

유전 알고리즘을 이용한 헬리콥터의 퍼지 PID 제어기의 성능 개선

김 문환* · 이 호재* · 주 영훈** · 박 진배*

Kim moon Hwan, Ho Jae Lee, Young Hoon Joo, and Jin Bae Park

* 연세대학교 전기전자공학과

** 군산대학교 전자정보공학부

요 약

본 논문은 비선형 헬리콥터 시스템의 퍼지 비례-적분-미분 (PID) 제어기의 설계기법을 제안한다. 퍼지 제어기는 풍부한 자유도를 포함하므로 비선형 시스템의 제어에 매우 적합하다. 그러나 이의 설계는 전문가의 지식에 의존하므로 시스템의 정확한 지식의 획득에 어려울 경우 우수한 성능을 보장하는 제어기의 설계가 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 제안된 퍼지 PID 제어기의 성능 향상 및 최적화를 위하여 전역적 비선형 최적화 기법인 유전알고리즘 (GA)을 도입한다. 본 논문에서 제안한 퍼지 PID 제어기의 설계 기법은 실제 비선형 헬리콥터 실험 장치에 적용하여 그 효용성 및 실제 산업분야에의 응용 가능성을 보인다.

Key Words : 퍼지 PID 제어, 유전 알고리즘, 2자유도 헬리콥터 시스템

1. 서 론

대부분의 산업시스템은 비선형의 성질을 내포한다. 최근 비선형 시스템을 제어하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서 성공적인 접근 방법 중에 하나가 퍼지제어이다. 퍼지논리 기반 제어기는 전문가의 경험을 퍼지 논리를 이용하여 언어 규칙으로 표현하고, 이와 같이 이루어진 규칙들로서 제어기를 구성하기 때문에 제어 대상 플랜트의 정확한 수학적인 모델을 알지 못한다 하더라도 좋은 결과를 얻을 수 있고 강인한 성질을 지니고 있으며 그 구현도 간단하다. 그러나 이러한 퍼지 제어기 구현의 편리함에 비해 퍼지 제어기의 설계는 통상적으로 설계자의 주관적인 경험에 의해 시행 착오적으로 이루어지며 이러한 경험적인 방법은 시스템이 복잡해지거나 돌발적인 상황에 처했을 경우 제어 성능이 떨어지기 쉽다. 또한, 이렇게 전문가의 경험에 의해 설계된 여러가지 퍼지 제어기의 구성 요소들이 가장 최적의 값이라는 보장도 없다. 퍼지논리 기반 제어기의 최적화를 위하여 다양한 연구가 행해져 왔으며 최근에는 자동 학습 방법을 이용하여 퍼지 제어기의 설계를 자동화하는 연구가 진행되고 있다. 이에 자기 동조 방식[1], 신경회로망 이론과의 융합 방식[2], 유전 알고리즘에 의한 방식[3]등이 많이 사용되고 있다.

본 논문은 비선형 헬리콥터 시스템을 위한 퍼지 논리 기반 비례-적분-미분 (PID) 제어기의 설계를 논의한다. 앞에서 언급한바와 같이 헬리콥터 시스템은 비선형적 특성에 의해, 정확한 전문가의 지식을 획득하기 어려울 뿐 아니라 따라서 효율적인 퍼지 추론 시스템을 구현또한 어렵다. 또한 퍼지 추

론 시스템의 규칙의 수가 증가할수록 최적의 추론 시스템의 구축이 불가능하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 유전알고리즘(GA)을 이용하여 퍼지 규칙의 자동 동정 기법을 논의한다. 또한 유전 알고리즘을 이용하여 규칙의 수를 줄여서 제어기의 성능을 향상시키는 방안도 아울러 제시한다. 본 논문에서 제안한 기법은 실제 헬리콥터 시스템에 적용하여 실험을 수행함으로써 그 효용성을 검증한다.

2. 헬리콥터의 퍼지 제어기 설계

2.1 헬리콥터 시뮬레이터 시스템

2자유도 헬리콥터 시스템은 고정점에서 작동하는 헬리콥터 시스템이다. 그림 1은 2자유도 헬리콥터 시스템을 보인다. 2자유도 헬리콥터 시스템은 pitch 각과 yaw 각의 제어를 위하여 2개의 직류모터가 장착되었으며 이들을 제어함으로써 헬리콥터 시스템의 자세제어를 수행한다.

