

제한 동작 로봇의 강성도 적응성을 갖는 하이브리드 동적 제어에 관한 연구

Hybrid Dynamic Control Approach for Constrained Robot Motion Control with Stiffness Adaptability

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

Abstract : In this paper, we propose a new motion and force control methodology for constrained robots as an approach of hybrid discrete-continuous dynamical system. The hybrid dynamic system modeling of robotic manipulation tasks with constraints is presented, and the hybrid system control architecture for unconstrained and constrained motion system with parametric uncertainties is synthesized. The optimal reference stiffness of robot manipulator is generated by the hybrid automata as a discrete state system and the control behavior of constrained system which has poor modeling information and time-varying constraint function is improved by the constrained robots as a continuous state system. The performance of the proposed constrained motion control system is successfully evaluated via experimental studies to the constraint tasks.

Keywords : constrained motion, stiffness adaptation, hybrid control, robot

I. 서론

로봇과 자동화 시스템에서의 중요한 문제점 중의 하나는 간단한 시스템을 위한 단순한 제어 기술들이 실제적으로 구현되어 있는 반면에 요구되어지는 작업들은 점차적으로 복잡해지고 다양한 작업으로 확대되고 있다는 것이다. 또한, 주어진 로봇 작업에서 의사 결정(decision making)과 지능적 제어 성능을 위한 제어 방법들은 아직도 부족한 편이며 제어 기술들은 다양한 제어 요구에 대하여 한계가 있다. 뿐만 아니라 다양한 센서들과 장치들의 신호들을 처리하는 복잡한 작업의 관리(supervision)는 로봇의 동작제어를 더욱 어렵게 하고 있다. 따라서 로봇의 동작 제어와 복잡한 작업 수행을 위한 제어 구조의 필요성이 요구되지만 아직 복잡한 로봇 작업을 표현 및 제어할 수 있는 제어 구조에 관한 연구결과는 많지 않다.

제한(constrained)된 작업공간에서 로봇의 동작 제어, 모니터링, 신호 인터페이스, 그리고 해석은 기존의 로봇 제어기술로는 한계가 있다. 예를 들어, 로봇 매니플레이터의 작업공간상의 위치 오차는 작업공정의 실패의 주된 원인이 될 수 있으며, 조립, 용접, 그라인딩과 같은 공정에서는 힘 제어는 위치제어와 함께 기본적인 제어 기술 부분이며, 각각의 제어 방법의 독립적인 적용으로는 주어진 제어 성능의 요구 조건들을 만족할 수가 없다. 힘 제어와 관련된 분야의 연구[1]-[4]에서는 주로 작업공정의 하위수준(low level)의 제어인 액츄에이터(actuator)의 동작제어에 관련하여 초점을 맞추어 왔었으며, 집중된 연구에도 불구하고 제한적인 성능만을 보였다.

이와는 반대로 주어진 작업에 대한 상위수준(high

level)인 간략화 수준(abstract level)에서의 동작 제어 [7]-[9]와 해석에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 하이브리드 제어 시스템(hybrid control system)[5][6]을 이용하여 작업 환경에 의하여 로봇의 동작이 제한되며 힘 제어 또는 속도제어를 부분적, 또는 동시에 필요로 하는 복잡한 작업을 수행 할 수 있는 로봇의 제한 동작 제어를 위한 새로운 제어 방법을 제시한다. 이를 위하여 3계층의 계층적 구조를 갖는 하이브리드(hybrid) 제어시스템을 제안한다. 3계층의 하이브리드 제어 시스템은, 상위수준에서는 동작 특성 단순화 모델 기반의 이산상태제어기, 하위수준에서는 로봇의 작업 공간에서의 위치 및 힘 제어를 위한 연속상태제어기, 그리고 상/하위의 서로 다른 상태공간을 연결하고 지능적 동작을 위한 인터페이스(interface) 제어기로 구성되어 있다. 이를 위하여, 작업공간에서의 로봇의 동작과 작업 환경간의 상호작용을 간략화 수준에서의 이산상태 시스템 모델을 구하였으며 이를 하이브리드 오토마타(hybrid automata)를 이용하여 이산상태제어기를 설계하였다. 또한, 하위수준의 연속상태제어기는 로봇과 힘-토크 센서로 구성된 로봇 시스템에 대하여 로봇 관절의 강성도(stiffness) 제어를 통하여 위치 및 힘 제어를 할 수 있는 연속상태 제어시스템으로 구성되어 있다. 한편 인터페이스 시스템은 서로 다른 상태공간의 상/하위 제어 시스템들을 연결하고 서로의 상호작용을 연결하여 이산과 연속상태 변수들로 구성된 하이브리드 동적 시스템 모델(hybrid dynamical system model)을 구하였으며, 제한 공간에서의 로봇의 동작과 힘 제어를 위한 하이브리드 제어기를 제안한다.

1. 연구 배경 및 관련 연구

로봇을 이용한 작업 중에 조립작업, 그라인딩(grinding) 작업, 로봇 손을 이용한 물체 조작 등이 모두 제

한 동작 작업이다. 이러한 작업들은 대부분 위치 및 속도제어를 하게 되지만 작업 환경과 특성에 따라서 힘 제어를 필요로 하는 경우도 있다. 로봇을 이용한 제한동작 제어를 위한 연구로는 Hogan[1]이 작업환경에 의해 제한되는 물체의 조작을 위하여 임피던스(impedance) 제어 방법을 제안하였으며 Mason[2]과 Raibert와 Craig[3]은 위치제어와 힘 제어를 동시에 이용하는 방법을 개발하였다. 또한 [3]의 방법을 기초로 한 연구가 진행되어 개선된 제어 성능을 보였다. Tarn[4]은 접촉순간 상태전이(contact transition)에 의해 발생하는 문제점들을 연구하였다. 그러나 이러한 연구에도 불구하고, 제한동작(constrained motion) 시스템의 응용은 비교적 제한적인 작업에 부분적인 제어성능만을 만족하는 결과를 보이고 있다. 그 문제점 중의 하나는 하위수준의 액츄에이터의 동작 제어에 집중되어 있기 때문에 복잡한 작업 특성과 환경에서 위치 및 속도제어 뿐만 아니라 힘 제어를 동시에 필요로 하는 복잡한 작업에서는 전체적으로 요구되어지는 제어성능을 보이기에는 부족한 것이라고 할 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 작업의 특성과 환경의 제한 조건들을 간략하게 모델링한 간략화 수준의 모델이 필요하며 로봇의 제한동작과 작업환경과의 상호관계를 이해하여야 한다.

