

하이브리드 자동 동조 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 제어기

이대근, 김종영, 오성권
원광대학교 전기 전자 공학부

The Hybrid Fuzzy Controller using the Hybrid Auto-tuning Algorithm

Daekeun Lee, Joongyoung Kim, Sungkwun Oh
Division of Electrica & Electronic Engineering of Wonkwang Univ

Abstract -In this paper, we propose the hybrid fuzzy controller(HFC) and the hybrid auto-tuning algorithm. The proposed HFC combined a PID controller with a fuzzy controller concurrently produces the better output performance such as sensitivity improvement in steady state and robustness in transient state than any other controller. In addition, a hybrid auto-tuning algorithm which consists of genetic algorithm and complex algorithm to automatically generate weighting factor, scaling factors and PID control gains optimizes the output of HFC. As an typical example of non-linear system in control theory, an inverted pendulum will be controlled by the suggested HFC and illustrated the performance and applicability of this proposed method by simulation.

1. 서 론

현재 산업현장에서 널리 사용되는 제어방식인 PID 제어기는 제어 감도를 향상시키고 정상상태 오차를 개선하지만 제어 파라미터의 (K_p, K_i, K_d) 최적화가 어렵고 부하 변동에 의한 파라미터 변화가 발생할 수 있어 선형 시스템에서는 효과적으로 쓰이나 비선형 동적 시스템, 고차 시스템, 수학적 모델 선정이 어려운 시스템에서는 효과적이지 못하다. 이에 반해서 퍼지 제어기는 기존 PID 제어기와는 달리 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로 IF-THEN 형식의 제어규칙으로부터 제어입력을 결정하는 병렬형 제어이다. 이는 과도상태에서 커다란 오버슈트(overshoot)없이 설정치에 도달케하는 속응성과 강인성(robust)이 좋은 제어기법으로, 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어 할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 첫째, PID 제어기와 퍼지 제어기로 구성된 하이브리드 퍼지 제어기 (Hybrid Fuzzy Controller)를 제안한다. HFC는 기존 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점을 하중계수 (α)를 이용하여 결합하는 즉, 이 시스템의 제어 입력은 과도 상태에서의 퍼지 제어기 출력과 정상상태에서 PID 제어기 출력의 컨벡스(Convex)결합으로 구성된다. 둘째, 유전자 알고리즘과 컴플렉스 알고리즘으로 이루어진 하이브리드 자동 동조 알고리즘을 이용하여 제안된 제어기의 성능을 개선한다. 유전자 알고리즘은 미분등의 다른 보조 수단을 필요로 하지 않는, 자연진화와 유전자 메카니즘에 바탕을 둔 확률적 탐색방법으로 내재적 병렬처리 연산을 통한 전역탐색을 구현, 탁월한 최적화 성능을 발휘한다. 또한 컴플렉스 알고리즘은 투영, 확산, 반사개념을 이용하여 비용함수(Cost function)를 감소시키는 제한된 탐색방법으로 유전자 알고리즘과 상호 연관되어 제어기의 성능을 향상시킨다.

나아가 본 논문에서는 로켓이나 로봇 자세제어의 기본

이 되는 비선형성이 강한 직선형 도립진자에 제안된 방법의 제어기를 적용, 안정화 제어를 수행하며 제안된 제어기의 성능 평가와 우수성 입증을 도모하고자 한다.

2. 본 론

2.1 하이브리드 퍼지 제어기(HFC)

하이브리드 퍼지 제어기는 기존의 PID 제어기의 장점과 퍼지 제어기의 장점을 융합한 것으로, 이 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 제어기의 성능을 개선한다.

2.1.1 제어파라미터와 퍼지 환산계수 동조를 위한 자동동조 HFC

하이브리드 퍼지 제어기의 기본요소는 환산계수, 언어적 제어규칙, 하중계수, 제어 파라미터로 구성된다. 이 시스템의 제어입력은 과도상태에서의 퍼지 제어기 출력과 정상상태에서의 PID 제어기 출력의 컨벡스(Convex)결합이다. 하이브리드 퍼지 제어기의 기본 구조는 그림 1과 같다.

