

하이브리드 유전알고리즘을 이용한 크레인 시스템의 디지털 최적제어에 관한 연구

김길태¹⁾, 최형식²⁾

A Study on a Digital Optimal Control of Crane Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm

Gil-Tae Kim, Hyeung-Sik Choi

ABSTRACT

This thesis presents a hybrid genetic algorithm-based optimal control strategy for control of the swing motion and position of an overhead crane. A servor system which can transfer the trolley to a desired position is obtained on the basis of a linearized model to cope with disturbances. A hybrid genetic algorithm is applied to find the optimal gain parameter of the controller. Computer simulation and experimentation on an overhead crane demonstrates the effectiveness of the proposed method.

1. 서론

자동차 공장, 건설현장, 조선소, 및 중공업 플랜트등과 같은 산업현장에서 천정크레인인 크고 무거운 화물을 원하는 위치로 이동시키는데 주로 이용되어지고 있다. 크레인의 트롤리와 화물사이의 와이어 로프에 연결되어 있는 물리적인 구조 때문에, 화물을 목표위치로 이동시킬 때 대부분 진자운동형식의 흔들림이 발생되며 생산성 향상을 위해서 신속히 이동시킬 때 흔들림은 크게 일어난다. 이러한 경우에 충돌로 인해 각종 직살물의 파괴, 화물의 손상과 같은 경제적인 손해와 인명 피해가 초래될 수 있다. 따라서 속도 향상을 시키며 동시에 흔들림을 줄이기위한 많은 연구가 진행되고 있다.

먼저, 크레인 화물의 흔들림 제어에 관한 초기 연구의 형태로 흔들림 각도를 측정하지 않고 미리 입력한 속도계약을 따라 트롤리가 운행되며 동시에 로프의 진동을 최소로 하는 개루프제어가 있다¹⁾. 그리고 진동각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 제한시켜 제어한 피드백제어가 있으며²⁾ 크레인의 진동과 위치제어에 적응제어

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 기계공학전공

2) 한국해양대학교 기계냉동자동화공학부 조교수

(MRACS) 알고리즘을 적용한 연구⁽³⁾와 최적제어법을 이용하여 진자계의 흔들림을 최소화하는 연구가 있었다⁽⁴⁾. 또한, 크레인 대차에서 로프의 간격을 조정하여 로프의 장력을 증가시켜 진자의 흔들림을 줄이는 방법에 관한 연구⁽⁵⁾와 로타리 크레인과 컨테이너 크레인의 흔들림을 제어하기 위해 최적제어기를 설계한 연구가 있었다⁽⁶⁾. 비선형 크레인 모델링을 토대로 흔들림을 제어하기 위해 비선형 포화 제어 설계기법에 관한 연구도 발표되었다. 한편, 흔들림각 제어기는 근궤적 선도를 이용하고 위치제어는 루프형상기법을 사용하여 제어기를 설계한 연구와 퍼지제어기를 사용하여 위치제어와 각도제어의 가중치를 변화시키거나 속도프로파일을 이용하여 위치제어와 각도제어를 일정하게 한 연구가 있다⁽⁷⁾.

본 연구의 목적은 천정크레인이 화물을 이동중에 자체의 운동역학적 관계에 의한 흔들림과 외부로 부터의 외란에 의해 흔들리는 화물을 단시간에 흔들림이 가능한 없는 안정된 상태로 되돌리는 것과 가능한 단시간에 지정된 목표위치로 이동을 성취하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 흔들림 완화와 신속한 목표추종의 두 목표를 성취하기 위하여 HGA-based 최적제어기를 적용한다. 이를 위해 우선, 화물 흔들림의 운동해석과 화물과 트롤리와 의 운동특성을 파악할 수 있는 수학적 모델링이 필요하고 Lagrange 운동방정식을 이용하여 트롤리와 화물의 관계를 모델링하였다. 본 논문에서 천정크레인의 화물과 트롤리의 질량은 정확히 측정하기가 어려워 불확실한 시스템으로 정의하였다. 이러한 시스템의 제어를 위하여 외란이나 불확실한 모델에서도 강건하고 전역적인 해를 찾아내는 하이브리드 유전알고리즘을 이용한 최적 상태 피드백(optimal state feedback) 서보계를 설계한다. 이를 크레인에 적용하여 그 유효성을 검증한다.

