

# 하이브리드 방식을 이용한 크레인의 앤티스웨이 제어

## Anti-sway Control of Crane System Using Hybrid Control Method

박흥수 · 김환성 · 박준형 · 이동훈 · 김상봉

H. S. Park, H. S. Kim, J. H. Park, D. H. Lee and S. B. Kim

**Key Words** : Hybrid Control(하이브리드 제어), Velocity Pattern(속도 선도), Optimal Regulator(최적 레귤레이터), Anti-sway Control(흔들림-방지 제어)

**Abstract** : In crane control system, it is required that the travelling time of crane must be reduced as much as possible and there is no the swing of load at the end and starting points. In this paper, we present a hybrid control method which includes two control methods of the optimal regulator and the velocity pattern control in order to realize high performance of the anti-sway. To implement the control algorithm, the dynamic equation is linearized at an equilibrium point, so that the linear time invariant state equation can be obtained. A 1/10 sized model crane of the usual gantry cranes is made and used to show the applicability of the developed hybrid control method. The effectiveness of developed hybrid control method is proved by experimental results which show us good performance for anti-sway control comparing to conventional velocity pattern control. Practically, it is expected that the proposed control system will make an important contribution to the automatic crane control system of the industrial fields.

### 1. 서 론

크레인의 화물 이송 중에 발생하는 흔들림은 크레인의 구조물과 화물에 스트레스를 가하여 크레인 자체와 구조물 및 크레인 요소부품 등의 수명을 단축시키고 나아가서는 구조물의 붕괴와 같은 대형사고를 유발할 수 있다.

크레인의 이러한 구조적인 문제점을 해결하기 위한 종래의 연구사례를 살펴보면, 丸<sup>1)</sup>는 리니어 펄스 모터를 이용한 천장 크레인의 흔들림 방지 제어를 트롤리와 화물의 질량 및 초기상태에 관계없이 최적 제어법으로 실현하였으며, Shirat<sup>2)</sup> 등은 최적 제어 이론을 응용하여 양호한 제어 성능을 지닌 제어기를 개발하여 컨테이너 터미널의 실제 크레인에 적용하여 그 실용성을 확인하였다.

또한 Sakawa<sup>3)</sup> 등은 컨테이너 크레인의 운동을 자동화하고, 화물의 흔들림을 방지하기 위해 미리 크레인의 최적 궤도를 구해 두고 실제의 크레인 상태를 피드백하여 최적 궤도의 상태로 추종할 수 있도록 관측기 및 최적 레귤레이터 이론을 이용한 컨테이너 크레인의 흔들림 방지 제어를 실행하였다. 이러한 흔들림 방지 제어는 많은 종류의 크레인에 공통적으로 적용시킬 수 있는 제어법으로 그 유효성은 이미 여러 연구에서 검증되었다<sup>1) 9)</sup>. 그 중에서 크레인의 고효율·고성능화에 적합한 속도 선도 제어법을 이용한 흔들림 방지 제어에 관한 연구가 활발하게 수행되어 왔다<sup>10)</sup>. 그러나 속도선도에 의한 제어의 경우 크레인의 출발점부터 도착점까지의 입력을 미리 정해두고 피드포워드(feed-forward) 제어를 행하게 된다. 이러한 피드포워드 제어방식은 파라미터 변동이나 미지외란 등이 존재하는 경우에 발생하는 흔들림을 제어할 수 없는 문제가 발생된다.

따라서, 본 논문에서는 속도선도 제어법을 이용한 흔들림 방지 제어법을 크레인에 적용시켜 거드(girder)와 크레인의 주행시 발생하는 흔들림과 이

접수일 : 1998년 5월 11일

박흥수, 박준형 : 부경대학교 대학원

김환성 : 부경대학교 해양산업개발연구소

이동훈 : 삼성중공업

김상봉 : 부경대학교 기계·자동차공학부

송시간을 최소화함으로써 크레인의 고능률화를 실현함과 동시에 크레인이 목표점 부근에 도달하면 최적 레귤레이터법을 적용하여 컨테이너의 흔들림을 최소화할 수 있는 하이브리드 제어방식을 제안하였다. 본 제어법은 10분의 1 크기의 모형크레인에 적용되어 실험을 통해 그 유효성이 검증되었다.

