

입자군집최적화 기반 볼빔시스템 제어를 위한 최적 Fuzzy PI 제어기 설계

정대형*, 조세희**, 오성권***
수원대학교*

Design of Optimized Fuzzy PI Controller Based on PSO for Ball & Beam System Control

Dae-Hyung Jung*, Se-Hee Jo**, Sung-Kwun Oh***
The University of Suwon

Abstract - 본 논문은 볼빔시스템 제어에 대해 입자군집최적화 (Particle Swarm Optimization: PSO)을 이용한 최적 퍼지제어기 설계방법을 연구한다. 볼빔 시스템은 모터와 빔, 움직이는 볼로 구성되며 볼의 위치제어를 기본 동작으로 한다. 본 논문에서는 제어성능이 우수한 퍼지제어기를 사용하여 제어시스템을 설계하는데, 퍼지제어기구조는 1차 제어기와 2차 제어기로 구성되고, 최적 퍼지제어기 설계를 위해 PSO를 사용하며 PSO는 초기값에 영향이 적고 일반적인 탐색알고리즘과 달리 초기 수렴의 문제를 극복한다. 본 논문에서는 퍼지제어기와 기존의 PD 제어기의 성능비교를 시도 하였다.

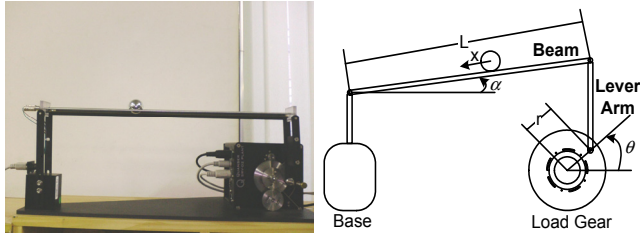
1. 서 론

볼빔 시스템은 모터와 빔이 직접 연결되어 모터의 제어를 통하여 볼의 위치를 제어하는 시스템으로써 물건 반송로봇의 운반체 균형문제, 2자유도 구름 이동 로봇, 우주항공분야의 비행체 자세제어 시스템 등과 같은 불안정한 시스템의 안정화와 관련된 다양한 문제에 응용이 가능하다. 본 논문에서는 볼빔 시스템의 제어를 위해 퍼지 제어기 구조를 제안한다. 퍼지 제어기는 비선형적으로 급격하게 변화하는 볼의 위치에 대응하여 제어기의 설정치를 효율적으로 결정한다. 따라서, 퍼지제어기는 안정적이고 빠른 응답을 얻을 수 있다. PSO 알고리즘은 새 떼와 물고기 떼와 같은 생체 군집의 사회적 행동양식을 바탕으로 한 최적화 알고리즘이다. 본 논문에서는 퍼지 제어기의 파라미터를 PSO 알고리즘을 사용하여 최적화 한다. 시뮬레이션과 실제 볼빔 시스템에 대한 제어기의 성능을 나타내고 PD제어기와 비교하여 퍼지 제어기의 우수성을 보인다.

2. 본 론

2.1 볼빔 시스템의 입출력 모델

볼빔 시스템의 간략한 모델 구성은 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 볼빔 시스템의 전체 구조

시스템의 제어목적은 모터의 전압을 인가하여 볼의 위치를 조정하는 것이다. 볼은 불안정한 상태에서 빔의 각도(α)와 모터의 움직임에 따라 안정한 상태를 유지할 수 있다. 급속 볼의 위치는 빔의 니크롭선의 저항으로 측정이 되고, 모터의 각(θ)은 엔코더로 측정된다. 비선형성이 강한 볼빔 시스템은 선형화된 식인 전달함수로 형태로 변환하여 모델링을 실시하면 다음 세 형태에 보여진 것 같이 전달함수로 나타낼 수 있다. 첫 번째는, Ball과 Beam에 대한 전달함수이다.

$$\frac{X(s)}{\alpha(s)} = \frac{5g}{7s^2} \quad \text{식(1)}$$

두 번째는, 모터의 전압(V_m)으로부터 나오는 출력인 각(θ)에 대한 전달함수는 식(2)이다.

$$\frac{\theta(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g \eta_m K_t K_g}{J_{eq} R_m + (B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_m K_t K_g^2) s} \quad \text{식(2)}$$

여기서, η_g 는 기어박스의 효율, η_m 은 모터의 효율, K_t 는 모터 토크상수, K_g 는 기어 비율이다. 그리고 J_{eq} 는 로드에 대한 관성모멘트, R_m 은 회로저항, B_{eq} 는 체동효율, K_m 은 역기전력 상수이다.

마지막으로, Lever arm이 이루는 각(θ)과 이에 연결된 Beam의 각(α)와의 관계는 식(3)과 같다.

