
선형화 기법에 의한 컨테이너 크레인의 제어

남택근* · 소명옥*

Control of a Container Crane using Linearization Method

Taek-Kun Nam* · Myung-Ok So*

Abstract

In this paper, we consider a control problem of the container crane with variable rope length. It is very important to decrease oscillation of the rope while the container crane is in motion. We proposed the control strategy that decreases the oscillation of the rope and stabilizes the trolley from its initial position to the origin. Simulation results are provided to verify the effectiveness of the proposed scheme.

I. 서론

본 논문에서는 컨테이너 크레인의 제어문제를 다루고자 한다. 컨테이너 크레인은 컨테이너 터미널의 에이프런(apron)에 위치하여 컨테이너를 선박과 육상 사이에서 적하 또는 양하하는 컨테이너 터미널의 핵심장비이다. 따라서 컨테이너 크레인의 효율적인 운용은 컨테이너 하역에 있어서 대단히 중요하다고 할 수 있다.

컨테이너 크레인의 주요동작은 컨테이너를 들어 올리고 내리는 호이스트 동작과 컨테이너를 선박과 육상의 목표위치로 이동시키는 트롤리 동작으로 구성되어 진다. 트롤리 장치와 실제 컨테이너를 집는 장치인 스프레더 사이에는

와이어 로프로 연결되어 있어 컨테이너를 목표위치로 이동시킬 때 트롤리의 가·감속으로 인한 화물의 흔들림이 발생하게 된다. 컨테이너 크레인의 하역효율을 높이기 위해서는 호이스트 속도와 트롤리의 이동속도를 높이고 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 스프레더의 흔들림을 짧은 시간내에 제어해야 한다. 기존의 흔들림 방지 제어시스템은 크레인의 사이클 시간을 줄이기 위해 트롤리를 목표위치에 빠르게 도달시키고, 목표위치 부근에서 생긴 오버슈트를 줄이기 위해 트롤리를 수회 전·후진시키고 있다. 하지만 이러한 전·후진 운동은 크레인 운전자에게 피로현상을 증가시키는 커다란 단점을 가지고 있기 때문에 실제 터미널에서는 어느 정도 속련

* 한국해양대학교

된 운전자는 수동운전을 행하고 있다. 즉, 크레인 운전은 운전자의 숙련도에 의존하고 있기 때문에 운전자의 개인적인 숙련도의 차, 실수 및 피로 등으로 인한 효율저하는 물론 안전과 화물의 손상 등 심각한 문제를 불러일으키고 있다.

본 논문에서는 컨테이너 크레인을 이용하여 화물의 양하, 적하작업을 수행함에 있어서 목표 위치에 가능한 한 짧은 시간에 오버슈트가 거의 없이 화물을 이동시키고 동시에 화물의 잔류 흔들림을 단시간에 제어함으로써 사이클 시간의 단축은 물론 흔들림 제어를 위해 불필요한 트롤리의 전·후진 동작을 없애는 제어를 설계하고자 한다.

이와 같은 컨테이너 크레인에 대한 종래의 연구를 살펴보면 Mita^[2]는 최단시간제어를 이용한 크레인의 최적운반법을 제안하고 있다. Vikramaditya^[4]는 대차의 위치와 로프의 길이를 목표로 하는 궤도에 추종하게 하고 나머지의 제로 다이내믹스가(zero dynamics-로프의 흔들림각에 해당함) 안정하게 되는 것을 보여주고 있다. Bartoline^[5]는 Vikramaditya가 주목한 제로 다이내믹스의 안정화에 슬라이딩모드제어 기법을 적용하여 크레인의 제어를 행하고 있다. 하지만 상기의 연구들은 로프의 흔들림각을 적극적으로 제어하고 있지는 않다.

본 논문에서는 로프의 길이를 목표로 하는 길이로 제어함과 동시에 비선형시스템에 대한 완전선형화 기법을 이용하여 크레인의 위치와 로프의 흔들림각을 제어하는 기법을 제안한다. 이와 같은 방법을 이용함으로써 크레인의 위치와 로프의 흔들림각을 직접적으로 제어할 수 있게 된다. 또한 제안한 제어 기법의 유용성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 행하고 결과에 대한 고찰을 행하였다.

II. 제어대상

본 연구의 제어대상은 Fig. 1과 같은 컨테이너 크레인이다. 이러한 컨테이너 크레인은 취급 화물의 종류, 형태, 설치위치 등에 따라 갠트리 크레인(Gantry crane)과 RMQC(Rail Mounted Quay side Crane)등으로 불리워지고 있다. 컨테이너 크레인의 주요동작은 컨테이너가 위 아래로 이동하는 호이스트 동작, 바다측이나 육지측으로 이동하는 트롤리 동작, 크레인 전체가 좌우로 움직이는 갠트리 동작, 붐 상하 이동의 붐 호이스트 동작으로 구분된다. 이러한 네 가지의 동작 중 작업의 시작과 끝에서는 갠트리와 붐 호이스트 동작이, 홀드사이의 이동시는 갠트리 동작이, 홀드에서의 작업은 호이스트와 트롤리의 반복적인 동작으로 이루어진다. Fig. 1은 컨테이너 크레인의 세부적인 구조를 나타내고 있다.

