

## 적응퍼지제어기를 이용한 스테빌라이저 시스템의 자세제어에 관한 연구

김태훈<sup>1)</sup>, 이병결<sup>1)</sup>, 김종화<sup>2)</sup>, 진강규<sup>2)</sup>, 류길수<sup>2)</sup>

# A Study on the Motion Control of a Stabilizer System Using an Adaptive Fuzzy Controller

T. H. Kim , B. K. Lee , J. H. Kim , G. G. Jin , and K. S. Rhyu

### Abstract

The stabilizer system compensates the tracking system for the vertical, horizontal and directional deviations between the tracking system and reference frame. This stabilizer system can be applied to a satellite antenna on ships, a sun tracking system on moving vehicles, and a camera servo control loop to take a stable image against the vibration.

In this paper, a stabilizer system using an active stabilization method is composed. An adaptive fuzzy controller is also suggested, which is applicable to systems with structural and parameter uncertainty. It is the 2nd/1st-type adaptive fuzzy control algorithm using advantages of 1st-type and 2nd-type adaptive fuzzy algorithm. Several simulations are executed for verifying the performance of the suggested method. Through experiments using a composed stabilizer system, tracking performances are evaluated.

## 1. 서 론

일반적으로 이동 목표물을 추적하기 위해서는 추적 대상에 대한 위치 정보를 획득하고, 획득된 정보를 통해서 추적 시스템의 방위각과 고도각을 조정하여 추적 목표물에 대한 지향각을 얻을 수 있다. 그러나, 항해 중인 선박이나 이동 중인 차량에서 이동 목표물을 추적하는 데는 추적 대상에 대한 정보뿐만 아니라, 추적 시스템이 가지는 운동 성분에 대한 정보도 같이 필요하게 된다. 여기서 운동성분은 공간 적교 좌표상의 각 축방향으로 발생하는 서어지(Surge), 스웨이(Sway), 히이브(Heave)의 선형 운동성분과 각 축을 중심으로 생기는 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw)의 회전 운동성분으로 나누어지는 6자유도 운동이다.<sup>[1]-[3]</sup> 이와 같은 운동성분들은 추적 시스템이 목표물을 추적하는데 수직 오차와 수평 오차, 그리고 방향 오차를 발생시킨다.

따라서 이동 목표물에 대한 정확한 지향각을 얻기 위해서는 각 운동성분에 대한 보상이 필요하며,

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 기계·정보공학부

이러한 역할을 해 주는 것이 스테빌라이저 시스템(Stabilizer system)이다.

이에 본 논문에서는 센서와 모터로 구성된 시스템의 자세를 직접 보상하는 능동적 안정화 방식(Active Stabilization method)을 사용하여 스테빌라이저 시스템을 설계하고 실제로 구현한다.

자세 안정화 장치는 X, Y 2축 구조로서, 각의 축에 회전운동 감지센서와 액츄에이터를 장착하여 각 축 단위로 분해하여 검출하고 독립적으로 제어할 수 있도록 설계한다. 회전 운동성분의 검출은 압전 자이로 센서(Piezo-Electric Gyro Sensor)<sup>[4]</sup>를 사용하고, 회전 운동성분을 보상해 줄 수 있는 액츄에이터는 DC 모터를 사용한다.

제어기는 플랜트의 구조나 파라미터들이 불확실한 상황에서 시스템의 연속적인 성능을 유지시킬 수 있는 적응퍼지제어기(Adaptive fuzzy controller)를 사용한다.<sup>[5]-[7]</sup> 그리고 간단한 적응 규칙(Adaptive Law)을 적용하는 1형(First-type) 적응퍼지 알고리즘과 작은 수의 퍼지 규칙을 가지는 2형(Second-type) 적응퍼지 알고리즘의 두 장점을 고려한 2/1형(Second/first-type) 적응퍼지 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 성능을 검토한다.

## 2. 스테빌라이저 시스템 구현

본 연구에서 구현한 스테빌라이저 시스템은 그림 1과 같이 X, Y 2축 구조로서, 각 축에 회전운동 감지센서를 부착하여 시스템에 발생하는 회전운동 성분을 축 단위로 분해하여 검출할 수 있도록 하고, 두 축에 발생하는 운동성분을 보상해 줄 수 있는 액츄에이터를 각 축에 장착하여 X, Y 2축을 독립적으로 제어할 수 있도록 설계하였다. 즉, X축을 중심으로 발생하는 롤 회전성분과 Y축을 중심으로 발생하는 피치 회전성분을 각각 독립적으로 감지하고 보상함으로써 시스템 자세제어를 용이하게 하였다.

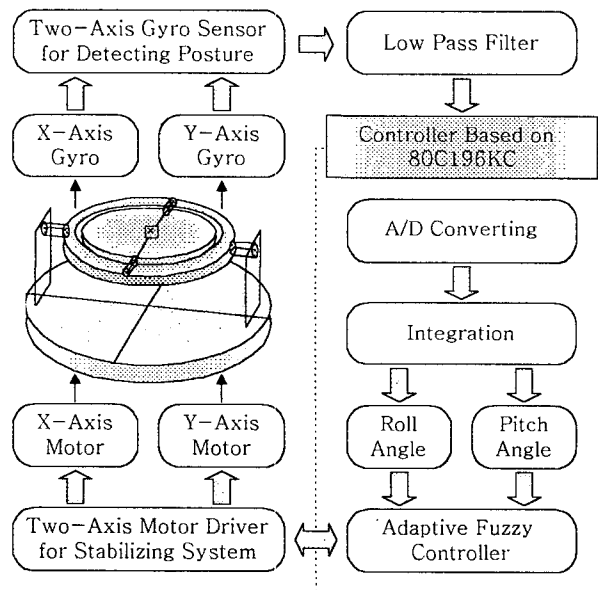


그림 1. 스테빌라이저 시스템의 구성도

Figure 1. Block diagram of a suggested stabilizer system

그림 1에서 구현한 스테빌라이저 시스템은 다음과 같이 크게 3부분으로 구성되어 있다. 먼저, 회전운동 감지센서로서 시스템의 자세정보를 획득하는 자세 검출부, 획득한 회전 운동성분에 대한 정보를 가지고 액츄에이터를 구동하여 시스템의 자세를 보상하여 안정화시키는 자세 안정화부, 그리고 회전운동 감지센서로 획득한 데이터를 처리하고 액츄에이터를 구동시키기 위한 제어 입력을 생성하며 사용자가 데이터 정보를 확인할 수 있도록 데이터를 디스플레이하는 데이터 제어부로 되어 있다.

