

트랜스퍼 크레인의 주행제어에 관한 연구 : 관측기 설계 및 실험적 연구

A Study on the Tracking Control of a Transfer Crane : Observer Design and Experimental Study

김 영 복*, 최 문 석, 서 진 호, 이 권 순
(Young-Bok Kim, Mun-Seok Choe, Jin-Ho Suh, and Kwon-Soon Lee)

Abstract : The most important thing in the container terminal is to handle the cargo effectively in the limited time. To achieve this object, many strategies have been introduced and applied to. If we consider the automated container terminal, it is necessary that the cargo handling equipments are equipped with more intelligent control systems. From the middle of the 1990's, an automated rail-mounted gantry crane(RMGC) and rubber-tired gantry crane(RTG) have been developed and widely used to handle containers in the yards. Recently, in these cranes, the many equipments like CCD cameras and sensors are mounted to cope with the automated terminal environment. In this paper, we try to support the development of more intelligent automated cranes which make the cargo handling be performed effectively in the yards. For this plant, the modelling, tracking control, anti-sway system design, skew motion suppressing and complicated motion control and suppressing problems must be considered. In this paper, the system modelling and a tracking control approach are discussed. And, we design the tracking control system incorporating an observer based on the 2DOF servosystem design approach to obtain the informations of the states. The experiment results show the usefulness of the designed control system.

Keywords : rail-mounted gantry crane, rubber-tired gantry crane, automated container terminal, 2DOF servosystem, observer, tracking control

I. 서론

최근 항만 운영환경은 초대형 컨테이너선박에 효율적으로 대응함으로써 항만능력과 그 효율성을 배가시켜 국제경쟁력을 얻고자 하는데 집중적인 노력을 하고 있는 추세이다. 우리나라의 경우에도 중국의 위협적 도전으로 인한 경쟁력을 잃지 않기 위해, 신항만 건설 등 다양한 방면에서 다양한 노력으로 그 대응책을 강구하고 있다. 국제적 경쟁력을 갖춘 항만으로서의 가장 기본적인 요건은 물류처리의 신속성이다. 이와 같은 목표를 달성하기 위해서는 첨단기술을 이용하고 관련기술들을 적절하게 접목한 새로운 장비개발은 필수적일 것이다. 지금까지 많은 연구기술개발이 이루어져 그 결실도 다양하게 보고되고 있으나 그 대부분이 컨테이너 크레인의 anti-sway 시스템 설계이다[1-4]. 그것은 컨테이너 크레인이 항만에서 컨테이너를 선박에서 트럭으로 혹은 트럭에서 선박으로 하역 또는 선적하는데 필요한 장비이며, 가장 짧은 시간에 가능한 많은 컨테이너 물량을 처리해야 하는데 중요한 역할을 하기 때문이다.

컨테이너를 처리하기 위한 크레인에는 용도에 맞게 형태도 다양하고 그 크기도 여러 가지이다. 이 중 RMGC

(Rail-Mounted Gantry Crane) 및 RTG(Rubber-Tired Gantry Crane)는 크레인 자체가 독립적으로 이동하고 화물을 처리하는 장치이고, 독립적인 이동성을 갖추고 있기 때문에 항만에서 그 역할의 중요성이 더더욱 높아지고 있다. 반면 레일 또는 타이어를 이용한 독립적인 이동능력을 갖고 있기 때문에 컨테이너 처리작업 중 발생하는 흔들림 등의 운동 특성도 다양할 수밖에 없다. 그러나 안벽용 크레인의 경우, 작업과정에는 고정위치에서 직선운동 및 상하운동만 하기 때문에 sway-motion 외의 다른 형태의 흔들림은 흔들림 억제문제에서 크게 고려하지 않는다. RMGC나 RTG의 경우에는 컨테이너를 파지해서 이송하고 하역하는 과정이 안벽용 크레인보다 상당히 복잡하다. 따라서 다양한 형태의 잔여 흔들림 등 작업효율을 저하시키는 요인도 다양하게 발생하게 된다. 따라서 자동화 터미널의 효율적 운영을 위해서는 RMGC 및 RTG의 화물처리능력을 향상시키는 기술개발은 필연적이라 할 수 있다. 그러나 RMGC나 RTG에 대한 연구 결과는 거의 전무한 실정이다. 자동화터미널의 최종적인 구상이 무인화에 의한 효율적 터미널 환경구축이라는 사실을 감안한다면 무엇보다도 우선적인 연구개발대상이 트랜스퍼 크레인일 것이다.

따라서 본 연구에서는 RTG에 대한 운동특성을 파악하고 모델링을 수행한다. 그리고 우선 대상 시스템의 위치제어문제에 대해 고찰한다. RTG의 위치제어문제는 장비의 효율성을 결정짓는 가장 기본적인 과제이기 때문에 본 논문에서는 강인한 추종성능을 달성할 수 있도록 하는 2자유도 서보계 설계법[5,6]을 도입하여 위치제어계를 설계한다. 이때

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 8. 10., 채택확정 : 2006. 11. 22.

