

< 논 문 >

유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기 진동의 퍼지제어

김재원* · 양현석** · 박영필***

(1996년 5월 4일 접수)

Fuzzy Vibration Control of 3 DOF Robot Manipulator with Flexible Link

Jae-Won Kim, Hyun-Seok Yang, and Young-Pil Park

Key Words: Flexible Link(유연한 링크), Link Vibration(링크진동), Fuzzy Control(퍼지제어)

Abstract

Performance and productivity of robot manipulator can be improved by increasing its working speed and extending its link length. But heavy weight of the commercial robot links, considered as "rigid body", limits its maximum working speed and the weight of the links can be reduced for high speed operation. But this light-weight link or long link for special use cannot be considered as "rigid" structure and vibration of the link due to its flexibility causes errors in end-effector position and orientation. Thus the elastic behavior of the flexible link should be taken care of for increasing work speed and getting smaller error of end-effector position. In this paper, the fuzzy control theory is selected to design the controller which controls the joint positions of the robot manipulator and suppress the vibration of flexible link. In the first place, for the 1 DOF flexible link system, the fuzzy control theory is implemented. The controller for the 1 DOF flexible link system is designed. Experimental research is carried out to examine the controllability and the validity of the fuzzy control theory based controller. Next, using the extended design schemes for the case of the 1 DOF flexible link system and using the experimental phenomena of the 3 DOF flexible link system, the fuzzy controller for the 3 DOF flexible link system is designed and experimented.

1. 서 론

산업화, 공정의 전문화에 의해 처음 등장한 로봇 조작기는 중요한 작업구성 요소의 하나로 원가절감, 품질, 생산성 및 정밀도 향상에 큰 기여를 하였다. 로봇조작기의 성능향상을 위하여 구동의 고속화와 로봇조작기의 위치정밀도의 고정밀화가 요구되었다. 이러한 요구의 충족을 위한 여러 제안 중 현재 가장 용이한 것은 로봇조작기 자체의 경량

화와 링크길이의 확장을 통하여 작업영역의 확대와 고속운동성을 갖도록 하는 것이다. 그러나 경량의 긴 링크를 가진 특수 작업용 로봇조작기는 링크의 유연성에 의하여 진동이 크게 유발되어 조작기 끝단의 위치정밀도가 저하되었다. 따라서 링크가 유연성을 갖는 경우에 대한 제어기의 설계가 요구되었고, 이에 대한 연구가 최근 들어 활발히 진행중이다.

1985년 Karkkainen⁽¹⁾은 수직형 2자유도 대형 로봇에 링크와 관절의 탄성을 고려한 제어에 대해 시뮬레이션 및 실험을 행하였으며, 1986년 Mastuno 등^(2,3)은 평행구동기구를 가진 2자유도 수직다관절

*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

**회원, 연세대학교 기계공학과

로봇조작기의 마지막 링크가 유연하다고 가정하고 이의 동적해석 및 진동제어에 관한 연구를 행하였으며, Nagaya 등⁽⁴⁾은 일정자세에 있는 수직다관절 로봇의 끝단에 가진력이 가해질 때 이를 귀환하여 진동을 억제하는 것에 대한 이론적, 실험적 연구를 행하였다. Wang 등⁽⁵⁾은 수직직진-수평회전-수평직진 관절형태의 3자유도 로봇을 모델링하고 이의 귀환제어에 대해 수치해석을 행하였으며, Charhoub 등⁽⁶⁾은 수평회전-수직회전-수평직진 관절형태의 3자유도 로봇의 강제모델 제어기에 부수적으로 탄성 제어기를 추가하여 계의 제어에 대한 수치해석 및 실험을 행하였다. 1988년 Inamura 등⁽⁷⁾은 가속-동속-감속 속도곡선에 따라 움직이는 로봇의 진동거동을 예측하여 이를 입력에 반영시켜서 로봇 링크의 진동을 감소시키는 것에 대한 연구를 행하였다. 1991년 하영균⁽⁸⁾은 고속운동하는 3자유도 평행구동 방식 수직다관절 로봇조작기의 마지막 링크를 유연한 링크로 보고 3차원 운동에 대한 진동해석 및 진동제어실험을 하였다.

퍼지(fuzziness)의 개념이 처음 만들어진 것은 1965년 Zadeh 교수에 의해서였다. 발표 당시 크게 주목받지 못했던 퍼지이론은 이론이 실제 적용된 제품의 등장과 함께 세계적으로 그 관심이 높아져 현재 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 퍼지이론의 장점인, 계의 특성에 의해, 전문가의 지식으로, 그 외에 통계적인 방법으로 제어기가 설계된다는 점이 계의 운동방정식이나 파라미터들의 유도과 계산이 어려운 경우의 제어기 설계에 유리하게 적용되었다.