자세 검출부에서 사용되는 회전운동 감지센서로는 일본 Murata사 제품의 자이로 센서를 사용하였다. 2축 자이로 센서를 X축과 Y축 중심에 장착하여 각 축을 중심으로 발생하는 롤과 피치의 회전 운동성분을 검출할 수 있게 하였다.

자세 안정화부는 자세 검출부에서 검출한 시스템의 롤과 피치의 회전 운동성분을 이용하여 각 축의 액츄에이터를 구동할 수 있는 롤 김블과 피치 김블의 구조로 되어 있다. 액츄에이터는 X, Y 2축을 독립적으로 구동할 수 있도록 2개의 DC 모터를 사용하였다. 그리고 2개의 포텐쇼미터를 사용하여 모터의 각 변위를 검출하여 제어 루프를 구성하였다.

데이터 제어부는 다음과 같은 3가지 역할을 한다. 첫째, 자이로 센서 출력값을 처리하는데 먼저, 고주파 노이즈를 제거하기 위한 필터링을 하고 아날로그 전압값을 디지털 값으로 변환한다. 그리고 출력되는 각속도 값을 각도 값으로 변환하기 위하여 적분을 한다. 둘째는 시스템 자세정보를 통해서 적응 피지제어기로 만들어낸 제어 입력을 PWM 방식으로 DC 모터에 인가하여 구동시키고 제어 루프를 구성하기 위해서 포텐쇼미터로부터 궤환신호를 받는다. 마지막으로 시스템의 롤과 피치값, 모터의 출력값, 제어 입력값 등과 같은 데이터 정보를 디스플레이하기 위해서 LCD 패널을 인터페이스시킨다.

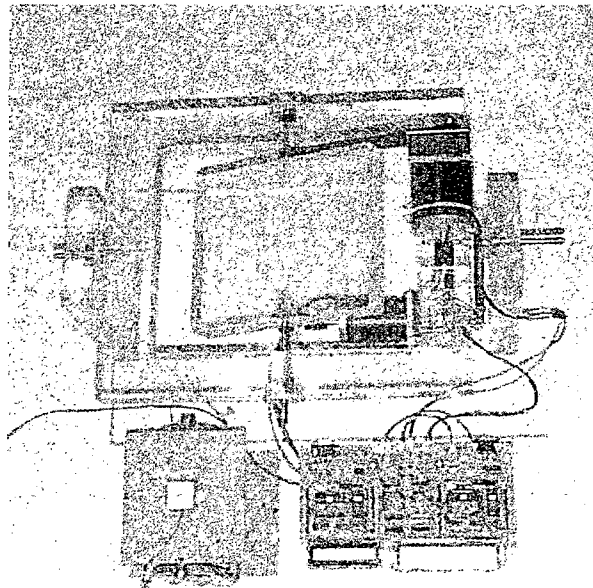


사진 1. 스테빌라이저 시스템의 실물사진

Photo 1. Photograph of the suggested stabilizer system

## 2.1 자세 검출부

스테빌라이저 시스템의 자세 검출부는 시스템의 회전 운동성분을 검출하기 위해서 자이로 센서를 사용하고 있다. 자이로는 이동체의 운동 특히 각 바퀴 둘레의 회전 운동을 직접 검출하는 기계식 자이로와 최근 실용화되기 시작한 광속도 센서인 광 파이버 자이로, 그리고 코리올리의 효과를 이용하여 선회 속도를 감지하는 압전 자이로 등이 있다.

본 연구에서는 온도상승에 따른 드리프트 오차를 가지는 특성이 있지만 가격이 저렴하고 부피가 작은 압전 자이로인 일본 Murata사의 ENV-05DB Gyrostar를 사용하였다. 이 자이로 센서는 각속도  $\pm 80[\text{deg}/\text{sec}]$  범위내 구간에서 선형적인 자이로 출력전압을 얻을 수 있으며, 영점 출력값이 2.5[V]이다.

자이로 센서 출력단에 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 저역통과 필터를 설계하고 출력 아날로그 전압 값을 디지털 값으로 변환해주는 A/D변환 과정을 거친다. 그리고 자이로 출력값이 각속도 값으로 검출되므로 각 변위값을 얻기 위해서는 적분계산을 해야 한다.

스테빌라이저 시스템에서 자이로 센서는 축 단위로 장착되어 X, Y 두 축을 중심으로 발생하는 롤과 피치의 회전 운동성분을 각각 분해하여 검출한다.

## 2.2 자세 안정화부

스테빌라이저 시스템의 자세 안정화 부분은 자세 검출부의 자이로 센서로부터 획득한 시스템의 자세 정보를 가지고 두 축의 모터를 구동하여 시스템의 자세를 안정화시킨다. 롤과 피치에 의해 기울어진 시스템의 자세를 X축과 Y축으로 각각 분해해서 이를 독립적으로 보상하는 구조를 가진다. 구동 모터는 소형이면서도 구동토크가 크며, 소비전력이 적은 감속기어가 내장된 DC 모터를 각 축에 사용하였고 타이밍 벨트로 연결하여 구동되도록 하였다. 모터 구동방식으로는 전력 제어 기법중의 하나인 PWM 방식을 사용하여 정밀제어를 가능하게 하였으며 전원의 부하를 줄였다. 그리고 모터 제어기는 적응퍼지제어기를 설계하여 구현함으로써 부하변동이나 외란의 요인에도 강인하도록 하였다. 그리고 각각의 구동축에 포텐쇼미터를 장착하고 그 출력값을 A/D변환하여 각각의 모터 각 위치를 검출하고 폐환시킴으로서 제어 루프를 구성하였다.

## 2.3 데이터 제어부

데이터 제어부는 80C196KC<sup>[8]-[10]</sup>를 주 제어기로 사용하여 센서값 처리, 제어입력 계산, LCD 패널로의 디스플레이 등의 역할을 한다. 저역통과필터로 고주파 노이즈를 제거한 자이로 센서 출력값을 A/D변환시키면 디지털의 각속도 값을 얻을 수 있다. 이를 적분하면 실제 시스템의 자세정보로 사용되는 각 변위값을 검출할 수 있다. 여기서 구한 각 변위값은 제어기를 통해서 모터를 구동하여 시스템을 안정화시키는 데 사용된다. 적응 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 설계한 제어기는 제어 목적에 준한 제어 입력을 계산하고, DC 모터에 PWM 신호를 인가하여 구동시킨다. 그리고 제어 루프를 구성하기 위해서 모터에 연결된 포텐쇼미터로부터 받은 폐환신호를 A/D 변환한다.