김영복 : 부경대학교 공과대학 기계공학부(kpjiwoo@pknu.ac.kr)

최문석 : 부경대학교 대학원 제어기계공학과(cms7007@naver.com)

서진호 : 포항지능로봇연구소(suhgang@postech.ac.kr)

이권순 : 동아대학교 전기공학과(kslee@dau.ac.kr)

※ 본 연구는 과학기술부 과학재단 목적기초연구(R01-2005-000-10418-0) 지원으로 연구되었음.

2자유도 서보계는 상태피드백 시스템 설계에 기초한 설계 방법므로 시스템 상태에 대한 모든 정보를 필요로 한다. 따라서 2자유도 설계법의 기본적인 관점에서 상태추정을 위한 관측기를 설계한다. 실험을 통해 설계된 위치 제어계의 유용성을 확인한다.

II. 제어대상 및 시스템 표현

1. 모델링

본 연구에서 고려하고 있는 운동해석 및 제어대상은 그림 1에 나타낸 것과 같이 고무타이어에 의해 이송작업이 이루어지는 RTG이다. 이송을 위해 양측의 타이어에 모터가 장착되고 이송거리 및 속도검출을 위한 엔코더 및 거리센서(초음파)가 설치된다. 특히 컨테이너의 흔들림을 억제하기 위한 anti-sway 시스템은 mass-damper 형[7-11]을 고려하고 있으며, 트롤리와 스프레더 운동 계측 및 제어시스템 등이 적절하게 장착된다. 이와 같은 준비아래, 우선 대상 크레인의 다양한 운동을 표현할 수 있는 모델을 구한다. 전술한 것과 같은 RTG는 각각 두개의 독립된 구동력에 의해 주행된다. 각각의 구동시스템을 적절하게 제어해야 RTG의 가장 기본적인 제어목표인 정확한 위치제어가 가능하게 되므로 주행제어를 위한 효과적인 제어알고리즘을 설계한다. 그림 2(a) 및 (b)는 제어대상에 대한 모델링을 하기 위해 제어대상이 운동할 때 위와 옆에서 관찰한 경우의 운동특성을 나타낸 것이다. 트랜스퍼 크레인은 그림 2(a)에서와 같이 좌측과 우측에 각각 독립된 구동장치를 장착하고 있기 때문에 필요한 운동계측시스템을 구축하여 적절한 제어가 수행되어야 한다. 만일 그렇지 않으면 그림 2(a)에서와 같이 좌·우측이 어긋나게 되어 원활한 작업이 어렵게 된다. 그래서 그림 2(a)와 (b)로부터 다음의 Lagrange 운동방정식을 이용하여 크레인의 운동방정식을 유도한다.

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

여기서, \mathcal{T} 운동에너지, D : 손실에너지, U : 위치에너지이며, q_i 는 일반화좌표를 나타낸다.

우선 그림 2에서 크레인 구조물의 무게중심에 대한 좌표를 (x_c, y_c) , 컨테이너의 무게중심좌표를 (x_{cl}, y_{cl}) 라고 하면

$$\begin{cases} x_c = h/2 \cdot \sin \theta_1 \\ y_c = h/2 \cdot \cos \theta_1 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{cl} = h \cdot \sin \theta_1 + l_r \cdot \sin \theta_2 \approx l_r \cdot \sin \theta_2 \\ y_{cl} = h \cdot \cos \theta_1 - l_r \cdot \cos \theta_2 \approx h - l_r \cdot \cos \theta_2 \end{cases}, \quad (\theta_1 \ll \theta_2)$$

로 나타낼 수 있고 운동에너지, 손실에너지 및 위치에너지를 다음의 (3)~(5)와 같이 각각 정리할 수 있다.

$$\mathcal{T} = \frac{M}{2} (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} (M+m) \dot{x}_e^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_{cl}^2 + \dot{y}_{cl}^2) + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_3^2 \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2} D_e \dot{x}_e^2 + \frac{1}{2} D_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} D_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} D_3 \dot{\theta}_3^2 \quad (4)$$

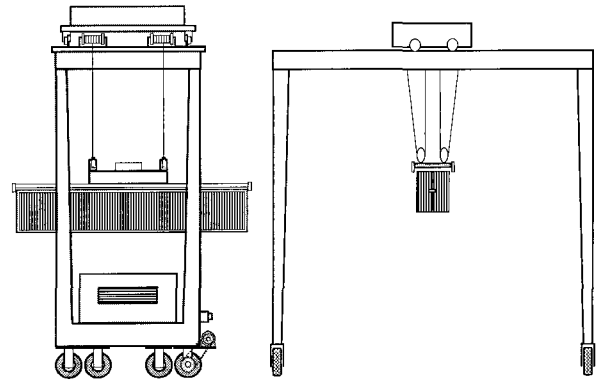


그림 1. 트랜스퍼 크레인.
Fig. 1. A transfer crane(RTG).

