

유전자 알고리즘을 이용한 Ball-Beam 시스템의 제어에 관한 연구

A Study of Ball-Beam system control using Genetic Algorithms

°이 남 기°,박 종 범°,조 황°

°광운대학교 제어계측공학과(Tel:02-940-5150; E-mail:jackey@daisy.kwangwoon.ac.kr)

°한전연구원 기술센터 자동제어그룹(Tel:042-865-5707; Fax:042-865-104)

Abstracts In this paper, feedback controller is designed for ball-beam system using genetic algorithms. A genetic algorithms are implemented for optimizing gain parameters of feedback controller. We can find optimal point in multi-dimensional search space by using genetic algorithms. Performance of controller is tested by simulation of ball-beam system.

keywords genetic algorithms, feedback control, optimization, ball-beam system, non-linear control

1. 서론

Ball-Beam 시스템은 전형적인 비선형 시스템으로 제어이론의 실험 시스템으로 잘 알려져 있다. 일반적인 비선형 시스템의 제어 방법은 비선형항들을 선형화한 후 선형제어 이론을 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 비선형성이 강한 시스템에 있어서 선형화는 비선형항의 제거를 전제로 하기에 시스템이 간략화되고 따라서 시스템이 선형화 조건을 벗어나게 되면 제어에 있어서 확실한 효과를 기대하기 어렵다. 따라서 비선형항을 포함하는 시스템의 모델링식을 갖는다하여도 일반적인 선형 제어 기법의 제어기 설계를 위해서는 시스템의 선형화가 수행되어야 하기 때문에 진정한 의미의 최적화를 이룰수가 없다.

유전자 알고리즘은 다윈(Darwin)의 자연 선택에 의한 진화 원리와 멘델(Mendel)의 유전학에 근거한 최적해 탐색 방법으로 기존의 최적해 탐색 방법과는 달리 국부탐색이 아닌 여러해를 동시에 탐색하는 전역탐색으로 전역적인 최적해를 발견할 높은 가능성을 갖고 상호적인 환경에서 시스템의 응답(response)과 유전자 연산을 통하여 정확한 해의 지식없이도 적합한 해를 찾아내며 몇개의 개별적인 해를 통해 병렬적으로 샘플링하기 때문에 국부 최적(local minima)에 쉽게 빠지지 않으며 목적함수에 연속성이나 미분가능등의 수학적 제약이 없다는 장점을 갖는다. 이런 여러가지 장점으로 스케줄링, 적응제어, 운송문제, 최적제어문제등 여러분야에서 다양하게 적용되고 있다.

본 논문에서는 비선형항을 포함하는 Ball-Beam 시스템의 제어기로서 피드백 제어기를 설계하고 그 파라미터의 최적화에 유전자 알고리즘을 적용하여 유전자 알고리즘의 우수성을 보이고자 한다.

논문의 내용은 다음과 같이 이루어진다. 2장에서는 유전알고리즘을 간략히 소개하며 3장에서는 Ball-Beam 시스템의 모델링을 보인다. 그리고 4장에서는 유전자알고리즘의 적용한 피드백 제어기의 특성을 보인다.

2. 유전자 알고리즘

2.1 gradient method와의 차이

최적화 이론으로는 유전자 알고리즘외에도 일반적으로 gradient 를 이용하는 몇가지 방법들이 있다. 유전자 알고리즘과 gradient 를 이용한 방법의 차이점은 다음과 같다.

(i) 유전자 알고리즘은 파라미터 자체가 아닌 파라미터의 코드를 통해서 최적화에 이른다.

(ii) 유전자 알고리즘은 문제의 가능한 해를 갖는 집단을 탐색하여 최적화에 이른다.

(iii) 유전자 알고리즘은 목적함수의 평가(assessment)를 이용한다.

(iv) 유전자 알고리즘은 확률적 규칙을 이용한다.

2.2 유전 알고리즘의 탐색 및 최적화 방법

유전자 알고리즘은 생물학적인 유전인자인 염색체에 해당 하는 문자열을 이용하여 생물과 같은 번식, 교배, 변이를 거쳐 다음 세대의 자손을 만들어 낸다. 유전자 알고리즘의 탐색과 최적화의 방법은 다음과 같다.

(a) 초기해 집단 $\Pi(0) = \sum_{m=1}^M A_m(0)$, M은 전체 개체의 수, 를

랜덤하게 생성한다.

(b) 각 개체의 적합도, $\mu(A_m(T))$ 를 계산하고 저장한다.

(c) 집단 $\Pi(T)$ 에서 확률함수

$$p(A_m(T)) = \mu(A_m(T)) / \sum_{i=1}^M \mu(A_i(T)) \quad (1)$$

에 의해 한개 이상의 개체를 선택한다.

