

다관절 로봇 아암의 강인한 모션 제어방법에 관한 연구

A Study on the Robust Motion Control Technology of Articulated Robot Arm

하언태*, 김현근**

Eon-Tae Ha, Hyun-Geon Kim

〈Abstract〉

In this paper, we propose a new motion control technology to design robust control system of industrial robot. The system modeling of robotic manipulation tasks with constraints is presented, and the control architecture for unconstrained and constrained motion system with parametric uncertainties is synthesized. The optimal reference of robot manipulator is generated by the reference controller as a discrete state system and the control behavior of constrained system which has poor modeling information and time-invariant constraint function is improved motion control system is successfully evaluated by experiment to the desired tasks.

Keywords : Constrained motion, Stiffness adaptation, Robust control, Time-invariant

* 정회원, 교신저자, (주)미래기술연구소 소장
E-mail: euntha@hanmail.net

** 정회원, (주)S&T중공업

* Corresponding Author, Future Technology Institute
Co., Ltd,

** S&T Dynamics Co., Ltd

1. 서 론

로봇의 제어방법에서 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 결정과 다이내믹 제어 성능을 위한 제어 방법들은 아직도 부족한 편이며 제어 기술들은 다양한 제어 요구에 대하여 한계가 있다.

뿐만 아니라 많은 센서 신호들을 처리하는 복잡한 작업의 통합제어는 로봇의 동작 제어를 더욱 난이하게 하는 문제점이라 할 수 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.

한정된 작업공간에서 로봇의 동작 제어, 모니터링, 신호 인터페이스, 그리고 해석은 기존의 로봇 제어기술로는 한계가 있다. 예를 들어, 로봇 매니퓰레이터의 작업공간상의 위치 오차는 작업 공정의 실패의 주된 원인이 될 수 있으며, 조립, 용접, 그라인딩과 같은 공정에서는 힘 제어는 위치제어와 함께 기본적인 제어 기술부분이다.

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 로봇의 모션제어를 위한 강인제어(robust control) 시스템[5][6]을 이용하여 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 새로운 제어 방법을 제시한다. 이를 위하여 3계층의 계층적 구조를 갖는 제어시스템을 제안한다. 로봇시스템의 제어 시스템은, 상위수준에서는 동작 특성 단순화 모델 기반의 이산상태제어기, 하위수준에서는 로봇의 작업 공간에

서의 위치 및 힘 제어를 위한 연속상태제어기, 그리고 상/하위의 서로 다른 상태공간을 연결하고 지능적 동작을 위한 인터페이스 제어기로 구성되어 있다.

이를 위하여, 작업공간에서의 로봇의 동작과 작업환경간의 상호작용을 간략화 수준에서의 이산상태 시스템 모델링을 수행하였다. 또한, 하위수준의 연속상태제어기는 로봇과 힘-토크 센서로 구성된 로봇 시스템에 대하여 로봇 관절의 강성도 제어를 통하여 위치 및 힘 제어를 할 수 있는 연속상태 제어시스템으로 구성되어 있다. 한편 인터페이스 시스템은 서로 다른 상태공간의 상/하위 제어 시스템을 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..

1.1. 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 액추에이터의 특성, 마찰, 접촉상태 등에 의해 결정된다. 힘 제어만을 할 때는 작업 환경과 물체에 대해서는 로봇이 손상을 입게 된다. 임피던스 제어방법은 위치제어 방법과 유사

하지만 로봇의 임피던스를 제어하는 방법이다. 그러나 로봇의 동특성과 환경의 정보가 정확하지 않을 때는 성능을 보장할 수 없는 단점이 있다. 병렬 힘/위치 제어 방법 또는 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 피라미터를 얻기는 매우 힘들며 작업 중에도 부하의 변화와 동특성의 변화등으로 정확한 강성도(stiffness) 피라미터를 구하기란 거의 불가능하다 [3,4,5,6].

