

〈論 文〉

# 원격 감시카메라 자동추적시스템의 퍼지제어기 개발에 관한 연구

윤지섭\* · 박영수\*\*

(1994년 2월 19일 접수)

## Development of Fuzzy Controller for Camera Autotracking System

Ji Sup Yoon and Young Soo Park

**Key Words :** Displacement Follower(변위추적장치), Pan/Tilt Device(조향장치), Tracking Control(추적제어), Fuzzy Control(퍼지제어), Telerobotics(원격로봇), Autonomous Robot(자율지능형 로봇)

### Abstract

This paper presents the development of a fuzzy controller for driving camera pan/tilt device so that the camera's viewing direction can automatically track a moving object. To achieve computational efficiency a non-contact type displacement follower is used as a feedback sensor instead of a vision camera. The displacement follower, however, is extremely sensitive to object's lighting condition and results in unstable response at high speed. To this end, a fuzzy controller is developed in such a way to provide stable tracking performance at high speed where the sensory signal is subjected to intermittent disturbances of large magnitude. The test result shows stable tracking response even for high speed and non-uniform lighting condition. The resulting camera autotracking system can be adopted as an effective tool for visual transfer in the context of teleoperation and autonomous robotics.

### 기 호 설 명

- |  |   |
|--|---|
| $\Delta x, \Delta y$ : 시각영역의 중심점으로부터 목표물까지 $x, y$ 방향의 선형변위 | $P_x, P_y$ : $x, y$ 방향의 스텝핑모터 구동펄스수           |
| $\theta_x, \theta_y$ : 조향장치의 수평 회전각도와 수직 기울임 각도            | $e, ce$ : 위치오차( $\Delta x, \Delta y$ )와 오차변화량 |
| $l$ : 변위추적장치와 목표물의 이동 평면간의 수직거리                            | $p$ : 퍼지제어기의 출력                               |
| $V_x, V_y$ : 변위추적장치의 $x, y$ 방향으로의 출력전압                     | $\mu_A$ : 퍼지변수 $A$ 의 소속함수                     |
| $K_1, K_2$ : 출력전압과 오차와의 $x, y$ 방향으로의 차                     | $A_i, B_i$ : 퍼지제어규칙 $i$ 의 입력부 퍼지변수            |
| $K_x, K_y$ : $x, y$ 방향의 비례제어 계인                            | $C_i$ : 퍼지제어규칙 $i$ 의 출력부 퍼지변수                 |
| $\alpha_x, \alpha_y$ : $x, y$ 방향의 보정계수                     | $U, V$ : 입력부 대역의 전체집합                         |
|  | $W$ : 출력부 대역의 전체집합                            |
|  | $a$ : 제어규칙의 출력 기여도                            |

### 1. 서 론

\*정회원, 한국원자력연구소

\*\*한국원자력연구소

레이터(telemanipulator)를 이용하여 극한환경에서의 작업을 수행하는데 있어서, 작업환경의 시각정보를 효과적으로 감지하고 전달하는 기능이 필수적으로 요구된다. 이와 같이 시각정보의 추출은 주로 텔레비전 카메라를 통해서 이루어지는데, 이때 카메라의 시각영역내에 로봇의 작업영역이 포함되도록 카메라의 주시방향을 조정해 주어야 한다. 특히 작업대상물과 작업기구의 상대위치가 자동으로 변할 경우 이와 같은 카메라 조향작업에 별도의 조작자가 할당되어야 하는데, 이 경우 조작자에게 많은 부담을 주게 되고, 작업의 효율 및 신뢰성이 떨어지게 된다. 또한 이러한 수동조작방식은 자율지능형 로봇의 경우에는 적용할 수가 없다. 이와 같은 불편을 해소하기 위해서 카메라 조향기능을 자동화하는 연구가 원격조작 분야에서 많이 수행되어 왔는데, 성공적인 카메라 자동추적장치의 도입은 일반적인 원격작업에 있어서 40%의 효율개선을 이루어 준다고 보고된 바 있다.<sup>(1)</sup>

카메라를 움직이는 목표물에 자동추적시키는데 있어서 가장 큰 문제점은 목표물의 공간상의 위치 및 속도를 측정하는 것이다. 이를 위해서 여러 가지 방법들이 제안되었는데, 효과적인 방법의 하나로는 로봇의 관절각도를 측정하여, 로봇그리퍼의 위치를 기하학적으로 계산하는 방법이 있으나,<sup>(2)</sup> 이 방법은 대상 물체가 로봇그리퍼로 한정되는 단점이 있다. 따라서 카메라를 임의의 작업대상물에 추적하도록 하기 위해서는 별도의 비접촉식 센서를 사용하는 것이 보다 바람직하다. 이 경우 주로 카메라의 화상정보를 처리하여 작업물의 위치를 인식하게 되는데, 일반적으로 화상정보처리에 많은 시간이 요구되어 실시간 추적이 어려움을 겪게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 윤지섭<sup>(3)</sup>은 별도의 2자유도를 가진 비접촉식 고속 변위추적장치(displacement follower)를 사용하여 화상정보 처리에 소요되는 시간을 줄이고, 카메라 자동조향을 위한 실시간 추적을 가능하게 하였다. 하지만 이 연구에서는 제어기로 단순한 비례 위치제어기를 도입함으로써, 조명이 균일하지 않거나, 목표물의 이동속도가 빠를 경우 변위추적장치가 외란에 취약한 특성을 나타내어, 제어성능이 크게 저하되는 단점을 나타내었다. 이 같이 제어기가 외란에 취약한 특성을 보완하기 위해서는 보다 향상된 기능을 가진 제어기를 도입할 필요성이 요구된다.

고전적인 제어기법으로 이와 같은 제어기를 설계

하기 위해서는 우선 제어대상의 동특성을 수학적으로 나타낼 수 있어야 한다. 이와 같은 동적 모델은 이론적 혹은 실험적인 방법으로 얻어지나 아무리 상세한 수학적 모델이라도 실제 시스템의 특성을 모두 나타내는 것은 불가능하며, 동특성 및 구조가 매우 복잡한 시스템의 수학적 모델을 구하는 것은 더욱 어렵다. 이와 같이 불확실한 특성을 갖는 시스템을 제어하는 방법으로 퍼지이론이 대두되어 퍼지집합 및 퍼지논리를 적절히 도입한 퍼지제어기 개발·적용하는 연구가 많이 수행되고 있다. 일반적으로 퍼지제어기는 제어대상 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확하며, 불확실한 경우에 기존 제어기술보다 우수한 성능을 나타낸다. 따라서 퍼지제어기는 단순 모델링이 불가능한 실제 산업시설에 널리 응용되어 왔는데, 대표적인 예로서 정수장의 수질제어,<sup>(4)</sup> 시멘트 킬른제어,<sup>(5)</sup> 지하철운전,<sup>(6)</sup> 컨테이너 크레인운전,<sup>(7)</sup> 기계가공공정 자동화,<sup>(8)</sup> 자동차운전<sup>(9)</sup> 등 여러 분야에 성공적으로 응용된 사례가 보고되었다.

