

컨테이너 크레인의 자동화에 관한 기초연구

신민생* · 이동철** · 김상봉***

Fundamental Study for Automation of Container Cranes

M. S. Shin · D. C. Lee · S. B. Kim

Key words : Digital optimal regulator control(디지털 최적제어). Digital redesign control(디지털 재설계제어).

Abstract

The container crane is still operated by skillfull human operators. So an automatic crane operation system is strongly required. In this paper, the digital control method is applied to position and anti - swing control for container crane. Two methods of digital optimal regulator control and digital redesign control are used for experiment.

From these experimental results, it is respected that both methods can be applied effectively to an actual container crane operation.

1. 서 론

최근의 해상수송의 경향이 일반화물선대에서 다량 신속한 운송이 가능한 컨테이너선대로 바뀌게 되었고, 화물량의 증가와 운항경비의 절감을 위하여 선박의 대형화 및 고속화가 촉진되어 TEU당 운송비의 절감이 가능하게 되었으나, 컨테이너 터미널에서의 낮은 작업능률로 인하여 해상 운송상의 운송비의 절감이 컨테이너 터미널에서의 하역비용의 증가로 전체 비용절감의 상당부분이 상쇄되고 있고, 크레인 작업자의 노동력 부족과 작업자

의 안전 확보를 도모함에 있어서 문제점등이 대두되어, 컨테이너 터미널에서의 고성능화의 필요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다²⁶⁾. 컨테이너 터미널의 고성능화는 터미널에서의 하역비용 삭감과 시설의 확충 및 개선, 컨테이너 크레인(Gantry Crane)에 있어서의 하역 비용절감을 위한 성력화와 고성능화가 요구되고 있고, 터미널의 고성능화에 의한 크레인(Gantry Crane)의 성능 향상으로 인하여, 트로리(Trolley)의 흔들림에 의한 Trailer Chassis와 선박의 양화 위치에서의 컨테이너 스포팅(Container Spotting) 작업시간의 단축, 심야 작

* 부산수산대학교 대학원
** 정회원, 부산공업대학교
*** 정회원, 부산수산대학교

업량의 감소, 부두 사용시간 단축등의 효과를 가져올 수 있다.

크레인에 대한 연구사례로서, 美多(1979)에 의해서 연구된 크레인의 로프 길이가 일정일 경우의 흔들림방지 최단시간 제어¹⁴⁾, J. W. Auerning (1987)의 로프 길이가 변하는 경우의 최단시간제어²⁰⁾, 進藤 등(1983)의 관측기 및 최적레규레이터 이론을 이용한 컨테이너 크레인의 흔들림 방지 제어²¹⁾, 安信의 퍼지제어 방식에 의한 컨테이너 크레인의 자동운전²²⁾, 相良 등(1990)의 모델 기준 적응 제어계에 의한 크레인의 적응제어²³⁾ 등이 있다.

현재 실제의 컨테이너 크레인에 적용되고 있는 제어로는 트로리 및 로프계의 목표속도 지령과 브레이크 지령을 숙련된 작업자에 의해 조작되도록 하고 조작, 구동 제어계를 내부에 가진 AVR(Automatic Voltage Regulator : 속도제어)계에 의해 트로리 및 로프계의 권상속도를 피드백시킴으로써 직류전동기(Motor)를 제어하는 방법이 있고, 흔들림 억제를 위해서 설치된 유압식 동요방지기(Anti-sway)는 기대한 효과를 얻지 못하여 현장 작업자들은 거의 사용하지 않고 있으며, 일본에서 연구 제작된 전기식 동요방지장치 시스템은 목표지점에서 정지하는데 걸리는 시간이 길고, 사고시의 대책이 미흡하여 실제 작업에는 효용 가치가 없어 사용하지 않고 있는 실정이다²⁶⁾. 현재 국내에서는 원자력연구소에서 무진동 이송 크레인²⁷⁾을 개발했다는 정보(1993)가 있었으나, 아직은 실용화가 되지 않은 상태이며, 金 등이 연구한 "이동크레인의 제어에 관한 연구"¹⁷⁾가 1991년에 발표되었다. 컨테이너 크레인의 고능률화를 위한 요구사항으로는, 이송중 다른 구조물에 접촉하지 않고 안전하게 운반할 수 있어야 하며, 빠르고 정확하게 화물을 소정의 장소까지 운반할 수 있고, 운전의 자동화와 트로리의 횡행속도만에 의한 컨테이너의 수평위치와 흔들림 제어 실현 문제, 초기 및 최종 위치에 있어서의 흔들림각이 0도가 될 수 있도록 하는 최단시간 제어 문제, 목표지점에 있어서의 停止精度가 좋을 것과 가속, 감속 시간의 대칭성 문제, 컨테이너의 중량이나 바람등과 같은 외란에 신속하게 대응할 수 있을 것 등이다.

