韓國精密工學會 '97年度 春季學術大會論文集 pp.112~117

유전자 알고리즘을 이용한 천정 크레인의 최적제어기에 관한 연구
A Study on An Optimal Controller of Overhead Crane using the GAs

김 길태 (한국해양대 대학원), 박 예구(한국해양대원), 최 형식 (한국해양대 기계냉동자동차공학부)
Gil-Tae Kim (Mech. Graduate School, K.M.Univ.), Ye-Gu Park, Hyeung-Sik Choi (Div. of Mech. K.M.U)

ABSTRACT

This paper presents a GA(Genetic Algorithms)-Optimal control strategy for the control of the swing motion and the tranverse position of the overhead crane. The overhead crane system is defined uncertain due to unknown system parameters such as payload and trolly mass. To control the overhead crane, the GA-Optimal control scheme is suggested, which transfers a trolly to a desired place as fast as possible and minimizes the swing of the payload during the transfer. The genetic algorithms are applied to find digital optimal feedback gains. A computer simulation demonstrate the performance of the proposed the GA-digital optimal controller for the overhead crane.

Key Words : GA-digital optimal control (유전자 알고리즘-디지털 최적 제어), Swing motion (흔들림 운동), overhead crane (천정 크레인).

1. 서론.

자동차 공장, 건설현장, 조선소, 및 중공업 플랜트 등과 같은 산업현장에서 천정크레인은 크고 무거운 화물을 원하는 위치로 이동시키는데 주로 이용되어 지고 있다. 크레인의 트롤리와 화물사이가 와이어 로프에 연결되어 있는 물리적인 구조 때문에, 화물을 목표위치로 이동시킬 때 대부분 진자운동형식의 흔들림이 발생 되어진다. 흔들림이 큰 경우, 이로 인해 발생되는 각종 시설물의 파괴, 화물의 손상과 같은 경제적인 손해와 인명 피해가 초래된다. 따라서 위와 같은 피해를 줄이고 크레인 운행을 자동화하기 위해선 빠른시간내에 화물의 흔들림을 제거해야만 한다. 최근까지도 이를 위해서 많은 연구가 진행되고 있다.

먼저, 크레인 화물의 흔들림 제어에 관한 초기 연구의 형태로 흔들림각도를 측정하지 않고 미리 입력한 속도궤적을 따라 트롤리가 운행되며 동시에 로프의 진동을 최소로 하는 개루프제어[1]가 있다. 그리고 진동각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 궤환시켜 제어한 피드백제어에 관한 연구가 있다[2,3,4,5] 한편, 크레인의 진동과 위치제어에 적응제어(MRACS) 알고리즘을 적용한 연구[6]와 최적제어법을 이용하여 진자계의 흔들림을 최소화 하는 연구가 있고[7] 크레인 대차에서 로프의 간격을 조정하여 로프의 장력을 증가시켜 진자의 흔들림을 줄이는 방법에 관한 연구[8]와 로타리 크레인과 컨테이너 크레인의 흔들림을 제어하기 위해 최적제어기를 설계한 연구가 있다[9,10]. 비선형 크레인 모델링을 토대로 흔들림을 제어하기 위해 비선형 포화 제어 설계기법에 관한 연구도 발표되었다.[11] 한편, 흔들림각 제어기는 근궤적 선도를 이용하고 위치제어는 루프형상기법을 사용하여 제어기를 설계한 연구[12]와 퍼지제어기를 사용하여 위치제어와 각도제어의 가중치를 변화시키거나 속도프로파일을 이용하여 위치제어와 각도제어를 일정하게 한 연구가 있다[13,14,].

본 논문에서는 천정크레인이 화물을 이동중에 자체의 운동역학적 관계에 의한 흔들림과 외부로 부터의 외란에 의해 흔들리는 화물을 단시간에 흔들림이 없는 안정된 상태로 되돌리는 것과 동시에 가능한 단시간에 지정된 목표위치로의 이동을 위한 제어기에 대하여 연구 하였다. 이를 위해 우선, 화물 흔들림의 운동해석과 화물과 트롤리와의 운동특성을 파악할 수 있는 수학적 모델링을 Lagrange운동방정식

을 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 유전자알고리즘을 이용하여 최적상태피드백(optimal state feedback) 제어기를 설계한다.

본 논문의 2장에서는 제어기의 설계에 사용하기 위한 천정크레인의 수학적인 모델링에 대하여 설명한다. 3장에서는 유전자알고리즘의 설명과 적용순서에 대해 설명하고 4장에서는 유전자 알고리즘을 이용한 디지털 최적 제어계을 설계한다. 그리고 5장에서는 설계된 제어기를 이용하여 불확실한 천정크레인 시스템에 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과에 대해 논하며 6장에서 결론을 맺는다.