하이브리드 시스템[5][6]은 연속상태(continuous state) 시스템과 결합된 작업의 특징과 제한동작에 대한 간략화된 개념들을 모델링 한 이산상태(discrete state) 시스템을 전체적으로 모델링 할 수 있으며 해석할 수 있는 뛰어난 수학적 구조를 제공한다. Branicky[5]와 Brockett[6]은 하이브리드 동특성 시스템의 수학적 모델과 해석방법을 제시하였으며 이산상태와 연속상태변수들이 복합적으로 작용하는 복잡한 제어시스템과 작업을 제어하기 위한 뛰어난 장점들을 갖고 있다. 즉, 하이브리드 동적 제어 시스템은 이산상태시스템(discrete state system)이 연속상태시스템(continuous state system)과 결합되어 서로 상호작용을 하게되는 구조로서, 일반적으로 이산상태 시스템은 간략화 수준에서 운영되며 의사 결정기(decision maker) 또는 이산사건 제어기의 역할을 한다. 따라서 연속상태 제어기는 이산상태제어기의 결정 또는 제어입력에 의해 실제적인 플랜트(plant)를 제어하게 된다. 하이브리드 동적 시스템은 제조 공정과 네트워크 프로토콜과 같은 분야에 점차 적용되고 있다. 예를 들어, 제조시스템(manufacturing system)의 제충적 해석을 위해 Petri net을 사용하고 있으며 [7]은 엘리베이터 시스템 제어를 위해 하이브리드 시스템을 이용한 최적 분산제어(optimal dispatching control)이론을 제시하였다. 하이브리드 시스템에 관한 대부분의 연구 분야들은 특정시스템에 대한 제어이론들을 개발하고 타당성을 증명하는데 집중되어 있었다. Stiver와 Antsaklis[8][12] 그리고 Gollu와 Varaya[9]는 하이브리드 시스템의 모델링과 해석을 위한 일반적인 구조(formulation)를 제시하였다. 또한 Brockett[6]은 하이브리드 동특성을 이용하여 동작제어시스템의 넓은 범위에서의 모델링을 위한 일반적인 기초를 마련하였

다. 또한 하이브리드 동적 시스템의 구조에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[10]-[12].

2. 연구 동기 및 문제 구성

일반적으로 로봇의 링크(link)는 유연성이 없는 강체(rigid body)로 되어있다. 이는 로봇이 물체를 옮기거나 용접, 페인팅 등과 같은 작업에서 주어진 궤적의 정밀한 추종과, 간단한 제어기로 위치 및 속도 제어 성능을 구현하기 위하여 강체로 설계되어 있다. 그러나 로봇 매니퓰레이터가 작업 환경과 접촉이 발생하게 되고 상호작용에 의해 물체로부터 end-effector로 반발하는 힘이 발생하게 된다. 이때 힘 제어가 되지 않으면 로봇의 관절이나 링크 혹은 작업 물체에 손상을 가져 올 수 있다. 로봇의 동특성은 액츄에이터의 특성, 마찰, 접촉상태 등에 의해 결정된다. 힘 제어만을 할 때는 작업 환경과 물체에 대한 정확한 정보를 필요로 하며, 위치 제어기만으로는 작은 위치 오차에도 과도하게 큰 힘이 인가되므로 강체의 물체에 대해서는 로봇이 손상을 입게된다. 임피던스 제어방법은 위치제어 방법과 유사하지만 로봇의 임피던스를 제어하는 방법이다. 그러나 로봇의 동특성과 환경의 정보가 정확하지 않을 때는 성능을 보장할 수 없는 단점이 있다. 병렬 힘/위치 제어 방법 또한 기준 속도(reference velocity)와 원하는 힘의 크기를 결정하기 위해서는 주어진 작업환경 또는 물체에 대한 정확한 정보를 필요로 하는 단점이 있다. 한편, 로봇은 일반적으로 대표적인 비선형 시스템으로 정확한 파라미터를 얻기는 매우 힘들며 작업 중에도 부하의 변화와 동특성의 변화 등으로 정확한 모델 파라미터를 얻기가 힘들다. 또한, 작업 물체의 정확한 강성도(stiffness) 파라미터를 구하기란 거의 불가능하다.

자유공간에서의 로봇 제어와 물체와 접촉된 상태에서의 로봇 제어의 차이는 로봇의 동작이 작업환경에 의하여 제한을 받게된다는 것이다. 즉, 제한조건들에 의하여 로봇의 동특성 모델이 바뀌게 된다. 제한 조건(constraints condition)은 시간 미분형태와 힘과 같은 구성변수(configuration variables)들 간의 관계이다. 제한 동작 로봇을 위한 연구들은 대부분 Lagrange 형태를 이용하여 모델링과 제어 그리고 해석을 하여왔으며, 물체와의 접촉 상태에서의 동작제어 문제는 액츄에이터 제어와 같은 하위수준에 집중되어 있었으며 그 결과들은 제한된 제어성능만을 보였다. 위에서 설명한 제한 동작 제어기들은 대부분 주어진 시스템의 강성도 파라미터와 공간정보(geometry)들과 같은 모델링 정보들을 필요로 한다. 그러나 로봇과 작업환경 그리고 상호작용에 대한 정확한 동적 모델을 구하기는 매우 힘든 일이다. 따라서 제한동작제어에 필요한 가장 중요한 점은 접촉 강성도(contact stiffness)의 불확실성이라고 할 수 있다.

로봇의 제한동작 시스템은 주어진 작업과 환경에 의해 힘 제어 또는 위치제어의 형태로 주어진다. 즉, 로봇의 제한동작 제어는 작업 환경 또는 조작 물체와의 접촉이 없을 경우와 접촉이 있을 경우로 크게 구분된다. 전자의 경우 정밀한 위치와 속도 제어가 요구되고 후자의

경우 작업의 요구에 따라 제어 성능과 제어기의 구성이 달라지게 된다. 이처럼 주어진 작업과 환경 그리고 로봇의 구조에 의해 로봇 제어기는 많은 제어성능을 요구받게 된다. 하이브리드 동특성 시스템 구조는 복잡한 작업과 제한 동작 조건에서 연속 상태와 이산상태 요소들을 결합하여 모델링 및 제어할 수 있는 이상적인 모델링 방법이며 해석을 가능하게 한다. 본 논문에서는 하이브리드 시스템의 응용으로 제한 동작 로봇 시스템을 대상으로 로봇과 작업물체와 공간에 대한 모델의 불확실성이 존재하는 작업들을 대상으로 제한조건들에 의해 동작의 제한이 주어지는 환경에서의 유연한 동작제어기를 제안한다. 이를 위하여 먼저, 로봇 제한 공간들에 대하여 하이브리드 동적 모델을 구하였으며, 주어진 작업과 제한 동작 조건에서 하이브리드 동특성 시스템 구조를 이용하였다. 이는 3계층의 계층적 구조를 갖고 있다. 상위계층에는 로봇의 제한동작을 위한 간략화 운동(abstrated motion)을 정의하여 이산상태 제어기를 구성하였으며 하위계층으로는 작업공간(task space)에서의 강성도 제어를 위한 연속상태제어기를 구성하였다. 또한 인터페이스 계층에서는 상위와 하위의 서로 다른 상태공간의 제어를 연결하고 서로간의 상호작용을 제어 할 수 있는 인터페이스 제어기로 구성되어있다.

