

## Implementation of Adaptive Impedance Controller using Fuzzy Inference

林 勇 澤\* · 金 承 禹\*\*  
(Yong-Taek Lim · Seung-Woo Kim)

**Abstract** - This paper proposes adaptive impedance control algorithm using fuzzy inference when robot contacts with its environments. The characteristics of the adaptive impedance controller is to adapt with parametric uncertainty and nonlinear conditions. The control algorithm is to join impedance controller with fuzzy inference engine. The conventional impedance controller is still not robust with parametric uncertainties of target system. The proposed control method overcomes the problem of impedance controller using gain-tuning algorithm of fuzzy inference engine. We implemented an experimental set-up consisting of environment-generated one-link robot system and DSP system for controller development. We apply the adaptive fuzzy impedance controller to one-link robot system, and it shows the good performance on regulating the interactive force in case of contacting with arbitrary environment.

**Key Words** : Impedance Controller, Fuzzy Inference, Environment-Generated One-link Robot System, Torque Sensor

### 1. 서 론

최근에 각 분야의 산업현장에서 사용되어지는 로봇들은 대부분이 로봇의 핸드가 환경과의 접촉을 하는 작업환경으로 이루어져 있다. 따라서 이런 작업들은 로봇이 작업처리를 인간과 같이 동일하게 하기 위해서는 정확한 힘/위치 제어가 필요하다.

국내외의 많은 로봇연구가들에 의하여 로봇의 힘/위치 제어에 관한 연구는 매우 활성화되어 지고 있고 많은 제어이론과 연구 결과가 나오고 있다. 하지만 로봇의 힘/위치 제어에 관한 제어 이론을 적용하기란 비선형적인(Nonlinear) 요소와 불확실한 파라미터(Uncertainly Parameter)들 때문에 어려웠다. 또한 제어이론을 적용할 실험환경의 구축은 다양한 복합기술을 필요로 한다[4][5][6][8]. 그러므로 로봇 힘 제어 이론들이 컴퓨터 상에서 이루어지는 시뮬레이션(Simulation) 연구에 치중하고 있다[10].

최근에 로봇의 비선형적인 동적(Dynamic) 요소들을 해결하기 위하여 토크연산제어(Computed Torque), 강인 제어(Robust Control), 슬라이딩 모드제어(Sliding Mode Control) 가변구조 제어기(Variable Structure Control)같은 제어 이론들이 연구되고 있다. 하지만 이러한 제어 방식들은 로봇의 위치제어를 하는 제어 이론들이고 로봇이 환경과 접촉을 하는 작업환경 때문에 더욱 강해진 비선형성을 극복할 수 있는 강인한 힘 제어기가 필요한 실정에 있다.

힘/위치제어를 하는 로봇 제어이론으로는 하이브리드 제어(Hybrid Control), 순응 제어(Compliance Control), 임피던스 제어(Impedance Control), 어드미턴스 제어 등이 있다 [10][11]. 본 논문에서는 힘과 위치제어 혼합형 구조를 갖는 임피던스 제어기를 사용한다. 임피던스 제어기의 특징은 로봇 제어에 있어 로봇의 힘 제어 및 위치 제어를 환경과의 접촉시 발생하는 반작용의 힘을 이용하는데, 로봇의 끝단(end effect)이 환경과 접촉하는 상황에서 반작용의 힘을 피드백 받아 위치제어와 힘 제어를 동시에 처리하며 힘/위치 제어 이론들 중 구현이 용이한 힘 제어 방식으로 평가받고 있다[9].

그러나 임피던스 제어기도 중력이나 마찰력 등의 제어대상시스템의 역학적인 불확실성에 강건히 대처할 만한 제어이득 값을 조정하는 방법은 아직 개발되고 있지 않다. 결국 임피던스 제어기도 제어대상 모델의 파라미터 불확실성(Parameter Uncertainty)에 대처하기 위하여 적응성을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 파라미터 불확실성에 강건성을 가지고 있는 퍼지추론 제어방식을 이용하여 임피던스 제어기의 강성이득값을 온라인(On-Line)으로 조정(Tuning)하는 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기를 제안하고 1축 로봇 시스템(One-Link Robot System)에 적용 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 퍼포먼스를 확인한다.

또한 제어이론을 적용할 실험환경의 구축은 복잡한 복합기술을 요구하고 있으나, 본 논문에서는 로봇 힘제어 이론을 손쉽게 적용 실험할 수 있는 로봇 시스템을 구축을 한다. 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기를 적용하기 위하여 제작된 1축 로봇 시스템은 토크센서를 기준으로 왼쪽 샤프트에는 제어대상 모터가 장착되어 있고 센서 오른쪽에는 로봇과 접촉되는 환경의 효과를 내기 위하여 부하 모터를 장착하여 임의의 환경을 로봇에 제공할 수 있다.