(d) 몇개의 유전 연산자를 선택된 개체에 적용시켜 새로운 개체 $A_m'(T)$, $m=1, \dots, N$ 을 생성한다. N은 후손의 개수이다.

(e) 후손 A_m' 와 현 세대집단 $\Pi(T)$ 의 개체를 선택하여 다음 세대 집단 $\Pi(T+1)$ 를 생성한다.

(f) 종료조건을 만족하면 종료하고 그렇지 않으면 다시 단

계 (b)과정으로 간다.

2.3 유전자 알고리즘의 연산들

가) 번식(reproduction)

적합도에 의해 현재의 집단에서 개체를 랜덤하게 선택하여 새로운 세대의 집단을 만드는 과정이다. 물론 적자생존의 원리에 의해 높은 적합도를 갖는 개체는 그렇지 못한 개체보다 다음 세대의 구성에 참가할 확률이 높다.

본 논문에서는 선택적 배양(Selective breeding)의 방법을 이용하였다. 그 과정은 다음과 같다.

- (a) 일반적인 방법에 의해 초기 집단을 구성한다
- (b) 각각의 개체들을 평가한다
- (c) 부모 집단으로부터 선택된 개체에 유전 연산자를 적용시켜 새로운 자식 세대집단을 형성한다.
- (d) 자식 세대 집단을 평가한다.
- (e) 다음 세대 집단은 부모집단과 자식세대집단의 가장 좋은 개체를 선택하여 형성한다.
- (f) 다시 (c)의 과정으로 간다.

위의 방법은 좋은 평가를 받은 개체가 확률적 선택에 의해 소멸되는 것을 막아준다.

나) 교배(crossover)

유전자 알고리즘에서 가장 주요한 연산자이다. 현 세대집단의 각 개체의 유전 정보를 서로 교환하여 새로운 특성을 갖는 개체를 만들어 내는 과정이다.

다) 변이(mutation)

복제와 교배과정은 집단의 개체들이 현재 가지고 있는 정보들을 채용하여 탐색하고 결합하는 과정이지만 변이 과정은 현재 집단에 존재하지 않은 새로운 유전 정보를 갖는 개체를 만드는 과정이다.

3. Ball-beam 시스템 모델링

제어기의 성능 검증에 많이 도입되는 ball-beam 시스템은 회전운동이 가능한 긴 막대 위에 공을 올려 놓아 공이 막대의 임의의 위치에 위치하도록 제어하기 위한 실험 장치이다. 모델링은 라그랑지안 방정식(Lagrangian equation)을 이용하였다. 그림1.은 시스템의 개략도와 모델링 파라미터들이다.

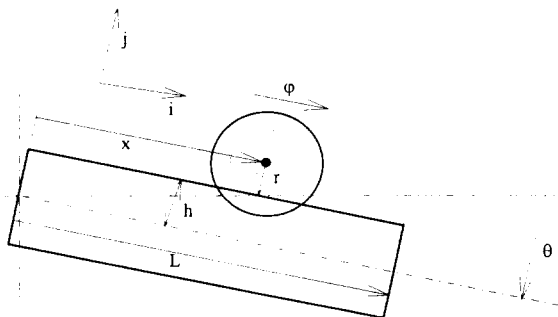


그림1. Ball-beam 시스템의 개략도
Fig. 1. Diagram of ball-beam system

라그랑지안은 다음과 같다.

$$L = T - V \quad (2)$$

$$T = K.E_{ball} + K.E_{beam} = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}I_b\omega^2 + \frac{1}{2}I_o\theta'^2 \quad (3)$$

여기서 I_b, I_o 는 공과 막대의 이너서이고 v_x 는 공의 중심질량의 절대속도이고 ω_x 는 공의 절대각속도이고 다음과 같다.

$$\vec{r}_x = xi + (r+h)j \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_x &= x'i + xi' + (r+h)j' + (r+h)j'' \\ &= x'i + x(-\theta') + (r+h)(\theta') \\ &= (x' + (r+h)\theta')i - x\theta'j \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{x}{r} \quad (6)$$

$$\omega = \varphi' + \theta' = \frac{x'}{r} + \theta' \quad (7)$$

여기서 r_x 는 공의 중심질량의 절대거리이다. 식(5)와 식(7)을 식(3)에 대입하면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2}[m\{(x' + (r+h)\theta')^2 + x^2\theta'^2\} + I(\frac{x'}{r} + \theta')^2 + I_b\theta'^2] \quad (8)$$

그리고 위치 에너지 V는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= V_b + V_o \\ &= -m(xi + (r+h)f)(g \sin \theta - g \cos \theta) - \frac{1}{2}MgL \sin \theta \\ &= -mgx \sin \theta + mg(r+h) \cos \theta - \frac{1}{2}MgL \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 라그랑지안 방정식은 다음과 같으므로

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

전체운동 시스템의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\therefore (m + \frac{I_b}{r^2})x'' + (m(r+h) + \frac{I_b}{r})\theta'' - mx\theta'^2 - mg \sin \theta = 0 \quad (11)$$

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 펜티엄 60에서 C언어를 사용하여 수행하였다. 시뮬레이션의 전체 개략은 그림2.와 같다.

