



스칼라  $K_i$ 는 차수  $i$ 에 따라 강성을 나타낸다. 즉, 방향에 대한 위치를 제어하기 위해서는  $K_i$ 를 큰 값으로 지정한다. 이것은 위치의 미소변위를 엄격하게 규제하는 효과가 있다. 방향에 대한 톨의 힘 또는 움직임을 제어하기 위해서는  $K_i$ 가 작은 값으로 선택해야만 한다. 왜냐하면 (식3)으로부터 힘과 변위 사이의 실제적인 관계를 알 수가 있고, 또한 로봇의 강성은 기계적 임피던스 관계로 제어되어짐을 알 수 있다. 여기서  $e$ 는 원하는 톨의 위치(회전)와 실제로 움직인 톨의 위치(회전)사이의 차이인  $e$ 는 에러를 나타낸다. 만약, 에러가 (식2)에서 미소변위의 역할을 한다고 가정하고, (식1)과 (식2)로부터 원하는 로봇 끝단의 강성을 유지하기 위한 조인트 톨크는  $\tau = J^T(q) K_i e$ 로 나타낸다. 이 식들을 일반화 시켜 제어규칙을 고려해 보면 점성마찰과 중력의 영향을 포함하고 있다

$$\tau = J^T(q) [Ke + L \dot{e}] + h(q) \quad (\text{식5})$$

여기서,  $L$ 은 양의 한정 대각 점성 상수 행렬이고,  $h(q)$ 는 중력으로 기인된 부하 톨크를 나타낸다. 임피던스 제어 법칙의 (식5)과 PD-plus-gravity 제어법칙 사이에는 비슷한 점이 있음에 대하여 주목을 할 필요가 있다. 여기서 기본적인 차이점은 에러가 (식5)의 방정식에서는 톨의 위치와 회전에 의해서 직접적으로 구체화되어진 것이지 조인트의 위치에러를 표현한 것은 아니다. 본 논문에서 사용되는 로봇 시스템은 축이 1 축으로 되어 있어 중력에 대한 비선형 조건인  $h(q)$ 는 생략이 가능하다.

## 2.2 적응 퍼지 알고리즘

임피던스 제어기의 파라미터 불확실성과 비선형 조건에 대해 보다 강건하고 적응성이 있는 제어법칙을 적용하고자 적응 퍼지 알고리즘을 부가하였다. 로봇과 환경 사이의 접촉 시에 가장 영향을 주는 것이 로봇과 환경이 각각 지니고 있는 강성이기 때문에 로봇과 환경이 갖고 있는 강성의 값만 정확하게 찾아 낼 수만 있다면 위치 및 힘을 제어하는데 효과적이다. 1축 로봇을 이용하여 특히 적응 퍼지 제어기법의 특성을 가지고 임의의 환경에 대해서도 우리가 설계한 임피던스 제어기의 제어규칙이 제어하고자 하는 대상인 로봇의 강성 계인 값을 조절함으로써 적응 퍼지 임피던스 제어의 환경에 대해서도 자연스럽게 운용하면서 로봇이 파괴되지 않고 원하는 위치와 속도로 움직이도록 하는데 보다 큰 목적이 있다고 볼 수 있다. 적응 퍼지 임피던스 제어의 전체적인 구성은 그림 2에서처럼 임피던스 제어기법에 전문가의 지식을 기반으로 하는 지식 베이스를 장착한 룰 베이스를 형성하고 퍼지 추론기를 통하여 임피던스 제어기에서 로봇이 환경과 접촉 시에 로봇의 강도 계인 값을 인간처럼 생각하는 언어적 변수를 가지고 임의의 강도 및 점성을 갖는 환경에 대해서 로봇의 강성 계인 값을 자동조정 할 수 있도록 하고자 하는 것이다.

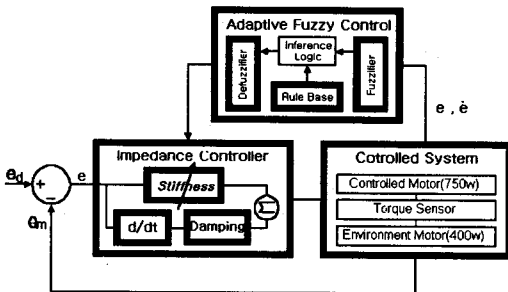


그림 2 적응퍼지 임피던스 제어기

이처럼 퍼지 추론을 하기 위해서는 먼저 지식 베이스를 바탕으로 하는 입력 및 출력 퍼지 언어적 변수를 설정해

야 하는데 1축 로봇 시스템에서는 퍼지 추론기의 입력 언어적 변수로 위치에러와 에러 변화율을 표현 할 수 있는  $err$  과  $derr$ 를 선택하였고 출력 언어적 변수로는 로봇의 강성과 관련된  $\Delta K$  선택한다.

