

타워형 크레인의 자동화를 위한 이론적 고찰 및 디지털 제어에 관한 연구

이진우*, 이충환*, 김상봉**
 (*부산수산대학교 대학원, **부산수산대학교)

Theoretical Consideration and Digital Control for Automation of Tower Cranes

° Jin Woo Lee, Choong Hwan Lee, Sang Bong Kim
 Department of Mechanical Engineering National Fisheries University of Pusan

ABSTRACT

The paper treated the oscillation control of cargo rope and the position control of cart for a tower crane system by adopting the optimal regulator method.

Since the tower crane has nonlinearity and it is very unstable when the cargo is mobiling, an insensitive control system with respect to oscillation of cargo rope and disturbance such as wind is required.

In this paper, model equation of the tower crane is induced by using Lagrange equation and it is linearized at equilibrium point. The real time control of tower crane system is implemented by 16bits microcomputer with A/D and D/A converters to illustrate the application of the adopted optimal design method.

1. 서론

현대제어 이론의 주된 특성은 시스템의 상태공간표현, 제어기 구성에 대한 수학적 최적화의 개념과 최적상태제어이론에 있으며, 고전이론에 비해 현대제어이론의 장점이라고 할 수 있는 것은 이와같은 개념들에 의해 뒷보이게 되었다고 할 수 있다. (1)~(3)

죽 그해볼 보다 더 간단히 얻을수 있다는 것과 불안정한 시스템의 안정화, 시스템응답에 대한 외란의 영향 최소화, 지정된 과도응답의 실현 및 파라미터변동에 대한 시스템의 로바스트성 부여등과 같은 구속조건을 가지는 설계문제를 쉽게 해결할 수 있다는 것이다. (4)~(9)

산업의 고도화와 대형화에 의하여 타워형 크레인은 제조업체, 건설현장, 조선 및 항만 등에서 사용빈도가 날로 증가하고 있으나, 사용자의 취급에 따른 불안정성으로 인해 대형 사고의 위험이 항상 내재하고 있으며 구조적인 불합리로 인하여 생산수를 측면에서도 원시적인 단계를 벗어나지 못하고 있다. (10)

또한 이러한 타워형 크레인은 옥외에 설치되어 사용되는 관계로 트롤리의 주행과 붐(Boom)의 회전, 달기기구의 권상권하 및 바람등에 의한 시스템 파라메타 변동과 외란을 받게되어 제어계 설계에 대한 어려움이 대단히 크다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점의 해결을 위한 기초 연구로서 그 모형을 제작하여 동 특성의 해석과 현대제어 이

론에 기초한 피드백 제어계 구성법을 연구 개발하여 실험에 의한 비교 검토를 통해, 그 유효성을 검토하였다.

2. Tower Crane 실험 장치의 해석

2.1 장치의 개요

Fig.2.1은 Tower Crane의 위치제어 및 각도제어를 위한 실험장치를 도식적으로 나타낸 것으로, Boom은 감속기가 부착된 직류 서보모터(DC 20V 180rpm)를 이용하여 회전되며, Trolley는 그 자체에 설치된 직류서보모터(DC 12V 200rpm)를 이용하여 구동된다.

또한 Boom회전 및 Trolley에 부착된 진자의 흔들림을 측정하기 위한 센서로 포텐쇼미터(J50S, ±0.1%, 2KΩ Copal)를 사용하였으며, Trolley 위치 측정용센서로 회전형포텐쇼미터(R20K, ±0.25%, HELIPOT)를 사용하였다.

D/A Converter의 출력전압 0~5V를 붐회전에 필요한 모터용으로 20V및 트롤리이동에 필요한 모터용으로 12V로 증폭하여 정역회전이 가능하도록 파워증폭기를 제작하였다.