II. 제한동작 시스템의 하이브리드 동특성 모델

본 논문에서는 그라인딩(grinding)작업과 같이 자유공간에서의 위치제어와 접촉상태에서의 힘 제어를 필요로 하는 작업을 대상으로 하며 작업 물체의 위치정보는 불확실하다고 가정한다(그림 1 참조). 이때 제한동작 시스템 제어의 두 가지 중요한 요구사항은 다음과 같다. 첫째, 자유공간에서는 주어진 궤적을 가능한 정확히 추종해야 하며 둘째, 접촉상태에서는 제한방향(constrained direction)으로는 원하는 접촉력(contact force)을 유지하면서 비제한방향(unconstrained direction)으로는 로봇의 end-effector의 속도를 제어해야 한다. 일반적으로 불확실한 모델 오차와 시-변 제한 조건 함수(time-varying constraint function)들로 인하여 정확한 강성도 파라미터를 구하기는 어렵다. 특히, 강성도 파라미터의 불확실성은 힘 제어 시스템의 성능을 약화시키는 주된 요인이다.

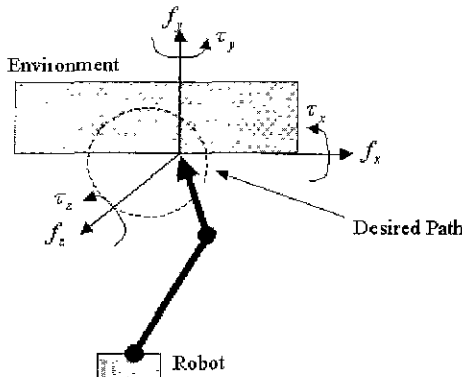


그림 1. 제한공간에서의 그라인딩 작업.
Fig. 1. Grinding an object in constrained space.

제한 동작 시스템은 접촉과 비접촉에 따른 동특성이 서로 다르게 스위칭 하게 되고, 이에 따른 제어 방법 또한 달라져야 한다. 이와 같은 작업에서 서로 다른 동특성을 제어하기 위하여 하이브리드 시스템 모델[6]을 이용하기로 한다. 하이브리드 모델링 방법은 연속상태 제어시스템과 결합되어 이산 사건적인 작업 특성을 가장 정확하게 모델링 할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 하이브리드 시스템은 이산상태 시스템과 연속상태 시스템이 결합된 시스템이며 하이브리드 상태변수는 이산 및 상태 변수가 결합된 상태 공간이다. 본 논문에서는 로봇의 제한동작 제어시스템을 위한 하이브리드 동적 모델을 Branicky[13]의 모델에 기초하였다.

그림 1과 같은 작업에서 시스템의 동특성은 접촉과 비접촉에 상태에 따라서 시스템의 동특성이 다르며 이들은 작업상태간의 천이(transition)에 따라서 동특성의 스위칭이 발생한다. 하이브리드 동적 시스템 모델(hybrid dynamic system model)은 제한 동적 시스템을 매우 효과적으로 모델링 할 수 있으며 복잡한 작업 특성을 상위 수준에서 간략하게 모델링 할 수 있는 방법이다. 본 논문에서 제안한 제한 동작 로봇 시스템을 위한 하이브리드 동적 시스템 모델은 그림 2에 주어져 있다.

3-계층의 계층적 구조를 갖는 하이브리드 동적 시스템은 상위계층으로 로봇 동작의 이산 사건적 모델특성을 기반으로 한 이산상태 시스템과 하위 계층의 로봇 액추에이터 제어를 위한 연속 상태 시스템, 그리고 상/하위 시스템의 서로 다른 상태공간을 연결하고 상호작용을 제어하기 위한 인터페이스 시스템으로 구성되어 있다. 상위 수준의 이산-상태 시스템은 간략화 수준(abstract level)에서 논리적 결정(decision)을 위한 이산-사건 제어시스템이며 연속-상태 시스템은 이산-상태시스템의 결정에 의해 액추에이터를 실제적으로 구동하는 하위수준의 제

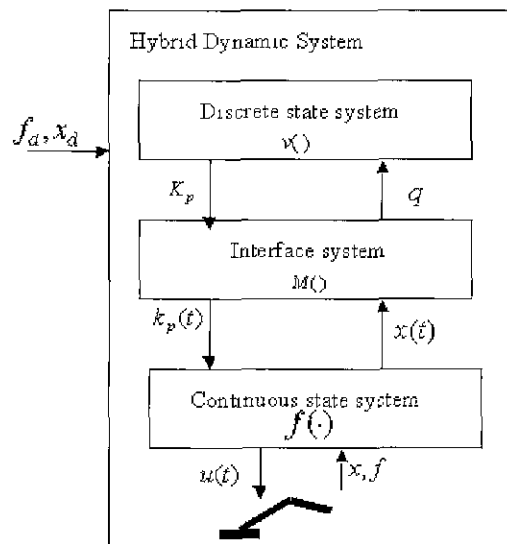


그림 2. 제한동작 로봇을 위한 하이브리드 동적 시스템 구조.
Fig. 2. Block diagram representation of hybrid dynamic system for constrained robots.

어시스템이다. 한편, 인터페이스 시스템은 상/하위의 서로 다른 상태공간의 변수를 변환하여주며 이산상태의 상태 천이 조건을 결정한다. 즉, 연속-상태변수 $x(t)$ 에 의해 이산-상태 q 를 결정한다. 이를 (1)로 표현 할 수 있다.

하이브리드 동적 시스템은

$$H=[Q, \Sigma, V, A, G] \quad (1)$$

으로 여기서, 이산상태 $Q \subset \{1, 2, \dots, N\}$, 연속상태 동적 시스템의 집합 $\Sigma = \{\Sigma_q\}_{q \in Q}$ 로서 $\Sigma_q = [X_q, f_q]$ 로서 X_q 는 연속상태 변수, f_q 는 연속상태 동특성이다. 또한 $V = \{v_q\}$ 는 이산상태 동특성이고, $A = \{A_q\}_{q \in Q}, A_q \subset X_q$ 로 동특성의 스위칭 집합(switching set)이다. G 는 이산상태 천이 관계(discrete state transition map)로 $G = (G_q)_{q \in Q}, G_q: A_q \rightarrow \bigcup_{q \in Q} X_q \times \{q\}, S = \bigcup_{q \in Q} X_q \times \{q\}$. S 는 하이브리드 상태 공간으로이다. 즉, 연속상태변수와 이산상태 변수의 조합 $S_q = X_q \times \{q\}$ 이다.