## 2. 실제 크레인 장치의 구성

### 2.1 장치의 구성

실제 실험에 사용된 크레인 장치의 구성은 다음과 같다. 본 장치는 항만 젠트리 크레인을 10분의 1로 축소하여 제작하였고, 레일의 길이는 20m로 제작되었다. 동력원은 주행부에 AC 모터(1.5kw 2개), 트롤리부는 AC 모터(0.75kw 2개)를 사용하였으며, 호이스트 구동은 AC 유도모터(2.2kw 1개)를 사용하였다. 그리고 주행, 크레인, 호이스트의 위치 센서는 각각 300 pulse 엔코더를 사용하였고 컨테이너의 흔들림은 포텐쇼미터(10kΩ 0.25%)를 사용하여 측정하였다.

### 2.2 크레인의 모델링

Fig. 1에 보이고 있는 크레인의 등가질량을  $M$ , 등가점성마찰계수를  $D$ , 컨테이너의 질량이  $m$ , 로프의 길이  $l$ , 크레인의 구동력을  $F$ , 컨테이너의 출발점으로부터 도착점까지의 거리를  $L$ , 출발점으로부터 이동한 크레인까지의 거리를  $r$ , 로프의 흔들림각을  $\theta$ 라고 하여, 다음과 같은 Lagrange 운동방정식을 이용하여

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

크레인 계의 운동방정식을 유도하도록 한다. 단,

$q_i$ : 일반화 좌표( $i=1, 2, 3, \dots, n$ )

$T$ : 운동 에너지

$D$ : 소산 에너지

$U$ : 위치 에너지

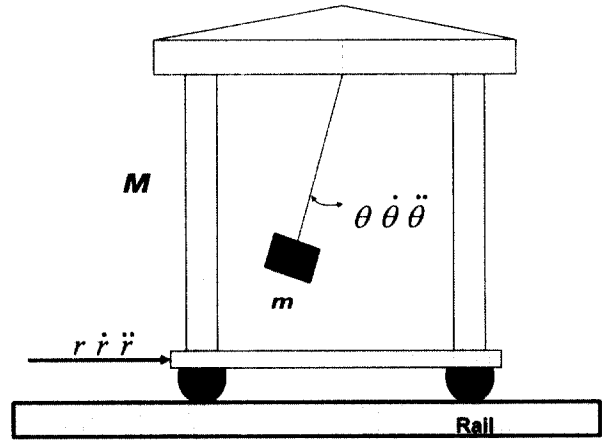


Fig. 1 Coordinate of crane system

식(1)을 이용하면 식(2)와 같은 크레인계의 운동방정식을 얻을 수 있다.

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

로프에 대한 마찰을 무시하여, 로프계에 대한 운동방정식을 세우면

$$ml^2\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = ml\ddot{r}\cos\theta \quad (3)$$

여기서,  $\theta \approx 0$ (컨테이너의 평형점)으로 하여 선형 근사화하면( $\dot{\theta}^2 \approx 0$ ,  $\cos\theta = 1$ ,  $\sin\theta = \theta$  이므로) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M\ddot{r} + D\dot{r} &= -m(\ddot{r} - l\ddot{\theta}) + F \\ &= -mgh + F \end{aligned} \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = \frac{\ddot{r}}{l} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 가속도가 자유롭게 제어 가능하다고 하면 다음과 같은 상태방정식으로 정리할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (6a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (6b)$$

여기서,

$$x(t) = \begin{bmatrix} r(t) \\ \theta(t) \\ \dot{r}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = u_a(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g/l & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1/l \end{bmatrix},$$

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

식(6)에 의해, 대차 및 하중의 질량  $M$ 과  $m$ 에 의존하지 않는 일정한 제어가 가능한 것을 알 수 있다.