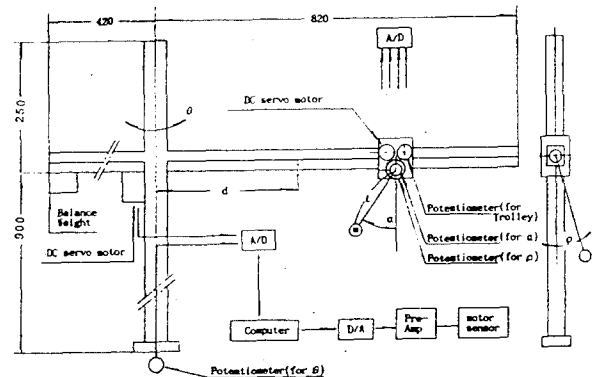


Fig.2.1 Configuration of Tower Crane System

2.2 모델링 I

Fig.2.1에서 M은 Boom의 질량, I_0 는 무게중심에서의 관성 모멘트, d는 무게중심까지의 거리, m은 진자의 질량, θ 는 Boom의 회전각, ρ 는 Boom의 수평회전에 따른 진자의 회전각, l은 진자의 길이, α 는 trolley 직선운동에 따른 진자의 회전각이라고 할 때, 운동방정식은

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = 0 \quad (2-1)$$

을 이용하여 유도된다.

단, $q_i = \text{파라메타 } (i = 1, 2, 3, \dots)$

$T = \text{운동에너지}$

$U = \text{위치에너지}$

$D = \text{마찰요소}$

$$(M d^2 + I_G + m d^2) \ddot{\theta} - m d l \cos \rho \ddot{\rho} + m d l \rho^2 \sin \rho = F \quad (2-2)$$

$$m l^2 \ddot{\rho} - m d l \theta \cos \rho + m g l \sin \rho = 0 \quad (2-3)$$

$$(N + m) \ddot{x} - m l a \cos \alpha + m l a^2 \sin \alpha = \tau \quad (2-4)$$

$$m l^2 \ddot{\alpha} - m l x \cos \alpha + m g l \sin \alpha = 0 \quad (2-5)$$

와 같이 된다.

식 (2-2), (2-3), (2-4), (2-5)를 평형점 근방에서 선형화 하고 $P \cong m d l \rho$, $Q \cong m l a$ 를 외란으로 생각하고 Boom, trolley 및 Pendulum의 질량에 관계없이 x 와 θ 가 자유롭게 제어될 수 있다고 가정하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = u_a \quad (2-6)$$

$$\ddot{\varphi} = \left(-\frac{g}{l}\right)p + \left(\frac{d}{l}\right)u_a \quad (2-7)$$

$$\ddot{x} = u_b \quad (2-8)$$

$$\ddot{\alpha} = \left(-\frac{g}{l}\right)a + \left(\frac{1}{l}\right)\dot{x} \quad (2-9)$$

단, u_a, u_b 는 새로운 입력 변수이다.

식 (2-6), (2-7), (2-8), (2-9)를 상태방정식으로 표현하면

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2-10)$$

$$y = Cx$$

단,

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ \rho \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\rho} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (-g/l) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (-g/l) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ (1/l) & 0 \\ 0 & (d/l) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

본 실험장치에서 $l = 0.45$ (m), $d = 0.41$ (m)이다.

2.3 모델링 II

Trolley 직선운동에 따른 운동방정식에서 진자의 무게중심의 좌표를 보면

$$x_G = x - l \sin \alpha \quad (2-11)$$

$$y_G = l \cos \alpha \quad (2-12)$$

이 되고 Boom의 회전운동에 따른 운동방정식에서 진자의 무게중심 좌표는

$$x_G = d \cos \theta + l \sin \rho \sin \theta \quad (2-13)$$

$$y_G = d \sin \theta - l \sin \rho \cos \theta \quad (2-14)$$

$$z_G = l \cos \rho \quad (2-15)$$

가 된다.