본 연구에서는 컨테이너 크레인의 무인 자동화

실험을 위한 기초적 연구로서, 실물 컨테이너크레인 크기의 약 1/20인 모형을 만들어 동적운동방정식을 유도한 후 선형제어계 이론을 적용하여 마이크로 컴퓨터로 실시간 제어를 행한 결과를 보이도록 한다

제어계 설계이론으로는 디지털 최적제어계 설계법 및 디지털 재설계법을 이용하였으며, 실험에서는 실제적인 컨테이너의 이동 및 작업상황을 고려하여 로프의 길이가 주행중 가변일 경우에 대해 그 주행특성을 검토하였다.

2. 실험장치의 제작과 Modeling

2.1 장치의 개요

Fig.1에 보이는 컨테이너 크레인 시스템의 구성요소는 트로리계(트로리 구동 드럼, 직류 서보모터 : 20V 200rpm, 포텐쇼 메터 1 : R20K. 0.25%)와 컨테이너계(main block과 Sprader권상, 권하용 드럼 : 직경 43mm pitch 2mm screw groove 20개 4조, 직류 서보모터 ; 20V 200rpm, 포텐쇼 메터 2 : R20K. 0.25%, 포텐쇼 메터 3 : J50S 0.1% 2K copal), 컴퓨터, 프리 앰프(Pre-amplifier), A/D, D/A변환기로 구성되어 있다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 크레인의 외관을 도식적으로 표현한 것이다.

Fig. 2에서, 트로리는 와이어로프와 직경 43mm의 구동 드럼으로 연결하여 직류 서보모터에 의해 구동되며, 그 이동거리는 구동드럼에 연결된 포텐쇼메터 1에 의해 측정된다. 그리고 컨테이너의 권상과 권하도 와이어로프와 직경 43mm의 구동드