\* 準 會 員 : 順天鄉大 工大 制御計測工學科 碩士卒業  
 \*\* 正 會 員 : 順天鄉大 工大 制御計測工學科 副教授 · 工博  
 接受日字 : 2001年 1月 19日  
 最終完了 : 2001年 8月 6日

실험환경을 구동하기 위한 제어 시스템 환경은 고속의 DSP를 이용하여 실험상에서 발생할 수 있는 샘플링 속도 제한(Sampling Rate Limitation), 센서 노이즈 등의 영향으로부터 좀더 자유로울 수 있도록 하며, 제안된 제어 알고리즘의 고속 및 정밀제어 기능을 확인할 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 2장부터의 본론에서는 임피던스 제어기의 구조와 가변적인 환경하에서 보다 정확한 힘/위치 제어를 하기 위해 부가한 적응퍼지 알고리즘에 대하여 설명하며, 제안된 알고리즘을 적용할 제어 대상 시스템의 구성 및 실험 방법 그리고 결과를 분석한다. 6장에서는 실험결과를 통한 제안된 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기의 우수성에 관한 결론을 설명한다.

### 2. 임피던스 제어기

로봇과 환경 사이의 반작용의 힘에 의해서 로봇핸드가 환경과 접촉시 발생하는 힘을  $F_{tool}$ 이라 하고 환경이 갖고 있는 강도를  $H$ 라 하면  $F_{tool} = H(XE - X)$ 가 된다. 여기서,  $XE$ 는 환경과 로봇이 접촉을 했을 때의 접촉점을 나타내며, 로봇의 실제 이동 위치는  $X$ 가 되며, 로봇의 실제 제어 위치는  $XD$ 가 된다. 매니플레이터에서 로봇핸드의 힘과 각 조인트에서의 토크간의 관계식을 자코비안(Jacobian) 행렬인  $J(q)$ 를 이용하여 표현하면 식(1)과 같다.

$$\tau = J^T(q) F^{tool} \tag{1}$$

윗식은 가상일(Virtual Work)의 원리를 이용하여 유도한 것으로서,  $\tau$ 는 조인트 토크벡터이고,  $F^{tool}$ 은 로봇핸드가 환경과 접촉시 발생하는 힘벡터이다. 로봇핸드의 미소변위  $du$ 와 발생하는 가상적인 일의 양은  $dW = F_{tool} \cdot du$ 가 된다. 또한, 로봇핸드의 미소변위와 조인트의 미소변위  $dq$ 와의 관계는 식(2)와 같으며,  $J(q)$ 는 매니플레이터 자코비안 매트릭스이다.

$$du = J(q)dq \tag{2}$$

$$(F_{tool})^T J(q)dq = \tau^T dq \tag{3}$$

식(3)은 식(2)를 로봇핸드의 미소변위에 의하여 발생하는 가상적인 일의 관계식에 적용하면 얻을 수 있다. 이때 로봇핸드에 발생하는 힘과 미소변위의 관계는 스프링에 대한 방정식을 이용해서 표현하면 식(4)와 같다.

$$F_{tool} = Kdu \tag{4}$$

식(4)에서  $K$ 는 스프링 상수이며, 양의 행렬이다.

$$K = \text{diag}[k_1, k_2, k_3, \dots, k_6] \tag{5}$$

스칼라양  $k_i$ 는 로봇핸드의 강성도를 의미하며, 큰값의 강성도는 로봇핸드의 미소변위에 대하여 큰힘이 발생하는 것이고, 작은 값의 강성도는 로봇핸드의 미소변위에 대하여 작은 힘의 발생을 의미한다. 즉 강성도  $k_i$ 에 의하여 로봇핸드의 힘과 환경과의 관계를 간접적으로 제어할 수 있음을 의

미하고, 강성도  $k_i$ 를 기계적인 임피던스로 정의 할 수 있다. 이때 이것을 이용한 로봇 힘 제어 방식이 임피던스 제어이다. 여기서 로봇핸드의 기준 위치를  $r$ 이라 하고, 실제위치와 회전을  $u$ 라 한다면,  $e$ 는 오차를 나타낸다. 식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$e \triangleq r - u \tag{6}$$

위치오차(Position Error)가 식(2)에서  $du$ 의 역할을 한다고 가정하면, 식(1)과 식(2)를 결합하게 되고, 여기서 조인트 토크는 로봇핸드의 기준강성도에 의하여  $\tau = J^T(q)Ke$ 로 나타낼 수 있으며, 이 식들을 일반화 시켜 임피던스 제어규칙을 고려해 보면 점성값(damping)과 중력의 영향을 포함하여 식(7)과 같이 전개할 수 있다[7][11].

$$\tau = J^T(q) [Ke + L\dot{e}] + h(q) \tag{7}$$

식(7)에서  $L$ 은 양의 한정행렬로서 점성값을 의미하며,  $h(q)$ 는 중력으로 기인된 부하 토크를 나타낸다. 임피던스 제어기의 블록선도는 그림 1과 같다.

