

컨테이너크레인 시스템의 슬라이딩모드제어

이숙재* · 박 한* · 홍금식**

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과, ** 부산대학교 기계공학부 교수

Sliding-Mode Control of Container Cranes

Suk-Jae Lee* · Hahn Park* · Keum-Shik Hong**

*Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, Graduate School, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요 약 : 본 논문은 컨테이너크레인의 흔들림제어의 한 방법으로, 이송중인 컨테이너가 임의의 이송궤적을 따라서 움직이도록 하고, 또한 트롤리 및 호이스트의 위치제어를 동시에 수행하는 가변구조제어에 관한 연구이다. 자동화터미널의 야적장에서 A지점에서 B지점으로 컨테이너를 옮기고자 할 때, 쌓여 있는 주위의 다른 컨테이너들을 피하면서 이송시키거나, 혹은 양하역 작업을 장애물이 존재하는 환경에서 수행할 때 주변의 장애물과 충돌하지 않도록 이송궤적을 만들어야 함은 필수적이다. 기존의 연구들이 무조건 흔들림이 작게끔 하는 것에 초점을 맞추었던 것에 반하여, 본 논문에서는 비롯 흔들림이 발생하더라도 주어진 궤적을 추종하여 이송되게끔 하는 것에 그 특징이 있다. 트롤리 및 호이스트의 위치 및 속도오차 뿐 아니라 흔들림 각변위 및 각속도오차가 슬라이딩 평면으로 정의되며, 등속구간과 도착구간에서의 제어가 각각 별도로 설계된다. 리아프노프 방법을 이용하여 안정성을 해석하였으며 파일럿 크레인을 이용한 실험결과를 제시한다.

핵심용어 : 컨테이너크레인, 슬라이딩모드제어, 비선형시스템, 모델불확실성, 리아프노프 방법

Abstract : In this paper, as an anti-sway control strategy of container cranes, we investigate a variable structure control in which the moving load follows a given trajectory, whereas both the trolley and hoist controllers achieve their positioning problems. It is crucial, in an automated container terminal, that collisions should be avoided during the transference of containers from one place to another. It is also necessary, in the case of a quay crane, to select suitable loading and unloading trajectories of containers, so that possible collisions with surrounding obstacles are avoided. After a brief introduction of the mathematical model, a robust control scheme (i.e., a second-order sliding mode control that guarantees a fast and precise transference and a suppression of the resulted swing) is presented. Despite model uncertainties and unmodeled actuators dynamics, the swing suppression from the given trajectory is obtained by constraining the system motion on suitable sliding surfaces, which include both the desired path and the swing angle. The proposed controller has been tested with a laboratory-size pilot crane. Experimental results are provided.

Key words : Container crane, Sliding mode control, Nonlinear system, Model uncertainty, Lyapunov method

1. 서 론

컨테이너크레인은 항만에서 화물용 컨테이너들을 컨테이너선으로부터 트럭 혹은 AGV로 양하역하는 하역장비이다. 오늘날 컨테이너터미널에서는 날로 증가하는 물동량과 생산성 향상이라는 측면에서 주어진 시간 내에 많은 수의 컨테이너를 양하역하는 것은 매우 중요하게 되었다. 하지만 현재 설치된 컨테이너크레인의 작업환경은 숙련된 크레인 운전자들의 경험과 능력에 의존하여 컨테이너의 하역작업을 수행하고 있는 실정이다. 운전자의 능력이 우수함에도 불구하고 부산항의 컨테이너크레인 1기당 하역성능은 약 30 moves/hr (평균)로서 이미 한계에 도달해 있다. 또한 컨테이너선은 전세계적인 컨테이너물동량의 증가에 따라 점차적으로 거대해지고 있는 추세이며, 컨테이너크레인의 하역성능 역시 늘어나는 물동량에

따라 증가되어야 한다. 하지만 컨테이너크레인의 하역작업 시 가장 큰 문제는 트롤리의 이송 후 목표위치에 정지시켰을 때 로우프 끝에 매달린 컨테이너가 계속하여 흔들리고 있기 때문에 다음 작업에 들어가기 어렵다는데 있다. 그리고 크레인 시스템은 보유하고 있는 자유도의 수가 시스템이 구사할 수 있는 제어입력의 수보다 많은 비구동관절을 가진 기계시스템(underactuated mechanical system)이어서, 흔들림감쇠를 위한 제어입력을 흔들리는 물체에 직접적으로 가할 수 없고, 대신 흔들림-다이나믹스와 결합된 트롤리-다이나믹스를 통하여 제어할 수 있는 특성이 있으며, 비선형성이 매우 크고, 또한 항만의 경우에는 바람등과 같은 외란도 극복해야 하는 문제점이 있다.

컨테이너크레인에 대한 화물의 흔들림제어 및 트롤리와 호이스트의 위치제어에 관련된 기존의 연구는 다음과 같다.