### 3. 적응퍼지제어 이론

적응퍼지제어기는 플랜트의 수학적모델이 알려져 있지 않거나 파라미터들에 불확실성이 많이 내포되어 있는 경우에도 시스템의 성능을 연속적으로 유지시키며 향상시키기 위해 사용된다.<sup>[5]-[7]</sup> 본 논문의 제어대상시스템인 스테빌라이저 시스템은 형상이 복잡하고 불균형 관성으로 인하여 모델 추출이 어렵고 비선적이며 외란으로 변하는 중력토크를 가진 시스템이기 때문에 적응퍼지제어기를 설계하여 제어시스템을 구성하는 것이 바람직하다.

적응퍼지제어기는 퍼지로지시스템이 바로 제어를 설계하는데 사용되는가, 아니면 시스템을 퍼지적으로 묘사하는데 사용되는가에 따라서 두 가지로 분류할 수 있다. 전자는 직접(Direct)적응퍼지제어기이고 후자는 간접(Indirect) 적응퍼지제어기이다. 직접 적응퍼지제어기는 플랜트와 기준 모델사이의 출력 오차가 감소하도록 조정되는 퍼지로지시스템이 직접 제어기로 사용된다. 즉, 어떤 상황에서 어떤 제어가 이루어져야할 지를 언급한 언어적 퍼지 제어 규칙이 직접 제어기 속에서 구체화된다. 간접 적응퍼지제어기는 플랜트의 파라미터를 추정하기 위해서 퍼지로지시스템을 사용하고 추정된 파라미터를 플랜트의 실제 값이라고 보고 제어를 설계한다. 따라서 미지의 플랜트 동작을 묘사하는 퍼지 IF-THEN 규칙이 제어기에서 구체화된다.

적응퍼지제어기에서 사용되는 퍼지로지시스템의 조정가능 파라미터들이 선형인지 비선형인지에 따라 각각 1형(First-type) 적응퍼지제어기와 2형(Second-type) 적응퍼지제어기로 나눌 수 있다.

#### 3.1 간접적응퍼지제어

본 연구에서는 제어 목적을 세우고, 그런 다음 구조적 방법으로 이런 제어 목적을 달성하기 위한 퍼지로지시스템을 기본으로 간접 적응퍼지제어기를 설계하고 구현하였는데 그림 2는 간접 적응퍼지제어기의 블록선도를 나타낸다. 그림에서와 같이 기준 모델과 플랜트의 출력 오차를 가지고 적응 규칙을 결정하여 조정가능한 파라미터들을 적응시키고 퍼지 베이스 함수와 함께 플랜트의 인식 모델(Identification Model)을 만든다. 제어 입력은 인식 모델의 추정 플랜트 함수를 가지고 제어 목적을 달성할 수 있도록 하는 기본제어 입력과 플랜트의 한계값을 가지고 플랜트의 출력값을 감시하는 감독제어 입력으로 구성된다.

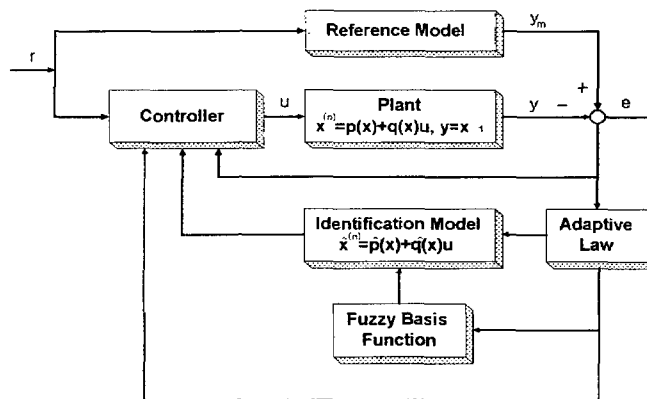


그림 2. 간접적응퍼지제어 시스템의 블록선도

Figure 2. Block diagram of the indirect adaptive fuzzy control system

다음 식(1)과 같은  $n$  차 비선형 시스템에서

$$\dot{x}^{(n)} = p(x, \dot{x}_1, \dots, x^{(n-1)}) + q(x, \dot{x}_1, \dots, x^{(n-1)})u, \quad y = x \quad (1)$$

$p(x)$ 와  $q(x)$ 는 미지의 플랜트 함수이므로 간접적응퍼지제어기에서는 이를 식(2),(3)의 퍼지로지 시스템으로 추정한다.

$$\hat{p}(x | \underline{\beta}_p) = \underline{\beta}_p^T \underline{\xi}_p(x) \quad (2)$$

$$\hat{q}(x | \underline{\beta}_q) = \underline{\beta}_q^T \underline{\xi}_q(x) \quad (3)$$

여기서,  $\underline{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_M)^T$  : 적응 파라미터

$$\underline{\xi}_i(x) = \frac{\prod_{i=1}^M \mu_{F_i}(x_i)}{\sum_{i=1}^M [\prod_{i=1}^M \mu_{F_i}(x_i)]}, \quad \underline{\xi}(x) = (\xi_1(x), \dots, \xi_M(x))^T : \text{퍼지베이스함수}$$

제어 목적은 모델 내부의 모든 신호가 제한되어진다는 가정 하에서  $y(t)$ 가 주어진 제한기준신호  $y_m(t)$ 를 따르도록 하는 것이다. 이러한 제어 목적을 달성하기 위해 추정 오차  $e = y_m - y$  는 가능한 한 작아야만 한다. 기본 제어(Certainty Equivalent Controller)  $u_c$ 는 다음과 같다.

$$u_c = \frac{1}{\hat{q}(x | \underline{\beta}_q)} [-\hat{p}(x | \underline{\beta}_p) + y_m^{(n)} + k^T e] \quad (4)$$

플랜트 함수의 한계값인  $p^U, q^U, q_L$ 를 기초로 하고, 다음과 같은 감독 제어(Supervisory Controller)  $u_s$ 를 선택할 수 있다.

$$u_s = I_1^* \text{sgn}(e^T P b_c) \frac{1}{q_L(x)} [|\hat{p}(x | \underline{\beta}_p)| + p^U(x) + |\hat{q}(x | \underline{\beta}_q)u_c| + |q^U(x)u_c|] \quad (5)$$

여기서, 만약  $V_e > \bar{V}$  이면  $I_1^* = 1$ ,  $V_e \leq \bar{V}$  이면  $I_1^* = 0$  이다.

