

# 계층적 분석방법을 이용한 실시간 퍼지로봇핸드의 양방향 제어의 구현

## Implementation of Real-Time Bilateral Control of Fuzzy Robot Hand using Analytic Hierachy Process

진현수\*, 홍유식\*\*

HyunSoo JIN\*, YooSik Hong\*\*

천안대학교 정보통신학부\*, 상지 대학교 컴퓨터 정보공학부\*\*

### 요 약

원격 조작기는 같은 일을 반복적으로 수행하지 않는다는 점에서 산업용 로봇 과는 구별 된다. 즉 조작자가 작업을 하는 동안 직접 판단을 내리며 조작기에 제어 명령을 내린다는 점에서 조작자도 원격 조작기를 제어하기 위한 제어루프에 포함된다. PID 제어에 의존하는 원격 제어기의 모델링 오차를 줄이기 위한 방법이 퍼지 제어기의 구현이라 할 수 있는데 위치-힘 제어 방식의 양방향 제어에서는 진동으로 인한 불안정성을 내포하고 있다. 비선형성에 의한 모델링 오차를 계층제어 방식에서는 여러 각도의 입력을 종합하여 판단한 조작자의 경험적 제어 규칙을 선형적으로 변환 모델링 함으로써 안정화 시킬 수 있다. 즉, 다속성 계층을 사용함으로써 선형적인 결과를 얻어 낼 수가 있다.

### Abstract

Telemanipulator is distinguished from industrial robot by iterating same specified work. Manipulator operator is included in control loop for controlling the telemanipulator because he decide directly during the work and order controllably .We implement fuzzy controller for reducing the modelling error of telemanipulator which depend on the PID controller. But position-force control method of bidirectional control impose unsafety of vibration and Analytic Hierchy method can stabilize for reducing nonlinear modelling error by expert operator because of transformation empirical control rule to linear model.

**Key words :** 계층분석방법, 양방향 제어기, 퍼지 제어기, 일관성지수, 로봇핸드

### 1. 서 론

특수한 작업 환경 아래에서 인간이 좀더 안전하고 효율적인 작업을 수행하기 위해서 원격 조작이 요구된다. 일반적으로 원격조작기는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 한쌍으로 구성된다. 원격 조작기는 반복적인 일을 수행하지 않는다는 점에서 산업용 로봇과는 구별 되며 조작자가 작업을 하는 동안 직접 판단을 내리며 조작기에 제어명령을 내린다는 점에서 제어루프에 포함된다. 원격 조작기의 제어방식은 크게 단방향 제어와 양방향 제어 두가지 형태로 나뉘어 지는데 단방향 제어란 힘의 피드백이 없이 마스터 조작기에서 발생된 제어명령이 슬레이브 조작기 쪽으로만 전해지는 방식이며, 슬레이브 조작기가 물건을 잡을 때 조작기에 가해지는 힘을 피드백시켜 조작자가 마스터 조작기를 통해서 실제로 그힘을 느낄수 있도록 하는 제어 방식이 양방향 제어이다. 즉 양방향 제어에서는 슬레이브 조작기가 물건을 집을 때 조작기에 가해지는 힘을 측정하며 그힘을 마스터 조작기 쪽으로 피드백 시키므로 조작자가 실제로 그 물건을 쥐고 있는것

과 같은 느낌을 가질수 있어서 단방향 제어에서는 어려운 섬세하고 정교한 작업을 할 수 있다.한편, 기존의 PID 제어를 비롯한 고전제어 이론과 상태공간(State Space)을 이용하는 최적제어(Optimal Control)같은 현대 제어 이론은 제어하고자 하는 시스템의 수학적인 모델에 의존하지만 이런 수학적 모델은 얻기가 어렵고 얻었다 하더라도 얻어진 모델은 오차를 포함하기 마련이므로 실제 환경에서 설계 성능을 만족시키기 어려운 경우가 많다.[1]

1980년대 초반부터 이러한 기존 이론의 결점인 모델링의 어려움, 모델링의 오차에 대한 민감성과 비선형 시변 시스템에 대한 현실적 적용에 따르는 문제점을 극복하기 위하여 신경망 제어 및 퍼지이론제어등의 다양한 제어 이론이 개발 또는 재조명 되고 있으나 숙련된 조작자의 경험적 제어 규칙을 그대로 적용한다든가 방대한 양의 제어규칙 룰을 필요로 한다든가의 제약성을 가지고 있어 마스터 조작자의 힘이 강,약을 받는등의 기복을 나타내어 정확한 세기의 힘을 슬레이브 조작기에 전달할수 없는 단점이 있었다.강약을 조절하는 PID 제어기도 제효력을 발휘하지 못하므로 힘과 속도를 동시에 제어하는 어떤 기술적인 방법이 계층제어방식이다. 정량적인 방법을 정정하여 정성적인 방법으로 이용하는 기술은 극도의 기술적인 효과를 요구하므로 퍼지 제어기도 감당기 어렵다. 이를 적용하는 퍼지 뉴럴방식도 어렵다. 그

접수일자 : 2003년 10월 8일  
완료일자 : 2004년 6월 24일

러나 퍼지 제어 이론의 비선형성에 대한 강인성등을 포함하면서 위에서 언급한 단점을 극복한 계층 분석 방법을 사용하는 방법이 있다.

양 방향제어에 사용되는 두조작기는 조작기 자체에는 비선형성이 많고, 힘 측정을 위한 힘센서의 출력은 잡음이 심해서 정보가 불확실 하다, 힘과 속도의 두 입력의 불확실성을 선형적으로 이용하여 선형적인 출력을 유출하고 여러각도의 정성적 입력을 함축하여 결과치를 얻어낼 수가 있다. 따라서 이시스템에 계층 분석 방법을 적용한다면 위에서 언급한 퍼지제어기의 단점을 극복할수 있을 것이다.

