

# 퍼지 보상을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 위치/힘 제어<sup>1)</sup>

## Position/Force Control of Robotic Manipulator with Fuzzy Compensation

심 귀 보\*  
Kwee-Bo Sim\*

---

이 논문은 1992년도 한국과학재단 핵심전문연구과제의 연구비지원에 의한 것임

---

### ABSTRACT

An approach to robot hybrid position/force control, which allows force manipulations to be realized without overshoot and overdamping while in the presence of unknown environment, is given in this paper. The main idea is to use dynamic compensation for known robot parts and fuzzy compensation for unknown environment so as to improve system performance. The fuzzy compensation is implemented by using rule based fuzzy approach to identify the unknown environment.

The establishment of proposed control system consists of following two stages. First, similar to the resolved acceleration control method, dynamic compensation and PD control based on known robot dynamics, kinematics and estimated environment stiffness is introduced. To avoid overshoot the whole control system is constructed with overdamping. In the second stage, the unknown environment stiffness is identified by using fuzzy reasoning, where the fuzzy compensation rules are obtained a priori as the expression of the relationship between environment stiffness and system.

Based on the simulation result, comparison between cases with or without fuzzy identifications are given, which illustrate the improvement achieved.

**Key words :** Fuzzy Control, Position/Force Hybrid Control, Resolved Acceleration Control, Robotic Manipulator, Overshoot and Overdamping Performance

### I. 서 론

로봇 매니퓰레이터의 위치/힘 제어에 관해서는, 이미 많은 보고가 있다. 이들의 제어수법의 공통점은 비선형 보상에 의하여 제어대상을 선형화하고, 선형화한 모델에 입각하여 안정한 제어계를 구성하는 것이다. 그러나 로봇 매니퓰레이터와 같은 운동 제어계에서는, 매니퓰레이터 자신만을 제어대상으로 취급하는 것이 아니라, 외부환경(작업 대상물)까지도 제어계에 포함시켜서 생각해야 할 필요가 있다. 이때 사전지식 및 관측정보의 불확실성 즉, 시스템의 애매함이 증가해 가는 것은 쉽게 상상할 수 있다. 이와 같은 경우 상술의 비선형 보상은 그 역할을 다하기 어렵다.

---

\*중앙대학교 제어계측공학과  
Department of Control and Instrumentation Engineering Chung-Ang University

일반적으로 위치 제어와 힘 제어가 동시에 요구되는 작업에 있어서, 로봇은 제어 대상 혹은 외부 환경과 기계적으로 접촉하여 운동의 구속이 존재하기 때문에 제어 대상 또는 외부 환경을 제어계에 포함시켜야만 한다. 이때 시스템 정보의 불확실성은,

- (1) 힘 제어에 있어서 환경의 유연성에 관한 불확실성
- (2) 센서 분해능과 측정 노이즈에 의한 불확실성
- (3) 마찰, 부하등 시스템의 파라미터에 의한 불확실성

등의 문제를 들 수 있다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 특히 문제 (1)을 중점으로 취급한다. 그리고 문제 (2)의 센서 분해능의 영향에 대해서도 정량적으로 검토를 행한다.

주지와 같이, 인간의 손발은 대단히 우수한 범용성의 작업 능력을 가지고 있다. 인간의 손발이 이처럼 우수한 기능을 가지는 이유는, 인간이 과거의 경험이나 지식을 활용하여 제어 대상의 특성을 정량 또는 정성적으로 인식해 가면서(바꾸어 말하면, 외부 환경에 관한 지식을 획득해 가면서) 목적의 작업을 수행하기 때문이다. 이와 같은 정성적인 과거의 경험이나 지식을 정량적으로 변환하는 것은 신경 회로망 제어<sup>7)</sup>나 퍼지 제어<sup>8)</sup>에서 볼 수 있는 특징이다. 다만 多自由度 로봇 매니퓰레이터와 같은 복잡한 시스템의 정밀한 제어 요구에 대해서는 단순히 퍼지를 이용한 “coarse”나 “fine” 등의 경험 rule 만으로는 불충분하다.

따라서 본 논문에서는 로봇 매니퓰레이터의 kinematics, dynamics 및 compliance 에 관한 사전 지식을 최대한으로 이용해서 동적 보상을 행하고, 나머지의 애매한 부분에 대해서는 미리 expert 제어계를 구성하여 퍼지 정보 처리 수법으로 대처하는 방법을 제안한다. 본 연구에서는 이와 같은 생각을 위치/힘 제어에 적용한 것이다.

제안된 제어계의 구성은 다음과 같다. 최초로  $n$ 자유도의 로봇 매니퓰레이터를 대상으로 하여, 동적 보상에 의한 위치/힘의 가속도 분해 제어를 도입해서 작업 공간에 있어서 위치 제어와 힘 제어와의 비간섭화 및 임계 응답 특성을 가지는 이차계를 실현한다. 환경에 불확실성이 존재하는 경우에는 미리 overdamping 응답 특성을 갖도록 이차계를 구성한다.

다음에 사전 지식을 이용해서 구성한 fuzzy rule base 와 근사 추론에 의해서 미지 환경 스프링 정수를 추정하는 퍼지 보상 부분을 구성하여 그것을 동적 보상에 가하는 구조로 되어 있다. 이 제어계로부터 힘 제어에 있어서 문제가 되는 overshoot 를 방지하면서, overdamping 을 대폭으로 완화할 수가 있다.

마지막으로 3축 로봇 매니퓰레이터를 제어대상으로 하여 센서 분해능에 의한 불확실성도 고려한 모의 실험을 행하여 제안한 제어 방법의 유효성을 검토한다.

## II. 가속도 분해에 의한 위치/힘의 제어

### 2.1 시스템의 모델링

본 논문은  $n$  자유도를 가지는 로봇 매니퓰레이터를 제어 대상으로 하며, 구동계는 힘 센서를 가지는 DC 서보 모터계이다. 그리고 로봇의 end-effector와 접촉하고 있는 작업 대상물은 선형 스프링 정수  $K_e$ 로 모델화 한다.

#### 2.1.1 액츄에이터의 다이내믹스

여기서는 로봇 매니퓰레이터의 구동계로써  $n$ 개의 DC 서보 모터를 생각한다.

$$L_a \dot{i}_a + R_a i_a + K_e \dot{q} = v_a \quad (1)$$

$$L_a \ddot{q} + B_f \dot{q} + B_v \operatorname{sgn}(\dot{q}) + B_s (I - \operatorname{sgn}(|\dot{q}|)) = K_t i_a - \tau \quad (2)$$

여기서,  $L_a, R_a \in R^{n \times n}$ 는 모터의 임피던스와 저항행렬,  $K_e, K_t \in R^{n \times n}$ 는 액츄에이터의 역기전력 계수행렬 및 토크 정수행렬,  $B_f, B_v, B_s \in R^{n \times n}$ 는 액츄에이터의 등가 점성마찰계수, 쿨롱마찰계수, 정지마찰계수행렬을 각각 나타내고,  $J_a \in R^{n \times n}$ 는 모터의 등가 관성행렬을 나타낸다. 이들의 행렬은 전부 대각행렬이다. 또한  $i_a, v_a \in R^{n \times 1}$

는 각각 액츄에이터의 전류와 전압벡터,  $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 는 각각 관절의 회전각도, 각속도, 각가속도 벡터, 그리고  $\tau \in R^n$ 는 액츄에이터의 출력 토크 벡터이다. 대부분의 경우, 액츄에이터의 등가 전기시정수는 매우 작기 때문에 일반적으로 무시할 수 있다. 또 (2)식의  $sgn(\dot{q}_i)$ 는 각 요소가 다음과 같이 정의되는 벡터이다.

$$sgn(\dot{q}_i) = \begin{cases} 1 & \dot{q}_i > 0 \\ 0 & \dot{q}_i = 0 \\ -1 & \dot{q}_i < 0 \end{cases}$$

### 2.1.2 로봇 매니퓰레이터의 다이내믹스

$n$  자유도 로봇 매니퓰레이터의 다이내믹스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau - J^T f = J_M(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + C_V \dot{q} + C_Q sgn(\dot{q}) + C_S \{I - sgn(|\dot{q}|)\} \quad (3)$$

여기서,  $J^T \in R^n$ 는 Jacobian 행렬의 전치,  $f \in R^n$ 는 외부환경으로부터 로봇 매니퓰레이터의 end-effector에 작용하는 접촉력 벡터,  $J_M \in R^{n \times n}$ 은 로봇 매니퓰레이터의 관성행렬,  $h \in R^n$ 는 Coliori 및 원심력,  $g \in R^n$ 는 중력,  $C_V, C_Q, C_S \in R^{n \times n}$ 는 매니퓰레이터의 등가 점성마찰계수, 쿨롱마찰계수, 정지마찰계수행렬을 각각 나타낸다.