본 연구의 대상인 카메라 자동추적시스템의 변위추적장치는 조명상태의 변화에 따라 응답특성이 불규칙적으로 변하여, 실제로 이론적인 방법이나 실험적으로 동특성의 수학적 모델을 얻어내기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 카메라 자동추적시스템의 추적제어에 퍼지제어기법을 도입하여, 조명의 외란에 불안정한 특성을 개선하여, 고속 추적도 가능하도록 하였으며, 개발된 제어기의 성능을 실험을 통해 평가하였다. 본 논문에는 카메라 자동추적시스템의 개발과정, 기능, 퍼지제어기의 구성 및 기능을 설명하고, 성능시험 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 카메라 자동추적장치의 구성 및 기능

본 연구에서 도입된 카메라 자동추적장치의 전체적인 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 다음 부분으로 구성되어 있다.

- 변위추적장치(displacement follower)
- 2자유도 조명장치(pan/tilt device)
- 고속 펄스발생기
- 제어용 컴퓨터
- 조명장치
- 표적 이송장치

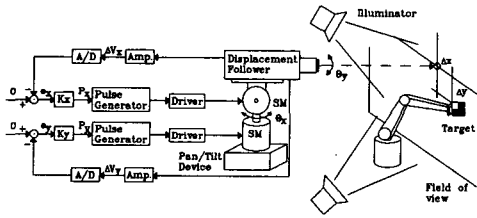


Fig. 1 Schematic diagram of auto-camera tracking system

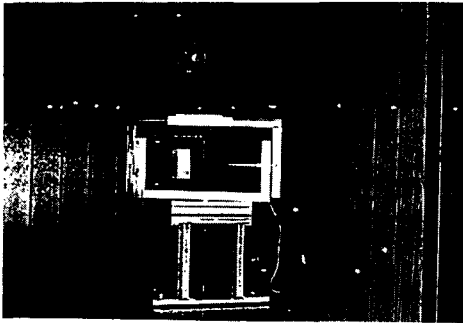


Fig. 2 Overview of pan/tilt device and optical head

Fig. 2에서 보는 바와 같이 목표물의 위치 변화량을 전압으로 출력시키는 변위추적장치(displacement follower)가 2개의 스텝핑모터/하모닉드라이브 시스템으로 구성된 팬/틸트기구 위에 장착되어 있고, 각 축의 스텝핑모터를 구동시키기 위한 고속의 펄스발생기와 모터드라이버로 구성되어 있다. 그 외에 위치오차 출력을 증폭시켜 주는 증폭기와 상용 A/D변환기가 제어용 컴퓨터에 연결되어 있으며, 또한 카메라가 감시할 대상물을 모사하기 위한 표적(target object)과 이를 이송시켜주는 구동장치로 이루어져 있다. 또한, 변위추적장치가 효과적으로 동작하기 위해서는 목표물의 조도가 일정 수준 이상이어야 하므로, 목표물을 밝게 비추어주는 조명장치를 설치하였다. Fig. 3은 변위추적장치에 사용된 광학센서의 내부 구조를 보여주며 이 센서의 작동원리는 다음과 같다.

장치의 렌즈를 통과한 빛의 상은 포토 캐소드에 의하여 광량에 비례하는 전자의 상으로 변환된다. 이와 같은 전자상은 수평/수직 방향의 가속 코일에 의하여 가속되어 미세구멍(aperture)이 있는 양극판에 전달되며 이중 일부분의 전자(빛의 상에서 명암의 경계점에서 발생된 전자)가 미세구멍을 통과하게 된다. 구멍을 통과한 전자의 양은 전자 계수

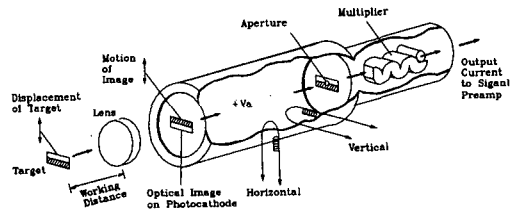


Fig. 3 Schematic diagram of optical head

회로에 의하여 측정되며 측정된 양이 미리(pre-lock 상태에서) 설정해 놓은 일정한 전자량(명암의 경계점에서 발생된 전자량)과 같아지게끔, 서보 제어회로가 동작된다.<sup>(3)</sup> 즉, 측정된 전자량과 미리 설정해 놓은 전자량의 차이에 비례하는 전압이 수평·수직 코일에 공급되어 항상 명암의 경계점에서 발생된 전자만이 양극판의 미세구멍을 통과하도록 제어부가 동작된다. 이 때, 수평·수직 코일에 가해지는 전압을 측정함으로써 목표물의 경계점이 시각영역의 중심으로부터 벗어난 위치를 측정할 수 있다.

변위추적장치의 동작원리는 다음과 같다. 변위추적장치는 렌즈를 통해서 작업대상물을 포함한 작업영역을 화상으로 잡고, 시각영역(field of view)의 중심에서 표적의 정해진 모서리까지의 수평, 수직 방향의 위치오차(x, y)에 비례한 전압이 증폭되어 실시간으로 출력되면, 이의 A/D변환 값이 제어기에 오차극환되어 2자유도의 팬/틸트기구의 각 스텝핑모터를 구동시킨다. 컴퓨터는 위치오차를 귀환받아 제어 알고리즘을 이용하여 펄스수를 계산하고 계산된 펄스수를 펄스 발생기로 전달하고, 이에 따라 발생된 펄스가 드라이버를 통해서 모터를 구동시킨다. 조향장치의 각 부분에 대한 자세한 설명은 참고문헌 (3)에 주어져 있다.