본 논문에서는 3자유도의 평행구동방식 로봇조작기의 마지막 링크를 유연성을 갖게 하여 로봇의 임의의 위치로의 운동시 그 위치제어와 운동에 수반되는 탄성에 의한 링크의 진동을 최소화하는 퍼지제어기를 설계하고 설계된 제어기에 의한 위치/진동제어실험을 통하여 얻어진 결과를 검토한다.

2. 퍼지제어기의 설계(유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 경우)

2.1 퍼지제어기

기본적인 퍼지제어기(fuzzy logic controller)의 구성은 Fig. 1과 같다. 계의 출력은 퍼지화과정(fuzzification)을 거쳐 퍼지집합원으로 변환된다. 결정규칙(decision making rule)은 설계자가 파악

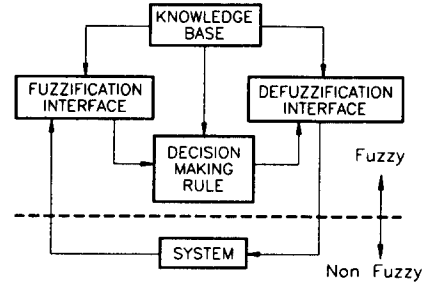


Fig. 1 Fuzzy logic controller

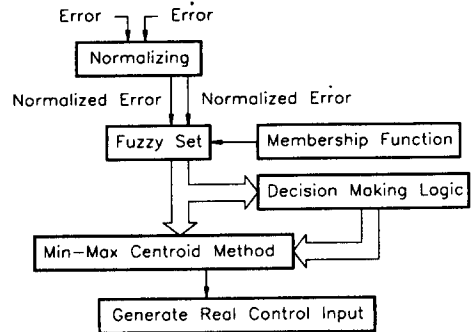


Fig. 2 Flow diagram of fuzzy controller

한 계의 특징에 따라 설계되어진 제어규칙이다. 이 과정에서는 퍼지화된 계의 출력값을 갖고 결정규칙에 의해 퍼지화된 제어입력을 계산한다. 계산된 퍼지화된 제어입력(control input)을 역퍼지화과정(defuzzification)을 거쳐 제어할 계로의 제어입력을 구한다. 이들 각 과정에는 설계자의 경험, 전문가의 지식, 제어할 계의 특성 등이 설계자에 의하여 첨가된다. 이러한 설계방식에 의한 퍼지제어이론은 계의 특징이나 경향 또는 어느정도 예측가능한 계의 성향을 알고는 있지만 수식으로 표현하기 어려운 경우나 수식으로 표현되더라도 비선형성을 많이 내포하고 있어 제어기의 설계가 곤란한 경우에 제어기를 쉽게 설계할 수 있는 특징이 있다.

본 연구에서 설계된 퍼지제어기의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 먼저 제어량의 오차와 오차의 시간 변화량을 퍼지집합원으로 분류하기 위하여 일정범위의 값으로 정규화(normalizing)한다. 다음으로 설계자가 정한 멤버십함수로 구성된 퍼지집합원소로의 표시과정을 거쳐 오차와 오차의 시간변화량을 퍼지화한다. 이 퍼지화된 두 값과 설계자가 결정한 결정규칙에 의해 퍼지제어입력값을 구한다. 구해진 퍼지화된 오차, 퍼지화된 오차의 시간변화량 그리

고 퍼지화된 제어입력을 이용하여 하나의 제어입력을 산출해내는 과정이 최소-최대 도심방법(min-max centroid method)이다. 여기서, 구해진 값은 정규화되어 있는 값이므로 이 값을 실제 계로의 입력신호로 만들어주는 과정이 마지막으로 수행된다.

정규화 : 퍼지제어이론의 적용을 위하여는 계의 출력값의 퍼지화가 필요하게 된다. 이를 위하여 임의의 구간 내에 퍼지집합을 구성하고 계의 출력이 이 구간내의 값을 가지도록 정규화 하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 3으로 설명되는 식 (1)을 사용하여 제어값의 오차와 오차의 시간변화량을 정규화 시킨다.

$$\mu_{Error}, \mu_{Error} = \frac{x - D_0}{D} \quad (1)$$

- D : Target value-start value
- D₀ : Target value-reference value
- x : Present value

보통의 경우는 기준값(reference value)과 시작값(start value)이 같은 값이 된다.