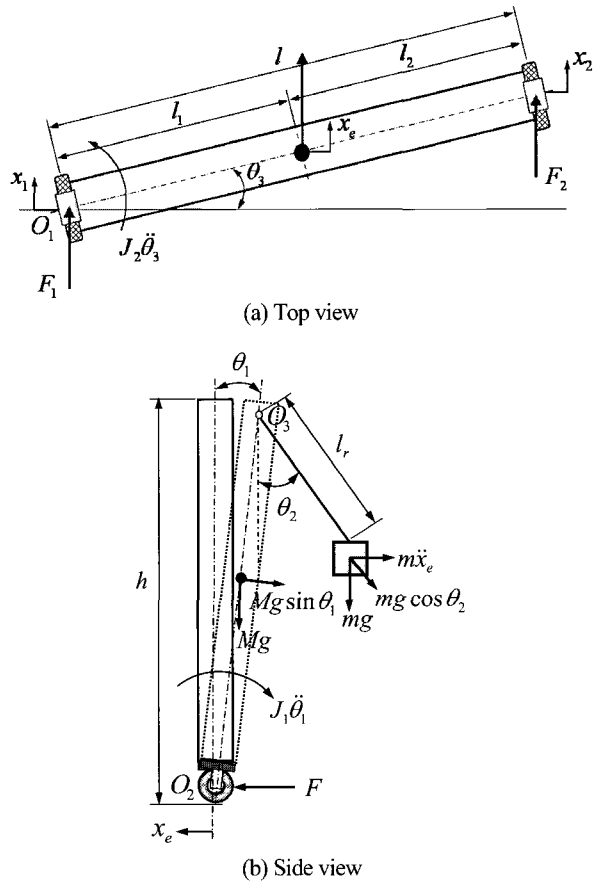


그림 2. 제어대상의 운동특성 해석을 위한 개략도.
Fig. 2. A schematic diagram for analysing system dynamics.

$$U = \frac{1}{2} Mgh \cos \theta_1 + mg(h - l_r \cos \theta_2) + \frac{1}{2} K x_e^2 + \frac{1}{2} K_3 \theta_3^2 \quad (5)$$

이때 (1)의 Lagrange 운동방정식에서, 일반화좌표 q_i 를 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, x_e$ 라 두면 대상 크레인의 운동방정식은 다음과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{1}{4} Mh^2 + J_1 \right) \ddot{\theta}_1 + D_1 \dot{\theta}_1 - \frac{1}{2} Mgh \sin \theta_1 = 0 \quad (6)$$

$$ml_r^2 \ddot{\theta}_2 + D_2 \dot{\theta}_2 + mgl_r \sin \theta_2 = T - T_d \quad (7)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_3 + D_3 \dot{\theta}_3 + K_3 \theta_3 = T_2 - T_1 \quad (8)$$

$$(M+m) \ddot{x}_e + D_e \dot{x}_e + K_e x_e = F_1 + F_2 \quad (9)$$

여기서 x_1 은 크레인 좌측 구동부 중심의 이동거리, x_2 는 우측 구동부 중심의 이동거리, x_e 는 무게 중심부의 이동거리를 나타내며 각 파라미터는 (1)과 같은 상관관계로 표현된다. 이때 선형화된 모델을 구하기 위해 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 가 충분히 작은 값이라고 하여 $\sin \theta_i \approx \theta_i, \cos \theta_i \approx 1$ 로 둔다. 그리고 각 변수간의 곱으로 표현되는 비선형항도 무시한다.

$$x_e = x_1 + l_1 \theta_3 = x_2 - (l-l_1) \theta_3 \quad (10)$$

위의 (1)-(10)을 정리하면 다음의 (11)-(14)가 구해진다.

$$\ddot{x}_e = -\frac{D_e}{(M+m)} \dot{x}_e - \frac{K_e}{(M+m)} x_e + \frac{1}{(M+m)} (F_1 + F_2) \quad (11)$$

$$\ddot{\theta}_1 = -\frac{D_1}{(1/4 M h^2 + J_1)} \dot{\theta}_1 + \frac{1/2 M g h}{(1/4 M h^2 + J_1)} \theta_1 \quad (12)$$

$$\ddot{\theta}_2 = -\frac{D_2}{m l_r^2} \dot{\theta}_2 - \frac{g}{l_r} \theta_2 + \frac{1}{m l_r^2} (T - T_d) \quad (13)$$

$$\ddot{\theta}_3 = -\frac{1}{J_2} D_3 \dot{\theta}_3 - \frac{1}{J_2} K_3 \theta_3 + \frac{1}{J_2} (T_1 - T_2) \quad (14)$$

위의 식에서 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

T : moving-mass에 의한 컨테이너 흔들림 억제력

T_d : 컨테이너 흔들림 발생 외란

F_1, F_2 : 좌·우측 구동모터에서 발생하는 힘

T_1, T_2 : F_1, F_2 에 의한 발생 토크

M : 트랜스퍼 크레인 질량

m : 컨테이너를 포함한 스프레더부 질량

D_1, D_2, D_3, D_e : 트랜스퍼 크레인 운동에서의 댐핑상수

K_1, K_2, K_3, K_e : 트랜스퍼 크레인 운동에서의 스프링상수

l : 트랜스퍼 크레인 폭

l_r : 로우프 길이

J_1, J_2 : 관성모멘트

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$: 회전 각

이것으로부터 전체시스템에 대한 상태방정식을 표현하도록 한다.