제어하게 된 결과로 나타나게 된 pitch 각과 yaw 각의 상태는 2개의 엔코더를 사용하여 측정한다. 본 논문에서 사용한 2자유도 헬리콥터 시스템의 수학적인 모델링은 식 (1)과 같이 나타난다 [4].

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{y} \\ \dot{p} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ y \\ \dot{p} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_{pp} & K_{py} \\ K_{yp} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 바탕으로 하여 적절한 제어법칙을 설계하기 위해서는 제어 입력의 상호 영향을 나타내는 계수, K_{py} 와 K_{yp} 를 선정하여야 하는데 계수동정이 매우 난해하다. 또한 실제 비선형 동적 시스템을 선형화한 식 (1)을 기반하여 설계된 제어기는 적절한 제어 성능을 발휘하지 못할 가능성이 크다. 따라서 본 논문에서는 이러한 수학적 모델에 기반하지 않는 퍼지논리기반 제어기를 설계한다.

2.2 퍼지논리기반 제어기

일반적인 퍼지 제어기는 퍼지화, 퍼지 규칙 베이스, 퍼지 추론, 비퍼지화 부분으로 되어 있으며 그 구성은 그림 1과 같다. 본 연구에서 사용하는 퍼지 제어기는 간략화 퍼지 추론법을 사용하며 그 규칙은 식 (2)과 같이 정의한다.

Rule i: If x_1 is A_{i1} , ..., and x_n is A_{in} , then y_i is w_i ($1 \leq i \leq c$) (2)

식 (2)에서 *Rule i*는 i 번째 규칙($1 \leq i \leq c$)을 말하며, $x_j(1 \leq j \leq n)$ 은 퍼지 제어기의 j 번째 입력 변수, y_i 는 i 번째 규칙의 출력을 나타낸다. 본 논문에서는 전제부의 소속 함수 A_{ij} 를 식 (3)와 같이 부등변 삼각형으로 정의하고 결론부는 실수치 w_i 로 정의한다. 소속 함수의 형태는 그림 1에 나타내었다.

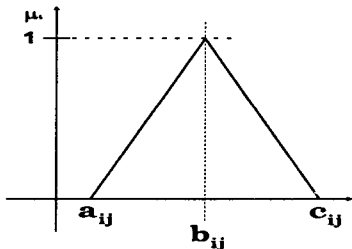


그림 1 소속 함수의 형태

$$A_{ij}(x_j) = \begin{cases} 1 + \frac{x_j - b_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}} & : a_{ij} \leq x_j < b_{ij} \\ 1 + \frac{b_{ij} - x_j}{c_{ij} - b_{ij}} & : b_{ij} \leq x_j \leq c_{ij} \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} 는 각각 삼각형의 왼쪽 모서리, 중심, 오른쪽 모서리 위치를 나타낸다. 식 (2)의 규칙들로 구성된 퍼지 제어기에 입력이 주어지는 경우 출력 값의 결정을 위한 추론 과정은 아래와 같다.

단계1: 입력 벡터 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 에 대해 i 번째 규칙의 적합도 μ_i 를 식 (4)과 같이 구한다.

$$\mu_i = A_{i1}(x_1) \times A_{i2}(x_2) \times \dots \times A_{in}(x_n) \quad (4)$$

단계2: 퍼지 추론의 결과 y^* 를 식 (5)에 의해 얻는다.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^c \mu_i} \quad (5)$$

이러한 기법을 헬리콥터 시스템에 적용하기 위하여 다중입력 다중출력 퍼지추론 시스템을 설계한다. 전체의 퍼지논리기반 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

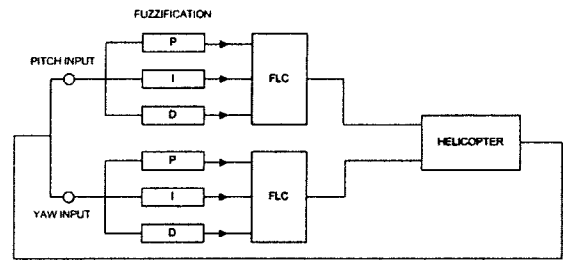


그림 2 헬리콥터 퍼지 제어기

여기서 각 PID의 k 번째 규칙의 전건부 변수를 Ep_k, Ei_k, Ed_k 라고 하고 후건부 변수를 Y_k 라고 하면 k 번째의 규칙은 다음과 같이 표현된다.

