

GA-퍼지 제어를 이용한 크레인의 안정화에 관한 연구

오경근 · 허동렬* · 주석민* · 정형현*
*동아대학교 전기공학과

A Study on the stabilization of Crane system using GA-fuzzy controller

K. G. Oh · D. R. Hur* · S. M. Joo* · H. H. Chung*
*Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

Abstract - In this paper, we design a GA-fuzzy controller for position control and anti-swing at the destination point. Applied genetic algorithm is used to complement the demerit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and control rules. Lagrange equation is used to represent the motion equation of trolley and load in order to obtain mathematical modelling.

1. 서 론

크레인 시스템은 화물 이송시 효율성을 극대화하기 위하여 최단 시간내에 화물을 가장 안정한 상태로 원하는 목적지에 이송하여야 한다. 그러나 크레인 시스템은 복잡한 구조로 인하여 많은 비선형 요소를 내포할 뿐만 아니라, 단진자 운동을 하며 다양한 하중의 화물을 이송하여야 하기 때문에 만족스러운 성능을 유지하는 제어를 설계하는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 극복하고 효과적인 제어를 위해 많은 연구들이 진행되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 화물의 위치 제어 및 흔들림 제어를 통한 안정화를 위하여 퍼지 제어가 가지고 있는 외부 환경 변화에 적절하게 대응할 수 있는 장점과 퍼지 제어기의 구성요소인 스케일링 계수, 멤버쉽 함수, 제어규칙 선정이 곤란하다는 단점을 보완할 수 있는 유전 알고리즘을 이용하여 GA-퍼지 제어를 설계하고자 한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 목표치 변경 및 외란 적용시 제안한 GA-퍼지 제어가 크레인의 위치 및 흔들림 제어에서 강인함을 입증하고자 한다.

2. 시스템 동특성

2.1 크레인 모델링

본 논문에서 제시한 크레인은 호이스트 드라이버와 트롤리 드라이버로 나눌 수 있다. 트롤리의 수평방향으로의 이동은 트롤리 드럼을 원하는 방향으로 회전하여 이동하게 되며, 컨테이너의 수직방향으로의 상승이동은 호이스트 드라이버를 이용하여 원하는 높이만큼 이동시키고, 하강이동은 컨테이너와 스프레더의 자중에 의해 자유 낙하하게 된다. 그림 1은 크레인의 개략적인 그림이다.

이에 대해 Lagrange 운동방정식을 사용하여 트롤리에 대한 운동방정식과 화물에 대한 운동방정식을 세우면 식(1), (2)와 같다.

$$(M_t + M_p)\ddot{r} + M_p \ell \ddot{\theta} \cos \theta - M_p \ell \dot{\theta}^2 \sin \theta + B_r \dot{r} = F \quad (1)$$

$$M_p \ell^2 \ddot{\theta} + M_p \ell \cos \theta \dot{r} + M_p g \ell \sin \theta = 0 \quad (2)$$

이를 정리하면 식(3), (4)와 같은 크레인의 수학적 모델로 표시할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = - \frac{M_p \ell \cos \theta \dot{r} + M_p g \ell \sin \theta}{\ell^2 M_p} \quad (3)$$

$$\ddot{r} = \frac{F + M_p \ell \sin \theta \dot{\theta}^2 + M_p g \cos \theta \sin \theta - B_r \dot{r}}{M_t + M_p - M_p \cos^2 \theta} \quad (4)$$

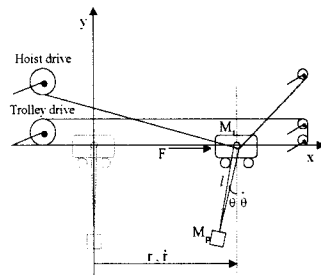


Fig. 1. Schematic diagram of a crane

여기서 r은 트롤리의 이동거리, l은 트롤리와 화물 사이의 길이, theta는 수직방향에 대한 로프의 흔들림 각도, M_t는 트롤리의 질량, M_p는 화물의 질량, g는 중력가속도, B_r은 등가점성마찰계수, F는 트롤리에 작용하는 힘으로 정의한다.