만약  $y \geq 0$  이면  $\text{sgn}(y) = 1$  이고,  $y < 0$  이면  $\text{sgn}(y) = -1$  이다.

따라서, 최종적인 제어 입력  $u$ 는 다음과 같이 된다.

$$u = u_c + u_s \quad (6)$$

그리고 미지의 플랜트 함수를 추정하기 위한 적응 규칙은 다음과 같다.

$$\dot{\underline{\beta}}_p = -\nu_1 e^T P b_c \underline{\xi}_p(x) \quad (7)$$

$$\dot{\underline{\beta}}_q = -\nu_2 e^T P b_c \underline{\xi}_q(x) u_c \quad (8)$$

### 3.1.1 1형 간접적응퍼지제어기

1형 간접 적응퍼지제어기는 퍼지 시스템에 대한 규칙의  $IF$  부분에서 퍼지 집합을 고정함으로서 퍼지 시스템의 변수가 선형이 된다는 이점이 있다. 즉, 고정된 소속 함수로서 퍼지베이스함수를 구성하고 퍼지로직시스템을 결정함으로써 변수를 조정하기 위한 적응규칙을 비교적 간단하게 적용할 수 있다. 그리고 복잡한 비선형 문제에 관심을 두지 않기 때문에 적응 단계에서 더 빠르게 수렴할 수 있다. 그러나 입력 공간의 가능한 모든 조합을 생각해야 한다는 단점도 있다. 퍼지로직시스템의 소속 함수가 고정되어 변화될 수 없기 때문에 입력 영역을 모두 포함할 수 있는 퍼지 규칙을 가져야 한다. 즉, 모든 입력 공간을 분할하여 조합되는 소속 함수들의 퍼지 규칙베이스 안에 적어도 하나의 규칙이 있어야 한다는 것을 의미한다. 일반적으로, 시스템 내부 변수의 실제 경로가 입력 공간의 어느 작은 영역 안에서만 존재하기 때문에 실제로 퍼지로직시스템에 대한 많은 규칙들이 제어기에 사용되지 못한다. 따라서 1형 적응퍼지제어기에는 조정 가능 변수들을 이용하는데 효율적이지 못한 단점이 있다.

### 3.1.2 2형 간접적응퍼지제어기

1형 적응퍼지제어기는 고차 시스템들에 대해서 매우 많은 수의 규칙들을 요구할 수 있다. 이런 규칙의 과다 문제를 해결하는 2형 적응퍼지제어기는 퍼지 규칙  $IF$  부분의 퍼지 집합을 조정하여 변할 수 있도록 허용하는 것이다. 결과적으로 작은 숫자의 퍼지 규칙만 필요하게 되지만 좀 더 복잡한 적응 규칙을 사용해야만 하는 단점이 있다. 적응 규칙에서는 적응 파라미터와 함께 소속함수에 대한 조정 알고리즘도 필요하게 된다. 따라서 알고리즘의 계산량이 많아져서 실시간 제어가 어려울 수 있다. 그리고 퍼지로직시스템의 추정되는 퍼지로직시스템의 변수가 비선형이 되기 때문에 초기 적응 단계에서 빠른 수렴을 얻지 못할 수도 있다.

### 3.1.3 2/1형 간접적응퍼지제어기

본 연구에서 제안하는 2/1형 간접 적응퍼지제어기는 1형과 2형 간접 적응퍼지제어기의 장점만을 고려하여 설계한 제어기이다. 1형 간접 적응퍼지제어기는 고정된 소속함수를 사용하기 때문에 퍼지 시스템의 변수가 선형이 되어서 간단한 적응 규칙을 적용할 수 있고 비선형 문제가 없기 때문에 초기 적응 단계에서 빠르게 적용할 수 있는 장점이 있다. 그리고 2형 간접 적응퍼지제어기는 퍼지 규칙  $IF$  부분의 퍼지 집합을 조정할 수 있기 때문에 불필요한 입력 공간의 소속 함수를 사용하지 않고 작은 수의 퍼지 규칙만을 가지고 사용할 수 있는 장점이 있다.

이 두 형의 장점을 적용하기 위하여 2/1형 간접 적응퍼지제어기에서는 먼저 2형 적응퍼지제어기로서 시스템에서 가장 주요하게 사용되는 소속 함수들을 찾아내고 이 소속함수들을 1형 적응퍼지제어기에 적용하여 그 퍼지 규칙들을 초기화하였다. 즉, 먼저 2형 적응퍼지제어기를 설계하고 시스템에 적용함으로써 퍼지 규칙  $IF$  부분의 퍼지 집합들이 적응 과정을 거쳐서 플랜트 내부 변수들의 공간을 적절하게 사용하게 된다. 여기서 적용된 소속함수들을 1형 적응퍼지제어기의 소속 함수로 사용함으로써 제어기는 작은 수의 퍼지 규칙만을 가지고도 시스템을 잘 표현할 수 있게 된다. 이런 과정을 거침에 따라 제어기는 작은 수의 퍼지 규칙들을 가지고도 간단한 적응 규칙을 사용할 수 있게 된다. 또, 2/1형 적응퍼지제어기는 초기 제어를 구성하는데 있어서 적용된 소속함수와 함께 적용된 파라미터도 사용할 수 있는 장점이 있다. 보통 초기 적응 파라미터는 언어적 정보들에 의해 결정된다. 물론 시스템에 대한 전문적이인 지식이 있다면 적절한 초기 적응 파라미터를 결정할 수 있다. 그러나 이런 지식이 없다면 적절한 초기 적응 파라미터를 결정할 수 없게 되어서 초기 제어기는 제 역할을 못하게 되고 시스템의 초기 성능을 기대하기 어렵다. 2/1형 적응퍼지제어기는 이런 시스템의 초기 성능을 개선시키고 제어기의 빠른 적응을 위해서 2형 적응퍼지제어기에서 적용된 파라미터를 1형 적응퍼지제어기의 초기 적응 파라미터로 사용하고 있다.