식 (2-11)~(2-15)를 식(2-1)의 Lagrange 방정식에 적용시키면

$$(N+m)\ddot{x} - m l a \cos \alpha + m l a^2 \sin \alpha + D_c \dot{x} = \tau_c \quad (2-16)$$

$$m l^2 \ddot{\alpha} - m l x \cos \alpha + D_a \dot{\alpha} + m g l \sin \alpha = 0 \quad (2-17)$$

$$(J + m d^2 + m l^2 \sin^2 \rho) \ddot{\theta} - m d l \cos \rho \ddot{\rho} + 2 m l^2 \sin \rho \cos \rho \dot{\rho} \dot{\theta} + m d l \rho^2 \sin \rho + D_{\theta} \dot{\theta} = \tau_b \quad (2-18)$$

$$m l^2 \ddot{\rho} - m d l \cos \rho \ddot{\theta} - m l^2 \sin \rho \cos \rho \dot{\theta}^2 + D_{\rho} \dot{\rho} + m g l \sin \rho = 0 \quad (2-19)$$

가 된다.

식 (2-16)~(2-17)~(2-18)~(2-19)를 평형점 근방에서 선형화시켜서 상태방정식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ Cx \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

이 된다.

단,

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ \rho \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\rho} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{mg}{N} & 0 & 0 & -\frac{D_c}{N} & -\frac{D_a}{Nl} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(N+m)g}{Nl} & 0 & 0 & -\frac{D_c}{Nl} & -\frac{(N+m)D_a}{Nl} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Nl}{-(J+md^2)g} & 0 & 0 & 0 & \frac{Nm l^2}{-(J+md^2)D_{\rho}} & D_{\rho} - d \dot{\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Jl}{-mdg} & 0 & 0 & \frac{Jm l^2}{-d D_{\rho}} & \frac{Jl}{D_{\theta}} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{N} & 0 \\ \frac{1}{Nl} & 0 \\ 0 & \frac{l}{Jl} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} \tau_c \\ \tau_b \end{bmatrix}$$

3. 제어계 설계

3.1 최적레귤레이터 설계

가제어한 제어대상

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t); A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad (3.1)$$

에서, 소비에너지를 적게하면서 상태를 가능한한 빨리 영의 상태로 하는 제어문제를 생각한다.

즉, 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} (\|x(t)\|_Q^2 + \|u(t)\|_R^2) dt \quad (3.2)$$

를 최소로 하는 제어입력 $u(t)$ 를 구하도록 한다. 여기서 $Q(n \times n)$ 는 非負定한 대칭행렬, $R(m \times m)$ 은 正定대칭행렬이며, 설계사양으로 주어지는 하중행렬이다. 식(3.2)는 x, u 에 대해 2차형식으로 되어있으므로, 2차형식평가함수(Quadratic performance index)라 불리워지며, 이론제는 R.E.Kalman에 의해 정식화되어 그해는 다음과 같이 주어진다. 식(3.2)를 최소로하는 최적제어입력 $u(t)$ 는, 상태피드백칙

$$u(t) = -F x(t) \quad (3.3)$$

$$F = R^{-1} B^T P$$

으로 주어진다. 여기서 행렬 $P(n \times n)$ 은 다음의 리카치방정식

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (3.4)$$

의 正定대칭해이며, (A, B) 가 가제어일때, 이와같은 P 는 유일하게 존재한다.

식(3.3)을 식(3.1)에 대입했을때의 최적한 폐루프계

$$\frac{dx(t)}{dt} = (A - B R^{-1} B^T P) x(t) \quad (3.5)$$

를 최적레귤레이터라 하고, 그 블록선도는 Fig.3.1과 같다.

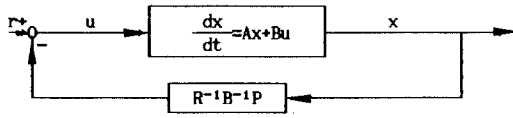


Fig.3.1 Optimal regulator system

4. 실험

4.1 최적 레귤레이터계 구성

진자의 흔들림 없이 목표치에 추종할수 있는 제어계 설계법으로서 3절에서 보여준 최적레귤레이터법을 이용하여 마이크로 컴퓨터에 의해 샘플링 시간을 15m sec로 하여 실시간 제어를 행했다. 실험을 간략히 하기위하여 스텝상의 목표치와 목표치를 변경시켰을 경우 및 외란을 가했을때로 나누어 실험을 행했으며, 최적 레귤레이터법에 의해 구성되는 폐루프 시스템의 제어 블록선도는 Fig.4.1과 같다.

