

하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기

A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller with Hybrid Structure

이 평 기, 박 상 배

Pyeong Gi Lee, Sang Bae Park

위덕대학교 컴퓨터제어공학과

Department of Computer Control Engineering, Uiduk University

요 약

본 논문에서는 하이브리드 구조를 가지는 자기구성 퍼지제어기를 제안한다. 제안한 방법은 FARMA 제어기에 비해 다음과 같은 장점을 가진다. 하이브리드 구조를 자기구성 퍼지논리 제어기에 도입함으로써 예측출력값을 구할 때 까지의 입출력정보의 부재로 인한 나쁜 응답성능을 개선할 수 있다. 또한 이 방법은 Yager의 t-norm을 이용하여 계산상의 복잡성을 피하고 규칙들의 가중치를 구하기 위해 필요한 D_{max} 선정의 어려움을 해결한다.

Abstract

In this paper, a self-organizing fuzzy logic controller with hybrid structure is proposed. The proposed method has several advantages over the FARMA controller as follows. By introducing a self-organizing fuzzy logic controller with hybrid structure improves poor performance due to the lack of I/O data to calculate predictive output. Also the proposed method avoids the possible computational overload and alleviates the effort in searching D_{max} value by using Yager's t-norm in calculating weights of rules

1. 서 론

시스템 운용에 경험이 많은 전문가의 정보나 지식을 이용하여 제어규칙을 구성하고 이러한 규칙을 기반으로 현재 상황에 가장 적합한 시스템 제어입력을 추론하는 퍼지제어이론은 여러 산업분야에 성공적으로 적용되고 있다[1-2]. 퍼지제어이론은 복잡한 화학 공정 시스템제어에서 제어규칙구성이 쉽지않고 시스템 주변의 예기치 못한 외란이나 잡음에 대해서 견실한 성능을 얻을 수 없는 것이 주된 문제점으로 지적될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 제어대상 시스템에 대한 제어규칙을 상황에 따라 적절하게 스스로 구성해 가면서 시스템을 제어하는 자기구성 퍼지제어기(Self-organizing fuzzy logic con-

troller)에 대한 이론이 제시되었다[3]. 이와같은 자기구성 퍼지제어기의 하나로 Park등[4]은 입출력정보를 이용하여 제어규칙을 구성하는 FARMA(Fuzzy auto-regressive moving average)형태의 자기구성 퍼지제어기를 제안하였다. 이 방법은 숙련된 전문가의 정보가 없어도 플랜트의 현재응답과 기준출력값과의 차에 의해 구성되는 성능지수에 의해 제어규칙을 생성, 수정하여 복잡한 시스템을 제어할 수 있는 효율적인 제어방법이다. 이러한 장점에도 불구하고 FARMA 퍼지제어기는 초기단계에서의 규칙부재로 인한 성능저하, 가중치를 구하는데 있어서의 복잡한 계산 그리고 D_{max} 선정의 어려움등을 단점으로 지적할 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 예측출력값을 구하기 어려운 초기단계에서는 기본적인 PD형태의 퍼지제어기로서 시스템을 구동시

키고 신뢰할만한 제어규칙이 구성될 때 까지 기본 퍼지제어기와 FARMA 퍼지제어기 사이의 적용강도를 조정하는 변조함수(Modulation function)를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안하고자 한다. 또한 이 방법은 FARMA 퍼지제어기의 시행착오에 의한 D_{max} 선정의 어려움과 복잡한 계산과정을 피하여 실시간 처리가 가능하도록 규칙 후건부에 영향을 미치는 가중치를 Yager의 t-norm을 이용하여 계산하므로써 FARMA 퍼지제어기보다 쉽게 제어입력을 추론할 수 있는 장점이 있다.

II. 성능개선을 위한 Hybrid구조의 자기구성 퍼지제어기

1. 제안한 방법의 시스템 구조

초기 응답특성을 개선하고 예측출력값이 구해질 때 까지 PD형태의 기본적인 퍼지제어기에 의해서 시스템이 구동되고, FARMA 제어기의 규칙이 생성되고 예측기능을 위한 최소한의 데이터가 확보된 뒤에는 점차적으로 FARMA제어기가 시스템을 제어하며 규칙을 계속 생성해가는 하이브리드 구조의 전체 구성도는 다음 그림과 같으며 변조함수는 두 퍼지제어기 사이에서 부드러운 천이를 하도록 하기 위해서 사용된다.