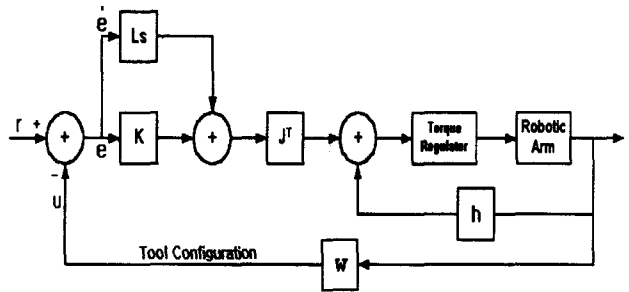


그림 1 임피던스 제어기  
Fig. 1 Impedance Controller

위의 임피던스 제어기는 로봇에의 적용이 간편한 구조로 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 임피던스 제어기의 특징은 로봇 제어에 있어 로봇의 힘 제어 및 위치 제어를 환경과의 접촉시 발생하는 반작용의 힘을 이용하는 데, 로봇의 끝단(end effect)이 환경과 접촉하는 상황에서 반작용의 힘을 피드백 받아 위치제어와 힘 제어를 동시에 처리하며 힘/위치 제어 이론들 중 구현이 용이한 힘 제어 방식으로 평가받고 있다[4]. 그러나 임피던스 제어기의 고정된 게인 값을 사용한다면 여전히 제어 대상 시스템의 불확실성과 비선형성을 완전히 극복할 수 없는 구조를 갖고 있는 것도 사실이다. 그러므로 이러한 기존의 임피던스 제어기의 문제점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 퍼지 추론 엔진을 이용하여 제어 대상 시스템의 파라미터 불확실성에 대처할 수 있는 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기를 개발한다.

### 3. 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기

임피던스 제어기도 중력이나 마찰력 등의 제어대상시스템의 역학적인 불확실성에 강건히 대처할 만한 제어 이득 값을 조정하는 방법은 아직 개발되고 있지 않다. 결국 임피

던스 제어기도 제어대상 모델의 파라미터 불확실성에 대처하기 위하여 적응성을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 파라미터 불확실성에 강건성을 가지고 있는 퍼지추론 제어방식을 이용하여 임피던스 제어기의 강성 이득값을 온라인으로 조정하는 적응 임피던스 제어기를 제안한다. 본 논문에서 적응퍼지 알고리즘을 사용하고자 하는 목적은 임피던스 제어기를 사용하면서 임피던스 제어기가 갖고 있는 파라미터의 불확실성과 비선형 조건에 대해 보다 강건하고 적응성이 있는 게인 값을 실시간으로 얻을 수 있는 적응퍼지 알고리즘을 부가하였다. 본 논문에서 제안한 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기의 전체 구성도는 그림 2와 같다.

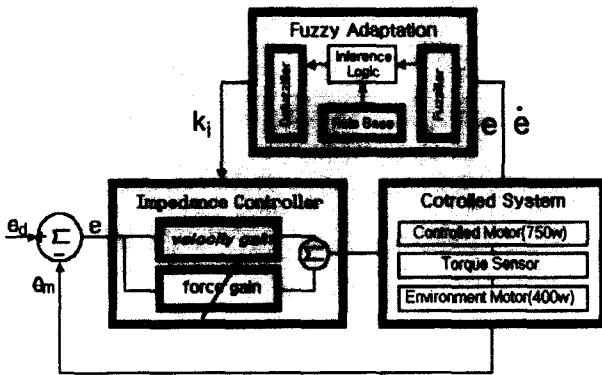


그림 2 적응 임피던스 제어기  
Fig. 2 Adaptive Impedance Controller

본 논문에서 제안하는 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기는 제어 대상 시스템인 로봇시스템으로부터 위치 오차  $e$  와 위치오차 변화율  $\dot{e}$ 을 입력받아 퍼지 논리로 구성된 퍼지 적응기를 거쳐 실시간 강성값을 만들어 낸다. 이렇게 만들어진 강성값을 이용하여 새로운 임피던스 제어기가 구성되고 그것을 통하여 로봇 힘 제어기가 구동된다.