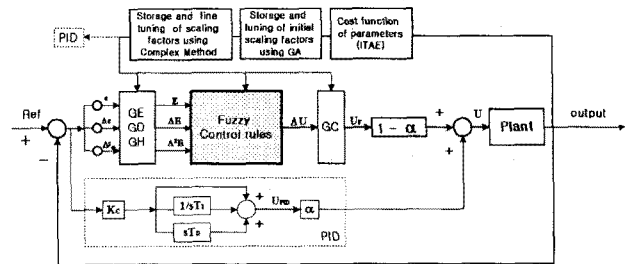


그림 1. 환산계수와 제어 파라미터 추정을 위한 자동동조 하이브리드 퍼지 제어기의 구성도

하이브리드 퍼지 제어기는 PID제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 합성을 위하여 그림 2의 하중계수 (α)를 이용한다. 설정치와 출력의 절대오차가 크면 α 는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게된다. 따라서 하이브리드 퍼지 제어기의 출력은 식 (1)과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1-\alpha) \cdot U_F \quad (1)$$

여기서, 하중계수 (α)는 그림 2와 같은 삼각형 형태의 멤버십 함수로 구성되어진다.

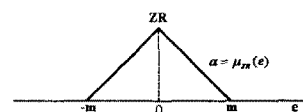


그림 2. 하중계수의 멤버십 함수

2.1.2 하이브리드 퍼지 제어기의 최적 설계

퍼지 제어기는 일반적으로 식 (2) 형태와 같은 N개의 독립된 제어규칙을 구성한다.

$$R^i : \text{IF } E_k \text{ is } A_i, \Delta E_k \text{ is } B_i, \Delta^2 E_k \text{ is } C_i, \text{ THEN } \Delta U \text{ is } D_i \quad (2)$$

여기서,

- R^i : i번째 제어 구현 규칙 ($i=1, 2, \dots, N$)
- E_k : 오차(error)값
- ΔE_k : 오차의 변화값
- $\Delta^2 E_k$: 변동오차의 변화값
- ΔU : 플랜트 제어입력의 변화값
- A_i, B_i, C_i : 퍼지 변수 D_i : 싱글톤(Singleton)

제어규칙에서 입출력 변수의 멤버십 함수는 각각 그림 3 및 그림 4와 같이 [-1,1]에 의해 표준화된 삼각형 형태를 사용한다.

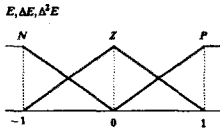


그림 3. 전반부 입력변수 $E, \Delta E, \Delta^2 E$ 의 멤버십 함수



그림 4. 후반부 출력변수 ΔU 의 멤버십 함수

전반부의 언어적 제어변수는 오차 (E), 오차의 변화치 (ΔE), 변동오차의 변화치 ($\Delta^2 E$)에 대해, N(negative), Z(zero), P(positive)의 3개로 구성되고, 후반부의 출력변수는 ΔU 에 대해 NB(negative big), NM(negative middle), NS(negative small), ZE(zero), PS(positive small), PN(positive middle), PB(positive big)의 7개로 구성되며, 전체적인 제어규칙은 표 1과 같다.

각각의 규칙에 있어 전반부의 추론값은 식 (3)과 같고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 (4)와 같다.

$$W_i = \min \{ \mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_i}(\Delta E_k), \mu_{C_i}(\Delta^2 E_k) \} \quad (3)$$

$$\Delta U = \frac{\sum_{i=1}^N W_i D_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (4)$$

표 1. 전반부 3개 퍼지변수의 퍼지 제어규칙

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	NB	NM	NM
	Z	NM	NS	ZE
	P	ZE	PS	PM

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	NB	NM	NS
	Z	NS	ZE	PS
	P	PS	PM	PB

		$\Delta^2 E = P$		
		N	Z	P
E	N	NM	NS	ZE
	Z	ZE	PS	PM
	P	PM	PB	PB

2.2 독립진자 시스템

2.2.1 독립진자 시스템 모델

독립진자 시스템은 그림 5 및 표 2와 같이 구성된다.