퍼지집합 : 정규화 과정을 거친 계의 출력값을 퍼지화하기 위하여 퍼지집합을 구성한다. 퍼지집합의 구성은 이미 많은 연구가 되어 있고 그 방법 또한 매우 많다. 그러나 보통의 경우 일정구간을 5 내지 9등분한 원소들로 구성하며 이들 원소의 멤버쉽함수도 여러 형태가 있지만 계산상 편리함을 갖고 있는 삼각형함수(triangular function)를 많이 사용한다. 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 -1에서 1 사이의 구간을 7등분하고 삼각형함수를 멤버쉽함수로 한 퍼지집합을 구성하였다.

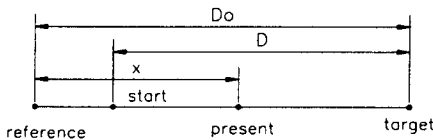


Fig. 3 Normalization

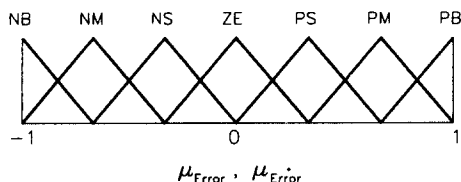


Fig. 4 Fuzzy set with triangular membership function

결정논리 : 앞의 과정에서 결정된 퍼지집합과 일반 계의 제어곡선을 이용하여 설계자가 알고 있는 지식을 바탕으로 퍼지추론(fuzzy inference)을 행하여 결정논리를 구성한다. Fig. 5에서 a점은 제어값이 목표값에 크게 못 미치고 제어값의 변화량이 0이므로 현재의 오차는 NB(negative big), 오차의 변화량은 ZE(zero)로 볼 수 있고, 이 경우 계로의 입력을 PB(positive big)으로 하는 것이 타당할 것이다. 또 b점에서의 오차는 ZE, 오차의 변화량은 PS로 보면 입력은 NS정도가 적당할 것이다. 이와 같은 논리를 확장하여 7개의 원소로 구성된 퍼지집합의 모든 경우에 대한 퍼지규칙(fuzzy rule)을 구성하면 Fig. 6과 같다. 앞에서 구해진 퍼지화된 오차와 오차의 시간변화량, 퍼지화된 제어입력을 이용하여 실제 제어입력을 구하기 위한 최소-최대 도심방법은 Fig. 7로 설명되며 구해진 도심 값이 정규화된 제어입력이 된다.

2.2 위치/진동제어기

유연한 링크를 가진 1자유도 모터계를 Fig. 9에 나타내었고 이의 진동제어를 위한 위치/진동 퍼지제어기를 Fig. 8에 나타내었다.

제어기의 구성은 크게 위치제어를 위한 위치제어기, 진동제어를 위한 진동제어기, 각 제어기에서 계산된 제어입력을 조합하여 최종 제어입력을 구하

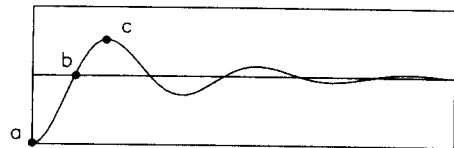


Fig. 5 Typical response of a controlled system

	NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	ZE	NS
	NS	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
	ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM
	PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	PM	PS	ZE	NS	NM	NB	NB
	PB	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
		NB	NM	NS	ZE	PS	PB

Error

Error

Fig. 6 Fuzzy rule

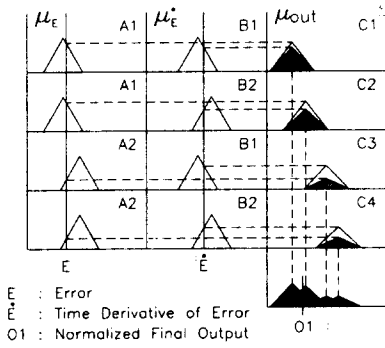


Fig. 7 Min-max centroid method

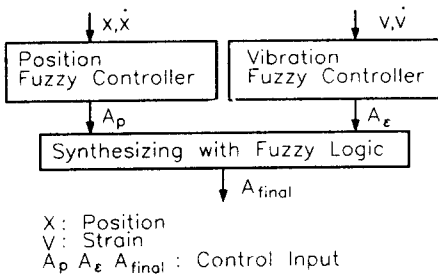


Fig. 8 Position and vibration fuzzy controller

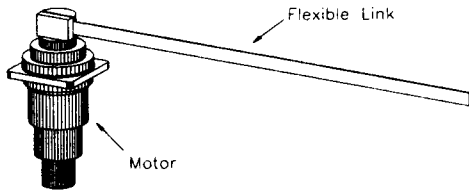


Fig. 9 Schematic diagram of 1 DOF flexible link model

는 합성기의 세부부분으로 되어있다.