### 3 퍼지 적응기(Fuzzy Adaptor)

고정되어 있는 환경만 고려를 하는 것이 아니라, 가변적인 강성을 갖는 환경 역시 고려되어야 하므로 퍼지논리에 의한 퍼지 적응기를 임피던스 제어기에 부가한다. 우선 퍼지 적응기의 구성은 퍼지화기, 룰베이스부, 추론 엔진부, 비퍼지화기로 그림 3과 같다.

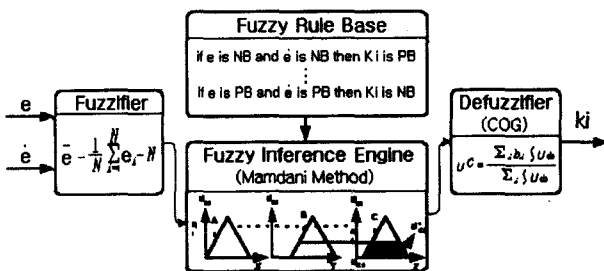


그림 3 퍼지 적응기의 구조  
Fig. 3 The Structure of Fuzzy Adaptor

본 논문에서는 추론엔진은 맘다니(Mamdani)의 추론방식을 사용하였고, 비퍼지화기는 무게 중심법을 사용하였다.

임피던스 제어기의 강성 이득값을 실시간으로 추론하기 위한 퍼지 적응기는 입력으로 제어 대상 시스템으로부터의 위치오차와 오차변화율로 정의하며, 제어 대상시스템인 로봇핸드의 위치와 임피던스 제어기의 출력값을 실험적으로 분석하여 퍼지추론 엔진에 룰베이스를 설계하면 표 1과 같다. 사용한 멤버십 함수의 대집합(Support Set)은  $(-1, 1)$ 이고, 표 1에서 퍼지언어변수(Linguistic Variable)인 {NB, NS, ZE, PS, PB}에 대한 변수값은  $(-1, -0.5, 0, 0.5, 1)$ 로 정의된다.

표 1 퍼지적응기의 룰베이스  
Table 1 Rule Base of Fuzzy Adaptor

입력	오차 변화율				
	NB	NS	ZE	PS	PB
오차	NB	PB		PS	ZE
	NS		PS	PS	ZE
	ZE	PB	PS	ZE	NS
	PS		ZE	NS	NS
	PB	ZE		NS	NB

### 4. 힘 제어용 1축 로봇 시스템의 설계

본 논문에서는 로봇 힘제어 이론을 손쉽게 적용 실험할 수 있는 로봇 시스템을 구축하였다. 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기를 적용하기 위하여 제작된 1축 로봇 시스템(One-Link Robot System)은 토크센서를 기준으로 왼쪽 샤프트에는 제어대상 모터가 장착되어 있고 센서 오른쪽에는 로봇과 접촉되는 환경의 효과를 내기 위하여 부하 모터를 장착하여 임의의 환경을 로봇에 제공할 수 있다. 그림 4에서 로봇 힘 제어용 1축 로봇 시스템의 구성도를 볼 수 있다.

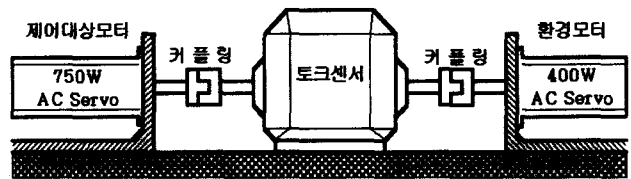


그림 4 로봇 시스템 구성도  
Fig. 4 Configuration of Robot System

그림 4에서와 같이 로봇핸드에 해당하는 750W AC 서보 모터와 가변적인 환경의 역할을 부여하는 400W AC 서보 모터 및 로봇과 환경이 접촉을 이루었을 때 발생하는 토크를 측정할 수 있는 토크 감지기(Torque Detector)와 토크 측정기(Torque Measurement)로 구성되어 있다.

본 논문에서 로봇 시스템에 적응 임피던스 제어기를 적용하기 위하여 연산속도가 빠른 고속의 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하였다. 제어 시스템의 구성은 그림 5과 같이 구성 되어있다. 구성도에서 보는 바와 같이 윈도우즈

NT를 OS로 IBM PC를 사용하고 있고, 중앙 처리 장치 보드와 입/출력 제어 신호를 발생시키는 I/O 보드로 구성되어 있다. 중앙처리 장치로는 DSP 프로세서를 탑재한 보드를 사용함으로써 실시간으로 제어대상 시스템인 1축 로봇 시스템을 제어하고 있다.