### 3. 비례제어방식의 재고찰

윤지섭<sup>(3)</sup>은 위치오차 측정계수를 보정작업을 통해서 실험적으로 구하여, 이로부터 비례제어 이득을 환산하고 비례제어기를 구성, 카메라 자동추적장치를 성공적으로 제어한 바 있다. 본 논문의 범위는 상기 연구개발의 취지를 이어서 추적제어기의 성능을 개선하는 데에 두었으므로, 본 연구결과를 심도 있게 설명하기 위하여 상기의 비례제어기의 구성 및 특성을 간략하게 설명하고자 한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 추적하고자 하는 목표물이 놓인 수직 평면상에서 수평선을  $x$ -축, 수직선을  $y$ -축으로 정의하고, 조향장치의 수평 회전각도를  $\theta_x$ , 기울임각도를  $\theta_y$ 라 정의한다. 이때, 조향장치에 장착된 렌즈가 목표 평면에 수직으로 위치했을 때 그 사이의 수직거리를  $l$ 이라 하면,  $x, y$ 방향의 선형변위  $\Delta x, \Delta y$ 와 수평 회전/기울임(pan/tilt) 각도와와의 관계를 선형화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\theta_x = \frac{\Delta x}{l}, \quad \theta_y = \frac{\Delta y}{l} \quad (1)$$

또한 변위추적장치와 증폭기(amplifier)을 거쳐서 출력되는 전압과 해당 변위의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \frac{V_x}{K_1}, \quad \Delta y = \frac{V_y}{K_2} \quad (2)$$

여기서,  $V_x, V_y$ 는 각각  $x, y$  변위에 비례하는  $-10 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$ 의 출력이다. 식(2)의 비례상수  $K_1$ 과  $K_2$ , 변위추적장치의 렌즈의 초점거리와  $l$ 로부터 기하학적인 방법으로 대략적으로 구해질 수 있으나 보다 정확한 값을 얻기 위해 윤지섭은 실험적인 방법으로 보정(calibration)하여 구하였다. 보정실험의 결과  $l=325 \text{ cm}$ 일 때  $K_1=0.514, K_2=0.521$ 로 구해졌으며, 이로부터 조향각도는

$$\theta_x = \frac{V_x}{K_1 l}, \quad \Delta y = \frac{V_y}{K_2 l} \quad (3)$$

로 계산된다. 또한, 조향장치를 구성하는 2개의 스테핑 모터의 정도가 25,000펄스/회전이므로 모터 구동펄스수로 환산된 제어입력은 아래와 같이 구해진다.

$$P_x = K_x \alpha_x V_x, \quad P_y = K_y \alpha_y V_y \quad (4)$$

여기서,  $K_x, K_y$ 는 각각  $x, y$ 방향의 비례제어 계인 이고,  $\alpha_x, \alpha_y$ 는 보정계수로부터 구해진 비례상수로서  $\alpha_x = 25000 / (2\pi K_1 l), \alpha_y = 25000 / (2\pi K_2 l)$ 로 정해진다.

윤지섭은 상기의 비례제어기를 구성하여, 목표물의 속도가 15 cm/sec 이하인 경우에 날카로운 비연속점이 있는 경로를 가진 목표물의 움직임을 잘 추적하는 특성을 얻었으며, 목표물의 속도가 그 이상으로 커질 경우에는 조명상태가 균일하지 않은 특성이 외란으로 작용하여, 추적제어 특성이 불안정해지는 현상이 발생하게 되었다. 이와 같은 추적 특성은 구동속도가 느린 원격로봇(telerobot)에 적

용하기에는 적합하나, 보다 빠른 반응속도가 요구되는 경우에는 부적합하다. 비례제어기의 이러한 불안정한 특성은 되먹임신호(feedback signal)로 단순히 위치오차만을 사용하였고, 제어규칙이 단순하여 센서정보에 섞인 외란을 감쇠시켜주는 기능이 없기 때문이다. 따라서 고속으로 움직이는 목표물을 추적할 때 외란의 영향에도 안정하게 작용하는 제어기의 개발이 요구된다. 조명상태의 불안정에서 기인되는 외란은 특성을 수학적인 방법으로 명확히 나타내기에는 어려우나, 반복된 실험구동을 통해서 그 정성적인 특성을 파악하는 것은 가능하다. 이러한 특성은 최근 복잡한 동적 시스템의 제어기로 성공적인 적용사례들이 발표되고 있는 퍼지제어기의 도입에 적합하다. 퍼지제어기는 발견적인(heurixtic) 방법으로 얻어진 제어규칙을 다수의 정성적인 언어문의 형태로 나타냄으로써 경험적인 기능을 제어기에 도입할 수 있게 하며, 구문 별로 정교한 제어를 가능하게 한다. 또한 제어규칙의 수정 및 보완이 용이하여 실험적으로 얻어진 정성적인 지식이 축적됨에 따라 제어기를 거듭 개선해 나갈 수 있는 장점도 있다. 퍼지제어기의 이러한 특성들은 외란의 영향이 큰 본 카메라 자동추적장치의 제어기를 구성하는데 적합하며, 이에 본 연구에서는 조명상태의 외란을 감쇠시키는 제어규칙과 언어적인 비례·미분제어 규칙으로 퍼지제어기를 구성하여 추적성능을 평가하였다.

#### 4. 퍼지제어기 구성

퍼지제어기는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 퍼지화도입부, 퍼지제어 규칙부, 데이터베이스, 추론부, 및 퍼지화부로 구성된다. 하지만 이들은 편의상 구

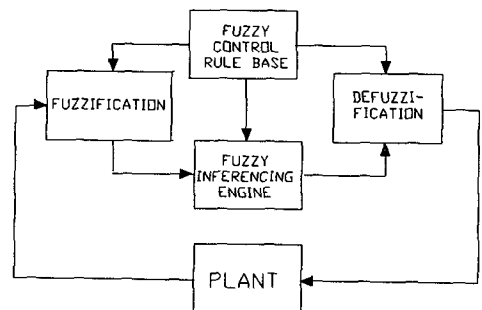


Fig. 4 Structure of fuzzy controller

분된 것이고, 실제로는 이와 같은 기능이 명확히 구분되지는 않고 상호 연관성을 가지며 일부 기능들을 공유한다. 본 제어기에서는  $x, y$  두 방향으로의 화상의 중심위치와 목표물의 중심부 위치간의 차이(위치오차) 및 그 변화량을 제어입력으로 사용하였으며, 제어출력으로는 조향장치의 구동을 담당하는 두개의 스텝모터의 구동펄스수를 사용하였다. 이와 같은 퍼지제어기는 개괄적으로 다음과 같은 방식으로 동작된다. 즉,

— 제어입력인 위치오차와 위치오차의 변위량을 해당되는 입력변수에 대응시켜 언어적인 ‘약간 크다,’ ‘크다,’ ‘매우 크다’ 등의 퍼지변수로 변환(퍼지화)한다.