계층 분석 방법은 1970년 초에 Satty에 의해 개발 되었는데 일반적인 대안 평가 방법인 다속성 가치방법(Multi-attribute valuemethod)이 각 대안들이 가지는 속성의 범주를 추출하여 각 속성의 값을 구하고 소정의 과정을 통하여 각 속성의 가중치를 가정한 후에, 각 속성값을 가중치로 보완한 총합계를 기준으로 대안을 평가하는 의사 결정법이라 할 수 있는데 이는 가중치의 부여과정에 객관성을 부여하기가 어렵고 오차가 클수 있다는 점이다. 이를 보완하는 방법이 AHP라 할 수 있는데 다수의 목표, 다수의 평가기준, 다수의 의사결정문제를 계층화하여 상위계층에 있는 한 요소의 관점에서 직계 하위 계층에 있는 요소들의 상대적 중요도를 쌍별 비교에 의해 평가한후 궁극적으로 최하위 계층에 있는 대안들의 중요도를 구하는 방법이다.

본 논문에서는 2개 이상의 다속성에 의해 추종되기 어려운 슬레이브 조작기의 제어 과정에 AHP를 이용하여 로봇핸드의 양방향 제어 알고리즘을 개발 하였다.

## 2. 원격 조작기

원격 조작기는 매우 광범위한 분야에서 연구 또는 이용되고 있다. 인간이 우주로 많은 유,무인 로켓을 발사하면서 우주공간에서도 원격조작기가 실험되고 있으며 해저 광물의 채취 및 동식물의 탐사 원자력 발전소의 원자로 보수, 화재 진압전설이나 군사적인 용도에 이르기 까지 원격 조작기의 유용성은 앞으로 더욱 많아 질것이며 따라서 원격 조작기의 양방향 제어도 더욱 중요한 과제가 될 것이다. 하지만 원격 조작기의 양방향 제어에 개입되어지는 다속성에 의한 불안정 제어특성에는 효과적인 특정 방법이 없었으나 AHP의 장점을 이용하여 더 안정 되고 좋은 성능을 가지는 양방향 제어기를 구현하고자 한다.

본 논문에서는 로봇핸드의 양방향 제어를 위한 AHP제어 알고리즘을 개발하는데 필요한 마스터 조작기와 PC 인터페이스 보드를 제작하여 양방향 원격 조작 시스템을 실험으로 구현 하였다.[2]

AHP 제어기는 Off-line으로 출력을 미리 계산해둔 Lookup 테이블을 사용하여 실제 제어 시의계산 시간을 줄여서 샘플링 타임을 최소한으로 하였으며 IBM PC에서 소프트웨어로 구현 되었다. 이상적인 조작기란 조작자가 실제로 조작물에 대한 직접적인 조작을 하지않지만 완벽하게 같은 감각을 가질수 있도록 하는 것이 이상적인 원격조작기의 역할이다.

## 3. 원격조작기의 구조

양방향 제어에 사용되는 원격 조작기의 일반적인 구조는 아래그림과 같다.

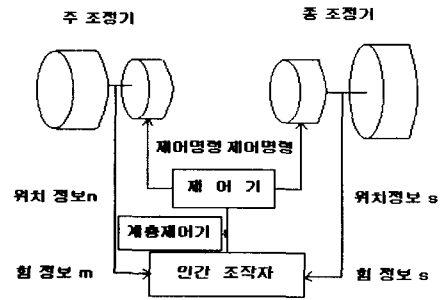


그림 1. 양방향 제어기의 구조 및 상태도  
Fig. 1. fuzzy robot shake hand and state digram

제어기는 마스터 조작기와 슬레이브 조작기로부터 현재의 위치와 힘 정보를 읽어들이는 다음 적절한 제어 알고리즘 사용하여 각 조작기를 구동시키기 위한 토크를 출력한다.[3][4]

양방향 제어 방식은 위치-위치 제어(Position-Position control)과 위치-힘제어(Position-force control)로 나뉘어진다. 본 논문에서는 위치와 힘을 계층적 다속성 대상으로 통합한 방식을 사용한다. 두 개의 제어대상을 단계별로 나누어 구성한다. 위치-힘제어 방식은 정확한 힘의 전달이 불가능하다는 위치-위치 제어의 방식의 결점을 해결하기 위하여 구성한 방식으로 구성방법은 아래 그림과 같다.

이 방식에서 슬레이브 조작기는 마스터 조작기에 의해서 위치 제어되며 마스터 조작기는 슬레이브 조작기에서 측정된 힘에 의해 제어된다. 슬레이브 조작기에 가해진 힘을 측정하여 마스터 조작기로 피드백 시켜 마스터 조작기가 다시 이힘을 조작자가 힘을 가하는 반대 방향으로 재생하기 때문에 조작자는 실제 슬레이브 조작기에 가해진 힘을 정확하게 느낄 수 있다. 위치-힘 제어방식에서 서로 성격이 다른 두 개의 성분을 같은 제어대상으로 출력을 나타내기 위하여 계층분석 방법을 사용한다.

그러나 이 위치- 힘 제어방식은 앞에서 설명한 위치-위치 제어 방식에 비해서 시스템이 불안정 해결 가능성이 훨씬 크다는 결점이 있다.[5]

제어 구조 자체가 비대칭적이며 Positive feedback 성격을 띠고 있어서 두조작기의 응답시간의 차이가 나서 위치 오차가 커진다든가, 두조작기 사이의 신호의 지연이 커지게 되어 진동이 일어나기 때문인데 그러한 이유 때문에 위치-위치 제어에 비해서 실제로 쓰여지지 않고 있는 것을 시간 지연, 응답시간의 과다, 비대칭적 성향등을 계층적 다속성의 원소로서 사용하여 위치- 힘 제어방식의 좋은 결과를 유도해 낼수 있는 기반을 조성한다. 위치의 제어대상으로 진동, 각도, 축의

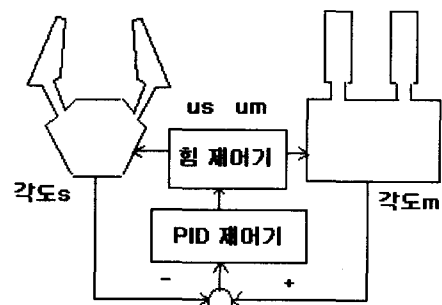


그림 2. PID제어기의 양방향제어의 구현  
Fig. 2 .PID controller and shake hand controller digram

오차를 들 수 있으며 힘의 제어대상으로 토크, 마찰력을 계층분석 제어기의 대안으로 설정한다.