앞에서 지적한 바와 같이 액츄에이터의 등가 전기시정수는 매우 적기 때문에 무시할 수가 있으므로, 액츄에이터와 로봇 매니퓰레이터의 다이내믹스를 다음과 같은 간결한 식으로 표현할 수가 있다.

$$R_a \dot{i}_a + K_e \dot{q} = v_a \quad (4)$$

$$D(q) \ddot{q} + \omega = K_t i_a - J^T f \quad (5)$$

식 (4)에서  $K_t i_a$ 는 토크  $\tau$ 이고,  $D(q)$  및  $\omega$ 는 다음과 같다.

$$D(q) = J_a + J_M(q) \quad (6)$$

$$\omega = h(q, \dot{q}) + g(q) + B_V \dot{q} + B_Q sgn(\dot{q}) + B_S \{I - sgn(|\dot{q}|)\} + C_V q + C_{Qq} sgn(q) + C_S \{I - sgn(|\dot{q}|)\} \quad (7)$$

### 2.2 가속도 분해에 의한 위치/힘의 완전 보상과 비간섭화

일반적으로 힘과 위치제어를 동시에 실행하기 위해서, 로봇 매니퓰레이터에는 엔코더, 타코 제네레이터 그리고 힘센서가 내장되어 있다. 이들에 의해서 검출되는 정보는 관절각도  $q$ 와 각속도  $\dot{q}$  및 로봇의 end-effector와 대상 물과의 상호작용력  $f$ 이다. 작업 공간에 있어서  $m$  자유도가 힘 제어로 지정되고, 나머지  $n-m$  자유도가 위치제어로 지정되었다고 하자. 또한 힘과 위치목표를 각각  $f_d \in R^m$ 과  $x_d \in R^{n-m}$ 라하고, 힘 제어의 목표는 일정하다고 가정한다. 그러면, 이들의 센서 정보를 이용하여 위치/힘 제어의 피이드 포워드 즉 동적 보상이 실현 가능하다. 위치제어만의 경우에는 가속도 분해제어가 잘 알려져 있다. 위치/힘제어에 있어서도 동적 보상을 이용함으로써 시스템의 응답을 개선할 수 있다. An<sup>[9]</sup>은 다음과 같은 개량형 가속도 분해제어를 제안하고 있다.

$$\tau = DJ^{-1} [(I_n - S)x^* - J\dot{q}] + \omega + J^T S f^* \quad (8)$$

$$x^* = \dot{x}_d + K_{FD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{FP}(x_d - x) \quad (9)$$

$$f^* = K_{FP}(f_d - f) \quad (10)$$

상기 식에서  $x$ 는 작업공간에 있어서 일반화 좌표로써  $\dot{x} = J \dot{q}$ 이다. 또  $S = \text{diag.}(0_{n-m} I_m)$ 는 작업공간에 있어서 각 좌표의 제어성질을 힘으로 할 것인가 위치로 할 것인가를 결정하는 행렬이다.  $I_n$ 과  $I_m$ 은  $n$ 차원과  $m$ 차원의 단위행렬이고,  $0_{n-m}$ 은  $n-m$ 차원의 영행렬이다.  $K_{PD}$ 와  $K_{PP}$ 는 위치제어의 D-제어 이득 행렬과 P-제어 이득행렬을 각각 나타내고, 임계 댐핑응답을 얻을 수 있도록 지정된다. 또한  $K_{FP}$ 는 힘제어의 P-제어 이득행렬을 나타낸다.

종래의 하이브리드 제어방식과 비교하여 상술의 제어방식의 특징은 위치제어부분에 대해서 댐핑항을 도입한 것이다. 그러나 이 개량형 가속도 분해제어에는 두 가지의 문제가 존재한다.

하나는 작업공간에 있어서 힘제어와 위치제어와의 사이에는 완전 비간섭화가 되어 있지 않은 점이다. 식 (8)을 식 (5)에 대입하면

$$D(q)\ddot{q} + \omega = DJ^{-1}[(I_n - S)x^* - \dot{J}\dot{q}] + \omega + J^T S f^* \quad (11)$$

이 얻어진다. (11)식의 양변에  $JD^{-1}$ 을 곱하고,  $\ddot{x} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}$ 를 이용하면,

$$(I_n - S)[(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x})] - S\ddot{x} + Jd^{-1}J^T SK_{FP}(f_d - f) = 0 \quad (12)$$

가 얻어진다. 일반적으로  $JD^{-1}J^T S$ 의 최초의  $n-m$ 행은 영이 아니기 때문에 힘제어로부터 위치제어로 작용이 존재한다. 한편  $S\ddot{x}$ 의 영향으로써 (12)식으로부터  $(f_d - f) = 0$ 을 얻을 수 없다. 단 작업공간에 있어서 힘제어에 관한  $m$ 차원의 가속도가 극히 작기 때문에,  $Jd^{-1}J^T$ 의 특이점 근방이 아니면  $S\ddot{x}$ 의 영향을 무시할 수 있다고 생각한다.

또 하나의 문제점은 힘제어 부분에 댐핑항이 없기 때문에 제어이득의 조정이 어렵고, 오버슈트나 진동이 일어나기 쉽다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 새로운 위치/힘의 가속도 분해 제어방법을 제안한다.

$$\tau = DJ^{-1}[(I_n - S)x^* + S k_{eq}^{-1} f^* - J\dot{q}] + \omega \quad (13)$$

$$x^* = \dot{x}_d + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x) \quad (14)$$

$$f^* = \ddot{x}_d + K_{FD}(\dot{f}_d - \dot{f}) + K_{FP}(f_d - f) = -K_{FD}\dot{f}(f_d - f) + K_{FP}(f_d - f) \quad (15)$$

여기서,  $K_{eq}$ 는 환경과 힘센서의 등가 스프링정수이다. 환경에 관한 정확한 정보가 얻어지는 경우에는 힘의 미분값  $\dot{f}$ 는  $K_{eq}\dot{x}$ 로써 구할 수 있다. 상술한 식 (13)-(15)의 제어법칙의 유효성을 확인하기 위해서 다음과 같은 제어관계식을 선정한다.

$$\begin{aligned} \eta &= (I_n - S)\bar{\eta}_p + S\bar{\eta}_f \\ \bar{\eta}_p &= [\eta_p^T \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad \bar{\eta}_f = [0 \ \dots \ \eta_f^T]^T \end{aligned} \quad (16)$$

$$\eta_p = (\ddot{x}_d + \ddot{x}) + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x) \quad (17)$$

$$\eta_f = (\dot{f}_d + \dot{f}) + K_{PD}(\dot{f}_d - \dot{f}) + K_{FP}(f_d - f) \quad (18)$$

식 (16)으로부터

$$\begin{aligned} \eta &= (I_n - S)(x^* - \ddot{x}) + S(f^* - \dot{f}) \\ &= (I_n - S)x^* + S f^* - (I_n - S + SK_{eq})\ddot{x} \end{aligned} \quad (19)$$

으로 된다. 한편 제어법칙 식 (13)을 식 (5)에 대입하면,

$$\ddot{x} = J \ddot{q} + \dot{J} \dot{q} = JD^{-1} D \ddot{q} + \dot{J} \dot{q} = (I_n - S) x^* + SK_{eq}^{-1} f^* \quad (20)$$

을 얻는다. 또한  $(I_n - S)S = 0$ ,  $(I_n - S)(I_n - S) = (I_n - S)$  및  $SS = S$ 가 되어,  $(I_n - S + SK_{eq}) \ddot{x} = (I_n - S) x^* + SK_{eq} K_{eq}^{-1} f^*$ 을 얻기 때문에 (19)식으로 부터  $\eta = 0$ 이 얻어진다. 또  $S(I_n - S) = 0$ 이 되기 때문에  $\bar{\eta}_p^T = \bar{\eta}_p^T = 0$ 으로 되고, 위치제어와 힘제어와는 비간섭화 된다.