III. 제한 동작 로봇 시스템

하이브리드 동적 시스템 구조에서 연속상태 시스템은 로봇에 힘과 토크 입력을 제공할 수 있는 강성도 제어(stiffness control) 시스템이다. end-effector 또는 작업공간에서의 로봇의 동작 방정식(motion equation)은

$$z(\dot{t}) = f_q(z(\dot{t}), u(\dot{t})), \quad q = \{1, 2\} \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 q 는 이산상태이며, $z(\dot{t})$ 는 연속 상태 벡터, $u(\dot{t})$ 는 제어 입력벡터이다. 로봇의 end-effector가 고정된 작업물체와 접촉에 의한 상호작용이 발생하게 되면, 자유 공간상의 동특성 (2)는 동작의 제한을 받게 된다. 즉, (2)의 시스템은 (3)의 동작제한 함수에 의해 제한을 받게된다.

$$\alpha(t, z) = 0. \quad (3)$$

여기서 $\alpha(t, z)$ 는 시간 t 에 대하여 연속 상태 변수 z 가 제한 받게 되는 제한조건들이다. 거리함수와 힘/토크 제한 값들은 대표적인 $\alpha(\cdot, \cdot)$ 의 함수가 될 수 있다. 일반적인 강체의 링크로 구성된 로봇의 상태 공간 동특성 방정식은

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) + N(\dot{\theta}) + J^T(\theta) f, \quad (4)$$

으로 주어지며 여기서, 관절 각 벡터 $\theta \in R^n$, τ 는 제어 입력 토크 벡터, $M(\theta)$ 는 관성행렬, $V(\theta, \dot{\theta})$ 는 Coriolis 및 원심력(centrifugal) 벡터, $N(\dot{\theta})$ 는 마찰 성분 벡터, f 는 접촉 힘 벡터, J 는 자코비안(Jacobian)으로 end-effector의 속도벡터 \dot{x} 와 관절 각 속도 $\dot{\theta}$ 에 대한 관절의 강성도 벡터 K_θ 는

$$K_\theta = J^T(\theta) K_p J(\theta), \quad (5)$$

$$K_p(X) = \text{diag}\{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pm}\} \quad (6)$$

이며 여기서 K_p 는 Cartesian공간에서의 $n \times n$ 강성도 행렬이다. J 가 nonsingular 라고 가정한다. (4)의 동특성은

작업 공간에서 접촉상태와 비접촉(자유공간)에 따라서 결정된다. 자유공간에서의 로봇 관절의 강성도는 위치 정밀도를 위하여 매우 높은 강성도를 유지하게되고, 작업물체와의 접촉 시에는 물체로부터 반발력 f 를 받게 된다. 이때 제어 시스템은 액츄에이터의 입력 토크를 통하여 로봇의 강성도를 제어해야 한다. 이와 같은 이유로 연속상태 제어시스템은 작업공간에서

$$\tau = K_p(X)(\theta_d - \theta) + K_v(X)(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + G(\theta) + F_c(\dot{\theta}) \quad (7)$$

와 같은 강성도 제어기로 구성되어 있다. 여기서 K_p 는 속도 이득 벡터이다 F_c 는 마찰력으로 signum 함수이다 [4]. (7)은 PD-형태의 케환 제어기로 K_p 는 로봇 매니퓰레이터의 강성도를 나타내는 케환 이득이다. 그러나 실제로 정확한 강성도 파라미터를 구하기는 거의 불가능하며, 더욱이 작업이 접촉과 비접촉상태로 구분되는 작업에서는 K_p 를 결정하기란 불가능하다. 따라서 모델의 강성도 파라미터의 불확실성과 작업의 특성이 접촉과 비접촉상태로 구성된 복잡한 작업을 위해서는 작업특성에 따른 의사결정(decision making)과 지능적인 위치 및 힘 제어가 필요하다.

IV. 이산상태 시스템

1. 이산시간 모델링

그림 1과 같은 제한 공간에서의 로봇의 동작은 자유공간에서의 동작과 물체와의 접촉된 동작으로 구분될 수 있다. 이러한 작업에 대한 로봇의 이산 동특성을 모델링한다. 이산 상태변수 $q(t) \in Q$ 는 로봇의 end-effector가 작업환경 또는 작업 물체와의 접촉 또는 비접촉에 의하여 결정된다. 이산상태 q 는

$$q = \begin{cases} 2, & \text{Constrained Motion } (f \neq 0) \\ 1, & \text{Unconstrained Motion } (f = 0) \end{cases} \quad (8)$$

와 같이 정의한다. 여기서 f 는 로봇의 end-effector의 힘 센서로부터 측정된 힘 벡터로 $f \in R^6$ 이다. 작업 환경과의 접촉 및 비접촉은 힘 센서에 의해서 감지 및 측정 할 수 있다고 가정한다. (8)의 이산상태 q 를 하이브리드 오토마타로 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3에서 f_d 는 end-effector에서의 원하는 접촉력이며 x_d 는 작업공간에서의 원하는 궤적이다.

2. 강성도 적응(Stiffness adaptation)

그림 3에서 이산상태변수 q 는 자유공간에서의 비접촉 동작(nonconstrained motion)과 접촉상태에서의 접촉 동

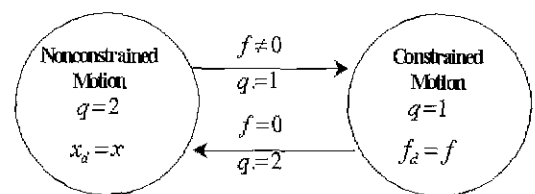


그림 3. 제한동작의 이산시간 모델.
Fig. 3. Discrete event model of constrained motions.