### 4. 제안한 양방향 계층제어 알고리즘

#### 4.1 AHP제어기의 개요

본논문의 양방향 계층 퍼지제어 알고리즘은 근본적으로 위치-힘 제어 방식이다.

슬레이브 조작기의 위치를 제어하며 AHP C2는 슬레이브 조작기에 가해지는 힘을 마스터 조작기가 정확히 재생하도록 제어한다

AHP C1은 마스터 조작기와 슬레이브 조작기의 각도와 힘을 대상으로 저층 대안을 구성하는 제어구조를 나타낸다. AHP C2는 마스터 조작기의 위치를 제어대안으로 계층분석을 시행하는 제어기로 PID제어기의 위치-힘 제어와 같은 제어를 한다. AHP 제어기는 다속성 원소의 함유, 제어규칙의 선택등 PID 제어기에 비해 더욱 설계의 자유도가 큰 비선형 제어이므로 적절히 설계 되었을 경우 PID 제어기에 비해서 좋은 결과를 얻을수 있다.[6][7][8]

AHP C1과 AHP C2의 구조는 아래 그림에 나타 내었다 두 제어기는 동일한 구조를 가지고 있으며 서로 독립적으로 두 조작기의 힘과 위치를 제어한다.

제어기의 입력으로 error(e)와 error의 의 변화량(e)을 사용하며 제어 입력의 증가량 ΔH를 출력한다.두 제어기 모두 AHP화는 다속성 선택 방법을 사용 하였으며 비 AHP화는 무게 중심법을 사용 하였다. 계층화 방법의 형태와 계층의 수, 그리고 제어 규칙은 목적에 따라 조금씩 다르게 설계 되었다.

AHPC1은 조작기의 빠른 응답과 오버 슈트의 억제를 목표로 설계 되었으며 AHPC 2는 센서 출력의 잡음에 대하여 강인하도록 설계 하였다.슬레이브 조작기의 반응이 너무 늦거나 오버 슈트가 생기면 작업물과 접촉하는 순간 큰 위치 오차가 생기게 되어 조작자에게 갑작스런 힘이 가해지게 되며 힘 제어기가 센서의 잡음에 너무 민감해도 시스템이 전체적으로 불안정 해지기 쉽기 때문이다.

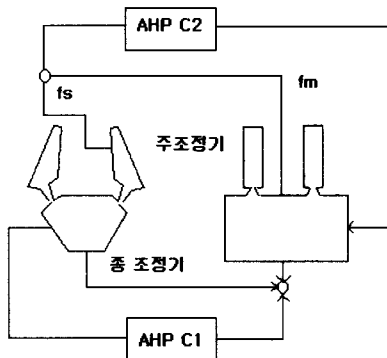


그림 3. 계층제어 분석기의 양방향 제어기 상태도  
Fig. 3. AHP controller and shake hand controller state diagram

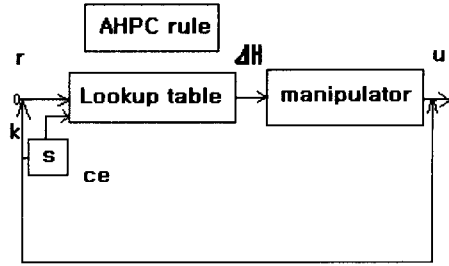


그림4. 계층제어 분석기의 순서도  
Fig. 4. AHP controller analyzer state diagram

#### 4.2 AHP 방법

제어 대상이 되어지는 속성들에 대한 가중치의 부여 과정에 객관성을 부여하기가 어렵고 오차가 클수 있다는 기존의 제어 방법에 대해 약점을 보완하고자 하는 방법이 계층화 분석 방법이다. 이것은 다속성 가치방법과 기본적인 분석과정은 같으나 전체의 대안을 동시에 평가하는 것이 아니라 두 대안씩 조를 만들어 상대적인 비교를 하는 과정을 거치게 된다. AHP는 다수의 목표, 다수의 평가기준, 다수의 의사결정 문제를 계층화 하여 상위계층에 있는 한 요소의 관점에서 직계 하위계층에 있는 요소들의 상대적 중요도를 평가한후 궁극적으로 최하위 계층에 있는 대안들이 중요도를 구하는 것이다. 계층분석 방법은 정량적 분석법의 일종으로 1970년대 초에 Satty에 의해 개발되었다. 이 기법은 대안의 평가 및 채택을 위한 의사결정기법의 하나로써 이미 이 기법에 대하여 많은 연구가 진행된바 있다. 일반적인 대안 평가방법인 다속성 가치방법(multi-attribute value method)은 각 대안들이 가지는 속성의 범주를 추출하여 각 속성의 값을 구하고, 소정의 과정을 통하여 각 속성의 가중치를 가정한 후에, 각 속성 값을 가중치로 보완한 총합계를 기준으로 대안을 평가하는 의사 결정기법이다. 그러나 이 기법은 가중치의 부여 과정에 객관성을 부여하기가 어렵고 오차가 클 수 있다는 데에 단점이 있다. 이러한 약점을 보완할 수 있는 방법이 계층화 분석 방법이다. 이것은 다속성 가치방법과 기본적인 분석과정은 같으나, 전체의 대안을 동시에 평가하는 것이 아니라, 두 대안씩 조를 만들어 상대적인 비교를 하는 과정을 거치게 된다.