위치제어기: 제어기 구성상 필요한 정보로 허브의 회전각도와 각속도를 선정하였다. 이를 식 (1)을 사용하여 정규화하고 앞서 결정된 퍼지집합과 일반 계의 제어규칙을 적용하여 구성하였다.

진동제어기: 진동제어를 위한 제어규칙의 구성을 위하여 Fig. 10과 같은 전형적인 외팔보의 모드형상(mode shape)을 이용하였다. 보의 진동에 의한 변형률은 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였고 이를 이용하여 진동제어논리를 구성하였다. 측정되는 변형률을 감소시키는 경향을 갖는 방향으로 보가 붙어있는 허브를 운동시키면 보의 진동을 줄일 수 있다는 논리를 적용하였다. 보의 첫 번째 모우

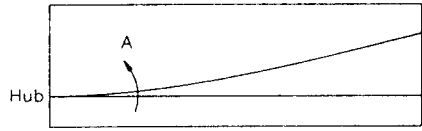


Fig. 10 Mode shape of a cantilevers

	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
Error	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

Fig. 11 Synthesizing rule

드 형상인 Fig. 10에서 보의 변형률을 보면 보의 고정단을 A방향으로 회전시키면 보에 작용되는 응력이 적어져 변형률이 줄어들 것이다. 이와 같은 논리를 이용하여 구성된 퍼지집합의 모든 경우에 대한 퍼지규칙은 위치제어기의 경우와 동일한 Fig. 6과 같다.

제어기의 합성: 위치제어기와 진동제어기에 의해 구해진 위치입력값과 진동입력값은 각각 독립된 상황하의 경우에 대하여 구해진 값들이다. 그러므로 이 값들은 서로 상반된 경향을 가지고 있다. 즉 위치를 제어하려면 진동이 발생되고 진동을 제어하면 위치가 제어되지 않는 경향을 갖게 된다. 따라서 두 제어기로부터 계산된 두값의 경향을 잘 조절해 주어야 진동을 억제하면서 위치제어를 행할 수 있는 최종출력값을 구할 수 있다. 계산된 두 기본적인 입력값은 퍼지제어기 설계방식을 적용할 수 있는 특징을 갖고 있다. 위치, 진동 제어기를 설계할 때와 같은 성질을 이용하여 두 값을 잘 비교하면 퍼지제어기를 이용하여 정규화 되어 있는 두 값을 이용하여 퍼지규칙에 따라 최종적인 입력(A_{final})을 구할 수 있다. 퍼지합성규칙은 Fig. 11과 같다.

2.3 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 위치/진동제어 실험

설계된 제어기를 이용한 진동제어 실험을 실행하여 퍼지제어기의 제어성과 설계의 타당성을 실험을 통하여 검증하기 위하여 다음과 같은 3가지 실험을

행하였다.

- (1) 허브의 위치제어만을 퍼지제어기로 행한 경우
- (2) 유연한 링크를 진동시킨 뒤 진동제어만을 행한 경우
- (3) 위치 및 진동을 동시에 제어한 경우

실험장치는 Fig. 9와 같고 유연한 링크의 길이는 1 m이고, 퍼지제어의 특성상 정량화된 제어량이 필요하지 않으므로 계측기로 사용된 계수기(counter)나 A-D변환기에서 읽은 디지털 정보값을 그대로 사용하였다. 허브의 위치는 모터에 부착되어 있는 엔코더를 이용하였으며 속도는 타코제네레이터를 이용하였다. 링크의 진동은 스트레인게이지를 사용하여 측정하였고 스트레인의 시간변화량은 수치미분을 사용하였다. 사용된 모터는 속도제어형 서보 드라이버에 의하여 구동되며 D-A변환기에서

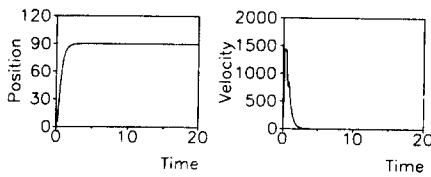


Fig. 12 Experimental results (position control only)

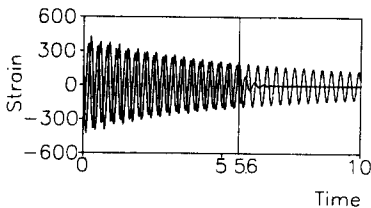


Fig. 13 Experimental results (vibration control only)

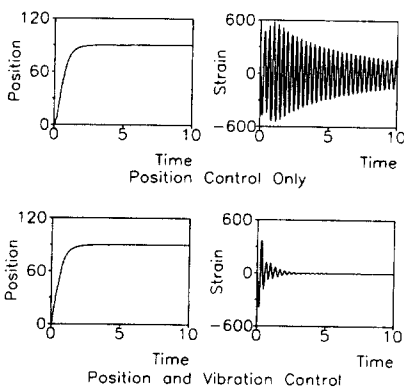


Fig. 14 Experimental results (position and vibration control)

출력되는 제어신호는 속도 입력이 된다.