2.. 천정 크레인의 모델링

이 장에서는 제어대상인 천정크레인의 수학적모델링을 구한다. 천정크레인의 운동은 Lagrange식을 이용해서 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

2.1 천정크레인의 운동방정식.

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

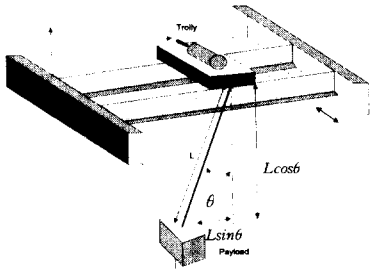

Fig. 1 천정 크레인 시스템의 구성도.

여기서, 트롤리의 등가질량 M_t, 화물의 질량 M_p, 등가 점성 마찰계수 B_a, 트롤리와 화물사이의 거리 L, 화물의 흔들림 각도 θ라 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 발생되는 마찰계수는 정확히 알 수 있다.

위의 조건에 따라 Lagrange식을 이용하여 천정크레인의 운동방정식을 세운다.

천정크레인 전체의 운동에너지, 위치에너지 및 마찰에너지는 각각 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

로 표현되는 운동방정식을 얻는다. 흔들림의 진폭이 작을 경우 즉 화물의 진동각도의 평형점 $\theta \fallingdotseq 0$ 에서 선형화 하면 $\sin\theta \fallingdotseq \theta$, $\cos\theta \fallingdotseq 1$로 근사할 수 있다. 위 운동방정식에서 상태 $x=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$가 $x_1=x$, $x_2=\dot{x}$, $x_3=\theta$, $x_4=\dot{\theta}$ 라 정의하면 다음의 상태방정식을 얻게된다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$
$$y = Cx \qquad (11)$$

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

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

3. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms :GA)은 자연계의 진화현상을 토대로한 인공 유전 계산 모델로서 John Holland에 의해서 1975년에 개발된 견실하고 전역적인 최적화 알고리즘이다.

3.1 유전자 알고리즘 구성

자연계의 생물들은 유전인자인 염색체에 의해서 생식과 유전등 진화과정을 반복해서 발전해 간다. 이 알고리즘을 컴퓨터에서 인공적으로 실현하기 위해서 생물의 염색체에 해당하는 부분은 이진 문자열로 표현한다. 이 문자열을 가지고 자연의 생물유전을 모방한 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 연산자를 거쳐서 다음 세대의 새로운 자손(offspring)을 인공적으로 생산해 내는 것으로 그 구성은 다음과 같다.

1) 초기화 및 부호화 (Initialization and Coding)

생물의 염색체와 같이 유전알고리즘에서는 염색체에 해당하는 파라미터를 주로 난수를 사용하여 2진수로 부호화한 N개의 문자열을 생성하므로서 초기 해집단을 구성한다.

2) 적합도 평가 (Evaluation of fitness)

해집단을 평가하는 것으로 각 문자열을 디코딩하여 목적함수에 대한 적합도를 계산한다.

3) 복제 (Reproduction)

적합도의 평가에 따라 높은 적합도를 가진 염색체를 선택하는 과정이다.

4) 교배 (Crossover)

복제연산에 의해 선택된 두 개의 염색체를 선택하여 문자열안의 있는 유전정보를 서로 교환하여 새로운 정보를 갖는 염색체를 생성한다.

5) 돌연변이(Mutation)

문자열안에 있는 유전자의 돌연한 형태로 새로운 유전정보를 갖는 문자열을 만든다.

3.2 유전자 알고리즘 적용 순서.

본 논문의 천정 크레인시스템에 이용되는 유전자 알고리즘의 적용 순서도를 Fig. 2에 나타낸다. 그리고 Table. 1은 사용된 유전자 알고리즘의 파라미터이다

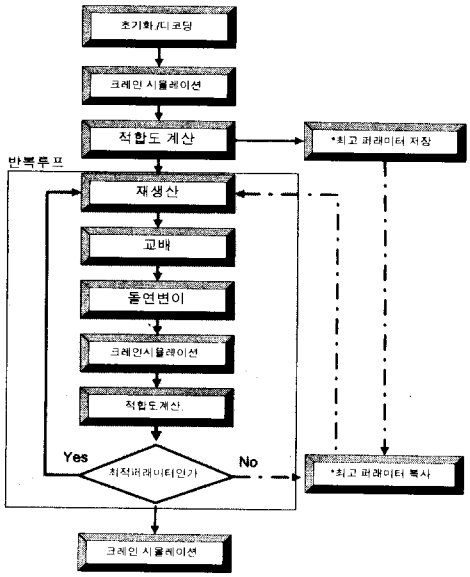

Fig. 2 유전자 알고리즘의 적용 순서도

Table. 1 유전자 알고리즘의 파라미터.