자유공간에서의 로봇 제어와 물체와 접촉된 상태에서의 로봇 제어의 차이는 로봇의 동작이 작업 환경에 의하여 제한을 받게 된다는 것이다. 즉, 제한조건들에 의하여 로봇의 동특성 모델이 바뀌게 된다. 제한 조건(const-

raints condition)은 시간 미분형태와 힘과 같은 구성변수(configuration variables)들 간의 관계이다. 제한 동작 로봇을 위한 연구들은 대부분 Lagrange형태를 이용하여 모델링과 제어 그리고 해석을 하여왔으며, 물체와의 접촉 상태에서의 동작제어 문제는 액츄에이터 제어와 같은 하위수준에 집중되어 있었으며 그 결과들은 제한된 제어 성능만을 보였다. 위에서 설명한 제한 동작 제어기들은 대부분 주어진 시스템의 강성도 피라미터와 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(contactstiffness)의 불확실성이라고 할 수 있다[6,7,8].

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 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 제한동작 조건에서 동특성 시스템 구조를 이용하였다.

2. 동적 모델 분석

본 논문에서는 연마작업과 같이 자유공간에서의 위치제어와 접촉상태에서의 힘 제어를 필요로 하는 작업을 대상으로 하여 작업 물체의 위치정보는 불확실하다고 가정한다.(그림 1 참조). 이때 제한 동작 시스템 제어의 두 가지 중요한 요구사항은 다음과 같다.

첫째, 자유공간에서는 주어진 궤적을 가능한 정확히 추종해야 하며 둘째, 접촉상태에서는 제한방향(limited direction)으로는 원하는 접촉력(contact force)을 유지하면서 비제한방향(unconstrained direction)으로는 로봇의 end-effector의 속도를 제어해야한다. 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.

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 상태변수가 결합된 상태 공간이다. 본 논문에서는 로봇의 제한동작 제어시스템을 위한 강인한 제어 위한 동적 모델을 Branicky [13]의 모델에 기초하였다.

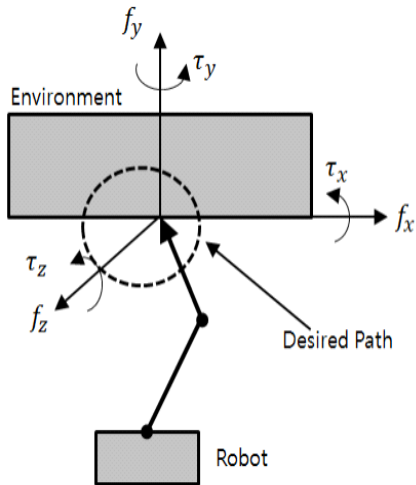


Fig. 1. Polishing working(limited space).

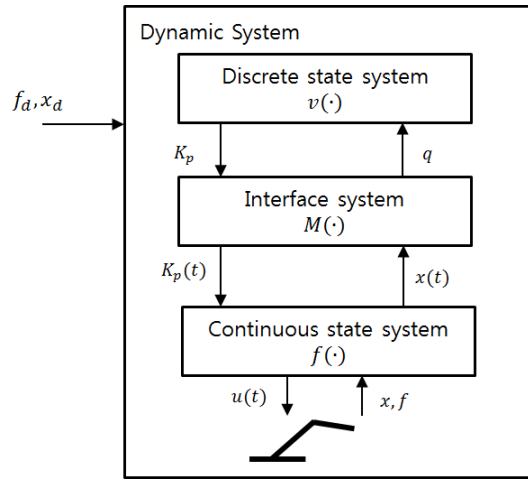


Fig. 2. Dynamic Control system structure

그림 1과 같은 연마작업에서 시스템의 동특성은 접촉과 비접촉에 상태에 따라서 시스템의 동특성이 다르며 이들은 작업상태간의 이동에 따라서 동특성의 스위칭이 발생한다.

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 주어졌다.

동적 제어시스템은 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 결정을 위한 이산-사건 제어시스템이며 연속-상태 시스템은 이산-상태 시스템의 결정에 의해 액추에이터를 실제적으로 구동하는 하위수준의 제어시스템이다 한편, 인터페이스 시스템은 상/하위의 서로 다른 상태공

간의 변수를 변환하여 주며 이산상태의 상태 천이 조건을 결정한다. 즉, 연속-상태변수 $x(t)$ 에 의해 이산-상태 q 를 결정한다. 이를 (1)로 표현할 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 $\Sigma = \sum_{q \in Q}$ 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, $A = A = A_{q \in Q}, A_q \subset X_q$ 로 동특성의 스위칭 집합(swithing set)이다. G 는 이산상태 천이 관계(discrete state transition map)로 $G = G_{q \in Q}, G_u : A_q \rightarrow \bigcup_{q \in Q} X_q \times qS = \bigcup_{q \in Q} X_q \times q$. S 는 하이브리드 상태 공간으로이다. 즉, 연속상태변수와 이산상태 변수의 조합 $S_q = X_q \times q$ 이다.