## 4. 자세 안정화 제어기 설계

### 4.1 자세제어 알고리즘

그림 3은 스테빌라이저 시스템의 자세를 안정화시키기 위한 간접 적응퍼지제어시스템의 블록선도이다. 시스템의 회전 운동성분인 롤과 피치에 의한 자세 변화를 검출하는 자이로 센서의 출력값이 기준 입력이 된다. 물론, 시스템의 자세 변화각을 얻기 위하여 적분기를 통과하였고 자세를 보상시키기 위한 반전값을 취한다. 이 기준 입력과 스테빌라이저 시스템 자세 보상각과의 오차가 간접 적응퍼지제어기에 입력된다.

초기 제어기는  $\beta_p(0), \beta_q(0)$ 의 값을 가지고 인식 모델과 제어 입력을 만든다. 초기 파라미터  $\beta_p(0), \beta_q(0)$ 는 시스템에 대한 전문가적인 지식을 가지고 있을 때는 그것을 언어적 정보로 적용하여 결정할 수 있으나, 그렇지 않을 때는 시스템의 한계를 고려하여 대략 결정할 수 있다. 이것이 제어기의 초기 성능을 결정한다.

적응 규칙은 동정 모델과 플랜트의 출력 오차를 줄일 수 있도록 조정가능 파라미터  $\beta_p, \beta_q$ 를 적응시킨다. 적응된 파라미터  $\beta_p, \beta_q$ 와 퍼지베이스함수는 플랜트에 대한 동정모델을 만든다. 퍼지베이스함수는 1형 적응퍼지제어일 경우는 초기 제어기에서 결정하여 고정되고, 2형 적응퍼지제어일 경우는 적응 파라미터와 같이 조정 가능하게 되어 적응 규칙에 의해 적용되어 간다. 제어 규칙에서는 기준 입력과 시스템 출력과의 오차가 0으로 수렴해야 한다는 제어 목적에 부합할 수 있도록 하는 기본제어 입력을 만들고, 플랜트의 한계값 정보를 가지고 시스템이 항상 안정한 범위 내에 있도록 하는 감속제어 입력을 만들어 스테빌라이저 시스템에 인가된다.

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| $\dot{\theta}_g$ : 시스템의 자세 변화률 [rad/sec], | $\theta_g$ : 시스템의 자세 변화각 [rad]        |
| $\theta_m$ : 시스템의 자세 보상각 [rad],           | $\theta_e$ : 시스템의 자세 보상 오차각 [rad]     |
| $u_c$ : 기본제어 입력,                          | $u_s$ : 감속제어 입력                       |
| $u$ : 제어 입력,                              | $u = u_c + u_s$                       |
| $\hat{p}(x), \hat{q}(x)$ : 인식 모델 함수,      | $\beta_p(0), \beta_q(0)$ : 초기 적응 파라미터 |
| $\beta_p, \beta_q$ : 조정 가능한 적응 파라미터,      | $\xi$ : 퍼지 베이스 함수                     |

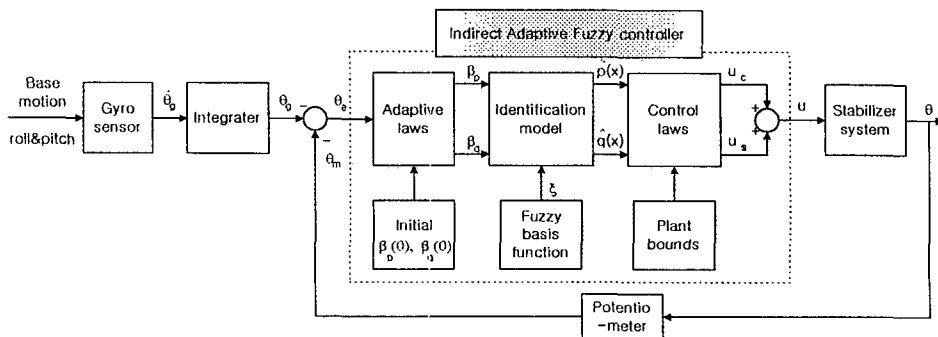


그림 3. 자세 제어를 위한 간접 적응퍼지제어시스템의 블록선도

Figure 3. Block diagram of an adaptive fuzzy control system for motion control



## 4.2 시뮬레이션

스테빌라이저 시스템의 자세 안정화 수학 모델이 다음과 같다고 가정한다.

$$x^{(2)}(t) = p(x) + q(x)u \tag{9}$$

$$p(x) = -3.625x_2 + 4.5 \sin(x_1) \cos(x_2) + a_1(t)x_1x_2 \tag{10}$$

$$q(x) = 6.25 + a_2(t) \tag{11}$$

상태 변수와 제어 입력의 한계는 다음과 같이 결정한다.

$$-\frac{\pi}{6} \leq x_1 \leq \frac{\pi}{6}, \quad -\frac{4\pi}{9} \leq x_2 \leq \frac{4\pi}{9}, \quad 0 \leq u \leq 25$$

플랜트의 고정 한계는

$$|p(x)| \leq |-3.625x_2| + |4.5 \sin(x_1) \cos(x_2)| + |a_1(t)x_1x_2| \leq 11.02$$

$$|q(x)| \leq |6.25| + |a_2(t)| \leq 8.25$$

$$|q(x)| \geq 6.25 - |a_2(t)| \geq 4.25$$

와 같다. 이 때  $a_1(t)$ 는 플랜트의 시변 불확실성 요소이고  $|a_1(t)| \leq 5$  이며,  $b_1(t)$ 는 입력단의 시변특성으로  $|b_1(t)| \leq 2$ 이다. 그리고 안정 행렬의 계수는  $k_1 = 4$ ,  $k_2 = 4$ 이고 양의 한정행렬  $Q$ 를 결정하고 양의 한정 대칭행렬  $P$ 를 구한다.

$$Q = \begin{bmatrix} 32 & 0 \\ 0 & 32 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 36 & 4 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$$

각 형의 초기 제어기를 구성하는 소속함수와 적응 파라미터를 결정하는 방법은 각각 조금씩 다르다.

먼저 1형 퍼지로지시스템의 고정된 소속함수의 수는  $m_1 = 5$ ,  $m_2 = 5$ 가 되고 퍼지 규칙의 수는  $m = m_1 \times m_2 = 25$ 가 된다. 이 때 퍼지로지시스템의 소속함수와 퍼지 규칙은 그림 4, 5와 같다.