* 대표저자 : 이숙재(정회원), sjlee@pusan.ac.kr 051)510-1481

** hpak97@pusan.ac.kr 051)510-1481

*** 정회원, kshong@pusan.ac.kr 051)510-2454

Boustany and d'Andrea-Novell(1992)은 다이나믹 피드백 선형화를 이용한 크레인 적응제어를 발표하였으며, (Okawa *et al.*, 1995)은 속도패턴제어와 더불어 흔들림각 피드백을 위하여 optimal-fiber gyro inclinometer를 사용하는 연구결과를 발표하였다. 그러나, 이러한 제어방법들은 방법자체가 원천적으로 갖고 있는 문제점, 즉 피드백 선형화기법에서는 제어모델에 불확실성이 있을 시 정확히 선형화가 되지 않는다는 점 등과 같은 단점을 갖고 있다. Mansour and Mohamed(2000)은 천정크레인에 대하여 트롤리 및 호이스트제어는 가변구조제어기법을, 화물의 흔들림제어는 상태 피드백제어를 발표하였다. (Bartolini *et al.*, 2002)은 2차 슬라이딩모드제어를 통한 컨테이너크레인의 흔들림제어에 관한 연구를 발표하였다.

국내에서는 (홍 등, 1997a, b)이 일정길이의 로우프에 대해서 목표지점에서의 무진동을 얻기 위한 6가지의 속도패턴을 분석하였고, (이 등, 1998)은 2자유도 서보제어기를 이용한 크레인의 흔들림제어를 제안하였다. 또한, (홍, 1999) 및 (Hong *et al.*, 2000)에서는 컨테이너크레인의 제어에 관한 (홍 등, 1997a,b)의 후속연구로, 트롤리의 주행구간(시간최적)과 잔류흔들림제어(비선형피드백선형화기법)을 순차적으로 적용하는 2단계 제어를 제안하였고, (박 등, 2000)은 슬라이딩모드 제어기를 이용한 산업용 천정크레인의 추종제어에 관한 연구를 발표하였다. (손 & 김, 2000)은 스프레더 위에 컨테이너크레인의 흔들림을 제한할 수 있는 방지장치에 관한 연구를 발표하였으며, (손 등, 2002)은 LQ제어기법을 이용한 컨테이너크레인의 제어를 설계하였으며, (소 등, 2003)은 피지제어 기법을 이용한 컨테이너크레인의 제어를 설계하였다. (Hong *et al.*, 2003)은 컨테이너크레인 의 트롤리가 주행할 때 흔들림각을 제한하는 입력성형기법을 제안하였으며, (강·홍, 2004)은 시간최적제어를 이용한 지브크레인의 흔들림제어를 수행하였다. 이러한 연구들은 로우프의 길이 변화가 급격하지 않은 경우에는 좋은 제어성능을 보이고 있으나, 제어기가 극복할 수 있는 불확실성에 대하여 언급이 적고, 이러한 불확실성에 대한 강인성을 보장할 수 있는 방안을 잘 제시하지 못하고 있다. 따라서 로우프의 길이 변화가 크거나 급격한 상황에 대해서는 잘 대처하지 못하고 있다고 하겠다.

일반적으로 컨테이너가 항만에서 이송되는 경우 로우프의 길이가 일정한 구간도 있고 변하는 구간도 있는데, 본 논문에서는 로우프의 길이가 자유롭게 변하는 경우에도 흔들림각이 일정부분 제어되는 기법을 제시한다. 앞에서 열거된 모든 논문들에서 컨테이너가 이송되는 작업환경(주변환경)을 고려하지 않고 (즉, 장애물 회피문제는 고려하지 않고), 흔들림제어만을 다루고 있는데 반하여, 실제 자동화된 터미널에서는 A지점에서 B지점으로 컨테이너를 옮기고자 할 때 주위에 쌓여 있는 다른 컨테이너들을 피해야 하므로, 먼저 이송궤적을 생성하고 그 이송궤적을 따라 옮길 때 주위의 컨테이너와 충돌하지 않도록 흔들림의 크기도 일정부분 제한해야 할 필요가 있다. 따라서 주위의 장애물을 피할 수 있도록 추종궤적을 정하고 그 궤적을 따라 컨테이너가 움직일 수 있도록 할 경우, 비롯 전체적인 이송시간은 장애물을 회피하지 않는 경우에 비

하여 늘어나게 되고, 또한 그러한 동작으로 인한 추가적인 에너지는 소요되겠지만, 항만에서의 하역작업을 자동화/무인화 한다는 측면에서 절대적으로 고려해야 할 부분이라 하겠다.