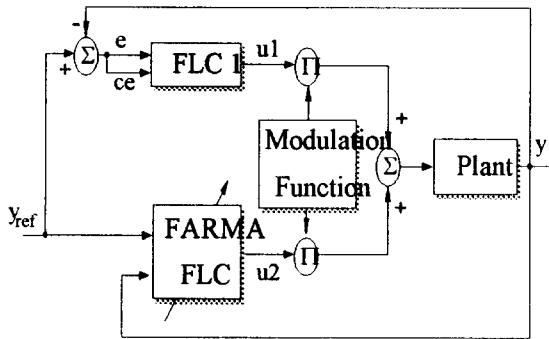


그림 1. 제안된 방법의 전체 시스템 구성도

2. 하이브리드 퍼지 제어기

2.1 FLC에 사용된 퍼지제어기

FLC1은 간단한 PD형태의 퍼지제어기를 사용했으며 사용된 규칙은 목표치와 출력값과의 오차의 크기와 오차의 방향을 고려하여 설계하는 규칙으로서 그 형태는 다음과 같다.

IF e is A_1 and ce is A_2 THEN U_1 is B_1

2.2. FARMA 퍼지제어기

2.2.1 Rule Base의 구성

일반적인 단일출력(SISO) 이산시간 시스템은 다음과 같은 비선형함수의 형태로 표현된다.

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots) \quad (1)$$

이러한 식으로부터 다음 단계에서 y_{ref} 의 출력을 얻기 위한 $u(k)$ 의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$u(k) = g(y_{ref}, y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (2)$$

식 (2)와 같은 입출력관계로서 규칙을 구성하면 ARMA 모델과 그 형태가 비슷하게 되므로 Fuzzy ARMA(FARMA) 규칙이라고 한다. 이러한 FARMA 제어기는 매 단계마다 샘플링한 플랜트의 실제 입

$$\begin{aligned} R_i : & \text{IF } y_{ref} \text{ is } A_{1i}, y(k) \text{ is } A_{2i}, \dots, y(k-n+1) \text{ is } A_{(n+1)i}, \\ & \text{AND } u(k-1) \text{ is } B_{1i}, u(k-2) \text{ is } B_{2i}, \dots, u(k-m) \text{ is } \\ & B_{mi} \text{ THEN } u(k) \text{ is } C_i. \end{aligned} \quad (3)$$

출력정보로부터 규칙을 생성하여 규칙 베이스에 저장한다.

2.2.2 퍼지화(Fuzzification)

시스템의 실제 입출력정보로부터 규칙베이스에 저장될 퍼지레이블들을 만드는 퍼지화방법은 다음 그림과 같이 적절히 가정된 universe of discourse 상에서 샘플링된 실제 입·출력 데이터를 소속함수값이 최대가 되도록 하는 삼각형 퍼지 레이블형태로 퍼지화한다.

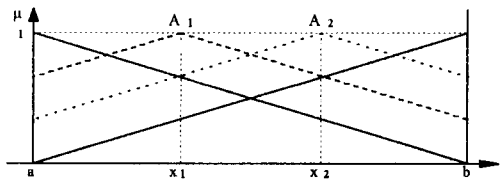


그림 2. 퍼지화 방법

2.2.3 추론방법

실제 입력과 규칙에서 IF부분의 입력과의 일치되는 정도를 일반적으로 가중치 ω 로 나타낸다. FARMA 퍼지제어기에서는 매우 복잡한 과정을 거쳐 각 규칙의 가중치를 구하는데 이러한 경우 실시간 처리가 어려워 질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Yager의 t-norm을 이용하여 각 규칙의 가중치를 계산한다. 계산된 ω_i 와 규칙 후건부 퍼지집합의 ϕ 연산으로 다음과 같이 퍼지집합을 추론한다.

$$\begin{aligned} \widehat{C}_i &= \omega_i \varphi C_i \\ &= \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

각각의 규칙에서 추론된 퍼지집합들(\widehat{C}_i)에 MIN 연산을 취하여 최종 제어입력 퍼지집합(Net Control Action)을 구한다. 한 예로 i번째 규칙과 j번째 규칙에서 얻어지는 최종 제어영역(NCR)은 다음그림에서와 같이 c와 b의 중복된 구간으로 구해진다.