2장에서는 제어계의 설계에 요구되는 천정크레인의 수학적 모델을 얻고, 3장에서는 하이브리드 유전알고리즘(HGA)에 대해 설명하고, 4장에서는 HGA을 이용한 제어계를 설계한다. 그리고 5장에서는 크레인시스템의 실험장치와 실험 및 시뮬레이션결과에 대해 살펴보고, 끝으로 6장에서 설계된 제어기를 이용하여 천정크레인 시스템에 적용한 결과에 대한 결론을 논한다

2. 크레인 시스템 모델링

이 장에서는 제어대상인 천정크레인의 수학적 모델을 얻는다. 천정크레인의 운동역학은 Lagrange식을 이용해서 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

2.1 천정크레인의 운동방정식

천정크레인은 Fig. 1과 같이 크게 트롤리, 화물 그리고 화물을 연결하는 연결선으로 구성된다.

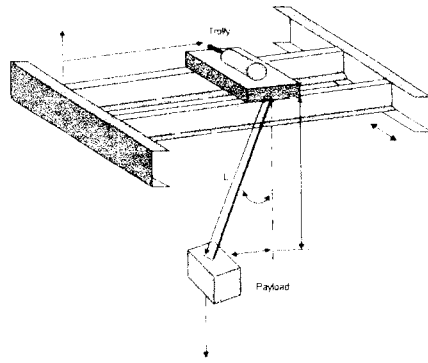


Fig. 1 천정크레인 시스템의 구성도.

여기서, 트롤리의 등가질량 M_t , 화물의 질량 M_p , 등가 점성 마찰계수 B_d , 트롤리와 화물사이의 거리 L , 화물의 흔들림 각도 θ 라 한다. 또한 천정 크레인 시스템은 다음과 같은 조건을 만족한다고 가정한다.

1. 트롤리의 위치와 속도 그리고 화물의 각도와 각속도를 측정할 수 있다.
2. 화물과 트롤리사이 연결은 질량이 없는 강체로 이뤄져 있고 연결 관절부의 마찰은 무시할 수 있다.
3. 트롤리 이동시 발생하는 마찰계수는 정확히 알 수 있다.

위의 조건에 따라 Lagrange식을 이용하여 천정크레인의 운동방정식을 세운다.

천정크레인 전체의 운동에너지, 위치에너지 및 마찰에너지는 각각 다음과 같다.

$$T_{total} = \frac{1}{2} (M_t + M_p) \frac{dx}{dt}^2 + M_p L \frac{dx}{dt} \frac{d\theta}{dt} \cos(\theta) + \frac{1}{2} L^2 M_p \frac{d\theta}{dt}^2 \quad (1)$$

$$U_{total} = M_p GL(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$D_{total} = \frac{1}{2} B_d \frac{dx}{dt}^2 \quad (3)$$

윗 식 (1), (2) 및 (3)들을 Lagrange식 (4)에 따라 순차적으로 풀어 운동방정식으로 표현하면 다음의 식 (5)와 (6)으로 표현된다.

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

트롤리에 대한 운동방정식은

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

화물에 대한 운동방정식은

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

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 대입하여 \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

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

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

로 표현되는 운동방정식을 얻는다. 흔들림의 진폭이 작을 경우 즉 화물의 진동각도의 평형점 $\theta \approx 0$ 에서 선형화하면 다음과 같은 상태방정식을 얻게된다.