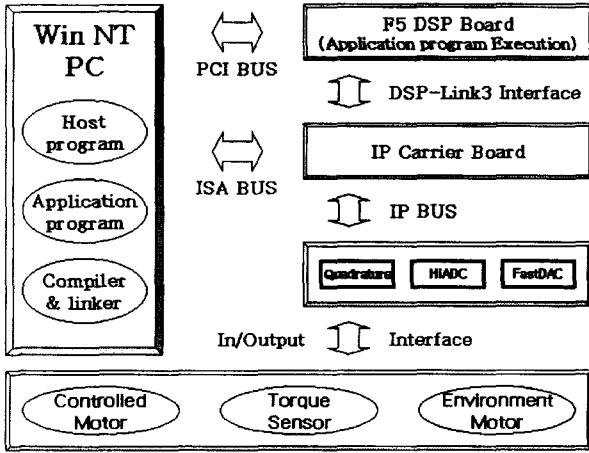


그림 5 제어기 개발 환경  
Fig. 5 Development-Environment of Controller

윈도즈 NT PC에 DSP보드를 PCI버스에 장착하고, 외부 입출력 모듈을 탑재한 인터페이스 보드를 ISA 버스에 장착하여 구성하였다. 인터페이스 보드에는 12비트 A/D 컨버터 및 13비트 D/A 컨버터와 24비트 카운터 모듈이 탑재되어 있다.

DSP 보드와 인터페이스 보드간의 데이터 송수신은 DSP Link3 버스를 사용한다. 또한 인터페이스 보드와 IP 모듈간의 데이터 송수신은 IP 버스를 사용한다.

1축 로봇 시스템과 제어기 개발 환경 시스템의 연결 상태를 설명하면, 로봇핸드에 해당하는 750W AC 서보 모터와 가변적인 강성을 갖는 환경의 역할을 하는 400W AC 서보 모터에 D/A 컨버터로부터 제어 신호를 출력하고, 각각의 모터에서 나오는 엔코더 신호는 카운터(IP-Quadrature)에 연결하여 모터의 위치를 파악한다. 로봇과 환경의 접촉시에 발생하는 토크를 측정하기 위해서 토크 센서에서 출력되는 값을 A/D 컨버터를 사용하여 토크값을 측정할 수 있다.

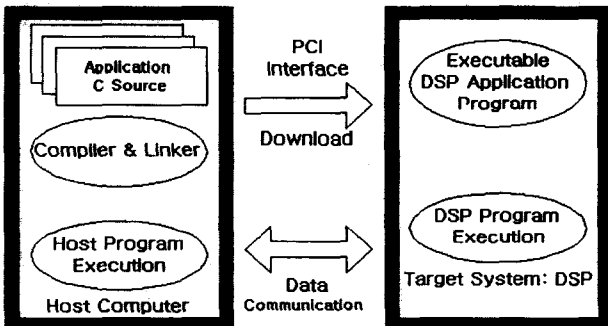


그림 6 제어 SW의 프로그래밍 환경  
Fig. 6 Programming Environment of Control SW

초고속 DSP보드와 IP버스를 이용한 제어기 개발 환경 시스템의 소프트웨어 개발방법은 그림 6과 같이 구성되어 있다.

5. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어를 적용하기 위하여, 1축 로봇과 로봇이 접촉하는 환경을 임의로 발생 시킬수 있도록 본 논문에서 제작한 힘 제어용 1축 로봇 시스템의 결과를 그림 7에서 볼 수 있다.

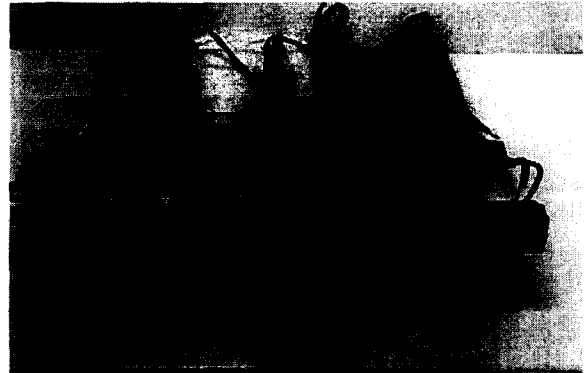


그림 7 힘 제어용 1축 로봇 시스템  
Fig. 7 One-link Robot System

퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어를 힘 제어용 1축 로봇 시스템에 적용하는 실험을 위하여 1축 로봇이 접촉하는 환경을 제공하여야 한다. 그것은 앞에서 설명하였듯이 본 논문에서 제작한 1축 로봇 시스템의 부하모터(400W AC 서보 모터)에 의하여 발생시킬 수 있고, 로봇이 접촉하는 환경의 가변성을 위하여 정현파 신호의 DC값을 첨가한 신호를 부하 모터에 입력함으로써 환경으로부터 로봇에 가해지는 반작용의 힘을 발생 시켰고, 그 결과를 그림 8에서 볼 수 있다. 그림 8은 개루프로 로봇이 환경과 접촉하기 전 환경 모터의 움직임을 나타내는 그래프이다. 반작용의 힘을 발생시키기 위한 부하 모터의 입력은 식(8)과 같다.