### 3. 제어계 설계

본 논문에서는 크레인이 목표점까지 이동할 때는 진자의 주기를 고려한 속도선도로 제어를 행하고 목표 위치 부근에서는 최적 레귤레이터로 전환하여 컨테이너의 흔들림이 최소화 할 수 있는 하이브리드 제어 방식을 택하도록 한다.

#### 3.1 속도선도

제어 속도선도를 사다리꼴로 가·감속할 경우 로프 끝에 매달린 컨테이너의 흔들림을 해석해 보면 다음과 같다.

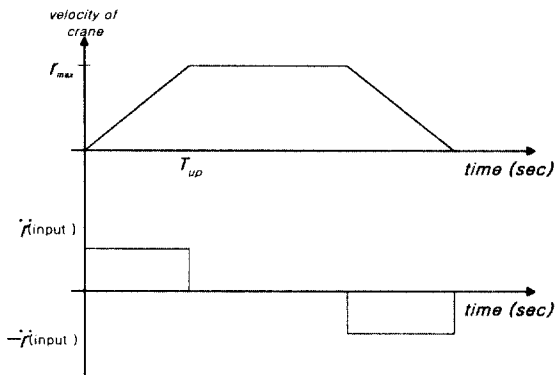


Fig. 2 Trapezoidal velocity pattern

등속·감속구간에서 제어 입력  $u(t)$ 는 상수가 된다. 즉  $u(t) = a_m(\text{constant})$ 인 경우가 되며, 이때의 식(5)의 해는

$$\theta(t) = \frac{a_m}{g} (\cos \omega t - 1) \quad (7)$$

여기서,  $a_m$ 은 최대 가속도,  $\omega = \sqrt{g/l}$  이다.

$\theta(t)$ 는 진폭이  $a_m/g$ 이며, 주파수가  $\omega$ 인 단진자 운동이다. 따라서  $t = T_{up} = 2\pi/\omega$ 에서 완전히 1-사이클이 끝나고  $\theta(t)$ 가 0이 됨을 알 수 있다. 만약  $t = T_{up}$ 에서 가하는 제어입력을  $u(t) = 0$ 으로 전환하면, 이때의 초기조건이

$$\theta(T_{up}) = \dot{\theta}(T_{up}) = 0 \quad (8)$$

이 되어  $\theta(t) = 0, t \geq T_{up}$ 으로 지속됨을 알 수 있다. 즉, 제어입력은  $u(t) = v_m/T_{up}$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 가속구간중 크레인의 이동거리는

$$r_{travel} = \frac{1}{2} v_{max} T_{up} = \pi v_{max} \sqrt{l/g} \quad (9)$$

가 되고, 따라서 감속구간에서도 최종 위치로부터  $r_{travel}$  거리만큼 떨어진 지점에서 감속작용에 들어가게 되면 정확히 원하는 위치에서 흔들림이 없이 정지하게 된다.

#### 3.2 최적 레귤레이터

크레인의 엔티스웨이 제어를 위해 최적 레귤레이터법에 의해 제어계를 구성한다. 레귤레이터란 외란에 의해 평형점으로부터 벗어난 상태변수를 원래의 위치로 되돌리기 위한 피드백제어계를 말한다. 이러한 레귤레이터는 제어계 설계시 동일한 극을 갖는 많은 피드백 행렬  $F$ 가 고려되어 질 수 있으므로, 어떠한 해가 가장 좋은 제어성능을 가지는 가는 분별하기가 어렵다. 이와 같은 문제의 해결방법으로 지정한 평가함수를 최소로 하는  $F$ 를 결정하는 방법이 최적 레귤레이터 설계법이다.

제어대상을 다음과 같이 표현하자.