위치제어만 행한 경우 허브의 회전각도를 퍼지제어기를 이용하여 제어하였다. 허브를 90°회전시키는 위치제어를 행하였으며 기준입력으로 스태มป์력을 사용하였다. 실험결과를 Fig. 12에 나타내었고 퍼지제어기는 허브의 위치제어를 잘 수행함을 알 수 있다.

진동제어만 행한 경우 : 유연한 링크를 진동시킨 뒤 설계된 퍼지제어기로 진동을 억제하는 실험을 행하였다. 진동제어를 하는 경우 제어를 시작하는 시간은 진동이 시작된 뒤 5.6초이다. 실험결과를 Fig. 13에 나타내었고 진동을 하지 않은 경우는 링크가 계속 진동을 하는 반면 제어를 하는 경우에는 제어 시작후 짧은 시간 내에 진동을 억제함을 볼 수 있다. 이로서 보의 모드 형상을 이용하여 결정된 진동제어규칙이 타당함을 확인할 수 있었다.

위치와 진동을 동시에 제어하는 경우 : 허브를 90°회전시키고 동시에 회전에 의한 링크의 진동을 제어하는 실험을 행하였다. 실험결과를 Fig. 14에 나타내었으며 설계된 퍼지 위치/진동 제어기는 링크의 진동을 잘 억제함과 동시에 허브의 위치제어를 잘 수행함을 알았다.

앞의 3가지 경우에 대한 실험을 통하여 설계된 제어기는 유연한 링크계의 제어를 잘 수행함을 알았으며 설계방법이 타당함을 알 수 있었다.

3. 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇 조작기의 퍼지제어기

앞서 설계된 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 위치/진동제어기의 개념을 확장시켜서 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기의 위치/진동제어에 적용한다.

3.1 실험장치

실험에 사용한 3자유도 로봇조작기의 구동방식은 평행구동 방식이며, 유연한 링크를 포함한 전체적인 치수를 Fig. 15에 표시하였다. 로봇조작기 관절의 회전각도는 엔코더를 이용하여 16비트 계수기를 이용하여 측정하였고 각 축의 제어신호는 12비트 D-A변환기를 사용하였다. 로봇조작기에 사용된 AC 서보모터는 속도제어형 서보 드라이버로 구동된다. 따라서 D-A변환기에서 만들어진 모터의 속도지령은 속도입력이 된다.

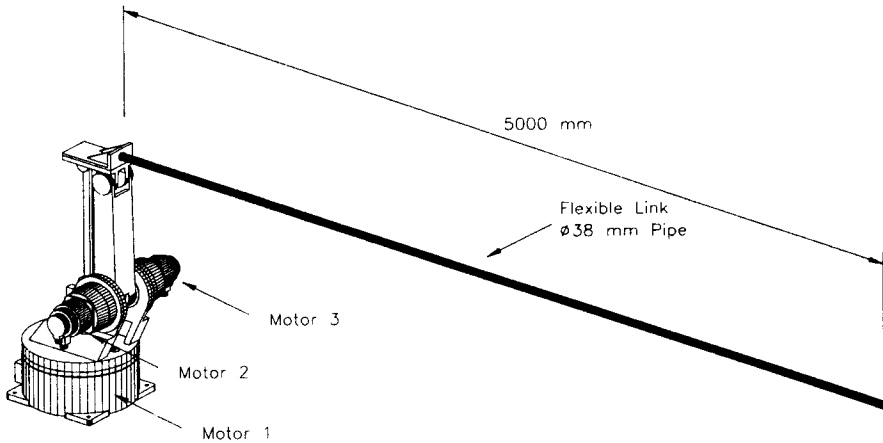


Fig. 15 Schematic diagram of the experimental set-up

유연한 링크의 수평방향 진동 및 수직방향 진동은 링크에 부착된 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였고, 게이지 앰프와 로우패스필터(low pass filter)를 이용하여 고차 모드의 신호를 제거하였다. 스트레인의 시간 변화량은 수치미분을 이용하여 구하였다. 각 축의 속도신호 및 유연한 링크의 진동량은 12비트 A-D변환기를 사용하여 측정하였다. 1자유도 유연한 링크의 진동제어시와 같이 모든 값은 정량화되지 않은 값을 사용하였다. 제어기로는 80386/80387 PC를 사용하였다.