본 논문에서는 컨테이너크레인의 제어모델에 불확실성이 존재함에도 불구하고 컨테이너가 기준궤적을 따라 이송되는 동안에도 흔들림을 제어하여 목표지점에 안정하게 도달할 수 있는 슬라이딩모드 제어기법을 제안한다. 기존의 트롤리, 호이스트, 그리고 흔들림각에 대한 슬라이딩면에 흔들림 각속도 성분에 대한 슬라이딩면을 추가하여 제어법칙을 유도한 것이 특징이다. 비롯, 이송궤적 생성문제는 본 논문의 범위를 벗어나 생략되나, 로우프의 길이변화와 모델의 불확실성에 제어기의 견실성을 높이는 것에 초점을 맞춘 것이 본 논문의 강점이라 하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 슬라이딩모드제어를 위한 크레인 시스템의 모델을 유도하고, 제3절에서는 트롤리의 궤적추적 및 진동감쇠를 위하여 정의된 슬라이딩모드함수를 바탕으로 흔들림각도 θ -다이나믹스를 유도하며, 제4절에서는 제안된 슬라이딩모드 제어기의 안정성을 Lyapunov함수를 통하여 분석하기로 한다. 제5절에서는 파일럿 크레인을 사용하여 제안된 제어기의 성능을 실험을 통해 입증하고, 제6절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 크레인시스템 모델링

먼저 컨테이너의 흔들림현상 및 크레인시스템에 대하여 다음과 같은 가정을 한다. 1) 컨테이너는 평면운동만을 한다. 즉, 컨테이너의 흔들림은 트롤리의 이동방향과 수직선이 이루는 평면 안에서만 발생한다고 가정한다. 2) 크레인 구조물의 탄성변형은 무시할 수 있을 정도로 작다. 3) 컨테이너는 질량이 없는 로우프에 매달려 있는 질점으로 간주한다.

Fig. 1은 컨테이너크레인의 2-차원 평면운동을 보이고 있다. 여기서 M , m , x , l , θ , f_1 그리고 f_2 는 각각 트롤리 질량, 컨테이너 질량, 트롤리 위치, 로우프 길이, 흔들림 각도, 트롤리 구동력, 그리고 호이스트 구동력을 나타낸다. 앞의 가정과 Lagrange 역학을 이용하여 크레인시스템의 운동방정식을 구해보면 다음과 같다 (Lee, 1998).

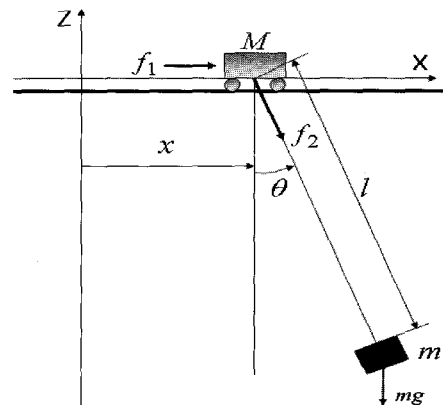


Fig. 1 Schematic diagram of a container crane

$$(M+m)\ddot{x} + 2ml\dot{\theta}\cos\theta + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta + m\ddot{l}\sin\theta = f_1, \quad (1) \quad \ddot{\theta} = -\frac{2l\dot{\theta}}{l} - \frac{g\theta}{l} - \frac{1}{l}z_1 + \frac{\theta m}{Ml}z_2 \quad (13)$$

$$m\ddot{l} + m\ddot{x}\sin\theta - m\dot{\theta}^2l - mg\cos\theta = f_2 \quad (2) \quad \text{여기서 } z_1, z_2 \text{는 다음과 같이 정의된다.}$$

$$ml^2\ddot{\theta}\cos\theta + 2ml\dot{\theta}l + mgl\sin\theta = 0 \quad (3) \quad z_1 = \frac{1}{M}f_1, \quad z_2 = \frac{1}{m}f_2. \quad (14)$$

또한 (1)-(3)을 다시 정리하면 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}f_1 - \frac{\sin\theta}{M}f_2 \quad (4)$$

$$\ddot{l} = \dot{\theta}^2l + g\cos\theta - \frac{\sin\theta}{M}f_1 + \left(\frac{\sin\theta}{M} + \frac{1}{m}\right)f_2 \quad (5)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2l\dot{\theta}}{l} - \frac{g\sin\theta}{M} - \frac{\cos\theta}{Ml} + \frac{\sin\theta\cos\theta}{Ml}f_2 \quad (6)$$

이때 컨테이너의 흔들림각도 θ 는 실제적으로 작다고 가정할 수 있으므로 $\cos\theta \cong 1, \sin\theta \cong \theta$ 로 근사화할 수 있다. 또한 $\theta^\alpha\theta^\beta (\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \alpha + \beta \geq 2)$ 의 형태로 표시되는 모든 항들은 선형화시 사라지게 되므로 (4)-(6)은 1차적으로 다음과 같이 단순화된다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}f_1 - \frac{\theta}{M}f_2, \quad (7)$$

$$\ddot{l} = g - \frac{\theta}{M}f_1 + \frac{1}{m}f_2, \quad (8)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2l\dot{\theta}}{l} - \frac{g\theta}{l} - \frac{1}{Ml}f_1 + \frac{\theta}{Ml}f_2 \quad (9)$$

3. 슬라이딩모드 제어기

먼저 슬라이딩모드 제어기 설계를 위해 다음과 같은 슬라이딩평면을 정의한다.

$$s(x, l) = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} - \dot{x}^d + \lambda_1(x - x^d) \\ \dot{l} - \dot{l}^d + \lambda_2(l - l^d) \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서 λ_1, λ_2 는 양의 상수이고 위 첨자 d 는 목표치를 의미한다.

