

볼빔 시스템에 대한 Partical Swarm Optimization을 이용한 최적 퍼지 cascade 제어기 설계

장한중¹, 최정내², 오성권¹

¹수원대학교 전기공학과, ²대림대학 전기과

Design of Optimized Fuzzy Cascade Controller Based on Partical Swarm Optimization for Ball & Beam System

Han-Jong Jang¹, Jeung-Nae Choi², *Sung-Kwun Oh¹
¹Department of Electrical Engineering, The University of Suwon
²Department of Electrical Engineering, Daelim College

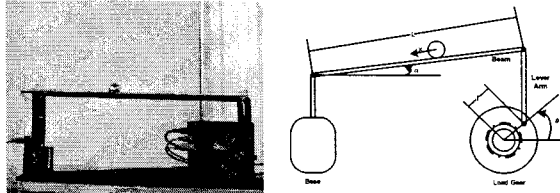
Abstract - 본 연구에서는 볼빔 시스템 제어에 대해 particle swarm optimization을 이용한 최적 퍼지 cascade 제어기 설계 방법을 소개한다. 볼빔 시스템은 모터, 빔과 움직이는 볼로 구성되며 볼의 위치를 제어하는 시스템이다. 본 논문에서는 많은 분야에서 제어 성능이 우수한 퍼지제어기를 cascade형식으로 설계하여 볼빔 시스템을 제어한다. 퍼지 cascade 제어기 구조는 1차 제어기와 2차 제어기로 구성되어 있다. 퍼지 퍼지 제어기를 설계하기 위하여 PSO를 사용한다. PSO는 초기값에 영향이 적고 일반적인 탐색알고리즘과 달리 초기 수렴의 문제점을 극복한다. 본 논문에서 퍼지 제어기와 기존의 PD 제어기의 성능을 비교 분석한다.

1. 서 론

볼빔 시스템은 모터와 빔이 직접 연결되어 모터의 제어를 통하여 볼의 위치를 제어하는 시스템으로써 물건 반송 로봇의 운반체 균형 문제, 2 자유도 구동 이동 로봇, 우주 항공 분야의 비행체 자세 제어 시스템 등과 같은 불안정한 시스템의 안정화와 관련한 다양한 문제에 응용이 가능하다[1,2]. 본 논문에서는 퍼지 제어를 기반으로 하여 볼빔 시스템의 제어를 위해 퍼지 cascade 제어기 구조를 제안한다. 제안 구조에서 외부 퍼지 제어기는 비선형적으로 급격하게 변화하는 볼의 위치에 대응하여 내부 퍼지제어기의 설정치를 효율적으로 결정한다. 따라서, 내부 퍼지 제어기는 안정적이고 빠른 응답을 얻을 수 있다. PSO 알고리즘은 새 떼와 물고기 떼와 같은 생체 군집의 사회적 행동양식을 바탕으로 한 최적화 알고리즘이다[3]. 본 논문에서는 퍼지 cascade 제어기의 파라미터를 PSO 알고리즘을 사용하여 최적화한다. 시뮬레이션과 실제 볼빔 시스템에 대한 제어기의 성능을 나타내고 PD cascade 제어기와 비교하여 퍼지 cascade 제어기의 우수성을 보인다.

2. 볼빔 시스템의 입출력 모델

볼빔 시스템의 간략한 모델 구성은 그림 1과 같다.



(a) Practical Ball & Beam system (b) Mathematical illustration of Ball & Beam
 그림 1. 볼빔 시스템의 전체 구조

시스템의 제어 목적은 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 니크롬선의 저항으로 측정되고, 모터의 각(θ)은 엔코더로 측정이 된다.

비선형성이 강한 볼빔 시스템은 선형화된 식인 전달함수 형태로 변환하여 모델링을 실시하면 다음 세 형태에 보여진 것 같이 전달함수로 나타낼 수 있다.

첫 번째로, Ball과 Beam에 대한 전달함수이다.

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

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

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

여기서, η_g는 기어박스의 효율, η_m은 모터의 효율, K_t는 모든 토크상수와 K_g는 SRV02 시스템의 기어 비율이다. 그리고 J_{eq}는 로드와 관성 모멘텀, R_m는 회로저항, B_{eq}는 제동효율과 K_m은 역 기전력 상수이다.

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

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

최종적으로, Ball & Beam 시스템의 개방 루프 전달함수는 다음과 같다.

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

3. Fuzzy cascade 제어구조

본 연구에서는 볼빔 시스템을 정밀하고 안정적이며 최적의 제어하기 위하여 그림 2와 같이 앞서 설명한 퍼지 제어기 두 개를 결합시킨 퍼지 cascade 제어기구조를 나타낸다.