2. 전체 시스템 표현

1절에서 구한 모델을 상태방정식으로 표현하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A x + B u + B_w w + B_d d \\ y &= C x + D u \end{aligned} \quad (15)$$

(10)으로부터 $x = [\ddot{x}_1 \ x_1 \ \ddot{x}_2 \ x_2 \ \ddot{\theta}_1 \ \theta_1 \ \ddot{\theta}_2 \ \theta_2 \ \ddot{\theta}_3 \ \theta_3]$, $B = [B_1 \ B_2]$, $w = T$, $d = T_d$, $u = [u_1 \ u_2] = [F_1 \ F_2]$ 로 둔다.

각 구동모터의 입력전압을 v_1, v_2 , 모터 토크상수를 K_{m1}, K_{m2} 라 하면 구동력은 $[F_1 \ F_2] = [K_{m1} v_1 \ K_{m2} v_2]$

와 같이 나타낼 수 있고 (15)로 표현된 상태방정식의 각 계수행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B_1 = \left[\left(\frac{1}{(M+m)} + \frac{l_1^2}{J_2} \right) 0 \left(\frac{1}{(M+m)} + \frac{l_1(l-l_1)}{J_2} \right) 0 0 0 0 0 -\frac{1}{J_2} 0 \right]^T \cdot K_{m1}$$

$$B_2 = \left[\left(\frac{1}{(M+m)} + \frac{(l-l_1)l_1}{J_2} \right) 0 \left(\frac{1}{(M+m)} + \frac{(l-l_1)^2}{J_2} \right) 0 0 0 0 0 \frac{1}{J_2} 0 \right]^T \cdot K_{m2}$$

$$B_w = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/ml_r^2 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$B_d = -B_w$$

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

위의 (16)에서 행렬 A 의 요소행렬은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{D_e}{(M+m)} & -\frac{K_e}{(M+m)} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D_e}{(M+m)} & -\frac{K_e}{(M+m)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{D_1}{(1/4 M h^2 + J_1)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_1 \left(\frac{D_e}{M+m} - \frac{D_3}{J_2} \right) & -l_1 \left(\frac{K_e}{M+m} - \frac{K_3}{J_2} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{D_e(l_1-l)}{M+m} + \frac{D_3(l_1-l)}{J_2} & -\frac{K_e(l_1-l)}{M+m} + \frac{K_3(l_1-l)}{J_2} & 0 \\ \frac{1/2 M g}{(1/4 M h^2 + J_1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_2}{m l_r^2} & -\frac{g}{l_r} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{D_3}{J_2} & -\frac{K_3}{J_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

만일 제어대상에 대해 주행 중의 컨테이너 흔들림 문제는 고려하지 않고 주행제어문제 만 고려한다면 (15)-(17)로 표현된 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= A_r x_r + B_r u \\ y_r &= C_r x_r + D_r u \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $x_r = [\ddot{x}_1 \ x_1 \ \ddot{x}_2 \ x_2 \ \ddot{\theta}_3 \ \theta_3]^T$, $B_r = [B_{r1} \ B_{r2}]$, 입력 $u = [u_1 \ u_2] = [v_1 \ v_2]$ 이고 상태방정식의 각 계수행렬은 (16), (17)로부터 적절하게 표현할 수 있다.

III. 주행제어시스템 설계

1. 파라미터 추정

제어계를 설계하기위해 먼저 (15)-(17)에 나타낸 시스템 표현에서, 각각의 파라미터를 계산과 실험으로부터 추정한다. 계산이 어려운 파라미터인 강성계수(K_3, K_e) 및 댐핑상수(D_3, D_e) 등은 실험으로 추정하도록 한다.

실험을 위해 그림 3과 같이 실험장치를 제작하였으며 (1)-(3)을 기본으로 하여 실험과 시뮬레이션을 통해 구하고자 하는 파라미터를 추정한다.

(1)-(3)으로부터 RTG의 주행운동특성을 나타내는 운동방정식은 (19)와 같이 정리할 수 있다.

단, 트롤리는 크레인 중앙에 위치해 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_e &= -\frac{D_e}{(M+m)} \dot{x}_e - \frac{K_e}{(M+m)} x_e \\ &\quad + \frac{1}{(M+m)} (K_{m1} v_1 + K_{m2} v_2) \\ \ddot{\theta}_3 &= -\frac{1}{J_2} D_3 \dot{\theta}_3 - \frac{1}{J_2} K_3 \theta_3 \\ &\quad - \frac{1}{J_2} l_1 K_{m1} v_1 + \frac{1}{J_2} (l - l_1) K_{m2} v_2 \end{aligned} \quad (19)$$

이 경우, $l_1 = l_2 = 0.5l$ 이 된다.

이러한 기본적인 데이터를 이용하여 그림 4 및 그림 5와 같이 실험과 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 4는 양쪽 구동용 모터에 스텝상의 전압(12V)을 인가했을 때의 크레인 주행특성(주행속도)을 나타내고 있다. 파선이 실험결과이며 실선은 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

그림 5는 두 개의 구동용 모터 중 하나에만 스텝상의 전압을 인가했을 때의 크레인 회전운동특성을 나타낸 것이다. 이것은 독립적인 구동모터를 갖는 크레인의 주행 중 발생할 수 있는 회전운동특성을 파악하기 위한 것이다. 이것으로부터 크레인에 대한 기본적인 데이터와 위의 두 가지 운동특성 실험 및 시뮬레이션을 통해 추정된 파라미터(표 2)에 대한 유효성을 확인하였다.