— 복수의 제어규칙에 따라서 각각의 제어출력을 계산하고 이들을 합성하여 제어출력을 퍼지변수로 나타낸다. (추론)

— 퍼지변수로 나타난 출력값을 명확한(crisp) 출력값으로 바꾸어 준다. (비퍼지화)

이상과 같이 동작하는 퍼지제어기를 구성하기 위해서는 제어대상물의 특성 및 환경을 고려해서 퍼지제어기의 각 기능부를 적절히 설계하여야 하며 실제로 다음과 같은 설계가 수행되었다.

— 입력부와 출력부의 대역(range) 및 퍼지변수 설정

— 복수개의 제어규칙 설정

— 추론(inferencing) 방식 결정

— 퍼지화 및 비퍼지화 방식 결정

이와 같이 설계된 제어기의 성능을 전산모사(computer simulation) 및 실증시험을 통하여 평가하면서 제어변수 및 규칙들을 세부적으로 보완해 나가는 방식으로 수행하였다. 퍼지제어기의 각 부분에 대하여 설명하면 다음과 같다.

#### 4.1 퍼지화 도입부

퍼지화 도입부에서는 목표물과 카메라 사이의 위치오차(광학센서의 출력신호)의 명확한(crisp) 값을 퍼지연산에 적합한 퍼지값으로 변환시켜 준다. 광학센서의 출력신호를 A/D변환하면 명확한 값이 얻어지는데, 이를 입력변수의 대역에 맞추어 크기 변환(scaling)하고, 퍼지화(fuzzification)한다. 입력변수의 대역은 광학센서가  $-10 \text{ volts} \sim 10 \text{ volts}$  사이의 전압을 출력하므로, 편의상 퍼지입력부의 대역을  $-10 \sim +10$ 으로 설정하여 선형변환하였다. 제어입력기호의 퍼지화는 측정오차가 작다고 간주

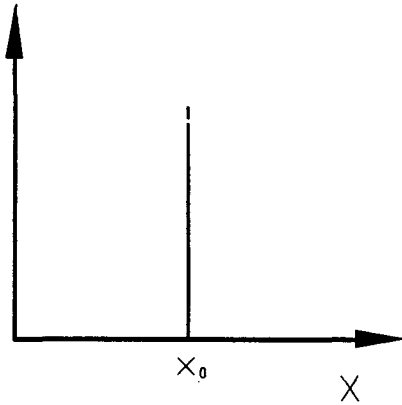


Fig. 5 Fuzzy singleton

하고, 퍼지단일값(fuzzy singleton)으로 변환하는 방식을 택했다. 즉, Fig. 5에서 보인 바와 같이  $x_0$ 라는 명확한 입력값이 주어졌을 때, 변환된 퍼지값은  $x_0$ 점에서의 소속함수 값( $\mu(x_0)$ )이 1이고, 나머지 영역에서는 모두 0값을 갖는 퍼지집합으로 정의된다. 이러한 퍼지단일값은 측정된 센서의 출력값이 명확한 값으로 바뀐 것으로 퍼지집합연산에 직접 사용될 수 있다.

#### 4.2 입출력 제어변수

위치오차와 오차 변화량을 나타내는 입력부 퍼지변수의 대역은 광학센서의 두 방향으로 출력신호( $-10 \text{ volt} \sim 10 \text{ volt}$ )를 선형변환하여  $-10 \sim +10$ 의 이산집합으로 동일하게 설정하였다. 즉,  $-10 \text{ volts} \sim 10 \text{ volts}$  사이의 연속값을 갖는 전체 집합이 ( $-10, -9.5, -8.5, -8.0, \dots, -0.5, 0, 0.5, \dots, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10$ )와 같이 41개의 요소 값을 갖는 이산적인 전체 집합으로 재정의되었다. 여기에 퍼지변수로 PB(positive big), PM(plsitive medium), PS(positive small), ZE(sero), NS(negative small), NN(negative medium), NB(negative big)의 7개의 퍼지변수를 선정하였다. 각 퍼지변수는 Fig. 6과와 같이 이등변삼각형 형태를 갖는데 이들의 분포형상을 변화시켜가며 목표물 추종 반복 실험을 수행하여 선정하였다. Fig. 6에서 퍼지변수 ZE가 넓은 대역에 분포하는데, 이는 외란이 없이 정상적으로 추종할 때 추종제어규칙의 기여도를 높여 추종성능을 향상시키기 위한 것이며, NM, NB, PM, PB의 대역을 넓힌 것은 센서신호가 외란의 영향을 많이 받는 경우 안정된 추종을

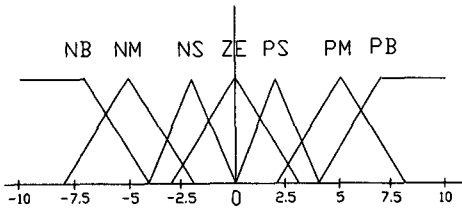


Fig. 6 Input fuzzy variables

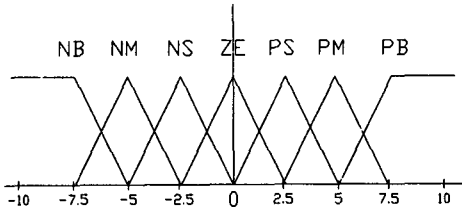


Fig. 7 Output fuzzy variables

이루기 위한 것이다. 한편, 추종실험에서 NS, PS 대역의 신호는 많이 발생하지 않는 것으로 확인되어 이들의 분포대역을 줄여 해당제어규칙의 기여도를 축소하였다. 실제로 이산화된 입력부 대역에서 정의된 퍼지변수들은 이산 집합의 형태를 가진다. 예를 들어 퍼지변수 NS는 다음과 같은 이산적인 퍼지집합으로 정의된다.

$$NS = \{(\text{대역값}, \text{적합도}) (-3.5, 0.25), (-3, 0.5), (-2.5, 0.75), (-2, 1.0), (-1.5, 0.75), (-1, 0.5), (-0.5, 0.25)\}$$

출력부 퍼지변수도 Fig. 7에서 보는바와 같이 이 등변삼각형 형태로 설정하였으며, 출력부의 대역은 조향장치 구동용모터의 구동정밀도가 1회전당 25,000 펄스임을 고려하고, 조명상태의 외란에 따른 조향각도의 변화정도의 최대치를 실험적으로 구하여, -30~30의 동작구간을 -10~10의 대역에서 41개 구간으로 이산화하여 설정하였다.