AHP는 다수의 목표, 다수의 평가기준, 다수의 의사결정 문제를 계층화하여 상위 계층에 있는 한 요소의 관점에서 직계 하위 계층에 있는 요소들의 상대적 중요도(weight : 행렬식에서는 가중치)를 쌍별 비교(pairwise comparison)에 의해 평가한 후, 궁극적으로 최하위 계층에 있는 대안들의 중요도를 구하는 것이다. AHP 기법은 의사결정자의 오랜 경험이나 직관 등을 평가의 바탕으로 하고 있기 때문에 수치로 표현할 수 있는 객관적 평가기준은 물론, 흔히 의사결정 문제에서 다루기 힘든 주관적인 평가기준들도 비교적 쉽게 처리할 수 있다.[9][10]

#### 4.3 AHP의 적용 절차

AHP를 이용하여 의사 결정 문제를 해결하고자 할 경우에는 일반적으로 다음과 같은 4단계를 갖는다.

- (단계 1) 주어진 의사결정 문제를 계층 구조로 분해한다.
- (단계 2) 같은 계층 구조에 있는 요소를 대상으로 쌍별 비교를 한다.

(단계 3) 계층의 고유치(eigenvalue)를 구하고, 쌍별 비교된 요소들의 중요도를 추정한다.

(단계 4) 최하위 계층에 있는 대체안들의 중요도를 구하기 위하여 각 계층에서 구해진 평가 요소들의 중요도를 종합한다.

**4.4 의사결정 문제의 계층화**

AHP의 적용 절차 중 가장 중요한 단계인 계층화 단계는 주어진 의사 결정 문제를 상호 관련된 의사 결정 요소들로 계층화하여 문제를 분석하는 과정으로, 최상위 계층에는 가장 포괄적인 의사 결정의 목표가 놓여지고, 최하위 계층에는 선택의 대상인 대안들로 구성되며, 하위 계층으로 갈수록 평가요소가 구체적이어야 한다. 계층화 분석을 위한 계층 구조의 일례는 그림 5와 같다.[10][11]

**4.5 평가 기준의 쌍별 비교**

AHP에서 쌍별 비교는 어떤 계층에 있는 한 기준의 관점에서 직계 하위 계층에 있는 기준들의 상대적 중요도를 추정하기 위하여 평가 요소들간에 서로 비교하는 것으로 행렬로 나타낼 수 있다. 예를 들어, 어떤 계층의 비교기준을  $c_1, c_2, \dots, c_n$ 이라 하고,  $c_j$ 에 비해  $c_i$ 의 중요한 정도를  $a$ 라는

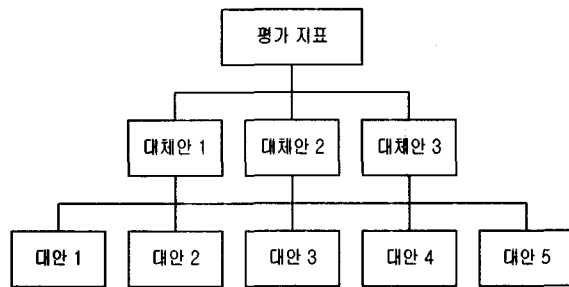


그림 5. 계층화 분석을 위한 계층구조  
Fig.5. Hierarchy layer system for AHP

수치로 표현할 때, 이들  $n$ 개의 기준들간 쌍별 비교 결과는 다음과 같이  $n \times n$  행렬로 나타낼 수 있다.

$$A = (a_{ij}) \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

여기서, 행렬  $A$ 의 성분  $a_{ij}$ 는 다음과 같은 규칙을 따른다.

- 규칙1.  $a_{ij} = \beta$ 이면  $a_{ji} = 1/\beta$ 단,  $\beta \neq 0$
- 규칙2.  $c_i$ 와  $c_j$ 가 똑같은 중요한 정도로 중요 하다면  $a_{ij} = a_{ji} = 1$  이 된다. 특히 모든  $i$ 에 대해  $a_{ii} = 1$ 이다. 따라서 행렬  $A$ 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

쌍별 비교의 과정에는 평가기준들에 대한 의사결정자의 선호 정도를 어의적인 표현에 의해 나타내고, 이에 상응하는 적절한 수치를 부여하는 수량화 과정이 포함되어진다.

**4.6 가중치의 추정**

쌍별 비교를 행한 후에는 각 계층에 대하여 비교대상 평가 기준들이 갖는 상대적 가중치를 추정하는데, 앞 단계에서 쌍별 비교를 통해 얻은  $a_{ij}$ 값을 이용하여 평가 기준  $c_1, c_2, \dots, c_n$ 이 갖는 영향도 또는 선호도를 나타내는 수치  $w_1, w_2, \dots, w_n$ 을 추정하는 것이다. 여기서 다음과 같은 식이 성립한다.가중치  $w_j$ 는 다음과 같다.

$$a_{ij} = A_i / A_j, \quad A_j = (a_{ij})$$

$$a_{ij} = w_i / w_j, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad \dots \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j = n w_i, \quad i=1,2,\dots,n$$

Satty는 경험적으로 볼 때  $CR \leq 0.1$ 인 경우에 판단의 일관성을 인정하고  $CR > 0.1$ 이면 판단을 다시 하거나 수정할 필요가 있다고 하였다.  $CR$ 은 정합도로서 아래와 같다.

$$A\omega = \lambda\omega \quad (\lambda \text{는 고유치}), \quad CR = CR / RI \quad (RI: \text{난수지수})$$

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1)$$

**4.7 가중치의 종합**

AHP의 마지막 단계는 최하위 계층에 있는 대안들의 우선 순위를 구하기 위해 각 계층에서 계산된 평가기준들의 상대적 가중치를 종합하는 과정으로 최상위 계층에 있는 의사 결정 문제의 가장 일반적 목표를 달성함에 있어서, 최하위 계층에 있는 대안들이 어느 정도 영향을 미치는지를 알아보기 위해 대안들의 종합 가중치를 구하는 단계이다. 대안은  $a_{ij}$ 이다. 평가기준은  $A = |a_{ij}|$ 이다.