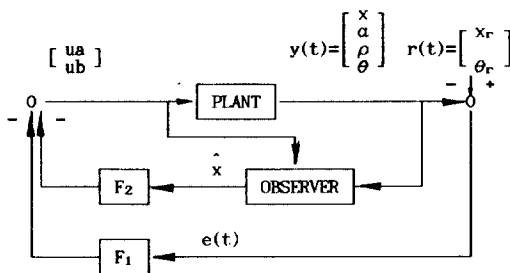


Fig.4.1 Block diagram of optimal regulator

식 3-2의 평가함수에 대하여

$$J = \int_0^{\infty} (\|x(t)\|_Q^2 + \|u(t)\|_R^2) dt$$

$$Q = \text{diag}[100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100]$$

$$R = \text{diag}[50 \ 50]$$

로 주어질때

Modeling I 일 경우에 이를 최소로 하는 피드백 행렬은

$$F = \begin{bmatrix} 1.414D+00 & 2.951D+00 & 3.054D-16 & 4.107D-16 \\ -1.807D-16 & -1.309D-15 & 2.964D+00 & 1.414D+00 \\ 2.381D+00 & 1.301D+00 & 1.107D-18 & 2.914D-16 \\ -8.597D-16 & 2.825D-16 & 1.299D+00 & 2.351D+00 \end{bmatrix}$$

이고, 폐루프극은

$$\lambda_i(A-BF) = \{-1.101 \pm j4.599D-01 \ -1.101 \pm j4.624D-01 \\ -1.257 \pm j4.479D+00 \ -1.533 \pm j4.384D+00\}$$

이다.

Modeling II 일 경우 평가함수를 최소로 하는 피드백 행렬은

$$Q = \text{diag}[100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100]$$

$$R = \text{diag}[50 \ 50] \text{ 일때}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1.414D+00 & 2.254D+0 & 3.113D-15 & -1.151D-17 \\ 2.768D-17 & 2.360D-16 & 1.259D+00 & 1.414D+00 \\ 8.074D-01 & 7.156D-01 & 5.739D-16 & -3.223D-15 \\ 6.862D-17 & -4.154D-17 & 1.230D+00 & 1.841D+00 \end{bmatrix}$$

이고, 폐루프극은 다음과 같다.

$$\lambda_i(A-BF) = \{-1.938D-01 \pm j4.757D+00 \ -2.889D-01 \pm j0.000D+00 \\ -3.368D-01 \ -j0.000D+00 \ -6.959D-01 \pm j0.000D+00 \\ -1.340D+00 \pm j4.999D+00 \ -2.964D+00 \pm j0.000D+00\}$$

4.2 관측기의 설계

본 실험의 경우는 거리와 각도만을 포텐쇼미터를 사용하여 측정하고 있으므로 나머지의 상태를 관측하기 위하여 최소차원 관측기를 다음과 같이 구성하였다.

$$\dot{\hat{m}}(t) = \hat{A} m(t) + \hat{B} y(t) + \hat{J} u(t) \quad (4.1)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{C} m(t) + \hat{D} y(t) \quad (4.2)$$

단, Modeling I의 경우 관측기의 극은 -1000, -1000, -1000, -1000으로 했다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & -1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} -1.00D+06 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & -1.00D+06 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D+06 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D+06 \end{bmatrix}$$

$$\hat{J} = \begin{bmatrix} -1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 2.22D-01 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.82D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \\ 1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+03 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+03 \end{bmatrix}$$

