

유전자 알고리즘을 이용한 천정크레인의 최적제어기에 실험적 연구

최형식*, 김길태**

An Experimental Study on an Optimal Controller for the Overhead Crane Using the Genetic Algorithm

Hyeung-Sik Choi*, and Kil Tae Kim**

ABSTRACT

This paper presents a HGA-based(hybrid genetic algorithm) optimal control strategy to control of the swing motion and the transfer of the overhead crane. The objective is to achieve the regulation of the fast swing motion or fast position control. The controller is based on the state feedback. The HGA-based optimal algorithm is applied to find optimal gains of the controller. Computer simulation and experiments were performed to demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme.

Key Words : Genetic Algorithm(유전자알고리즘), Hybrid Genetic Algorithm(복합유전자알고리즘), overhead crane(천정크레인), state feedback control(상태귀환제어), optimal control(최적제어).

1. 서론

자동차 공장, 건설현장, 조선소, 및 중공업 플랜트등과 같은 산업현장에서 천정크레인은 크고 무거운 화물을 원하는 위치로 이동시키는 작업에 주로 이용되고 있다. 크레인의 트롤리와 화물사이와 이어 로프에 연결되어 있는 물리적인 구조 때문에, 화물을 목표위치로 이동시킬 때 대부분 진자운동형태의 흔들림이 발생되며 생산성 향상을 위해서 신속히 이동시킬 때 흔들림은 크게 일어난다. 이러한 경우에 충돌로 인한 각종 시설물의 파괴, 화물의 손상과 같은 경제적인 손해와 인명 피해가 초래될 수 있다. 따라서 속도를 향상시키며 동시에 흔들림

을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되었고 또한 진행되고 있다. 크레인 시스템의 제어에 관한 연구문헌들을 살펴보면, 크레인 화물의 흔들림 제어에 관한 초기 연구의 형태로 가속-정속-감속의 미리 입력한 트롤리의 속도궤적을 따르며 감속의 끝점에서 로프의 진동을 최소로 하는 개루프제어가 있다⁽¹⁾. 적절한 제어알고리즘을 적용한 폐루프 제어의 형태로는 진동각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 귀환시켜 제어한 피드백제어가 있으며⁽²⁾ 불확실한 크레인 시스템의 진동과 위치제어에 적응제어 알고리즘을 적용한 연구⁽³⁾와 갠트리 크레인 시스템의 동적 피드백을 행한 후에 기준모델형 적응제어를

* 한국해양대 기계공학부

** 주) 소프트뱅크

적용한 연구가 존재한다⁽⁴⁾. 또한, 로타리크레인의 모델링과 제어에 로프의 길이를 조정하며 개루프와 피드백 제어를 병행 적용하여 흔들림과 위치를 제어한 연구가 있었다⁽⁵⁾. 위의 방법들이 크레인시스템의 운동식을 선형화하여 제어알고리즘을 적용한 반면, 비선형식에 비선형제어기를 제안한 연구도 있었다^(6,7). 국내에서도 크레인에 대한 연구 논문들이 발표되었다. 선형화된 크레인시스템의 단진자의 주기운동을 이용하여 이동속도제어를 입력하여 화물의 흔들림을 제어하는 연구와⁽⁸⁾, 디지털 최적레귤레이터를 타워형크레인에 적용한 연구가 있었다⁽⁹⁾. 흔들림 각 제어기는 근계적 선도를 이용하고 위치제어는 루프형상기법을 사용한 연구와 퍼지제어기를 사용하여 위치제어와 각도제어의 가중치를 변화시키거나 속도프로파일을 이용하여 위치제어와 각도제어를 일정하게 한 연구도 있었다⁽¹⁰⁾. 또한, 여러 문헌상의 제어방식들을 정리하고 크레인 흔들림 제어에 적용된 속도선도의 체계적 정리와 장단점을 분석한 연구가 있었다^(11,12).

