

# 컨테이너 크레인의 위치제어 및 흔들림 억제를 위한 GA-퍼지 제어기 설계

§오경근\* · 허 동렬\* · 안 병철\*\* · 정형환\*  
(\*동아대학교 전기공학과, \*\*부산지방중소기업청)

## Design of GA-Fuzzy Controller for Position Control and Anti-Swing in Container Crane

§K. G. Oh\* · D. R. Hur\* · B. C. An\*\* · H. H. Chung\*  
\*Dong-A University Electrical Engineering  
\*\*Pusan Small & Medium Business Administration

**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. Simulation results show that the proposed control technique is superior to a conventional optimal control in destination point moving and modification.

**Key words** : Container Crane System(컨테이너 크레인 시스템), GA-Fuzzy Controller(GA-퍼지 제어기), Auto-tuning(자동 동조)

### 1. 서론

최근 항만부두 뿐만 아니라 대형창고, 공장 내 자재 보관장소 등 산업분야에서 대형물체를 운반하는데 주로 사용되는 수단이 크레인 시스템(Crane System)이다. 크레인 운전제어에 대해 이송물체의 흔들림을 속도, 무게, 외란 등의 변수를 제어하여 안전하게 이송시킬 수 있는 제어 시스템의 개발이 다각도로 연구되고 있다. 크레인에 대한 논문사례를 살펴보면, 흔들림 각도를 측정하지 않고 바람직한 방향으로 미리 입력한 속도궤적을 따라 트롤리가 가도복하며 동시에 로프의 진동을 최소화 하는 개루프 제어와<sup>1)</sup> 진동각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간 피드백시켜 로프의 길이 변화, 외란 등에 대하여 적절하게 대처할 수 있는 피드백 제어<sup>2)</sup>가 있다. 또 부진동 제어를 이용한

크레인의 흔들림 제어에 관한 연구<sup>3)</sup>, 퍼지추론을 이용하여 진동방지 알고리즘을 제시한 연구<sup>4)</sup>, 빠르고 부드러운 이송을 위한 최적의 속도기준을 만드는 연구<sup>5)</sup>가 있으며, 불안정한 오버헤드 크레인 시스템을 위해 제어를 설계한 연구<sup>6)</sup>, 물체를 들어올리는 동작을 포함하는 경우의 시간-에너지 최적 제어<sup>7)</sup>, 컨테이너 기중기의 수정된 시간최적주행과 비선형 잔류 흔들림의 제어에 관한 연구<sup>8)</sup>가 있다.

본 논문에서는 컨테이너 크레인의 목표지점에서의 위치제어 및 흔들림 억제를 위하여 GA-퍼지제어기를 설계하고자 한다. 우선 퍼지 제어기의 구성요소인 스케일링 계수, 멤버쉽 함수, 제어규칙 선정이 곤란하다는 단점을 보완하기 위하여 유전 알고리즘을 이용하여 자동으로 퍼지 제어기를 최적화 하는 것과, 이에 대한 실험으로 유전 알고리즘을 이용한 퍼지제

여기가 종래의 시행착오법이나 부분적인 최적화보다 목표지점에 정확히 추종하는 것과 흔들림을 효과적으로 감쇄시키는 강인함을 보이고자 한다.

## 2. 컨테이너 크레인 시스템 모델링

### 2.1 시스템 모델

컨테이너 크레인 시스템의 제어계는 그림 1과 같이 x축 방향의 트롤리의 주행속도 조작과 y축 방향의 로프의 조작으로 나누어 모델을 나타내었다.

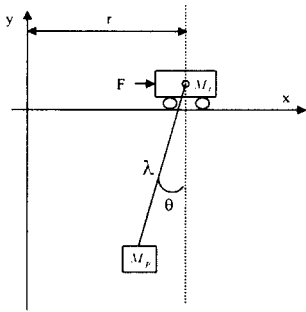


Fig. 1. Container crane system

- $M_t$  : 트롤리의 등가질량 [kg]
- $M_p$  : 화물의 질량 [kg]
- $B_r$  : 등가 점성 마찰계수 [N · sec/m]
- $l$  : 트롤리와 화물사이의 거리 [m]
- $\theta$  : 수직방향에 대한 로프의 흔들림 각도 [rad]
- $F$  : 트롤리에 작용하는 힘 [N · m],
- $r$  : 트롤리의 이동거리 [m]

### 2.2 시스템 운동방정식

화물과 트롤리 사이의 연결로프는 변동이 없으며, 연결 관절 부의 마찰은 무시한다고 가정한다. 이 가정에 따라 Lagrange 운동방정식을 적용하여 크레인계의 운동방정식을 유도한다. Lagrange 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right\} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

여기서  $q_i$  = 일반좌표 ( $i=1, 2, 3, \dots$ ).