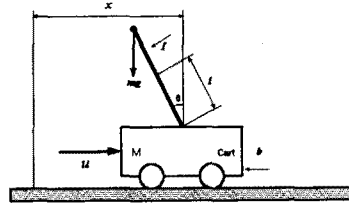


그림 5. 독립진자 시스템

표 2. 독립진자 시스템의 매개변수

M	카트의 질량	0.5 kg
m	진자의 질량	0.2 kg
l	카트의 마찰력	0.1 N/m/sec
i	진자 길이의 반	0.3 m
u	제어 입력	Newton
x	중력 가속도	9.8 m/sec ²
θ	진자의 기울어진 각도	degree
g	진자의 관성	0.006kg · m ²
x	카트의 움직인 거리	m

2.2.2 수학적 모델링

그림 4와 같은 독립진자를 고려하면, 이 시스템에 대한 선형 방정식 모델링은 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{K(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{K(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mb}{K(M+m)+Mml^2} & \frac{mgK(M+m)}{K(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{K(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{K(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} \cdot u \quad (5)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \quad (6)$$

여기에서, \dot{x} 는 카트의 속도, $\dot{\dot{x}}$ 는 가속도이고 θ 는 진자의 각속도 $\dot{\theta}$ 는 진자의 각 가속도이다.

2.3 최적화 자동 동조 알고리즘

제어기의 성능에 있어, 무엇보다도 중요한 것은 제어 파라미터 값을 최적으로 결정하는 것이다. 본 논문에서는 이러한 제어 파라미터 값을 최적으로 결정, 공정의 성능을 높이기 위하여 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 컴플렉스 알고리즘(Complex Algorithm)을 결합한 하이브리드 자동 동조 알고리즘을 사용한다. 이 하이브리드 자동 동조 알고리즘은 유전자 알고리즘의 한계효율(marginal efficiency)에 의한 지역극소(local minimum)로의 수렴 문제를 기하학적 개념(geometric concept)을 이용한 컴플렉스 알고리즘(Complex Algorithm)을 이용하여 최적을 파라미터를 찾아 제어기의 성능을 개선한다.

2.3.1 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)

생물진화(적자생존, 돌연변이)의 원리로부터 착안된 알고리즘으로 내재적 병렬처리 연산을 통한 전역탐색(Global Search)이 가능하므로 최적화 문제에서 탁월한 성능을 발휘한다. 제안된 모델의 최적화를 위하여 사용된 유전자 알고리즘은 2진(Binary) 코딩된 변수의 문자열을 개체로 그리고 개체의 비트(Bit)를 유전자로 취급하여 교차(Crossover), 돌연변이(Mutation), 재생산(Reproduction)과정을 반복 수행 하게되며, 동시에 여러 지점을 탐색하여 결과를 얻게 된다. 결과의 선택과정에서 적합도로 목적함수(ITAE) (식 7)를 사용한다.

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (7)$$

2.3.2 컴플렉스 알고리즘(Complex Algorithm)

컴플렉스 알고리즘은 기하학적으로 구성되는 n 차원 공간에서 목적함수를 최소화시키는 점을 찾게된다.

$f(x)$ 가 감소함에 따라,

$$g_i \leq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$X_i^{(l)} \leq X_i X_i^{(u)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$X_k = (X_1^k, X_2^k, \dots, X_n^k), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n, n+1, \dots, m$$

투영(Reflection) : $X_r = X_0 + \alpha(X_0 - X_r)$

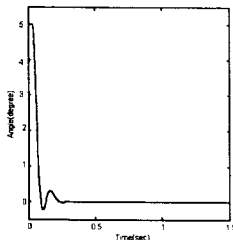
확장(Expansion) : $X_e = X_0 + \gamma(X_r - X_0)$

축소(Contraction) : $X_c = X_0 + \beta(X_k - X_0)$ (8)

