

論文96-33B-11-1

## 퍼지모델을 이용한 매니플레이터의 강성 제어

## (A Stiffness Control of a Manipulator Using a Fuzzy Model)

金文柱\*, 李義振\*, 曹泳完\*, 金賢泰\*, 朴玟用\*

(Moon-Ju Kim, Hee-Jin Lee, Young-Wan Cho, Hyun-Tae Kim, and Mignon Park)

## 요 약

본 논문에서는 작업 환경의 중요한 특성 중의 하나인 강성을 퍼지모델링하고 이를 이용하여 PD 제어기의 PD 이득을 결정하는 방법을 제시한다. 매니플레이터를 이용한 순응 작업을 수행할 때 작업 환경이나 로봇 자체의 특성 등으로 인해 로봇트를 제어하기가 어렵다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 영상 처리 방법의 하나인 휴변환을 이용하여 입출력 데이터의 관계를 부분 선형식으로 나누어 퍼지규칙을 설정하고, 경사하강법으로 파라미터들을 미세 조정한다. 또한, 결정된 퍼지모델을 이용하여 PD 제어기의 이득을 설계하는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 보이기 위해 힘센서가 부착된 로봇트 매니플레이터가 강성이 변하는 종이 상자의 표면을 트래킹하는 실험을 보이고 실험 데이터를 분석한다. 기존의 방법과의 비교를 위한 성능 지수로는 안정 시간을 이용하였으며 일반 PD 제어기와의 성능 비교를 실시한다.

## Abstract

In this paper, we suggest a new identification method based on the Takagi-Sugeno fuzzy model which represents an environmental stiffness and propose a method to decide PD gains of the PD controller. It is difficult to perform a compliance task due to characteristics of robot itself and uncertain work environment. Therefore, in this paper, we identify the fuzzy rule by dividing the relationship of input-output data into several piecewise-linear equations using the Hough transform which is the one of the image processing method, and fine-tune the parameters by gradient-descent method. And using this fuzzy model, we propose a method to design the PD gain. We show the validity of this method by the experiment of tracking the surface of the paper box as an example of variable environment using robot manipulator and force sensing system. As a performance index, we use the settling time, and perform an analysis between conventional PD controllers and this controller.

## I. 서 론

산업 현장에서 사용과 그 필요성이 점점 증가하고 있는 로봇트 매니플레이터<sup>[1][7]</sup>의 작업의 종류는 크게 제한되지 않은 작업(Unconstrained Task)과 제한된 작업(Constrained Task)으로 나눌 수 있다<sup>[2]</sup>. 제한되지 않은 작업(Unconstrained Task)은 로봇트의

이동이 주변 환경에 의해 제약을 받지 않는 단순한 작업을 가리키며 제한된 작업은 로봇트가 대상 물체를 이동시킬 때 환경을 고려하여 수행해야 하는 작업을 가리킨다. 환경에 의해 로봇트의 움직임이 제약을 받는 작업에서는 엔드 이펙터(End Effector)가 모든 방향으로 움직일 수 없다는 제약이 가해지게 된다.

제한된 작업에서 다루어지는 제약의 제어 방법에는 매니플레이터 암(arm)이 장애물을 회피하면서 원하는 궤적을 따라 움직이게 하는 운동 계획 제어와 실제 다루어지는 물체가 주변 환경의 접촉을 필요로 하는 순

\* 正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering, Yonsei Univ.)

接受日字:1995年2月13日, 수정완료일:1996年10月29日

응 운동 제어 등이 있다.

순응 운동 제어에 관한 기존의 방법으로는 측정된 힘에 대응하는 로봇 암(arm)의 속도를 어드미턴스(Admittance) 행렬로 나타내서 사용하는 분해율(Resolved rate) 매니플레이터 제어<sup>[11][12]</sup>, 매니플레이터의 움직임이 힘 응용 작업의 원하는 방향에 가까운 방향으로 정렬되어 있는 경우 특정 조인트를 선택함으로써 그 물체에 적용되는 힘을 제어하는 방법<sup>[13]</sup>, 혼성 힘/위치 제어<sup>[4][15]</sup> 등이 있다. Salisbury는 암의 강성을 능동적으로 제어하는 방법을 제시하였는데<sup>[6]</sup>, 이는 핸드 좌표계에서 임의로 위치한 한 프레임의 3개의 위치와 3개의 변위 강성을 명시하게 하는 것으로 명령된 강성을 자유로이 변경할 수 있고 잡은 물체를 원하는 좌표로 가져오게 하는 명목상의 위치 제어를 명시할 수 있다.

이와 같은 기존의 힘제어 알고리즘은 매니플레이터가 접촉하고 있는 작업 환경의 변화를 제어에 반영하지는 못하였다. 또한, 센서를 통해 받아들이는 데이터도 센서의 측정 시간 지연, 센서 구조상의 기계적인 진동 등을 고려하지 않고서는 신뢰하기 어렵다. 변화하는 환경을 고려하는 근사적인 모델링으로 이런 오차들을 상쇄시켜 줄 수도 있지만 이는 근본적인 해결 방법이 되지는 못한다.

이에 본 논문은 새로운 퍼지 모델링 방법을 이용한 강성 제어를 새로운 힘제어 방법으로 제시한다. 미리 환경의 강성을 휴변환<sup>[8][9][10]</sup>을 이용한 새로운 퍼지 모델링 방법으로 모델링하고 이를 이용하여 강성 제어를 함으로써 수동적인 의미로서의 강성을 이용하여 환경에 적합한 제어 인자를 찾을 수 있게 하여 보다 안정적인 제어가 가능하도록 한다.

