

유전알고리즘을 이용한 크레인 시스템의 최적제어

김길태* · 최형식** · 진강규***

An Optimal Control of the Crane System Using a Genetic Algorithm

G. T. Kim* · H. S. Choi** · G. G. Jin***

Key words : Hybrid genetic algorithm(하이브리드 유전 알고리즘), Genetic algorithm(유전 알고리즘), Optimal control(최적 제어), State feedback(상태 귀환), Overhead travelling crane(천정 크레인).

Abstract

This paper presents an optimal control algorithm for the overhead crane. To control the swing motion and the position tracking of the payload of the overhead crane, a state feedback control algorithm is applied. By using a hybrid genetic algorithm, the feedback gains of the state feedback is optimized to minimize the cost function composed of position errors and payload swing angle under unknown constant disturbances. Computer simulation is performed to demonstrate the effectiveness of the proposed control algorithm.

1. 서 론

자동차 공장, 건설현장, 조선소, 및 중공업 플랜트 등과 같은 산업현장에서 천정 크레인은 주로 크고 무거운 화물을 원하는 위치로 이동시키는데 이용되고 있다. 크레인의 트롤리와 화물사이가 와이어 로프에 연결되어 있기 때문에, 화물을 목표 위치로 이동시킬 때 진자운동형태의 흔들림이 발생되며 생산성 향상을 위해서 신속히 이동시킬 때

흔들림은 더욱 크게 일어난다. 이러한 경우에 충돌로 인해 각종 시설물의 파괴, 화물의 손상과 같은 경제적인 손실과 인명 피해가 초래될 수 있다. 따라서 이동 속도를 향상시킴과 동시에 흔들림을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

크레인 화물의 흔들림 제어에 관한 초기 연구의 형태로 흔들림 각도를 측정하지 않고 미리 입력한 속도궤적을 따라 트롤리가 운행되며 동시에 로프의 진동을 최소로 하는 개루프 제어가 있다¹⁾. 그리

* 주) 토탈소프트뱅크(원고접수일 : 98년 1월)

** 한국해양대 기계.냉동.자동차 공학부

*** 한국해양대 자동화정보 공학부

고 진동 각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 귀환시켜 제어한 피드백제어가 있으며¹² 크레인의 진동과 위치제어에 적응제어(MRAC) 알고리즘을 적용한 연구¹³와 최적 제어를 이용하여 진자계의 흔들림을 최소화하는 연구가 있다¹⁴. 또한, 크레인 트롤리에서 로프의 간격을 조정하여 로프의 장력을 증가시켜 진자의 흔들림을 줄이는 방법에만한 연구¹⁵와 로터리 크레인과 컨테이너 크레인의 흔들림을 제어하기 위해 최적제어를 설계한 연구가 있다¹⁶. 비선형 크레인 모델링을 토대로 흔들림을 제어하기 위해 비선형 포화 제어 설계기법에 관한 연구도 발표되었다. 한편, 흔들림 각 제어기는 근계적 선도를 이용하고 위치제어는 루프형상기법을 사용하여 제어를 설계한 연구와 퍼지 제어를 사용하여 위치제어와 각도제어의 가중치를 변화시키거나 속도프로파일을 이용하여 위치제어와 각도제어를 일정하게 한 연구가 있다¹⁷.

본 연구의 목적은 천정크레인이 화물을 이동할 때 자체의 운동 역학적 관계에 의한 화물의 흔들림과 외란에 의한 화물의 흔들림을 단시간에 안정한 상태로 되돌리는 것과 가능한 단시간에 지정된 목표위치로 이동하는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 흔들림 완화와 신속한 위치추종의 두 목표를 성취하기 위하여 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 개선한 하이브리드 유전알고리즘(hybrid genetic algorithm -HGA)을 이용한 최적제어를 적용한다^{18,19}. 이를 위해서 화물과 트롤리와의 운동특성을 나타내는 수학적 모델링을 구해야 하며 이는 Lagrange 운동방정식을 이용하였다. 본 논문에서 천정크레인의 화물과 트롤리의 질량은 정확히 측정하기가 어려워 불확실한 시스템으로 정의하였다. 이러한 시스템의 제어를 위하여 외란이나 불확실한 모델에서도 강건하고 전역적인 해를 찾아내는 HGA를 이용한 최적 상태 피드백(optimal state feedback) 서보계를 설계하여 이를 크레인시스템에 적용하고 그 유효성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 천정크레인의 운동방정식

이 장에서는 제어대상인 천정크레인의 수학적

모델을 얻는다. 천정크레인의 운동역학은 Lagrange식을 이용해서 미분 방정식으로 표현할 수 있다.천정크레인은 Fig. 1과 같이 크게 트롤리, 화물 그리고 화물을 연결하는 와이어로프로 구성된다.