작(constrained motion)으로 나누어진다. 즉, 로봇이 물체와 접촉하게 되면 이산상태는 $q=1$ 이 되며 이때 물체의 반발력은 $f > 0$ 이 된다. 한편 반발력이 $f=0$ 이 되면 이산상태는 $q=2$ 로 설정된다. 그림 3의 인베리언트(invariant)는 이산 상태에 따라서 $x_d=x$ 또는 $f_d=f$ 가 되며 이는 각각의 이산상태에서의 제어의 기준이 된다. 이산상태별로 주어진 제어기준에 따라 로봇 매니플레이터의 강성도를 제어해야한다. (2)의 동작 방정식은 (3)에 의해 제한 받게 되고 이에 따른 각각의 동작 특성은 이산상태 q 로 모델링되고 각각의 이산상태에 따른 동작 특성은 두 가지 구별되는 특성을 갖고 있다. 첫째로, 비접촉 동작에서는 제어기의 성능은 위치 정밀도를 유지하여야 한다. 즉,

$$\Delta x = x_d - x = 0, \quad (9)$$

을 만족하여야 한다. 이를 위해 이산상태 제어기에서는 (9)를 만족할 수 있는 강성도 기준 값 K_b 를 생성하여야 한다. 예를 들어 $\Delta x < 0$ 이면 로봇 관절의 강성도를 증가해야한다. 둘째로, 접촉 동작에서는 물체와의 제한동작 방향으로는 접촉상태를 유지하기 위하여

$$\Delta f = f_d - f = 0 \quad (10)$$

의 제한 조건을 만족해야하며 비제한 동작 방향으로는 속도 제어를 하여야 한다. 따라서 이산상태 시스템에서는 위의 두 가지 제어 목적을 충족 할 수 있어야 한다.

제한동작의 작업 특성은 로봇의 강성도를 제어하기 위하여 강성도 파라미터를 작업특성에 맞게끔 생성해야 한다. 이와 같은 특성들을 "Admittance Mode"와 "Impedance Mode", 그리고 "Stationary Mode"로 구분하여 각각의 동작특성을 다음과 같이 정의한다.

1) Admittance Mode

로봇 매니플레이터의 강성도를 감소시켜 관절의 강성도를 낮은 상태로 한다. 이때의 이산상태 동특성은

$$K_p(t) = K_p(0) - \lambda t \quad (11)$$

으로 주어지며 여기서 $K_p(0)$ 는 이산상태가 Admittance mode로의 스위칭 순간의 초기 K_p 값이며, $\lambda > 0$ 인 실수이다.

2) Impedance Mode

로봇 매니플레이터의 강성도를 증가시켜 관절의 강성도를 높은 상태로 한다. 이때의 이산상태 동특성은

$$K_p(t) = K_p(0) + \lambda t \quad (12)$$

으로 주어진다.

3) Stationary Mode

로봇 매니플레이터의 강성도를 현재의 상태로 유지하게되며, 이때의 이산상태 동특성은

$$K_p(t) = K_p(0) \quad (13)$$

으로 주어진다.

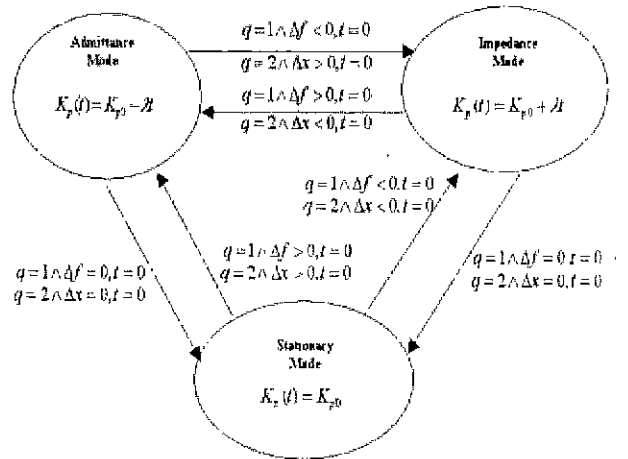


그림 4. 이산상태 시스템의 하이브리드 오토마타로 구성된 기준 강성도 프로세서

Fig. 4. Hybrid stiffness reference processor using hybrid automata in discrete state system.

이산상태 시스템의 강성도 적용 제어기를 하이브리드 오토마타를 이용하여 설계하면 그림 4와 같이 구성된다. 그림 4에서 점선네모의 조건식들은 이산상태 천이 조건(transition conditions)식들이다.

V. 인터페이스 시스템

3-계층의 하이브리드 제어기에서 인터페이스 시스템은 상/하위 시스템의 상태 공간은 서로 다르기 때문에 연속 상태 시스템과 이산상태 시스템을 연결하는 역할을 한다. 이를 위하여 인터페이스 시스템은 이산상태 발생기(discrete event identifier)와 강성도 설정(stiffness mask)으로 구성되어 있다. 규칙기준(rule-based)의 이산상태 발생기는 연속상태 변수들로부터 이산상태 q 를 생성하게된다. 이를 위한 규칙은 조건-사건(condition-event)들의 쌍(pair)으로 정의되는데, 이는 접촉상태와 비접촉상태에 따라서 결정된다. 다음의 규칙

$$\text{If } f \neq 0, \text{ then } q=1, \text{ else if } f = 0, \text{ then } q=2. \quad (14)$$

은 이산상태를 결정하기 위하여 정의된 규칙이다.

강성도 설정은 이산상태 시스템의 출력인 기준 강성도 K_b 를 연속상태 시스템으로 변환하여 준다. 강성도 설정 $K_p(t)$ 는

$$K_p(t) = \text{diag}\{K_{p1} + m_1 \lambda t, \dots, K_{pn} + m_n \lambda t\} \quad (15)$$

로 정의되며 여기서 $m_j, j=1, \dots, n$ 은 Boolean으로 0 또는 1의 값을 갖는다. 자유 공간에서 $m_j=1$ 이며, 제한 동작구간에서는 제한 받는 축 방향의 $m_j=1$ 이며 비제한 축 방향의 $m_j=0$ 이다. 이는 힘/토크 센서로부터 end-effector의 접촉력으로 결정된다.

VI. 실시간 제어기 구현 및 성능 평가

제안된 제한 동작 로봇을 위한 하이브리드 동적 제어기의 특성과 성능을 그림 1과 같은 작업공간에서 물체에

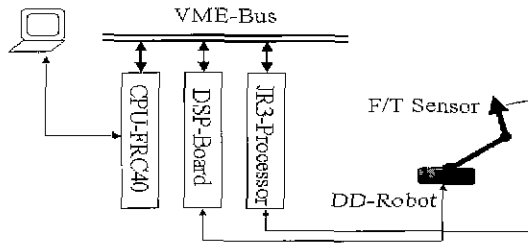


그림 5. 하이브리드 동적 시스템의 실시간 제어기의 구조.

Fig. 5. Structure of real-time controller of hybrid dynamic system for constrained robots.

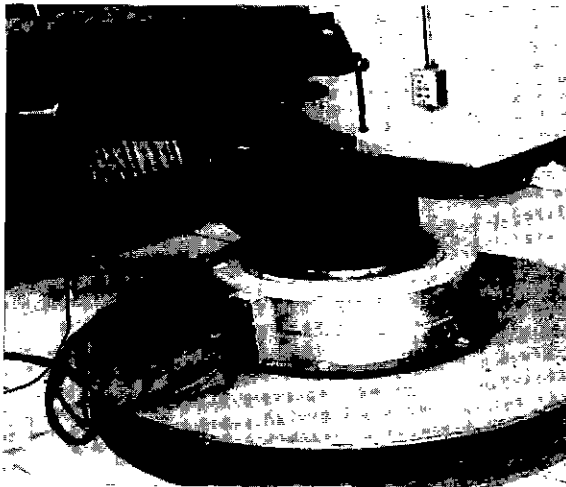


그림 6. 제한작업공간에서의 2축 직접구동형 로봇.