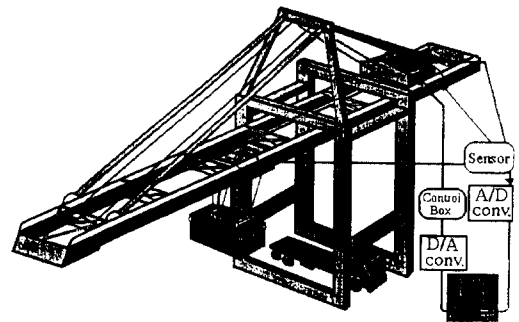


Fig. 1 Appearance of Gantry Crane System

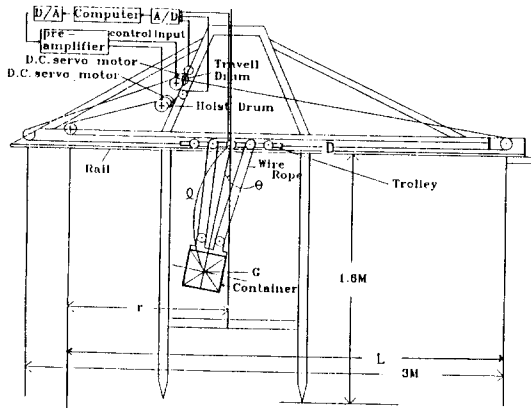


Fig. 2 Configuration of Gantry Crane System

림으로 연결하여 직류 서보모터에 의해서 구동이 되고, 드럼에 연결된 포텐쇼메터2에서 컨테이너의 지상으로부터의 위치를 검출할 수 있게 했고, 또 포텐쇼메터3을 트로리에 부착시켜 컨테이너의 흔들림 정도를 측정할 수 있도록 했다. 이 때 화물에 연결되는 로프는 실제적인 상황을 고려하여 그 길이가 0.4m에서 2m까지 변할 수 있도록 하였다. 트로리의 프레임과 스프레더, 컨테이너는 알루미늄으로 제작되었고, 규격은 트로리와 스프레더가 각각 가로×세로 324mm×300mm와 325mm×200mm이며, 컨테이너의 규격은 폭×길이×높이가 175mm×525 mm×225mm이고, 이들의 중량은 각각 1Kg, 300g, 3Kg이다.

트로리의 프레임에는 붐(Boom)상의 레일을 주행할 수 있도록 직경 5mm의 축에 볼 베어링이 내장된 휠이 부착되어 마찰없이 주행이 가능하도록 했으며, 8개의 활차(Sheave)가 부착되어 있어 컨테이너를 부착한 스프레더에 4개의 활차와 함께 권상과 권하가 용이하게 이루어 질 수 있도록 했다. 주행 로프장치에는 드럼과 트로리를 와이어로프로 연결하였고, 트로리를 횡행시키는 로프에 장력을 주기 위하여 4조의 스프링을 활차에 연결하여 운전의 원활을 기하고 있다. 권상, 권하의 끝과 횡행의 끝 지점에는 리미트스위치를 설치하여 안전을 도모하고 있으며, 컨테이너의 흔들림 감지를 위해서 트로리의 중앙에 포텐쇼메터를 설치하고 스프레더 프레임의 중앙과는 스프링의 장력에 의해서 가변될 수 있는 로프로서 연결되어 있고,

A/D, D/A변환기는 PCL 812를 사용하고 있다.

2.2 모델링²⁴⁾

Fig. 2에 보이고 있는 트로리의 등가질량을 M , 등가점성마찰계수를 D , 컨테이너의 질량이 m , 로우프의 길이가 l , 트로리의 구동력을 F , 컨테이너의 출발점으로부터 착화점까지의 거리를 L , 출발점으로부터 이동한 트로리까지의 거리를 r , 로우프의 흔들림각을 θ 라고 하고, 다음과 같은 Lagrange 운동방정식

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

을 이용하여 크레인 계의 운동방정식을 세우도록 한다.

단,

q_i = 일반좌표 ($i=1,2,3,\dots$)

T = 운동에너지

D = 마찰에너지

이다.

트로리에 가해지는 힘 F 에 의한 트로리의 운동방정식을 구하면

$$(M + m) \frac{dr^2}{dt^2} - ml \frac{d^2\theta}{dt^2} \cos\theta + ml \frac{d\theta}{dt} \sin\theta \frac{d\theta}{dt} + D \frac{dr}{dt} = F \quad (2-2)$$

또는

$$(M + m)\ddot{r} - ml\ddot{\theta}\cos\theta + ml\dot{\theta}^2\sin\theta + D\dot{r} = F \quad (2-3)$$

나타낼 수 있고, 이를 다시 정리 하면

$$(M + m)\ddot{r} - ml\dot{\theta}^2\sin\theta + D\dot{r} = ml\ddot{\theta}\cos\theta F \quad (2-4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 화물에 대해서는 Lagrange 방정식(2-1)에서 화물에 가해지는 힘은 0이므로 화물에 대한 운동방정식은

$$ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} - ml \frac{d^2r}{dt^2} \cos\theta + ml \frac{dr}{dt} \sin\theta \frac{d\theta}{dt}$$

$$-ml \frac{dr}{dt} \sin \theta \frac{d\theta}{dt} + D \frac{dr}{dt} + mgl \sin \theta = 0 \quad (2-5)$$

또는

$$ml^2 \ddot{\theta} - ml \ddot{r} \cos \theta + D \dot{r} + mgl \sin \theta = 0 \quad (2-6)$$