3.2 제어기의 설계

유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기는 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 경우와는 달리 링크가 이동하는 공간이 1자유도 모터계의 경우에는 평면인데 반해 3자유도 로봇조작기의 경우에는 3차원의 공간상을 움직이게 되며 중력으로 인한 정적치짐에 의한 변형도 생기게 된다.

정적치짐에 의한 변형을 고려한 로봇조작기의 정방향 기구학 해는 구할 수 있음이 알려져 있다. 또한 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기의 운동방정식은 비선형계임과 이의 선형화가 어느정도 타당함이 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 로봇조작기의 각 축의 운동이 유연한 링크의 진동에 미치는 영향을 실험으로 알아보고 이에 따른 제어규칙을 정하기로 한다. 먼저 로봇조작기의 각 자유도에 해당되는 각 모터만을 회전시켜 이에 따른 링크의 진동경향을 조사한다. 이때 다른 모터의 회전은 없도록 한다. Fig. 16에 모터 1만을 회전시킨

경우의 링크의 진동경향에 대한 실험결과를 나타내었고 Fig. 17에 모터 3만을 회전시킨 경우의 링크의 진동경향에 대한 실험결과를 나타내었다. Fig. 16의 경우 3자유도 각 축의 동작각도는 $(14.4^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 에서 $(-21.6^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 이고 Fig. 17의 경우의 동작각도는 $(0^\circ, 0^\circ, 14.4^\circ)$ 에서 $(0^\circ, 0^\circ, -7.2^\circ)$ 이다. 두 그림에서 strain H는 유연한 링크

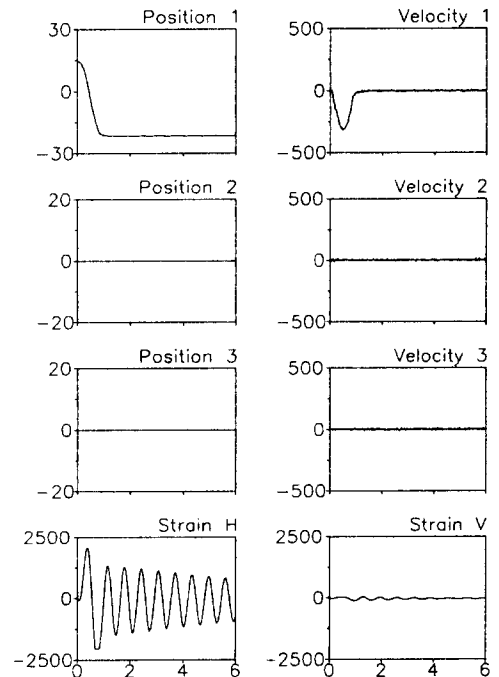


Fig. 16 Experimental results

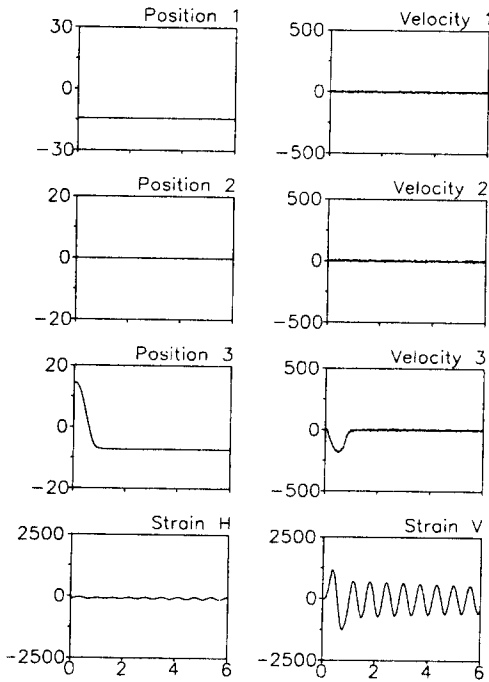


Fig. 17 Experimental result

의 수평방향진동을 말하며 strain V는 수직방향진동을 의미한다. 두 그림에서 보이는 모터 1과 모터 3의 회전에 의한 유연한 링크의 진동에 대한 영향은 거의 독립적으로 볼 수 있다. 즉 모터 1의 운동은 유연한 링크의 수평방향 진동에 지배적인 영향을 미치고 모터 3의 운동은 링크의 수직방향 진동에 지배적인 영향을 미친다. 두 축간의 간섭이나 로봇조작기의 이동시 발생하는 미세한 진동에 의하여 모터 1이 운동할 때 어느 정도 수직방향진동이 발생하는 것을 볼 수 있지만 그 양이 상대적으로 매우 작으므로 이는 무시한다. 모터 3의 운동시 발생하는 수평방향진동도 같은 이유로 무시한다.