대안의 종합 가중치는 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$W = \sum_j (w_j)(u_j^i) \quad (2)$$

- 여기서  $W$ 는  $i$ 번째 대안의 종합 가중치
- $w_j$ 는 평가 기준  $j$ 의 상대적 가중치
- $u_j^i$ 는 평가기준  $j$ 에 대한  $i$ 번째 대안의 가중치

**5. 로봇 핸드의 퍼지제어기의 구현**

**5.1 멤버십 함수**

퍼지 제어기의 FLC1과 FLC2의 예러(e)와 예러의 변화량(ce)을 사용하여 제어 입력의 증가량( $\Delta u$ )을 조합하여 다섯 개의 linguistic value를 사용하여 사용된 값을 나열하면 다음과 같다.

- NB:Negative Big    NS:Negative Small    ZR:Zero
- PS:Positive Small    PB:Positive Big

FLC1과 FLC2의 입력으로 사용되는 e,ce 그리고 출력  $\Delta u$ 의 멤버십 함수는 아래 그림과 같다. FLC1에서 e와  $\Delta u$ 는 -15에서 15까지 31개의 값으로 양자화 하고 ce는 -5에서 5까지 11개의 값으로 양자화 하였다. FLC2의 e,ce,  $\Delta u$ 는 모두 같은 형태의 멤

버섯 함수를 사용하였고 FLC1의 e와 Δu는 일반적인 삼각형 모양의 멤버십 함수를 사용하였으며 ce의 멤버십 함수를 ZR에 비해서 NB이나 PB의 영향이 커지도록 하였다.

FLC2는 FLC1과는 달리 삼각형 모양의 멤버십 함수를 사용하지 않고 사다리꼴 모양의 멤버십 함수를 사용한다. 사다리꼴 형태의 멤버십 함수는 어느정도의 입력의 변화가 있어도 멤버십값은 유지되므로 잡음에 대하여 더 강인하다고 할 수 있다. 힘센서는 잡음이 매우 심하기 때문에 같은 힘 fo에 대해서도 출력이 fo 부근에서 많이 변한다.

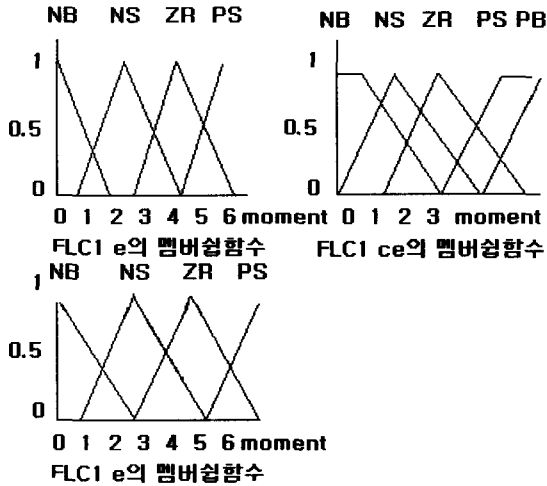


그림 6. 멤버십 함수  
Fig. 6. Membership function

삼각형 모양의 멤버십 함수는 입력의 변화에 따라 멤버십 값이 민감하게 변화하지만 사다리꼴 형태의 멤버십 함수는 어느정도의 입력의 변화가 있어도 멤버십 값은 유지 되므로 잡음에 대하여 더 강인하다고 할 수 있다.

5.2 제어 규칙

퍼지 제어기는 제어 규칙을 다양하게 구성 할수 있고 또 이를 쉽게 수정할수 있어서 다양한 제어 기능을 갖추고 있다.FLC1과 FLC2의 제어규칙은 다음과 같은 형태로 이루어져 있다.

- 단계 1: 매니플레이터 → 조작자
- R1: if e is NB ce is NB then Δu is NB
- R2: if e is NB ce is NS then Δu is NB
- .....
- R25: if e is PB ce is PB then Δu is NB

- 단계 2: 조작자 → 매니플레이터
- R1: if Δu is NB ce is NB then k is NB
- R2: if Δu is NB ce is NS then k is NB
- .....
- R25: if Δu is PB ce is PB then k is NB

두 제어기 모두 25개의 제어 규칙을 가지고 있으며 이 제어 규칙들은 일반적인 퍼지 제어규칙 형태에서 출발하여 실험을 거치면서 원하는 목표를 만족시키도록 약간씩 수정된 것이다.

Universe of discourse가 discrete하기 때문에 모든 입력

은 양자화 된다. FLC1의 경우 e는 -15에서 15까지 31개의 값 가운데 하나를 가지며, ce는 -5에서 5까지의 11개의 값 가운데 하나를 가지게 된다. 따라서 모든 가능한 입력 조합의 수는 341개 이므로 이를 off-line으로도 미리 계산해 둘 수 있다. FLC2의 경우에는 가능한 입력의 수는 1681개 된다. 실제 실험에서도 시간을 줄이기 위하여 출력을 미리 계산해 둔 lookup Table을 사용하였다.

전체 시스템은 마스터 조작기와 슬레이브 조작기, 모터를 구동하기 위한 서보앰프, 이들을 제어하기 위한 IBMPC 그리고 이들간의 접속을 위한 인터페이스 보드로 구성되어 있다.

5.3 마스터 조작기

마스터 조작기는 자율 이동 로봇을 구현할 때 장애물이 존재하는 곳을 피하기 위한 경로탐색의 이동구간을 설정하여 한번이 40cm인 정사각형인 이동구간을 설정하였다. 퍼지 양방향 제어기는 일대일 제어를 가지고 퍼지 분류자 시스템에 의해 생성되는 출력값으로 한번 이동하는 것을 1스텝이라 한다. 150스텝을 1회 실행하고 매회실행후 로봇을 힘제어 방식의 양방향 제어 구현으로 실현하는 방법으로 정사각형 공간 내의 장애물의 위치와 모양을 바꾼다. 5 스텝후 강화 신호를 받고 강화신호를 10번 받은후 규칙생성을 시도한다. 주요 파라미터 값을 초기 분류자의 개수를 100개, 최대 스텝을 150스텝 신뢰도를 100,비드상수값을 0.1, Tax 상수값을 0.01, 교차 확률을 0.8, 돌연변이 확률은 0.01로 설정하였다. 작업자가 직접 조작하며 제어명령을 발생시키는 부분이므로 조작이 편하며 슬레이브 조작기에서 피드백된 힘이 작업자에서 정확하게 전해지도록 기계적 마찰이 가능한 작은 구조가 되어야 한다.