## II. 능동 강성 제어

Salisbury에 의해 제안된 힘제어 방법<sup>[6]</sup>으로서 매니플레이터의 핸드 좌표계에서 임의로 위치한 프레임의 세 개의 이동 강성과 세 개의 회전 강성을 명시하여 변화하는 작업 요구 사항에 따라 이 강성을 변경하게 함으로써 원하는 위치와 수행 가능한 위치 사이의 오차를 줄이는데 사용된다.

이 방법은 힘제어를 위한 방법이지만 실제로는 위치 제어를 효율적으로 수행하기 위한 보조적인 방법이라고 할 수 있다.

### 1. 기본적인 강성의 공식화

강성(Stiffness)이라 함은 로봇 핸드에서의 힘이 명시된 위치에서 변형된 거리에 따라 증가하는 힘과 거리의 비율이다. 기본적인 강성을 정식화하면 선형 스프링 관계로부터 식(1)과 같은 6차원 행렬 표현으로 일반화된다.

$$F = K\delta X \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 6차의 강성 행렬,  $\delta X$ 는 명령된 위치  $X_0$ 로부터의 일반화된 변위,  $F$ 는 6차원의 힘벡터이다. 이러한 정식화에서 일반화된 위치의 변위와 이에 대응하는 힘의 선형적인 관계를 유지하기 위해서는  $\delta X$ 가 3개의 수직인 이동 요소와 수직 축에 대하여 3개의 미소 회전 요소를 가져야 한다는 제약 조건을 가진다. 자코비안 변환(Jacobian Transformation)인 미소 변환 행렬  $J$ 를 사용하여 조인트(Joint) 각 변위로부터 카테시안(Cartesian) 변위를 결정하면  $\delta\theta = \theta - \theta_0$ 를 실제 조인트 각과 명시적으로 명령된 조인트 각 사이의 차로 정의하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\delta X \approx J\delta\theta \quad (2)$$

정적, 동적인 힘이 보상되어지거나 작아서 무시될 수 있다고 가정하면 로봇 핸드(hand)에 힘  $F$ 를 적용하는데 필요한 조인트 토크  $T$ 를 자코비안 전치 행렬을 이용하여 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$T = J^T F \quad (3)$$

식(1), 식(2), 식(3)을 결합하여 로봇 핸드를 카테시안 공간에서 6차원의 스프링처럼 행동하게 하는데 필요한 조인트 토크에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$T = J^T K J \delta\theta \quad (4)$$

식(4)에서  $K_\theta = J^T K J$ 는 조인트 강성 행렬이라 불린다.

### 2. 제어 모델과 구현

로봇 암이 위에서 제시한 바와 같이 정해 준 강성을 가지고 행동하려면 제어된 힘을 제어 구조 내부 계층에서 핸드 끝에 적용할 수 있어야 한다. 우선 바이어스 힘  $F_B$ 를 중첩하여 사용하면 결과적인 조인트 토크 명령  $T_C$ 는

$$T_C = K_\theta \delta\theta + T_B, \quad \text{여기서 } T_B = J^T F_B \quad (5)$$

가 된다. 이것은 원하는 방향의 강성을 영(0)으로 하여 핸드에서의 위치에 무관한 힘을 적용할 수 있게 한다. 이론적으로 Salisbury가 제안한 강성 제어에서는 위치를 힘으로 변환시켜 제어함으로써 실제 힘을 제한시켜 제어할 필요는 없지만 제한이 없으면 힘 응용 작업의 감도가 많이 떨어진다. 손목 센서의 힘  $F_s$ 로부터 자코비안 행렬을 이용하면 각 조인트에의 토크  $T_s$ 를 식(6)과 같이 결정할 수 있다.

$$T_s = J^T F_s \quad (6)$$

이로부터 각 조인트의 토크 에러  $\delta T = T_c - T_s$ 가 결정되고 원하는 접촉 힘이 핸드에서 유지되도록 모터 토크를 교정한다.

### III. 새로운 강성제어

조인트 좌표계에서의 매니플레이터의 동적 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_d \quad (7)$$

여기서  $N(q, \dot{q}) = V(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q)$  이고  $q$ 는 조인트좌표,  $M(q)$ 는 관성행렬,  $\tau_d$ 는 외란에 의한 토크,  $\tau$ 는 입력 토크이며  $N(q, \dot{q})$ 는 비선형항을 나타낸다. 식(7)은 매니플레이터의 엔드 이펙터가 환경에 접촉하지 않은 상태의 식으로 접촉하여  $f$ 의 힘을 받는 매니플레이터의 수정된 운동 방정식은 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_d + J^T(q)f \quad (8)$$

여기서  $J$ 는 자코비안 행렬이다. 기존의 힘제어를 위한 강성 제어기는 PD형 제어기로서 제어기의 식이  $\tau = -K_v \dot{f} + K_p(f - f_d)$ 로 주어지고 이 때 환경에 가해지는 힘은

$$f = k_e(x - x_e) \quad (9)$$

로 정의된다. 환경의 강성인  $k_e$ 가 크고 힘이 가해지는 위치에 상관없이 일정하다면 힘  $f$ 에 관한 식(9)는 유효하며 제어기도 안정하게 동작한다. 즉, 강성 제어는 강성이 고정된 환경에서는 주어진 작업을 잘 수행하는 반면에 강성이 변하는 환경에서는 좋은 수행 능력을 보이지 않는다.