### 4.3 제어규칙

조향장치를 상하와 좌우로 구동하는 스텝모터들은 동일한 감속비의 감속기를 포함하며, 동작특성도 같다. 따라서, 본 연구에서는 두 방향의 구동에 있어서 동일한 제어규칙을 도입하였다.

퍼지규칙은 “if(특정조건이 만족된다면) then(특정결과들이 유추될 것이다)”와 같이 언어적 형태로 나타내어진다. 또한 복수 개의 단위 제어규칙들이

모여서 제어규칙 집합을 이루고, 각각의 규칙들은 서로 연관성을 가진다. 본 연구에서 도입된 단위 제어규칙의 일반적인 형태는

$$R_i : \text{If } (e \text{ is } A_i \text{ and } ce \text{ is } B_i) \text{ then } (p \text{ is } C_i) \quad (5)$$

와 같이 정리된다. 여기서,  $e$ 와  $ce$ 는 각각 입력신호인 위치오차와 위치오차 변화량을 나타내며  $A_i$ 와  $B_i$ 는  $i$ 번째 제어규칙에 있어서 입력부 대역의 전체집합( $U \times V$ )에서 정의된  $e$ 와  $ce$ 의 퍼지값을 나타내는 퍼지변수이다. 또한  $p$ 는 제어기에서 계산된 출력으로서 모터의 구동입력펄스를 지칭하며,  $C_i$ 는  $i$ 번째 제어규칙에 있어서 출력부 대역의 전체집합  $W$ 에서 정의된  $p$ 의 퍼지값을 나타내는 퍼지변수이다. 이와 같은 개별적인 제어규칙  $R_i$ 는 다음과 같은 퍼지관계(fuzzy relation)로 나타내어진다.

$$\mu_{R_i} = [\mu_{A_i}(U) \text{ and } \mu_{B_i}(V) \rightarrow \mu_{C_i}(W)] \quad (6)$$

여기서  $\mu$ 는 아래첨자로 표기된 퍼지변수의 소속함수를 나타내는 기호이며, “ $\rightarrow$ ”는 유추 관계(implication)를 나타내는 기호이다. 이와 같은 복수  $n$ 개의 제어규칙들로 구성된 전체 제어규칙은 아래와 복합적인 관계로 표현된다.

$$R = \text{also } (R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_n) \quad (7)$$

여기서 “also”는 개별적인 제어규칙간의 연관성을 표현하기 위하여 편의상 도입한 연결관계이며, 이의 해석은 다음 추론부에서 주어진다.

위와 같은 구조를 갖는 퍼지제어규칙을 설정하기 위하여, 본 연구에서는 광학센서의 출력특성, 스텝모터의 구동특성 및 목차별 주변의 조명환경등을 고려하였으며, 이를 토대로 하여 경험적으로 제어규칙을 정하고 실험을 통해서 세부 내용을 보완하였다. 그 결과 얻어진 제어규칙들은 아래와 같이 언어적 형태로 표현되었다.

$$\text{if } e = \text{PS and } ce = \text{ZR then } p = \text{PS}$$

$$\text{if } e = \text{NB and } ce = \text{NM then } p = \text{NB}$$

$$\text{if } e = \text{PB and } ce = \text{PB then } p = \text{ZE}$$

예를 들어 여기서 세 번째 규칙은 ‘오차와 오차 변화량이 지나치게 크면 제어출력을 현재상태로 유지하라’는 의미이고, 이러한 규칙을 추가함으로써 심한 외란의 영향을 줄이도록 고안된 것이다.  $e$ 와  $ce$ 가 각각 7개의 퍼지값을 가지므로 제어규칙은 최대 49개가 있을 수 있으며, 이들은 Fig. 8에 나

error (e)

		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB			
change in error (ce)	PB				ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PM				ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PS			NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	
	ZE			NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
	NS			NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	
	NM			NB	NM	NM	NS	NS	ZE	ZE	
	NB			NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	

Fig. 8 Table of fuzzy control rules

타난 바와 같다. 여기서, 표 내부의 값들은 양변에 표기된 입력변수들의 퍼지값에 대응하는 출력변수의 퍼지값들을 나타낸다. 표에서 보인 바와 같이 제어규칙은 오차와 오차변화량에 비례하여 제어출력값이 커지도록 하는 일반적인 비례미분 제어기의 특성을 구현하도록 선정하였다. 여기에, Fig. 8에서 점선으로 싸여진 부분들을 추가하여 고속에서 안정된 제어특성을 타내도록 하였는데, 이들은 실험적으로 얻어진 제어규칙들로서 오차 및 오차 변화량이 지나치게 큰 경우에 제어출력이 커지지 않도록 하는 역할을 한다. 또한 본 제어기의 제어 출력은 실제 모터위치 지령치의 변화량으로 입력되는 이른바 속도형 구조를 가진다. 이 경우 출력값이 ZE인 경우 모터의 위치지령으로 ZE가 입력되기 보다는 위치지령의 변화량이 ZE가 되어 결국 이전의 위치지령을 유지하게 된다.

4.4 퍼지추론

퍼지추론은 제어규칙들이 주어지면 퍼지화된 입력값으로부터 논리학의 일반화된 연역추론방식(generalized modus ponens)을 이용하여 퍼지화된 제어 출력값을 구하는 방법이다. 본 논문에서는 입력부의 적합도를 계산하는 데 sup-min방식을 적용하였으며, 출력부 변수결정에는 제어기의 입력값에 대한 민감도를 높이기 위하여 product규칙을 적용하

였다.

연역추론방식을 퍼지정보의 처리가 가능하도록 확장한 일반 연역추론방식 과정을 정리하면 다음과 같다.

퍼지입력값  $x$  is  $A'$  and  $y$  is  $B'$ 이 주어지고 제어 규칙이 if ( $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$ ) then ( $z$  is  $C$ )라고 주어졌을 때 추론결과  $z$  is  $C'$ 이 유추될 것이다.

여기서,  $A, B$ 는 입력부 대역의 전체집합( $U, V$ )에서 정의된 입력부 퍼지변수이고,  $C$ 는 출력부 대역의 전체집합  $V$ 에서 정의된 출력부 퍼지변수이다. 또한  $A', B'$ 은 퍼지 입력값이고,  $C'$ 은 추론 결과 얻어진 퍼지 출력값이다. 본 제어기에서  $x$ 는 위치오차( $e$ ),  $y$ 는 위치 오차 변화량( $ce$ ),  $z$ 는 제어출력( $p$ )에 해당한다.