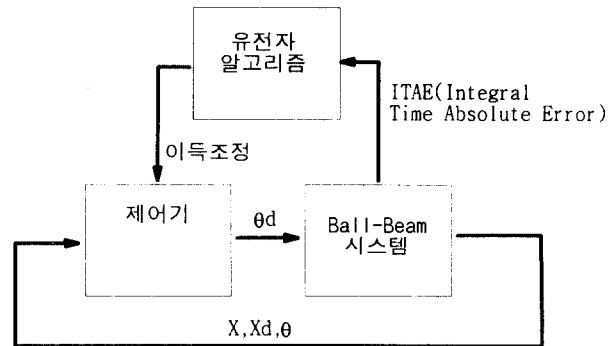


그림2. 최적화 개략도

Fig. 2. Block diagram of optimization

4.1.1 Ball-beam 시스템

시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 표 1.과 같다.

표 1. Ball-beam 시스템 파라미터
Table 1. Parameters of ball-beam system.

parameters	values	units
m	0.02	kg
r	0.013	m
h	0.007	m
I_s	0.000001352	kgm ²

4.1.2 제어기 구성

본 제어기의 목적은 막대의 각속도를 변화시켜 공을 원하는 지점에 위치시키는 것이다.

시스템의 제어신호는 각속도이고 제어기의 피드백 입력은 막대의 각, 공의 위치, 공의 속도이고 각각의 피드백 이득은 유전자 알고리즘을 이용하여 결정한다. 제어기의 구성은 다음과 같다

$$\theta' = k1 \cdot X_e + k2 \cdot X' + k3 \cdot \theta \quad (12)$$

제어기의 성능을 나타내는 ITAE는 다음과 같이 표현된다.

$$ITAE = \int |x_e| \cdot t \, dt \quad (13)$$

4.1.3 유전자 알고리즘

복제(reproduction)는 선택 배양(Selective breeding)의 방법을 선택했다. 유전 알고리즘의 파라미터들은 다음과 같다.

population size:1000 crossover:0.8
mutation rate:0.2 crossover point:3

본 논문에서의 유전자 알고리즘의 목적은 초기치 $X=0.2m$ 에서 기준입력 $X_t=0.8m$ 의 8초간의 ITAE1와 초기치 $X=0.8m$ 에서 기준입력 $X_t=0.2m$ 의 8초간의 ITAE2의 합을 최적화 시키는 $k1, k2, k3$ 를 구하는 것이다. 식(12)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\theta' = \frac{K1}{10000} (X_e + \frac{K2 \times X' + K3 \times \theta}{10000}) \quad (15)$$

위의 식은 식(12)를 유전자 알고리즘에 적합하도록 표현한 것이다. 그리고 $K1=16bits, K2=16bits, K3=16bits$ 의 길이로 정한다. 따라서 $K1, K2, K3$ 의 범위는 정수형 범위인 $-32768 \sim 32767$ 이다.

유전 알고리즘의 적합도 함수는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{ITAE1 + ITAE2} \quad (16)$$

f를 극대화함으로써 시스템의 응답을 최적화할 수 있다.

4.2 결과

유전자 알고리즘의 집단개체수는 1000이고 교배는 3점 교배 방식으로 3번의 수행하였다. 종료 조건은 48bits의 코드가 90% 이상 수렴시에 종료된다. 표 2. 는 최적화 결과이다.

표 2. 최적화 결과

Table 2. The results of optimization

수행횟수	K1	K2	K3	f
1회	-32768	10752	15462	116266.23
2회	-26624	9600	21058	420213705.44
3회	-32768	11264	20560	259392.26

시뮬레이션 결과 수행횟수 2회에서 f가 극대화 됨을 알수 있다. 그 결과 피드백 이득 $k1=-2.2624, k2=2.5590, k3=5.6065$ 으로 결정된다.

4.2 결과

위의 파라미터를 이용한 피드백제어기의 효과를 그림.3 에서 보인다. 그림 3. 은 초기치 0에서 제어입력 0.8로 추종함을 보인다.