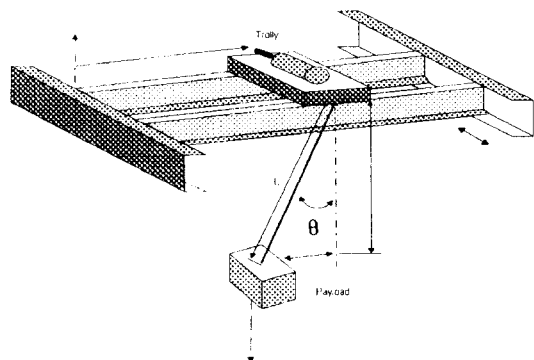


Fig. 1 view of overhead crane system

여기서, M_t 는 트롤리의 등가질량, M_p 는 화물의 질량, B_d 는 등가 점성 마찰계수, L 은 트롤리와 화물사이의 거리, θ 는 연직방향에 대한 로프의 흔들림 각도라 한다. 또한, 천정크레인 시스템은 트롤리의 위치와 속도 그리고 화물의 각도와 각속도를 측정할 수 있고, 화물과 트롤리 사이의 연결로프는 변형이 없으며 연결 관절 부의 마찰은 무시할 수 있다고 가정한다. 이 가정에 따라 Lagrange식을 적용하여 천정크레인의 운동방정식을 세우면 천정크레인 전체의 운동에너지, 위치에너지 및 점성마찰에너지는 각각 다음과 같다.

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

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

$$D = \frac{1}{2} B_d \dot{x}^2 \quad (3)$$

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

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

트롤리에 대한 운동방정식은

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

여기서 F 는 천정크레인 시스템에 대한 제어입력이다. 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. 식 (6)에서 $\ddot{\theta}$ 에 대해 정리하면

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

으로 나타낼 수 있다.

식 (7)을 식 (5)의 $\ddot{\theta}$ 에 대입하여 \ddot{x} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

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

식 (7)과 (8)에서

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

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

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

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx}, \quad \mathbf{z} = \mathbf{Dy} \quad (11)$$

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.

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

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

3. 하이브리드 유전알고리즘(HGA)

유전알고리즘(Genetic algorithms)은 자연계의 진화원리를 모방하여 강인한 전역적인 탐색능력을 보유하고 있기 때문에 복잡한 최적화 문제를 해결하는 도구로 이용되고 있다¹⁰⁾. 일반적인 유전자알고리즘은 룰렛 휠(roulette wheel) 선택방법에 기초한 확률적인 재생산 연산자를 사용하므로 작은 염색체 집단이 사용되면 초기상태에서 유전자적 다양성을 상실하게 된다. 따라서 보통 30~200개 범위 안의 큰 해 집단크기가 사용되어 계산적인 부하가 크다. 본 논문에서는 이런 룰렛 휠 방식의 결점을 보완하기 위해서 작은 집단수라도 유전자적 다양성 문제를 극복할 수 있는 새로운 재생산자를 사용하는 하이브리드 유전알고리즘을 사용한다^{18,9)}. 하이브리드 유전알고리즘의 일반적인 구조는 일반 유전알고리즘과 같이 파라미터의 부호화, 초기 해 집단의 생성, 집단 개체들의 적합도 평가, 새로운 재생산 연산자를 포함하는 기본 동작자들로 구성된다.

1) 부호화 및 집단의 초기화

자연계의 생물들이 유전인자인 염색체에 의해서 진화하는 것과 같이 유전알고리즘에서도 이러한 과정을 컴퓨터로 구현하기 위해서 파라미터들을 부호화 하여 사용하며 보편적 표현방법은 이진 부호화이다. 파라미터의 표현방법이 결정되면 다음은 N개의 개체로 구성되는 초기 해 집단을 생성한다.

2) 적합도 평가

유전알고리즘은 해집단 내 개체간의 우열을 평가하여 더 나은 해집단을 형성하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 이는 주로 목적함수로부터 계산된다.