슬레이브 조작기에서 피드백된 힘을 조작자에게 다시 전하기 위하여 20 W 출력의 직류모터를 사용하였으며 모터에서 발생한 토크를 증가시키기 위해서 1:2의 비로 모터를 감속하여 토크를 2배로 증가 시켰다.

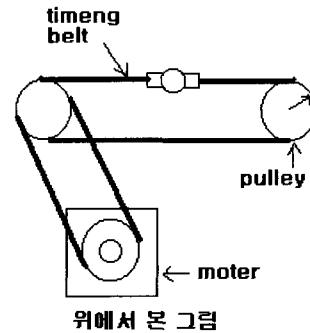


그림 7. 마스터 조작기 구조  
Fig. 7 Structure of Manipulator

마스터 조작기가 발생시키는 힘을 측정하기는 어려우므로 간접적으로 측정하였으며 그 방법은 다음과 같다.

모터가 1/2로 감속되었으므로 모터가 발생시키는 토크를 τ라고 하면 조작자가 느끼는 힘 F는 다음과 같이 구해진다

$$F = \frac{2}{r} \tau$$

r은 위그림에서 표시된 풀리의 반지름이다  
모터가 발생시키는 토크는 다음과 같다

$$\tau = kt \cdot ia$$

ia는 모터의 아마튜어에 흐르는 전류이며 kt는 모터의 토크 상수이다

두식에서 조작자가 느끼는 힘은 다음과 같이 된다

$$F = \frac{2}{r} kt \cdot ia$$

따라서 매스터 조작기내의 직류모터에 흐르는 전류를 측정하면 조작자에게 가해지는 힘을 알수 있다. 실험에 사용된 모터의 토크상수는 0.5kg-cm/A이다

### 5.4 슬레이브 조작기

슬레이브 조작기는 Telerobotics사에서 제작한 EP-100/30 General Purpose End Effector를 사용하였다. 이 End Effector는 직렬로 연결된 11Wdml 출력의 직류모터2개를 직렬과 연결하여 사용하고 있으며 Ball Screw를 사용하여 기어비를 크게 증가시키고 있다. 슬리에브 조작기에 가해지는 힘을 측정하기 위한 힘 센서는 End Effector의 핸드 안쪽에 부착하였다.

사용한 힘 센서는 FSR(FORCE Sensing Resistor)로서 가해지는 힘에 대해 선형적으로 저항이 감소하는 특징을 가지고 있다.

## 6. 계층 분석 제어기 설계 및 구현

계층 분석 방법을 사용하여 로봇핸드의 양방향 제어를 실시하고자 할 경우에는 계층 분석기의 대안을 실제 실험 대상 입력과 쌍을 이루어야 하는데 대안별 실시되어지는 실험양은 에러 e와 에러의 변화량(ce)와 제어입력의 증가량(Δu)을 선정하여서 대안 1,2,3으로서 결정한다. 각 대안이 결정 되었으면 쌍별 비교를 하여 1차적인 평가치를 선정한다. 각 대안별 비교량은 아래의 표와 같이 상호 비교를 실시한다.

비교치 값이 결정되어졌으면 쌍별 비교에 의한 행렬값을 구하여 쌍별 비교 행렬 A로써 결정한다.

표 1. 제어 입력 기록표

Table 1. Recording table of input parameter

	e	ce	Δu
e	17/17	17/19	①17.4/8.1
ce	19/6	19/19	②19/6.1
Δu	12.1/6	17.4/3	12.1/12.1 (17.4/17.4)

표 2. 계층분석방법을 이용한 순서도

Table 2. Flowchart of AHP control

순번	프로그램 내용	알고리즘 과정	합 수 식
1	센서를 통하여 e와 ce, Δu를 수집한다	계층분석과정의 대안을 입력함수를 사용하여 결정한다	e=a11, ce=a12 Δu=a13
2	e,ce, Δu를 각 대안의 첫 번째 원소로서 설정한후 데이터의 우선 순위를 중요도 매트릭스로서 결정한다.	매트릭스의 대안을 결정하는 원소의 결과값을 결정한다	$a = \begin{vmatrix} a11/a11 & a12/a21 & a13/a31 \\ a21/a12 & a22/a22 & a23/a32 \\ a31/a13 & a32/a23 & a33/a33 \end{vmatrix}$
3	대안값의 중요도를 통하여 결과값을 결정하기 위하여 대안값의 특성값을 결정한다.	중요도 매트릭스의 상대값인 가중치 매트릭스값을 구한후 두값의 곱을 취하여 일관성 지수를 선택한후 결과 출력치를 출력한다.	CI=(λ-n)/(n-1) CI는 일관성 지수 λ는 특성치이며 n은 원소의 수이다.

제어입력 e의 형태별 환산계수와 AHP중요도 매트릭스 수치는 표1에서 발췌하여 9개항으로 풀이하여 나타내었다. 힘은 위치에 비해 0.5로 단위 환산을 시행하고 각도는 힘에 비해 0.7로 환산한다. 이렇게 구한 행렬식은 아래식과 같다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

A 행렬이 결정 되어졌으면 각 계층에 대하여 비교대상 평가 기준들이 갖는 상대적 가중치를 추정하는데 앞 단계에서 쌍별 비교를 통해 얻은 A=[aij]을 이용하여 평가기준 c1,c2,...,cn이 갖는 영향도 또는 선호도를 나타내는 수치 w1,w2,...,wn을 추정한다. 여기서 다음과 같은 식이 성립한다

$$a_{ij} = w_i/w_j (i,j=1,2,...,n)$$

$$a_{ij} \cdot w_j = w_i$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j = n \quad w_i, i=1, 2, \dots, n$$

이 식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

위 행렬식에서 다음과 같은 식이 성립된다.

$$Aw = nw \tag{3}$$

위의 w는 실제 가중치인 4개의 교통 파라메터의 개별적 상대비교를 말하며 상대방정식 (A-λI)X=0(A:중요도 매트릭스, λ:고유값, I:단위행렬, X:상태변수)에서 상태변수의 계수값을 통해 구하며 n은 요소의 수이다.