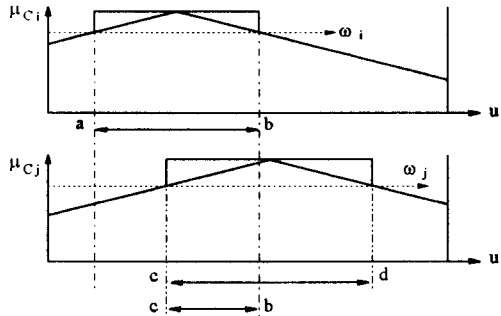


그림 3. 최종제어입력 영역의 계산

2.2.4 비퍼지화 (Defuzzification)

최종적인 제어입력 퍼지집합으로부터 플랜트에 인가할 물리적인 제어입력량을 구하기 위해 비퍼지화 과정이 필요하다. NCR이 형성되는 경우 외삽법을 이용해서 출력의 변화추세로부터 다음 단계에서의 플랜트 출력을 예측하여 현재 단계에서 가해야 할 제어입력의 방향을 설정해주므로 좀 더 신뢰할 수 있는 입력을 가할 수 있다[6].

2.2.5 자기구성과정 (Self-Organizing Procedure of the Rule Base)

규칙 베이스의 자기구성과정은 매 샘플링 단계에서 생성된 규칙이 그 영역에 다른 규칙이 저장되어 있지 않으면 그 규칙은 규칙 베이스에 저장되고, 만약 같은 영역에 다른 규칙이 이미 저장되어 있으면 일단 현재 생성된 것을 더 나은 규칙이라 가정하여 규칙 베이스에 저장시킨 후에 성능을 다음 식에 의해 평가하여 규칙을 갱신한다.

$$J = [y_r(k+1) - y(k+1)]. \quad (5)$$

3 변조함수(Modulation function)

제어입력은 FLC1과 FARMA FLC에서 각각 추론되어 나오는 u_1, u_2 값의 조합이며 조합의 비를 조정하

는 요소로서 변조함수가 사용된다.

$$u(k) = m(k) * u_1(k) + (1 - m(k)) * u_2(k) \quad (6)$$

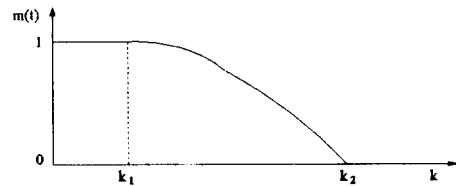


그림 4. 모듈레이션 함수

4. 제어 알고리즘

제안한 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기의 제어알고리즘을 단계별로 요약하면 다음과 같다.

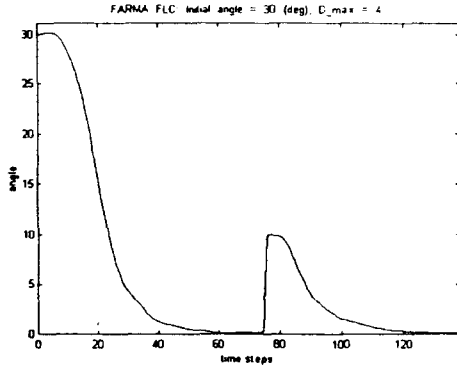
- 단계 1 : 따라가야 할 목표값과 초기값을 부여하고 FLC1의 규칙을 구성한다.
- 단계 2 : 변조함수의 k_1 시점까지 PD형태인 FLC1으로 제어입력을 구하여 플랜트에 인가한다.
- 단계 3 : 예측출력값이 구해지는 시점에서 FARMA 규칙을 생성하고 FLC1과 FARMA 제어기에서 각각 얻어지는 제어입력값들을 구한 후 변조함수를 이용하여 제어입력을 구하여 플랜트에 인가한다.
- 단계 4 : 플랜트의 출력값이 허용할 수 있는 오차범위 내에 들어오면 끝내고 그렇지 않으면 단계 3을 반복한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