지금부터는 주행제어를 위한 제어계 설계문제에 대해 검토한다.

본 논문에서는 RTG의 가장 기본적인 주행제어 문제, 즉 (18)로 표현된 제어대상에 대해 위치제어계를 설계한다. 이때 구조는 단순하지만 강한 목표값 추종성능을 갖는 2자유도 서보계 설계법[5,6]을 이용하며 우선 이에 대해 간단히 서술한다.

2. 관측기를 갖는 2자유도 서보계(2DOF servo-system)

제어계 설계에 있어서 가장 기본적인 문제 중의 하나는 제어대상의 모델링 오차나 외란이 존재함에도 불구하고 목표신호에 오차없이 추종하도록 제어계를 설계하는 것이다. 이것을 강인서보문제(robust servo problem)라고 한다. 특히 본 절에서 소개하는 설계법은 정상상태에서 뿐 만 아니라 과도상태에 있어서도 강인성이 확보되는 서보계 설계법이다.

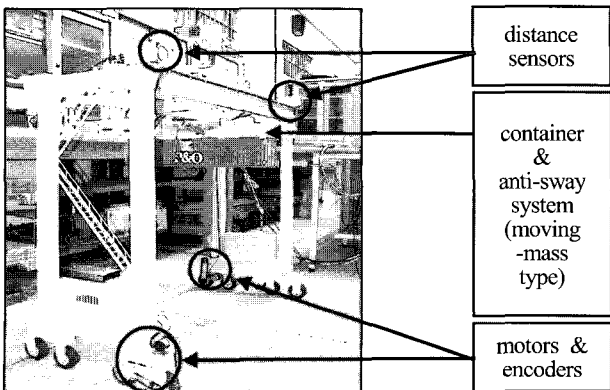


그림 3. 실험용 크레인 및 제어시스템.

Fig. 3. Pilot plant for experiment.

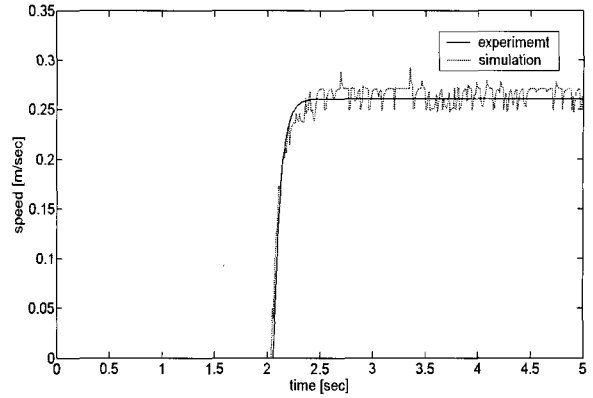


그림 4. 파라미터 추정을 위한 주행운동 실험결과.

Fig. 4. Tracking experiment for parameter estimation.

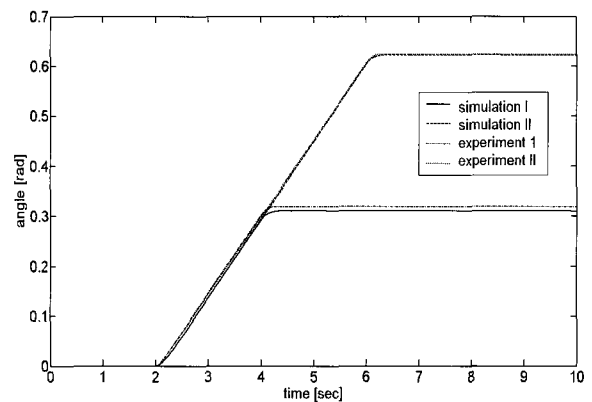


그림 5. 파라미터 추정을 위한 회전운동 실험결과.

Fig. 5. Rotation experiment for parameter estimation.

표 1. 실험용 크레인의 규격.

Table 1. Specification of the plant model.

Items	Spec.
Scale	1/24
Trolley winding speed	0.150 [m/sec]
Crane speed	0.270 [m/sec]
Height of crane	1.013 [m]
Width of crane	1.010 [m]
Weight of spreader part with container	0.134 [kg]
Total weight of crane	1.060 [kg]

표 2. 추정된 파라미터.

Table 2. Estimated parameter values.