입력 및 출력 언어적 변수를 결정이 되고 나면 이에 적합한 linguistic value를 설정해 주어야 한다. 여기서 linguistic value의 개수 결정은 원래 전문가의 지식이나 경험을 토대로 세우는데 실제적인 시스템에서는 모든 상태 값들을 구하기가 어렵기 때문에 1축 로봇 시스템에 부착되어 있는 센서에서 얻은 데이터들을 활용하여 실험적인 데이터 값을 적용하여 적당히 입출력 공간을 퍼지 분할하여 사용한다.

일단은 위치 에러와 속도 에러에 대한 입력 언어적 변수 이 2가지 요소를 가지고 로봇의 강도에 관련된 IF-THEN형태의 룰 베이스를 작성하면

$$\text{Rule}^{A.F.I.C} = \text{IF } err \text{ is } E_i \text{ and } derr \text{ is } D_i \text{ then } \Delta K \text{ is } S_{ti} \quad (\text{식7})$$

- $err$  : 위치 에러의 언어적 변수
- $derr$  : 속도 에러의 언어적 변수
- $\Delta K$  : 로봇의 강도
- $E_i$  : 에러 크기에 대한 언어변수
- $D_i$  : change of error 크기에 대한 언어변수
- $S_{ti}$  : 로봇의 강도 크기에 대한 언어 변수

퍼지 추론기에서는 들어오는 입력의 크리스프(crisp)한 값을 퍼지 값으로 바꾸어 어떤 룰 베이스가 참여 할 것인가를 결정 해주어야 하는데 IF-THEN 룰에 의해서 입출력 관계식을 연결한다. 1축 로봇 시스템에서는 Mamdani의 추론법을 이용하여 로봇의 강성(K)값을 찾아낸다.

$err =$  원하는값 - 현재값 이므로 에러가 +라는 말의 의미를 식으로 나타내면  $err = \theta_d - \theta_m \geq 0$ 가 됨을 알 수 있다. 즉 에러가 +라는 의미는  $\theta_{des} = 10^\circ$  인데

$\theta_m = 8^\circ$  돌았다면  $err$ 입장에서 보면 환경이 로봇의 강도보다 더 단단하기 때문에 로봇이 자신이 원하는 위치 만큼 가지 못한 경우라 할 수 있다. 그러므로 로봇의 강성을 당연히 크게 해 주어야 하고 그래야만 로봇이 원하는 위치와 속도로 환경과 접촉시에도 강인성을 가지고 환경에 자연스럽게 운용하여 움직일 수 있다. 하지만 무조건 로봇의 강도를 크게 가져가면 환경과 접촉시 안정성에 문제가 발생 할 소지가 생기므로 현재 로봇이 진행 하고 있는 방향의 속도물 역시 고려하면서 로봇의 응답 특성을 좋게 하는 강도 값을 비퍼지화 과정을 통해 로봇이 환경에 제대로 운용할 수 있도록 한다.

## 2.3 로봇 시스템 구성

그림 3에서 보는 바와 같이 750W/400W AC 서보 모터와 톨크센서로 구성이 되어있다.

750W AC 서보 모터는 제어대상의 로봇으로 가정할 수가 있고, 400W AC 서보 모터는 로봇이 접촉하는 환경으로 간주한다. 또한 톨크센서는 로봇이 환경과 접촉 시에 환경에서 발산하는 반작용의 힘 측정하기 위한 기능을 갖고 있다. 그리고 커플링은 모터와 톨크센서의 샤프트를 연결해 주는 부분이 된다. 이렇게 해서 1축 로봇 시스템을 구성하였다. 1축 로봇 시스템을 제어하기 위해 적응 퍼지 임피던스 제어기에 사용되는 파라미터 값을 보면 다음과 같다.

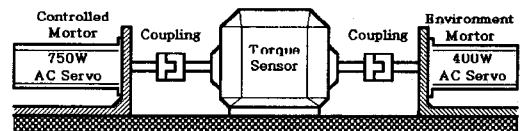


그림 3 로봇 시스템 구성

$M_m$  : 제어대상 모터의 관성모멘트  
 $M_{env}$  : 환경의 관성모멘트  
 $B_t$  : 커플링 점성  $K_t$  : 커플링 강도

## 2.4 제어 실험 환경

1축 로봇의 제어를 위해 연산처리 속도가 빠른 DSP 칩이 내장된 보드를 사용하였다.

그림 4와 같이 시스템 제어를 위해 제어부의 구성은 Windows NT를 기반으로 TMS320c4x 계열의 DSP 칩이 내장된 Dakar F5 Carrier Board가 장착이 되고, Imola ISA Quad IP Carrier Board에는 4개의 모듈을 탑재시킬 수 있는 슬롯이 주어진다. 우선 슬롯1과 슬롯2에는 타이머/카운터 기능이 있는 Quadrature가 탑재가 되고, 슬롯3에는 D/A컨버터가 장착이 되고, 슬롯4에는 A/D컨버터가 장착이 된다.

