. 이산사건 제어기는 이동로봇의 동작특성을 간략화 수준으로 모델링 하였으며 오토마톤을 이용하여 두 바퀴의 기준 속도를 생성하는 제어기를 구성하였다. 연속상태 제어기는 입력-출력 선형화 방법을 이용하여 바퀴의 속도제어를 위한 계산-토크 PD 제어기를 구성하였다. 인터페이스 시스템은 이동로봇의 주행을 위하여 추종 가능한 국부 경로를 생성하고 경로에 따른 이산상태 천이 조건들을 구하였다. 또한, 연속상태 $x(t)$ 에 의한 이산상태를 발생하게된다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 모델과 제어기를 이용하여 다양한 비선형 경로에 대하여 효과적인 이동로봇의 동작제어 성능을 보였으며, 두 지점간의 이동과 자세제어를 위한 새로운 제어방법을 제시하고 성능의 우수성을 보였다.

참고 문헌

- [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, 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 Nonholonomic Mobile

Robots," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 5, pp. 577-592, 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, 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, Univ. C. Berkeley, 1995.

[13] J. M. Coron and B. d'Andrea-Novel, *Global Asymptotic Stabilization for Controllable Systems without Drift*, *Mathematical Control on Signal and Systems*, Vol. 5, pp. 295-312, 1992.

[14] R. W. Brockett, *Asymptotic Stability and Feedback Stabilization*, *Differential Geometric Control Theory*, Boston: Birkhauser, pp. 181-191, 1983.

[15] C. Samson and K. Ait-Abderrahim, "Feedback Control of a Nonholonomic Wheeled Cart in Cartesian Space," IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 1136-1141, 1990.

[16] 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.

저 자 소 개



임 미 섭(林美燮)
 1963년 11월 27일생. 1986년 한국항공대 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한양대 대학원 전자공학과 박사과정
 Tel : 02-958-5747, Fax : 02-958-5749
 E-mail : mslim@amadeus.kist.re.kr



임 준 홍(林俊弘)
 1956년 11월 21일생. 1979년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 한국과학기술원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 IOWA대 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1986년~1989년 한국항공대 조교수. 1989년~현재 한양대 전자·컴퓨터 공학부 교수
 Tel : 0345-400-5175, Fax : 0345-418-3397
 E-mail : jhlim@aser.hanyang.ac.kr