다시, 식 (4)는 고유치와 고유벡터와의 관계를 나타내는 일반적인 방정식

$$Aw = \lambda w \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다.

$$(A - \lambda I)w = 0$$

식 (3)을 다시 쓰면,

$$Aw = \lambda Iw \quad (I \text{는 단위행렬})$$

또는 식(4)에서  $\lambda$ 를 구하면

$$|A - \lambda I| = 0$$

이 되며, 이 때  $\lambda$ 의 값은 다음과 같은 성질을 갖는다. 일반적으로  $A$ 가  $n$ 차 행렬인 경우  $n$ 개의  $\lambda$ 값 결국 식(4)은 다음과 같이 된다.

$$Aw = \lambda_{\max} w$$

위 식에서 가중치  $w$ 를 추정할 수 있으며,  $\lambda_{\max}$ 의 값이  $n$ 에 근접하면 쌍별 비교 행렬  $A$ 가 일관성을 갖는 것으로 해석한다.

### 7. 실험 및 고찰

실험은 10 nsec 시간 동안에  $e$ 와  $ce$ 와  $\Delta u$ 를 샘플링하여 퍼지 제어기 구현을 룩업 테이블 방식을 사용하여 실험을 실시하고 계층제어 방식은 같은 시간 동안에 본 알고리즘을 실시하여 PID제어기와 퍼지제어기 계층 제어 알고리즘을 실시한 결과를 비교하였다. 전체 제어기 구성은 그림 8과 같다. 입력 데이터 값  $e, ce, \Delta u$ 를 통하여 계층 분석상 특성치 값을 구하였으면 구한값을 가지고 일관성 비율값을 결정한후 유효범위내의 값이 도출되었으면 결과값을 배출한다. 결과값은  $Aw=nw$ 에서 CI 값이 0.1~0.15사이에 들어 있으므로 결과 평가치를 구한다. 평가치는 CI값이 결정된후 입력 데이터 값을  $A$ 값으로 변환한 후 퍼지 적분치 값으로 결과값을 구한다. 즉,  $e$ 와  $ce$ 와  $\Delta u$ 값의 샘플치 값을 구한후 각 10nsec 동안의 주기내에 표본값 10개를 100nsec동안에 10개를 취하여서 퍼지추론치를 통한 평가치 계산 결과 값을 100nsec 동안에 3개×10주기 결과값을 구하여 데이터 값을 결정한다. 결정된 데이터값의 결과 그래프는 그림 9와 같다.

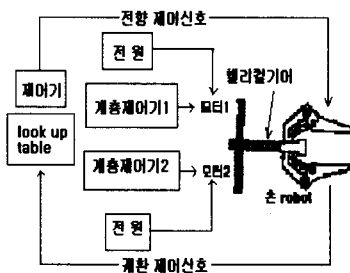


그림 8. 전체 제어기 구성  
Fig.8 Structure of Controller

결과 그래프를 통한 위치값의 비교는 PID제어와 퍼지제어를 양방향 퍼지핸드의 결과

목표값에 평균  $2 \times 10^{-3} \text{mm}$  와  $4 \times 10^{-3} \text{mm}$ 을 보여 주고 있으나 계층제어 결과 위치

값은  $1 \times 10^{-1} \times 10^{-3}$ 위치 오차 결과값을 나타내므로 더욱 우수한 결과치를 보여 준다.

계층 제어 결과는 제어 규칙을 시행하는 결과 그래프를 통한 제어방향을 설정하여 결정된 방법을 구체화 하여 결과 그래프를 시행한 결과값을 토대로 하여 양방향 제어의 결정값을 정한다.

그림 a의 Y축 단위값은 mm이고 그림 b의 Y축 값은 moment이고 그림 c의 단위값은 환산 단위값이다.그림 d는 잡음에 대한 AHP제어기의 강인성을 나타내었으나 속도의 과도특성을 나타내는 측면에서도 AHP제어기가 같은 특성을 보여주었다. 계층 제어 결과는 제어 규칙을 시행하는 결과 그래프를 통한 제어방향을 설정하여 결정된 방법을 구체화하여 결과 그래프를 시행한 결과값을 토대로 하여 양방향 제어의 결정값을 정한다. PID 제어기는 양방향 제어를 시행하여 결과 그래프를 시행하여 살펴본 결과 세 개의 그래프를 비교한 결과 양방향 제어를 실현한 결과 그래프를 통한 세 개의 그래프를 실현한 결과는 세 개의 그래프 가운데 계층제어

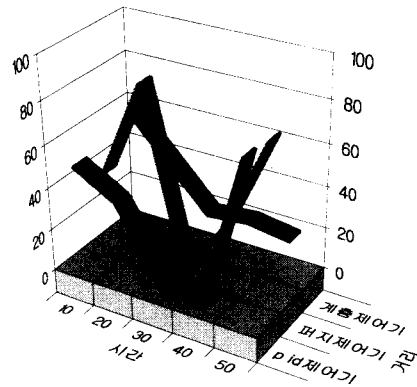


그림 a. 위치제어 결과값  
Fig. a. Output Position Control

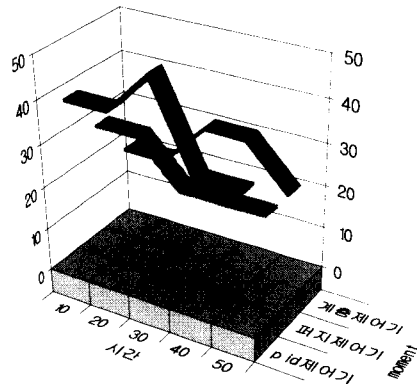


그림 b. 힘 제어 결과값  
Fig. b. Output Force controller

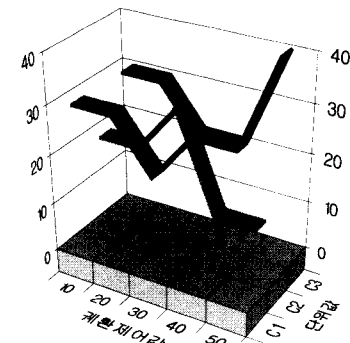


그림 c. 궤환제어값  
Fig. c. Output Feedback controller.