환경의 강성  $k_e$ 가 위치에 따라 변한다면 실제 환경에 가해지는 힘은 다음과 같이 어떤 작업을 수행하기 전에 설정해 놓은 경로  $P$ 에 대하여 변하는 강성  $k_e(P)$ 로 나타낼 수 있다.

$$f_r = k_e(P)(x - x_e) \quad (10)$$

$k_e$ 의 변화는 측정 가능하지만 측정시의 오차, 외란 등이 있을 수 있고 비선형적인 특성을 가지고 있으므로 이를 그대로 수식화하여 제어규칙의 파라미터로 쓰는 것은 신뢰하기 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 불확실성을 극복하기 위하여 주어진 작업을 수행하기 전에 오프라인 상태에서  $k_e$ 를 퍼지모델링한 후 이를 이용하여 온라인 상태로 PD 제어기의 파라미터를 결정하여 로봇의 제어에 이용한다. 본 논문에서는 강성의 입출력 데이터의 관계를 회상 처리 방법 중의 하나인 휴변환을 이용하여 퍼지모델링한다. 퍼지모델에서 시스템의 입출력 데이터의 관계를 묘사하는데 사용되는 후건부 선형식의 세그먼트 개수를 휴변환을 이용하여 결정하고 경사 하강법을 이용하여 각 퍼지 규칙에 쓰이는 소속 함수의 중심과 분산을 조정함으로써 파라미터의 미세조정을 수행한다. 퍼지모델링을 거쳐서 얻어진 데이터를 동적 운동 방정식에 대입하여 각각의 경우에 대한 PD 파라미터를 얻는다.

#### 1. 퍼지모델

##### 1) 퍼지모델의 새로운 설정(Identification)

경로에 따라 변하는 강성  $k_e$ 를 모델링하기 위해 본 논문에서 새롭게 제안하는 퍼지 모델링 방법은 전건부가 퍼지 소속 함수에 의해 퍼지 분할되고 분할된 각 전건부에 대해 후건부에서 출력이 입력에 대한 선형식으로 표현되는 Takagi와 Sugeno의 퍼지모델<sup>[11]</sup>을 이용한다.

$L^i$ : If  $x_i$  is  $A_1^i$  and  $x_2$  is  $A_2^i, \dots, x_m$  is  $A_m^i$

$$\text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_m^i x_m \quad (11)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w^i y^i}{\sum_{i=1}^n w^i}, \quad \text{여기서 } w^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) \quad (12)$$

여기서  $L^i (i = 1, 2, \dots, n)$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙,  $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 는 입력 변수,  $y^i$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙으로부터의 출력,  $a_j^i$ 는 후건부 파라미터,  $A_1^i, A_2^i, \dots,$

$A_{im}^i$ 는 퍼지 소속 함수이다. 식(11), 식(12)와 같이 이 퍼지모델은 비선형 입출력 관계를 분할된 각 입력 공간에 대한 부분 선형식의 조합으로 표현한다. 식(11), (12)에서 출력은 전진부 파라미터  $w_i$ 와 후진부 파라미터  $a_i$ 에 의해 결정되는데 전진부 파라미터보다 후진부 파라미터에 의해 많은 영향을 받으므로 본 논문에서는 먼저 후진부를 설정하고 그 후에 전진부를 설정한다. 후진부 파라미터들은 2차원 평면 데이터로부터 일련의 선형 관계들을 구하는 휴변환(Hough Transformation)에 의해 설정되는데 이는 선형식들의 초기치 설정 과정을 필요로 하지 않는다는 장점을 가진다. 여기서 퍼지모델의 파라미터들을 미세조정하기 위해 경사 하강 알고리즘(Gradient Descent Algorithm)을 이용하는 방법을 제안한다. 후진부의 구조와 선형 방정식에 포함된 데이터에 따라 전진부 구조와 전진부 파라미터가 결정된다.

#### 가) 휴변환을 이용한 후진부 설정

주어진 시스템을 부분 선형식으로 표현하기 위해서는 입력 공간이 분할되어야 한다. 일단 입력 공간이 분할되면 분할된 각 부분 공간은 출력이 입력에 대한 선형식으로 표현되어 퍼지모델의 각각의 퍼지규칙을 형성하는데 사용된다. 단일 입력 단일 출력(SISO) 시스템의 경우에는 시스템의 입력과 출력이 2차원 평면 상의 한 점  $(x_i, y_i)$ 으로 사상(mapping)될 수 있으므로 사상된 입출력 데이터는 휴변환하여 직선 부분을 추출하고 파라미터를 설정한다. 평면 상의 한 점  $(x_i, y_i)$ 를 지나는 직선은 변수  $a$ 와  $b$ 에 대하여 방정식  $y_i = ax_i + b$ 를 만족한다. 이 방정식을  $b = -x_i a + y_i$ 로 하여 변수 공간인  $ab$ 평면으로 변환하면 고정된 점  $(x_i, y_i)$ 에 대하여 직선을 얻는다. 다른 점인  $(x_j, y_j)$ 도 또한 변수 공간에서 한 직선으로 표현되며 이 직선은  $b = -x_j a + y_j$ 와  $(a', b')$ 에서 교차한다. 여기서  $a'$ 은  $xy$ 평면에서 두 점  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$ 를 지나는 직선의 기울기이며  $b'$ 은 절편이다. 실제로 이 직선에 포함된 모든 점들은 휴변환에 의해  $(a', b')$ 으로 사상된다. 점  $(x_i, y_i)$ 를 모든  $i$ 에 대하여 휴변환한 결과를  $ab$ 평면을 분할한 셀(cell)에 누적시켜 누적된 값에 의해 직선 성분을 추출할 수 있다. 누적 셀들을 계산할 때, 직선이 수직 위치에 가까워짐에 따라 기울기와 절편이 무한대로 수렴하는 계산상의 어려움이 있기 때문에 실제로는 식  $y_i = ax_i + b$  대신 식(13)을 사용하여  $\rho\theta$  평면