Fig. 16과 17에서 보이는 바와 같이 모터 1, 3번 축의 운동이 유연한 링크의 수평, 수직방향진동에 각각 지배적인 영향을 미치는 것에 착안하여 제어기를 설계한다. 먼저 각 축에서 측정된 위치정보를 이용하여 로봇조작기가 움직여야 할 위치와의 오차를 구한다. 이 오차를 이용하여 각축의 퍼지위치제어기를 설계한다. 이 제어기는 단일자유도 유연한 링크의 진동제어기에 사용된 위치제어기와 같은 구조이다. 스트레인지치로 측정된 수평방향, 수직방향 진동에 대해 각각 퍼지진동제어기를 설계한

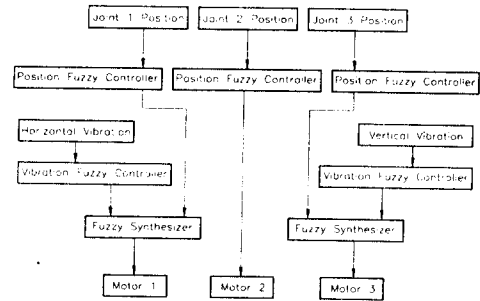


Fig. 18 Flow diagram of fuzzy controller for 3 DOF robot manipulator with flexible link

다. 이 진동제어기도 앞절에서 설계된 진동제어기와 같다. 이렇게 구해진 5개의 제어입력(모터 1, 2, 3번 위치제어입력, 수평 수직방향 진동제어입력)중 모터 1의 위치제어입력과 수평방향진동제어입력, 모터 3의 위치제어입력과 수직방향 진동제어입력을 각각 앞절에서와 같이 퍼지합성하여 각각 하나의 제어입력을 출력한다. 모터 2의 제어는 위치제어만 하는 퍼지제어기로 이루어진다. 이 구성을 Fig. 18에 나타내었다.

3.3 실험

실험은 3자유도의 로봇조작기를 임의의 위치로 이동시켜 위치제어만을 행하는 경우와 위치 및 유연한 링크의 진동을 동시에 제어하는 경우에 대하여 그 결과를 비교하는 것으로 한다. 로봇조작기의 시작위치는 (14.4°, -7.2°, 14.4°)이고, 최종위치는 (-21.5°, 7.2°, -7.2°)이다. 시작위치에서 최종위치까지의 궤적은 진동의 유발을 적게 하기 위하여 3차함수를 사용하였으며 목표위치까지의 도달시간을 1초로 하였다. 두 실험결과를 Fig. 19에 나타내었다. Fig. 19에서 보면 위치제어만 하는 경우 각 축의 위치제어는 잘 수행됨을 알 수 있다. 그러나 운동에 의해 유발된 유연한 링크의 수평, 수직방향 진동은 위치제어 후에도 여전히 남아있음을 알 수 있다. 위치와 진동을 동시에 제어하는 경우를 보면 위치의 제어는 위치제어만 하는 경우와 거의 같은 제어성을 보이면서 링크의 진동을 현격하게 억제함을 볼 수 있다. 즉 수직방향진동은 모터 1의 운동이, 수평방향진동은 모터 3의 운동이 지배적인 영향을 미친다고 생각하여 설계된 제어기가 진동을 잘 억제하면서 동시에 위치제어도 잘 수행함을 알 수 있다. 제일 아래에 있는 두 그림은 수