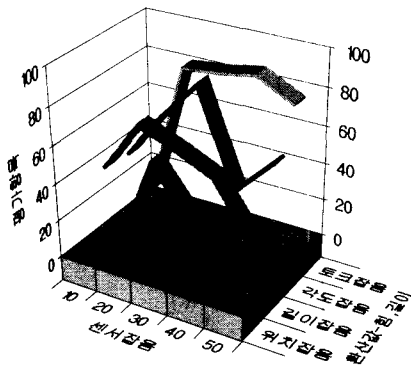


그림 d. 잡음 강도값  
Fig. d. Intensity of Noise

그림 9. 제어기 비교값  
Fig. 9. Comparison of each controller

결과 그래프가 가장 우수한 결과를 나타내었다. 세 개의 결과 그래프를 실행한 방법은 측정하고자 함이다.

오차를 측정하는 기준은 PID 제어를 먼저 실현하고 2개의 퍼지제어기와 계층제어 분석기를 비교하여 가장 오차가 적게 나오는 그래프를 비교검토하여 한 개의 그래프를 선택한다. 그래프 가운데서는 PID제어기와 계층제어 분석기와 퍼지 제어기를 비교하여 보면 계층 제어 분석기의 결과가 가장 우수함을 보여 주고 있다. PID 제어기는 실험치가 곡선형으로 사용 되었으므로 곡선점을 비교를 하여 계층제어 분석기를 검토 비교 한다. 검토한 결과 PID제어기는 그래프의 특성상 기존의 결과 그래프를 그대로 사용하고 있기 때문에 검토 대상이 되지 않는다. 다만 퍼지제어 그래프가 계층 제어 분석기와 검토 대상이 되기 때문에 계층 제어 결과 그래프를 선택하는 이유가 되어진다. 고찰하여야 할 점은 양방향 제어가 매니플레이터를 통해 실현 되어지므로 PID제어를 통해 먼저 구현을 실시하고 양쪽제어기를 비교 검토 한다. 검토한 결과는 실험을 통해 PID 제어기와 퍼지제어기를 통해 계층제어기가 우수함을 보여준다.

## 8. 결 론

계층 제어기는 힘, 위치를 입력으로 궤환값을 출력한다.

힘의 제어대상은 각속도, 토크, 마찰력, 점성등을 들수 있는데 이를 종합 입력할 수 있는 방법은 없다. 계층 제어기는 이를 실시간으로 합산 출력하는 방법인 유일한 제어 방법이다. 힘과 거리등의 유사성이 거리가 있는 제어대상도 판단할 수 있지만 같은 유사성의 제어 대상에 높은 제어력을 발휘할 수 있다. 많은 정량적 제어 방법으로 사용되어 왔으나 앞으로는 정성적인 제어대상에 중점을두어 제어하는 방법을 시도하여야 겠다. 제어대상의 속도가 많은 문제점으로 작용하나 이를 해결하는 알고리즘 및 제어대안이 모색되어지면 좋은 결과를 얻을 수가 있다. 본 논문에서는 제어단계를 알고리즘의 판단 지연에 의한 축소 단계를 시행하였으나 좀더 확장하는 발전적인 방법이 시도되면 교통 및 초고속 제어에 응용될 수 있는 방법으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

[1] T.B.Sheridan, "Telerobotics", Automatica, vol.25, no.

4, pp.487-507, 1987.

- [2] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in control System: Fuzzy Logic Controller, Part I", I. E.E.E Trans. Syst., vol. 20, no.2, pp.404-418, 1990.
- [3] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control systems: Fuzzy Logic Controller, part II", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol.20 no.2, pp.419-435, 1990.
- [4] Y.F.Li and C.C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithm for Servo Systems", IEEE Contr. Syst.Mag., pp.65-71, April 1989.
- [5] M.W. Thring, Robots and Telechirs, John Wiley & Sons press, pp.82-131, 1983.
- [6] M.Braae, D.A. Rutherford, "Theoretical and linguistics aspects of the fuzzy logic", vol.15, pp.553-577, 1979.
- [7] Jean Vertut and Philippe Coiffet, "Teleoperation and Robotics", Robot Technology, vol.3, KoganPage Ltd., 1985.
- [8] G.J.Raju, G.C. Verghese and T.B. Sheridan, "Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation", in Proc on Rob and Automation, pp.1316-1321, 1989.
- [9] David E. Goldberg, Genetic Algorithm in optimization, and machine learning, Addison Wesley, 1989.
- [10] Holland J.H., "Properties of the bucket brigade algorithm", Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithm, pp.1-7, 1985.
- [11] whitehead, S.D., & "learning to perceive and act by trial and error," Machine Learning. 7, pp.45-83
- [12] Valenzuela-Rendon M, "The Fuzzy classifier system: Motivations and first results," Parallel Problem Solving from Nature-PPSNII, Springer-Verlag. pp.330, 1991.

## 저 자 소 개

진현수 (Hyun-Soo Jin)

1986년 : 서울시립대학교 전자공학과 (학사)

1990년 : 서울시립대학교 전자공학과 (석사)

2000년 : 서울시립대학교 전자공학과 (박사)

1996년~2000년 : 안산공과대 조교수

2000~2001년 : 한국과학 기술원 박사후 과정

2001~현재 : 천안대학교 정보통신과 근무

2001~현재 : 한국인터넷정보학회 학술지편집위원 근무

E-mail : jhs1020@chonam.ac.kr

홍유식 (You-Sik Hong)

2003년 제13권 1호 참조