2.2 모델의 단순화

앞의 운동방정식은 비선형 방정식으로서 선형 제어기의 설계를 위해서 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 화물은 평면운동만을 한다. 즉, 화물의 흔들림은 트롤리의 이동방향과 수직선이 이루는 평면안에서만 발생한다고 가정한다.
- (2) 화물의 흔들림 각도 theta의 변동이 매우 작다고 간주한다.
- (3) 화물과 트롤리 사이의 연결로프는 변동이 없으며, 연결 관절부의 마찰은 무시한다.
- (4) 트롤리와 화물 사이의 로프는 무한대의 탄성을 가진다.

위 가정에 의해 식(3), (4)를 선형화하면 식(5), (6)과 같이 표현된다.

$$\ddot{\theta} = g \left(\frac{M_t + M_p}{M_t \ell} \right) \theta - \frac{B_r}{M_t \ell} \dot{r} + \frac{1}{M_t \ell} F \quad (5)$$

$$\ddot{r} = - \frac{B_r}{M_t} \dot{r} - \frac{M_p g}{M_t} \theta + \frac{1}{M} F \quad (6)$$

위 식에서 상태벡터를 $x = [r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}]^T$ 로 정의하고 상태방정식을 구하면 식(7)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_r}{M_t} & -\frac{M_p g}{M_t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{B_r}{M_t \ell} & -g(\frac{M_t + M_p}{M_t \ell}) & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_t} \\ 0 \\ -\frac{1}{M_t \ell} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. GA-퍼지 제어기 설계

일반적인 퍼지 제어기의 구성은 퍼지화부(fuzzifier), 지식베이스부(fuzzy rule base), 퍼지추론부(Inference engine) 및 비퍼지화부(defuzzifier)의 4부분으로 구성되어 있고, 퍼지모델은 식(8)의 형태를 가지는 구현 규칙들로 구성된다.

$$R_n : \text{IF } e(k) \text{ is } A_n \text{ and } \Delta e(k) \text{ is } B_n, \\ \text{THEN } U(k) \text{ is } C_n \quad (8)$$

여기서, $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 는 오차 및 오차의 변화량이며, $U(k)$ 는 제어량을 표시한다. 또한 A_n 과 B_n 은 입력 변수의 퍼지변수, C_n 은 출력변수의 퍼지변수를 나타낸다. 크레인의 위치제어 및 흔들림 억제를 위해 본 논문에서 제안하는 GA-퍼지 제어기의 블록선도는 그림 2와 같다. 여기서, 퍼지 제어기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 이에 대한 흐름도는 그림 3과 같다.

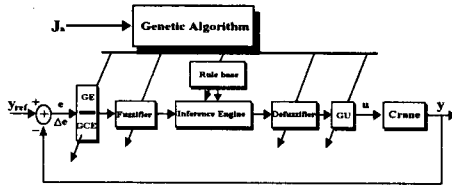


Fig. 2. Proposed GA-fuzzy controller

그림 2에서 퍼지 제어기는 식(9)와 같이 기준점 y_{ref} 와 크레인 시스템의 출력 y 를 사용하여 방정식을 세운다.

$$e(k) = y_{ref} - y(k) \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ u(k) = F(e(k), \Delta e(k)) \quad (9)$$

이때, $e(k)$ 는 기준점 y_{ref} 와 크레인 시스템 출력 $y(k)$ 사이의 오차, $\Delta e(k)$ 는 오차의 변화량이다. 또한 $F(e(k), \Delta e(k))$ 는 퍼지논리에 의한 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 의 비선형 함수로 $u(k)$ 가 되며 이는 크레인 시스템의 제어 입력이 된다.

여기서 최적화하고자 하는 퍼지 제어기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버십함수, 제어규칙이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 제어기의 입출력인 e , Δe 와 u 에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE, GU로서 3개, 멤버십함수는 전진부의 경우 퍼지 제어기의 입력인 e 와 Δe 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버십함수를 표현하는데 필요한 변수는 폭이므로 전진부 스트링의 총 길이는 $2 \times 3 \times 1 = 6$ 개가 된다. 마지막으로 제어규칙의 스트링의 길이는 9개이다. 따라서 각 구성요소에 대한 총 스트링 길이는 18개이다. 각 염색체의 구성을 살펴보면, 전진부의 e 에 대한 멤버십함수의 폭 그리고 Δe 에 대한 멤버십함수의 폭의 차례로 염색체가 구성된다. 다음은 스케일링 계수에 대한 변수가 염색체로 구성되며, 마지막으로 제어규칙이 염색체로 구성된다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들도 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 퍼지 제어기의 구성요소를 추출하고 추출된 구성요소에 대한 퍼