위의 연구들에서 실험적 연구가 많지 않고 유전알고리즘을 적용한 것이 존재하지 않는다. 따라서, 본 논문의 목적은 최적 알고리즘의 일종인 유전알고리즘을 천정크레인 시스템에 적용하고 이의 적용 가능성을 실험적으로 검증하는 것이다. 제어 목표는 천정크레인이 단시간에 화물의 흔들림을 최소로 줄이며 화물을 원하는 목적지로 이동하는 것과 최단 시간에 지정된 목표위치로 이동을 하며 화물의 흔들림을 줄이는 것들에 두었다. 사용된 제어기는 강인하며 전역적 최적해를 구할 수 있는 유전알고리즘을 귀환상태제어기와 함께 적용하였다. 제안된 제어기의 적용가능성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실제 시스템을 제작하여 실험을 병행하였다. 유전알고리즘 중에서는 연산 부하를 줄일 수 있도록 적은 염색체 집단을 사용할 수 있는 하이브리드 유전알고리즘(hybrid genetic algorithm)을 이용하였다^(14,15).

2장에서는 제어계의 설계에 요구되는 천정크레인 시스템의 운동방정식을 살펴보고, 3장에서는 하이브리드 유전알고리즘(HGA)의 구성과 구조에 대해 설명하고, 상태제어기와 HGA를 이용한 서보계의 설계에 관하여 4장에서 설명한다. 제안된 제어기를 적용하여 불확실한 천정크레인 시스템에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과는 5장에서

논하며 6장에서는 결론을 짓는다.

2. 천정크레인의 모델링

천정크레인의 운동역학은 Lagrange식을 이용하여 미분 방정식으로 표현할 수 있다. 천정크레인 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 트롤리, 화물 그리고 화물을 연결하는 와이어로우프로 구성된다.

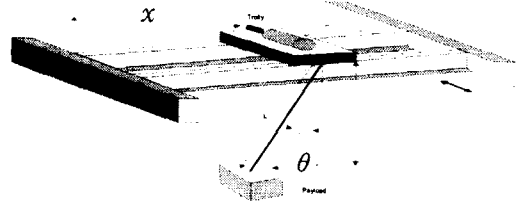


Fig. 1 view of the overhead crane system

여기서, M_t 는 트롤리의 등가질량, M_p 는 화물의 질량, B_d 는 등가 점성마찰계수, L 은 트롤리와 화물사이의 거리이고, θ 는 연직방향에 대한 와이어로프의 흔들림 각도이다. 본 논문에서 천정 크레인 시스템은 트롤리의 위치와 속도 그리고 화물의 각도와 각속도를 측정할 수 있으며 화물과 트롤리사이의 연결은 질량이 없는 강체로 이뤄져 있고 연결 관절부의 마찰은 무시할 정도로 작다고 가정한다. 이 가정에 따라 Lagrange식을 이용하여 천정크레인 시스템의 운동방정식을 세울 수 있다.

천정크레인 전체의 운동에너지, 위치에너지 및 마찰력은 각각 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} (M_t + M_p) \dot{x}^2 + M_p L \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} L^2 M_p \dot{\theta}^2 \quad (1)$$

$$U = M_p g L (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$D = B_d \dot{x} \quad (3)$$

위 식 (1), (2) 및 (3)들을 Lagrange식 (4)에 대입하여 순차적으로 풀고 운동방정식으로 표현하면 다음의 식 (5)와 (6)으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad (4)$$

여기서 Γ_i 는 일반화된 외력이며 크레인 운동식에
서 $\Gamma = F - D$ 이다. 트롤리와 화물에 대한 방정식은 각각

$$(M_t + M_p)\ddot{x} + M_p L \ddot{\theta} \cos \theta - M_p L \dot{\theta}^2 \sin \theta + B_d \dot{x} = F \quad (5)$$

$$(L^2 M_p)\ddot{\theta} + M_p L \cos \theta \ddot{x} + M_p G L \sin \theta = 0 \quad (6)$$

와 같이 표현된다. (6)식에서 $\ddot{\theta}$ 에 대해 정리하면

$$\ddot{\theta} = -\frac{M_p L \cos \theta \ddot{x} + M_p G L \sin \theta}{L^2 M_p} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (7)을 식 (5)의 $\ddot{\theta}$ 에 대입
하여 \ddot{x} 에 대해 정리하면 다음과 같다

$$\ddot{x} = \frac{F + M_p L \sin \theta \dot{\theta}^2 + M_p G \cos \theta \sin \theta - B_d \dot{x}}{(M_t + M_p) - M_p \cos^2 \theta} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서

$$\ddot{x} = \frac{F + M_p L \sin \theta \dot{\theta}^2 + M_p G \cos \theta \sin \theta - B_d \dot{x}}{M_t + M_p \sin^2 \theta} \quad (9)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{\cos \theta \ddot{x}}{L} - \frac{G \sin \theta}{L} \quad (10)$$