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

여기서 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ 는 상태벡터, \mathbf{y} 는 관측 출력벡터, \mathbf{z} 는 출력이며 계수행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & M_1 G & 0 \\ 0 & M_1 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & G & M_1 G \\ 0 & M_1 & L & M_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3. 하이브리드 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic algorithms: GAs)은 자연계의 진화원리를 모방하여 강인한 진화적인 탐색능력을 보유하고 있기 때문에 복잡한 최적화 문제를 해결하려는 도구로 이용되어지고 있다¹⁾. 그러나 일반적인 유전자알고리즘은 룰렛 휠(roulette wheel) 선택 방법에 기초한 확률적인 재생산연산자를 사용하므로 작은 염색체 집단이 사용되어지면 초기상태에서 유전자적 다양성을 상실하게 된다. 따라서 보통 30 ~ 200개 범위 안의 해 집단크기가 사용된다. 하지만 이 크기의 집단은 그만큼의 계산적인 부하가 증가한다. 따라서 본 논문에서는 이런 룰렛 휠 방식의 결점을 보완하기 위해서 작은 집단수에도 유전자적 다양성 문제를 극복할 수 있는 새로운 재생산자를 사용하는 하이브리드 유전알고리즘을 사용한다²⁾. 하이브리드 유전알고리즘의 일반적인 구조는 일반 유전알고리즘과 같이 퍼라미터의 부호화, 초기 해 집단의 생성, 집단내 개체들의 적합도 평가, 새로운 재생산 연산자를 포함하는 기본 동작자들로 구성된다.

1) 부호화 및 집단의 초기화

자연계의 생물들이 유전인자인 염색체에 의해서 진화해가듯이 유전알고리즘에서도 이러한 과정을 컴퓨터상에서 실현하기 위해서 퍼라미터들을 부호화 하여 사용하며 이진 부호화가 보편적으로 이용되는 표현방법이다. 퍼라미터의 표현방법이 설정되면 다음은 N개의 개체로 구성되는 초기 해집단을 생성한다.

2) 적합도 평가

유전알고리즘은 집단내 개체간의 우열을 평가하여 더 나은 집단을 형성하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 이는 주로 목적함수로부터 계산된다.

3) 새로운 재생산 연산

재생산은 자연계에서 일어나는 직사생존의 원리를 모방한 것으로서 동작중 적합도에 따라 개체를 선택하여 교배급원(Mating pool)을 생성하게 된다. 일반적으로 적합도

가 높을수록 개체들의 선택확률도 높아진다. 재생산 방법은 여러 가지가 있으니 그중 룰렛 휠 방법을 이용한 확률적 선택법이 많이 사용된다. 그러나 확률적인 선택 재생산은 ① 선택과정에서 최적의 적합도 개체를 잃어버릴 수 있다. ② 특히 집단이 수가 작을 경우, 초기에 강한 개체가 여러번 생산되어 집단을 지배해버릴 수 있다. ③ 탐색 영역에서, 이 선택방법은 새로운 점을 탐색할 수 없는 경우가 있다는 결점을 가진다. 이런 결점들을 극복하기 위해 사용된 새로운 연산자는 확률적 선택과 유사구배 (Gradient-like) 기법적 선택을 혼합하여 적은 집단수에서도 강인하고 효과적으로 전역해를 빠른시간내에 탐색한다⁽⁹⁾.

4) 교배 연산

자연계에서 생물들이 성적결합을 통해 자손을 생성하듯이 개체간에 유전정보를 교환하여 새로운 염색체를 생성하는 동작이 교배이다. 교배급원으로부터 한 쌍의 아버지 개체가 선택되고 임의의 교차점을 선정하고 이후의 문자열을 서로 교환하여 새로운 자손을 생산하는데 이러한 동작은 N개의 자손이 생성될 때까지 계속된다.

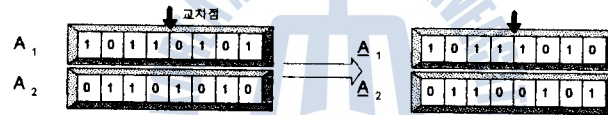


Fig. 2 교배 연산 과정

5) 돌연변이 연산

돌연변이는 돌연변이 확률에 따라 구조체의 비트를 임의로 변화시키므로써 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.

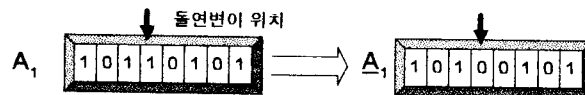


Fig. 3 돌연변이 연산 과정

Fig. 4는 하이브리드 유전알고리즘의 동작과정을 보여주고 있다.