Parameter	Value	Parameter	Value
D_3	1.3899 [N · s/m]	K_e	0.0059 [N/m]
D_e	20.8848 [N · s/m]	J_2	0.3975 [m · s ²]
K_{m1}	0.1910 [N · m/V]	l	1.010 [m]
K_{m2}	0.1910 [N · m/V]	l_r	0.505 [m]
K_3	9.857×10^{-4} [N/m]		

특히 모든 상태를 직접 관측할 수 없기 때문에 필요한 상태를 관측기를 이용하여 추정하는 서보계 설계 문제에 대해서도 고려한다. 먼저

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= A_r x_r + B_r u \\ y_r &= C_r x_r + D_r u \end{aligned} \quad (20)$$

와 같이 표현된 제어대상에 대해 스텝상의 목표신호로

$$r(t) = \begin{cases} r_+ & (t \geq 0) \\ r_- & (t < 0) \end{cases} \quad (21)$$

를 생각한다. 목표치 r_+ 는 시간 $t=0$ 에서 주어진다고 한다. 그리고 목표신호 r_+ 에 제어출력이 추종하도록 하는 제어계를 구성하기 위해 (A_r, B_r) 는 가안정, (C_r, A_r) 는 가검출 및

$$\det \begin{bmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{bmatrix} \neq 0 \quad (22)$$

라고 한다. 이러한 가정아래 그림 6과 같은 2자유도계로서의 적분형 서보계가 저자 등에 의해 제안되어져 있다. 그림 6에서 F_0 는 $A_r + B_r F_0$ 를 안정하게 하는 행렬이고 F_{1s}, H_0 는 다음과 같이 정의되는 행렬이다.

$$F_{1s} = C_r (A_r + B_r F_0)^{-1} \quad (23)$$

$$H_0 = [-C_r (A_r + B_r F_0)^{-1} B_r]^{-1} \quad (24)$$

특히 H_0 는 서보계의 목표값으로의 추종성능을 향상시키기 위해 도입된 피드포워드 이득이다. 예를 들어 제어계에 외란 등의 불확실성이 존재하지 않으면 신호 v 는 '0'이 되고 이득 H_0 에 의해 출력은 목표치에 정확하게 일치하도록 설계된 제어계이다.

그리고 이득 G 는 시스템 응답특성에 따라 적분보상효과를 조절하기 위해 도입된 이득이다. 이것은 페루프계가 안정하도록 결정해야 하며, 예를 들어 LQ제어이론에 따라 제어기를 설계한다면 (25)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} G &= -R^{-1} (F_{1s} B_r)^T W \\ &= G_0 W \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 $F_{1s} B_r$ 는 정칙(nonsingular)이고 R, W 는 정행렬(positive definite matrix)이다. 특히 W 는 임의로 조정 가능한 이득으로 외란 등의 불확실성의 강도에 따라 그 크기를 조정함으로써 외란제거성능 등을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 계산에 부담이 되지 않을 정도로 충분히 크게 선정해 두면 제어계 안정성이 보장되면서 외란 등의 불확실성에 대한 강인성을 부여할 수 있도록 설계된 파라미터 이대[6].

그림 6은 기본적으로 모든 상태정보가 필요한 상태피드백 시스템이다. 실험단계에서 모든 상태정보를 이용한다는 것은 어렵기 때문에 최소한의 출력정보와 상태추정을 통한 상태정보를 이용하는 것이 필요하다. 따라서 실험장치에 부착된 거리센서를 이용한 정보이외의 상태정보는 관측기(observer)로부터 추정하도록 한다.

이를 위해 그림 7과 같이 관측기를 도입한 2자유도 서보계를 구성한다. 이때 상태 x_r 에 대한 추정값을 \hat{x}_r 이라 두면 동일차원관측기는 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{\hat{x}}_r(t) = A_r \hat{x}_r(t) + B_r u(t) - L \{y_r(t) - C_r \hat{x}_r(t)\} \quad (26)$$

이때 L 은 $A_r + LC_r$ 을 안정하게 하는 이득이다. 최적제어 이론 및 LMI등의 해석기법을 이용하면 사양에 맞는 적당한 이득을 구할 수 있다. 각 이득의 계산에 있어서의 시스템 안정성 등에 관한 이론은 이미 보고된바 있다[12].

결국 그림 7의 관측기를 갖는 2자유도 서보계를 구축하기 위해 계산된 각 행렬은 다음과 같다.

$$F_0 = \begin{bmatrix} -1.1190 & -20.4226 & -0.0054 & 0.3739 & 2.4719 & -0.0011 \\ -0.0446 & -0.3691 & -1.1231 & -20.4230 & -2.4981 & 0.0011 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$F_{1s} = \begin{bmatrix} -0.0633 & -1.3021 & -0.0182 & -0.3601 & 0.0491 & -0.0784 \\ -0.0182 & -0.3601 & -0.0594 & -1.2247 & -0.0497 & 0.0766 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} 20.4298 & -0.3719 \\ 0.3713 & 20.4297 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} 0.0408 & -0.0007 \\ 0.0007 & 0.0408 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1170 & -58.5 \\ -600 & -420 \\ -600 & -480 \\ -144 & -144 \\ -3.6 & -360 \end{bmatrix} \quad (31)$$

그리고 위의 행렬들은 최적제어이론에 따라 계산되었으며, 전체 서보계에 대한 평가함수

$$J = \int_0^\infty [\tilde{x}^T(t) Q \tilde{x}(t) + \tilde{u}^T(t) R \tilde{u}(t)] dt \quad (32)$$

를 최소로 하는 행렬들이다. 이때 \tilde{x} 와 \tilde{u} 는 정상상태에서의 상태값(x_∞)과 제어입력(u_∞)의 편차 즉,

$$\tilde{x}(t) = x_r(t) - x_\infty, \quad \tilde{u} = u(t) - u_\infty \quad (33)$$

를 나타낸다.