로 표현되는 운동방정식을 얻는다. 흔들림의 진
폭이 작을 경우 즉 화물의 진동각도의 평형점 θ
 ≈ 0 에서 선형화하면 다음과 같은 상태방정식을
얻게된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} u, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x}, \quad \mathbf{z} = \mathbf{D} \mathbf{y} \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ 는 상
태벡터, $\mathbf{y} \in R^{2 \times 1}$ 는 관측출력벡터, \mathbf{z} 는 출력이며
계수행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_d}{M_t} & \frac{M_p G}{M_t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{B_d}{M_t} & -\frac{G}{L} - \frac{M_p G}{M_t} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_t} \\ 0 \\ -\frac{1}{LM_t} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. 최적상태 제어기의 설계

크레인 시스템의 운동방정식을 바탕으로, 건설
한 최적의 상태제어기를 설계하였다. 여기에 계단
상이나 임펄스형태의 외란이 수반되는 환경에서도
화물의 흔들림을 억제하며 목표위치를 정확히 추
종할 수 있도록 적분기를 더하였다. 본 논문에서
는 최적의 위치추종과 흔들림의 제어를 위하여 제
어이득들을 하이브리드 유전알고리즘(hybrid
genetic algorithm - HGA)을 이용하여 동조한다
(tuning). 적분기의 적용을 위하여

$$v = \int (z - z_r) dt \quad (12)$$

양변을 시간에 대하여 미분하고 식 (11)의 관계를
이용하면 다음의 확장시스템으로 표현된다.

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}} u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} z_r \quad (13)$$

$$\text{단, } \bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ v \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{DC} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}$$

확장시스템으로부터 행렬의 쌍 ($\bar{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{B}}$)는 식
(11)의 시스템이 가제어이고 동시에 다음의 관계
가 만족되므로 역시 가제어이다⁽¹⁰⁾.

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A} \\ 0 & \mathbf{DC} \end{bmatrix} = 5.$$

시스템을 제어하기 위하여 다음과 같은 상태귀환
제어칙을 선정하고

$$u = -\mathbf{K} \bar{\mathbf{x}} \quad (14)$$

이를 식 (13)에 대입하여 양변을 미분하면 폐회로
제어시스템은 다음과 같게 된다.

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = (\bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{B}} \mathbf{K}) \bar{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{K} \in R^{1 \times 5} \quad (15)$$

식 (15)의 시스템의 고유치가 모두 부의 실수부를

가지도록 K를 적절히 설계하면

$$\dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty$$

즉, $\dot{v} = z - z_r \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty$

이 되어 화물의 위치출력이 계단상의 입력을 오차 없이 추종함을 보여준다. 따라서, 확장시스템에서는 화물의 추적오차와 진자의 진동이 일정한 시간 후에는 안정하게 됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 귀환상태제어기에서 제어이득 K을 하이브리드 유전알고리즘을 이용하여 최적으로 선택함으로써 시스템을 제어하고자 한다. 이를 위하여 K는 다음의 평가함수가 최소값을 갖도록 결정된다.

$$J = \int_0^{\infty} (\bar{x}^T Q \bar{x} + u^T r u) dt \quad (16)$$

여기서 $Q \in R^{5 \times 5}$ 는 정정(positive definite) 하중행렬으로 위치추종이나 흔들림제어 목적에 따라 선택적으로 결정되는 하중계수이다. 화물의 흔들림과 위치추종의 목적들을 Q를 적절히 설계함으로써 선택적으로 성취할 수 있다. $r \in R^{1 \times 1}$ 는 제어입력의 크기를 결정하는 양의 하중계수이다. 식 (14)는 다시 다음과 같이 표현된다.

$$u = -K_1 \bar{x} + k_2 \int (z_r - z) dt \quad (17)$$

여기서 $K = [K_1 \ k_2]$, $K_1 \in R^{1 \times 4}$ 이다. 식 (16)의 평가함수를 최소화하기 위하여 하이브리드 유전알고리즘을 이용한다.