3. 로봇 제어시스템

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

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

로 주어진다. 여기서 q 는 이산상태이며, $z(t)$ 는 연속 상태 벡터, $u(t)$ 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 받게 된다.

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

여기서 $c(t, z)$ 는 시간 t 에 대하여 연속 상태 변수가 z 가 제한 받게 되는 제한조건들이다. 거리 함수와 힘/토크 귀환 값들은 대표적인 $c(\cdot, \cdot)$ 와 함수가 될 수 있다. 일반적인 강체의 링크로 구성된 로봇의 상태 공간 동특성 방정식은

$$\tau = M(\theta)\theta'' + V(\theta, \theta')\theta + G(\theta) + N(\theta') + J^T(\theta)f, \quad (4)$$

으로 주어지며 여기서, 관절 각 벡터 $\theta \in R^n, \tau$ 는 제어 입력 토크 벡터, $M(\theta)$ 는 관성행렬, $V(\theta, \theta')$ 는 Coriolis 및 원심력(centrifugal) 벡터, $N(\theta')$ 는 마찰 성분 벡터, f 는 effector의 속도벡터 x 와 관절 각 속도 θ 에 대한 관절의 강성도 벡터 K_0 는

$$K_0 = J^T(0)K_p J(\theta), \quad (5)$$

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

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 액추에이터의 입력 토크를 통하여 로봇의 강성도를 제어해야 한다. 이와 같은 이유로 연속상태 제어시스템은 작업공간에서

$$\tau = K_u(X)(\theta_d - \theta) + K_V(X)(\theta'_d - \theta') + G(\theta) + F_C(\theta')$$

(7)

와 같은 강성도 제어기로 구성되어 있다. 여기서 K_v 는 속도 이득 벡터이다. F_c 는 마찰력 signum 함수이다 [4].(7)은 PD-형태의 궤환 제어기로 K_p 는 로봇 매니퓰레이터의 강성도를 나타내는 궤환 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 힘제어가 필요하다.

4. 제어성능 실험

제안된 제한 동작 로봇을 위한 하이브리드 동적 제어기의 특성과 성능을 그림 1과 같은 작업 공간에서 물체에 의한 동작의 제한을 받게되는 작업을 대상으로 평가한다.

제어 대상 로봇은 실험실에서 제작한 2축의 직접 구동형 planar-형태의 로봇으로 그림 6에서 보여주고 있다. 로봇 액추에이터는 직접 구동형 구조로 관절에 설치되어있으며 AC-서보 모터로 구성되어 있다. 로봇의 액추에이터 제어는 실험실에서 제작한 디지털 신호 프로세서(DSP)인 TMS320C32를 기반으로 하는 모터 제어기로 1축 까지 제어 가능하다. 또한 로봇의 end-effector에는 JR3사의 힘/토크 센서가 장착되어 있으며 JR3 센서 프로세서에서 힘정보를 얻게 된다. 전체

적인 하이브리드 동적 시스템 제어기의 실시간 프로그램의 구조는 그림 3에 주어지 있다. 표 1에서는 2축 직접 구동형 로봇 매니퓰레이터의 파라미터들을 보여주고 있다. 실험이 적용된 작업은 그림 1과 같이 차원 평면에서 주어진 원 궤적이 작업물체로 인하여 동작의 제한을 받게 되는 그라인딩 작업을 대상으로 한다. 이때 작업 물체는 고정되어 있으며 강성도가 로봇보다는 매우 높다고 가정한다.