과 같이 되고, 화물의 운동에 대한 마찰을 무시하면, 화물에 대한 운동방정식은

$$ml^2 \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = ml \ddot{r} \cos \theta \quad (2-7)$$

과 같이 된다. 또한, $\theta \approx 0$ (컨테이너의 평형점)으로 하여 선형근사화하면,

식(2-4)과 식(2-7)은 $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$ 에 의해

$$M \ddot{r} + D \dot{r} = -m(\ddot{r} - l \ddot{\theta}) + F \quad (2-8)$$

$$\ddot{\theta} + (g/l)\theta = \ddot{r}/l \quad (2-9)$$

로 된다. 식(2-9)의 양변에 l 를 곱하면

$$\ddot{r} - l \ddot{\theta} = g\theta$$

로 되는 것을 이용하여, 식(2-8)을 다시 정리하면

$$M \ddot{r} + D \dot{r} = -mg\theta + F \quad (2-10)$$

으로 된다.

여기서 d 슬 $-mg\theta$ 를 외란으로 생각하고, 트로리와 컨테이너의 질량에 관계없이 \ddot{r} 가 자유롭게 제어될 수 있다고 가정하면 식(2-8)과 식(2-9)는

$$\ddot{r} = u_a \quad (2-11)$$

$$\ddot{\theta} + (g/l)\theta = (1/k)u_a \quad (2-12)$$

로 나타 낼 수 있다. 여기서 u_a 는 새로운 입력 변수이며, 다음과 같은 크기로 주어진다.

$$|u_a| \leq \alpha m (\alpha m : \text{최대 허용가속도})$$

식(2-11)와 식(2-12)를 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2-13a)$$

$$y = Cx \quad (2-13b)$$

로 된다.

여기서,

$$x = \begin{bmatrix} r \\ \theta \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, u = u_a, A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g/l & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1/l \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

이고, 본 실험장치에서 컨테이너의 로프 길이 l 은 0.4m에서 2m까지 변할 수 있도록 했다.

3. 제어계의 설계

본 절에서는 시스템의 내부상태가 어떤 영향으로 바람직한 상태로 부터 벗어났을 때 그 벗어남이 자동적으로 신속하게 원상태로 돌아오게 할 수 있는 레귤레이터 구성법을 사용하여 주어진 평가함수하에서 가장 양호한 보상작용을 나타낼 수 있는 디지털 최적레귤레이터 문제를 생각한다. 2절에서 구한 파라미터로 구성되는 연속 시스템(2-13)을 샘플링 시간 T 로 이산화하여

$$x(k+1) = \phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (3-1)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

과 같은 이산 시스템을 얻는다.

이산시스템 (3.1)의 제어칙 $u(k)$ 를 구하기 위해서 다음과 같은 2차 형식의 평가함수

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \{x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)\} \quad (3-2)$$

를 정의한다. 단, 행렬 Q 와 R 은 정정대칭 행렬이며, 이때 평가함수 J 를 최소로 하는 제어칙은

$$u(k) = -Fx(k) \quad (3-3)$$

$$F = (R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \phi \quad (3-4)$$

과 같이 구해질 수 있다. 여기서, P 는 리카치방정식

$$P = Q + \phi^T P \phi - \phi^T \Gamma P (R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \phi \quad (3-5)$$

의 정정대칭해이고, ϕ 와 Γ 가 가제어일때 P 는 유일하게 존재한다.

식(3-3), (3-4)를 식(3-2)식에 대입 했을 때 최

적의 폐루프계

$$x(k+1) = (\phi - \Gamma F)x(k) \quad (3-6)$$

가 구해지고, 이를 디지털 최적 레귤레이터라 한다.

4. 실험

본 절에서는 컨테이너를 야드의 트레일러에서 선박의 화물창까지, 또는 화물창에서 야드의 트레일러까지의 목표지점에 도달하는데 걸리는 시간을 최소화하면서 컨테이너의 흔들림이 없이 도달시키기 위한 제어계 설계법으로 3절에서 보여진 디지털 최적제어법을 이용하여 마이크로 컴퓨터에 의하여 실시간 제어를 행한 결과와 연속계에서 피드백제어계를 설계하고, 쌍선형함수를 이용하여 디지털 재설계한 실험결과를 보이도록 한다. 실험시 가속도에 대한 목표입력은 계단형태이고 외란이 없을 경우에 샘플링시간 10ms로 하여 실험을 행했다.