$$v_{env} = 0.3 \sin \omega_e t + 0.3 \tag{8}$$

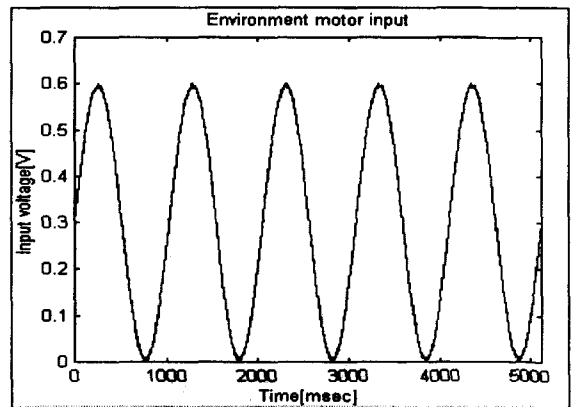


그림 8 환경 모터에 인가한 입력  
Fig. 8 Input of Environment-Motor

로봇에 접촉하는 환경으로부터 가해지는 가변적인 반작용의 힘에 대처하면서 목표하는 출력 위치의 궤적파형은 그림 9와 같다. 제어대상 로봇이 1축 로봇이므로 로봇의 위치출력은 모터의 위치센서값과 동일하므로 엔코더의 펄스값으로 표현하였다. 그것의 입력 신호값은 식(9)와 같다.

$$v_{des} = 0.5 \sin \omega_e t + 0.5 \quad (9)$$

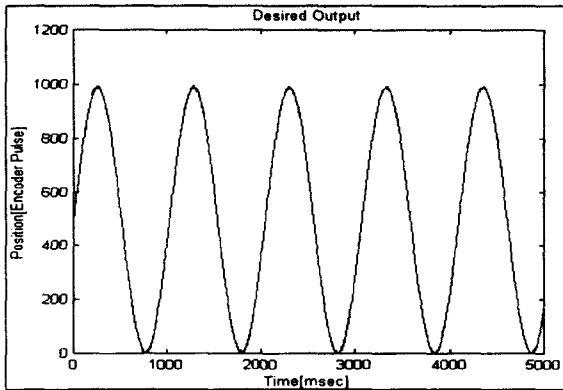


그림 9 정현파 기준 출력  
Fig. 9 Reference Output of Sinusoidal Signal

로봇핸드의 끝단과 접촉하고 있는 환경으로부터의 반작용 힘에 적절히 순응하기 위한 로봇핸드의 끝단에 발생하는 출력힘을 그림 10에서 볼 수 있다.

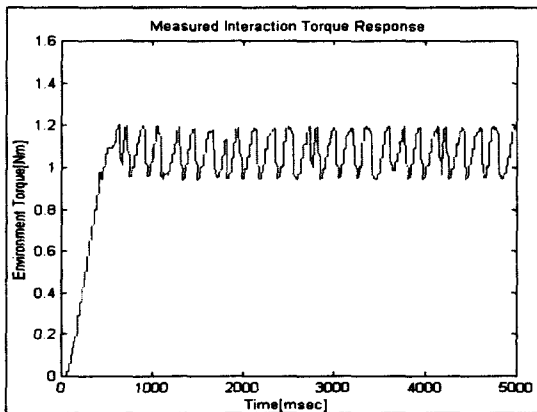


그림 10 적응 임피던스 제어기의 결과  
Fig. 10 Result of Adaptive Impedance Controller

기존의 비적응 임피던스 제어기를 이용하여 본 논문에서 제작한 힘 제어용 1축 로봇 시스템을 구동하였을 때의 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 원하는 위치 궤적 출력신호에 피크치 부근에서 제어성이 떨어지며, 약간의 리플현상이 나타나고 있다.