Fig. 6. Laboratory developed two-link direct drive robot in constrained space.

의한 동작의 제한을 받게 되는 작업을 대상으로 평가한다. 하이브리드 동적 시스템을 구현하기 위하여 실시간 운영체제인 VxWorks를 기반으로 하였으며, 제어 알고리즘은 실시간 프로그램으로 구현되었다. 하드웨어 환경은 그림 5에 주어지 있으며, VME-버스 시스템으로 중앙연산 프로세서는 68040-계열의 CPU40 보드를 사용하였다. 제어 대상 로봇은 실험실에서 제작한 2축의 직접 구동형 planar-형태의 로봇으로 그림 6에서 보여주고 있다. 로봇 액츄에이터는 직접 구동형 구조로 관절에 설치되어있으며 AC-서보 모터로 구성되어 있다. 로봇의 액츄에이터 제어는 실험실에서 제작한 디지털 신호 프로세서(DSP)인 TMS320C30을 기반으로 하는 VME-버스용의 모터 제어기로 4축까지 제어 가능하다. 또한 로봇의 end-effector에는 JR3사의 힘/토크 센서가 장착되어 있으며 VME-버스를 사용하는 JR3 센서 프로세서에서 힘 정보를 얻게된다. 전체적인 하이브리드 동적 시스템 제어기의 실시간 프로그램의 구조는 그림 7에 주어지 있다. 표 1에서는 2축 직접 구동형 로봇 매니플레이터의 파라미터들을 보여주고 있다. 실험이 적용된 작업은 그림 1과 같이 2차원 평면에서 주어진 원 궤적이 작업물체로 인하여 동작의 제한을 받게 되는 그라인딩 작업을 대상으로 한다. 이때 작업 물체는 고정되어 있으며 강성도

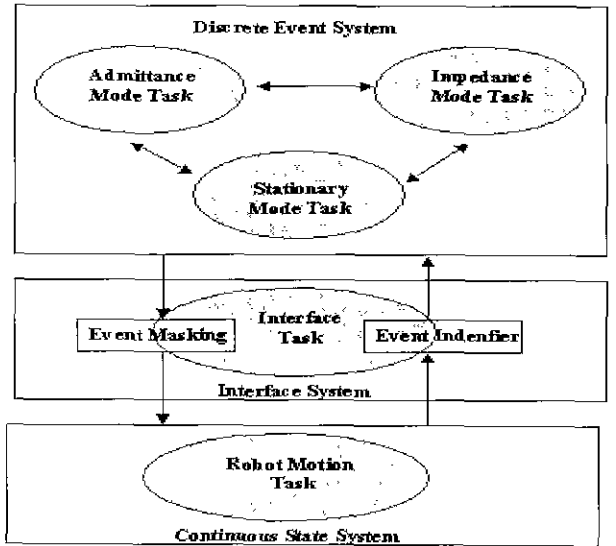


그림 7. 하이브리드 동적 시스템의 실시간 제어기의 알고리즘 구조.

Fig. 7. Algorithm structure for real time control of hybrid dynamic control system.

표 1. 로봇 매니플레이터의 파라미터

Table 1. Parameters of robot manipulator.

	Link 1	Link 2
Mass of link	22kg	12kg
Length of link	0.65m	0.45m
Mass of motor	73kg	12kg
Rotor inertia	0.2675kgm ²	0.0077kgm ²
Friction coefficient	5.7Nm	0.9Nm

가 로봇보다는 매우 높다고 가정한다.

그림 7의 하이브리드 동적 시스템의 구조에서 3계층의 제어시스템들은 실시간 운영체제에서 실시간 태스크(real-time task)로 각각 구현되었다. 이산상태 제어기에서의 하이브리드 오토마톤 모델은 실시간 태스크로 구현되었다 즉, 3종류의 태스크로 각각 admittance mode task, impedance mode task, 그리고 stationary mode task로 구현되었다. 각 태스크간의 이산상태 천이는 인터페이스 제어기로부터의 이산사건에 의해 이루어진다. 각각의 태스크는 스윗칭 순간 $t = 0$ 로 된다. 따라서 이산상태 제어기에서는 3개중 1개의 실시간 태스크가 운영되게 된다 인터페이스 제어기는 하나의 실시간 태스크인 인터페이스 태스크에서 이산사건 발생기와 강성도 설정 기능이 구현되었다. 이산사건 발생기는 이산사건을 생성하고 강성도 설정은 이산상태 제어기에서 출력된 강성도를 연속상태 제어기에서 필요로 하는 강성도 벡터로 입력한다. 연속 상태 제어기는 로봇의 관절에 토크 입력을 제어하게 되며 1개의 태스크에서 로봇을 제어하게 된다. 전체적인 실시간 태스크들의 샘플링 간격은 5msec이며 이산상태 시스템은 샘플링 간격 1 msec이며 이산상태의 스윗칭은 1msec 이내에서 이루어진다. 즉 스윗칭

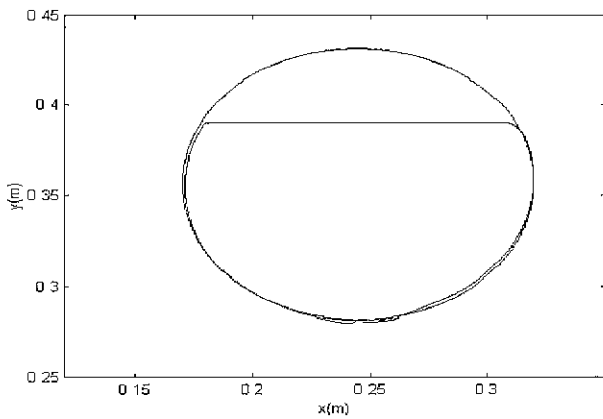


그림 8. 제한 작업공간의 원 궤적에 대한 위치 추종.
Fig. 8. Trajectory tracking with geometric constraints.