따라서, 제어이득을  $K_{FD}^2 = 4K_{FP}$ ,  $K_{PD}^2 = 4K_{FP}$ 로 선정하면, 제어시스템의 응답은  $\eta_f = 0$ ,  $\eta_p = 0$ 으로 되어 시스템은 임계상태인 선형 2차계로 된다.

### Ⅲ. 퍼지 보상을 이용한 하이브리드 제어

2장에서 서술한 위치/힘의 가속도 분해제어에서는 제어이득의 크기가 등가 스프링정수와 직결하고 있다. 식 (13)으로부터 알 수 있는 바와 같이 로봇 매니퓰레이터와 접촉하고 있는 환경이 딱딱하면 딱딱할수록 동일한 오차에 대해서 제어 입력  $\tau$ 가 작게 되고 제어이득은 증가적으로 감소해 간다. 따라서 환경의 유연성에 관한 정보가 불충분한 경우 완전한 동적 보상이 실현되지 않고 overdamping과 overshoot의 문제가 생긴다.

일반적으로 힘 제어에 있어서 overshoot를 방지하는 것은 특히 중요하다. 따라서 안전을 위하여 먼저 제어계를 overdamping 계처럼 구성하고, 다음에 적절한 방법으로 환경의 유연성에 관한 정보를 획득하여 안전성을 유지하면서 시스템의 응답을 개선하면 된다. 이하 이들의 문제에 관해서 검토를 행하고, 해결 방법을 제안한다.

#### 3.1 Overdamping 제어계의 구성

외부 환경의 애매함에 관한 사전 정보로써 등가 스프링정수의 범위를  $K_{min}$ 으로부터  $K_{max}$ 로 한다. 그리고 등가 스프링정수의 추정값을  $K_{et}$ 로 한다. 이때 동적 보상 식(13)은

$$\tau = DJ^{-1} [(I_n - S) x^* + SK_{et}^{-1} f^0 - \dot{J} \dot{q}] + \omega \quad (22)$$

$$f^0 = -K_{FD} K_{et} \dot{q} + K_{FD} (f_d - f) \quad (23)$$

로 된다. (22)식을 (16)식에 대입하고, (19)식에서부터 (21)식의 도출과정을 참고하면

$$\eta = S(I_n - K_{eq} K_{et}^{-1}) K_{FP} (f_d - f) \quad (24)$$

로 된다. (24)식의 양변에  $S$ 를 곱하여  $(I_n - S)S = 0$ 과  $SS = S$ 로부터

$$\begin{aligned} \eta S &= S \eta_f = S(-\dot{f} - K_{FD} \dot{f} + K_{FP} (f_d - f)) \\ &= S(I - K_{eq} K_{et}^{-1}) K_{FP} (f_d - f) \end{aligned} \quad (25)$$

로 된다. 따라서 힘 제어 부분의 전달 함수는

$$s^2 (I_n + K_{FD} S + K_{eq} K_{et}^{-1} K_{FP}) f(s) = K_{eq} K_{et}^{-1} K_{FP} f_d / s \quad (26)$$

로 된다. 여기서  $s$ 는 라플라스 작용소이다.

환경의 스프링정수  $K_{eq}$ 가 추정값  $K_{et}$  보다 큰 경우, 제어계는 진동이 일어나고 overshoot가 발생한다. 일반적으로 힘제어의 경우는 overshoot를 방지하기 위하여 추정값  $K_{et}$ 를  $K_{max}$ 로 선정하면 좋다.  $K_{eq} K_{et}^{-1} < 1$ 일 때, 시

스텝 전체가 overdamping으로 된다. 일반적으로 overdamping을 방지하기 위해서 시스템의 응답이 다소 늦어지더라도 상관없지만  $K_{max}$ 와  $K_{eq}$ 가 상당히 떨어져 있으면, 시스템의 응답은 극히 늦어지기 때문에 적절한 대책을 강구하지 않으면 안된다. 이것에 대해서는 다시 상세히 검토한다.

### 3.2 퍼지 보상에 의한 방법

힘제어에서 overshoot 를 방지하기 위하여 환경의 스프링정수의 최대값을 고려하여 동적 보상을 구성한다. 그리고 시스템 응답의 지연시간을 줄이기 위해서는, 환경의 유연성을 on-line으로 identification하여 그것에 준한 만큼 동적 보상을 행하면 된다. 그러나 로봇 매니플레이터의 비선형성으로 인하여, 통상의 parameter identification 수법으로써  $K_{et}$ 를 추정하는 것은 곤란하다. 또  $K_{eq}$ 의 변동범위가 대단히 넓기 때문에 identification과정에서 overshoot가 생길 위험이 있다. 한편 인간의 손발로써 힘제어등의 작업을 수행할 때, 인간은 대단히 우수한 적응성을 가진 작업 능력을 보인다. 즉, 인간은 과거의 애매한 경험이나 지식을 활용함으로써 제어 대상의 특성을 동정해 가면서 제어를 행할 수가 있다. 따라서 이와 같은 방법으로부터 제어계에 관한 정량 혹은 정성적인 지식을 이용하여 시스템 응답과 환경 스프링 정수와의 관계를 사전에 근사적으로 조사해서 퍼지 지식 베이스를 구성할 수 있다. 이들의 지식을 이용하여 동적 보상에 인가하면 시스템의 응답 특성을 개선시킬 수가 있다.

구체적으로 설명하면, 미리 등가 스프링정수  $K_{eq}$ 와 시각  $t$ 에 대해서 몇 개의 샘플링 점(기준점)을 정하여 관계식 (29)로부터 off-line 계산으로 시스템 응답  $f(t)$ 와 등가 스프링정수  $K_{eq}$ 와의 비선형 관계를 퍼지화된  $IF(\cdot)$  THEN( $\cdot$ ) rule의 형식으로 기억해 둔다. 다음에 근사 관계를 기본으로 하여 실 시스템의 응답과 매칭을 조사하여 근사 추론으로부터 미지 파라메터를 identification할 수 있다.

### 3.3 퍼지보상의 실현

3.2절의 방법에 입각하여 퍼지보상의 실현 순서를 나타낸다. 여기서는 스칼라계만을 나타내지만 본 방법을 다 변수계에 확장하는 것은 용이하다.

#### 3.3.1 기준 모델 :

관계식 (26)식을 참조하여, 다음과 같은 이차계를 기준모델로 선정한다.

$$f(s) = \omega^2 / s(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2) \quad (27)$$

#### 3.3.2 Sample 집합 :

등가 스프링정수는  $K_{eq} \in [k_{min}, k_{max}]$ 로 두고,  $K_{eq}$ 에 관해서는  $r$  개의 기준점에 대해서 시스템 (27)의 응답을 조사한다.  $k_{eq} = Q \in \mathbf{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_r\}$  단,  $Q_i (i=1, 2, \dots, r)$ 는 스프링정수의 상태를 나타낸다. 예를 들면,  $Q_1 = k_{min}$ 은 스프링정수의 상태를 VS(Very Soft),  $Q_r = k_{max}$ 를 Hd(Hard)로 정의한다. 각 기준값을 환경의 스프링 정수의 참값으로 하고,  $K_{eq}$ 의 예측값을  $K_{max}$ 로 정한다. 이때 힘제어 상태의 각 좌표에 있어서 시스템의 응답은

$$y_i(s) = \omega_i^2 / s(s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2), \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (28)$$

로 된다. 고유 주파수와 감쇄율은 다음과 같이 된다.

$$\omega_i = \sqrt{k_{eq} k_{et}^{-1} k_{FP}} \quad (29)$$

$$\zeta_i = k_{FD} / 2 \sqrt{k_{eq} k_{et}^{-1} k_{FP}} = \sqrt{k_{et} k_{eq}} \quad (30)$$

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 명백하게  $k_{eq} = \text{「HD」}$ 를 제외하고는 전부  $\zeta_i > 1$ 이기 때문에, 시스템의 응답에는 overdamping 이 생긴다.