3) 새로운 재생산 연산

재생산은 자연계에서 일어나는 적자생존의 원리를 모방한 것으로서 동작 중 적합도에 따라 개체를 선택하여 교배급원(Mating pool)을 생성하게 된다. 일반적으로 적합도가 높을수록 개체들의 선택확률도 높아진다. 재생산 방법은 여러 가지가 있으나 그중 룰렛 휠 방법을 이용한 확률적 선택

방법이 많이 사용된다. 그러나 확률적인 선택 재생산은 선택과정에서 최적의 적합도 개체를 잃어버릴 수 있다. 특히 집단 수가 작을 경우, 초기에 강한 개체가 여러 번 생산되어 집단을 지배할 수 있다. 탐색영역에서, 새로운 점을 탐색할 수 없는 경우를 갖는 결점을 가진다. 이런 결점들을 극복하기 위해 재생산 연산의 한 방법으로 사용된 HGA는 확률적 선택과 유사구배(Gradient-like) 기법적인 선택을 혼합하여 적은 집단 수에서도 강인하고 효과적으로 전역해를 빠른 시간 내에 탐색한다¹⁹⁾.

4) 교배 연산

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



Fig. 2 crossover process

5) 돌연변이 연산

돌연변이는 돌연변이 확률에 따라 구조체의 비트를 임의로 변화시키므로 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.

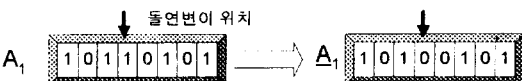


Fig. 3 mutation process

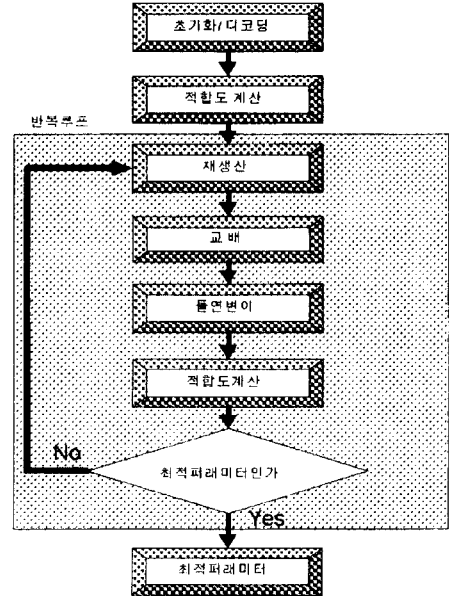


Fig. 4 flow chart of hybrid genetic algorithm

Fig. 4는 하이브리드 유전알고리즘의 동작과정을 보여주고 있다.

4. 서보계의 설계

본 장에서는 유도된 크레인 시스템의 운동방정식을 바탕으로 시스템을 제어하기 위해 건설한 서보제어계를 설계하며 건설한 서보제어계로 하이브리드 유전알고리즘을 제안한다. 제어계의 목적은 임펄스 형태의 충격 외란이 수반되는 환경에서도 화물의 흔들림을 되도록 억제하며 계단상의 목표위치 변화에 정상편차 없이 트롤리를 빠르게 이동시키는 것이다. 이를 위해 다음의 새로운 상태변수를 도입하고

$$v = f(z - z_r) dt \tag{12}$$

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

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

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

확장시스템으로부터 행렬의 쌍 (\bar{A}, \bar{B}) 는 식 (11)의 시스템이 가제어이고 동시에 다음의 관계

가 만족되어 역시 가제어이다.

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

다음과 같은 제어칙(control law)을 선정하고

$$u = -K\bar{x} \tag{14}$$

여기서 $K=[K_1, k_2]$ 는 귀환제어 이득이다. 이를 식 (13)에 대입하고 양변을 한번 미분하면 폐회로 제어시스템은 다음과 같게 된다.

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

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

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

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

이 되어 출력이 계단상의 입력을 성공적으로 추종하게 하는 제어기를 구성할 수 있음을 보여준다. 확장시스템을 안정하게 하는 제어칙은 항상 존재하며 최적제어칙은 평가함수를 최소화함으로써 얻어질 수 있다. 이때 K는 다음의 평가함수가 최소 값을 가지도록 구해진다.

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

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

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

하이브리드 유전알고리즘을 이용한 서보계 구조는 Fig. 5와 같다.