θ -다이나믹스를 트롤리 및 호이스트시스템의 가속도성분으로 표현하기 위하여 선형화된 모델 (7)-(9)를 새로운 제어입력 z_1, z_2 로 다음과 같이 나타내어 보자.

$$\ddot{x} = z_1 - \frac{\theta m}{M}z_2, \quad (11)$$

$$\ddot{l} = g - \theta z_1 + z_2, \quad (12)$$

그리고 흔들림각도 θ -다이나믹스는 슬라이딩모드상태 즉 $s_1 = s_2 = 0$ 을 만족하는 z_1 과 z_2 에 의하여 결정된다. 슬라이딩모드 함수 $s(\cdot)$ 의 차수는 1차이고, 가변구조제어의 등가제어 (equivalent control)처럼 (11)-(13)의 제어입력

$z_{eq} = [z_{1eq} \ z_{2eq}]$ 는 $\dot{s}(\cdot) = 0$ 시스템의 해가 된다 (Bartolini et al., 2002). 따라서 해 z_{1eq}, z_{2eq} 는 (10)-(12)에 의해서

$$z_{1eq} = \frac{m\ddot{\theta}}{M} + \ddot{x} - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d), \quad (15)$$

$$z_{2eq} = \theta\{\ddot{x} - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d)\} - f + \ddot{l} \quad (16)$$

로 얻어지고 흔들림각도 θ -다이나믹스는 (15)와 (16)을 (13)에 대입하면 다음과 같이 유도된다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{2l\dot{\theta}}{l} - \left(\frac{g}{l} + \frac{mg}{Ml}\right)\theta - \frac{1}{l}\{\ddot{x}^d - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d)\}. \quad (17)$$

(17)을 살펴보면 흔들림각도 θ -다이나믹스의 $-\frac{2l\dot{\theta}}{l}$ 항은 호이스트 운동이 θ -다이나믹스와 결합되는 량으로 로우프 길이 l 이 일정할 때 그 값은 0이 된다. 그러나 로우프 길이 l 이 시간에 따라 변하는 경우에는 호이스트가 하강하게 되면 $\dot{l} > 0$ 이 되어 θ -다이나믹스에 감쇠항으로 작용하게 되고, 역으로 호이스트가 상승하게 되면 $\dot{l} < 0$ 이 되어 시스템을 불안정하게 됨을 알 수 있다. 즉, (10)과 같이 슬라이딩평면이 정의되게 되면 $\dot{l} < 0$ 이 될 경우 시스템이 불안정하게 되는 것을 구조적으로 피할 수 없게 된다.

본 논문에서는 흔들림각도에 대한 슬라이딩모드평면 s_3 를 새롭게 도입하고, x 에 대한 슬라이딩면에 트롤리의 구동력 f_1 에 의해 흔들림각도를 제어할 수 있는 새로운 슬라이딩모드평면 s_1^* 를 다음과 같이 정의한다.

$$s_3 = \dot{\theta} - \dot{\theta}^d + \lambda_3(\theta - \theta^d) \quad (18)$$

$$s_1^* = s_1 + ks_3 = \dot{x} - \dot{x}^d + \lambda_1(x - x^d) + k(\dot{\theta} + \lambda_3\theta), \quad (19)$$

여기서 k 는 임의의 상수이며, 이때 최종 위치에서의 흔들림 목표치는 $\dot{\theta}^d = \theta^d = 0$ 가 된다.

윗글에 전개된 과정을 반복하면 본 논문에서 제안하는 새로운 슬라이딩모드평면 s_1^* 에 대해서 $\dot{s}_1^* = 0$ 를 풀어서 얻은 등가제어입력 z_{1eq}^* , z_{2eq}^* 와 흔들림각도 θ -다이나믹스는 다음과 같이 유도된다.

$$z_{1eq}^* = \frac{m\ddot{\theta}}{M} + \ddot{x}^d - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) \quad (20)$$

$$z_{2eq}^* = \theta \{ \ddot{x}^d - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) \} - g + \dot{l} \quad (21)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} [(2\dot{l} + k\lambda_3)\dot{\theta} + \frac{(1+m)g}{M}\theta + \{ \ddot{x}^d - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d) \}]. \quad (22)$$

새롭게 유도된 θ -다이나믹스를 살펴보면 $\dot{\theta}$ 의 계수로 $k\lambda_3/(l-k)$ 이 나타나며, 이때 k 값을 적절히 조절함으로써 호이스트 로우프가 상승할 때 불안정하게 되는 현상을 제어할 수 있다. 즉, $2\dot{l} + k\lambda_3 > 0$ 으로 만들 수 있다.