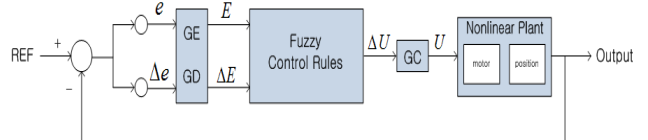
$$\frac{\alpha(s)}{\theta(s)} = \frac{r}{L} \quad \text{식(3)}$$

최종적으로, Ball & Beam시스템의 개방루프 전달함수는 식(4)와 같다.

$$\frac{X(s)}{V_m(s)} = \frac{\theta(s)}{V_m(s)} \frac{\alpha(s)}{\theta(s)} \frac{X(s)}{\alpha(s)} \quad \text{식(4)}$$

2.2 제어기의 모델링 (Fuzzy PI Controller)

i. 플랜트의 제어를 위하여 FuzzyPI Controller를 블록다이어그램으로 표현하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 제어기의 구조

ii. 퍼지 규칙

$$R_k = IF E \text{ is } A_i \text{ and } \Delta E \text{ is } B_j \text{ THEN } \Delta U \text{ is } C_i \quad \text{식(5)}$$

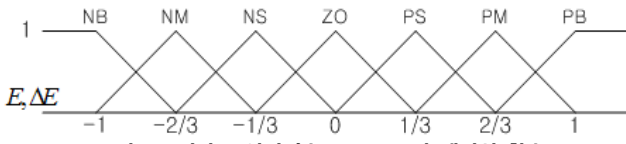
k = 제어규칙수 (1,2,3,4) E = 오차값
 ΔE = 오차의 변화값 ΔU = 제어입력의 변화값
 A_i = 퍼지 변수 C_i = 싱글톤

iii. 퍼지제어 규칙(Fuzzy Control Rule)

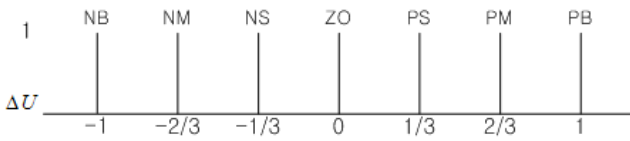
		ΔE						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

<그림 3> 퍼지 제어규칙

제어 규칙에서 입·출력 변수의 멤버십 함수는 각각 <그림 4>와 <그림 5>를 [-1,1]에 의해 규준화된 삼각형 형태를 사용한다.



〈그림 4〉 전반부 입력변수 $E, \Delta E$ 의 멤버십 함수



〈그림 5〉 후반부 출력변수 ΔU 의 멤버십 함수

각각의 규칙에 있어 전반부의 추론결과 값은 식 (6)과 같고 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론 결과 값은 식(7)과 같다.

$$W_i = \text{Pro}[\mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_i}(\Delta E_k)] \quad \text{식(6)}$$

$$\Delta U^* = \frac{\sum_{i=1}^N W_i C_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad \text{식(7)}$$

후반부 출력에서 추론은 간략추론으로 싱글톤(C_i)을 사용한다.

2.3 입자군집최적화(PSO: Particle Swarm Optimization)

1995년 Kennedy와 Eberhart에 의해 처음 소개된 PSO는 연속의 비선형 함수의 최적화를 위한 방법으로 소개 되었다. 이 방법은 간략화된 사회모델과 생체군집의 행동양식을 배경으로 한 최적화 알고리즘이다. PSO는 이론이 간결하여 알고리즘을 구현하기 쉽고 연산의 효율성이 뛰어나다. 따라서 적은 세대안에 최적의 해로 수렴하고, 다른 학습 알고리즘에 비해 안정적이다. PSO 알고리즘의 순서는 6단계로 나누어진다.

[Step 1] Initialization - 랜덤하게 m개의 Particle들을 탐색공간내에 생성한다. m개의 Particle들은 초기 Swarm이 된다. 또한, 초기 Particle velocity를 $[-v_{kmax}, v_{kmax}]$ 에서 임의로 선택한다. 초기 Swarm의 각 Particle은 목적함수를 이용하여 평가되고, 이들 모두는 pbest로 설정한다. 초기 Particle 최적의 값은 다시 gbest로 선정된다.

[Step 2] Inertia weight & velocity updating - 관성하중 값을 계산하고, j번째 particle velocity를 계산한다. 제한조건 $[-v_{kmax}, v_{kmax}]$ 을 확인한다.

[Step 3] Position updating - 식(8)에 의해 particle의 위치정보는 조절된다.

$$x_{jk}(t) = v_{jk}(t) + x_{jk}(t-1) \quad \text{식(8)}$$

여기서, $x_k^{\min} \leq x_{jk}(t) \leq x_k^{\max}$ 이다.