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

여기서, 소비에너지를 적게 하면서 상태를 가능한

한 빠른 0 상태로 하는 제어문제를 생각하자. 즉, 평가함수(performance index)

$$J_p = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (11)$$

를 최소로 하는 제어입력  $u(t)$ 를 구하는 문제로 귀착된다. 단,  $R$ 과  $Q$ 는 하중행렬을 설계사양으로 선택하고 최적 레귤레이터 문제를 풀어 최적게인을

$$F = R^{-1} B^T P = [f_x \ f_{\theta} \ f_{\dot{x}} \ f_{\dot{\theta}}] \quad (12)$$

이라 할 때,

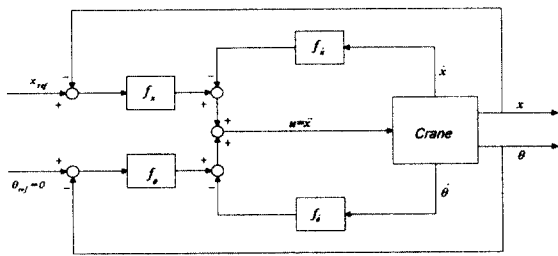


Fig. 3 Control law of crane

Fig. 3과 같은 제어계를 구성하면,  $x \rightarrow x_{ref}$ ,  $\theta \rightarrow 0$ 라고 하는 의미에서의 로버스터 서보계로 된다.

일반적인 레귤레이터 구성과 차이는,  $f_x$ 가  $x$ 에 걸리지 않고 위치 편차 ( $x \rightarrow x_{ref}$ )에 관계하고 있다는 점이다. 즉 (11)식을 최소로 하는 최적제어입력  $u(t)$ 는 다음의 상태 피드백칙으로 된다.

$$u(t) = \dot{\bar{x}} = -[f_x(x - x_{ref}) + f_{\dot{x}}\dot{x} + f_{\theta}\theta + f_{\dot{\theta}}\dot{\theta}] \quad (13)$$

여기서, 행렬  $P \in R^{n \times n}$ 는 다음의 리카치방정식의 정정 대칭해이며,  $(A, B)$ 가 가제어일 때, 이와 같은  $P$ 는 유일하게 존재한다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (14)$$

식(12)를 식(10)에 대입했을 때의 폐루프계를 최적 레귤레이터라 하며 다음 식으로 정리된다.

$$\dot{x}(t) = (A - BR^{-1}B^T P)x(t) \quad (15)$$

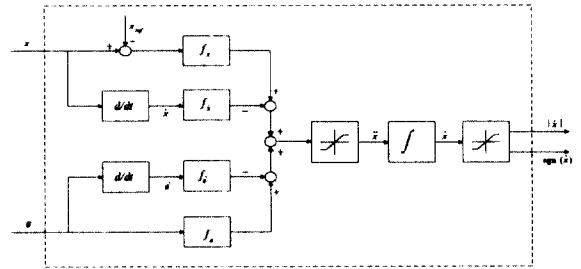


Fig. 4 Organization of control law

제어칙은 Fig. 4의 블록선도와 같이 계산하고 있다. 즉, 위치  $x$ 와 각도  $\theta$ 를 읽어 들여, 식(13)의 제어칙을 제약조건을 고려하여 계산하고, 속도 지령을 내고 있다.

#### 4. 실험결과

속도선도제어를 행하여 크레인이 목표위치의 부근에 도달하였을 때 최적 레귤레이터에 의한 제어기로 전환하여 안정화 제어를 행한다.