위의 평가함수에 도입된 중량함수(weighting function)는 다음과 같다.

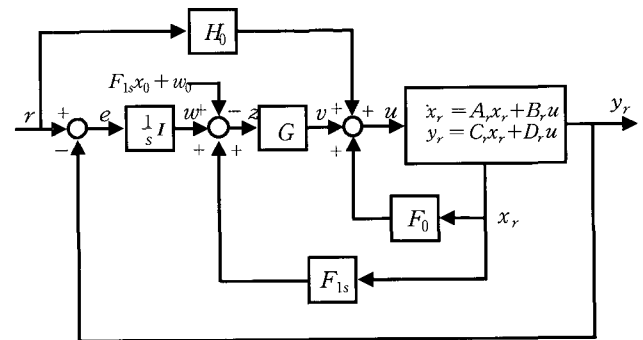


그림 6. 2자유도 서보계(상태피드백 시스템).
Fig. 6. 2DOF(two-degree-of-freedom) servo system.

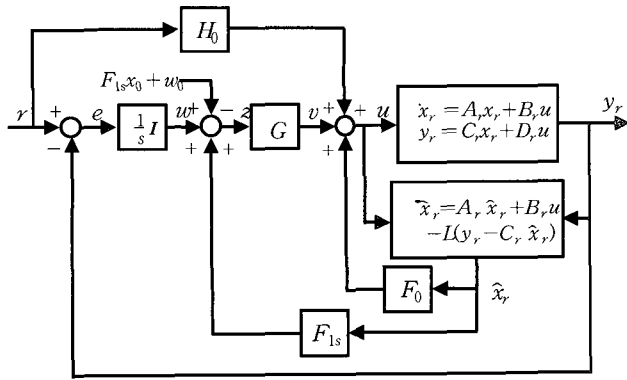


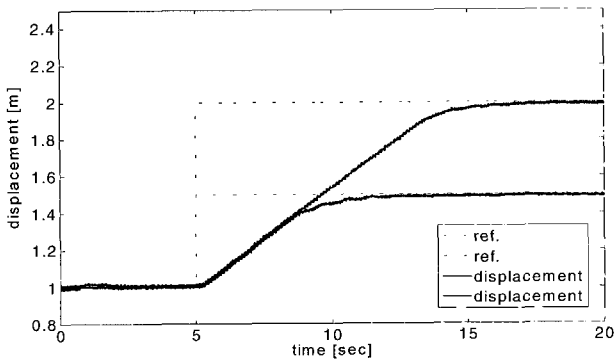
그림 7. 관측기를 갖는 2자유도 서보계.
Fig. 7. 2DOF(two-degree-of-freedom) servo system incorporating an observer.

$$R = \begin{bmatrix} 1.2 & 0 \\ 0 & 1.2 \end{bmatrix}$$

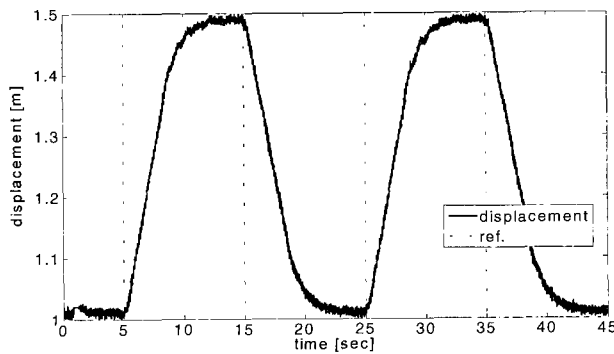
$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.005 \end{bmatrix} \quad (34)$$

IV. 실험

3장에서 소개한 2자유도 서보계 설계법에 따라 설계된 제어기를 이용하여 실험을 수행하였다.



(a)



(b)

그림 8. 스텝응답.
Fig. 8. Step responses.

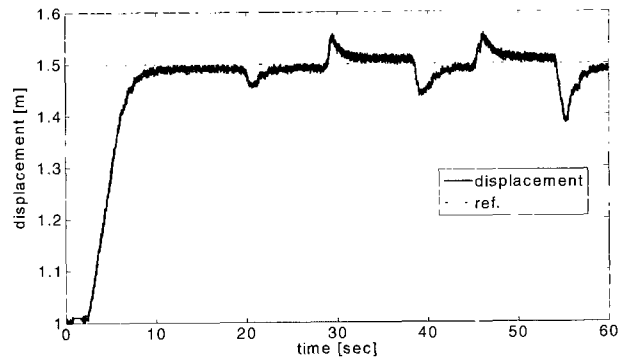


그림 9. 외란응답.
Fig. 9. Disturbance response.