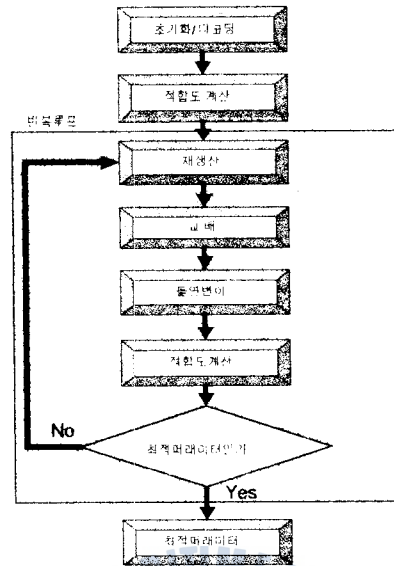


Fig. 4 하이브리드 유전알고리즘의 순서도

4. 제어계의 설계

여기서는 앞서 구한 크레인 시스템의 동적방정식을 바탕으로, 건설한 서보제어계를 설계하기 위하여 하이브리드 유전알고리즘을 이용한다. 제어계의 목적은 계단상의 외란이 수반되는 환경에서도 화물의 흔들림을 되도록 억제하며 계단상의 목표위치 변화에 정상 편차없이 트롤리를 빠르게 이동시키는 것이다. 이를 위해 다음의 새로운 상태변수를 도입하고

$$v = \int z - z dt \tag{12}$$

양변을 한 번 미분하고 식 (11)의 관계를 이용하면 다음의 확장시스템으로 표현된다.

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A} \bar{x} + \bar{B}u - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} z, \tag{13}$$

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

확장시스템으로부터 행렬의 쌍 (\bar{A}, \bar{B}) 는 식 (11)의 시스템이 가제어하고 동시에 다음의 관계가 만족되어 역시 가제어하게 된다¹⁰⁾.

$$\rho \begin{bmatrix} B & A \\ 0 & DC \end{bmatrix} = \bar{5}.$$

다음과 같은 제어칙(control law)을 선정하고

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

이를 식 (13)에 대입하고 양변을 한번 미분하면 폐회로제어시스템은 다음과 같게 된다.

$$\dot{\bar{x}} = (\bar{A} - \bar{B}K)\bar{x} \quad (15)$$

만약 식 (15)의 시스템의 고유치가 모두 부의 실수부를 가지도록 K를 적절히 정하면

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

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

이 되어 출력이 계단상의 입력을 성공적으로 추종하게 하는 제어기를 구성할 수 있음을 보여준다. 확장시스템을 안정하게 하는 제어칙은 항상 존재하며 최적제어칙(Optimal control law)은 확장시스템에서 $z_r = 0$ 수정하므로써 얻어질 수 있다. 이때 K는 다음의 평가함수가 최소값을 가지도록 구해진다.

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

여기서 Q는 반정정(positive semidefinite) 하중행렬이고 r는 양의 하중계수이다. 식 (14)는 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 $K = [K_1 \quad k_2]$ 이다.

하이브리드 유전알고리즘을 이용한 서보계 구조는 Fig. 5와 같다.

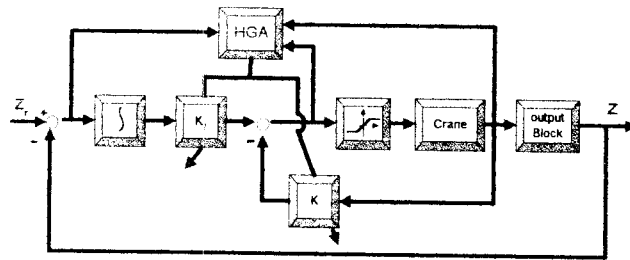


Fig. 5 하이브리드 유전자-서보계 구성도

5. 실험 결과

제안된 제어기에 대한 실험을 위하여 높이1.8m, 길이1.9m의 크레인시스템을 제작하였다. 크레인 시스템의 주요부분으로 제어부, 구동부, 트롤리, 레일, 화물, 데이터 처리부로 구성되어있다. 크레인 시스템의 흔들림과 위치제어를 위해 시뮬레이션과 실험을 행하였다. 천정 크레인의 파라미터들은 트롤리와 화물의 추정질량이 3.0kg, 3.0kg이고 마찰계수 2Nsec/m, 로프 길이는 0.73m를 사용하였다. 최적 궤환이동행렬 K를 결정하기 위해 대각행렬 $Q = [10, 3, 10, 5, 10]$, $r=1$ 로 설정하였다. 사용된 하이브리드 유전알고리즘의 파라미터는 돌연변이 확률 $P_m = 0.005$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 재생산 계수 $\eta = 1.5$ 그리고 집단의 크기 N=6를 사용하였다. Fig. 6은 빠른 목표위치 추종을 하면서 흔들림을 가능한 줄이는 시뮬레이션 결과이고 Fig. 7은 최저 흔들림을 유지하면서 원하는 목표에 이르는 시뮬레이션 결과이다.