- T = 운동에너지
- D = 점성마찰에너지
- U = 위치에너지

#### 2.2.1 트롤리에 대한 운동방정식

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

#### 2.2.2 화물에 대한 운동방정식

$$M_p l^2 \ddot{\theta} + M_p l \ddot{r} \cos \theta + M_p G l \sin \theta = 0 \quad (3)$$

## 3. GA-퍼지제어기 설계

### 3.1 최적 제어기

크레인 시스템 모델에 적용하기 위하여  $\theta$ 의 변동이 아주 미소하다고 가정하여  $\theta \approx 0$ 에서 근사화하여  $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1, \sin^2 \theta \approx 0, \cos^2 \theta \approx 1$ 로 표시할 수 있다. 이때 선형화된 상태방정식은 식(4)와 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx, \quad z = Dy \quad (4)$$

여기서  $x = [r, \dot{r}, \theta, \dot{\theta}]^T$ 이고  $y$ 는 관측 출력벡터,  $z$ 는 출력이며 계수행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_1}{M} & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b_1}{lM} & -g \frac{M+m}{lM} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_t} \\ 0 \\ -\frac{1}{M_t l} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = [1 \ 0]$$

그리고 시스템에서 목표지점에 정상편차 없이 잘 추종하도록 다음과 같이 서보 제어계를 설계한다. 여기서 식(4)의 시스템에 대한 오차  $e$ 를 적분한 변수  $\eta$ 를 새로이 도입한다.

$$\dot{\eta} = e = DCx - z_r \quad (5)$$

식(4)와 식(5)를 이용해 확장시스템으로 쓰면 식(6)과 같다.

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} z_r \quad (6)$$

여기서

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \eta \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{DC} & 0 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$$

식(6)에서 행렬 ( $\bar{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{B}}$ )는 식(4)의 시스템이 가 제어이고 동시에 식(7)의 관계가 성립되어 역시 가 제어이다.

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A} \\ 0 & \mathbf{DC} \end{bmatrix} = 5 \quad (7)$$

식(6)으로부터 2차 형식의 평가함수를 식(8)로 정의한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \quad (8)$$

단, Q:상태가중치행렬, R:제어가중치행렬

식(8)을 최소로 하는 최적 제어입력은 식(9)와 같이 얻어지며 이는 선형 상태공간에서만 취급한다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{K} \mathbf{x} \quad (9)$$

시스템이 시불변이라고 가정하면 식(10)과 같이 대수 Riccati 방정식이 구해진다.

$$\mathbf{K} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{K} + \mathbf{Q} = 0 \quad (10)$$

$\mathbf{K} = [\text{constant matrix}]$

### 3.2 유전 알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 자동규칙 발생

1970년 John Holland는 집단이 가진 염색체가 세대에 따라 그들이 처한 환경에 대하여 생존과 번식의 적합한 활동을 위한 자연선택 때문에 진화된다는 다윈의 진화이론을 토대로 한 자연의 유전원리를 모방하여 유전 알고리즘을 도입하기 시작했다. 이 유전 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하는데 적용되고 있으며 해를 구하는 방법에서 강인한

탐색방법으로 알려져 있다.<sup>9)-10)</sup>

컨테이너 크레인의 위치제어 및 흔들림 억제 를 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.

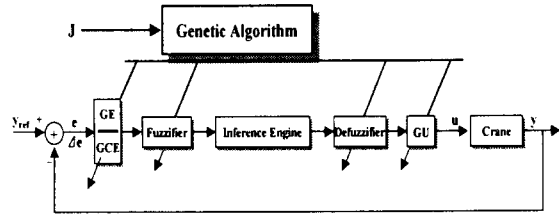


Fig. 2. Proposed GA-fuzzy controller

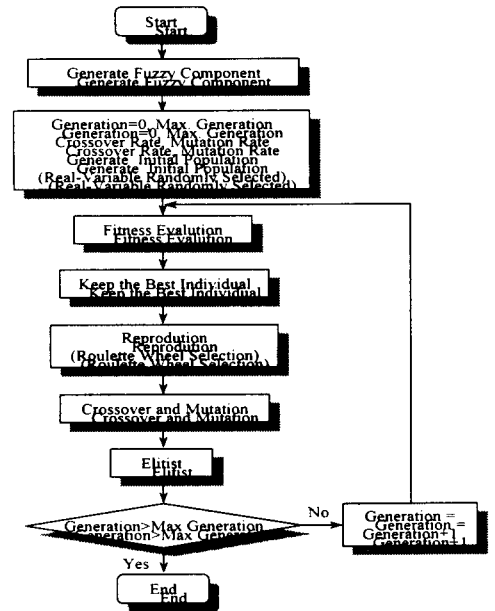


Fig. 3. Auto-tuning of fuzzy component using genetic algorithm

여기서, 최적화하고자 하는 퍼지 제어기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버쉽함수 및 제어규칙이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 2진 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 제어기의 입출력인 e, Δe와 u에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE, GU