실험방법은 두개의 구동모터를 액추에이터로 하여 계산된 제어신호를 두개의 모터에 각각 인가한다. 크레인의 이동 거리는 초음파센서(정도 1mm)를 이용하였으며, 실험결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

그림 8에서 (a)는 기준위치로부터 1m 떨어진 지점에서 0.5m, 1m씩 전진하도록 하는 스텝상의 목표신호에 대한 응답(크레인 이동거리)을 나타내고 있다. (b)는 기준위치로부터 1m 떨어진 지점에서 출발하여 0.5m전진후 원래의 위치로 복귀하도록 하는 연속적인 목표신호에 대한 응답을 나타내고 있다. 실험결과로부터 목표신호에 양호하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

그리고 그림 9는 외란응답을 나타내고 있다. 목표위치 1.5m까지 이동한 상태에서 목표위치를 벗어나게 하는 외란이 인가되었을 때의 외란제거 능력을 나타내고 있다. 외란에 대해서도 충분한 강인성이 확보되었음을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 항만 하역장비의 하나인 트랜스퍼 크레인(RTG)의 운동제어문제에 대해 고찰하였다. 안벽용 크레인에 비해 상당히 다양한 흔들림이 발생하는 문제가 있으나 야드에서의 유용성 등으로 향후 다양한 형태로의 개발이 가능한 장비 중 하나이다. 본 논문에서는 장비의 유용성과 효율성을 제고하기 위해 RTG에 대한 운동을 해석하고 모델링을 수행하였으며 구해진 모델을 대상으로 우선 주행제어문제에 대해 고찰하였다. RTG의 주행제어문제는 장비운용상 가장 우선적으로 고려되어야 할 사항이고 신속한 물류처리를 위한 가장 기본적인 문제이다. 따라서 본 연구에서는 강인한 추종성능을 가진 2자유도 서보계 설계법을 이용하여 제어계를 설계하였다. 특히 본 연구에서는 2자유도 서보계 설계법에 기초하여 상태를 추정하기 위한 관측기를 도입하였다. 설계된 제어기를 이용하여 실험을 수행하였으며 실험결과로부터 양호한 추종성능과 외란에 대한 강인성을 확인하였다.

참고문헌

[1] 박경택, 박찬훈, 김두형, 신영재, “자동화 컨테이너 터미널을 위한 컨테이너 트랜스퍼 크레인의 안티 스웨

- 이 시스템: Part I-기본구조, 모델링.” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권, 제11호, pp. 1112-1118, 2004.
- [2] 박경택, 박찬훈, 김두형, 신영재, “자동화 컨테이너 터미널을 위한 컨테이너 트랜스퍼 크레인의 안티 스웨이 시스템: Part II-모델 크레인 및 실험 검증,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권, 제12호, pp. 1287-1294, 2004.
- [3] C. W. Kim, K. S. Hong, and G. Lodewijks, “Anti-sway control of container cranes : an active mass-damper approach,” *Proceedings of SICE Annual Conference*, pp. 939-944, 2004.
- [4] H. H. Lee, “A new design approach for the anti-swing trajectory control of overhead cranes with high-speed hoisting,” *International Journal of Control*, vol. 77, no. 10, pp. 931-940, 2004.
- [5] Y. Fujisaki and M. Ikeda, “Synthesis of two-degree-of-freedom servosystems,” *Trans. SICE of Japan*, vol. 27, no. 8, pp. 907-914, 1991.
- [6] Y. Kim, M. Ikeda, and Y. Fujisaki, “Robust stability and high-gain integral compensation of two-degree-of-freedom servosystem,” *Trans. of SICE of Japan*, vol. 32, no. 2, pp. 180-187, 1996.
- [7] 김영복, 손유식, “컨테이너 크레인의 흔들림 방지장치 개발에 관한 연구,” 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp. 35-42, 2000.
- [8] 김영복, 정용길, “ H_{∞} Gain-scheduling 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제7권, 제7호, pp. 559-556, 2001.
- [9] 김영복, 채규훈, “크레인 스프레더의 Swing motion 제어에 관한 연구,” 한국동력기계공학회지, 제7권, 제3호, pp. 54-60, 2003.
- [10] 김영복, 문덕홍, 양주호, 채규훈, “동시최적화 설계기법을 이용한 항만용 크레인의 흔들림 제어계 설계,” 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp. 66-73, 2005.
- [11] Y. B. Kim, D. H. Kim, J. S. Jang, and G. Zhai, “Gain-scheduling approach to mass damper type anti-sway system design,” *Proc. of the 16th IFAC World Congress*, We-A04-TP-7, 2005.
- [12] 김영복, 양주호, “관측기를 갖는 2자유도 서보계의 승법적인 불확실성에 대한 강인한 안정성,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제3권, 제1호, pp. 1-8, 1997.

김 영 복

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 12 권 제 5 호 p. 431
참조.



서 진 호

1969년 12월 27일생. 1993년 한양대학교 수학과 졸업. 1996년 부경대 대학원 석사과정 수료. 2002년 동경공업대학 박사과정 수료(제어공학 전공). 2006년 현재 포항지능로봇연구소 선임연구원. 관심분야는 지능로봇, 항만물

류시스템 제어 및 자동화.



최 문 석

1979년 8월 18일생. 1999년 군산대학교 기관공학과 졸업. 2006년 부경대학교 대학원 제어기계공학과 석사과정 입학. 관심분야는 선박운동제어 및 항만 물류시스템 제어 및 자동화.

이 권 순

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 12 권 제 5 호 p. 431
참조.