6. 결론

본 연구에서는 천정 크레인에서 트롤리와 화물의 흔들림간의 관계를 파악할 수 있는 운동방정식을 유도하였고 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키며 천정 크레인 트롤리를 원하는 위치로 신속하게 이동시키는 제어계를 하이브리드 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 본 논문에서 설계한 하이브리드 유전자 서보제어계는 질량변화에 의한 외란, 충격력에도 불구하고 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키고 트롤리가 상상 편차 없이 목표위치를 정확히 추종하는 강인한 제어기임을 시뮬레이션 및 실험을 통해 보여 주었다. 또 선형적이고 비선형성에 강인한 하이브리드 유전알고리즘을 사용해 설계된 제어기는 기존의 리카치방정식의 해를 구하지 않고 하이브리드 유전알고리즘을 이용하여 강인한 제어를 할 수 있음을 보여준다.

이 제안된 제어기를 실 크레인 시스템에 적용하여 다음과 같은 유효성을 검증하였다.

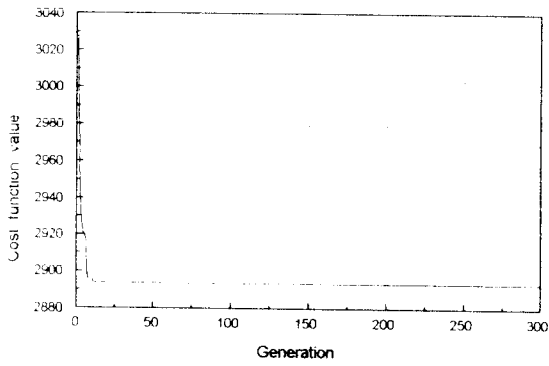
- 1) 충격적인 외란인가시, 화물의 흔들림을 감쇄 제어하는 레귤레이터제어가 시뮬레이션

- 및 실험에 모두 효과적으로 수행됨을 확인하였다.
- 2) 빠른 트롤리 목표위치제어에서, 서보제어계는 정상상태오차와 큰 오버슈트없이 빠른시간내에 정상상태에 도달함을 확인하였다.
 - 3) 최대흔들림억제제어에서, 트로리의 목표위치도달시간은 다소 늦어지나 흔들림의 크기 및 지속시간은 효과적으로 감소됨을 확인하였다.

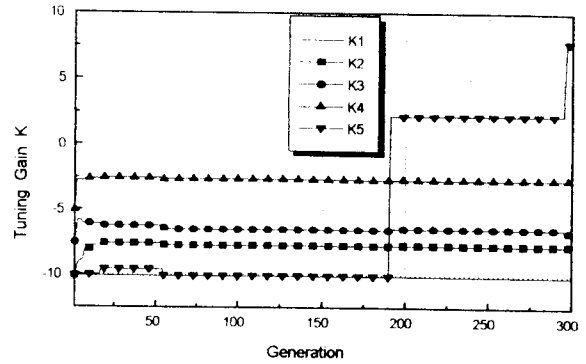
실험 및 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제안된 제어기는 목표위치 추종제어와 흔들림제어에 효과적임을 확인하였고 또 외란에 대한 강인성을 검증하였다.