에서 누적 셀들을 형성한다.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (13)$$

휴변환의 결과는  $\rho\theta$  평면 상의 셀들에 누적되고 상대적으로 높은 값을 갖는 셀들이 퍼지모델의 부분 선형식의 고려 대상으로서 선택된다. 이 극점들 중 근접해 있는 점들은 각각 비슷한 기울기와 절편의 선들을 나타내고, 이는 비슷한 부분의 퍼지 규칙이 많이 발생함을 의미하므로 불합리한 모델링 결과를 보일 수 있다. 따라서  $\rho\theta$  평면 상의 누적 셀들 중에서 국부적인 최대점(local maximum)의 셀들이 고려 대상 셀로 선택된다. 휴변환은 보통 2차원(특히 영상)에 대해 사용되지만 이것은 좌표벡터  $x$ , 계수벡터  $c$ 를 갖는  $g(x, c) = 0$  형태의 어떤 함수에도 적용 가능하므로 다입력 다출력 시스템의 경우에도 적용할 수 있다. 그림 1은 단일 입력과 단일 출력 시스템의 입출력 데이터로부터 휴변환을 통해 얻은 직선을 나타내고 있는데 각각의 직선은 부분적인 영역에서 입출력 데이터쌍을 잘 묘사하고 있다. 입력공간은 각 직선이 입출력 데이터쌍을 잘 묘사하는 영역들로 퍼지분할되고 분할된 영역은 퍼지모델의 전진부를 구성하게 되며 이 전진부에 대한 입출력 관계를 나타내는 후진부는 그 입력영역을 묘사하고 있는 직선의 관계식으로 구성되게 된다.

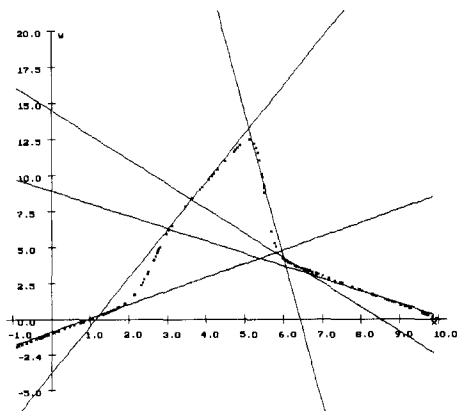


그림 1. 휴변환에 의해 얻어진 선형 세그먼트  
Fig. 1. The linear segments obtained by the Hough transform.

#### 나) 전진부 설정

전진부 구조 설정을 위한 입력 공간의 분할은 휴변환에 의해 얻어진 후진부 파라미터에 따라 입출력 데이터의 연속성을 고려하여 클러스터링(clustering) 방

법에 의해 수행한다. 입력 공간이 분할되면, 분할된 각 영역은 퍼지 모델의 퍼지 규칙을 만드는데 사용된다. 선형 세그먼트(segment)에 가장 가까운 데이터는 세그먼트의 초기 클러스터에 포함되며, 각 세그먼트들은 클러스터의 초기 집합을 형성한다. 모든 입출력 데이터가 초기 클러스터에 할당되면 초기 클러스터의 중심과 분산이 계산된다.

본 논문에서는 클러스터링 방법 중 구성 항목들의 수를 모르는 경우에 쓰이는 샘플 집합 구성(adaptive sample set construction) 방법을 사용하여 주어진 데이터로부터 분할과 클러스터링의 수를 결정한다. 클러스터링 방법에 의해 입력 공간이 분할되면 클러스터들의 중심과 분산은 퍼지모델의 전건부 파라미터를 설정하는데 사용된다. 모든 소속 함수들은 가우시안(gaussian) 함수를 사용하여 다음과 표현한다.

$$A_i(Z_i, S_i, X) = \exp[-((X-Z_i)/S_i)^2] \quad (14)$$

여기서  $Z_i$ 는  $i$ 번째 클러스터의 중심이고  $S_i$ 는 클러스터의 표준편차이다.

2) 경사 하강 알고리즘 (Gradient Descent Algorithm)에 의한 미세조정

정리 1과 정리 2는 퍼지모델의 파라미터들을 미세조정하는데 사용되는 알고리즘이다. 정리 1은 전건부에 대한 미세조정 알고리즘이고 정리 2는 후건부에 대한 미세조정 알고리즘이다.

**정리 1**

퍼지모델은 식(15)에 의하여 표현되고 식(16)은 추론 결과 식이다.

$$L^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i(p_{11}^i, p_{12}^i), x_2 \text{ is } A_2^i(p_{21}^i, p_{22}^i), \dots, x_m \text{ is } A_m^i(p_{m1}^i, p_{m2}^i),$$

$$\text{then } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_m^i x_m. \quad (15)$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n w^i y^i}{\sum_{i=1}^n w^i} \quad \text{여기서 } w^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) \quad (16)$$

여기서  $p_{jk}^i$ 는  $i$ 번째 규칙에서  $j$ 번째 전건부의 언어 변수를 구성하는  $k$ 번째 변수이다. 이 때, 퍼지모델의 전건부 파라미터는 다음과 같은 학습 방법에 의해 미세조정될 수 있다.

$$p_{jk}^i(t+1) = p_{jk}^i(t) + \Delta p_{jk}^i \quad (17)$$

$$\Delta p_{jk}^i = \gamma(y_{des} - y^*)(y^i - y^*) \frac{1}{\sum_{i=1}^m w^i} \frac{\partial w^i}{\partial p_{jk}^i} \quad (18)$$

여기서  $\gamma$ 는 학습율,  $y_{des}$ 는 원하는 출력,  $y^i$ 는 퍼지 모델의  $i$ 번째 규칙의 출력,  $y^*$ 는 퍼지모델에서 얻어진 출력을 나타낸다.