[Step 4] Individual & global best updating - 새로운 위치정보를 가진 Particle들은 목적함수에 의해 평가된다. 각 Particle의 적합도는 이전 pbest의 적합도와 비교되며 pbest를 재설정한다. pbest의 Particle중 최적 해를 가지는 Particle의 적합도와 이전 gbest의 적합도를 비교하여 최적 위치정보를 가진 particle을 gbest로 재설정한다.

[Step 5] Stopping criteria - 종료조건을 만족하면 탐색과정을 종료하고, 그렇지 않으면 [Step 2]부터 반복한다.

[Step 6] Optimal parameter - 최종적으로 생성된 gbest는 최적의 위치정보를 가진다.

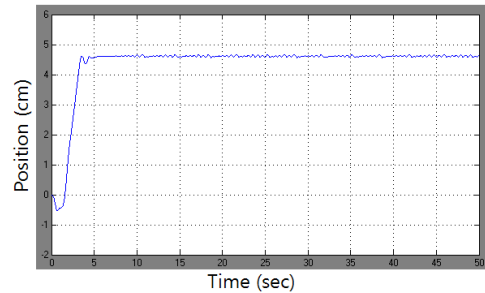
본 논문에서는 정상상태의 오차를 최소로 하기 위하여 목적함수로 ITAE(Integral of the Time-weighted Absolute value of the error)를 사용한다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad \text{식(9)}$$

PSO 알고리즘은 다차원인 제어기 파라미터들을 지역해에 수렴하지 않고 최적의 파라미터를 찾아낸다.

2.4 실험 및 결과고찰

본 논문에서는 PSO 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기와 PD제어기의 최적 파라미터를 찾아내고 두 종류의 제어기를 비교하여 그 성능을 평가한다. 또한 시뮬레이션으로 최적 설계된 제어기들을 Quanser사의 실제볼빔 시스템에 적용한다. <표 1>은 볼빔 시스템에 대한 파라미터 변수들을 나타내었다. PSO 알고리즘의 세대수는 300세대로 설정하고, Particle수는 150으로 설정한다. PSO의 최대 Particle 벡터인 vmax는 탐색공간의 20%로 설정하고, 가속상수(c1, c2)는 각각 2.0을 주어 목적지를 지나치거나 갑작스런 방향 전환을 줄인다. 또한, 최대 0.9에서 최소 0.4까지의 관성하중(w)을 주어 Particle의 전역탐색 능력과 지역탐색 능력을 조절한다.



〈그림 6〉 퍼지제어기 시뮬레이션 결과

<그림 6>의 시뮬레이션 결과로 퍼지제어기는 우수한 성능을 보이며, 설정치에 대한 수렴속도 또한 우수한 것으로 나타난다.

3. 결 론

본 논문에서는 입자군집최적화알고리즘(PSO)을 이용하여 Fuzzy PI 제어기의 최적설계에 관하여 연구하였다. 볼빔 시스템의 제어목적은, 모터에 기전력을 인가하여 볼의 위치를 조정하는 것으로 볼은 불안정한 상태에서 빔의 각도와 모터의 움직임에 따라 안정한 상태를 유지하게 하는 것이다. Fuzzy PI 제어기는 고차원의 비선형 시스템의 제어에 성공적으로 적용되어왔다. 기존의 PID제어기가 선형 시스템에서 우수한 성능을 나타내지만 고차 비선형 동적 시스템의 수학적 모델 설계에 있어서는 효과적이지 못한 특성을 가지고 있었다. 이의 단점을 보완하기 위한 퍼지제어기는, 본 연구에서 비선형의 동적 시스템에 잘 적용 될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0074928) 그리고 이 논문은 2010년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2010-D00065).

[참 고 문 헌]

- [1] Sung-Kwun Oh and Seok-Beom Roh, "The Design of Fuzzy Controller Based on Genetic Optimization and Neurofuzzy Networks", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 4, PP.653~665, 2010
- [2] Yanan Zhao and Emmanuel G. Collins, Jr., "Fuzzy PI Control Design for an Industrial Weigh Belt Feeder", IEEE, TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, VOL. 11, NO. 3, JUNE 2003
- [3] Mohammed Obaid Ali, S.P.Koh, K.H.Chog, S.K.Tiong and Zeyad Assi Obaid, "Genetic Algorithm Tuning Based PID Controller for Liquid-Level System", Proceedings of ICoMMS, 11-13 October 2009
- [4] 오성권, "C프로그래밍에 의한 퍼지모델 및 제어시스템", 내하출판사, PP.391~396, 2002
- [5] 오성권, "프로그래밍에 의한 컴퓨터지능", 내하출판사, PP.165~182, 2002