이고,

단, Modeling II의 경우 관측기의 극은 -0.1, -1000, -0.1, -1000으로 했다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -1.30D+00 & -1.55D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ -7.71D+00 & -9.98D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D-01 & -2.10D-03 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -2.49D-04 & -9.99D+02 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 2.15D-01 & -1.55D+05 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ -1.66D-03 & -9.98D+05 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -2.26D+01 & -2.09D+06 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -4.99D+01 & -9.99D+05 \end{bmatrix}$$

$$\hat{J} = \begin{bmatrix} 8.69D-01 & 0.00D+00 \\ 1.93D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 2.70D-01 \\ 0.00D+00 & 1.48D-01 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{D} = \begin{bmatrix} 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \\ -2.15D+00 & 1.55D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.66D-02 & 9.98D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 8.89D-02 & 2.09D+03 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -2.22D+08 & 9.99D+02 \end{bmatrix}$$

이다. 여기서 관측기 식 (4.1), (4.2)를 샘플링 시간 15msec로 이산화하면 다음과 같다.

$$\hat{m}(k+1) = \hat{A}_D m(k) + \hat{B}_D u(k) + \hat{J}_D u(k) \quad (4.3)$$

$$\hat{\dot{x}}(k) = \hat{C}_D m(k) + \hat{D}_D u(k) \quad (4.4)$$

단, Modeling I 일 경우,

$$\hat{A}_D = \begin{bmatrix} 3.05D-07 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 3.05D-07 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 3.05D-07 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 3.05D-07 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B}_D = \begin{bmatrix} -9.99D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & -1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -1.00D+03 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & -9.99D+02 \end{bmatrix}$$

$$\hat{J}_D = \begin{bmatrix} 9.99D-04 & 0.00D+00 \\ 2.21D-03 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.82D-03 \\ 0.00D+00 & 9.99D-04 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C}_D = \begin{bmatrix} 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{A}_D = \begin{bmatrix} 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \\ 1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+03 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+03 \end{bmatrix}$$

이고,

단, Modeling II 일 경우,

$$\hat{A}_D = \begin{bmatrix} 9.97D-01 & -1.55D+01 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ -7.71D+03 & 1.20D-03 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 9.98D-01 & -2.09D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -2.49D-07 & 8.30D-07 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B}_D = \begin{bmatrix} 3.24D-03 & -1.55D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ -2.50D-05 & -9.98D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -3.26D-01 & -2.09D+03 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -4.99D-04 & -9.99D+02 \end{bmatrix}$$

$$\hat{J}_D = \begin{bmatrix} 8.79D-03 & 0.00D+00 \\ 1.87D-03 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & -3.02D-04 \\ 0.00D+00 & 1.48D-04 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C}_D = \begin{bmatrix} 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \end{bmatrix}$$

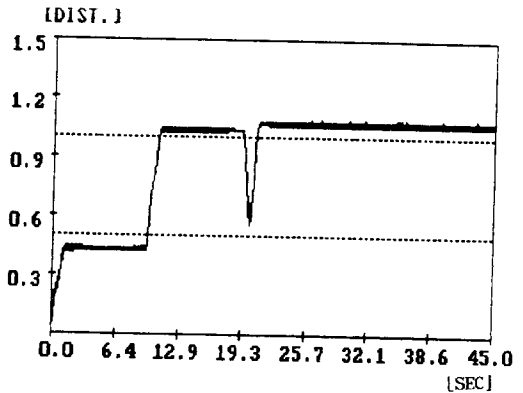
$$\hat{D}_D = \begin{bmatrix} 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 0.00D+00 & 1.00D+00 \\ -2.16D+00 & 1.55D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 1.66D-02 & 9.98D+02 & 0.00D+00 & 0.00D+00 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & 8.89D-02 & 2.09D+03 \\ 0.00D+00 & 0.00D+00 & -2.22D+08 & 9.99D+02 \end{bmatrix}$$

이다.

이산화된 관측기를 제어프로그램으로 실현시켜 제어를 행하였으며 제어프로그램은 C언어로 작성하였다.

4.3 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 최적 레귤레이터 제어법의 피드백 행렬을 구하고 이때의 실험에 대한 각각의 경우는 다음과 같다.