Table. 1 Parameters of the robot manipulator

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

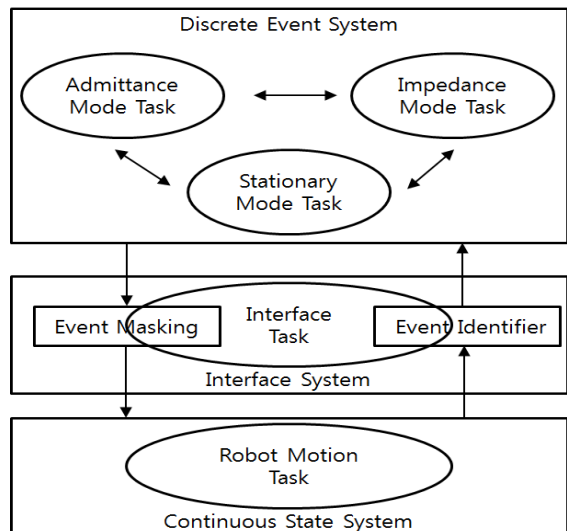


Fig. 3. The scheme of control system

그림 3의 동적 시스템의 구조에서 제어시스템 들은 실시간 운영체제에서 실시간 태스크 (real-time task)로 각각 구현되었다. 이산상태 제어기에서의 동적 모델은 실시간으로 구현되었다. 각 태스크간의 시프트(shift)는 인터페이스 제어기로부터의 이산사건에 의해 이루어진다. 각각의 태스크는 스위칭 순간 $t = 0$ 로 된다. 따라서 이산상태 제어기에서는 3개중 1개의 실시간 태스크가 운영 되게 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 10msec이며 시스템은 샘플링 간격 1msec이며 이산상태의 스위칭은 1msec 이내에서 이루어진다.

실험에서 작업환경은 그림 3과 같으며, (7)의 연속 상태 제어기에서 작업 물체와 로봇 매니플레이터의 강성도는 매우 높은 강체라 가정하였다. 원하는 궤적은 x-y평면에 원을 기준 궤적으로 주었으며, 작업물체의 공간정보는 주어지지 않았다. 전체 작업 시간은 60초로 하였다. (7)의 초기 조건들은 다음과 같다. 초기 궤환이득 행렬은 각각,

$K_p = \text{diag}[2.0 \times 10^3 \ 2.0 \times 10^3](N/m)$ 의 낮은 강성도와 $K_v = \text{diag}[2.0 \ 2.0]$ 로 임의의 값으로 주었다. 작업 물체의 강성도는 $K_e = 6.0 \times 10^6(N/m)$ 의 매우 높은 강성도로 하였다. 로봇의 초기 위치는 $(x=0.35, y=0.32)(m)$ 이며 초기 속도는 정지 상태이다. 그리고 제어 목적은 각각. 자유공간에서는 위치 궤적 추종(원 궤적)과 접촉 모드에서는 작업물체에 수직 방향으로

는 접촉상태를 유지하기 위하여 접촉력 $F_d = f_y = 15N$ 을 기준 접촉력으로 하였으며 접선(tangential)방향의 속도 제어는 x-축방향의 기준속도 추종을 제어 목적으로 한다. 실험에서 자유공간상의 위치정밀도는 $|\Delta| < 2(mm)$, 제한 공간에서의 힘의 정밀도는 $|\Delta F| < 0.2N$ 으로 설정하였다.

로봇의 end-effector가 y-축 방향으로 동작이 제한될때 제한 축방향의 강성도는 원하는 접촉력을 유지하기 위하여 조절하고 비제한 축 방향으로 는 위치 및 속도제어를 하도록 하였다.