로서 3개, 멤버쉽함수는 전건부의 경우 퍼지 제어기의 입력인  $e$ 와  $\Delta e$ 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버쉽함수를 표현하는데 필요한 변수는 폭으로써 전건부 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, 전건부의  $e$ 에 대한 멤버쉽함수의 폭 그리고  $\Delta e$ 에 대한 멤버쉽함수의 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 퍼지 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(11)과 같고, 적합도 함수는 식(12)와 같이 정의하였다.

$$J_a = \int_0^{t_1} (e^2 \cdot \alpha) dt \quad (11)$$

$$\text{Fitness}(J_a) = \frac{1}{1 + \min J_a} \quad (12)$$

식(11)의  $t_1$ 은 적분시간이며,  $\alpha$ 는 가중치이다. 식(12)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 크게 되며 이와 반대로 값이 작은 개체는 가능성이 작게 된다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 크레인 시스템의 운전시 발생하는 외란에 대해 적응성을 갖도록 유전 알고리즘을 이용한 최적의 퍼지 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 효과적 입증을 위하여, 화물을 목표지점으로 이동시킬 경우(사례 1)와 목표치를 변경하여 화물을 이동시킬 경우(사례 2)에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 화물의 위치와 흔들림 각도를 측정하여 동특성을 비교·고찰하였다. 제어기 설계시에는 먼저, 퍼지 제어기의 입출력 요소인  $e$ ,  $\Delta e$ 와  $u$ 에 대해서 3개의 퍼지변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 전건부의 폭 그리고 스케일링 계수와 제어규칙을 계산하게 된다. 이 구성요소에 의한 제어성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복 계산하게 된다. 또한, 각 방식에 대한 평가함수의 비교를 통하여 제어성능을 고찰하였다. 본 논문에서 사용한 크레인 시스템의 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1. A simulation parameters of the crane system

Parameters	Values
중력가속도 ( $G$ )	9.8 [m/sec <sup>2</sup> ]
트롤리 질량 ( $M_t$ )	2.0 [kg]
화물의 질량 ( $M_p$ )	3.5 [kg]
로프의 길이 ( $l$ )	0.5 [m]
등가점성마찰계수 ( $B_r$ )	2.0 [N · sec/m]

##### 4.1 화물을 목표지점으로 이동시킬 경우

첫번째 사례는 화물의 목표지점으로 이동시켰을 경우로 이에 대해 제안된 유전 알고리즘의 초기 파라미터는 표 2와 같고, 최적화된 퍼지 제어기의 각 구성요소의 값들은 표 3, 표 4, 표 5와 같다. 여기서 표 5는 멤버쉽함수의 동조 과정에서 최적화된 폭의 값을 나타내고 있다. 또 각 세대에 따른 적합도는 그림 4에서 보여 주고 있다.

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	3.554839	0.332258	7.421936

Table 4. Optimized fuzzy rules

e \ Δe	N	Z	P
N	P	Z	P
Z	P	Z	N
P	P	N	N

Table 5. Optimized width values of membership function

	N	Z	P
e	2.096774	3.000000	1.967742
Δe	2.096774	1.064516	3.000000

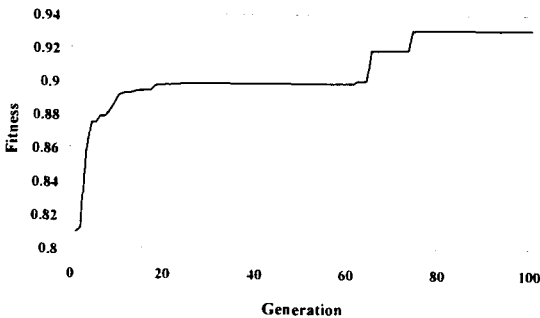


Fig. 4. Fitness

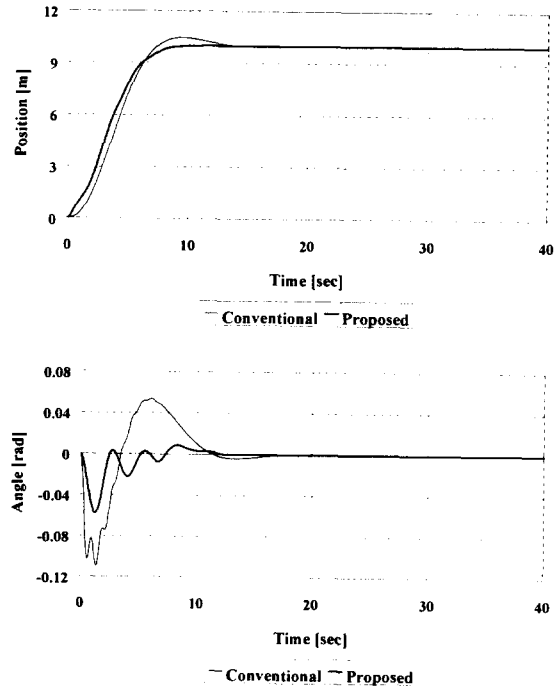


Fig. 5. Simulation results (Case 1)