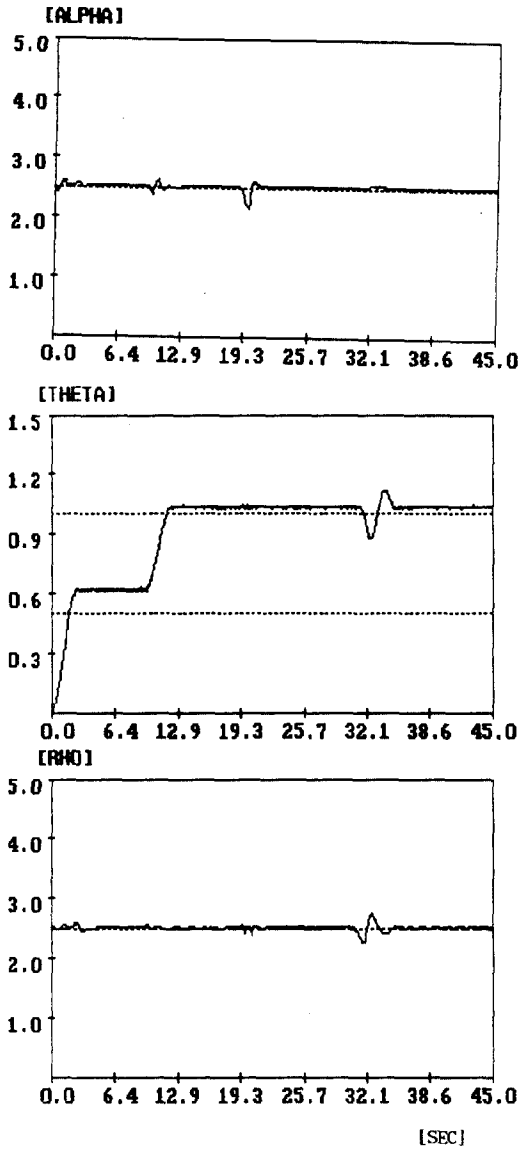


Fig.4.3 Response for reference variation with disturbance in the case of modeling I

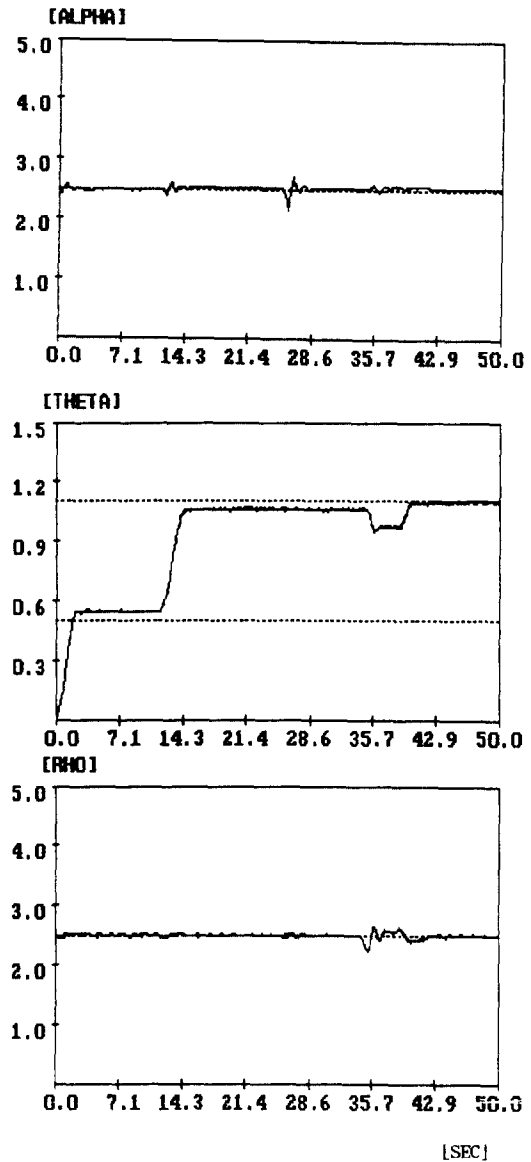
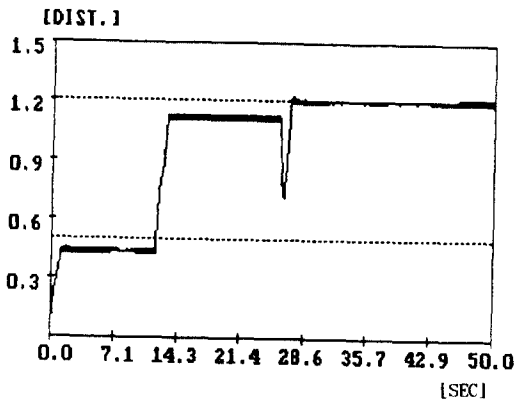