Rule k:
IF (Ep_k is about Ap_k) and (Ei_k is about Ai_k) and (Ed_k is about Ad_k), THEN Y_k is V_k

여기서, V_k 는 TS 모델에서의 후건부 변수의 값이고 이다. Ap_k, Ai_k, Ad_k 는 각 규칙의 멤버십 함수이다.

2.3 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지제어기 최적화

유전 알고리즘은 자연의 진화과정을 컴퓨터상에서 모의 실험하여 주어진 문제에 대한 원하는 해를 탐색하는 방법이다. 유전 알고리즘의 본질적인 동작 원리는 자연 선택과 유전론에 근거한 것이다. 자연 선택에서 각 개체는 재생산을 위한 기회를 얻기 위해 경쟁하고 돌연변이에 의해 각 개체에 새로운 형질이 도입된다. 유전 알고리즘을 이용하여 문제를 푸는 경우, 각 개체는 풀고자 하는 문제의 해에 관련한 정보를 가지며 이는 일련의 비트, 정수, 혹은 실수 스트링으로 표현이 된다. 이러한 스트링은 염색체(chromosome)라고 불려진다. 각 개체가 풀고자 하는 문제에 얼마나 적합한지는 적합도(fitness)에 의해 평가되며 이 적합도에 따라 집단 내에서 그 개체의 생존 여부가 결정이 된다. 이러한 개체들의 모임인 개체군을 세대(generation)라고 하며 유전 알고리즘은 이 세대에 대해 작동을 한다. 유전 알고리즘은 재생산(reproduction), 교차(crossover), 돌연변이(mutation) 연산자를 사용하

여 최적해를 탐색해 간다. 위와 같은 특성을 이용하여 퍼지제어기의 규칙을 최적화 시킬 수가 있다. 이를 위해서는 퍼지제어기의 규칙의 염색체 표현하는 작업과 적합도 함수를 적절히 만드는 작업이 필요하다

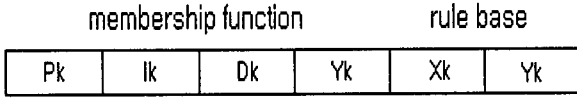


그림 3 염색체의 구성

2.3.1 염색체의 표현

염색체의 표현은 전건부 변수의 값과 후건부의 변수의 값과 규칙 베이스가 하나의 배열의 형태로 이어져서 구현이 된다. PID 제어는 규칙이 많기 때문에 규칙의 수를 줄이는 방법을 선택해서 적합하지 않는 규칙에 대해서는 값을 가지지 않도록 설계했다. 염색체의 구조는 그림 3과 같다.

염색체는 크게 소속함수를 결정하는 부분과 규칙 베이스를 나타내는 부분으로 나누어져 있다. Pk, Ik, Dk,는 각각 그림 1의 소속함수의 형태로 3가지의 변수의 값을 가지게 된다.

2.3.2 적합도 함수의 표현

각 개체의 적합도(fitness)를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자 하는 최적화 문제의 목적 함수나 다른 주관적 평가 함수에 기본하여 결정된다. 일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 목적 함수값을 최소화시키는 퍼지 제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서, 본 논문에서는 식 (6)과 같은 목적함수를 이용한 식 (7)를 적합도 함수로 정한다.

$$x = \sum_{n=0}^{rule\ number} e_n^2 \tag{6}$$

$$f_{fitness}(x) = \frac{1}{(1+x)} \tag{7}$$

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 퍼지논리기반 제어기의 효용성을 입증하기 위하여 2자유도 헬리콥터 시스템의 제어기설계의 예를 보인다. 먼저 시스템에 맞는 퍼지 규칙베이스를 찾기위하여 유전알고리즘을 이용한 퍼지 PID 제어기의 퍼지추론시스템의 규칙을 최적화를 하였다. 최적화된 퍼지추론 규칙을 기반하여 2자유도 헬리콥터 시스템을 제어실험을 수행하였다.