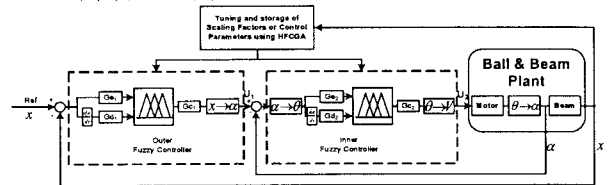


그림 2. 퍼지 cascade 제어기 구조

볼빔 시스템을 총괄적으로 제어하는 외부 부분의 퍼지 제어기는 입력인 볼의 위치를 받아서 퍼지 추론에 의하여 정확하고 빠르게 볼의 위치를 제어하게 된다. 퍼지 제어기에 사용한 규칙은 아래와 같다.

$$R^k: E_i \text{ is } A_1^k \text{ and } \Delta E_i \text{ is } A_2^k \text{ then } U_i = B^k \quad (5)$$

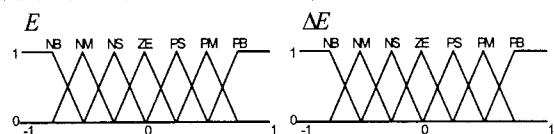
여기서, R^k는 k 번째의 제어규칙(k=1, 2, ..., m), E_i는 외부 제어루프의 오차와 내부 제어루프의 오차(i=1, 2), ΔE_i는 외부 제어루프의 오차의 변화량과 내부 제어루프의 오차의 변화량이다. A₁^k, A₂^k는 퍼지 변수, U_i는 외부 제어루프의 출력과 내부 제어루프의 출력이며 B^k는 제어기 수행의 상수 변수(singleton)이다.

퍼지 제어기에 사용한 퍼지제어기의 Rule-Base는 표 1과 같다.

<표 1> 퍼지제어기의 Rule-Base

		E						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ME	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

표 1과 같은 Rule-Base와 그림 3, 4와 같이 삼각형 멤버십 함수(Membership Function)와 간략 추론방식을 이용하여 입력과 출력 공간을 정의한다. 여기서 입력과 출력 공간은 [-1, 1]로 정규화 하였다.



(a) 입력 E의 MF (b) 입력 ΔE의 MF
 그림 3. 각 입력에 대한 Membership Functions

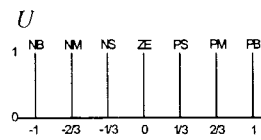


그림 4. 출력에 대한 Membership Function

4. Particle Swarm Optimization

1995년 Kennedy와 Eberhart에 의해 처음 소개된 PSO는 연속의 비선형 함수의 최적화를 위한 방법으로 소개되었다. 이 방법은 간략화된 사회 모델과 생체 군집의 행동양식을 배경으로 한 최적화 알고리즘이다[4]. PSO는 이론이 간결하여 알고리즘을 구현하기 쉽고 연산의 효율성이 뛰어나다. 따라서 적은 세대만에 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 $[-v_{max}, v_{max}]$ 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, j 번째 particle velocity를 계산한다. 제한조건 $[-v_{max}, v_{max}]$ 을 확인한다.

[Step 3] Position updating - 식 (6)에 의해 particle의 위치정보는 조절된다.

$$x_{jk}(t) = v_{jk}(t) + x_{jk}(t-1) \quad (6)$$

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 particle 중 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 목적함수 IAE(Integral of the Absolute value of Error)를 사용한다.

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (7)$$

PSO 알고리즘은 다차원인 제어기 파라미터들을 지역해에 수렴하지 않고 최적의 파라미터를 찾아낸다

5. 실험 및 결과고찰

본 논문에서는 PSO 알고리즘을 이용하여 퍼지 cascade 제어기와 PD cascade 제어기의 최적의 파라미터를 찾아내고 두 종류의 제어기를 비교하여 그 성능을 평가한다. 또한 시뮬레이션으로 최적 설계된 제어기들을 Quanser사의 실제 모델 볼빔 시스템에 적용한다.

볼빔 시스템의 모델은 식 10에서 나타내었다. 표 2는 볼빔 시스템에 대한 파라미터 변수들을 나타낸다.

<표 2> Ball & Beam 파라미터 변수

Symbol	Description	Symbol	Description
K_t	Motor torque constant	η_g	Gearbox efficiency
K_m	Back-emf constant	η_m	Motor efficiency
K_g	SRV02 system gear ratio	m	Mass of the Ball(kg)
R_m	Armature resistance	F_{tx}	Translational force on the Ball
J_{eq}	Equivalent moment of inertia at the load	F_{rx}	Rotational force on the Ball
B_{eq}	Equivalent viscous damping coefficient	x	Ball Position
r	Lever arm offset(inch)	α	Beam pitch
L	Beam Length(inch)	θ	Servo load gear angle
g	Earth's gravitational constant(m/s ²)	V_m	Motor Input voltage

퍼지 cascade 제어기의 최적의 파라미터를 찾기 위하여 적용된 PSO 알고리즘의 주요 파라미터와 연산자는 표 3에 나타낸다.