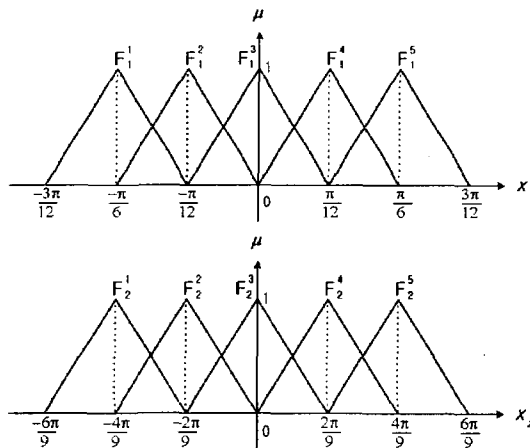


그림 4. 1형 퍼지로지시스템의 소속 함수

Figure 4. Membership functions of a first-type fuzzy logic system

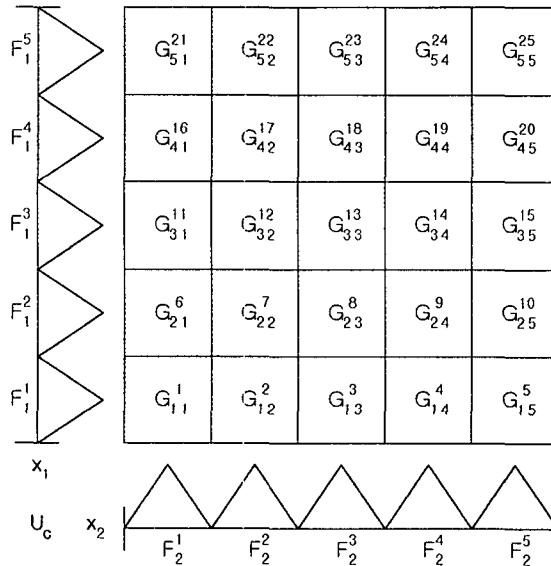


그림 5. 1형 퍼지로직시스템에 대한 퍼지 규칙  
Figure 5. Fuzzy rules for a first-type fuzzy logic system

1형 적응 규칙에서 조정되는 초기 적응 파라미터는 퍼지 규칙의 수와 같이 5×5의 벡터로 구성되고 각 벡터의 값들은 플랜트의 한계값을 고려하여 결정한다. 초기 적응파라미터  $\beta_p(0)$ 는 [-5 5],  $\beta_q(0)$ 는 [5 7.5]에서 난수를 발생하여 결정한다.

2형 적응퍼지제어기는 퍼지 규칙의 퍼지 집합들을 조정하여 개선시킬 수 있다. 따라서 초기 제어기를 구성하는 소속함수는 상태 변수들의 범위 내에서 임의로 결정한다. 각 퍼지 규칙들은 각각  $m=15$ 로 결정한다. 그리고 각 퍼지집합들은 삼각퍼지 형태를 사용하였고, 삼각 퍼지 집합의 중심 값과 그 폭이 조정 가능한 파라미터가 된다.

마지막으로 2/1형 적응퍼지제어기에서는 2형의 정보를 1형의 초기 제어기로 사용한다. 즉, 2형에서 적응 규칙으로 조정된 소속함수들로 1형의 퍼지 집합을 구성하여 초기 퍼지 규칙들을 결정한다. 물론 퍼지 규칙들은 1형의 25개보다 작은 15개로 결정할 수 있다. 그리고 이 규칙들은 모델을 가장 잘 묘사할 수 있는 퍼지 집합들로 이루어진 것들이다. 기존의 1형이나 2형 적응퍼지제어기들은 초기 적응파라미터들을 정확한 전문가적 지식이 없는 상황에서 단순히 플랜트의 한계치 정보만으로 난수를 발생하여 결정하기 때문에 좋은 초기 성능을 기대하기 어렵다. 그러나 2/1형 제어기의 초기 적응 파라미터들은 2형에서 적용된 것들을 사용하기 때문에 양질의 언어적 정보를 적용한 효과를 얻을 수 있어 기존 입력에 대한 초기 수렴도 빠르다.

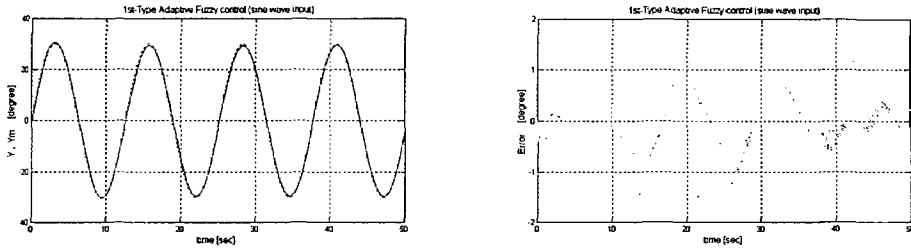


그림 6. 1형 적응퍼지제어 시스템의 정현파 입력에 대한 시뮬레이션 결과  
 Figure 6. Sinusoidal response of the first-type adaptive fuzzy control system

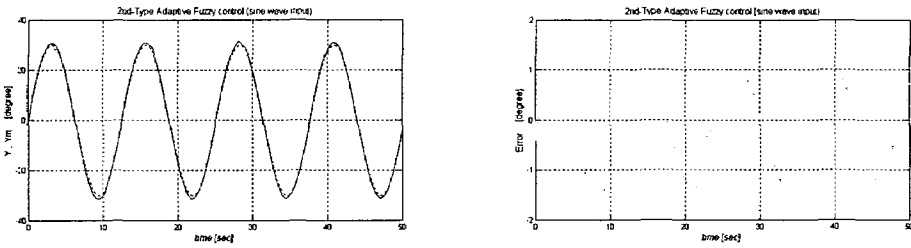


그림 7. 2형 적응퍼지제어 시스템의 정현파 입력에 대한 시뮬레이션 결과  
 Figure 7. Sinusoidal response of the second-type adaptive fuzzy control system

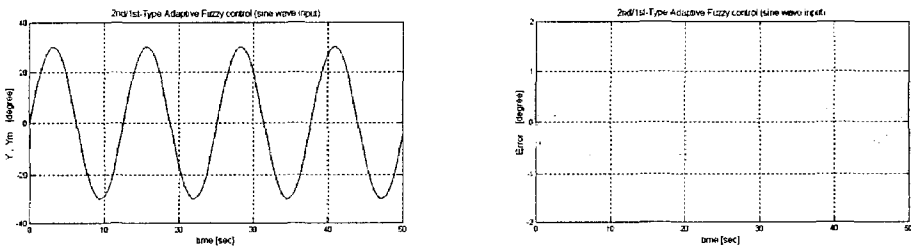


그림 8. 2/1형 적응퍼지제어 시스템의 정현파 입력에 대한 시뮬레이션 결과  
 Figure 8. Sinusoidal response of the second/first-type adaptive fuzzy control system

## 5. 스테빌라이저 시스템 실험 및 결과 고찰

### 5.1 제어 시스템 설계 및 실험 결과

본 연구에서 구현한 스테빌라이저 시스템은 X, Y 두 축의 회전 운동성분을 각각 독립적으로 검출하고 보상한다. 따라서, 롤과 피치에 대한 운동 성분으로부터 시스템의 자세를 안정화시킬 수 있는 제어기를 각각 설계하고 구현하였다. 제어기는 롤 플랜트와 피치 플랜트의 독립적인 제어 대상에 대해서 각각 1형 간접 적응피지제어기를 구현하였다.