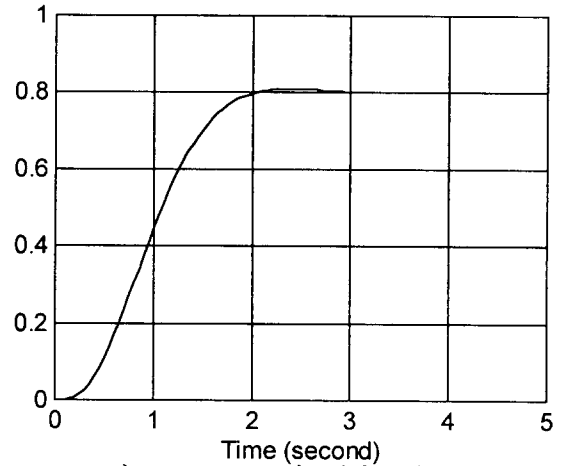


그림 3. Ball-beam 시스템의 단위 응답 (x)
Fig. 3. Step response of the ball-beam system(x)

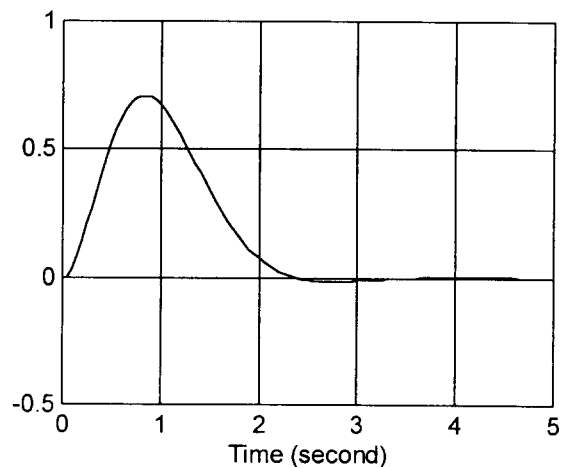


그림 4. Ball-beam 시스템의 단위 응답 (x')
Fig.4. step response of ball-beam system(x')

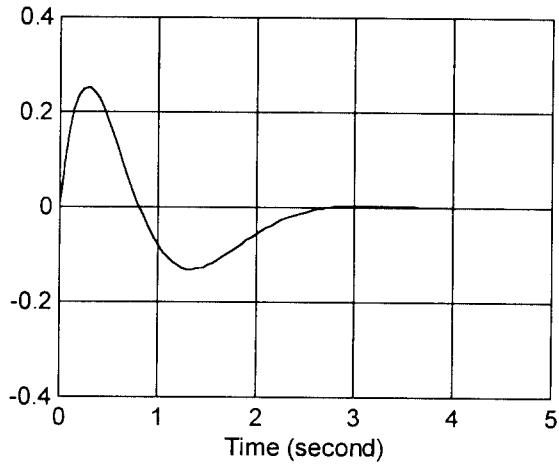


그림 5. Ball-beam 시스템의 단위응답(θ)

Fig.5. step response of ball-beam system(θ)

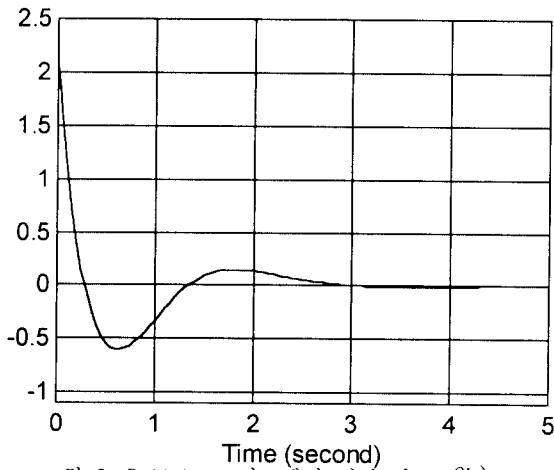


그림 6. Ball-beam 시스템의 제어 신호(θ')

Fig.6. Control signal of ball-beam system(θ')

참고문헌

- [1] A. Varsek, T. Urbancic and B. Filipic, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning", IEEE Trnas. On Systems, Man and Cybernetics, vol.23, no.5, pp.1330-1339, 1993.
- [2] D. A. Linkens and H. O. Nyongesa, "Genetic algorithms for fuzzy control Part1:Offline system development and application", IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol.142, No.3, pp.161-176, 1995
- [3] S. R. Ladd, "Genetic Algorithms in C++", M&T Books, 1995
- [4] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs", Springer-Verlag, 1994
- [5] B. Shahian and M. Hassul, "Control System Design Using Matlab", Prentice-Hall, 1993
- [6] K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, 1990