Fig.4.4 Response for reference variation with disturbance in the case of modeling II



앞의 실험결과에서와 같이 각각의 경우 Boom 및 Trolley가 목표치에 도달할 때까지 진자의 진동을 극소화 하고있고, overshoot도 거의 발생하고 있지 않으며 settling time도 2.2sec로 매우 짧은 것으로 나타난다.

또한, Boom과 Trolley가 목표치에 도달하여 안정된후에 임의의 방향으로 외란을 가하여 진자가 진동하게되면, 이에 대응하여 Boom과 Trolley의 민감한 반응으로 진자의 진동을 최단시간 내에 감쇄시키면서 목표치로 되돌아 감을 알 수있다.

5. 결론

본논문에서는, 회전과 위치이동을 동시에 실시하는 타워 크레인 시뮬레이터 설계에 최적레규레이터 설계법을 적용하여 마이크로 컴퓨터로서 실시간 제어를 행한결과 주어진 목표치에 일정시간후 거의 정상편차없이 추종하고 있으며 임의로 가해진 외란에 대해서도 로바스트함을 알수 있다.

참고문헌

- [1] Kuo B.C.: Automatic Control Systems.
- [2] Astrom K.J.and Wittenmark B.: Computer Controlled Systems,theory and design, Prentice-Hall,Inc. Englewood Cliffs,1984.
- [3] Kuo B.C.:Digital Control Systems,Holt,Rineha and Winston,Inc,1980.
- [4] 安田ら: 最適ロバスト サーボ系の構成,計測自動制御學會 論文集, 24-8, pp.817 ~ 822,1988.
- [5] Gupta K. : Frequency-Shaped Cost Functionals :Extension of Linear Quadratic -Gaussian DesignMethods, J. Guidance Control, 3-6, pp. 529-535,1980.
- [6] 古田ら : 메카니カル 시스템 制御; オーム社,1984.
- [7] Kwakernaak H.and Sivan R.: Linear Optimal Control Systems, Wiley Interscience,1972.
- [8] Ackermann J.: Parameter Space Design of Robust Control Systems, IEEE Trans, Auto, Control, AC-25, No.6, pp.1058 ~ 1072,1980.
- [9] 丸子 : パルス モータを用いた クレーンの 振れ止め 制御,長岡技術科學大學 卒業論文,1979.
- [10] 美多, 金井: トロリーの 最大速度に 注目した クレーンの最適運轉法, 計測自動制御學會論文集,1-6,pp.833~838,1979.
- [11] D.L.Kleinman and P.K. Rao : Continous-Discrete Gain Transformation Methods for Linear Feedback Control, Automatica,Vol.7, pp.425~428(1977)
- [12] 김상봉, 오세준, 정용길, 김환성 "서보계 설계에 대한 쌍선형 변환법의 응용 및 카트의 위치제어" 대한전기학회지,제 40권 3호, pp 290~298(1991)
- [13] 김상봉, 신민생, 김환성, 정용길 "이동CRANE의 제어에 관한 연구" 한국정밀공학학회지, 제 8권 제 2호, PP. 47 ~56(1991)