먼저 두 플랜트의 적응피지제어기에 대하여 설정되어야 하고 오프 라인 전처리부에서 결정되어야 하는 설계 파라미터와 플랜트의 한계값은 시뮬레이션에서의 것과 동일하게 결정하였다.

다음으로 초기 제어기를 구성하기 위해서 각 변수에 대한 소속함수를 선정하고 초기 적응 파라미터를 결정하여 플랜트의 동정 모델을 구하기 위한 퍼지 규칙을 만들어야 한다. 롤 플랜트에 대한 각 변수의 소속함수의 수는  $m_1=3, m_2=2$ 로 되어 퍼지 규칙( $m=m_1 \times m_2=6$ )을 구하고, 피치 플랜트에 대한 각 소속함수의 수는  $m_1=2, m_2=3$ 이 되어 퍼지 규칙( $m=m_1 \times m_2=6$ )을 구할 수 있다. 플랜트에 대한 퍼지로지시스템의 소속함수와 퍼지 규칙은 그림 9, 10과 같다.

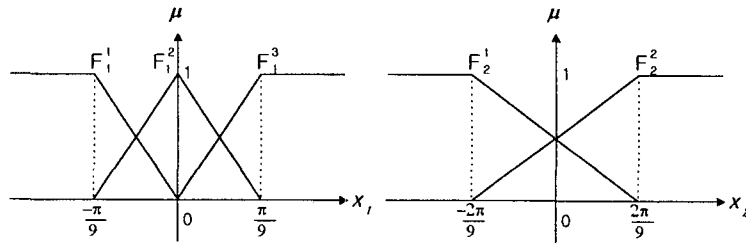


그림 9. 플랜트에 대한 퍼지로지시스템의 소속함수

Figure 9. Membership functions of a fuzzy logic system for a plant

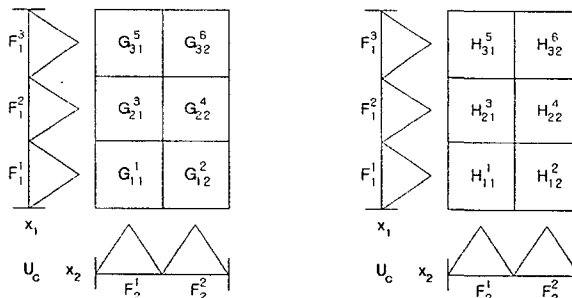


그림 10. 플랜트에 대한 퍼지 규칙

Figure 10. Fuzzy rules for a plant

$\hat{p}(x)$ 와  $\hat{g}(x)$ 에 대한 초기 적응 파라미터인  $\beta_p(0)$ 는  $[-3 \ 3]$ ,  $\beta_g(0)$ 는  $[3.5 \ 5]$ 의 구간에서 임의로 선정하여  $6 \times 1$ 의 벡터로 각각 구성하였다.

은 라인 적응 단계에서는 자이로 센서와 포텐쇼미터의 출력값을 A/D 변환하여 그에 따른 제어 입력을 계산하고 적응 규칙을 통하여 조정가능 파라미터들을 적응시키는 계산을 수행한다. 따라서, 센서 검출과정과 알고리즘 계산과정, 그리고 각 플랜트에 제어 입력을 인가하는 샘플링 시간은 20[ms]로 80C196KC의 인터럽트를 사용하여 처리하였다.

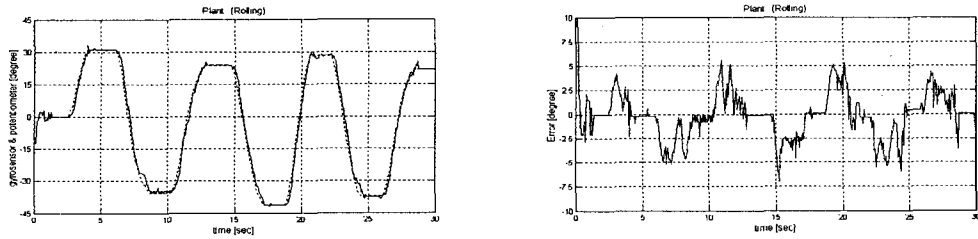


그림 11. 롤 플랜트의 응답  
Figure 11. Response of the roll plant

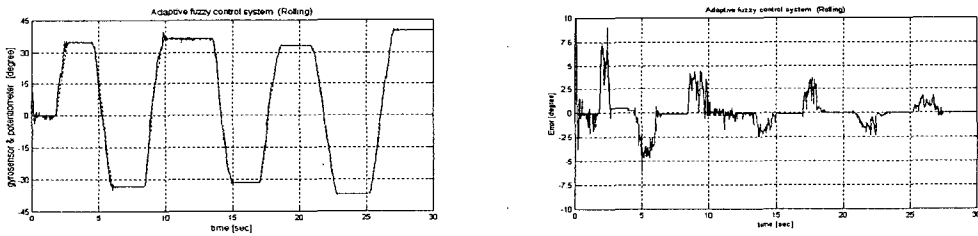


그림 12. 롤 적응퍼지제어시스템의 응답  
Figure 12. Response of a roll adaptive fuzzy control system