(증명)

주어진 샘플 데이터  $(X, y_{des})$ 에서  $y_{des}$ 와  $y^*$  사이의 차를 오차  $e$ 로 정의한다.

$$e = y_{des} - y^* = y_{des} - \frac{\sum_{i=1}^m w^i y^i}{\sum_{i=1}^m w^i}$$

전건부 파라미터 제공오차  $e^2$ 을 줄이도록 조정되어야 하므로 경사 하강법으로부터 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta p_{jk}^i &= -\gamma \frac{\partial}{\partial p_{jk}^i} \left( \frac{e^2}{2} \right) = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial p_{jk}^i} \\ &= \gamma(y_{des} - y^*) \frac{\frac{\partial}{\partial p_{jk}^i} \left( \sum_{i=1}^m w^i y^i \right) \times \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m w^i y^i \times \frac{\partial}{\partial p_{jk}^i} \left( \sum_{i=1}^m w^i \right)}{\left( \sum_{i=1}^m w^i \right)^2} \\ &= \gamma(y_{des} - y^*) \frac{\frac{\partial w^i}{\partial p_{jk}^i} y^i \times \sum_{i=1}^m w^i - \sum_{i=1}^m w^i y^i \times \frac{\partial w^i}{\partial p_{jk}^i}}{\left( \sum_{i=1}^m w^i \right)^2} \\ &= \gamma(y_{des} - y^*)(y^i - y^*) \frac{1}{\sum_{i=1}^m w^i} \frac{\partial w^i}{\partial p_{jk}^i} \quad (\text{Q.E.D}) \end{aligned}$$

**정리 2**

후건부 파라미터는 다음의 학습 방법에 의해 조정될 수 있다.

$$a_j^i(t+1) = a_j^i(t) + \Delta a_j^i \quad (19)$$

$$\Delta a_j^i = \gamma(y_{des} - y^*) \frac{1}{\sum_{i=1}^m w^i} w^i x_j \quad (20)$$

여기서  $\gamma$ 는 학습율,  $y_{des}$ 는 원하는 출력이고  $y^*$ 는 퍼지모델에서 얻어진 출력이다.

(증명)

후건부 파라미터는 경사 하강 알고리즘을 이용하여 전건부와 같이 제공오차  $e^2$ 을 줄이도록 조정되어야 하므로 경사 하강법에 의해,

$$\begin{aligned} \Delta a_j^i &= -\gamma \frac{\partial}{\partial a_j^i} \left( \frac{e^2}{2} \right) = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial a_j^i} \\ &= \gamma(y_{des} - y^*) \frac{1}{\sum_{i=1}^m w^i} w^i x_j \quad (\text{Q.E.D}) \end{aligned}$$

## 2. 퍼지모델을 이용한 힘제어기의 설계

본 논문에서 제안된 퍼지모델 방법을 이용한 강성 제어의 기본 구조는 다음과 같다. 오프라인 상태에서 위치에 따라 측정된 환경의 강성 데이터를 필터를 통해 잡음을 제거하고 퍼지모델링을 수행함으로써 강성 데이터의 퍼지모델과 PD 제어기의 원형 2차식<sup>[12]</sup>을 이용하여 제어기를 구성할 수 있다.

제어기는 식(21)과 같이 표현되고 제어 대상은 식(22)와 같이 표현된다.

$$\tau = -K_D(P)\dot{\hat{x}} + K_P(P)\hat{x} \quad (21)$$

$$\tau = \bar{M}\ddot{x} + K_e(P)(x - x_e) \quad (22)$$

여기서  $P$ 는 주어진 작업 위치이고  $K_e(P)$ 는 위치에 따라 변화되는 강성이며  $K_P(P)$ 와  $K_D(P)$ 는 각각 위치  $P$ 에 따라 변경되어야 할 P, D 이득이다. 원하는 힘에 관한 식  $f_d = K_e(P)(x_d - x)$ 에서  $\hat{x} = x_d - x$ 이고  $\bar{M}$ 은 주어진 위치에서의 관성항이다. 위의 식(21)과 식(22)를 연립하면 다음과 같다.

$$\bar{M}\ddot{x} + K_D(P)\dot{\hat{x}} + (K_e(P) + K_P(P))x = K_e(P)x_e + K_P(P)x_d \quad (23)$$

$f_d = K_e(P)(x_d - x)$ 에서  $x_d = \frac{f_d}{K_e(P)} + x_e$ 가 되므로 식(23)은

$$\begin{aligned} \bar{M}\ddot{x} + K_D(P)\dot{\hat{x}} + (K_e(P) + K_P(P))x \\ = K_e(P)x_e + \frac{K_P(P)f_d}{K_e(P)} + K_P(P)x_e \end{aligned} \quad (24)$$

가 된다. 식(24)를 정해진 위치  $P$ 에서 라플라스 변환을 취하면  $K_P(P)$ 와  $K_D(P)$ 는 상수로 볼 수 있으므로 다음 식(25)와 같은 결과 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} [\bar{M}s^2 + K_D(P)s + (K_e(P) + K_P(P))]X(s) = (K_e(P) \\ + K_P(P))X_e(s) + \frac{K_P(P)}{K_e(P)}F_d(s) \end{aligned} \quad (25)$$

그림 2는 식(25)로 표현된 시스템의 블록 다이어그램을 나타내고 있는데 입력이 두 개인 시스템으로 간주될 수 있으며 두 입력에 각각 이득을 곱하여 중첩한 후 시스템에 전달되는 형태를 이룬다. 이 때, 이 시스템의 전달함수를 다음과 같이 정의한다.

$$H(s) = \frac{1}{[\bar{M}s^2 + K_D(P)s + (K_e(P) + K_P(P))]} \quad (26)$$

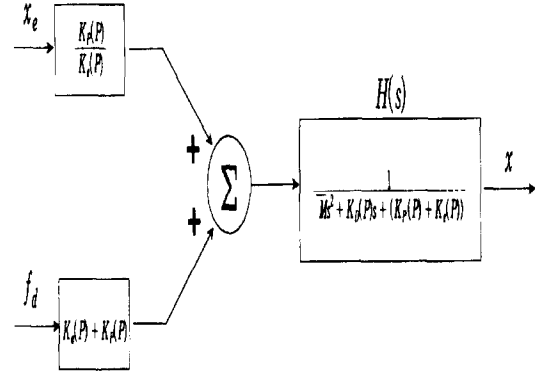


그림 2. 시스템 블록 다이어그램

Fig. 2. System block-diagram.