4. 하이브리드 유전알고리즘(HGA)

자연계의 진화원리를 모방한 유전자알고리즘은 전역적이고 외부의 외란에 대하여 강한 탐색능력을 보유하고 있어서 복잡한 최적화 문제를 해결하려는 도구로 이용되고 있고⁽¹³⁾ 어떤 시스템에서는 LQR 최적제어기와 성능을 비교한 결과로 유전자알고리즘을 적용하였을 때 상태오차가 줄어드는 결과를 보여준다.⁽¹⁶⁾ 이러한 유전자알고리즘은

재생산연산자를 산출할 때 룰렛휠(roulette wheel) 선택방법에 기초한 확률적인 방법을 사용한다. 이때 작은 염색체 집단(population)을 사용하면 초기세대에서 유전자적 다양성을 잃게 되므로 보통 30 - 200개 범위안에서 해 집단 크기를 선택한다. 집단의 크기에 비례하여 연산부하가 증가되므로 본 논문에서는 작은 집단수로도 유전자적 최적해를 구할 수 있는 새로운 재생산자를 사용하는 Fig. 2와 같은 HGA를 사용한다⁽¹³⁾. HGA의 구조는 일반적인 유전알고리즘과 같이 파라미터의 부호화, 초기해 집단의 생성, 집단내 개체들의 적합도 평가를 포함하며, 새로운 재생산 연산자, 교배연산자와 돌연변이 연산자를 기본 연산자로 사용한다.

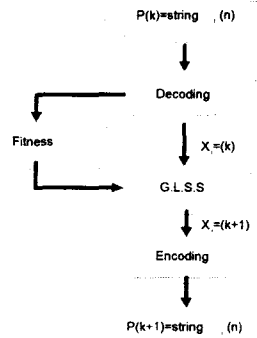


Fig. 2 flow chart of hybrid genetic algorithm

▶ 집단의 부호화 및 초기화

자연계에서 생물들이 유전인자인 염색체에 의해서 진화하는 과정을 컴퓨터로 구현하기 위해서 각 파라미터를 집단의 개체들로 정의하고 이들을 이진 부호화하여 사용한다. 이들을 N개의 개체로 구성하여 초기 해집단을 구성한다.

▶ 적합도 평가

집단내 개체간의 우열을 평가하여 더 나은 집단을 형성하기 위하여 목적함수의 크기를 계산하여 평가하는 것을 의미한다.

▶ 재생산(reproduction) 연산

자연계에서 일어나는 적자생존의 원리를 모방한 것으로서 적합도에 따라 개체를 선택하여 교배급원(Mating pool)을 생성하게 된다. 일반적으로 적합도가 높을수록 개체들의 선택확률도 높아진다.

여러 가지 재생산 방법 중 룰렛휠 방법과 같은 확률적 선택법이 많이 사용된다. 그러나 확실적인 선택법은 선택과정에서 최적의 개체를 잃어버릴 수 있고 집단 수의 수가 작을 경우, 초기에 강한 개체가 여러 번 복제되어 초기에 집단을 지배하여 새로운 점을 탐색할 수 없는 단점을 가진다. 이를 극복하기 위해 유사구배(Gradient-like)기법을 이용하여 적은 집단 수에서도 강인하고 효과적으로 전역해를 탐색한다.

▶ 교배(crossover) 연산

개체간에 유전정보를 교환하여 새로운 염색체를 생성하는 동작이 교배이다. 교배급원으로부터 한 쌍의 어머니 개체 선택 후 임의의 교차점을 선정하고 이후의 문자열을 교환하여 새로운 자손을 생산하며 교배율에 따라 평가함수의 크기가 달라진다. 일반적으로 0.45와 1사이의 값이 사용된다.

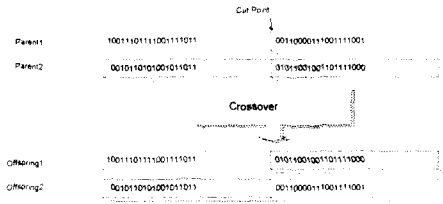


Fig. 3 crossover process

▶ 돌연변이(mutation) 연산

돌연변이는 돌연변이 확률에 따라 구조체의 비트를 임의로 변화시키므로서 초기 세대에서 특정 비트가 고정되는 것을 방지할 뿐만 아니라 또한 탐색영역을 확대해 주기도 한다. 돌연변이가 발생될 비트가 선정되면 그 비트 값이 '1' 이면 '0' 으로 반대로 '0'이면 '1' 로 반전한다. 돌연변이율에 따라 평가함수의 최적치가 영향을 받는다. 일반적으로 0.001과 0.01사이의 값이 선정된다.