본 논문에서 제안한 파라미터 불확실성에 강건성을 가지고 있는 퍼지추론 제어방식을 이용하여 임피던스 제어기의 강성 이득값을 온라인으로 조정하는 적응 임피던스 제어기를 힘 제어용 1축 로봇 시스템에 적용한 결과가 그림 12에서와 같이 나타난다. 정현파 형태로 로봇에 가해지는 환경으로부터 반작용의 힘을 유연하게 극복하며 원하는 기준

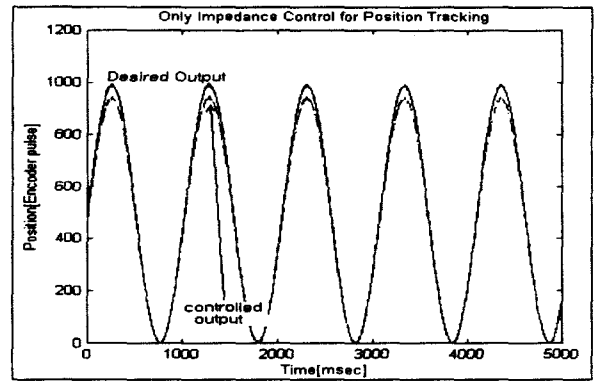


그림 11 기존의 임피던스 제어기의 결과  
Fig. 11 Result of the Conventional Impedance Controller

출력값을 정확하게 추적하고 있음을 확인할 수 있다. 환경에 순응하기 위한 힘을 발생 시켜주기 위하여 퍼지 적용기가 발생하는 강성이득 출력값을 그림 2.13에서 볼 수 있다. 그림 12에서부터 그림 13까지 볼 수 있듯이 가변적인 환경으로부터의 반작용의 순응하면서 원하는 기준 위치 출력값을 정확하게 추적하고 있는 결과 그래프를 통하여 본 논문에서 제안한 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기의 강력함/위치 제어성을 확인할 수 있다.

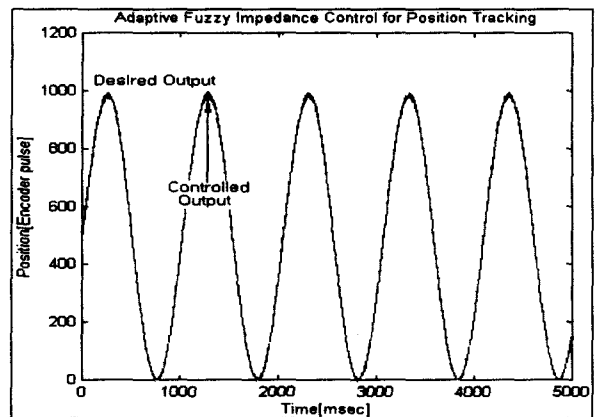


그림 12 적응 임피던스 제어기의 위치제어 결과  
Fig. 12 Position-Tracking Result of AIC

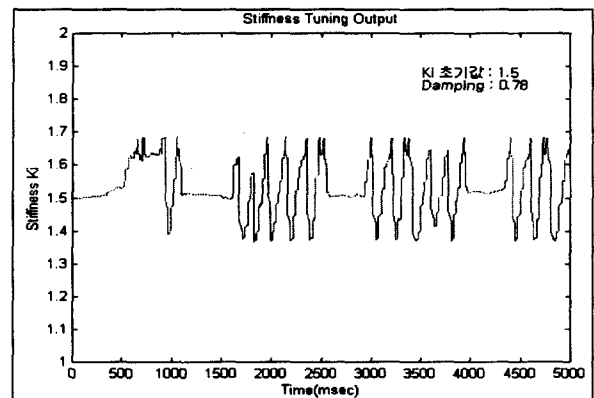


그림 13 퍼지적용기의 출력값  
Fig. 13 Output of Fuzzy Adaptor

그림 13은 임피던스 제어기의 강성도  $k_i$ 의 초기값을 1.5로 선택하고 댐핑값을 0.78로 설정한 상태에서 힘제어용 1축 로봇 시스템으로부터 위치 오차 및 오차 변화율을 입력받아 퍼지적응기의 룰베이스를 통한 퍼지 추론기 및 비퍼지화기의 무게중심법에 의한 강성도 조정 출력값을 나타낸 그래프이다.

## 6. 결 론

본 논문은 파라미터 불확실성에 강건성을 가지고 있는 퍼지 추론 방식을 이용하여 임피던스 제어기의 강성계인을 온라인으로 조정하는 적응 임피던스 제어기를 본 논문에서 제작한 1축 로봇 시스템에 적용하는 실험 논문이다.