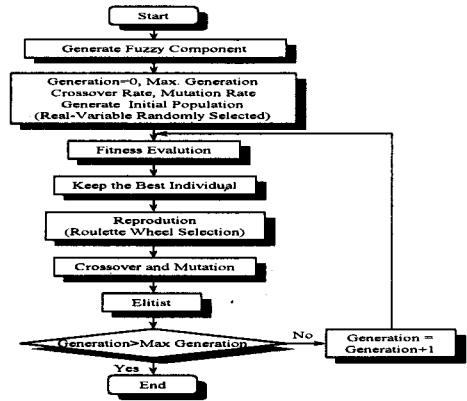


Fig. 3. Auto-turning of fuzzy component using GA

지 제어기를 이용하여 평가하게 된다. 각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자 하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 퍼지 제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가함수는 식(10)과 같고, 적합도 함수는 식(11)과 같이 정의하였다.

$$J_a = \int_{t_0}^{t_f} (|y_{ref} - y| \cdot \alpha + |\theta| \cdot \beta + |u| \cdot \gamma) dt \quad (10)$$

$$Fitness(J_a) = \frac{1}{1 + \min J_a} \quad (11)$$

식(10)의 t_0 , t_f 는 적분시간이며, α, β, γ 는 가중치이다. 식(11)의 적합도 함수는 퍼지 제어기가 기준신호에 빨리 도달하고 정상상태 오차가 최소가 될 때 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 적합도 함수는 각 개체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며 이 적합도 함수의 값이 큰 개체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크며 이와 반대로 값이 작은 개체는 가능성이 작게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 최적제어기로 설계된 종래의 제어기와 GA-퍼지제어기로 설계된 제안된 제어기를 이용하여 실제 플랜트에서 발생가능한 사례 3가지에 대해 시뮬레이션을 실시하였고, 두 제어기 모두 동일한 제어대상에서 그 성능을 고찰하였다. 시스템 파라미터, GA에 사용된 파라미터는 표 1,2와 같고, 최적화된 퍼지제어기의 각 구성요소의 값들은 표 3,4,5와 같다.

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
중력가속도 (g)	9.8 [m/sec ²]
트롤리 질량 (M _t)	2.0 [kg]
화물의 질량 (M _p)	3.5 [kg]
로프의 길이 (l)	0.5 [m]
등가점성 마찰계수 (B _r)	2.0 [N · sec/m]

Table 2. Initial parameters

Parameters	Values
Population size	40
Number of generation	100
Crossover rate	0.85
Mutation rate	0.01

Table 3. Optimized scaling factors

	GE	GCE	GU
Crane system	4.843871	0.010000	5.256223

Table 4. Optimized fuzzy rules

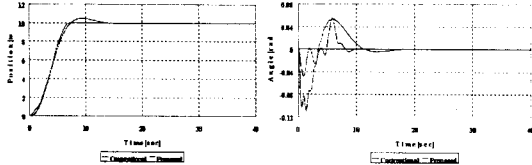
e	Δe	N	Z	P
N		P	P	P
Z		Z	Z	N
P		N	N	N

Table 5. Optimized width values of membership function

	N	Z	P
e	1.193548	1.387096	2.032258
Δe	2.612904	3.000000	2.741936

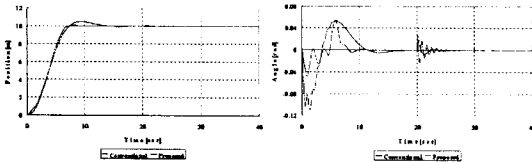
사례1. 화물의 목표점 이동시 외란이 발생한 경우

크레인의 운전중 외란이 가해지거나 부하가 변동될 수 있는 상황을 고려하여 시뮬레이션한 결과는 그림 4,5와 같다. 위치 및 흔들림에서 제안된 제어기가 종래의 제어기보다 우수한 속응성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.