위의 추론과정을 연산하기 위하여 문장접속사 "and"는 논리곱, "also"는 논리합 연산자로 대치하여 연산식으로 나타내면,<sup>(11)</sup>

$$C' = (A' \times B') \cdot R \tag{8}$$

여기서,  $\times$ 는 논리곱을 나타내는 연산자이고,  $\cdot$ 은 추론을 나타내는 논리합성 연산자이다. 또한  $R$ 은 제어규칙으로서 식(7)에 정의된 바와 같다. 퍼지이론에서 정의된 논리곱과 논리합 연산자는 여러 가지로 정의될 수 있으나, 본 연구에서는 논리곱과 논리합 연산자로 각각 최소값 연산(minimum operation,  $\wedge$ )과 최대값 연산(maxoperation,  $\vee$ )을 사용하였다. 또한 추론연산으로는 sub-min방식<sup>(10)</sup>에 비하여 제어기의 민감도가 높은 sub-product방식<sup>(11)</sup>을 채택하였다. 이상과 같이 정리하고 위의 추론과정을 정리하면,

$$\begin{aligned} C' &= \mu_{A \times B}(A', B') \cdot R \\ &= \mu_A(A') \wedge \mu_B(B') \cdot C(w) \\ &= \alpha \cdot C(w) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,  $\mu_A(A')$ 와  $\mu_B(B')$ 은 퍼지입력값  $A', B'$ 의 각 규칙의 퍼지변수  $A, B$ 에 소속된 정도를 나타내는 소속함수 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mu_A(A') &= \max[\min(\mu_A(u), \mu_{A'}(u))] \\ \mu_B(B') &= \max[\min(\mu_B(v), \mu_{B'}(v))] \end{aligned} \tag{10}$$

또한,  $\alpha$ 는 각 제어규칙이 출력값에 기여하는 정도를 나타내는 계수로서

$$\alpha = \mu_A(A') \wedge \mu_B(B') \tag{11}$$

로 정의된다.

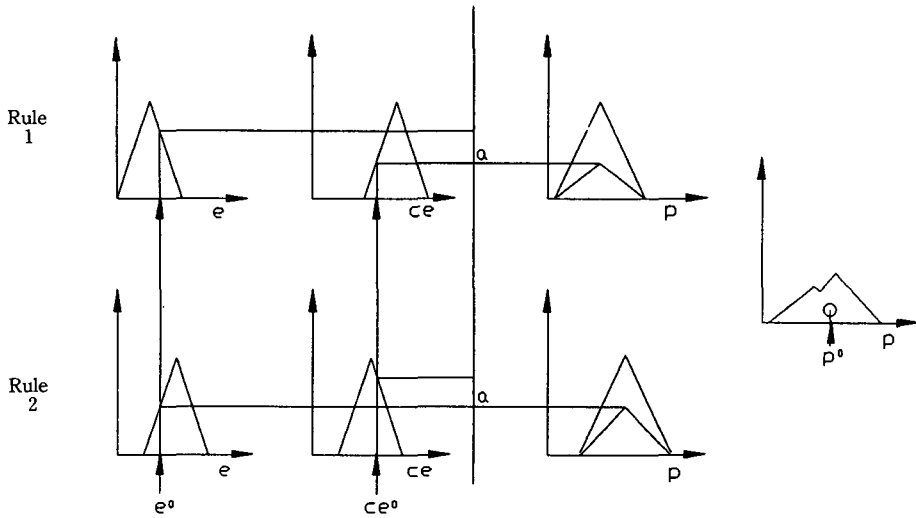


Fig. 9 Fuzzy inferencing

식(7)에서 나타난 바와 같이 퍼지제어규칙은 여러 개의 단일 제어규칙들이 모여서 구성되고, 이들은 “also”라는 논리합 관계로 연관된다. 따라서 전체 제어규칙은 각 제어규칙의 합집합으로 나타내어 진다

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup \dots \cup R_n \tag{12}$$

따라서, 전체 제어규칙을 도입한 추론결과는 식(9)와 같이 계산된 단일 제어규칙의 추론결과들을 논리합으로 합성한 것이 된다. 즉,

$$C' = C'_1 \vee C'_2 \vee C'_3 \vee \dots \vee C'_n \tag{13}$$

이상과 같은 추론과정을 Fig. 9에 도시하였다.

#### 4.5 비퍼지화

퍼지추론의 결과는 출력부 대역의 전체집합에서 정의되는 퍼지집합으로 나타난다. 즉, 제어 출력값이 “조작량을 조금 줄이시오”라는 것과 같이 애매한 퍼지값으로 출력되고, 인간의 경우에는 이러한 지령을 이해하고 어떤 수치로 변환하여 정량적인 조작량을 결정할 것이다. 이와 같이 애매한 출력값을 명확한 제어 출력값으로 변환시켜 주는 비퍼지화(defuzzification) 작업이 수행되어야 한다.

비퍼지화방법에는 최대값을 취하는 방법, 최대평균법, 및 무게중심법 등 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 무게중심법을 채택하였다. 이 방법은 비교적 연속적인 제어

특성을 구현하게 하며, 개략적으로 PI제어기와 비슷한 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.<sup>(12)</sup> 이 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심(center of gravity)을 구하여, 이에 대응하는 출력부 대역의 명확한 값을 제어기 출력으로 사용하는 방법이다. 이 과정을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$p_0 = \frac{\sum_{j=1}^m \mu(p_j) \cdot p_j}{\sum_{j=1}^m \mu(p_j)} \tag{14}$$

여기서,  $m$ 은 출력부 제어변수 전체집합의 이산화 준위(quantization level)의 갯수이고,  $p_0$ 는 비퍼지화 결과 얻어진 명확한 제어출력값을 나타낸다.