<표 3> PSO 알고리즘의 파라미터 및 연산자

Parameter	Particle Swarm Optimization	
	세대수	300
	Particle 수	150
	v_{max}	탐색공간의 20%
	c_1, c_2	각 2.0
	$[w_{min} w_{max}]$	[0.4 0.9]

PSO 알고리즘의 세대수는 300세대로 설정한다. PSO 알고리즘의 particle 수를 150으로 설정한다. PSO의 최대 particle 벡터인 v_{max} 는 탐색공간의 20%로 설정하고, 가속상수(c_1, c_2)는 각각 2.0을 주어 목적지를 지나치지나

갑작스런 방향전환을 줄인다. 또한, 최대 0.9에서 최소 0.4까지의 관성하중(w)을 주어 particle의 전역탐색 능력과 지역탐색 능력을 조절한다.

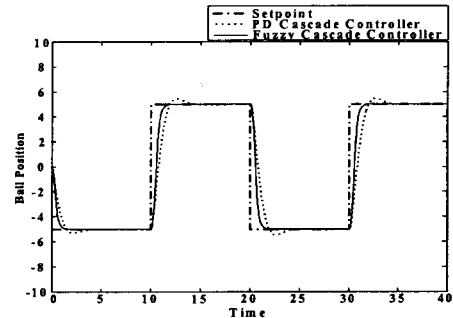


그림 5. PD cascade 제어기와 퍼지 cascade 제어기 시뮬레이션 결과 비교

그림 5의 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 퍼지 cascade 제어기는 오버슈트가 없어 PD cascade 제어기에 비해 우수한 성능을 보이며, 설정치에 대한 수렴속도 또한 우수한 것으로 나타난다.

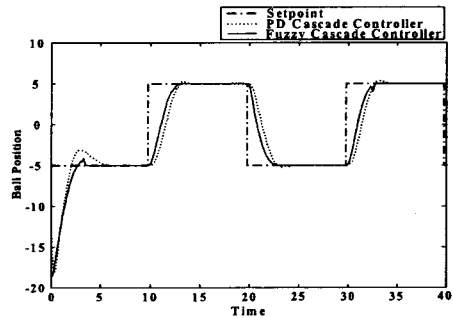


그림 6. 실제 Plant 결과 비교

그림 6은 실제 볼빔 시스템에 대하여 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 적용한 결과이다. 실제 플랜트와 시뮬레이션 결과의 차이는 볼의 관성, 빔에서의 위치 측정 오차, 실험의 장소와 환경 등에 의해서 비선형적 특성이 달라지기 때문이다. 실제 볼빔 시스템에서도 퍼지 cascade 제어기는 PD cascade 제어기보다 빠르고 안정적인 제어를 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 볼빔 시스템에 제어를 위한 퍼지 cascade 제어기를 설계하고, PSO 알고리즘을 이용하여 제어기의 파라미터를 최적화하였다.

비선형성 특성을 갖는 볼빔 시스템 제어를 위하여 두 개의 내부 및 외부 퍼지 제어기로 구성된 퍼지 cascade 제어구조를 제안하였다. 내부 퍼지 제어기는 모터의 위치제어를 위해 사용되고, 외부 퍼지 제어기는 볼의 위치변화에 따른 내부 퍼지 제어기의 설정치를 결정하는 역할을 한다.

본 논문에서는 PD cascade 제어구조와 퍼지 cascade 제어구조를 비교 수행하였다. 퍼지 cascade 제어기는 PD cascade 제어기보다 모터의 각(θ)과 빔의 기울기(α)의 응답이 빠름을 알 수 있었다. 외부 루프에 퍼지 제어기는 PD 제어기보다 적은 출력을 발생하며 내부 루프의 퍼지 제어기는 적은 출력을 입력으로 받아 큰 출력을 내어 모터를 빠르게 제어한다. 따라서 볼의 위치에 대한 제어에서는 PD cascade 제어기보다 퍼지 cascade 제어기가 오버슈트가 없고 훨씬 더 빠르게 수렴한다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구인(F01-2007-000-10058-0).

참고문헌

- [1] J. Hauser, S. Sastry and P. Kokotovic, "Nonlinear control via approximate input-output linearization : the ball and beam example," Automatic Control, IEEE Trans. on, Vol. 37, Issue 3, pp.392-398, 2002.
- [2] John Hauser, Shankar Sastry and Peter Kokotovic, "Nonlinear Control Via Approximate Input-output Linearization: The Ball and Beam Example," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 37, No. 3, pp. 392-398, 1992.
- [3] K.-S Kim, B.-J Park and S.-K Oh, "The Design of Polynomial Network Pattern Classifier based on Fuzzy Inference Mechanism and Its Optimization", KFIS, Vol. 17, No. 7, pp970-976, 2007.
- [4] J. Kennedy, "The particle swarm: Social adaptation of knowledge," Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Comput., pp. 303-308, 1997.