여기서 관성항  $\bar{M}$ 은 주어진 좌표의 함수로서 로봇트가 표면에 접촉하여 힘제어를 하고 있으므로 급격한 위치의 변화가 없다고 가정할 때 상수로 간주할 수 있다. 식(26)으로 표현된 제어기의 특성을 원하는 대로 설계하기 위해서 다음과 같은 원형 2차 제어기의 파라미터를 이용한다.

$$H_p(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (27)$$

주어진 오버슈트와 안정 시간을 기준으로 설계된 파라미터  $w_n$ 과  $\zeta$ 로부터 식(26)과 식(27)을 비교함으로써 원하는 P이득과 D이득을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_P(P) = \bar{M}w_n^2 - K_e(P) \quad (28)$$

$$K_D(P) = \bar{M} \times 2\zeta w_n \quad (29)$$

## IV. 실험 및 결과 고찰

전체 시스템을 관리하는 호스트 컴퓨터로는 IBM PC 호환기종 80486DX2를 사용하며 실제 작업을 수행하는 로봇트는 미쯔비시(Mitsubishi)사의 RV-M2 5축 수직 다관절 로봇이다. 힘제어의 대상은 길이, 넓이, 높이가 각각 160mm, 125mm, 65mm인 두께 1mm의 종이 상자이다. 이 대상체는 중심으로 갈수록 강성이 작아져 즉, 무른 성질이 커지므로 일정한 제어 파라미터로는 제어가 어렵다는 특징이 있다.

그림 3에서와 같이 주어진 실험 대상체를 콘베이어

위에 위치시키고 길이 방향으로 로봇의 X축을 정렬하고 로봇의 Z축은 실험 대상체의 높이 방향으로 정렬하였다. 이렇게 함으로써 고려해야 할 좌표를 X좌표와 Y좌표, 그리고 Z축의 힘만으로 한정시켜 실험을 진행하였다.

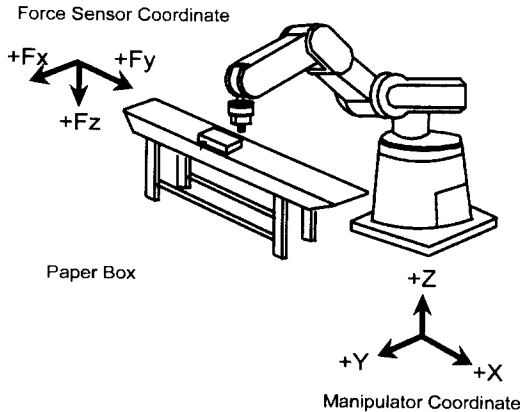


그림 3. 전체 시스템 좌표계  
Fig. 3. Overall system coordinates.

로봇의 핸들을 물체 위 3mm에 위치시키고 Z축의 위치를 바꿔가며 힘을 제어한다. 위에서 전개한 이론과 이에 해당하는 축을 명시하면 다음과 같다.

- 1) 경로  $P \Rightarrow Y$ 축의 위치를 명시하여 경로를 지정한다.
- 2) 제어 거리  $x \Rightarrow Z$ 축의 위치를 PD 제어에 이용한다.
- 3) 제어 힘  $f \Rightarrow Z$ 축의 힘을 이용, PD 제어를 수행한다.

위의 세 가지 정의를 바탕으로 기존의 PD 제어와 본 논문에서 제시한 방법의 제어 성능을 비교한다.

### 1. 기존의 방법

기존의 방법으로 힘을 제한받아 PD 제어를 수행하는 경우, PD 제어기의 이득을 달리하면서 실험하기 위해서 원하는 힘이 서로 다른 두 가지 경우에 대해서 고려한다. 제어기가 원하는 오버슈트 정도와 안정 시간의 특성을 나타내도록 초기 위치에서 PD 이득을 설정한 후, 그 때의 PD 이득을 그대로 유지하며 작업 대상체의 길이 방향 즉 로봇의 +X축 방향으로 일정 거리씩 이동시키면서 제어 특성을 관찰한다. 이 때, 수행 횟수에 대한 힘의 수렴, 즉, Z축 위치의 수렴을 그림 4에 나타내었다.

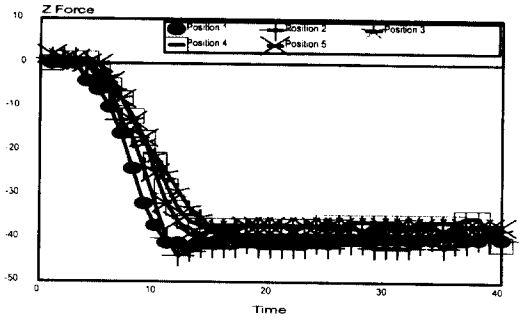


그림 4. 기존제어기를 이용한 제어결과 - 힘 목표치가 -40uf일 때  
Fig. 4. Control result using previous control method - reference force = -40uf.