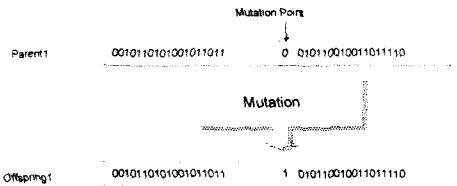


Fig. 4 mutation process

HGA를 이용한 서보계 구조는 Fig. 5와 같다.

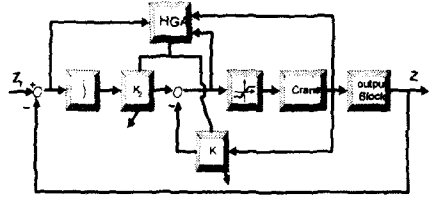


Fig. 5 block diagram of HGA-based controller

5. 실험결과 및 고찰

천정 크레인시스템의 흔들림과 위치제어를 위해 HGA를 이용한 제어기를 적용한 실험을 행하고 이를 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 실험에 사용된 천정크레인 및 제어시스템은 직접 제작되었고 그 개원은 Table 1에 나타나 있으며 외관은 Pic. 1에 나타나 있다.

Table 1 Specification of experimental apparatus

Device	Specification	Model
motor	DC motor	N4825/I, 24V
motor driver	darlington Tr.	MOSPEG 2SD633
angle sensor	potentiometer	COPAL J50S
position sensor	potentiometer	COPAL M220
I/O interfacer	made	8255, 8253, A/D, D/A convertor, etc

Pic. 1 The crane system



천정 크레인의 파라미터들은 트롤리와 화물의 질량이 각각 1.0kg, 1.5kg이고 로프 길이는 0.445m을 사용하였다. 귀환이득행렬 K의 최적치

를 결정하기 위해 대각행렬은 흔들림 감쇠에는 $Q = [10, 3, 10, 5, 10]$, 신속이동에는 $Q = [10, 5, 10, 3, 10]$ 를 사용하였고 $r=1$ 로 설정하였다. 사용된 하이브리드 유전자알고리즘의 파라미터는 돌연변이 확률 $P_m = 0.005$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 재생산 계수 $\eta = 1.5$, 그리고 집단의 크기는 $N=6$ 이다.

실험 및 시뮬레이션 결과에서 Fig. 6, 7, 8 및 9는 화물의 빠른 목표위치 추종을 성취하면서 흔들림을 가능한 줄이는 것이고 Fig. 10, 11, 12 및 13은 최저 흔들림을 유지하면서 원하는 목표추종을 성취하는 것이다. Fig. 6, 7 및 10, 11에서는 300세대에서 평가함수가 최소로 되는 제어이득들을 선정하였다. 각 Fig.에서 한 iteration은 0.1초로 하였다. Fig. 8a는 트롤리의 빠른 목표추종에 비중을 두고 Fig. 7에서 구해진 제어이득을 적용하여 최적제어를 행한 시뮬레이션 결과이고 이의 실험 결과는 Fig. 8b에 나타나 있다. Fig. 9a 및 9b는 트롤리의 빠른 목표추종에 비중을 두고 최적제어를 행하였을 때 화물의 흔들림 각의 시뮬레이션 및 실험 결과이다. Fig. 12a는 화물의 흔들림의 최소화 비중을 두고 Fig. 11에서 구해진 제어이득을 적용하여 최적제어를 행한 시뮬레이션 결과이고 이의 실험 결과는 Fig. 12b에 나타나 있다. Fig. 13a 및 13b는 화물의 흔들림의 최소화 비중을 두고 최적제어를 행하였을 때 화물의 흔들림 각의 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 각각의 제어 결과들을 살펴보면 제어목적은 화물의 빠른 목표위치 추종이나 흔들림을 줄이는 방향으로 정하였을 때 각 목적에 부합하는 결과들을 성취할 수 있음을 알 수 있다.