시뮬레이션에서 목표 제어거리는 10[m], 크레인의 최대속도  $v_m$ 은 1.25[m/s], 최대가속도  $a_m$ 은 0.7[m/s<sup>2</sup>], 진자길이는 각각  $l=2.0$ [m],  $l=2.5$ [m]로 실험을 행하였다. 진자의 길이를  $l=2.0$ [m]로 선택하였을 경우, 식(6)의 상태방정식 행렬  $A, B$ 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4.9 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

이때 샘플링시간 50[ms]로 이산화하면, 이산화 상태방정식은 다음과 같이 된다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$$

여기서,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0.9939 & 0 & 0.01 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.0392 & 0.99989 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0000 \\ 0.0100 \\ 0.0040 \end{bmatrix}$$

하이브리드 제어시 크레인의 위치가 목표위치의 80%를 넘었을 때 최적 레귤레이터로 전환하도록 한다. 최적 레귤레이터의 하중행렬  $Q, R$ 을

$$Q = \text{diag}([50, 10, 0.1, 0.1]), \quad R = 30$$

로 선택하여 피드백 행렬  $F$ 를 최적 레귤레이터 설계법에 의해 다음과 같이 구한다.

$$F = [0.9925 \ 0.3099 \ 1.4310 \ 0.1604]$$

실험결과는 Fig. 4~ Fig. 8과 같이 나타내며, Fig. 4는 외란이 없는 경우의 속도선도 제어의 실험 결과를 보이고 있다. 목표점에서 흔들림이 적은 것을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 7은 외란이 있을 경우의 속도선도 제어의 실험 결과를 보이고 있다. 목표점에서 외란에 의한 흔들림이 계속적으로 남아 있다. Fig. 6과 Fig. 8은 외란이 있을 경우의 하이브리드 제어의 실험 결과를 보이고 있다. 목표점에서 속도선도 제어법 보다 더 좋은 결과를 보이고 있다.

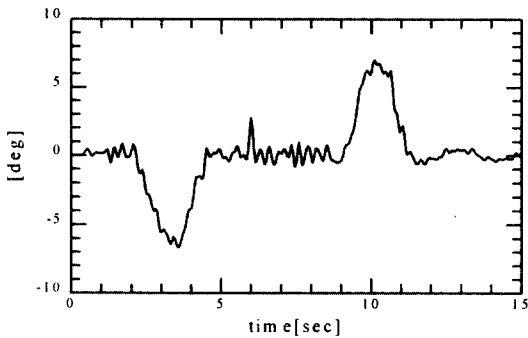


Fig. 5 Velocity pattern control without disturbance ( $l=2.0[m]$ )

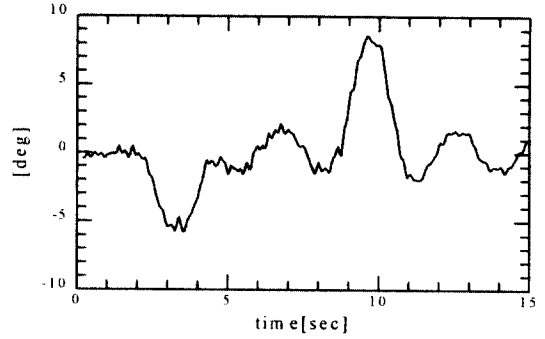


Fig. 6 Velocity pattern control with disturbance ( $l=2.0[m]$ )

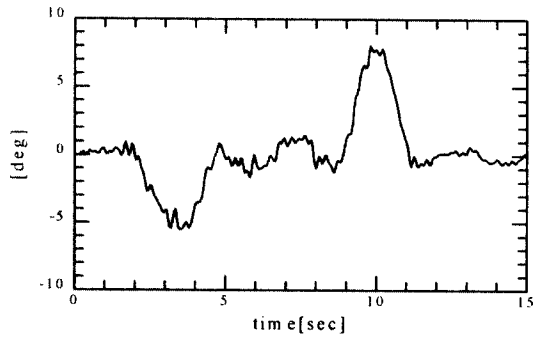


Fig. 7 Hybrid control with disturbance ( $l=2.0[m]$ )