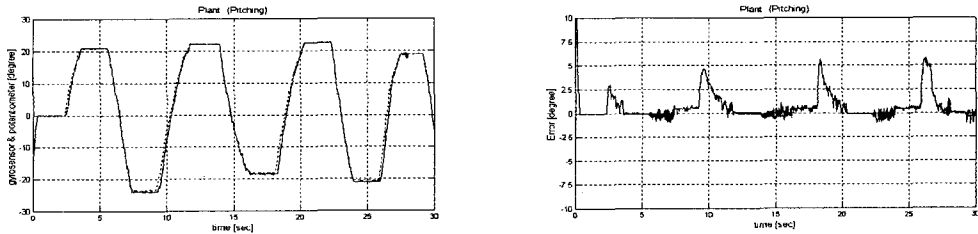


그림 13. 피치 플랜트의 응답  
Figure 13. Response of the pitch plant

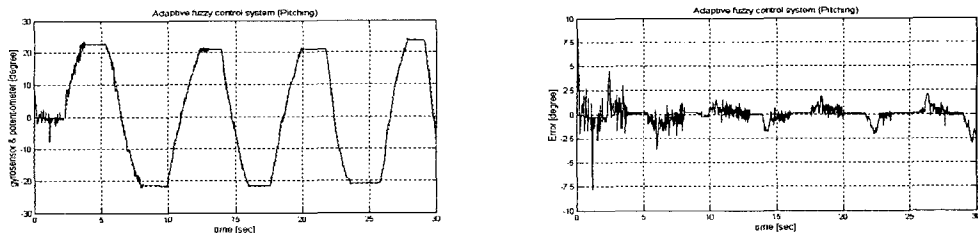


그림 14. 피치 적응퍼지제어시스템의 응답  
Figure 14. Response of a pitch adaptive fuzzy control system

## 5.2 실험 결과의 고찰

그림 11과 그림 12는 각각 롤 성분에 대한 플랜트 응답과 적응퍼지제어시스템의 응답이다. 플랜트의 롤 과도응답상태를 보면 오버슈트가 발생하고 상승시간이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이러한 요인으로 시스템의 자세 안정화 오차가 약  $\pm 5[\text{degree}]$  정도인 것을 확인할 수 있다. 그리고 시스템의 파라미터 변동과 외란에 대해서 매우 불안정한 응답을 보이고 있다. 적응퍼지제어시스템의 롤 과도응답상태를 보면 초기에는 오버슈트와 상승시간이 플랜트 응답에 비해서도 매우 크다. 그러나 약 10[s] 정도에서는 조정 파라미터들이 적응되어감에 따라 상승시간과 오버슈트는 작아지고 있다. 이는 적응 파라미터들이 적응 규칙에 의해 적응되면서 만든 인식 모델이 실제 롤 플랜트를 잘 추정하고 있다는 것이다. 또 조정 파라미터가 어느 정도 적응된 후에는 자세 안정화 오차가 약  $\pm 2[\text{degree}]$  정도로 플랜트 응답보다 현저히 개선되었다.

그림 13과 그림 14는 각각 피치 성분에 대한 시스템의 응답이다. 플랜트의 피치 응답상태에서 자세가 시계방향으로 회전할 때는 상승시간이 크고, 반시계방향으로 회전할 때는 오버슈트가 크다. 이는 피치 플랜트의 무게중심이 축의 한쪽으로 치우쳐 있어서 모터가 구동될 때 중력 토크의 영향을 받기 때문이다. 적응퍼지제어시스템을 보면 롤 응답과 마찬가지로 초기에는 매우 불안정한 응답을 보였으나 조정 파라미터가 적응됨에 따라 개선된 응답을 보이고 있다. 즉, 플랜트 응답에서의 오버슈트와 상승시간이 적응퍼지제어의 동정 모델 추정으로 인해 개선되고 자세 안정화 오차도 약  $\pm 5.5[\text{degree}]$  정도에서 약  $\pm 2.5[\text{degree}]$  정도로 개선되었다.

적응퍼지제어기는 적응 규칙에 의해 조정 파라미터를 적응시키고 플랜트의 동정 모델을 추정함으로써 미지의 플랜트를 제어할 수 있는 장점과 퍼지로직시스템으로 동정 모델과 제어 입력을 만들어냄으로써 비선형 제어로 사용될 수 있는 장점을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 운동체의 회전 운동성분을 보상하여 시스템의 자세를 안정화시킬 수 있는 스테빌라이저 시스템을 설계, 구현하고 제어 시스템을 구성하여 자세의 안정화 제어를 수행하였다.

설계한 안정화 시스템은 회전 운동성분을 롤과 피치의 두 성분으로 분해하여 시스템의 자세를 검출하고 각 축 단위로 자세를 독립적으로 안정화시킴으로써 제어가 편리하도록 하였다.

제안된 2/1형 적응퍼지제어방식을 사용한 제어시스템은 미지의 플랜트에 대해서 연속적으로 양호한 성능을 나타냈으며 플랜트의 비선형성, 외란에도 강인함을 알 수 있었다.

그러나, 제어기에서 사용된 마이크로프로세서가 가지는 능력의 한계로 인하여, 실시간 제어 범위내에서 이용가능한 퍼지규칙의 수가 6개 이상을 초과하지 못하였기 때문에, 적응퍼지제어기의 효능을 제대로 발휘하지 못한 한계를 나타내었다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 성능이 우수한 마이크로프로세서를 선택하는 것이 선행되어야 한다. 또한 최적의 퍼지 규칙을 가지는 각 형의 적응퍼지제어 알고리즘을 실시간으로 제어하기 위해서 제어기의 연산량을 최소화하고 오프라인에서 적응 데이터를 적절히 사용하는 방법에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Charles Broxmeyer, *Inertial Navigation Systems*, McGraw-Hill, Inc., 1964.
- [2] C. F. O'Donnell, *Inertial Navigation, Analysis and Design*, McGraw-Hill, Inc., 1964.
- [3] Kenneth R. Britting, *Inertial Navigation Systems Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [4] *Basics of Gyroscopes vol. 1, 2*, Applied Technologies Associates, Inc.
- [5] Li-Xin Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis*, Prentice-Hall International, Inc., 1994.
- [6] Li-Xin Wang, "Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems," *Proc. 31st IEEE Conf. on Decision and Control*, Tucson (1992), 2511-2516.
- [7] Li-Xin Wang and J. M. Mendel "Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and orthogonal least squares learning," *IEEE Trans. on Neural Network*, vol 3, no. 5 (1992), 807-814.
- [8] Intel Corporation Literature, *8XC196KC/8XC196KD User's Manual*, Intel, 1992.
- [9] Intel Corporation Literature, *Embedded Applications*, Intel, 1997.
- [10] 車永培 著, *MICRO CONTROLLER 80196*, 다다미디어, 1999.