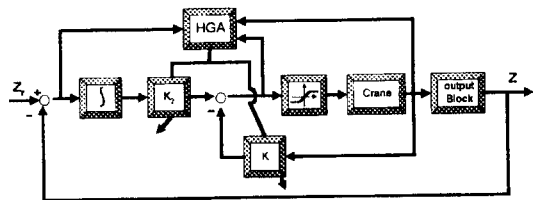


Fig. 5 하이브리드 유전자-서보계 구성도

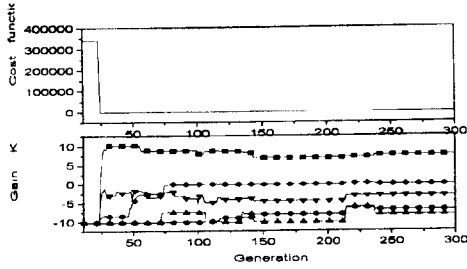
5. 컴퓨터 시뮬레이션

화물의 흔들림과 트롤리의 위치제어를 위해 제안된 제어기에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 사용된 유전알고리즘의 파라미터는 Table 1과 같다. 본 시뮬레이션에 사용된 천정크레인의 트롤리와 화물의 실제 질량은 1.5kg, 3.5kg이고 추정질량은 각각 3kg, 3kg이고 마찰계수는 $2N \cdot \text{sec}/m$, 로프 길이는 0.445m이다. 적용된 상태 귀환제어기에서 최적 귀환이득행렬 K를 결정하기 위해 HGA를 사용하였고, 사용된 파라미터는 Table 1에 나타나 있다. HGA에서 한 개체는 20비트의 5 string으로 구성된다. 평가함수에서 빠른 위치이동에서는 대각행렬 Q는 대각성분 [10, 5, 10, 3, 10], 최저 흔들림 위치이동에서는 대각성분 [10, 3, 10, 5, 10]을 사용하고 기준입력은 단위계단 입력으로 설정하였다.

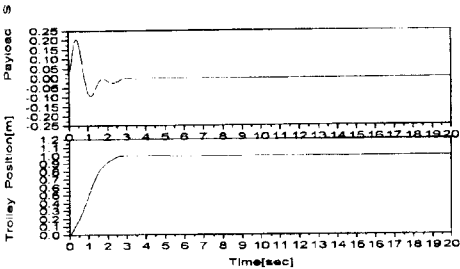
Table 1 Parameters of hybrid genetic algorithms

HGA Parameters	
Search Space	$-10.12 \leq k_1 \dots k_5 \leq 10.11$
Sampling period	0.05 sec
No. of generation	300
Size of population	6
Mutation rate	0.005
Reproduction coef	1.5
Crossover rate	0.9

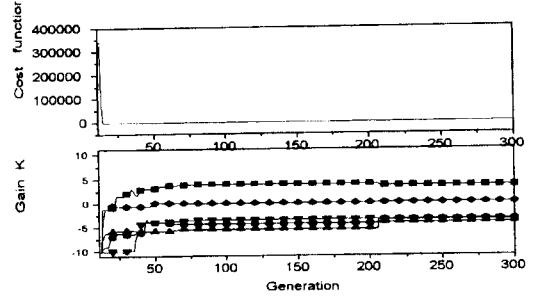
시뮬레이션 결과에서 Fig. 6, 7, 및 8의 a)에서 위의 그림은 300세대에서 평가함수의 값이 최소로 되는 제어이득들을 적용하였고 아래 그림은 이때의 상태 피드백 이득을 구하는 과정을 보여준다. 각 Fig.의 b)에서는 a)에서 구한 제어이득들을 적용하였을 때의 화물의 흔들림(위 그림)과 트롤리의 위치추종(아래 그림)을 나타낸다. Fig. 6은 흔들림보다는 목표위치로의 빠른 이동을 목표로 하였고 Fig. 7은 목표위치로의 이동보다는 최저 흔들림 제어에 중점을 두었다. Fig. 8은 6초경에 화물에 외부로부터의 충격이 가해졌을 때의 제어결과이다. 각 Fig.에서 나타난 바와 같이 HGA를 이용하여 구한 제어이득들을 적용한 결과, 흔들림의