GAs Parameters	
Search Space	$-10.12 \le k_1 \cdots k_4 \le 10.11$
Sampling period	0.05sec
No. of generation	300
Mutation rate	0.005
Crossover rate	1.

4. 제어계의 설계

이 장에서는 2장에서 구한 크레인 시스템방정식을 바탕으로, 강건하고 전역적인 해를 찾아내는 유전자알고리즘을 이용한 최적 상태피드백 제어기를 설계한다. 제어기의 목적은 외란에 의한 화물의 흔들림을 되도록 억제하며 트롤리를 목표위치에 빠르게 이동시키는 것이다.

유전알고리즘을 이용한 최적제어기 구조는 Fig. 3과 같다.

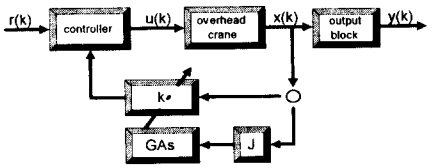

Fig. 3 유전자-최적 제어기 구성도.

최적제어기의 평가함수는 각 시간에서의 크레인의 각각의 상태변수의 제곱승 적분과 가해지는 제어입력항으로 나타나는 다음과 같은 식이 사용되어진다.

$$J=\int_0^T [x^T Qx + u^T Ru]dt \qquad (12)$$

여기서, Q, R. : 비중행렬.

식 (11)에 대한 연속시간계의 등가 이산계 시스템은 다음과 같다

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + Du(k) \\ y(k) &= Hx(k) \end{aligned} \qquad (13)$$

단, $\Phi = e^{AT}$, $D=\int_0^T e^{A\tau}d\tau B$, $H=C$이고 다음과 같다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0050 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.9967 & -0.0037 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9997 & 0.0050 \\ 0.0000 & -0.0033 & -0.1065 & 0.9997 \end{bmatrix}$$

$$D=\begin{bmatrix} 0.0000 \\ -0.0017 \\ 0.0000 \\ -0.0037 \end{bmatrix} \quad H=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

지금까지는 최적제어기에서, 평가함수를 최소로 하려는 최적제어규칙을 구하기 위해서 아래와 같은 리카치 방정식

$$\begin{aligned} \Pi(k) = {} & \Phi^T \Pi(k+1) D(D^T \Pi(k+1) D + R)^{-1} D^T \Pi(k+1) \Phi \\ & + \Phi^T \Pi(k+1) \Phi + Q \end{aligned} \qquad (14)$$

을 만족하는 정정대칭해 Π를 구한다. 이 리카치방정식의 해 Π를 사용한 아래식과 같은 게인행렬을 계산하고 이를 이용한 최적제어칙

$$u(k) = -(R + D^T \Pi(k+1) D)^{-1} D^T \Pi(k+1) \Phi x(k) \qquad (15)$$

을 구하여 왔다. 그러나 외란이나 잡음이 섞인 불확실한 시스템과 비선형성을 가진 시스템에서는 최적제어기(optimal control law)를 구하지 못하는 결점이 있다. 본 논문에서는 강건하고 전역적인 해를 구하는 유전자알고리즘을 이용하여 샘플링시간 T로 이산화하여 일반화한 평가함수[16]