$k_{eq} \in [k_{\min}, k_{\max}]$ 의 경우, 임의의 시각  $t_j$ 에 대해서 각 기준점에 대응하는 시스템의 응답이 하나로 결정된다. 즉,

$$y_{Q_i}(t_j) = 1 + \frac{\omega_i}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}} \left[ \frac{\exp(-\lambda_i' t_j)}{\lambda_i'} - \frac{\exp(-\lambda_i'' t_j)}{\lambda_i''} \right] \quad (31)$$

단,  $\lambda_i' = (\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) \omega_i$ ,  $\lambda_i'' = (\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) \omega_i$ 이다.

그리고  $y_{Q_i}(t_j) \{i=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, n_T\}$ 를 샘플 집합이라고 한다.

### 3.3.3 시스템 응답의 퍼지화

유한 개 identification rule로써 환경 스프링정수를 조사하기 위해서는 근사추론이 이용된다. 따라서 시스템 응답  $y$ 를 퍼지화할 필요가 있다. 시스템의 overdamping 특성에 의해서 시스템의 응답의 부호가 불변이기 때문에 힘  $f$ 의 절대값의 크기만을 고려하면 된다. 따라서 시스템의 응답을  $k_{eq}$ 의 기준점  $Q_i$ 에 따라  $r$ 개의 라벨  $\mathbf{Y} = \{Y_{Q_1}(t), Y_{Q_2}(t), \dots, Y_{Q_r}(t)\}$ 로 분류하고, 각 라벨에 있어서 시각집합  $\mathbf{T} = \{t_j | j \in n_T\}$ 에 대응하는 기준 모델로부터 시스템 응답의 샘플집합을 on-line 계산한다. 이와 같이하여 얻어진 시스템의 응답을 스프링정수와의 대응관계를 사전지식으로써 다음과 같은  $IF(\cdot) THEN(\cdot)$  법칙에 따라서 기억한다.

$$\begin{aligned} \forall t_j \in T, \quad Q \in \{Q_1, Q_2, \dots, Q_r\} \\ IF y(t_j) \text{ is } Y_Q(t_j) THEN k_{eq} \text{ is } Q \end{aligned} \quad (34)$$

Rule (34)는 「시각  $t_j$ 에서 응답  $y$ 가 라벨  $Y_Q$ 와 일치하면, 스프링정수  $k_{eq}$ 는  $Q$ 이다」라는 것을 나타낸다. 이와 같은 rule은  $r \times n_T$  개이다.

### 3.3.4 퍼지 근사추론

등가 스프링정수를 다음의 근사추론으로 계산한다<sup>[10]</sup>. 먼저 시각  $t_j$ 에 있어서 힘센서의 측정값으로부터 시스템 응답을

$$y(t_j) = |f(t_j) / f_d| \quad (35)$$

로 단위화 한다.

$y(t_j)$ 는 인접한 두 상태 즉  $Y_{Q'}(t_j)$ 와  $Y_{Q''}(t_j)$  사이에 있다. 그리고  $Q'$  및  $Q''$ 는  $\mathbf{Q} = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_r\}$ 에 속하고,  $Y_{Q'}(t_j) < Y_{Q''}(t_j)$ 로 한다. 이 경우 시스템 응답  $y(t_j)$ 가 인접한 두 상태  $Y_{Q'}(t_j)$ 와  $Y_{Q''}(t_j)$  사이에서 매칭하는 정도를 다음과 같이 산출한다.

$$\mu_{Y_{Q'}(t_j)}[y(t_j)] = \text{Mem } 1 \{y(t_j)\} = \frac{Y_{Q''}(t_j) - y(t_j)}{Y_{Q''}(t_j) - Y_{Q'}(t_j)} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \mu_{Y_{Q''}(t_j)}[y(t_j)] &= \text{Mem } 2 \{y(t_j)\} \\ &= 1 - \text{Mem } 1 \{y(t_j)\} \end{aligned} \quad (37)$$

여기서,  $\text{Mem } 1(\cdot)$ 와  $\text{Mem } 2(\cdot)$ 는 소속함수이고, 본 논문에서는 간단하게 하기 위해서 Fig. 1에 나타난 삼각형 상의 소속함수(membership function)를 선정한다.

마지막으로 등가 스프링정수  $k_{eq}$ 는 다음과 같이 근사 추정된다.

$$k_{eq} = [k_{eq}(Q') \mu_{Y_{Q'}(t_j)}\{y(t_j)\} + k_{eq}(Q'') \mu_{Y_{Q''}(t_j)}\{y(t_j)\}] / \Delta \quad (38)$$

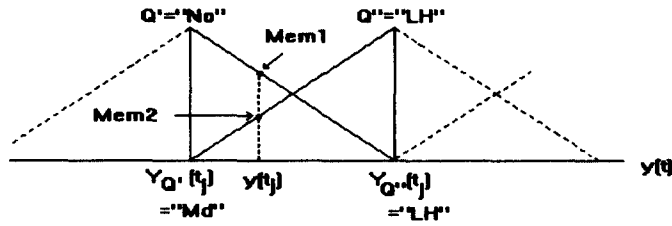


Fig. 1 Membership function of trigonometric type

$$\Delta = \mu_{y_{Q'}(t_j)} [y(t_j)] + \mu_{y_{Q''}(t_j)} [y(t_j)] \quad (39)$$

여기서,  $k_{eq}(Q')$ 과  $k_{eq}(Q'')$   $K_{eq}(Q')$ 는 기준점  $Q'$ 와  $Q''$ 에 있는 등가 스프링정수  $k_{eq}$ 의 값이다.

한편 본 논문에서 제안한 퍼지보상을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 위치/힘제어에 대한 제어계를 Fig. 2에 나타낸다.

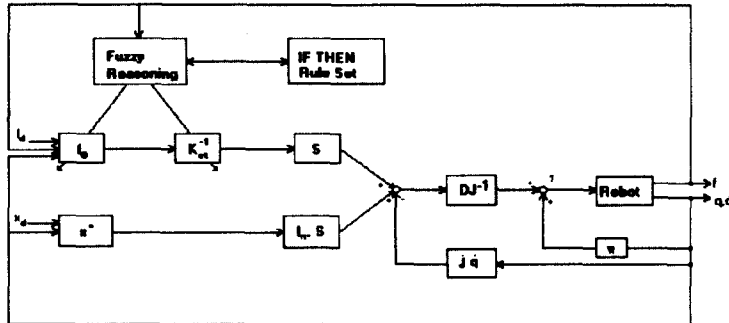


Fig. 2 Block diagram for the resolved acceleration position/force control with fuzzy compensation

#### IV. 검토 및 고찰

퍼지보상을 이용한 위치/힘의 가속도 분해제어의 유효성을 확인하기 위하여 제안한 제어수법을 Fig. 3에 나타내는 3자유도 로봇 매니퓰레이터에 적용한다.