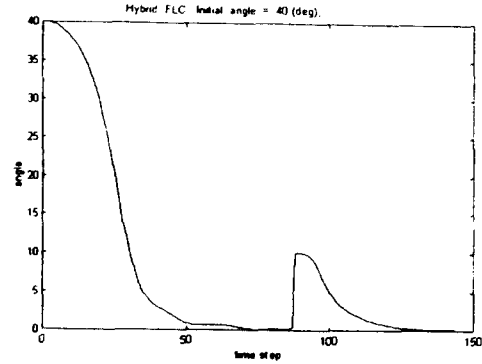
제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해서 다음과 같은 도립진자(Inverted pendulum) 시스템에 제안한 방법과 FARMA 제어기의 성능을 비교, 검토해보기로 한다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{(M/m) + \sin^2 \theta} \left(\frac{u}{m} + \dot{\theta}^2 L \sin \theta - g \sin \theta \cos \theta \right) \\ \ddot{\theta} &= \frac{1}{L(M/m) + \sin^2 \theta} \left(-\frac{u}{m} \cos \theta - \dot{\theta}^2 L \cos \theta \sin \theta + \frac{m+M}{m} g \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 m, M, L 은 각각 진자의 질량, 수레의 질량, 진자의 무게중심까지의 길이를 나타낸다. 먼저 $J=1m, M=1kg, m=0.1kg, g=9.8m/s^2$, 수렴후 10도의 외란을 인가하여 컴퓨터 모의실험을 통한 성능을 비교해 보기로 한다. k_1 은 16으로 하여 모의실험을 수행하였다. 다음 각각의 그림들은 초기각도가 30도이고 FARMA 제어기에서의 D_{max} 가 4일 때의 응답과 제안한 하이브리드 제어기에 의한 응답을 나타낸다.



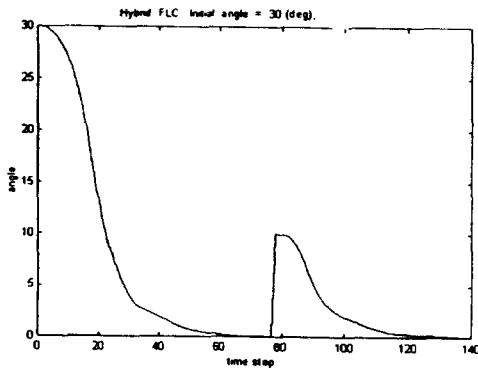
(a) FARMA 제어기에 의한 각도응답



(b) 제안한 방법에 의한 각도응답

그림 6. 각도응답의 비교

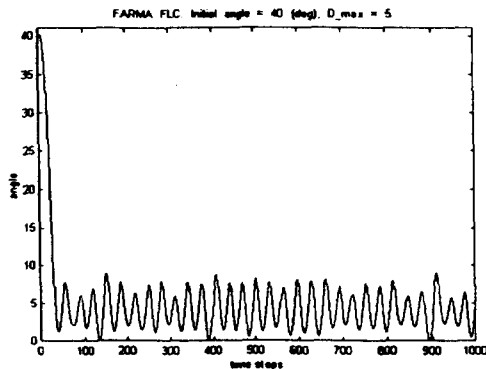
위 결과에서 FARMA제어기는 도립진자의 초기각에 대해 수렴하지 못함을 알 수 있고 반면에 하이브리드제어기는 초기각에 대한 오차와 오차의 변화율이 고려되어 목표값에 수렴함을 알 수 있다.



(b) 제안한 방법에 의한 각도응답

그림 5. 각도응답의 비교

그림 5에서 알 수 있듯이 초기각도가 30도인 경우에는 FARMA 제어기나 제안한 하이브리드제어기의 각도응답이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 다음은 초기각도가 40도 이고 D_{max} 가 5인 경우 응답을 비교 하면 각각 다음과 같다.



(a) FARMA 제어기에 의한 각도응답

IV. 결론

본 논문에서는 예측출력값을 구하기 어려운 초기 단계에서는 기본적인 PD형태의 퍼지제어기로서 시스템을 구동시키고 신뢰할만한 제어규칙이 구성될 때까지 기본 퍼지제어기와 FARMA 퍼지제어기 사이의 적용강도를 조정하는 변조합수를 이용하여 시스템의 응답특성을 개선시키는 하이브리드 구조의 자기구성 퍼지제어기를 제안한다.

V. 참고문헌

- [1] G. V. S. Raju, J. Zhou, and R. A. Kisner, "Fuzzy Logic Control for Steam Generator Feedwater Control," *Int. J. Man-Machine Study*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [2] J. A. Bernard, "Use of Rule Based System for Process Control," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 3-13, 1988.
- [3] Kenji Sugiyama, "Rule-Based Self-Organizing Controller," *Fuzzy Sets and Systems* 26, pp. 341-353, 1988.
- [4] Y. M. Park, U. C. Moon, and K. Y. Lee, "A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for Dynamic Systems Using a Fuzzy Auto-Regressive Moving Average(FARMA) Model," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 1, February 1995.