$$J=\sum_{k=0}^{T} [x^T(kT) Qx(kT) + u^T(kT) Ru(kT)] \qquad (16)$$

를 최소로 하는 최적상태피드백 이득을 구하면 최적제어칙(optimal control law)은

$$u(k) = -Kx(k) \qquad (17)$$

과 같이 구해질 수 있다. 그리고 최적의 폐루프계

$$x(k+1) = (\Phi - DK)x(k) \qquad (18)$$

가 구해지고, 이를 디지털 최적 제어기라 한다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

천정 크레인의 흔들림과 목표위치 제어를 위해 제안된 제어기에 대한 시뮬레이션을 IBM-586 컴퓨터를 사용하여 행하였다. 천정 크레인의 파라미터들은 트롤리와 화물의 추정질량이 3.0(kg), 3.0(kg)이고 마찰계수 2(Nsec/m), 로프 길이는 0.445(m)을 사용하였다. 최적 제어기의 비중행렬을 Q=[13, 3, 3, 5], R=1인 단위대각행렬로 설정하였다. 디지털제어기를 사용하였고 샘플링주기를 T=0.05로 하였다. 그리고 초기 흔들림과 t=5, 10초시 트롤리 진행의 반대방향과 진행방향에서 화물이동 가속도에 대한 질량의 4배정도의 충격력을 가했다.이 경우에 대해 최적제어기와 유전자-최적제어기에 적용한 결과를 비교하기 위해 위치와 흔들림 각도변화 결과는 Fig. 4, 제어입력 변화량은 Fig. 5에 각각 도시하였다. Fig. 6은 빠른 목표위치 추종을 하면서 흔들림을 가능한 줄이는 시뮬레이션 결과이고 Fig. 7은 최저 흔들림을 유지하면서 원하는 목표에 이르는 시뮬레이션 결과이다. Fig. 8은 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 상태 피드백 게인을 구해가는 과정이다. Fig. 9, 10는 비선

형 식(9, 10)을 사용하여 유전자-최적제어기로 제어한 결과를 나타내었다.

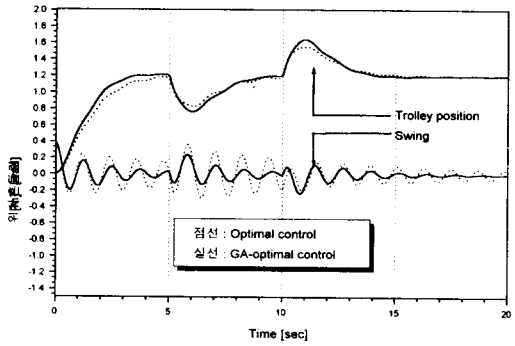

Fig. 4 초기 흔들림, 충격력 인가시 제어기 비교

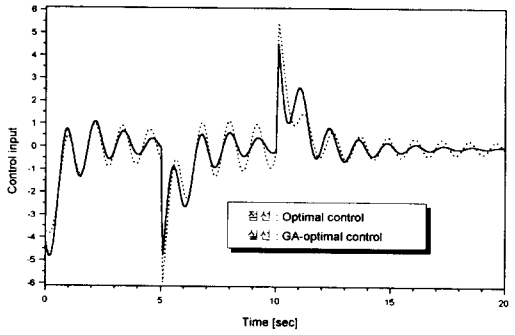

Fig. 5 천정 크레인의 제어 입력.

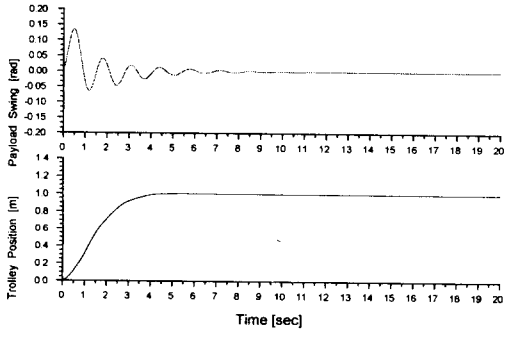

Fig. 6 빠른 위치 이동 제어

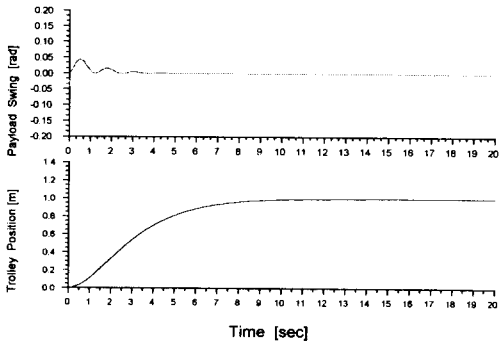

Fig. 7 최저 흔들림 위치이동 제어.

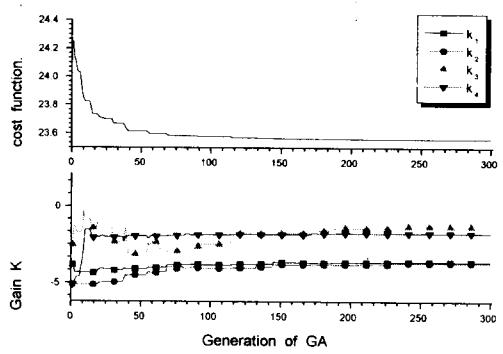

Fig. 8 GAs를 이용한 최적 피드백게인 계산.