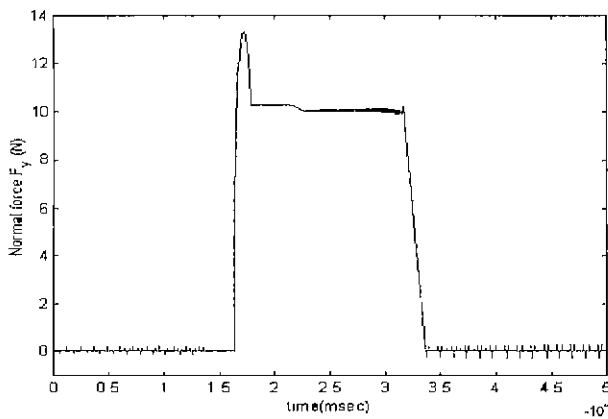
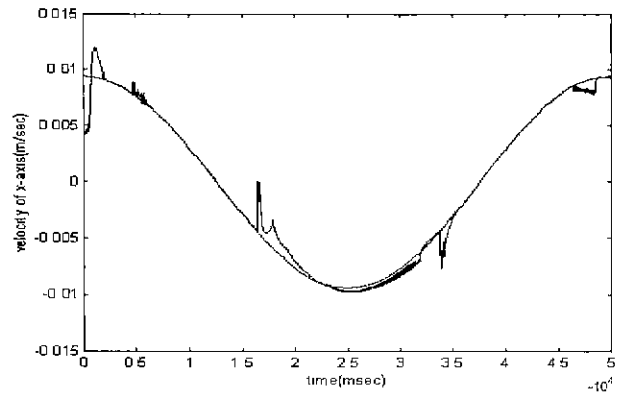


그림 9. 접촉면에서의 접촉력 f_y
Fig. 9. The exerted force from the environment.

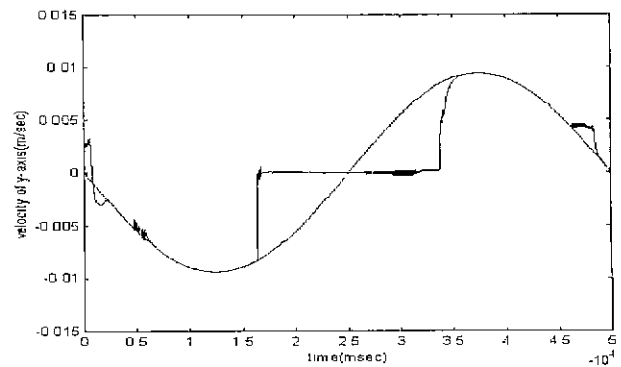
지연(switching delay)시간 $\delta t_d < 1\text{msec}$ 이다.

실험에서 작업환경은 그림 6과 같으며, (7)의 연속 상태 제어기에서 작업 물체와 로봇 테니플레이터의 강성도는 매우 높은 강체라 가정하였다. 원하는 궤적은 $x-y$ 평면에 원을 기준 궤적으로 주었으며, 작업물체의 공간 정보는 주어지지 않았다. 전체 작업 시간은 50초로 하였다. (7)의 초기 조건들은 다음과 같다. 초기 궤환이득 행렬은 각각, $K_p = \text{diag}[1.5 \times 10^3 \ 1.5 \times 10^3]$ (N/m)의 낮은 강성도와 $K_v = \text{diag}[15 \ 15]$ 로 임의의 값으로 주었다. 작업 물체의 강성도는 $K_e = 5.0 \times 10^6$ (N/m)의 매우 높은 강성도로 하였다. 로봇의 초기 위치는($x = 0.25, y = 0.28$) (m)이며 초기 속도는 정지 상태이다. 그리고 제어 목적은 각각. 자유공간에서는 위치 궤적 추종(원 궤적)과 접촉 모드에서는 작업물체에 수직 방향으로 접촉상태를 유지하기 위하여 접촉력 $F_d = f_y = 10\text{N}$ 을 기준 접촉력으로 하였으며 접선(tangential) 방향의 속도 제어는 x -축 방향의 기준속도 추종을 제어 목적으로 한다. 실험에서 자유공간상의 위치정밀도는 $|\Delta x| < 1(\text{mm})$, 제한공간에서의 힘의 정밀도는 $|\Delta f| < 0.1\text{N}$ 으로 설정하였다.

로봇의 end-effector가 y -축 방향으로 동작이 제한될 때 제한 축방향의 강성도는 원하는 접촉력을 유지하기



(a)



(b)

그림 10. (a) End-Effector의 x -축 방향의 이동 속도, (b) End-Effector의 y -축 방향의 이동 속도.

Fig. 10. (a) The x -directional velocity of end-effector, (b) The y -directional velocity of end-effector.

위하여 조절하고 비제한 축 방향으로서는 위치 및 속도제어를 하도록 하였다. 다음의 그림 8은 그림 6의 작업공간에서 주어진 원 궤적에 대하여 자유공간 즉, 비접촉 모드에서는 정확한 위치제어 정밀도를 보여 주고 있다. 또한 제한공간에서의 접촉상태에서는 평면을 접촉하며 미끄러지는 그라인딩 작업의 궤적을 볼 수 있다 그림 9는 접촉상태에서 힘/토크 센서에서 얻은 평면에 수직(normal) 방향의 힘 f_y 를 나타낸 것으로 주어진 기준 접촉력 $f_d = 10\text{N}$ 으로 접촉상태를 유지하는 결과를 보여주고 있다. 실험에서 비접촉 상태에서의 이산사건(접촉/비접촉) 상태를 결정(identification)하기 위하여 자유공간에서 발생하는 힘/토크 센서의 오프셋 F_{offset} 을 $-0.5 \leq F_{offset} \leq 0.5\text{N}$ 사이의 오프셋이 바이어스(bias)된 상태를 제거하였으며 이를 비접촉 모드로 하였다.

그림 10은 Cartesian 공간에서의 end-effector의 속도를 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 x -축 방향의 속도이며 (b)는 y -축 방향의 속도이다. 접촉상태를 유지하면서 x -축 방향의 기준 이동속도를 추종함을 알 수 있으며 또한, 접촉상태에서의 y -축 방향의 속도는 작업물체로 인하여 제한되며 x -축 방향의 속도를 추종함으로써 미끄러

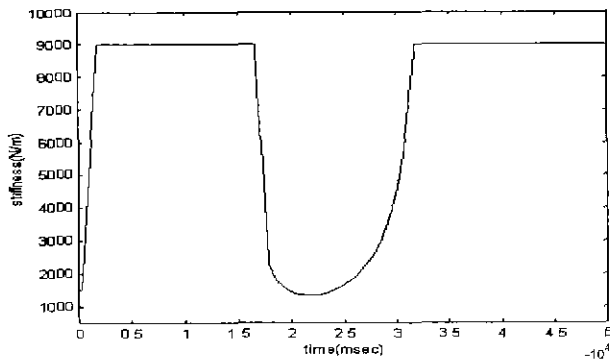


그림 11. 이산상태 제어기에서 생성한 로봇 매니플레이터의 기준 강성도.