III. 모델링

Fig. 1과 같은 컨테이너 크레인을 수식적으로 모델링하기 위해 Fig. 2와 같은 모델을 생각한 다. 이 크레인은 길이 l 의 가변 로프가 부착되어

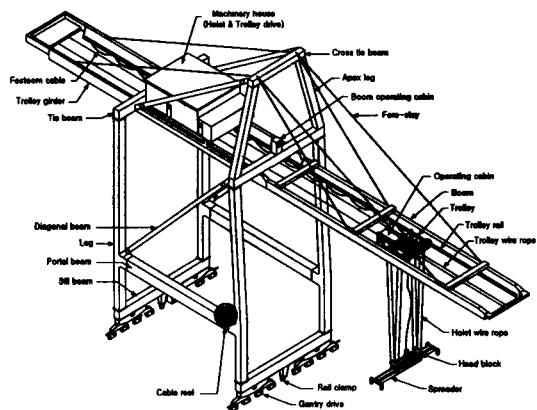


Fig. 1 Structure of the container crane

있고 로프의 끝단에는 질량 m 의 화물이 달려있는 구조이다. F 는 트롤리의 제어입력, τ 는 호이스트용 와이어 로프를 감는 입력토크이다.

시스템 전체의 운동에너지는

$$T = \frac{M}{2} \dot{x}^2 + \frac{m}{2} \left\{ \frac{d}{dt}(x - l \sin \theta)^2 + \frac{d}{dt}(l \cos \theta)^2 \right\} \\ = \frac{1}{2}(M+m) \dot{x}^2 + \frac{1}{2}(\dot{l}^2 + \dot{\theta}^2) - m(\dot{x} \dot{l} \sin \theta + l \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta) \quad (1)$$

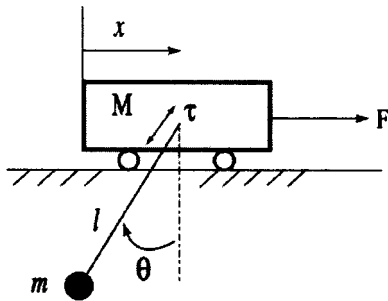


Fig. 2 Mathematical model of a container crane

가 얻어진다. 또한 위치에너지는

$$U = mgl(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

가 되고 Lagrange 함수 $L = T - U$ 가 된다.

Lagrange의 운동방정식으로부터.

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

$$ml - m \dot{x} \sin \theta + ml \dot{\theta}^2 + mg(1 - \cos \theta) = \tau \quad (4)$$

$$ml^2 \ddot{\theta} - ml \dot{x} \cos \theta + 2ml \dot{l} \dot{\theta} + mgl \sin \theta = 0 \quad (5)$$

를 얻는다. (3), (4), (5)의 x, l 에 대하여 부분 선형화를 행함과 동시에 (5)를 ml 로 나누면

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_1 \\ \dot{l} &= u_2 \\ \ddot{\theta} &= -\frac{2}{l} \dot{l} \dot{\theta} - \frac{g}{l} \sin \theta + \frac{1}{l} \cos \theta u_1 \end{aligned} \quad (6)$$

가 얻어진다. 단, 부분 선형화의 새로운 제어입력은 다음과 같다.

$$u = A^{-1}B \quad (7)$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} M+m - m \cos^2 \theta & -m \sin \theta \\ -m \sin \theta & m \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} F - \frac{1}{2} m g \sin 2\theta - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ \tau - ml \dot{\theta}^2 - mg(1 - \cos \theta) \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

여기에서 0 근방에서 θ 에 대해 근사화 하면

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_1 \\ \dot{l} &= u_2 \\ \ddot{\theta} &= -\frac{2}{l} \dot{l} \dot{\theta} - \frac{g}{l} \theta + \frac{1}{l} u_1 \end{aligned} \quad (8)$$

가 얻어진다. 여기에서 (8)의 시스템에 대하여

$$z = (x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}, l, \dot{l})^T \quad (9)$$

의 좌표변환을 행하면

$$\dot{z} = \begin{pmatrix} z_2 \\ 0 \\ z_4 \\ -g \frac{z_3}{z_5} - 2 \frac{z_4 z_6}{z_5} \\ z_6 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{z_5} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} u \quad (10)$$

의 시스템이 얻어진다.

IV. 제 어

본 절에서는 (10)으로 표현되어지는 시스템의 제어에 대해서 고찰한다. 제어목적은 로프의 길이를 바라는 길이로 제어함과 동시에 트롤리를 원점에 이동시키고 로프의 흔들림을 제어하는 것이다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해 우선

로프의 길이 z_5 를 목표길이 z_{5d} 에 추종하는 제어를 행한다. 로프의 길이를 제어하는 입력은 u_2 이므로

$$u_2 = -k_1 z_6 - k_2 e \quad (11)$$

단, $e = z_5 - z_{5d}$

를 사용하면

$$z_5 \rightarrow z_{5d}, z_6 \rightarrow 0, (t \rightarrow \infty) \quad (12)$$

가 달성되어 진다. 여기에서 개인 k_1, k_2 는 양의 실수이다.