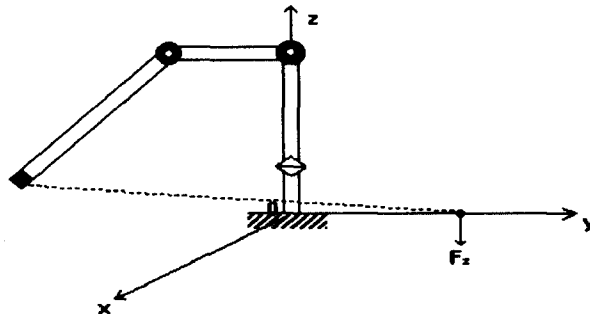


Fig. 3 Robot manipulator of 3 d.o.f. in Cartesian space



#### 4.1 3축 로봇 매니퓰레이터 제어계의 설계

로봇 매니퓰레이터의 link의 길이는 각각 0.1m, 0.5m, 0.5m이고, 서보계의 전기시정수는 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않는다. 그리고 환경의 등가 스프링정수의 범위는  $K_{min} = 10^2$  N/m에서부터  $K_{max} = 10^5$  N/m로 미리 알고 있다고 가정한다. 또한 작업 공간에서  $x$ 축과  $y$ 축 방향으로 위치제어,  $z$ 축 방향으로 힘제어를 하는 경우에 대해서 제어계를 구성한다.

로봇 매니퓰레이터의 end-effector의 위치를 (0.4, 0.0, 0.0)에서부터 (0.0, 0.5, 0.0)까지 이동한다고 가정한다. 그리고  $z$ 축 방향으로 end-effector가 환경과 접촉하고,  $-z$ 축 방향으로 15 N의 힘이 요구되는 것으로 한다. 또한 제어계는 PD(비례 + 미분)로 구성하고, 각각의 제어이득 행렬을 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{aligned} K_{pp} &= \text{diag.}(16, 16, 16) & K_{pd} &= \text{diag.}(8, 8, 8) \\ K_{fp} &= \text{diag.}(100, 100, 100) & K_{fd} &= \text{diag.}(20, 20, 20) \end{aligned}$$

따라서 작업공간에 있어서, 위치제어와 힘제어는 각각 주파수가  $\sqrt{K_{pp}} = 4$  rad/sec와  $\sqrt{K_{fp}} = 10$  rad/sec인 임계 댐핑응답이 된다.

퍼지 rule base를 만들기 위하여, 환경의 유연성의 변동범위에 관해서 다음과 같은 10개의 기준점을 선택한다.

$k_{eq} = 100$	→ VS (Very Soft)	$k_{eq} = 500$	→ So (Soft)
$k_{eq} = 1,000$	→ QS (Quite Soft)	$k_{eq} = 1,800$	→ RS (Rather Soft)
$k_{eq} = 3,000$	→ LS (a Little Soft)	$k_{eq} = 5,000$	→ No (Normal)
$k_{eq} = 8,000$	→ LH (a Little Hard)	$k_{eq} = 12,000$	→ RH (Rather Hard)
$k_{eq} = 30,000$	→ QH (Quite Hard)	$k_{eq} = 10^5$	→ Hd (Hard)

따라서,  $Q = \{VS, So, QS, RS, LS, No, LH, RH, QH, Hd\}$ 로 된다. 또한 기준점 집합  $Q$ 에 대한 퍼지 응답집합을  $Q$ 에 대한 퍼지 응답집합을  $Y = \{VS, Sm, QS, RS, LS, Md, LB, RB, QB, Bg\}$ 로 지정한다. 각각의 라벨의 의미는 "Very Small", "Small", "Quite Small", "Rather Small", "Rather Small", "a Little Small", "Medium", "a Little Big", "Rather Big", "Quite Big", "Big" 이다. 그리고 각 소속함수는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 좌측이 Mem 1, 우측이 Mem 2를 나타내고 있다.

그리고 샘플링 오차와 측정 노이즈의 영향을 적게하기 위해서는 어떤 시간대에 걸쳐서 계산한 추정값의 평균을 취하는 것이 바람직하다. 이를 위해 샘플링 시간 집합  $T = \{t_j | j \in n_T\}$ 에서 갯수  $n_T$ 를 증가시키면 되지만, 그것과 함께  $IF(\cdot) THEN(\cdot)$  rule의 갯수도  $n_T$ 에 비례해서 증가한다.

따라서  $n_T$ 를 증가시키지 않고 추정값의 평균화를 실현하기 위해서, 임의의 2개의 시각  $t_j$ 와  $t_{j+1}$  사이에 퍼지화된 상태의 샘플값을 다음의 보간식으로 on-line으로 산출한다.

$$\begin{aligned} \forall t \in [t_j, t_{j+1}], \quad \forall Q \in Q \\ Y_Q(t) = \frac{Y_Q(t_{j+1}) - Y_Q(t_j)}{t_{j+1} - t_j} (t - t_j) + Y_Q(t_j) \end{aligned} \quad (40)$$

한편 본 논문에서는  $T = \{0.7 \text{ sec}, 0.9 \text{ sec}\}$ 로 선정했다.

#### 4.2 모의실험에 의한 검토

가속도 분해제어 의한 위치/힘 제어의 결과의 한 예를 Fig. 4에 나타낸다.  $x$ 축과  $y$ 축 방향은 위치제어이고  $z$ 축 방향은 힘제어를 실행한 경우이다. 단 등가 스프링정수는 기지이고  $k_{eq} = 15,000$  N/m이다. 제어계를 설계한 대로 임계 댐핑응답 특성을 나타낸다. 또한  $k_{eq} = 1,500$  N/m와  $k_{eq} = 150$  N/m인 경우의 힘제어 부분의 응답을 Fig. 5에 나타낸다.  $k_{eq}$ 의 변동에 관계없이 완전한 동적보상에 의해서 시스템은 거의 동일한 응답특성을 보인다.

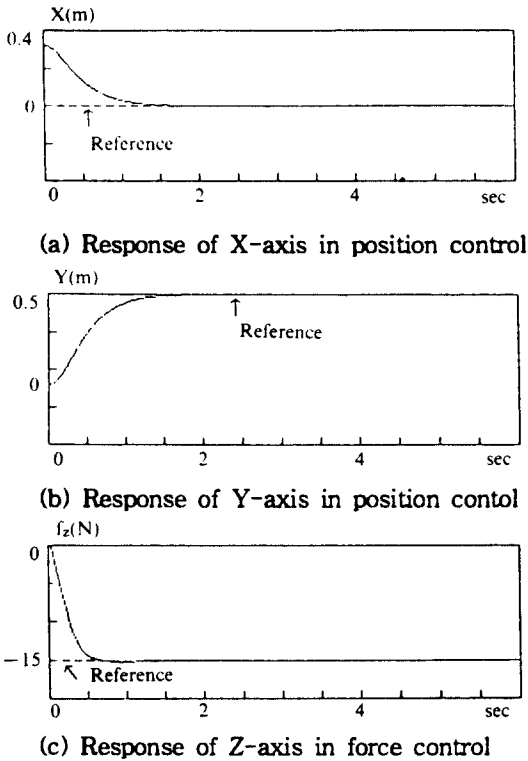
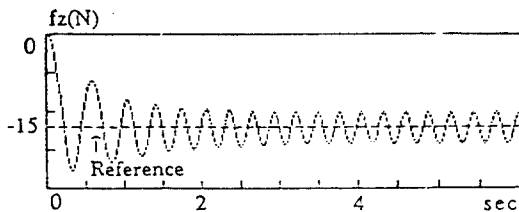


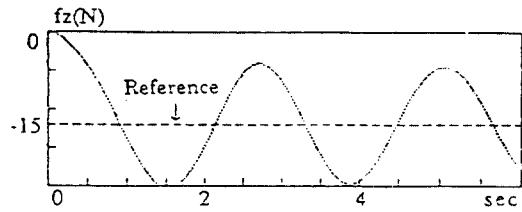
Fig. 4 System response of resolved acceleration position/force control with exact dynamic compensation ( $k_{et} = 15,000 \text{ N/m}$ )

한편 An<sup>[9]</sup>에 의하여 제안한 가속도 분해제어 식 (8)을 이용한 시스템의 힘응답을 Fig. 6에 나타낸다.  $k_{eq}$ 의 10 배의 변동에 대해서 제어이득을 0.2에서 150까지 조정했음에도 불구하고 시스템의 응답이 대단히 진동하고 있음을 알 수 있다.