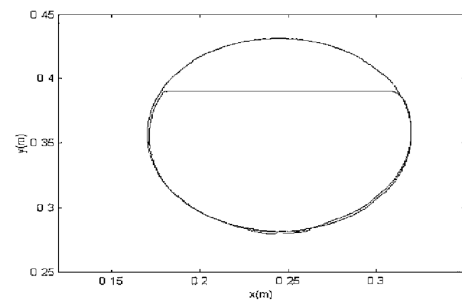


Fig. 4. The position tracking for circular trajectory in working space

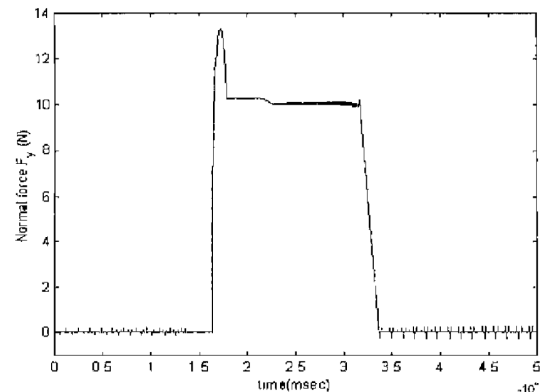
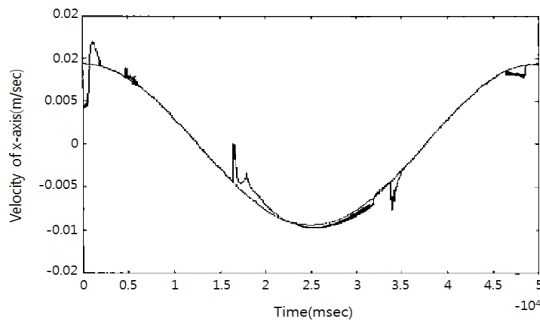


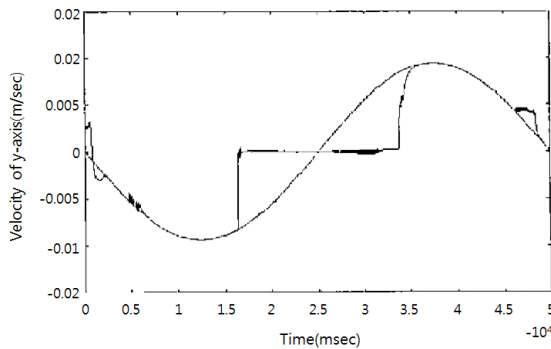
Fig. 5. Contacting force in contacting surface

그림 4는 그림 3의 작업공간에서 주어진 원 궤적에 대하여 자유공간 즉, 비접촉모드에서는 정확

한 위치제어 정밀도를 보여 주고 있다. 또한 제한 공간에서의 접촉상태에서는 평면을 접촉하며 미끄러지는 그라인딩 작업의 궤적을 볼 수 있다. 그림 5는 접촉상태에서 힘/토크 센서에서 얻은 평면에 수직(normal)방향의 힘 f_y 를 나타낸 것으로 주어진 기준 접촉력 $f_d = 10N$ 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 $-0.5 \leq F_{offset} \leq 0.5N$ 사이의 오프셋이 바이어스(bias)된 상태를 제거하였으며 이를 비접촉 모드로 하였다.



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Moving velocity of End-Effector in x-axes direction, (b) Moving velocity of End-Effector in y-axes direction

그림 6은 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 또 한, 접촉상태에서의 y-축 방향의 속도는 작업물체로 인하여 제한되며 x-축 방향의 속도를 주종함으로 미끄러지면서 그라인딩 작업을 수행함을 알 수 있다. 그림 7은 작업 특성에 따라서 로봇의 동작제어를 위한 기준 강성도 K_p 를 이산상태제어기에서 생성한 결과를 보여주고 있다. 이산상태에 따라서 기준 강성도의 적응성을 보여 이는 주고 있다.

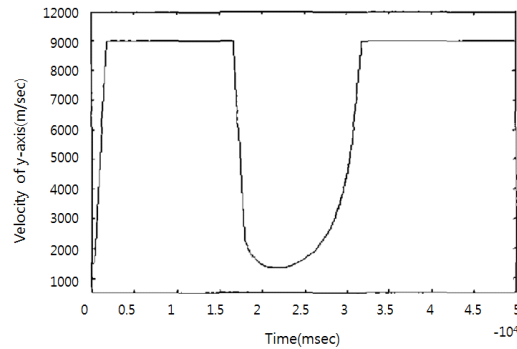


Fig. 7. The stiffness of robot manipulator

본 논문에서는 자유공간에서는 위치 제어성능, 제한공간에서는 구속조건을 만족하면서 힘 제어 성능을 보여줄 수 있는 강성도 비선형 함수 $K_p(t)$ 를 하이브리드 오토마톤으로 모델링 하였다. $K_p(t)$ 는 연속 상태 변수 $x(t)$ 에 의해 결정되며, 상위의 이산상태제어기의 상태천이를 통하여 로봇의 기준 강성도 K_p 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 수