#### 5. 퍼지제어기의 성능실험 및 결과 분석

개발된 퍼지제어기의 성능을 평가하기 위하여 정방향 제적 위를 이동하는 목표물의 이동속도를 변화시키며 추적성능을 관찰하였다. 목표물은 변위추적장치가 밝은 면과 어두운 면의 경계가 뚜렷한 목표물의 경계점의 움직임을 감지하는 것을 고려하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 한 변의 길이가 10 cm 인 정사각형 백지에 1, 3, 및 4분면에 검은 칩을 하여 제작하였다. 이 경우 변위추적장치는 목표물의 중심점을 추적한다. 목표물의 이동체적은 한 변의 길이가 20 cm인 정사각형을 형성하도록 하여 목표물이 정사각형의 좌측 하단 모서리에서 출발하



여 좌측 하단, 우측 상단, 및 상측 상단을 지나 다시 출발점으로 복귀하도록 하였다. 퍼지제어기의 구현을 위한 샘플링시간은 200 msec로 정하였다. 또한 퍼지제어기의 추적특성을 비례제어기를 사용할 때의 추적특성과 비교하기 위하여 같은 실험 조건에서 비례제어기를 적용한 실험을 수행하였다. 비례제어기 및 퍼지제어기의 추적성능 실험결과는 각각 Fig. 10과 Fig. 11에서 보는 바와 같다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 비례제어기의 경우, 목표물의 이동속도가 작을 경우(5 cm/sec) 정방형 궤적의 변은 물론 모서리 부분에서도 추적성능이 우수함을 알 수 있다. 그러나, 우측 상단부위에서 추적궤적의 처짐이 발생하며 이와 같은 현상은 목표물의 이동속도가 커짐에 따라(15 cm/sec) 점차적으로 추적장치에 진동이 발생하여 제어계가 불안정해진다. 이는 변위추적장치의 렌즈의 곡률이 일정하지 않고 목표물 주변의 조명상태가 균일하지 않음에 따라 발생한 현상으로 해석되었다.<sup>(3,17)</sup> 즉, 위의 진동현상의 원인을 규명하기 위하여 조명장치의 조사방향을 조금씩 바꾸어 가며 반복실험을 수

행한 결과, 비선형 특성이 나타나는 목표물의 위치가 조사방향에 따라 조금씩 변화됨을 알 수 있었으며 이 위치는 조명장치의 조사방향에 큰 관계없이 대부분 시각영역의 제1사 분면( $x > 0, y > 0$ )에 존재하였다.<sup>(3)</sup> 따라서, 목표물의 이동속도가 빠른 경우에는 정방형 궤적의 우측 상단모서리에서 진동이 발생하기 시작하여 제어계가 불안정해지며 이로 인하여 추적장치가 우측변을 추적할 때의 추적궤적이 발산하는 현상이 나타난다. 따라서, 이와 같은 현상때문에 기존의 비례제어기로는 이동속도가 빠른 목표물을 추적하는 것이 불가능하였다.

이와 같이 문제점을 해결하기 위하여 적용된 퍼지제어기의 추적특성을 살펴보면 Fig. 11에서 보는 바와 같이 전체적으로 비례제어기의 경우에 비하여 추적궤적에 다소 진동이 있는 양상을 나타낸다. 이는 퍼지제어기가 계산량을 많이 요구함에 따라 제어빈도(샘플링 시간 200 msec)를 비례제어기(샘플링 시간 50 msec)에 비하여 상당히 감소시켰기 때문이다. 즉, 속도가 작을 경우(5 cm/sec)에도 모서리 부분에서 추적궤적의 처짐이 나타나며 속도가