4.1 디지털 최적레귤레이터일 경우

실제 로프의 길이 l은 0.4m ≤ l ≤ 2m범위에서 가변되므로, 그 공칭치로서 0.4m로 택했을 경우, 식(2-13)의 상태방정식은

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4-1)$$

과 같이 주어진다.

단,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -24.58 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 2.5 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

과 같으며, 이 때 샘플링시간 10ms로 이산화 했을 경우 그 이산화 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (4-2)$$

단,

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0.9988 & 0 & 0.0099 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.2449 & 0 & 0.0249 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0001 \\ 0.01 \\ 0.0250 \end{bmatrix}$$

이다.

평가함수

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \{x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)\} \quad (4-3)$$

에 대해 그 하중행렬을

$$Q = \text{diag}[1 \ 10 \ 1 \ 1], R = [10]$$

과 같이 택했을 경우, 식(4-3)의 평가함수 J를 최소로 하는 피드백 행렬은

$$F = \begin{bmatrix} 0.3734 & 0.3205 \\ 0.8635 & 0.3662 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

와 같이 주어진다.

4.2. 디지털 재설계법에 의한 설계법일 경우¹⁸⁾

식(4-1)에 대해 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4-5)$$

$$Q = \text{diag}[1 \ 10 \ 0 \ 0], R = [0.02]$$

를 최소로 하는 피드백행렬은

$$F = \begin{bmatrix} 0.3162 & 0.3687 \\ 0.8696 & 0.3678 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

와 같이 주어진다.

연속계에서 설계되어 구해진 피드백행렬(4-6)을 다음과 같은 쌍선형함수

$$\bar{F} = \left[1 - \frac{T}{2}(A + BF) \right]^{-1} \quad (4-7)$$

를 이용하여 샘플링 시간 10ms로 디지털 재설계 방법으로 구한 피드백칙은 다음과 같다.

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0.3162 & 0.3687 \\ 0.8646 & 0.3678 \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

4.3 관측기의 설계

본 실험의 경우 거리와 각도만을 포텐쇼메타로서 측정하고 있으므로 나머지의 상태를 관측하기 위한 최소차원의 관측기를 아래의 식(4-9)와 같이 설계했다.

$$\begin{aligned} m(k+1) &= A_D m(k) + B_D y(k) + J_D u(k) \\ \hat{x}(k) &= C_D m(k) + D_D y(k) \end{aligned} \quad (4-9)$$

관측기의 극은[(0.9003 + j0.0903), (0.9003 - j0.0903)]으로 하였으며, 샘플링 시간이 10ms일때 관측기의 행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$A_D = \begin{bmatrix} 0.9003 & -0.0903 \\ -0.0903 & 0.9003 \end{bmatrix}$$

$$B_D = \begin{bmatrix} -0.0903 & -1.8887 \\ 1.9002 & -0.3263 \end{bmatrix}$$

$$H_D = \begin{bmatrix} 0.0083 \\ 0.0242 \end{bmatrix}$$

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

$$D_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 10 \\ -10 & 10 \end{bmatrix}$$

이산화된 관측기를 제어프로그램으로 실현시켜 제어를 행하였으며, 제어 프로그램은 C언어로 작성되었다.

4.4 실험결과

4.1절의 디지털 최적설계법과 4.2절의 디지털 재설계법에 의한 실험결과는 Fig.3과 Fig.4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 컨테이너가 지면에 가까이 있는 것으로 가정하고 로프의 길이가 길게 되면, 이동중에 흔들림이 크게 되므로 이동중에 흔들림을 최소화하기 위하여 트로리 부근까지 권상시켜 로프의 길이(0.4m)를 작게 하면서 제어했을 때의 실험결과이다. 그림에서 a)의 Dietane(m)는 트로리의 이동 거리이며 b)의 Altitude(m)로 표시된 것이 콘테이너의 권상과 권하한 높이이고 c)의 Angle(°)는 콘테이너의 흔들림 정도를 나타내고 있다.