### 2. 본 논문에서 제안된 방법

경로를 오프라인 상태인 로봇의 +X좌표 축을 따라 처음 위치에서 150mm의 직선 거리를 2mm 간격으로 이동시키면서 로봇 핸들을 +Z축 방향으로 0.1mm씩 이동시켜 힘이 100 uf가 될 때까지 힘과 거리를 측정하고 이를 반복한다. 그림 5은 측정된 힘과 거리의 데이터를 정규화된 X좌표에 따른 강성으로 계산하여 나타낸 것이다. 이 때 Y축은 힘(uf)이고 X축은 정규화된 로봇 X축 위치이다. 얻어진 데이터를 이용해 제안한 모델링 방법에 의해 모델링한 결과를 그림 6에 나타내었고 이 데이터와 실제 측정 데이터와의 오차를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타난 바와 같이 퍼지모델은 강성의 비선형성을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 표 1은 상자 위의 작업 경로를 임의로 다섯 구간으로 나누어 각 위치의 강성을 식(28)과 식(29)에 대입하여 구한 2차 PD 제어기의 파라미터를 나타내고 있다. 실제로 제안된 알고리즘에 따라 계산된 PD 제어 파라미터를 실제 실험에 적용하기 위해서는 로봇 제어기가 토오크를 입력으로 줄 수 있어야 하는데 실험에 쓰인 로봇 매니플레이터는 토오크를 입력으로 줄 수 없으므로 토오크를 그에 해당하는 위치로 변환하여 주는 과정이 필요하다. 이 때, 본 실험에서는 작업을 단순히 상자의 표면(로봇의 +X축 방향)을 따라가도록 정의하였으며 이 때의 제어 특성을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 경로의 시작점에서 주어진 PD 제어기의 이득으로 제어를 수행한 경우와 제안된 알고리즘으로 제어를 수행한 경우의 결과를 보이고 있다. 그림 8(b)~8(e)는 각기 다른 위치에서의 제어 특성을 보여주고 있는데 특히 그림 8(c)의 경우는 주변과 차이가 많이

나는 강성을 가지는 위치인데도 불구하고 본 논문에서 제시된 방법으로 제어된 결과는 다른 제어 결과와 같은 안정 시간(settling time)을 보임으로써 좋은 수행 성능을 보임을 알 수 있다. 또한, 정상 상태 오차에 대해서도 기존의 방법에 비해 비교적 적은 오차로 로봇트가 동작하고 있음을 알 수 있다.

표 1. 각 표본 위치에 따른 강성과 PD이득  
Table 1. Stiffness & PD gain in each sample position.

위치 (X Position) (단위: mm)	추론된 강성 (단위: uf/mm)	P 이득	D 이득
위치 1 : -174.6	453.60	0.0050	0.0001
위치 2 : -152.8	333.53	0.0068	0.0001
위치 3 : -110.6	257.73	0.0079	0.0001
위치 4 : -81.0	276.59	0.0076	0.0001
위치 5 : -54.0	298.4	0.0073	0.0001

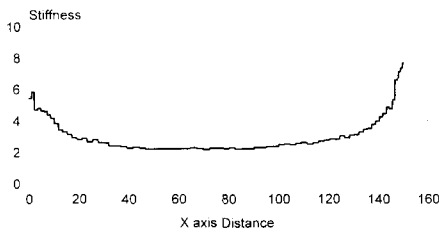


그림 5. 측정된 강성데이터  
Fig. 5. Measured stiffness data.

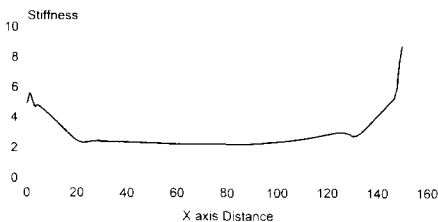


그림 6. 퍼지모델링된 강성데이터  
Fig. 6. Fuzzy model of stiffness data.

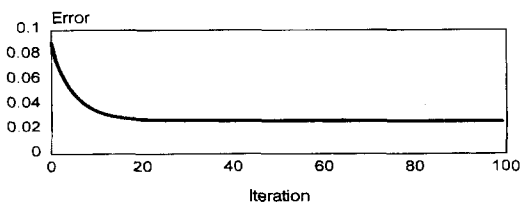
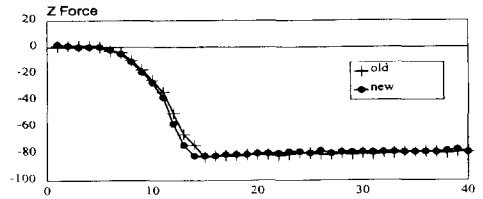
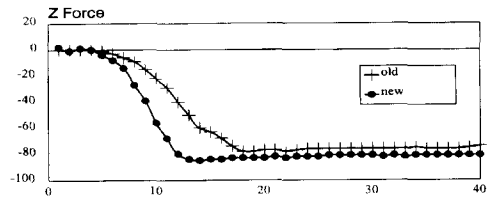


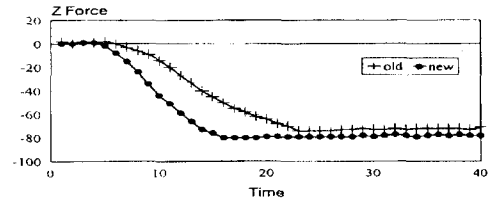
그림 7. 퍼지모델링 오차  
Fig. 7. Fuzzy modelling error.