단, 등가 스프링정수  $k_{eq}$ 가 미지인 경우, 예측값과의 매칭정도에 따라서 시스템의 응답형태가 현저하게 변하는



(a)  $k_{eq} = 1,500 \text{ N/m}$ ,  $k_{FP} = 0.2$

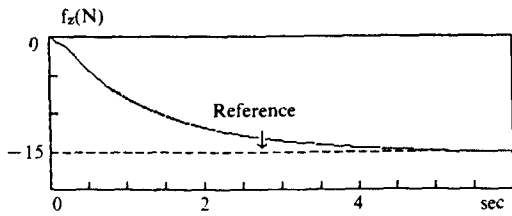


(b)  $k_{eq} = 150 \text{ N/m}$ ,  $k_{FP} = 150$

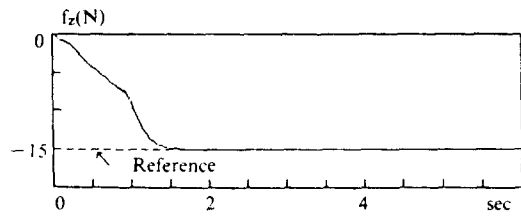
Fig. 6 System response of force control in resolved acceleration position/force control proposed by An<sup>[9]</sup>

것을 알 수 있다. Fig. 7의 (a)에서는  $k_{eq}$ 가 15,000 N/m인 경우 시스템의 힘의 응답을 나타낸다. 이 경우에는 힘의 예측값이  $k_{et} = 10^5$  N/m으로  $k_{eq}$ 와 그다지 큰 차를 보이고 있지 않기 때문에 대략 5초 이내에 목표값에 도달한다. 그러나 (b)와 (c)의 경우는 예측값과 실제의 값이 한 자리 또는 두 자리 이상 다르기 때문에 시스템의 응답도 점차로 늦어지는 것을 알 수 있다. 따라서 퍼지보상에 의한 제어계의 구성이 필요하게 된다.

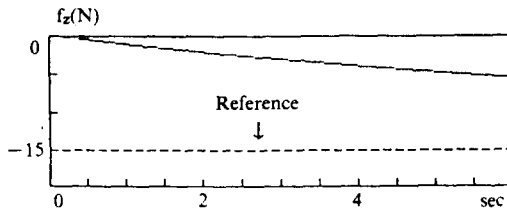
Fig. 8은 퍼지보상을 이용한 위치/힘의 가속도 분해제어에 의한 시스템의 힘응답이다. 등가 스프링정수가 각각  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{eq} = 1,500$  N/m,  $k_{eq} = 150$  N/m인 경우에 대해서 퍼지추론의 결과는 각각  $k_{et} = 16,213.5$  N/m,  $k_{et} = 1,538.5$  N/m,  $k_{et} = 153.9$  N/m이다. 그림에 의하여 제한한 제어계의 시스템 응답이 현저하게 개선됨을 알 수 있다. 모의실험에서의 제어 샘플링은 1 msec 이다.



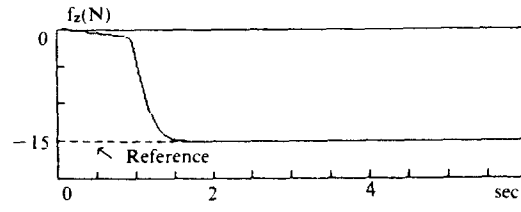
(a) Force response of Z-axis  
(  $k_{eq} = 15,000$  N/m )  
(  $k_{et} = k_{max} = 10^5$  N/m )



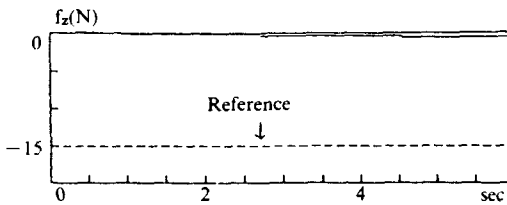
(a)  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{et} = 16,213.5$  N/m



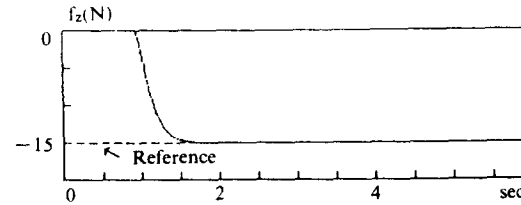
(b) Force response of Z-axis  
(  $k_{eq} = 1,500$  N/m )  
(  $k_{et} = k_{max} = 10^5$  N/m )



(b)  $k_{eq} = 1,500$  N/m,  $k_{et} = 1,538.5$  N/m



(c) Force response of Z-axis  
(  $k_{eq} = 150$  N/m )  
(  $k_{et} = k_{max} = 10^5$  N/m )



(c)  $k_{eq} = 150$  N/m,  $k_{et} = 153.9$  N/m

Fig. 7 System response of resolved acceleration position/force control with maximum equivalent stiffness

Fig. 8 Force response of Z-axis for the resolved acceleration position/force control with fuzzy compensation

### V. 센서 분해능의 영향에 대한 고찰

이상의 제어 알고리즘과 모의실험에서는 각종센서(Encoder, Tacho-generator, Force Sensor)가 무한대의 분해능력을 가지고 있다고 가정했지만, 실제의 경우에는 센서 분해능의 영향에 대해서 검토할 필요가 있다. 특히 힘제어 부분의 퍼지 보상은 상술한 세 종류의 센서 분해능과 관련하고 있기 때문에 제한한 제어 알고리즘의 유효성 검토에 센서 분해능의 영향에 관해서 정량적으로 고찰하지 않으면 안된다. 따라서 본 장에서는 센서 분해능을 고려해서 본 논문에서 제안한 제어계의 유효성을 검토한다.

먼저 제어계에 사용한 각종 센서가 다음과 같은 분해능을 갖는다고 하자.

$$\hat{f} = f + \Delta f, \quad \Delta f \in [-\epsilon_1, \epsilon_1] \quad (41)$$

$$\hat{q} = q + \Delta q \quad \Delta q \in [-\epsilon_2, \epsilon_2] \quad (42)$$

$$\hat{f} = \dot{q} + \Delta \dot{q} \quad \Delta \dot{q} \in [-\epsilon_3, \epsilon_3] \quad (43)$$

이들 식에서 ( $\hat{\cdot}$ )는 센서 분해능을 고려한 측정값이다 그리고  $\epsilon_1, \epsilon_2$  및  $\epsilon_3$ 는 각각 위치 센서, 속도센서 및 힘센서의 분해능을 나타내는 벡터이다.

여기서 어떤 서보 모터의 encoder가 5,000 pulse/rew, tacho-generator가 1,000 rpm, A/D변환기가 16 bit, 모터와 링크가 80 : 1의 하모닉 드라이브로써 커플링 하고 있다고 가정한다. 그러면 encoder의 센서 분해능은  $\epsilon_{2i} = 1.57 \times 10^{-5}$ 이고, tacho-generator의 센서 분해능은  $\epsilon_{3i} = 2 \times 10^{-5}$  rad/sec이다. 그리고 힘센서의 정격이 20 N이고, 이 센서의 분해능은 정격의 10% 즉  $\epsilon_{1i} = 2 \times 10^{-2}$ 이다.

센서 분해능으로부터 퍼지보상의 추정값에 대한 영향은, 주로 부드러운 대상물에 있어서 힘센서 분해능으로부터 퍼지추론 (34)식에의 영향과 상술한 세 개의 센서 분해능으로부터 동적보상 (22)식과 (23)식에의 영향이다. 이하에 각각에 관해서 상세하게 검토한다.