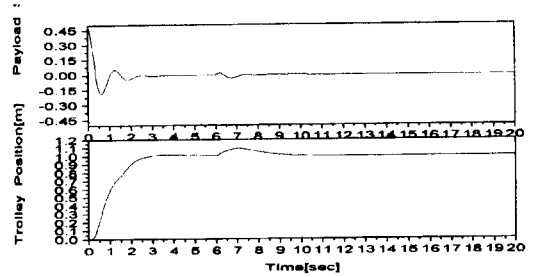
a) optimal feedback gain using HGA



b) response of trolley position and swing

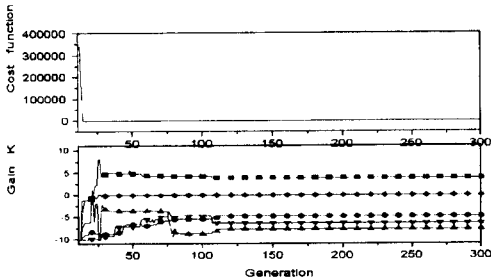


a) optimal feedback gain using HGA

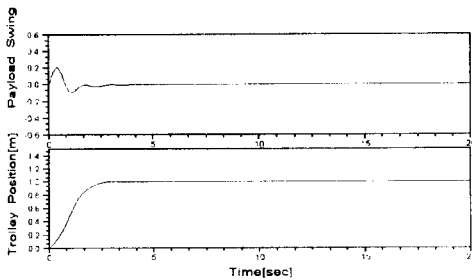


b) response of trolley position and swing

Fig. 6 response of fast position control



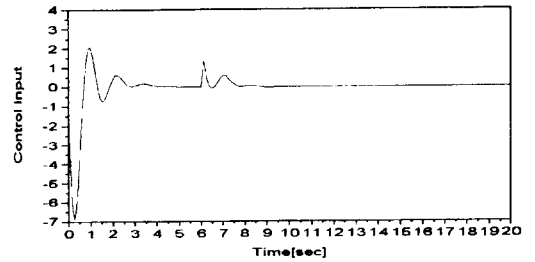
a) optimal feedback gain using HGA



b) response of trolley position and swing

Fig. 7 response of optimal swing control

제어나 위치추종의 제어를 선택적으로 잘 성취할 수 있음을 알 수 있다. 또한 제안된 제어기는 충격



c) control input

Fig. 8 response of controlled crane system in presence of impulse disturbance

력과 같은 외란에 대해서도 강인함을 보여준다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 천정크레인에서 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키며 천장 크레인 트롤리를 원하는 위치로 신속하게 이동시키는 추종제어를 하이브리드 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 본 논문에서 설계한 하이브리드 유전자-서보제어기는 화물의 초기 흔들림과 질량변화에 의한 외란, 충격력에도 불구하고 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키고 트롤리가 정상 편차 없이 목표위치를 정확히 추종하는 강인한 제어기임을

시뮬레이션을 통해 보여 주었다.

향후, 로프 길이를 변화시켜 흔들림을 효율적으로 제어하는 연구를 행하고자 한다.

참고문헌

- [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, pp.125-130, 1979.
- [2] A. J. Ridout, "New Feedback Control System for Overhead Cranes", Electric Energy Conference, Adelaide, pp.135-140, 1987.
- [3] S. Sagara and F. Ohkawa "Adaptive Control for Cranes", 日本機械學會論集(C편), No.89-0593 B, pp.150-154, 1990.
- [4] 홍형주, 이신섭, "크레인 진자계의 最適制御", 大韓機械學會, pp.832-837, 1995.
- [5] Y. G. Cho and Y. M. Yoo, "Dynamic Analysis and Optimal Control of a Container Crane", NATOASI Conf., Vol.3, pp.115-135, 1986.
- [6] Y. Sakawa and Y.Sindo, "Optimal Control of Container Cranes", Automatica, Vol. 18, No. 3, pp.257-266, 1982.
- [7] 정승현, 권판조, 박정일, 이달해, "크레인의 Anti-Swing 및 위치제어기의 개발", 韓國自動制御學術會議論文集I, 1996.
- [8] 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.
- [9] 김길래, 최형식, 진강규, "천정 크레인 시스템의 하이브리드 유전알고리즘을 이용한 서보제어", 대한기계학회 추계학술대회논문집 (A), pp.840-845, 1997.
- [10] J. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial System", The University of Michigan Press, Michigan, 1975.
- [11] B. Porter and A. Bradshaw, "Design of linear Multivariable Continuous-time Tracking Systems", Int J. System Sci., Vol. 5, 1974.

저자 소개



최형식

1961년 2월 6일생. 1983년 3월 고려대학교 기계공학과 졸업. 1989년 5월 University of South Carolina(공학석사). 1993년 2월 North Carolina State University(공학박사). 현재 한국해양대학교·냉동·자동차공학부 조교수.



진강규

1953년 10월 12일생. 1977년 한국해양대학교 졸업. 동대학원 석사(1981). 1985년 Florida Institute of Technology 전기·전자·컴퓨터공학과 석사. 1986년 University of Wales Cardiff 전기·전자·시스템공학과 박사. 1981-현재 한국해양대학교 자동차·정보공학부 교수.