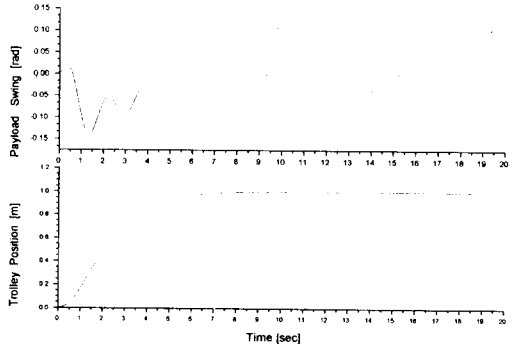

Fig. 9 비선형 모델시 빠른 위치 이동 제어.

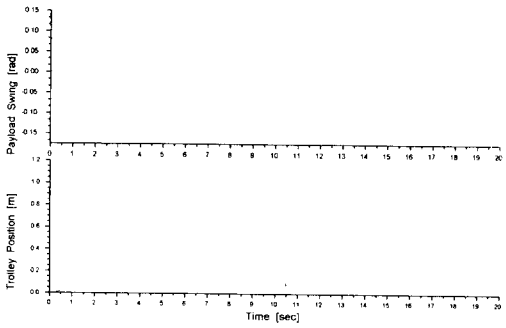

Fig. 10 비선형 모델시 최저 흔들림 위치이동 제어.

6. 결론.

본 연구에서는 천정크레인에서 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키며 천정크레인 트롤리를 원하는 위치로 신속하게 이동시키는 최적제어기를 유전자 알고리즘을 이용하여 설계하였다. 설계한 유전자-최적제어기는 화물의 초기 흔들림과 질량변화에 의한 외란에도 불구하고 화물의 흔들림을 효과적으로 감쇄시키고 트롤리가 정상 편차 없이 목표위치를 정확히 추종하는 강인한 제어기임을 시뮬레이션을 통해 보여 주었다. 또 전역적이고 비선형성에 강인한 유전자 알고리즘을 사용해 설계된 제어기는 기존의 리카치방정식의 해를 구하지 않고 유전알고리즘을 이용하여 강인한 제어를 할 수 있음을 보여준다.

제안된 제어기를 실시스템에 적용하기 위해서는 로프 길이 변화를 갖는 3차원 크레인시스템의 흔들림 제어에 대한 연구 및 제어기의 온라인 적용을 위한 하드웨어 구현에 대한 연구가 실시되어야 할 것이다.

참고문헌

(1) T.Mita, T.Kanai,"optimal control of the Crane System Using the Maximum speed of the Trolly"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) J.W.Auernig and H. Troger,"Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of load"Automatica, vol 23.no. 4, pp 37-447,1987.

(4) E. ohnishi,I,Tsuboi, T.Egusa, and M. Uesugi,"Automatic Control of an Overhead Crane", IFAC 8th Triennial World Congress,Japan,pp1885-1890,1981.

(5) J.C. Doyle,B.A. Francecis, & A.R.Tannenbaum, Feedback Control Theory,Macmilan Publishing Company.1992.

(6) 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.

(7) 홍형주,이신섭, "크레인 진자계의 最適制御." 大韓機械學會. pp. 832-837. 1995.

(8) Y.G.Cho, Y.M.Yoo,"Dynamic Analysis and Optimal Control of a Container Crane,"NATO ASI conference, Vol.3, pp.115-135. 1986.

(9) Y. Sakawa and Y.Sindo, Y. Hashimoto, "Optiaml Control of a Rotary Crane" ,J.optimazation Theory and Applications, 12 Vol.35. No4 pp.535-557,1981.

(10) Y. Sakawa and Y.Sindo ,"Optiaml Control of Container Cranes",Automatica, Vol. 18, no. 3, pp.257-266, 1982.

(11) T.Burg,D. Dawson, C. Rahn, and W.Rhodes "Nonlinear Control of an Overhead Crane via the Saturating control Approach of Teel" Procedings of the IEEE, Int. Conf. Robotics and Automation, 1996.

(12) 이호훈,조성근,조재성,정연우,"2축 천정크레인의 無振動制御",韓國自動制御 學術會議 論文集II, Oct.24-26, 1996.

(13) 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.

(14) S. Yasunobu, 1986, "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.

(15) David E. "Genetic algorithms in search optimization & machine learing", addision-wesley press. pp. 6-106. 1989.

(16) William L.Bragan "Mordern control theory", prentice Hall. pp 501-559. 1991.