Fig.3은 권상1m와 주행1.5m의 명령시 컨테이너가 5도 정도의 흔들림은 있으나 권상과 주행이 개시되어 권상이 2.3sec 주행이 3.3sec만에 목표치에 정상편차없이 정확하게 추종하고 있으며, 목표지 도달한 후 권하 1m의 목표치 변경 명령과 다시 권상 1m의 명령에 대해서도 각각 3.3sec와 2.3sec만에 목표치에 도달하고 있으며, 트로리의 원래의 위치로의 귀환 명령이 있을 때 흔들림은 약간 있으나 3.3sec이내에 목표지점에서 정지하고, 15도의 외란을 가했을 때에도 흔들림을 억제하면서 목표지점을 추종했고, 컨테이너를 하강(1m)시켰을 때에도 정확하게 목표치에 추종하고 있다. Fig. 4는 디지털 재설계법에 의한 실험결과로서, 디지털 최적

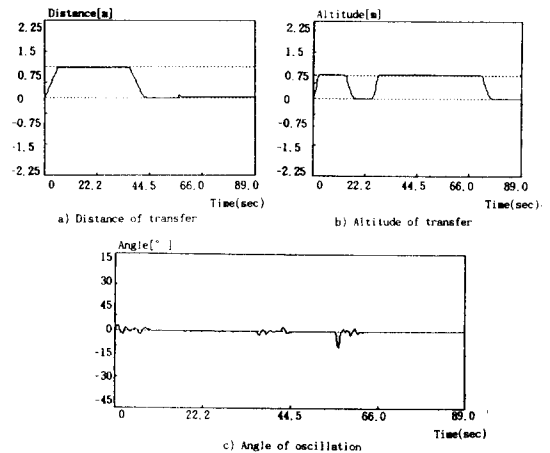


Fig. 3 Experimental Results by Digital Optimal Regulator

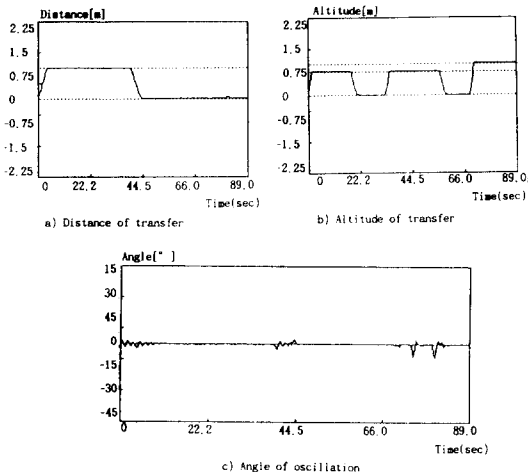


Fig. 4 Experimental Results by Digital Redesign

설계법과 차이는 거의 발견할 수 없을 정도이고 흔들림없이 정확하게 목표치에 추종함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 선형제어계 설계이론인 디지털 최적레귤레이터 설계법과 디지털 재설계법에 의해 피이드백 제어계를 구성하여 컨테이너 크레인의 위치제어를 실현한 결과를 보였으며, 실험결과를 통해 다음과 같은 사실을 확인 할 수 있었으며, 실제 크레인에 적용해도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

- 1) 스텝상의 권상 또는 권하와 주행에 대한표치 또는 목표치 변경에 대해서도 트로리는 정상 편차 없이 정확하게 추종하고 있다.
- 2) 외란을 고려해도 충분한 추종성이 있어 실용적인 정도와 응답성을 확인 할 수 있었다.
- 3) 화물의 권상 권하의 실현과 주행중 로프의 길이가 가변 된다고 하더라도 빠른 시간내에 트로리가 목표치를 추종하면서 컨테이너의 흔들림을 억제 할 수 있는 제어계의 구성이 가능함을 알 수 있었다.