실험을 통하여 제안한 알고리즘의 힘/위치 제어에 관한 결과를 확인한 결과 로봇이 접촉하는 환경으로부터 로봇에 가해지는 반작용의 힘이 크게 변하지 않는 상황에서는 기존의 임피던스 제어기만으로 로봇 힘 제어를 실현할 수 있었으나, 로봇환경의 변화가 큰 이유로 발생하는 제어 대상 시스템의 불확실성과 비선형성을 극복하기는 어렵다는 것을 본 논문에 실험을 통하여 알 수 있었다. 그러나 본 논문에서 제안한 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기는 매우 가변적인 환경 변화에도 적절히 대처할 수 있음을 실험 결과에서 확인하였다. 즉 적응 임피던스 제어기는 가변적인 환경으로부터의 반작용의 힘에 순응하면서 원하는 기준 위치 출력값을 정확하게 추적하는 실험결과를 통하여 제안한 퍼지를 이용한 적응 임피던스 제어기의 강력한 힘/위치 제어성을 확인하였다.

실험환경을 구동하기 위한 제어기 개발 시스템은 고속의 DSP를 이용하여 실험상에서 발생할 수 있는 샘플링 속도 제한, 센서 노이즈 등의 영향으로부터 자유로울 수 있도록 하였으며, 제안된 제어 알고리즘의 고속 및 정밀제어 기능을 간편하게 구현할 수 있었다. 또한 제어이론을 적용할 실험환경의 구축은 복잡한 복합기술을 요구하고 있으나, 본 논문에서는 로봇 힘제어 이론을 손쉽게 적용 실험할 수 있는 로봇 시스템을 구축하여, 제안된 제어 알고리즘을 적용함과 동시에 로봇과 접촉되는 환경으로부터의 임의의 힘을 자유롭게 발생시킬 수 있는 힘 제어용 실험 시스템의 구축도 본 논문의 중요한 결과라 할 수 있다. 특히 본 논문에서 제작한 힘제어 실험환경 시스템은 향후 로봇 힘제어에 많은 연구자들이 보다 쉽게 로봇 힘제어 이론을 적용하고 발전된 실험 결과를 얻는데 이용 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 순천향대학교 자체연구비의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

### 참 고 문 헌

[1] Yongteak Lim, Seungwoo Kim "A Study on Implementation of Stable Interaction Control" In Procee-

ding of the ITC-2000 Vol2, pp 608-611, Korea, 2000.  
 [2] 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, pp 237-242, Chicago, IL, 1994.  
 [3] 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, pp 1209-1215, San Diego, CA, May 1994 IEEE.  
 [4] Wyatt S. Newman and Yuandao Zhang "Stable Interaction Control and Coulomb Friction Compensation Using Natural Admittance Control," Journal of Robotic systems, 11(1), 1994.  
 [5] 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.  
 [6] Wyatt S. Newman and Mark E. Dohring "Augment Impedance Control : An Approach to Compliant Control of Kinematically Redundant Manipulators," In Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 30-35, Sacramento, CA April, 1991, IEEE  
 [7] Homayyoun Seraji and Richard Colbaugh "Force Tracking in Impedance Control," The International Journal of Robotics Researcb. Vol. 16, No 1, February 1997,pp 97-117.  
 [8] Miomir K. Vukbratovic and Aleksandar G.Rodic, Yury Ekalo "Impedance Control as a particular Case of the Unified Approach to the Control of Robots Interacting with a Dynamic Known Environment," Journal of Intelligent and Robotics Systems 18: pp 191-204, 1997.  
 [9] Ciro Natale and Bruno Siliano Lugi Villani "Spatial Impedance Control of Redundant Manipulators," Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan. May 1999.  
 [10] Chien-Chern Cheah and Danwei Wang," Learning Impedance Control for Robotic Manipulators," IEEE Transactions On Robotics and Automation, Vol, 14, No. 3, June 1998.  
 [11] J.E. Colgate, The Control of Dynamically Interacting Systems. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, August 1988.  
 [12] A.M. Khan, "Experimental Investigations of the admittance function of a robotic manipulator." Master's thesis, Case Western Reserve University, Department of Electrical Engineering and Applied Physics, May 1992.

저 자 소 개



임 용 택 (林 勇 澤)

1971년생. 1997년 순천향대 제어제측공학과 졸업. 2001년 순천향대 전기전자공학과 졸업(석사). 현 (주)네오게이트 주임연구원. 관심분야 : 로봇위치 및 힘제어, 임베디드 리눅스 시스템을 탑재한 실시간 로

봇제어

Tel : 041-530-1369, Fax : 041-530-1373

E-mail : seungwo@sch.ac.kr



김 승 우 (金 承 禹)

1961년 10월 15일생. 1987년 연세대 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989-1990년 삼성종합기술원 근무. 1994년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1994년~현재 순천향대 정보

기술공학부 부교수. 1998-1999년 미국 Case Western Reserve University 방문교수. 주관심분야 : 로봇 시스템, 퍼지제어시스템, 자동화기술, RP머신 개발 및 응용

Tel : 041-530-1369, Fax : 041-530-1373

E-mail : seungwo@sch.ac.kr