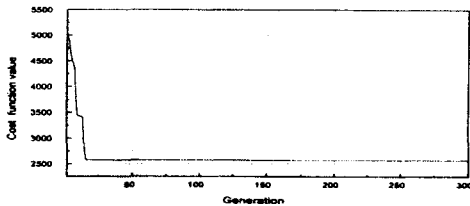


Fig. 6 cost function value in fast position control

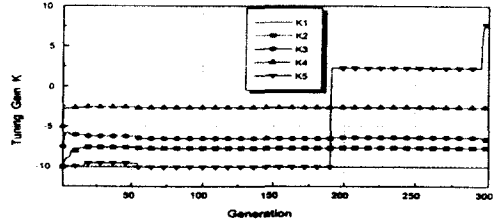


Fig. 7 gain tuning in fast position control

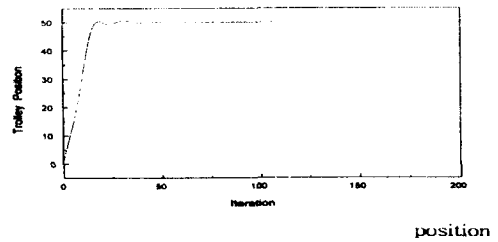


Fig. 8a simulation result of trolley position control in fast position control

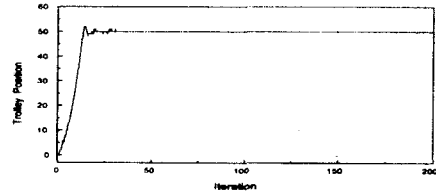


Fig. 8b experiment result of trolley position control in fast position control

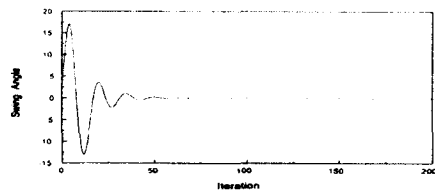


Fig. 9a simulation result of swing control in fast position control

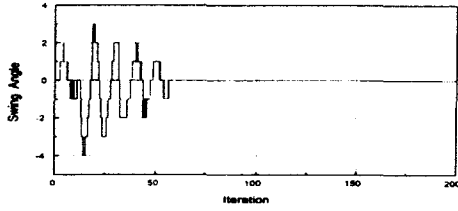


Fig. 9b experiment result of swing control in fast position control

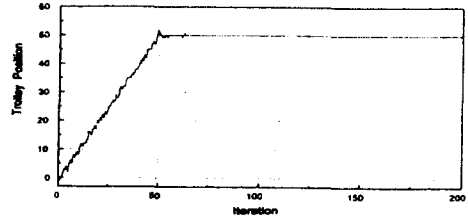


Fig. 12b experiment result of trolley position control in low swing control

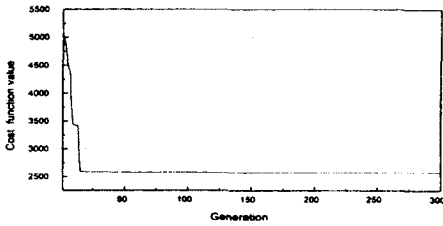


Fig. 10 cost function value in low swing control

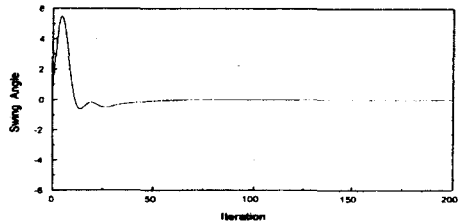


Fig. 13a simulation result of swing control in low swing control

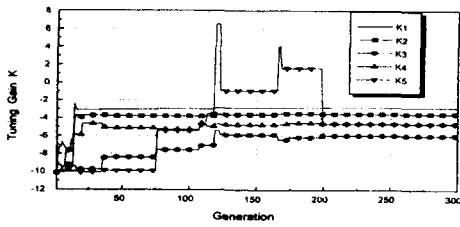


Fig. 11 gain tuning in low swing control

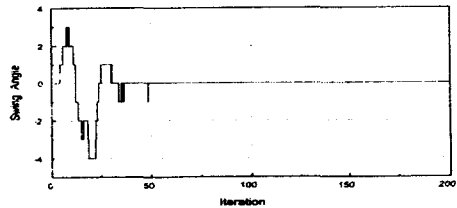


Fig. 13b experiment result of swing control in low swing control

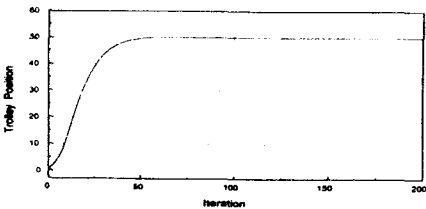


Fig. 12a simulation result of trolley position control in low swing control

6. 결론

천정 크레인시스템의 성능향상의 목적은 화물의 흔들림을 줄이며 원하는 위치로 이동하는 것이다. 본 논문에서는 제어의 목적으로 화물의 흔들림을 감소시키는 것에 비중을 두거나 천정 크레인 트롤리의 신속한 이동을 택하였다. 적용한 제어기는 적분기를 포함하는 상태제어기이며 적은 개체 집단을 사용해도 좋은 성능을 갖는 하이브리드 유

전알고리즘을 이용하여 각 제어이득을 최적화하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 최적의 제어이득을 구하고 이를 이용하여 실험적으로 적용하였다. 화물의 흔들림을 감쇠시키는 것에 비중을 두거나 천정 크레인 트롤리의 신속한 이동에 비중을 둔 두 경우의 시뮬레이션 및 실험결과 각각의 목적에 적합한 성능을 보여주었으며 실험과 시뮬레이션의 성향이 일치함을 보여주었다.

후 기

본 연구는 97년도 교육부 학술연구조성비(ME97-D-19)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mita, T and Kanai, T, "Optimal Control of the Crane System Using the Maximum Speed of the Trolley," 計測自動制御學會, pp.125- 130, 1979.