“이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었음”

참고문헌

- 1) Kim S. B. and Furuta K., "Regulator Design with Poles in a specified Region," *Int. J. Control*, Vol. 47, No. 1, pp. 143~160, 1988.
- 2) Furuta K. and Kim S.B. "Pole Assignment in a Specified Disk," *IEEE Trans. Auto. Control*, AC - 32, No. 5, pp. 423~427, 1987.
- 3) Åstrom K. J. and Wittenmark B., *Computer Controlled Systems, Theory and Design*, Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1984.
- 4) Kuo B. C., *Digital Control Systems*, Holt, Rineha and Winston Inc, 1980.
- 5) Johnson C. D. "Accommodation of External Disturbances in Linear Regulator and Servo - mechanism Problem," *IEEE Trans. Auto. Control*, AC - 16, No. 6, pp. 635~644, 1971.
- 6) Wolovich W. A. and Ferreira P., *Output Regulation and Tracking in Linear Multivariable Systems*, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC - 24, No. 3, pp. 460~465, 1979.
- 7) Davison E. J., "The Output Control of Linear Time Invariant Multivariable Systems with Unmeasurable Arbitrary Disturbances," *IEEE Trans. Auto. Control*, AC - 17, No. 5, pp. 620~629, 1972.
- 8) 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.
- 9) Gupta K., "Frequency - Shaped Cost Functionals : Extension of Linear Quadratic - Gaussian Design Methods," *J. Guidance Control*, 3 - 6, pp. 529~535, 1980.
- 10) 古田ら, "メカニカル システム 制御, オーム 社, 1984.
- 11) Kwakernaak H. and Sivan R., *Linear Optimal Control Systems*, Wiley Interscience, 1972.
- 12) Ackermann J., "Parameter Space Design of Robust Control Systems," *IEEE Trans, Auto. Control*, AC - 25, No. 6, pp. 1058~1072, 1980.
- 13) 丸子, "パルス モーターを用いた クレーンの振れ止め 制御," *長岡技術科學大學 卒業論文*, 1979.
- 14) 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.
- 15) D. L. Kleinman and P.K. Rao, "Continuous - Dis-

- crete Gain Transformation Methods for Linear Feedback Control," *Automatica*, Vol. 7, pp. 425~428(1977)
- 16) 김상봉, 오세준, 정용길, 김환성, "서보계 설계에 대한 쌍선형 변환법의 응용 및 카트의 위치제어", 대한전기학회지, 제 40권 3호, pp 290~298(1991)
 - 17) 김상봉, 신민생, 김환성, 정용길 "이동, CRANE의 제어에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제8권 제 2호, pp. 47~56, 1991.
 - 18) 이동철, 신민생, 하주식, 김상봉, "디지털제설계법에 의한 크레인계의제어", 대한기계학회논문집 제 16권 제 1호 pp. 41 - 52, 1992.
 - 19) 森下, "走行クレーンの運轉自動化のための 振れ止め制御", 日本計測自動制御學會論文集, Vol. 14, No. 16, 1978.
 - 20) Auering, J. W. & Troger, H., *Automatica*, "로프길이가 변하는 경우의 최단시간 제어" 23-4, 437~447, 1987.
 - 21) Y.sakawa and Y. shindo, "Optimal cotrol of Container Cranes, *Automatica*, 18-3, 255~266, 1982.
 - 22) 安信誠二, "豫見 Fuzzy 制御方式による コンテナクレーン 自動運轉", 日本計測自動制御學會 論文集, Vol. 22, No. 10, 1991.
 - 23) 相良愼, 大川 不二夫, "クレーンの適應制御", 日本機械學會論文集(C編), 56券 526號, 1494~1498, 1990.
 - 24) 신민생 : "이동크레인의 제어에 관한 연구" 부산수산대학교 대학원 기계공학과 석사학위 청구논문, 1992.
 - 25) 白井潤二ら : "コンテナクレーンの振れ止め 制御技術の實用化" 日本機械學會論文集(C編)59券 561號, 1443~1447, 1993. 5.
 - 26) 사단법인 한국항만훈련원, "콘테이너 크레인" 1993.
 - 27) 원자력연구소, "무진동 이송크레인 개발", 한국경제신문 과학면, 1993. 9. 6.