Fig. 11. Suffiness adaptation outputs of discrete state system.

지면서 그라인딩 작업을 수행함을 알 수 있다. 그림 11은 작업 특성에 따라서 로봇의 동작제어를 위한 기준 강성도 K_b 를 이산상태제어기에서 생성한 결과를 보여주고 있다. 이산상태에 따라서 기준 강성도의 적응성을 보여주고 있다.

본 논문에서는 자유공간에서는 위치 제어성능, 제한공간에서는 구속조건을 만족하면서 힘 제어 성능을 보여줄 수 있는 강성도 비선형 함수 $K_b(t)$ 를 하이브리드 오토마톤으로 모델링 하였다. $K_b(t)$ 는 연속 상태 변수 $x(t)$ 에 의해 결정되며, 상위의 이산상태제어기의 상태천이를 통하여 로봇의 기준 강성도 K_b 를 결정하게 된다. 제안한 제한동작 로봇의 하이브리드 제어시스템은 불확실한 환경 정보와 물체의 강성도에 의해 로봇과 물체간의 접촉과 비접촉이 반복적으로 발생하게 되면 이산상태의 천이 또한 반복적으로 일어 날 수가 있어서 채터링 현상이 발생 할 수 있다. 이는 로봇이 접촉 물체와 충돌(impact)하는 순간에 K_b 가 얼마나 빠르게 반발력을 제어(흡수)하느냐 하는 문제로 K_b 의 적응속도 즉, λ 의 크기에 의해 제어 될 수 있다. 또한, 제어 정밀도가 높아지게 될 때, 자유공간에서는 K_b 는 위치에 대한 궤환이득으로 원하는 궤적 x_d 를 추종하기 위하여 이산상태 제어기에서 점근적 안정도를 만족 할 수 있는 K_b 로 수립하게 된다. 이때, 최소한의 적응시간이 필요하다. 이는 λ 의 크기에 의해 결정되며 $|\lambda_i|$ 의 크기가 클수록 적응 시간은 빨라지게 될 것이다. 그리고 제한 동작구간에서 K_b 는 로봇 관절의 강성도 역할을 하게 된다. 실험에서 x_d 와 f_d 에 대한 오차한계를 $\Delta x = \epsilon_x > 0$, $\Delta f = \epsilon_f > 0$ 으로 설정하였기 때문에 채터링 문제를 해결 할 수 있었다. 이는 실험에서 발생하는 외란(disturbance)과 센서 측정오차, 그리고 로봇 시스템의 지연응답에 의해 결정된다.

VII. 결론

본 논문에서는 작업 환경에 의하여 로봇의 동작이 제한되며 힘 제어 또는 속도제어를 부분적, 또는 동시적으로 필요로 하는 복잡한 작업을 수행 할 수 있는 로봇의 제한 동작 제어를 위한 3계층의 계층적 구조를 갖는 하

이브리드 제어시스템을 제안하였다. 복잡하고 제한작업 공간에서의 다양한 작업을 수행하기 위한 3계층의 하이브리드 제어기는 각각, 상위수준에서는 간략화 수준으로서 이산상태제어기, 하위수준에서는 로봇의 작업공간에서의 위치 및 힘 제어를 위한 연속상태제어기. 그리고 서로 다른 상태공간을 연결하고 지능적 동작을 위한 인터페이스 시스템으로 구성되어 있다. 작업공간에서의 로봇의 동작과 작업 환경간의 상호작용을 간략화 수준의 이산상태시스템 모델은 하이브리드 오토마타를 이용하여 이산상태 제어기를 설계하였다. 또한, 하위수준의 연속상태제어기는 로봇과 힘-토크 센서로 구성된 로봇 시스템에 대하여 매니플레이터의 강성도 제어를 통하여 위치 및 힘 제어를 할 수 있는 연속상태제어 시스템으로 구성되어 있다. 한편 인터페이스 시스템은 서로 다른 상태공간의 상/하위 제어 시스템들을 연결하고 서로의 상호작용을 모델링하여 이산과 연속상태 변수들로 구성된 하이브리드 동적 시스템 모델을 구하였다. 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위하여 복잡한 작업과 제한조건에서의 2축 직접 구동형 로봇 매니플레이터의 실시간 제어기의 구현을 통하여 성능을 보였다. 본 연구 결과는 로봇에게 요구되어지는 작업으로의 응용 가능성을 충분히 보여 주었으며 앞으로의 연구 과제는 자율적이며 지능을 갖고 있는 제어기에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] N. Hogan, "Impedance control : an approach to manipulation, parts I, II, III," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, pp. 1-24, 1985.
- [2] M. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, pp. 418-432, 1981.
- [3] M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *ASME Journal of Dynamic System Measurement Control*, no. 102, pp. 126-133, 1981.
- [4] T. J. Tarn, Y. Wu, N. Xi, and A. Isidori, "Force regulation and contact transition control," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 32-39, 1996.
- [5] 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.
- [6] R. Brockett, "Hybrid models for motion control systems," in *Essay on Control : Perspectives in the Theory and and Its Applications*, H. L. Trentelman and J. C. Willems, Eds. Boston, MA : Birkhauser, pp. 29-53, 1993.
- [7] A. Pnueli and R. Rosner, "On the synthesis of a reactive module," *Symposium on Principles of Programing Languages*, pp. 179-190, 1989.
- [8] J. Stiver and P. Antsaklis, "Modeling and

analysis of hybrid control systems," *Conference on Decision and Control*, pp. 3748-3751, 1992.

[9] A. Gollu and P. Varaiya. "Hybrid dynamical systems," *Conference on Decision and Control*, December, 1989.

[10] M. Lemmon and C. Bett, "Hybrid control system design using robust linear control agents," *Conference on Decision and Control*, pp. 2688-2693, 1995.

[11] T. Niinomi, B. H. Kroh, and J. E. R. Cury.

"Synthesis of supervisory controllers for hybrid systems based on approximating automata," *Conference on Decision and Control*, pp. 1461-1466, December, 1995.

[12] J. Stiver, P. Antsaklis, and M. Lemmon, "Hybrid system modeling and autonomous control systems," In Robert L. Grossman, Anil Nerode, Anders P. Ravn, and Hans Rischel, editors, *Hybrid Systems I*, Lecture Notes in Computer Science 736, pp. 366-392, 1993.



임 미 섭

1963년 11월 27일생, 1986년 한국항공대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년-현재 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정.



임 준 홍

1956년 11월 21일생. 1979년 서울대 공대 전자공학과 졸업 1981년 한국과학기술원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 Iowa대 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1986년-1989년 한국항공대학교 조교수. 1989년-현재 한양대

전자. 컴퓨터공학부 교수.