참고문헌

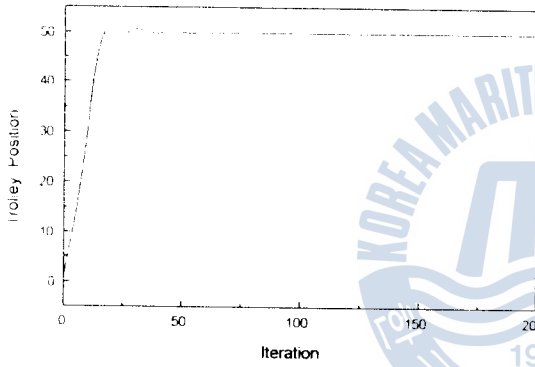
- (1) T.Mita, T.Kanai, "optimal control of the Crane System Using the Maximum speed of the Trolley" 計測自動制御學會論文集, pp.125-130, 1979.
- (2) A.J. Ridout, "New Feedback Control System for OverheadCranes", Electric Energy conference, Adelaide, pp135-140,6-9 Oct. 1987.
- (3) Shinichi SAGARA, Fujio OHKAWA "Adaptive Control for Crane", 日本機械學會論集(C편) No.89-0593 B. pp. 150-154. 1990.
- (4) 홍형주, 이신섭, "크레인 전자계의最適制御." 大韓機械學會. pp. 832-837. 1995.
- (5) Y.G.Cho, Y.M.Yoo, "Dynamic Analysis and Optimal Control of a Container Crane," NATO ASI conference, Vol.3, pp.115-135. 1986.
- (6) Y. Sakawa and Y.Sindo, "Optiaml Control of Container Cranes", Automatica, Vol. 18, no. 3, pp.257-266, 1982.
- (7) 정승현, 권판조, 박정일, 이달해, "크레인의 Anti-Swing 및 위치 제어기의개발" 韓國自動制御學術會議 論文集I, Oct. 24-26, 1996.
- (8) J. Holland, "Adpatation in Natural and Artificial System", The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- (9) D. T Pham and G. Jin, "A Hybrid Genetic Algorithm", Proc. 3rd World Cong. on Expert System, Seoul, Korea, Vol. 2, pp.748-754, 1996..
- (10) B. Porter and A Bradshaw "Design of linear Multivariable continous time tracking systems", int J. system Sci., vol 5, 1974.