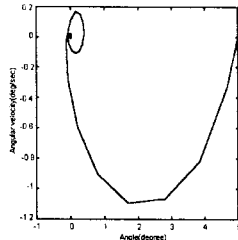
여기서, X_k 와 X_r 는 최대함수값 $f(X_k)$ 와 최소 함수값 $f(X_r)$ 에 상응하는 정점이며 α, β, γ 의 초기값은 투영, 확장, 축소를 사용함으로써 정의된다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

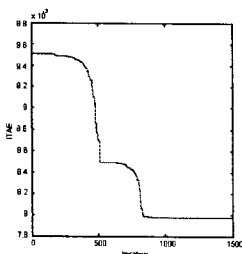
도립진자 시스템의 상태는 식 (5) 및 (6)에 나타난 변수 $x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}$ 에 의해서 표현된다. 본 논문에서는 도립진자의 초기 기울어진 각도를 임의로 설정한뒤, 진자를 수직으로 세우는 각도 제어만으로 시뮬레이션을 수행하였다. 진자의 기울어진 초기 각도는 5° 와 -15° 로 설정하였다.



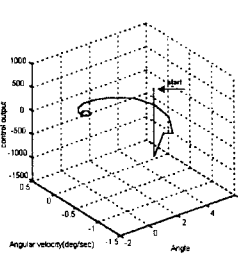
(a) HFC에 의한 진자의 각도출력



(b) 진자의 상태 궤적

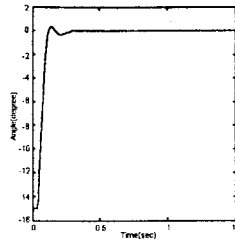


(c) ITAE 수렴과정

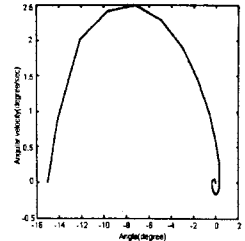


(d) 제어출력과의 비교

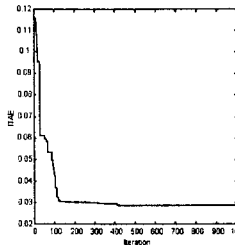
그림 6. 도립진자 제어(5° 일때)



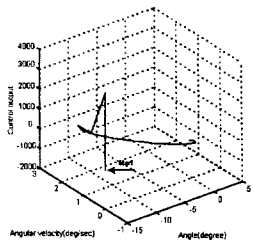
(a) HFC에 의한 진자의 각도출력



(b) 진자의 상태 궤적



(c)ITAE 수렴과정



(d) 제어출력과의 비교

그림 7. 도립진자 제어(-15° 일때)

4 결 론

본 논문에서는 하이브리드 자동동조 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 제어기 설계기법에 관하여 제안하였다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 하이브리드 퍼지 제어기가 빠른 속도로 기준점으로 수렴함을 알 수 있다. 이와 더불어, 향후 카트(Cart) 위치제어의 병행이 요구되어지며 나아가 실제 도립진자 시스템을 제작하여 제안된 알고리즘의 적용성과 우수함을 입증하는 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.E Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-wesley, 1989
- [2] J.R Koza, *Genetic Programming : On the Programming of Computers by means of Natural Selection*. MIT press, 1992
- [3]Katsuhiko Ogata, *Discrete-Time control systems*, Prentice-hall, 1987
- [4] Li-xin Wang, *A course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice hall, 1997.
- [5] Xian-Tu Peng, Self-regulating PID Controllers and its Applications to a temperature controlling process, *Fuzzy Computing*, pp 355-364
- [6] Ziegler, J. G. and , N. B. Nichols, Optimum setting for automatic controllers, *trans. ASME*, pp. 433-444,1942.
- [7] Sungkwun Oh, Taechon Ahn, Hyungsoo Hwang, Jongjin Park, and Kwangbang Woo, Design of Hybrid Fuzzy Controller with the Optimal Auto-tuning Method, *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 1, no 1, September, 1995
- [8] 오성권, "퍼지모델 및 제어이론과 프로그램", 技多利 출판사, 1999