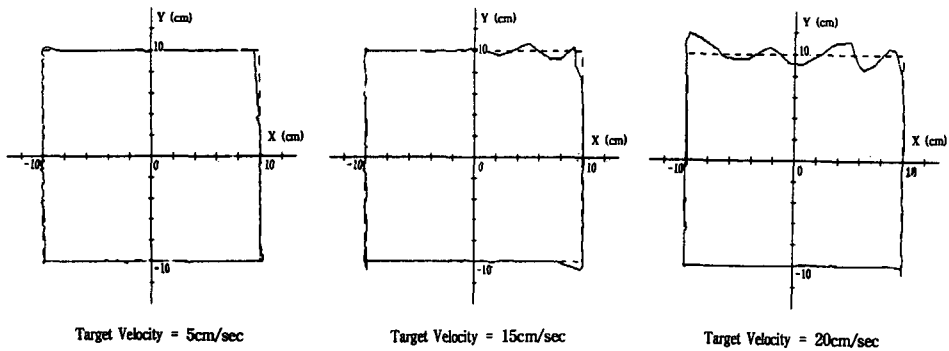


Fig. 10 Tracking contour of proportional controller

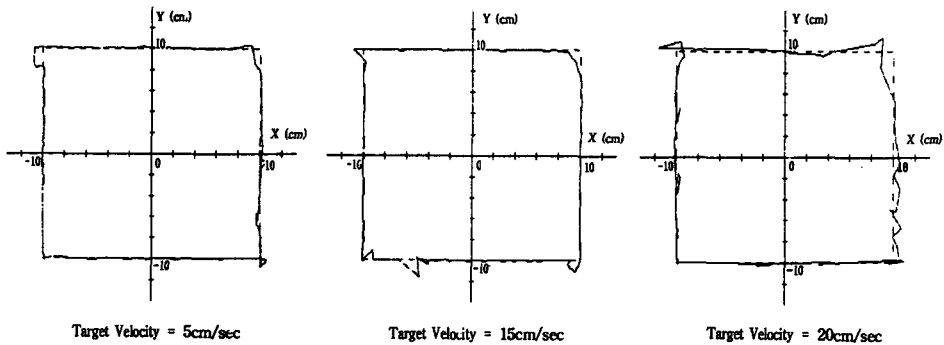


Fig. 11 Tracking contour of fuzzy controller

증가(15 cm/sec)됨에 따라 이 현상은 정방향 궤적의 변을 추적할 때도 발생한다. 특히, 속도가 20 cm/sec의 경우에는 비례제어기에서는 발생하지 않았던 진동이 정방향 궤적의 우측 변에도 발생한다. 이와 같은 문제점은 향후 계산속도가 보다 빠른 전산기를 사용하여 고속 전산처리를 수행함으로써 해결될 수 있을 것이다. 이와 같은 제약에도 불구하고 퍼지제어기의 특이할만한 장점은 비례제어기로 제어한 경우 외란의 영향을 많이 받아 추적에 실패하는 경우가 많은 반면, 퍼지제어기의 경우 추적 실패율이 작아서 안정된 특성을 가진 제어기가 구성되었음을 알 수 있었다. 목표물의 이동속도가 큰 경우 비례제어기의 경우에는 궤적의 상단, 즉 외란이 큰 이동구간 동안 계속적인 진동이 발생하였으며 쉽게 발산하게 된다. 반면 퍼지제어기로 제어한 경우에는 이 부분의 연속적인 진동이 쉽게 줄어들음을 알 수 있다. 이러한 특성은 원격조작 로봇 응용 작업시 매우 중요한 개선점으로 부각된다. 퍼지제어기는 제어규칙이 언어적 형태로 되어 있고, 규칙의 변경 및 추가가 쉬워서 실제로 사용하면서 얻은 경험을 제어규칙에 쉽게 반영할 수 있으므로 향후 추적장치의 특성향상이 계속적으로 이루어질 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 원격로봇 및 자율지능형 로봇을 이용하여 인간이 접근할 수 없는 극한환경에서의 작업을 수행할 경우 작업환경의 인식을 위해서 필수적으로 도입되는 카메라의 추적작업을 자동으로 안정하게 수행할 수 있는 퍼지제어기를 개발하였다. 개발된 카메라 자동추적장치는 임의의 움직임은 표적을 카메라가 항상 주시할 수 있도록 조향장치를 구동시켜 주며, 이때 표적의 2차원 위치를 구하기 위해서 별도의 전기광학식 변위추적장치를 사용함으로써, 화상처리에 소요되는 시간을 줄여 실시간 추적제어가 가능하게 하였다. 특히 목표물에 비추어지는 조명상태가 균일하지 않을 경우 고속으로 움직이는 목표물의 추적특성이 불안정해지는 기존 비례제어기의 단점을 보완하기 위해서 퍼지제어기법을 사용하여 외란에 안정된 제어성능을 얻었다. 퍼지제어규칙은 반복실험을 통해서 추적시스템의 응답특성을 관찰하고, 경험적으로 제어규칙을 계속 수정해 나가는 방식으로 개발되었다. 개발된

퍼지제어기의 성능을 조사하기 위하여 목표물의 이동속도를 변화시키면서 조향장치가 목표물의 움직임을 추적하는 실험을 수행하고 추적성능을 기존의 비례제어기와 비교하였다. 이와 같은 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 제어기가 지나치게 큰 외란의 영향에 둔감하도록 퍼지제어규칙을 보정함으로써, 균일하지 않은 조명상태에서 15 cm/sec 이상 고속으로 이동하는 목표물을 추적할 때에, 기존의 비례제어기는 불안정한 특성을 나타냄에 비하여 퍼지제어기를 도입한 경우 안정된 추적특성을 얻을 수 있었다.

(2) 의도적으로 균일한 조명상태를 부가하고, 목표물을 저속으로 움직일 경우 비례제어기가 퍼지제어기에 비하여 부드러운 제어특성을 나타내었는데, 이는 외란에 대한 민감도를 줄이기 위해 도입한 퍼지제어규칙이 외란이 전혀 존재하지 않는 이상적인 실험환경에서는 제어응답특성을 일부 저하시키는 영향을 주고, 또한 퍼지제어기가 계산시간을 많이 필요로 하기 때문에 샘플링시간을 크게 설정하여 제어기를 구성하였기 때문이다.

(3) 퍼지제어기는 반복된 실험을 통해 얻은 경험을 제어규칙에 계속 추가할 수 있게 하기 때문에 제어기의 개발에 유리하다.

이상과 같은 실험결과를 볼 때 카메라 자동추적장치의 퍼지제어기는 외란의 영향이 변위추적장치의 특성에 크게 작용하는 실제 상황에 적합한 제어기로 간주되며, 향후 처리속도가 빠른 제어용 컴퓨터를 도입하면 저속에서도 추적성능이 뛰어난 제어기를 구성할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- (1) Vertut, J. et al, 1983, "Coordination of Camera/Telem manipulator by Microprocessor," *Proc. 6th World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms*, New Delhi, pp. 1071.
- (2) Stoughton, R. S., 1984, "Automatic Camera Tracking for the Remote Manipulator," *Proc. Remote Systems and Robotics in Hostile Environments*, pp. 383~389.
- (3) 윤지섭, 1993, "원격 로봇용 카메라 자동추적시스템 개발에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제9호, pp. 2373~2380.
- (4) Yagishita, O., 1985, "Application of Fuzzy

- Reasoning to the Water Purification Process," *Industrial Application of Fuzzy Control*, M. Sugeno(ed.), Elsevier Publisher B.V.(North-Holland), pp. 19~39.
- (5) Holmblad, L. P. and Ostergaard, J-J., 1981, "Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic Techniques," *Proc. of 18th IFSC Triennial World Congress*, Japan, pp. 809~814.
- (6) Yasunobu, S. and Miyamoto, S., 1985, "Automatic Train Operation by Predictive Fuzzy Control," *Industrial Application of Fuzzy Control*, Sugeno, M.(ed.), Elsevier Science Publisher B.V. (North-Holland), pp. 1~18.
- (7) Yasunobu, S. and Hasegawa, T., 1987, "Predictive Fuzzy Control and its Application for Automatic Container Crane Operation System," *Proc 2nd IFSA Congress*, Tokyo, Japan, pp. 349~352.
- (8) Sakai, Y. and Ohkusa, K., 1985, "A Fuzzy Controller in Turnning Process Automation," *Industrial Application of Fuzzy Control*, Sugeno, M.(ed.), Elsevier Science Publisher B.V.(North-Holland), pp. 105~151.
- (9) Murakami, S. and Maeda, M., 1985, "Automobile Speed Control System Using a Fuzzy Logic Controller," *Industrial Application of Fuzzy Control*, Sugeno, M.(ed.), Elsevier Science Publisher B.V.(North-Holland), pp. 105~124.
- (10) Mamdani, E. H., 1974, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," *IEEE Proc. Control & Science*, Vol. 121, No. 12, pp. 1585~1588.
- (11) 이광형, 오길록, 1991, "퍼지이론 및 응용 : II 권 응용," 홍릉과학출판사, 서울, pp. 5-1~6-68.
- (12) Kickert, W. and Mamdani, E. H., 1978, "Analysis of Fuzzy Logic Controller," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 29~44.
- (13) 이재설 외, 1988, "사용후 핵연료 원격취급장치 개발," 한국원자력연구소 보고서 (KAERI/RR-778/88), pp. 46~62.
- (14) 이재설 외, 1990, "사용후 핵연료 저장공정장치 개발," 한국원자력연구소 보고서 (KAERI II / RR-6/90), pp. 46~62.
- (15) 박영수, 윤지섭, 1990, "원격조작 로봇트를 이용한 카메라 추적시스템 개발", '90 한국자동제어술회의논문집, Vol. 1, pp. 825~830.
- (16) Li. Y. F. and Lau, C. C., 1989, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 9, No. 3, pp. 65~72.
- (17) *Instruction Manual*: 5600, Electro-Optical Biaxial Displacement Follower.