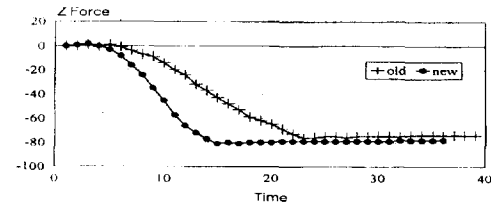
(a)



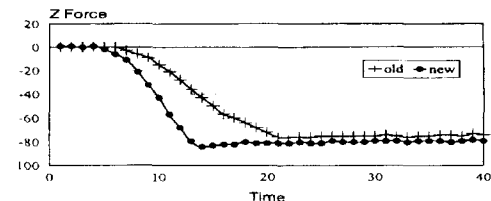
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 8. 제어특성의 비교 (a) 경로의 첫 번째 위치 (b) 경로의 두 번째 위치 (c) 경로의 세 번째 위치 (d) 경로의 네 번째 위치 (e) 경로의 다섯 번째 위치

Fig. 8. Comparison of a control characteristic (a) 1st position of route (b) 2nd position of route (c) 3rd position of route (d) 4th position of route (e) 5th position of route.



## V. 결 론

본 논문은 매니퓰레이터가 순응 작업을 수행할 때 위치에 따라 변화하는 작업 대상체의 강성을 휴변환을 이용하는 퍼지모델링 방법으로 모델링하고, 이 모델에 근거하여 PD 제어기의 파라미터를 설정하여 제어하는 방법을 제시하고 실제 실험을 통하여 그 타당성을 보였다. 기존의 힘제어 방법은 환경 강성을 상수로 설정하고 이를 큰 값으로 간주함으로써 안정되게 제어를 보였으나 변화하면서 그 크기가 상대적으로 작은 강성에 대해서는 좋은 제어 특성을 보이지 못했다. 따라서, 강성이 비선형적으로 변하는 대상체에 대해 그 변화를 고려하여 제어기를 구성하기 위하여 모델링의 필요성이 부각되었다. 본 연구에서는 여러 모델링 방법 중 시스템 묘사력이 뛰어난 퍼지모델링 방법을 선택하였다. 그러나, 퍼지 규칙의 최적 개수의 결정, 또는 퍼지모델의 파라미터 설정이 어려워 실제로 적용하기 어려웠던 기존의 퍼지모델의 문제점을 휴변환을 이용하여 파라미터를 설정하는 방법을 채택함으로써 해결하였다. 퍼지모델을 거쳐 모델링된 강성 데이터는 원형 2차 PD 제어기의 설계식을 이용하여 힘제어기를 최적으로 설계할 수 있었으며, 이를 실험으로 검증하였다. 기존의 방법이 대상체에 대해 시행착오를 거쳐 제어기의 파라미터를 설정해야 한다는 단점을 가지는데 비해 본 논문에서 제시한 새로운 강성 제어 방법은 작업 경로의 정의만 주어지면 자동으로 힘제어를 수행할 수 있고 환경 모델이 주어지면 제어기의 파라미터는 설계자가 원하는 제어 특성을 가지도록 설정될 수 있다는 장점이 있다. 반면에 본 논문에서 제안하고 있는 알고리즘은 오프라인으로 수행되므로 불합리한 점이 있으며 현재는 작업 경로의 설정에서 힘제어, 위치 제어의 적절한 분리를 사용자가 직관적으로 하여야 하므로 이에 대한 체계적인 방법이 필요하다고 하겠다. 또한 휴변환시의 임계치 설정에 따라 시스템의 묘사력이 크게 좌우되므로 주어진 플랜트와 시스템 묘사력간의 성능 지수를 설정하여 자동으로 최적의 임계치를 설정하는 방법의 개발이 요구된다.

## 참 고 문 헌

[1] D.E. Whitney, "Historical Perspective And State of The Art in Robot Force Control,"

- Proc. 1985 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 262-268.
- [2] H.Kazerooni, T.B.Sheridan, and P.K. Houpt, "Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I: The Fundamental Concepts of Compliant Motion," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 2, pp. 83-92, JUNE 1986.
- [3] R.P.C. Paul and B. Shimano, "Compliance and Control," in Proc. Joint Auto. Contr. Conf., pp. 694-699, 1976.
- [4] M. H. Raibert, J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," Transactions of ASME, vol. 102, pp. 126-133, JUNE 1981.
- [5] Matthew T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-11, no. 6, pp. 418-432, JUNE 1981.
- [6] J.Kenneth Salisbury, Jr., "Active Stiffness Control of A Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. 19th IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 95-100, Dec. 1980.
- [7] Kunio Kashiwagi et al, "Force controlled robot for grinding," IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 1001-1006, 1990.
- [8] D.H. Ballard, "Generating the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes," Pattern Recognition, vol. 13, no. 2, pp. 111-122, 1981.
- [9] Rafael C.Gonzalez and Paul Wintz, "Digital Image Processing," Addison Wesley Publishing Company, Second Edition, 1987.
- [10] Sing-Tze Bow, "Pattern Recognition and Image Preprocessing," Dekker, 1992.
- [11] T.Takagi and M.Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [12] Richard C. Dorf, "Modern Control System", Addison Wesley, Sixth Edition, 1992.

## — 저 자 소 개 —



金文柱(正會員)

1969년 9월 30일생. 1993년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업. 1995년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년 3월 ~ 현재 LG 전자생산기술원 연구원. 주관심분야는 로봇 제어가 설계임



李義振(正會員)

1964년 9월 10일생. 1987년 2월 연세대학교 전자공학과 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989년 1월 ~ 1993년 10월 대우통신(주) 종합연구소 연구원. 1993년 11월 ~ 1995년 2월 에스원(주) 종합연구소 연구원. 1995년 3월 ~ 현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 적응제어 및 로버스트 제어, 퍼지제어, 로봇제어, 자율이동로봇임



曹泳完(正會員)

1968년 10월 10일생. 1991년 2월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1993년 9월 ~ 현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 퍼지제어 및 모델링, 적응제어 및 로버스트 제어, 로봇제어, 자율이

동로봇임

金賢泰(正會員) 第32卷 B編 第4號 參照

현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정

朴玟用(正會員) 第29卷 B編 第3號 參照

현재 연세대학교 공과대학 전자공학과 교수