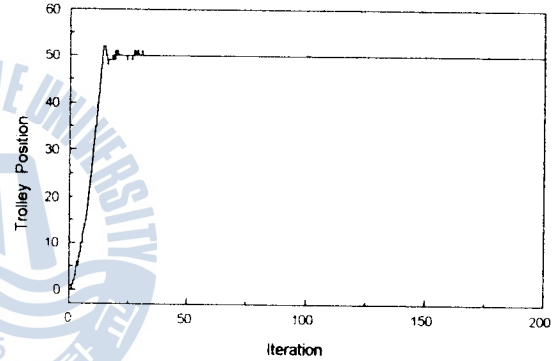
a) 평가함수값



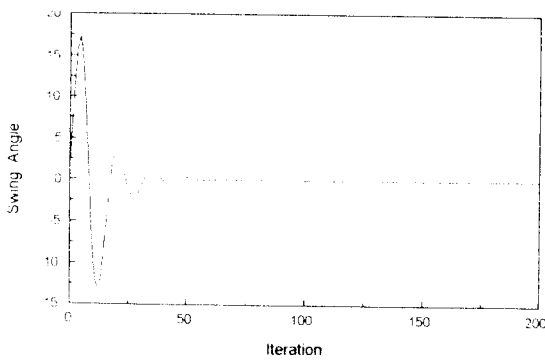
b) HGA를 이용한 파라미터 탐색과정



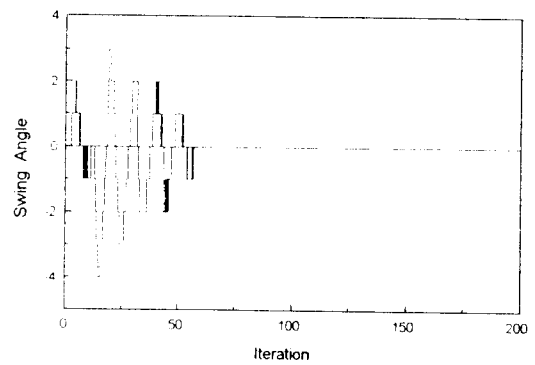
c) 트롤리위치 제어응답 시뮬레이션



d) 트롤리위치 제어응답 실험결과

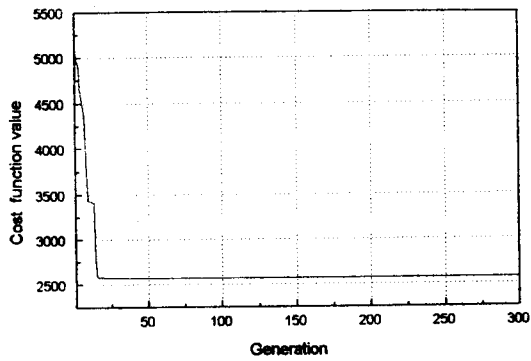


e) 화물 흔들림 제어응답 시뮬레이션

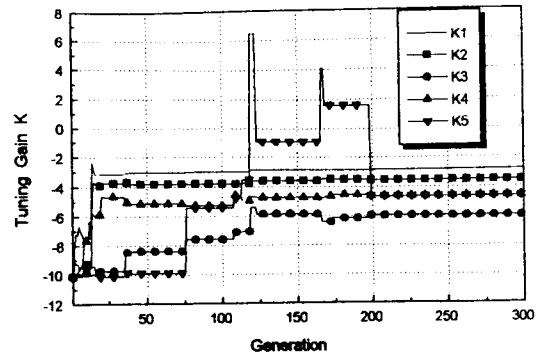


f) 화물 흔들림 제어응답 실험결과

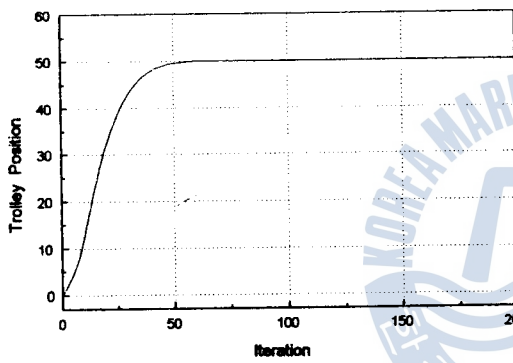
Fig. 6 빠른 위치제어시 제어응답



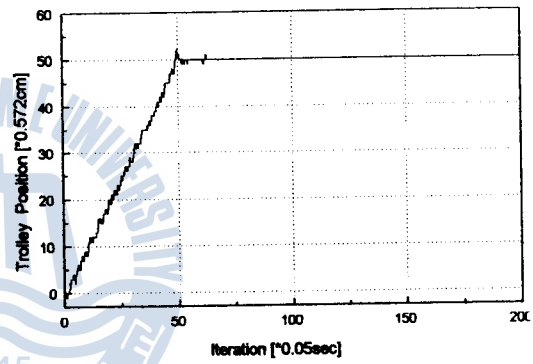
a) 평가함수값



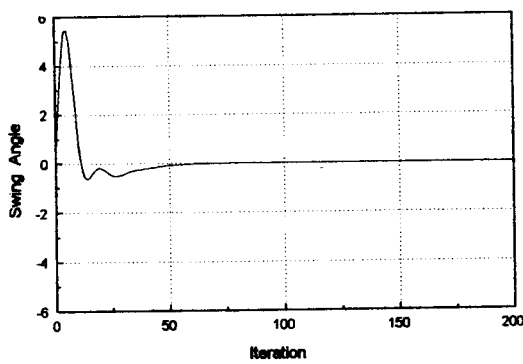
b) HGA를 이용한 파라미터 탐색과정



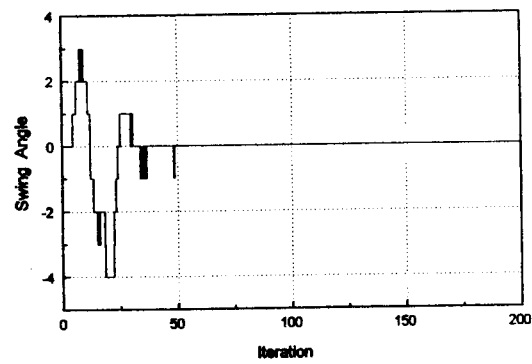
c) 트롤리위치 제어응답 시뮬레이션



d) 트롤리위치 제어응답 실험결과



e) 화물 흔들림 제어응답 시뮬레이션



f) 화물 흔들림 제어응답 실험결과

Fig. 7 흔들림 제어시 제어응답