가 있어서 채터링 현상이 발생 할 수 있다. 이는 로봇이 접촉 물체와 충돌(impact)하는 순간에 K_p 가 얼마나 빠르게 반발력을 제어(흡수)하느냐 하는 문제로 K_p 의 적응속도 즉, λ 의 크기에 의해 제어될 수 있다. 또한, 제어 정밀도가 높아지게 될 때, 자유공간에서는 K_p 는 위치에 대한 궤환이득으로 원하는 궤적 X_d 를 추종하기 위하여 이산상태 제어기에서 점근적 안정도를 만족 할 수 있는 K_p 로 수렴하게 된다. 이 때, 최소한의 적응시간이 필요하다. λ_i 의 크기에 의해 결정되며 $|\lambda_i|$ 의 크기가 클수록 적응 시간이 빨라지게 될 것이다. 그리고 제한 동작구간에서 K_p 는 로봇 관절의 강성도 역할을 하게 된다. 실험에서 x_d 와 f_d 에 대한 오차 한계를 $\Delta x = \epsilon_x > 0$, $\Delta f = \epsilon_f > 0$ 으로 설정하였기 때문에 채터링 문제를 해결 할 수 있었다. 이는 실험에서 발생하는 외란(disturbance)과 센서 측정오차, 그리고 로봇 시스템의 지연응답에 의해 결정된다.

8. 결론

본 논문에서는 연마작업 환경에 의하여 로봇의 동작이 제한되며 힘 제어 또는 속도제어를 동시적으로 필요로 하는 복잡한 작업을 수행 할 수 있는 로봇의 제한 동작 제어를 위한 강건성(robustness)을 갖는 로봇 제어시스템을 제안하였다. 복잡하고 제한작업 공간에서의 다양한 작업을 수행하기 위한 3계층의 하이브리드 제어기는 각각, 상위수준에서는 간략화 수준으로서 로봇의 작업공간에서의 위치 및 힘 제어를 위한 연속상태제어기, 그리고 서로 다른 상태공간을 연결하고 지능적 동작을 위한 인터페이스 시스템으로 구성되어 있다. 한편 인터페이스 시스템은 서로 다른 상태공간의 상/하위 제어 시스템들을 연결하고 서

로의 상호작용을 모델링하여 이산과 연속상태 변수들로 구성된 하이브리드 동적 시스템 모델을 구하였다. 제안한 제어기의 성능을 평가하기 위하여 복잡한 작업과 제한조건에서의 2축 직접 구동형 로봇 매니퓰레이터의 실시간 제어기의 구현을 통하여 성능을 보였다.

참고문헌

- 1) T. J. Tarn, Y. Wu, N. X1, and A. Isidori. "Force regulation and contact transition control." IEEE Control Systems Magazine, pp. 32-39, 1996
- 2) M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," ASME Journal of Dynamic System Measurement Control, no. 10 pp.126-133, 1981
- 3) M. Masom, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, pp. 418-432, 1981.
- 4) N. Hogan, "Impedance control : an approach to manipulation, parts I, II, III," Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, pp. 1-24, 1985
- 5) J. Stiver, P Antsaklis, and M. Lemmon, "Hybrid system modeling and autonomous

- control systems," In Robert L. Grossman, Anil Nerode, Anders P. Ravn, and Has Rischel, editors, Hybrid Systems I, Lecture Notes in Computer Science 736, pp. 366-392, 1993.
- 6) T. Niinomi, B. H. Krih, 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
 - 7) M. Lemmon and C. Bett, "Hybrid control system design using robust linear control agents," Conference on Decision and Control, pp 2688-2693, 1995
 - 8) A. Gollu and P. Varaiya.. "Hybrid dynamical systems," Conference on Decision and Control, December, 1989.
 - 9) J. Stiver and P. Antsaklis, "Modeling and analysis of hybrid control systems," Conference on Decision and Control, pp. 3748-3751, 1992.
 - 10) A. Pnueli and R. Rosner, "On the synthesis of a reactive module." Symposium, on Principles of Programming Languages. pp. 179-190. 1989.
 - 11) R. Brockett, "Hybrid models for motion control systems," in Essay on Control : Perspectives in the Theory and and Its Applications, H. Irentelman and J. C. Willems, Eds. Boston, Ma: Birhauser, pp. 29-53, 1993.