그림 4는 GA를 이용한 방법으로 적합도가 계산되는 과정을 보여주는 그림으로 유전알고리즘이 세

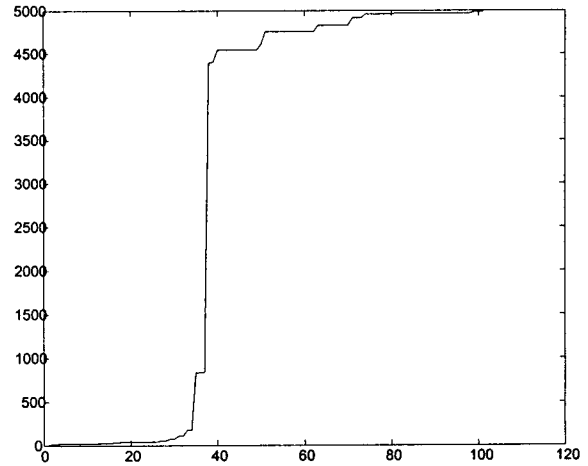


그림 4 적합도의 세대별 변화

표 1 유전알로리즘의 초기 매개 변수

Parameters	values
Maximum Generation	100
Maximum Rule Number	20
Population Size	50
Crossover Rate	0.8
Mutation Rate	0.2

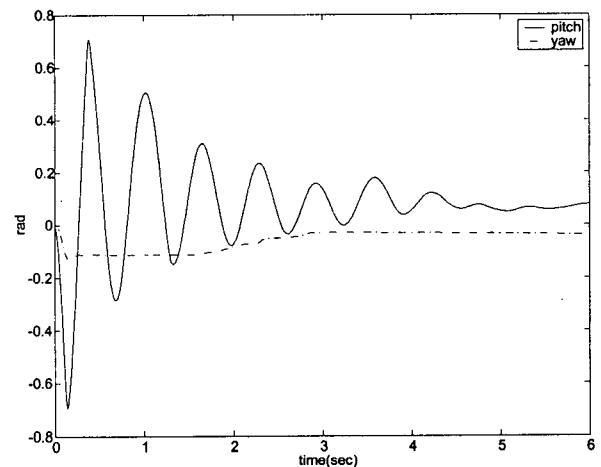


그림 5 제안된 방법에 의한 2자유도 헬리콥터 시스템의 제어 결과

대가 진행함에 따라 퍼지제어기의 성능의 향상을 나타낸다. 헬리콥터 시스템은 pitch 와 yaw 의 두 가지의 제어를 해야 하기 때문에 두 개의 퍼지논리기반 제어기가 필요하다. 따라서 각각의 제어기에 맞는 매개변수 최적화 과정을 수행한다. 그림 6와 7은 유전알고리즘에 의하여 최적화된 pitch각과 yaw각의 제어를 위한 퍼지추론 시스템의 소속함수의 매개변수를 나타낸다. 매개변수의 동정에서 초기 개체군은 헬리콥터의 입력의 범위에서의 임의의 값을 주었다. 그리고 유전 알고리즘은 기본적인 초기 매개 변수는 표3과 같다.