2. Ridout, A. J., "New Feedback Control System for Overhead Cranes." Electric Energy Conference, Adelaide, pp.135-140, 1987.
3. Sagara, S and Ohkawa, F, "Adaptive Control for Cranes," 日本機械學會論集(C卷), No.89- 0593 B, pp.150-154, 1990.
4. Butler, H., Honderd, G. and Amerongen, J. V., "Model Reference Adaptive Control of a Gantry Crane Scale Model," IEEE Control Systems, pp. 57-62, 1991.
5. Sakawa, Y and Sindo, Y, "Optimal Control of Container Cranes," Automatica, Vol. 18, No. 3, pp.257-266, 1982.
6. Chung, C. C. and Hauser, J., "Nonlinear Control of a Swing Pendulum," Automatica, Vol. 31, No. 6, pp. 851-862.
7. Fliss, M., Levine, J. and Rouchon, P., "A simplified approach of crane control via generalized state space model," Proc, 30th conference on decision and control, pp. 736-741, 1991.
8. Yoon, J. S., Park, B. S., Lee, J. S. and Park, H. S., "Control Design for the Anti-Swing Crane," KACC, pp. 229-235, 1994.
9. 이진우, 이충환, 김상봉, "타워형 크레인의 자동화를 위한 이론적 고찰 및 디지털 제어에 관한 연구," KACC, pp. 993-998, 1992.
10. 정승현, 권관조, 박정일, 이달해, "크레인의 Anti-Swing 및 위치제어기의 개발," KACC, 1996.
11. 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어 (Part I): 모델링, 제어전략, 기준 선도를 통한 오차 피드백 제어," J. of Control., Automation and Systems Eng., Vol. 3, No. 1., 1997.
12. 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어 (Part II): 트롤리 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어," J. of Control., Automation and Systems Engineering, Vol. 3, No. 2., 1997.
13. Holland, J., "Adaptation in Natural and Artificial System," The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
14. Pham, D. T. and Jin, G., "A Hybrid Genetic Algorithm," Proc. 3rd World Cong. on Expert System, Seoul, Korea, Vol. 2, pp.748-754, 1996.
15. 김길태, 최형식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 천장크레인의 최적견실제어," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(1), pp.197-201., 1997.
16. Kundu, S., Kamagata, K., Seto, K., and Kawata, S., "Can a Genetic Algorithm outperform LQR ?" 2nd ASCC, Vol. 3, pp.123-127, 1997.