3.1 등속구간에서의 슬라이딩모드제어

등속구간에서의 슬라이딩모드 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$s_1' = \dot{x} - v_0 + k(\dot{\theta} + \lambda_3\theta), \quad (23)$$

$$s_2' = \dot{l} - \dot{l}^d + \lambda_2(l - l^d), \quad (24)$$

여기서 $v_0 (= \dot{x}^d)$ 는 양의 상수이다. 즉 (10)과 (23)의 첫 번째 식을 비교하면 $\lambda_1 = 0$ 임을 알 수 있다. 또한 컨테이너시스템에서 컨테이너는 아래 식으로 주어지며 Fig. 2와 같은 포물선 형태의 기준궤적을 갖도록 한다.

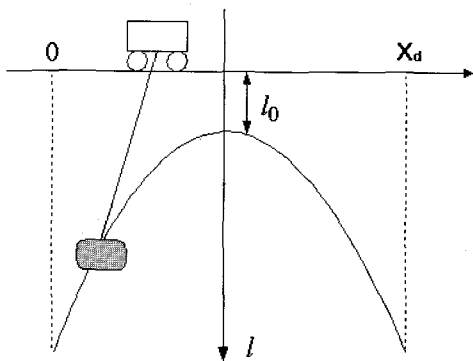


Fig. 2 A parabolic reference path of the container

$$l^d = l_0 + Cx^2, \quad C > 0, \quad |x| \leq x_{max}, \quad (25)$$

$$\dot{l}^d = 2Cx\dot{x}. \quad (26)$$

등속구간에서의 제어입력은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{z}_{1eq} = \frac{m\ddot{\theta}}{M} - k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) \quad (27)$$

$$\dot{z}_{2eq} = -\theta k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) - g + \dot{l} \quad (28)$$

따라서, 등속구간에서의 흔들림각도 θ -다이나믹스는 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} [(2\dot{l} + k\lambda_3)\dot{\theta} + \frac{(1+m)g}{M}\theta]. \quad (29)$$

3.2 도착구간에서의 슬라이딩모드제어

도착구간에서의 슬라이딩모드 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$s_1'' = \dot{x} - \lambda_1(x - x_f) + k(\dot{\theta} + \lambda_3\theta), \quad (30)$$

$$s_2'' = \dot{l} + \lambda_2(l - l_f). \quad (31)$$

여기서 x_f , l_f 는 최종목표위치를 나타낸다. 도착구간에서의 제어입력은 앞 절의 전개과정의 반복을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{z}_{1eq}'' = \frac{m\ddot{\theta}}{M} + \ddot{x} - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}_f) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) \quad (32)$$

$$\dot{z}_{2eq}'' = -\theta \{ \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3\dot{\theta}) \} - g + \dot{l} \quad (33)$$

따라서, 도착구간에서의 흔들림각도 θ -다이나믹스는

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} [(2\dot{l} + k\lambda_3)\dot{\theta} + \frac{(1+m)g}{M}\theta - \lambda_1(\dot{x} - \dot{x}^d)] \quad (34)$$

으로 유도된다.

4. 안정성 해석

정리 1 : 등속이송구간에서 구간 $K = (k_m, k_M)$ 과 $X = (0, x_{max})$ 이 존재하고, k 파라미터가 구간 K 안에 있고 또한 트롤리 위치 x 가 구간 X 에 존재한다면, 흔들림각도 θ -다이나믹스는 원점에서 국소적으로 점근적 안정하며 컨테이너의 이동경로는 예정된 경로를 따르게 된다.

증명 : 로우프 길이 제로-다이나믹스는 다음과 같다.

$$\dot{l} = \dot{l}^d - \lambda_2(l - l^d). \quad (35)$$

또한 로우프 길이 제로-다이나믹스의 l , \dot{l} 은 (25), (26)의 목표값으로 지수적으로 일치하게 되므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$l = l^d + \alpha_1 e^{-\lambda_2 t}, \quad \dot{l} = \dot{l}^d + \alpha_2 e^{-\lambda_2 t}. \quad (36)$$

그리고 (35)에 의해서 상태 (36)은 유계되어 있고, 비선형 흔들림각도 θ -다이나믹스 (29)는 (23), (25), (26), (36)에 의해서 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \theta = & -\frac{1}{l_0 + Cx^2 - k} (4V_0Cx - 2k\lambda_3)\dot{\theta} \\ & -\frac{1}{l_0 + Cx^2 - k} (1 + \frac{m}{M})g\theta - \frac{2\alpha_2}{l_0 + Cx^2 - k} e^{-\lambda_3 t}. \end{aligned} \quad (37)$$

(37)의 마지막 항은 시간이 지나면 지수적으로 감소되기 때문에 정리 1을 증명하는 것은 앞의 두 항의 안정성만 보장하면 된다. (37)은 다음과 같이 일반적인 형태로 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = -a(\eta)\dot{\theta} - b(\eta)\theta. \quad (38)$$

여기서 $\eta = x$ 이다.