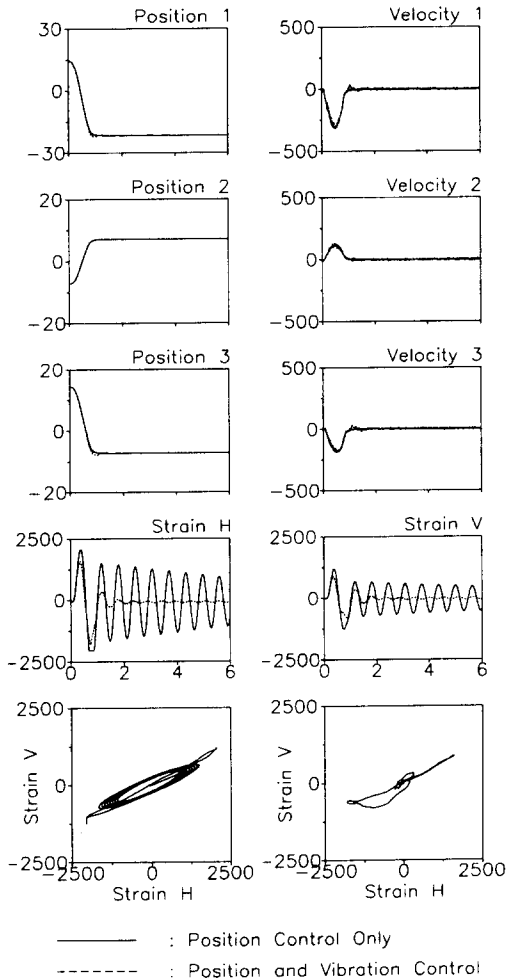


Fig. 19 Experimental results comparison of position only control and position/vibration control

평방향진동을 가로축에 수직방향진동을 세로축에 두었을 경우의 링크의 진동 형상을 나타내는 그림으로 왼쪽은 위치제어만 한 경우이고 오른쪽은 위치/진동제어를 하는 경우이다. 위치/진동제어를 하는 경우 그 진동이 잘 억제됨을 알 수 있다.

4. 결 론

퍼지제어이론을 이용한 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기의 위치/진동제어기를 설계하고 설계된 제어기를 이용한 제어실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 퍼지제어기의 설계기법의 확립을 위하여 선

정한 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 진동제어를 위한 제어기를 보의 모드형상을 통한 제어규칙의 결정으로 설계하였고 설계된 제어기를 이용한 실험을 통하여 제어기의 제어성을 확인하였다. 이로서 퍼지이론을 이용한 제어기의 설계기법을 확립할 수 있었다.

(2) 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 진동제어기 설계기법과 실험에 의한 로봇조작기의 운동 특성을 가지고 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기의 위치/진동제어기를 설계하였다.

(3) 설계된 유연한 링크를 가진 3자유도 로봇조작기의 위치/진동제어기를 사용하여 실제 로봇조작기의 위치/진동제어 실험을 행하였고 실험결과에 의하여 유연한 링크를 가진 1자유도 모터계의 진동제어기 설계기법과 실험에 의한 운동특성을 가지고 설계된 위치/진동제어기는 위치제어를 행함과 동시에 유연한 링크에 발생하는 진동을 잘 억제함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Karkkainen and Paavo, 1985, "Compensation Manipulator Flexibility Effects by Modal Space Techniques," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 972 ~ 977.
- (2) Sakawa, Yoshiyuki, Matsuo and Fumitoshi, 1986, "Modelling and Control of a Flexible Manipulator with Parallel Drive Mechanism," *International Journal of Control*, Vol. 44, No. 2, pp. 299 ~ 313.
- (3) Matsuo, Fumitoshi, Fukushima, Shigenobu, Ohsawa, Yoshiki, Kiyohara, Makoto, Sakawa and Yoshiyuki, Winter, 1987, "Feedback Control of a Flexible Manipulator with a Parallel Drive Mechanism," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 76 ~ 84.
- (4) Nagaya, Kosuke, Sun and Jianli, 1986, "Vibration and Vibration Control of a Flexible Robot Arm with Mutiple Joints Subjected to Vibration," *Journal of the JSME*, Vol. 52, No. 482, pp. 2631 ~ 2639.
- (5) Wang, P. K. C. and Wei, Jin-Duo, 1987, "Feedback Control of Vibrations in a Moving Flexible

- robot Arm with Rotary and Prismatic Joints," *Proceedings of IEEE International Conference On Robotics and Automation*, pp. 1683~1689.
- (6) Chalhoub, N. G. and Ulsoy, A. Galip, December 13~18, 1987, "Control of a Flexible Robot Arm: Experimental and Theoretical Results," *The Winter Annual Meeting of the ASME*, pp. 287~295.
- (7) Inamura, Toyoshiro, Morimoto, Yoshitaka, Mizoguchi and Kenji, 1988, "Dynamic Control of a Flexible Robot Arm by Using Experimental Modal analysis," *Journal of the JSME*, Vol. 54, No. 501, pp. 1096~1101.
- (8) 하영균, 1993, "유연한 3자유도 로봇팔 진동의 능동제어(I)," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제3호, pp. 548~558.