(a) Position control (b) Angle control

Fig. 4. Simulation results when reference input is applied

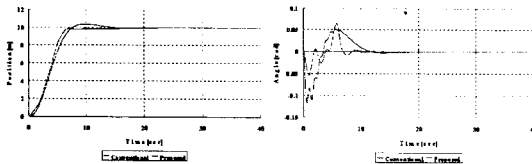


(a) Position control (b) Angle control

Fig. 5. Simulation results when a disturbance is applied

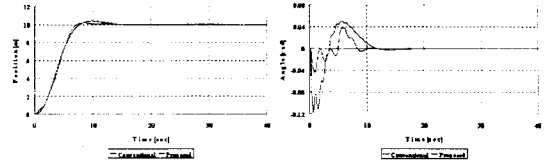
사례2. 화물의 질량을 변동하여 이동시킬 경우

제어기 설계시 파라미터 값이 선정된다 하더라도 주위 환경에 따라 운전중 파라미터 값이 변할 수 있는데, 이 경우를 시뮬레이션한 결과는 그림 6,7과 같다. 제안된 제어기가 종래의 제어기보다 안정적인 제어로 추종함을 확인할 수 있었다.



(a) Position control (b) Angle control

Fig. 6. Simulation results when the cargo weight is changed (-20%)

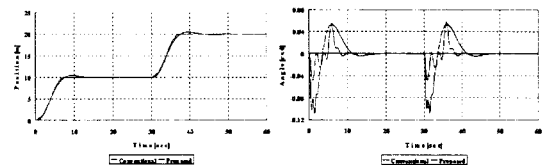


(a) Position control (b) Angle control

Fig. 7. Simulation results when the cargo weight is changed (+20%)

사례3. 목표치를 변경하여 화물을 이동시킬 경우

운전중 발생 가능한 기준입력 변화에 대한 제어기의 추종성능을 알아보기 위해 시뮬레이션한 결과는 그림 8과 같다. 역시 제안된 제어기가 종래의 제어기보다 위치 및 흔들림에서 우수한 정정시간 및 속응성을 나타내고 있다.



(a) Position control (b) Angle control

Fig. 8. Simulation results when the reference is changed

5. 결론

본 논문에서는 크레인 시스템에서 화물의 흔들림을 최소화 하면서 트롤리를 목표지점까지 신속하게 이동시키기 위해 유전 알고리즘을 이용한 최적의 퍼지 제어기를 설계하였다. 본 논문의 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 퍼지 제어기 설계시 최적화에 강인한 유전 알고리즘을 이용하였으며, 종전의 퍼지 제어기 구성요소인 스케일링 계수, 멤버십함수, 제어규칙 선정시 사용되었던 시행착오법이나 부분적인 최적화와는 달리 자동으로 모든 퍼지 제어기의 구성요소를 최적화시켰다.

둘째, 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 제안은 시스템의 외란이나 화물의 질량 변동, 목표치 수정에도 불구하고 트롤리가 정상편차 없이 목표위치를 정확히 추종하고 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키는 강인함을 보여주는 제어기임을 시뮬레이션을 통해 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Mita and T. Kanai, "Optimal Control of the Crane System Using the Maximum speed of the Trolley", 計測自動制御學會論文集, Vol. 15, No. 6, pp. 833-838, 1979
- [2] Y. Sakawa and Y. Sindo, "Optimal control of container cranes", Automatica, Vol. 18, No. 3, pp. 257-266, 1982
- [3] S. Yasunobu, "Automatic container crane operation based on a predictive fuzzy control", 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1073, 1986
- [4] A. J. Ridout, "New Feedback Control System for Overhead Cranes", Electric Energy Conference, Adelaide, pp. 135-140, 1987
- [5] 홍금식, 손성철, 이만형, 장국현, "컨테이너 크레인의 모델링 및 제어에 관한 연구", '95.KACC, pp. 609-612, 1995
- [6] 김길태, 최형식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 크레인 시스템의 최적제어", 한국박용기관학회지, 제22권, 제4호, pp. 80-86, 1998
- [7] 권옥현, 권오규, 홍금식, 이준화, "제어시스템 공학", 청문각, 1999