먼저 환경 스프링정수가  $k_{eq} = \lceil \text{VS} \rceil$  일 때 기준모델의 시스템 응답은 거의  $10^{-3}$  오더에 가깝고, 대개 0.5 sec 이후에 시스템 응답은  $2 \times 10^{-3}$  오더를 넘는다. 한편 힘 목표값이 정격의 50% 이상이라고 하면, 힘센서 분해능에 의해서  $f/f_d$ 는  $2 \times 10^{-3}$ 까지의 계산 정도가 얻어진다. 본 연구에서  $T = \{0.75\text{sec}, 0.9\text{sec}\}$ 로 선정할 이유가 여기에 있다.

Fig. 9의 (a), (b) 및 (c)에  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{eq} = 1,500$  N/m, 그리고  $k_{eq} = 150$  N/m에 대해서 퍼지보상을 이용한 제어결과를 나타낸다. 퍼지추론의 결과는 각각  $k_{et} = 15,996$  N/m,  $k_{et} = 1,543$  N/m, 그리고  $k_{et} = 189.8$  N/m이다. Fig. 8와 비교하면 힘센서 분해능의 영향은 거의 무시할 수 있다.

한편 모든 센서 분해능을 고려할 때, 동적보상 식 (22) 및 (23)중의  $f^0$ 는

$$\hat{f}^0 = -K_{FD}K_{et}J(\hat{q})\hat{q} + K_{FP}(f_d - \hat{f}) \quad (44)$$

로 된다.  $J(\cdot)$ 에 관해서 Taylor 급수 전개를 하면

$$\begin{aligned} \hat{f}^0 &= -K_{FD}K_{et}J(q + \Delta q)(\dot{q} + \Delta \dot{q}) + K_{FP}(f_d - f - \Delta f) \\ &= -K_{FD}K_{et}J(q)(\dot{q}) + K_{FP}(f_d - f) - K_{FD}K_{et}J(q)\Delta \dot{q} \\ &\quad - K_{FD}K_{et} \sum_{i=1}^n \frac{\partial J(q)}{\partial q_i} \Delta q_i \dot{q} - K_{FP}\Delta f - O(\cdot) \\ &= f^0 + \Delta \eta + O(\cdot) \end{aligned} \quad (45)$$

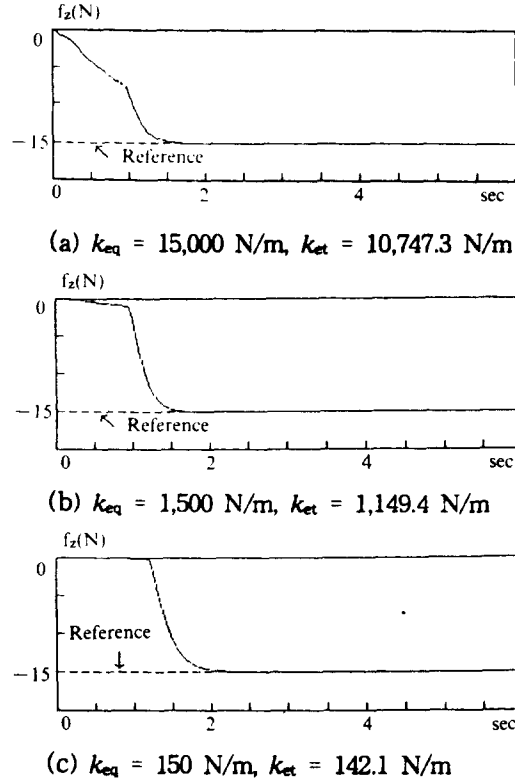


Fig. 9 Force response of Z-axis in the case that force sensor resolution is considered

여기서

$$\Delta \eta = -K_{FD} K_{et} J(q) \Delta \dot{q}$$

$$-K_{FD} K_{et} \sum_{i=1}^n \frac{\partial J(q)}{\partial q_i} \Delta q_i \dot{q} - K_{FP} \Delta f \quad (46)$$

는 센서 분해능에 비례하고,  $O(\cdot)$ 은 센서 분해능의 2차 이상에 비례하고 있다. 센서 분해능의 정도가 충분히 높으면  $O(\cdot) = 0$ 으로 볼 수 있다. 따라서  $\Delta \eta$ 만의 영향을 고려하면 된다. (23)식 대신 (45)식을 이용해서, (22)식을 (16)식에 대입하면, 힘제어 부분에 관해서

$$S(\dot{f} + K_{FD} \dot{f} + K_{eq} K_{et}^{-1} K_{FP} f) = S K_{eq} K_{et}^{-1} (K_{FP} f_d + \Delta \eta) \quad (47)$$

로 된다. 퍼지보상의 효과는 추정값의 精度에 따라서 결정되기 때문에 센서 분해능의 영향을 고찰하려고 할 때,  $K_{FP} f_d$ 와  $\Delta \eta$ 과의 상대 크기를 조사하면 된다. 여기서 검토하는 대상은 벡터이기 때문에 임의의 벡터  $x \in R^n$ 에 관해서 다음과 같은 두 종류의 Norm을 정의한다.

$$\|x\|_1 := \max_i |x_i| \quad (48)$$

$$\|x\|_2 := \sqrt{x^T x} \quad (49)$$

따라서  $K_{FD} f_d$ 의 각 요소의 절대값과  $\|\Delta\eta\|_1$ 과 비교하면 충분하다. 단  $\|\Delta\eta\|_1$ 을 직접 조사하는 것은 불편하기 때문에  $\|\Delta\eta\|_2 \geq \|\Delta\eta\|_1$ 의 성질을 이용해서  $K_{FD} f_d$ 의 각 요소의 절대값과  $\|\Delta\eta\|_2$ 와를 비교하면 된다. Schwarz 부등식으로부터

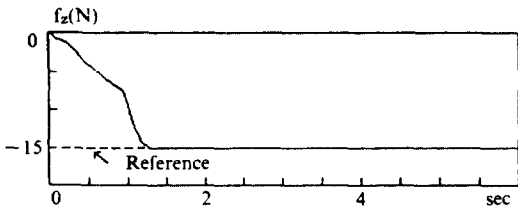
$$\|\Delta\eta\|_2 \leq k_{FD} k_{et} \left[ \|J\Delta\dot{q}\|_2 + \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q} \right\|_2 |\Delta q_i| \right] + k_{FD} \|\Delta f\|_2 \quad (50)$$

를 얻는다. 따라서

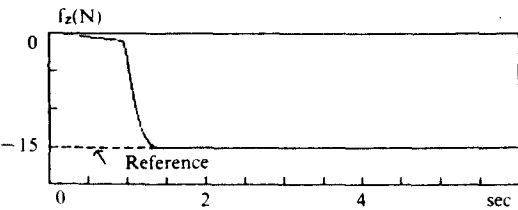
$$\begin{aligned} \|\Delta\eta\|_2 \leq k_{FD} k_{et} \left[ \lambda_{\max}^{\frac{1}{2}}(J^T J) \|\Delta\dot{q}\|_2 + \sum_{i=1}^n \lambda_{\max}^{1/2}\{(\partial J/\partial q_i)^T (\partial J/\partial q_i)\} \|\dot{q}\|_2 |\Delta q_i| \right] \\ + k_{FD} \|\Delta f\|_2 \end{aligned} \quad (51)$$

을 얻는다. 여기서  $\lambda_{\max}(\cdot)$ 는 행렬의 최대 고유값을 나타낸다.