이제, 임의의 변수 ω 를 다음과 같이 정의한다.

$$\omega = \dot{\theta} + h\theta. \quad (39)$$

여기서 h 는 임의의 양의 상수이다. 그리고 (38)을 새로운 $\omega - \theta$ 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega + h\theta, \\ \dot{\omega} &= -[a(\eta) - h] + [h\{a(\eta) - h\} - b(\eta)]\theta. \end{aligned} \quad (40)$$

새로운 좌표계에 대한 Lyapunov 함수후보를 다음과 같이 정의한다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2}\theta^2 + \frac{1}{2}\omega^2. \quad (41)$$

Lyapunov 함수후보를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(\theta, \omega) &= \theta\dot{\theta} + \omega\dot{\omega} \\ &= \theta(\omega - h\theta) + \omega[-\{a(\eta) - h\} \\ &\quad + [h\{a(\eta) - h\} - b(\eta)]\theta]. \end{aligned} \quad (42)$$

이것은 제곱(quadratic)형태로 다음과 같이 표현한다.

$$\dot{V}(\theta, \omega) = -[\theta, \omega]^T M(\eta) [\theta, \omega], \quad (43)$$

여기서

$$M(\eta) = \begin{bmatrix} h & -\frac{\delta(\eta) - b(\eta) + 1}{2} \\ -\frac{\delta(\eta) - b(\eta) + 1}{2} & a(\eta) - h \end{bmatrix} \quad (44)$$

이고, $\delta(\eta) = h[a(\eta) - h]$ 이다. 또한 행렬 $M(\eta)$ 은 다음의 부등식을 만족하면 양한정이 된다.

$$4\delta(\eta) > [\delta(\eta) - b(\eta) + 1]^2, \quad |\eta| \leq X_M. \quad (45)$$

그리고 (35)는 다음과 같이 재정리될 수 있다.

$$g_1(\eta) < \delta(\eta) < g_2(\eta), \quad (46)$$

여기서

$$g_1(\eta) = b(\eta) + 1 - 2\sqrt{b(\eta)}, \quad (47)$$

$$g_2(\eta) = b(\eta) + 1 + 2\sqrt{b(\eta)}. \quad (48)$$

이다.

함수 $\delta(\eta)$ 가 파라미터 h, k 에 의존하는 동안 화물은 limit 곡선 $g_1(\eta), g_2(\eta)$ 에 의해서 오직 목표경로만을 따른다. 그리고 함수 $\delta(\eta)$ 는 limit 곡선 $g_1(\eta), g_2(\eta)$ 가 (46)을 만족하는 적당한 영역 X 안에 놓여질 수 있게 하기 위하여 파라미터 h 는 k 에 의해서 적절하게 만들어진다.

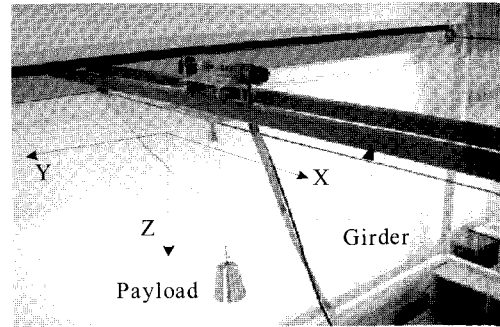


Fig. 3 A pilot crane for experiment: InTeCo 3DCrane (Poland)

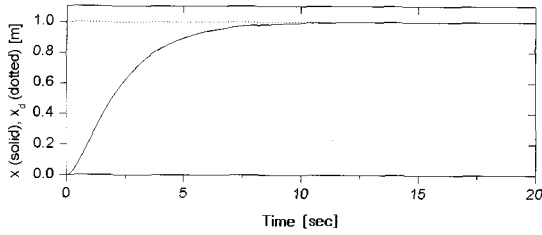
흔들림각도 θ 가 0으로 될 때 (23)에 의하여 실제 크레인 시스템의 속도는 목표값으로 근접하게 되고 시스템 (39)의 파라미터 h 직 안정성 해석에서만 나타나고 슬라이딩모드제어기에는 아무런 영향을 미치지 않는다.