그림 5는 화물의 위치와 흔들림 각도를 종래의 최적제어기와 제안한 GA-퍼지 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 행한 경우로 제안한 기법의 제어기 성능이 종래의 제어기보다 우수한 속응성을 나타내고 있다. 특히 흔들림 각도에서 종래의 제어기는 0.1[rad] 이상의 흔들림을 확인했으나, 제안한 제어기에서는 0.06[rad] 이하로 액체상태의 화물 이송 등에서 매우 안정적인 결과를 예측할 수 있다.

#### 4.2 목표치를 변경하여 화물을 이동시킬 경우

두번째 사례는 목표치를 변경하여 화물을 이동시키는 경우로, 그림 6과 같이 역시 제안한 기법이 종래의 제어기보다 초기 목표점 도달시간이나, 오실레이션 현상, 흔들림 각도 등 모두가 우수함을 확인할 수 있었다.

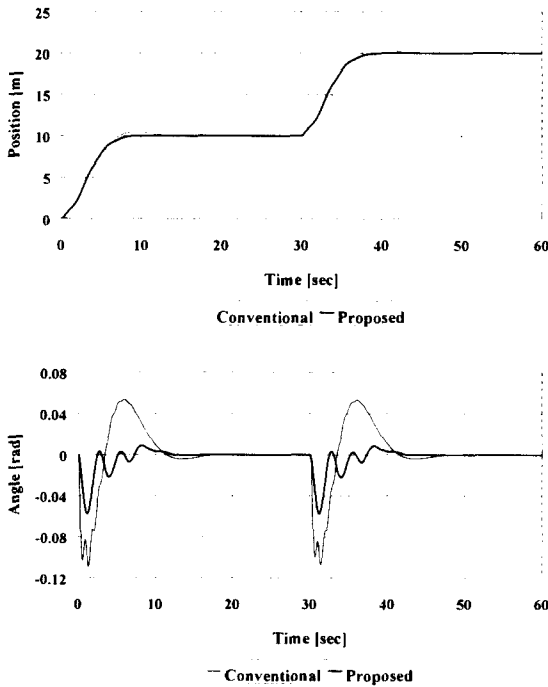


Fig. 6. Simulation results (Case 2)

## 5. 결론

본 논문에서는 크레인 시스템에서 화물의 흔들림을 최소화 하면서 트롤리를 목표지점까지 신속하게 이동시키기 위해 자연생태계의 진화를 모의한 확률론적 최적화 방법으로서 전역적 최소값을 찾을 수 있는 진화 연산의 한 방법인 유전 알고리즘을 이용한 최적의 퍼지 제어기를 설계하였다. 본 연구의 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

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

둘째, 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 제안은 목표지점이나 목표지점 변경에도 불구하고 트롤리가 정상 편차 없이 목표위치를 정확히 추종하고 화물의 흔들림을 효과적으로 감

쇄시키는 강인함을 보여주는 제어기임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

## 참고 문헌

- [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] A. J. Ridout, "New Feedback Control System for Overhead Cranes", Electric Energy Conference, Adelaide, pp. 135-140, 1987
- [3] 박병석, 윤지섭, 이재설, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구", '90.한국자동제어학회학술회의논문집, pp. 292-297, 1990.
- [4] 이태영, "퍼지이론을 적용한 Overhead Crane의 Anti-swing 제어", 경북대 기계공학과 석사학위, 1994.
- [5] J. J. Hamalainen, A. Mattinene, I. Baharova and J. Virkkunen, "Optimal path planning for a trolley crane : fast and smooth transfer of load", IEE Proc.-control Theory Appl., vol. 142, No. 1, pp. 51-57, 1995.
- [6] C. C. Cheng and C. Y. Chen, "Controller design for an overhead crane system with uncertainly", Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 5, pp. 645-653, 1996.
- [7] 김섭, 양현석, "물체를 들어올리는 동작을 포함한 천장크레인의 강인한 시간-에너지 최적제어", 한국자동제어학회학술회의논문집, pp. 708-711, 1998.
- [8] 홍금식, "컨테이너 기중기의 제어 : 수정된 시간최적주행과 비선형 잔류흔들림 제어", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제5권, 제5호, pp. 630-639, 1999.
- [9] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1989.
- [10] M. Gen, R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design", John. Wiley & Sons, Inc. 1997.