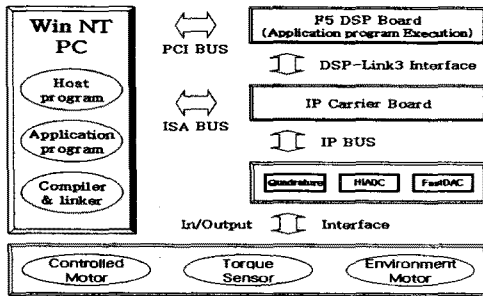


그림 4. 제어환경

각각의 모듈들의 기능에 대하여 간략하게 알아보면, 슬롯1과 슬롯2의 Quadrature는 모터의 위치나 속도의 변화를 측정하기 위한 용도이고, 슬롯3의 D/A컨버터는 우선 로봇과 환경을 구성하고 있는 AC 서보모터에 원하는 정현파 입력을 인가하기 위해서 사용하였으며 슬롯4의 A/D 컨버터는 토크센서로부터 나오는 전압을 측정하기 위한 용도이다.

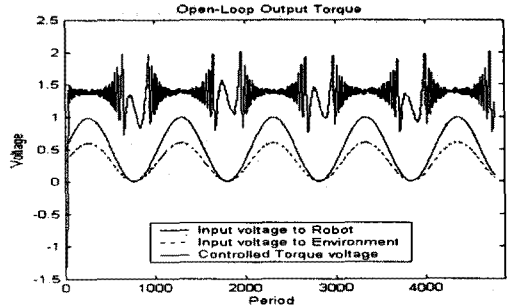
각각의 모듈은 IP-Bus를 통해 데이터가 교환이 이루어지고, Imola ISA Quad IP Carrier Board는 DSP-Link3라는 데이터 버스를 사용하며 최종 Windows NT에서의 데이터 교환은 PCI Bus를 통해 이루어진다.

## 2.5 실험결과

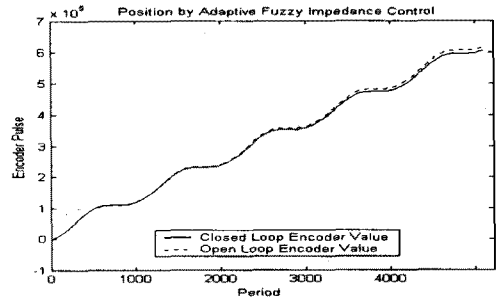
그림 2에서와 같이 임피던스 제어를 통해 입력에 대한 1축 로봇 시스템의 출력의 변화를 측정하고, 환경의 변화에 적응을 할 수 있도록 적응 퍼지 알고리즘을 부가하여 로봇의 강성을 가변적으로 제어할 수 있도록 구성하여 로봇이 환경과 접촉을 했을 때 보다 안정적으로 제어가 될 수 있도록 하였다. 따라서 다음과 같은 실험 결과를 얻을 수가 있었다.

결과 1은 오픈루프(Open-Loop)로 로봇을 환경과 접촉시켜 구동을 하였을 때의 토크센서에서 측정된 결과를 보여준다. 로봇에 해당하는 제어대상 모터의 입력은  $v_m = 0.5 \sin \omega_m t + 0.5$ 을 인가하였고, 임의의 강도를 갖는 환경의 효과를 주기 위해 환경 모터에는  $v_{env} = 0.3 \sin \omega_e t + 0.3$ 으로 구동 시킨 상태를 보여 준다.

결과 2는 적응 퍼지 임피던스 제어를 사용했을 때의 위치에 대한 결과를 Open-Loop에서 위치이동과 비교 분석한 결과이다.



결과 1 로봇이 환경과의 접촉시 힘



결과 2. 적응 퍼지 제어기에 따른 위치변화

## 3. 결 론

본 논문에서는 파라미터 불확실성에 강건성을 가지고 있는 퍼지 추론 방식을 이용하여 임피던스 제어기의 강성 제인을 온라인으로 조정하는 적응 퍼지 임피던스 제어를 제안하고 1축 로봇 시스템에 적용 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 퍼포먼스를 확인하였다.

환경 모터가 정현파 속도로 구동되는 로봇 접촉 환경에서 Desired Input이 정현파인 경우에 제안된 적응 퍼지 제어를 적용하여 기존의 제어 알고리즘 보다는 대상모델의 파라미터 불확실성에 보다 쉽게 대처하고 환경에 적응성이 강하며, 위치와 힘 제어가 빠르게 이루어짐을 결과로 볼 수 있었다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Brian B. Mathewson and Wyatt S. Newman, "Integration of force Strategies and Natural Admittance Control", In Proceedings of the ASME Mechanical Engineering Congress and Exposition, pages 237-242, Chicago, IL, 1994.
- [2] Gregory D. Glosner and Wyatt S. Newman, "The Implementation of a Natural Admittance Controller on an Industrial Manipulator", In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1209-1215, San Diego, CA, May 1994 IEEE.
- [3] N. Hogan, "Impedance Control: An approach to manipulation : Part III-application", Journal of Dynamic Systems Measurement and control, vol. 107, pp.17-24, March 1985.
- [4] Dong Sun and Yunhui Liu, "Modeling and Impedance Control of a two-Manipulator System handling a Flexible Beam", Transactions of the ASME, Vol. 119, pgae 736-742, December 1997.