5. 파일럿크레인을 통한 실험

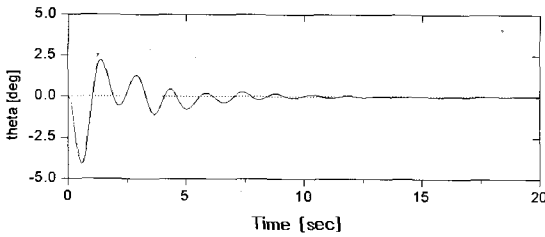
제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 3과 같은 InTeCo 3D크레인이 사용되었다. InTeCo 3D크레인 시스템은 트롤리, 거더, 추로 구성되어 있으며, 거더는 Y축방향으로 움직이고 트롤리는 X축방향으로 이동한다. InTeCo 3-D크레인은 3개의 DC모터에 의해서 트롤리, 거더, 호이스트가 구동된다. 또한 트롤리와 거더의 위치, 로우프의 길이, X-Y축 방향의 흔들림각도를 각각 측정할 수 있는 5개의 엔코더를 가지고 있다. 하지만 실험방법은 트롤리가 X축방향의 목표위치로 이동할 때의 상황만 고려하여 실험하였다. 왜냐하면 컨테이너크레인은 천장크레인처럼 X축 방향과 Y축 방향 동시에 이동하면서 하역작업을 수행하지 않기 때문이다.

실험에 적용된 파일럿크레인의 파라미터는 $M = 1.06kg$,

$m = 0.73kg$ 이다. 우선 제안한 제어가 로우프의 길이가 일정한 경우에 대해서도 좋은 성능을 보이는지 확인하기 위해 로우프의 길이가 1 m로 일정한 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 이를 살펴보기 위해 Fang *et al.*(2003)의 E^2 제어법칙을 2차원 시스템에 적용한 결과와 비교하여 보았다. Fig. 4는 E^2 제어법칙을 적용한 실험결과이며, 이때 게인의 크기는 $k_d = 125.3$, $k_p = 50$, 그리고 $k_E = 0.001$ 이다. 실험결과를 살펴보면 트롤리는 12초 후 목표위치 1 m에 도달하였으며, 이때 흔들림은 약 12초를 지나서 0에 도달함을 알 수 있다.

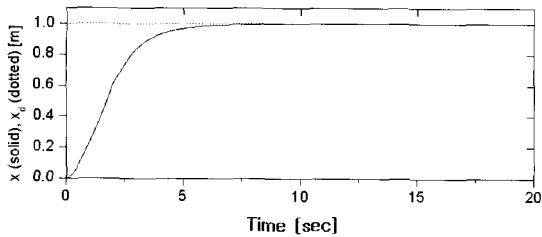


(a) x -position.

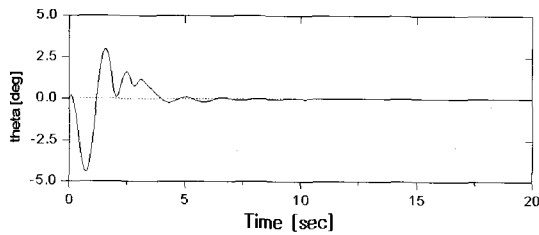


(b) Swing angle θ .

Fig. 4 Experimental result of the E^2 control law of Fang *et al.*(2003) (dotted lines: target values, solid lines: experimental values)



(a) x -position.

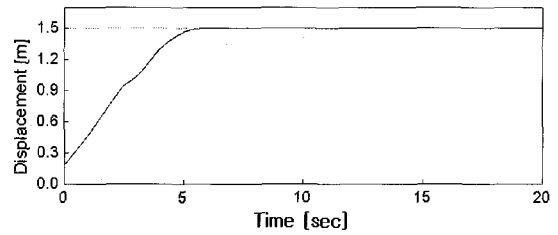


(b) Swing angle θ

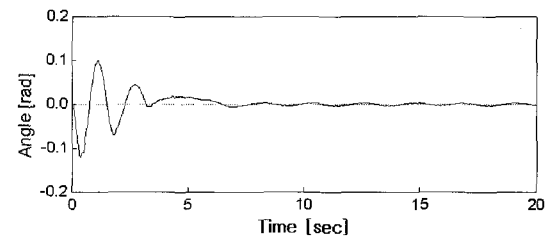
Fig. 5 Experimental result of the proposed controller (dotted lines: target values, solid lines: experimental values).

Fig. 5는 제안된 슬라이딩모드 제어를 적용했을 때의 실험결과를 나타내며, 트롤리는 약 7.5초 후에 목표위치 1m에 도달하였고, 흔들림 역시 약 7.5초가 지나서는 0이 됨을 알 수 있는데, 상대적으로 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

Fig. 6은 로우프의 길이가 예정된 경로를 따라 0.2m-1m -0.2m 를 이동했을 때의 실험결과를 나타낸다. 트롤리가 이동하면서 로우프의 길이가 변하는 경우에도 흔들림이 점점 줄어들어 목표위치에서 0이 됨을 알 수 있다. 아주 미세한 흔들림이 발생하는 것은 기계적인 한계에 인한 것으로 생각된다.