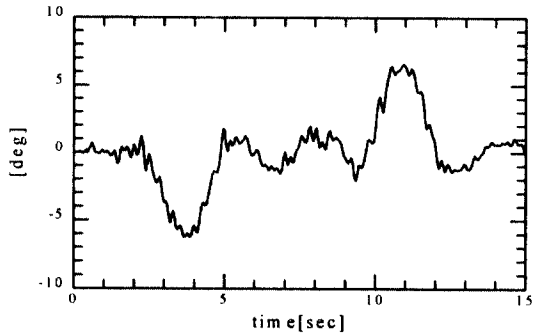


Fig. 8 Velocity pattern control with disturbance ( $l=2.5[m]$ )

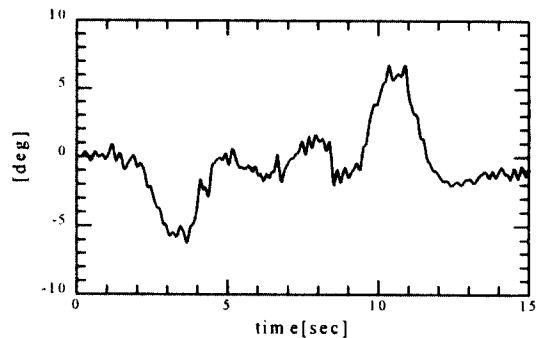


Fig. 9 Hybrid control with disturbance ( $l=2.5[m]$ )

## 5. 결 론

본 논문에서는, 크레인의 고성능을 위한 제어계 설계법으로 속도선도 제어법을 이용하여 크레인의 주행시 발생하는 거드의 흔들림과 이송시간을 최소화하고, 최적 레귤레이터법을 이용하여 크레인이 목표점 부근에 도달시의 미소한 컨테이너의 흔들림을 최소화하는 하이브리드 제어방식을 제안하였다. 본 제어법의 유효성을 검증하기 위해 실제 겐트리 크레인의 10분의 1 크기의 모형 크레인을 제작하여 실험을 행하였다.

속도선도 제어시 컨테이너의 흔들림 주기를 고려하여 크레인의 가속도를 제어입력으로 하였으며, 크레인의 목표위치 80%에 도달한 지점에서 최적 레귤레이터법으로 전환하여 흔들림의 안정화 제어를 행하였다. 본 하이브리드 제어방식을 모형 크레인에 적용한 결과, 빠른 화물의 이송과 목표지점에서의 컨테이너의 미소 흔들림을 최소화 하여, 본 제안법의 우수성을 확인 할 수 있었다. 따라서, 본 연구가 항만 컨테이너의 무인화를 위한 자동제어 장치 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 1997년 삼성중공업과의 공동연구과제에 의해 수행된 연구 결과의 일부임을 밝혀두며, 본 연구를 지원하여 주신 삼성중공업 조선플랜트 연구소에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 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
2. J. Shirat, H. Hirasawa and K. Fujiwara, “Development of Electronic Sway Control System for Container Crane”, Trans. JSME, Vol. 59, No. 561, pp. 1443~1447, 1993
3. Y. Sakawa, and Y. Shindo, “Optimal Control of Container Cranes”, Automatica, Vol. 18, No. 3, pp. 257~266, 1982
4. 北森, “クレーンの最適運轉法”, 第3回SICE學術講演會告集, pp. 347~348, 1964
5. 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, Vol. 15, No. 6, pp. 833~838, 1979
6. 山岸俊雄, “トロリーの振れ止め制御”, 第16回自動制御聯合講演前刷, pp. 353~354, 1969
7. J. W. Auering and Thoger, “Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hosting of Load”, Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 437~447, 1987
8. 김상봉, 신민생, 김환성, 정용길, “이동 크레인의 제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 47~56, 1991
9. 이동철, 신민생, 김상봉, 하주식, “디지털 재설계법에 의한 크레인의 제어”, 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 1, pp. 41~52, 1992
10. 홍금식, 손성철, 이만형, “컨테이너 크레인의 흔들림 제어: 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어” 제어·자동화·시스템공학논문지, Vol. 3, No. 1, pp. 23~31, 1997