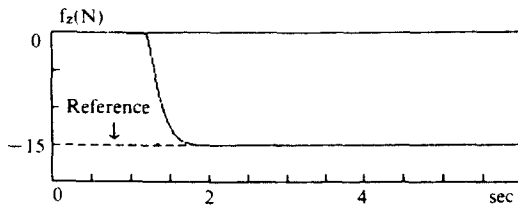
식 (51)을 이용하여 4.2절에서 나타낸 3자유도 로봇 매니퓰레이터의 위치/힘제어에 관한 구체적인 예를 고찰한다. 먼저 로봇 매니퓰레이터 메카니즘의  $\lambda_{\max}[(\partial J/\partial q_i)^T (\partial J/\partial q_i)]$  ( $i=1, 2, 3$ ) 및  $\lambda_{\max}(J^T J)$ 를 계산하면 1.25



(a)  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{et} = 28,664$  N/m

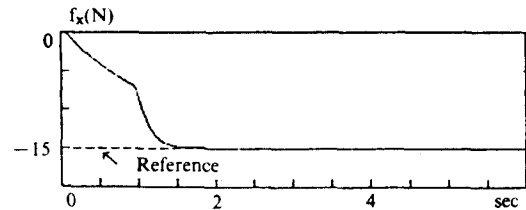


(b)  $k_{eq} = 1,500$  N/m,  $k_{et} = 2,349$  N/m

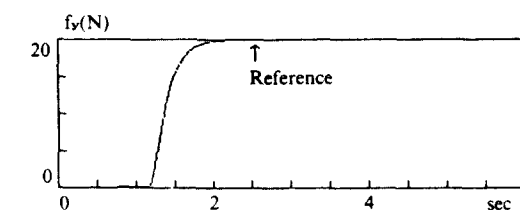


(c)  $k_{eq} = 150$  N/m,  $k_{et} = 285$  N/m

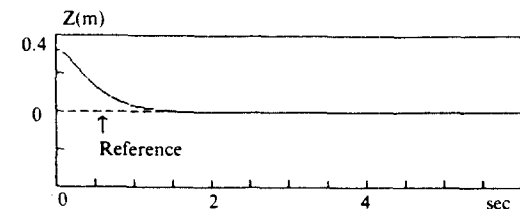
Fig. 10 Force response of Z-axis in the case that maximum equivalent disturbance of +5N is added



(a)  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{et} = 14,203.7$  N/m



(b)  $k_{eq} = 150$  N/m,  $k_{et} = 182.8$  N/m



(c) Position response of Z-axis

Fig. 11 Force response of X, Y-axis and position response of Z-axis for the resolved acceleration position/force control with fuzzy compensation

가 됨을 알 수 있다.

힘제어의 목표값은 항상 정격값에 가깝고, 수치 예에서는  $f_d = 15$  N으로 한다. 실제로 서보계의 위치/힘제어를 수행할 때  $\dot{q}_i(t)$ 의 크기는 대략 1~3 rad/sec 이다. 따라서 간단한 계산에 의하면  $\|\Delta\eta\|_2/k_{FD} \leq 4.3$ 이 된다. 따라서 힘제어의 전달함수 (26)식에 있어서  $f_d = -15$  N에 최대로  $\pm 15$  N의 외란이 가해진 것으로 간주할 수 있다. 그러므로 퍼지보상의 추정값이 이 외란항에 의해서 영향을 받게 된다. 결국 +5 N의 외란을 가했을 때, 퍼지보상의 추정값이 참값보다 약 57~90%정도가 크다. 반면 -5 N의 외란을 가했을 때는 퍼지보상의 추정값이 참값보다 5.3~28.4%가 작다.

단지 본 논문에서 제안한 퍼지보상의 목적은 정밀한 환경 스프링정수를 추정하는 것 보다는 시스템의 overdamping 현상을 완화하는 것이다. 예측한 스프링정수와 그 참값과의 차는 추정에 의해서 수십배에서 수퍼센트로 축소되고, 더구나 overdamping이 일어나지 않으면 퍼지보상의 목적이 충분히 달성되었다고 볼 수 있다. 또한 (47)식은 가장 엄한 조건하에서 구한 것이기 때문에 일반적으로 센서 분해능에 의한 등가의 외란은 그것보다 크게 되지 않는다.

Fig.10에 +5 N의 외란을 인가했을 때의 시스템응답을 나타낸다. 등가 스프링정수  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{eq} = 1,500$  N/m, 및  $k_{eq} = 150$  N/m에 대하여 퍼지 추론의 결과는 각각  $k_{et} = 28,644$  N/m,  $k_{et} = 2,349$  N/m, 및  $k_{et} = 285$  N/m이다. 그림을 보면 알 수 있는 바와 같이 시스템의 응답은 Overshoot가 전혀 발생하지 않고, 목표값에 잘 추종하므로 퍼지보상의 효과가 명백하게 양호함을 알 수 있다. 한편 -5 N의 외란을 인가했을 때의 시스템응답을 살펴보면 등가 스프링정수가  $k_{eq} = 15,000$  N/m,  $k_{eq} = 1,500$  N/m, 및  $k_{eq} = 150$  N/m에 대해서 퍼지 추론의 결과는 각각  $k_{et} = 10,747.3$  N/m,  $k_{et} = 1,149.4$  N/m, 및  $k_{et} = 142.1$  N/m이다.

마지막으로  $x$ 축과  $y$ 축 방향으로 힘제어,  $z$ 축 방향으로 위치제어를 하는 경우의 예를 보인다.  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 등가 스프링정수는 각각 15,000 N/m, 150 N/m이다. 위치제어의 목표값은 좌표값 (0.0, 0.5, 0.4)에서부터 (0.0, 0.5, 0.0)까지 이동한다고 가정하고,  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 힘제어 목표값은 각각 -15 N/m, 20 N/m이다. 등가 스프링정수가 미지인 경우에 퍼지보상에 의하여 identification한 스프링정수는 각각 14,203.7 N/m와 182.8 N/m이고, 이때의 시스템응답을 Fig.11에 나타낸다. 이 경우에도 overshoot가 전혀 발생하지 않으며, 퍼지보상의 효과가 명백함을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 다자유도 로봇 매니플레이터의 위치/힘제어에 관해서 퍼지보상을 이용한 가속도 분해제어를 제안했다. 본 제어수법은 정밀한 제어에 적합한 완전 동적보상 즉 가속도 분해제어와 애매한 제어대상에 대하여 정보처리 능력이 우수한 퍼지수법을 결합함으로써 보다 고도의 제어 성능을 가지는 하이브리드 제어를 실현할 수 있다. 모의실험 결과에 나타낸 바와 같이 환경 스프링정수가 미지일지라도 overshoot 및 overdamping 문제가 완전히 해결된 양호한 응답특성이 얻어진다. 또한 센서 분해능에 대한 본 제어수법의 유효성을 정량적 해석과 모의실험을 통해서 확인했다. 마지막으로 마찰항, 부하의 변동이나 측정 노이즈가 존재하는 경우에 이상적인 시스템의 응답을 어떻게 실현하는가에 대한 연구가 지금 진행중에 있다.

## 참 고 문 헌

1. M.H. Raibert and J.J. Craig: "Hybrid Position/Force Control of Manipulator", Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control, Vol.103, pp.126-133, 1981.
2. M.T. Mason: "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-16(6), pp.418-432, 1981.
3. M.H. Liu, W.S. Chang, and L.Q. Zhang, "Dynamic and Adaptive Force Controllers for Robotic Manipulators, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation", pp.1478-1483, 1988.

4. N. Hogan : "Impedance Control an Approach to Manipulation, Part 1 : Theory, Part 2 : Implementation, Part 3 : Application", Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control, Vol.107, 1985, pp.1-24.
5. D.E. Whitney : "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", The International Journal of Robotics Research, Vol.6, No.1, pp.3-14, Spring 1987.
6. T. Yoshikawa, T. Sugie, and M. Tanaka : "Dynamaic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators-Controller Design and Experiment-", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.6, No.5, pp. 16-22, 1989.
7. M. Tokita, T. Mitsuoka, T. Fukuda, and T. Kurihara, "Force Control of Robot Manipulator by Neural Network", Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.7, No.1, pp.47-51, 1989.
8. Y.F. Li and C.C. Lau : "Application of Fuzzy Control for Servo Systems", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1511-1519, 1988.
9. C.H. An and J.M. Hollerbach, "The Role of Dynamic Models in the Cartesian Force Control of Manipulators, The International Journal of Robotics Research", Vol.8, No.4, pp.51-72, 1989.
10. 菅野道夫, "ファジィ制御", 日刊工業新聞社, 1988.