(a) x -position.



(b) Swing angle

Fig. 6 Experimental result of the proposed controller while changing rope length (dotted lines: target values, solid lines: experimental values).

6. 결론

본 논문은 컨테이너크레인에서 화물을 빠르고 안정하게 이송시키는 제어문제를 다루고 있으며, 이를 위해 모델의 불확실성에도 불구하고 트롤리의 수평방향 이송속도제어를 통하여 컨테이너가 주어진 기준 궤적에 따라 움직이면서 트롤리가 목표 위치에 도달했을 때 로우프 끝에 매달려 있는 컨테이너의 흔들림을 0에 가깝도록 하는 슬라이딩모드제어를 설계하였다. 과일릿크레인을 통한 실험으로 제안된 제어기의 성능을 검증하였다.

후 기

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(차세대 물류IT기술연구사업단)의 지원으로 연구되었습니다.

참고 문헌

[1] 강민우, 홍금식(2004), “시간최적제어를 이용한 지브크레인의 흔들림제어”, 한국해양공학회지, 제19권, 1호 pp. 87-94.

[2] 박병석, 윤지섭, 강이석(2000), “슬라이딩모드 제어를 이용한 산업용 천정크레인의 추종제어에 관한 연구”, 제어자동화시스템공학 논문지, 제6권, 11호, pp. 1022-1032.

[3] 손정기, 최재준, 소명옥, 남택근, 권순재(2002), “LQ제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계”, 한국박용기관학회지 제26권, 5호, pp. 544-553.

[4] 소명옥, 유희환, 박재식, 남택근, 최재준, 이병찬(2003), “퍼지제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계”, 한국박용기관학회지 제27권, 6호, pp. 759-766.

[5] 손유식, 김영복(2000), “컨테이너 크레인의 흔들림 방지장치 개발에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제14권, 4호, pp. 35-42

[6] 신민생, 이충환, 김상봉(1998), “컨테이너 하역장에서 고속운송을 위한 크레인시스템의 개발”, 한국해양공학회지, 제12권, 4호, pp. 124-131.

[7] 이진우, 여태경, 안휘웅, 김상봉(1998), “2자유도 서보제어를 이용한 크레인의 Anti-Sway 제어”, 한국해양공학회지, 제12권, 4호, pp. 17-23.

[8] 홍금식, 손성철, 이만형(1997a), “컨테이너 크레인의 흔들림제어 (part I): 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차피이드백 제어”, 제어.자동화.시스템공학논문지, 제3권, 1호, pp 23-31.

[9] 홍금식, 손성철, 이만형(1997b), “컨테이너 크레인의 흔들림제어 (part II): 트로리 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어”, 제어.자동화.시스템공학논문지, 제3권, 2호, pp. 132-138.

[10] 홍금식(1999), “컨테이너 기증기의 제어: 수정된 시간체적주행과 비선형 잔류흔들림제어”, 제어.자동화.시스템공학회논문지, 제5권, 5호, pp. 630-639.

[11] Bartolini, G., Pisano, A., and Usai, E.(2002), “Second-order sliding-mode control of container cranes”, *Automatica*, Vol. 38, No. 10, pp. 1783-1790.

[12] Boustany, F. and d’Andrea-Novel, B.(1992), “Adaptive control of non-completely controlled mechanical systems using dynamic feedback linearization and estimation design”, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 6, No. 6, pp. 589-610.

[13] Fang, Y., Dixon, W. E., Dawson, D. M., and Zergeroglu, E.(2003), “Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, 418-423.

[14] Hong, K. S., Park, B. J. and Lee, M. H.(2000), “Two-Stage Control of Container Cranes, *JSME International Journal*”, Series C, Vol. 43, No. 2, pp. 273-282.

[15] Hong, K. T., Huh, C. D. and Hong, K. S.(2003), “Command Shaping Control for Limiting the Transient Sway Angle of Crnae Systems, *International Journal of Control*”, Automation, and Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 43-53.

[16] Lee, H. H.(1998), “Modeling and control of a three-dimensional overhead crane, *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*”, Vol. 120, No. 4, pp. 471-476.

[17] Mansour, A. K. and Mohamed, Z.(2000), “Robust control schemes for an overhead crane”, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 7, No. 7, pp. 395-416.

[18] Okawa, T., Yamaguchi, O., and Sekine, H.(1995), “Computer control of overhead crane”, *NKK 기보 (Japan)*, No. 149, pp. 40-45.

[19] Slotine, J. J. and Li, W.(1991), “*Applied Nonlinear Control*”, Prentice-Hall International, Inc..

원고접수일 : 2004년 12월 7일

원고채택일 : 2005년 10월 28일