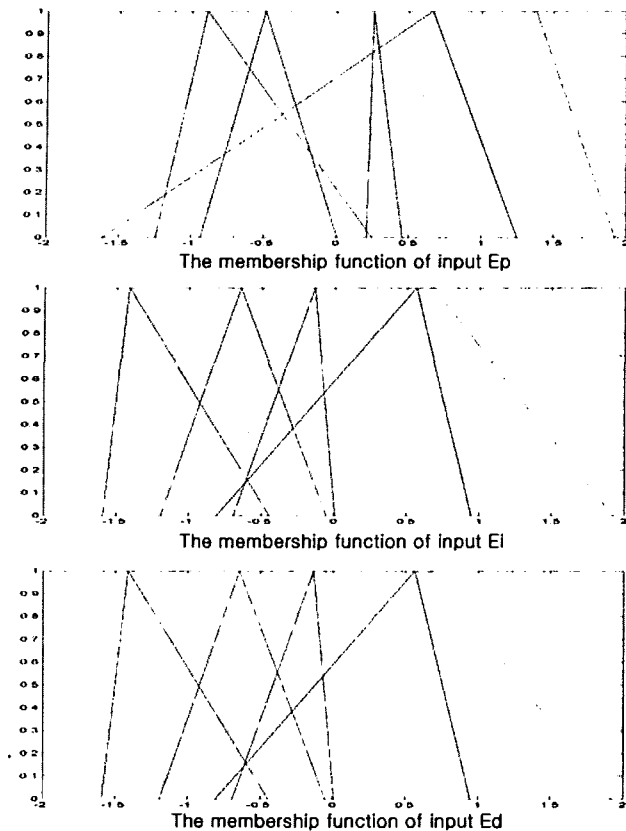


그림 6 yaw의 동정된 소속함수

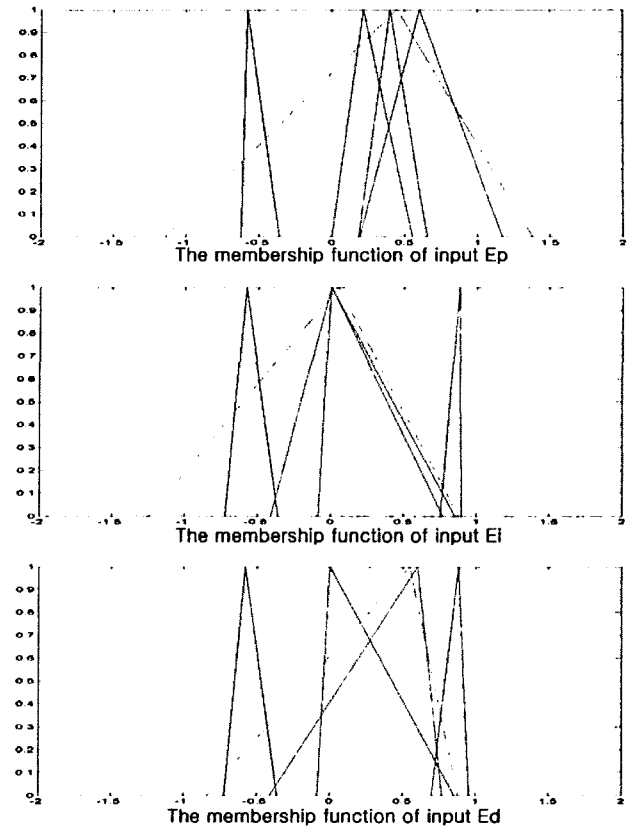


그림 7 Pitch의 동정된 소속함수

유전알고리즘에 의하여 동정된 퍼지 추론규칙을 이용하여 2자유도 헬리콥터 시스템의 제어실험을 수행하였다. 샘플링 간격은 0.01초로 설정하였다. 실험결과판은 그림 5에 나타난다.

4. 결론

2자유도 헬리콥터 시스템은 비선형 시스템일뿐 아니라, 수학적 모델링을 힘들다. 따라서 효과적인 제어를 위하여 퍼지 PID 제어이론을 적용하였다. 퍼지 PID제어기를 위한 퍼지추론시스템의 매개변수를 자동동정하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하였다. 제안된 기법의 효용성을 입증하기 위하여 실제 제어 시스템을 구축하였으며 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 기법의 효용성을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 한국과학재단 (과제번호: 2000-1-30200-002-3)에 의해 지원 받았습니다.

5. 참고 문헌

- [1] C. G. Moore and C. J. Harris, "Aspects of Fuzzy Control and Estimation", Advances in Intelligent Control, pp. 201-242, 1994.
- [2] Junhong Nie and D. A. Linkens, "Neural Network-Based Approximate Reasoning", Advances in Intelligent Control, pp. 321-335, 1994.
- [3] Chuck Karr, "Genetic Algorithms for Fuzzy Controllers", AI EXPERT, pp. 26-35, February, 1991.
- [4] 2D Helicopter Experiment pp.3 Quanser Consulting, 1998.