또한, (12)로부터 $\dot{z}_6 \approx 0$ 를 사용하고, z_5, z_6 를 분리해서 생각하면 (10)으로부터

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{pmatrix} z_2 \\ 0 \\ z_4 \\ -g - \frac{z_3}{z_5} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \frac{1}{z_5} \end{pmatrix} u_1 \\ &= f(z) + g(z)u_1 \end{aligned} \quad (13)$$

가 얻어진다. (11)의 제어를 행함으로써 얻어지는 (13)의 시스템에 대하여 좌표변환을 동반한 완전 선형화기법¹⁾을 이용하여 제어를 행하고자 한다. 여기에서는 로프의 길이 z_5 를 목표로 하는 길이 $z_{5d} = l_d$ 가 되도록 함과 동시에 다른 상태변수를 안정화시키는 제어를 행한다. 즉, z_{5d} 의 근방에서 선형화를 행하여 제어 목적을 달성시키는 것이다. 부록의 (A2)를 만족시키는 출력 함수 y_1 은 (A3)~(A6)으로부터

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_1}{\partial z_2} = 0, \quad \frac{\partial y_1}{\partial z_4} = 0, \\ \frac{\partial y_1}{\partial z_1} = -\frac{\partial y_1}{\partial z_3} \frac{1}{l_d}, \quad \frac{\partial y_1}{\partial z_3} \neq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

1) 완전선형화 기법에 대한 상세한 것은 부록을 참조.

를 만족시키는 함수이어야 한다. (14)를 만족시키는 y_1 으로서

$$y_1 = -\frac{1}{l_d} z_1 + z_3 \quad (15)$$

를 구할 수가 있다. (15)를 이용한 좌표변환

$$\begin{aligned} y_1 &= -\frac{1}{l_d} z_1 + z_3 \\ y_2 &= L y_1 = -\frac{1}{l_d} z_2 + z_4 \\ y_3 &= L y_2 = -g - \frac{z_3}{l_d} \\ y_4 &= L y_3 = -g - \frac{z_4}{l_d} \end{aligned} \quad (16)$$

을 행하면

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2 \\ \dot{y}_2 &= y_3 \\ \dot{y}_3 &= y_4 \\ \dot{y}_4 &= v \end{aligned} \quad (17)$$

와 같은 표준형의 가제어 선형시스템이 얻어진다. 여기에서 새로운 입력변환은 아래와 같이 주어진다.

$$v = \frac{g^2}{l_d^2} z_3 - \frac{g}{l_d} u_1 \quad (18)$$

(17)의 좌표변환과 (18)의 입력변환은 전역에서 유효함을 알 수 있다. 제어입력 u_1 은 (18)로부터 구할 수가 있다. 또한 (16)의 좌표변환으로부터 $y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T \rightarrow 0$ 이 되어

$$z = [z_1, z_2, z_3, z_4]^T \rightarrow 0 \quad (19)$$

의 관계가 성립함을 알 수가 있다. 즉, 좌표변환 후의 y 를 제어함으로써 본래의 상태변수 z 를 안정화시키는 것이다. (12), (19)로부터 로프의 길이

와 흔들림각 그리고 트롤리를 원점에 안정화시키고자 하는 제어목적이 달성됨을 알 수 있다.

V. 시뮬레이션

위에서 제안한 제어방법의 유용성을 검토하기 위해 크레인의 안정화제어에 대한 시뮬레이션을 행하였다.

Fig. 3~Fig. 5는 크레인시스템의 상태변수를 $(x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}, l, \dot{l})$ 로 하고 그 초기치와 목표치를 각각 $(-3, 0, \pi/6, 0, 2, 0), (0, 0, 0, 0, 0.5, 0)$ 로 하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 단, 트롤리의 질량 $M=10$ [kg], 화물의 질량 $m=8$ [kg]으로 하였다. (11)의 $k_1=k_2=3$ 으로 하였고 (17)의 선형화된 시스템의 제어기로는 LQR 제어기

를 이용하였다. 그림에서 $dx, d\theta, dl$ 은 각각 $\dot{x}, \dot{\theta}, \dot{l}$ 를 나타낸다.

Fig. 3의 시뮬레이션 결과는 로프가 초기각을 가지고 있음으로 인해 크레인의 수평방향 x 의 제어에 있어서 약간의 오버슈트 현상을 나타내고 있다. 즉, 목표위치 근방에서 트롤리가 불필요한 약간의 전·후진 동작을 하고 있다.

Fig. 6~Fig. 8은 초기치와 목표치를 각각 $(-3, 0, 0, 0, 2, 0), (0, 0, 0, 0, 0.5, 0)$ 로 했을 경우의 시뮬레이션의 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6~Fig. 8의 결과는 Fig. 3~Fig. 5의 시뮬레이션 결과와 비교하여 제어입력의 크기와 상태변수 x 의 변동량이 작고 점근적으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 즉, 목표위치 근방에서 화물의 흔들림 제어와 동시에 트롤리의 전·후진 동

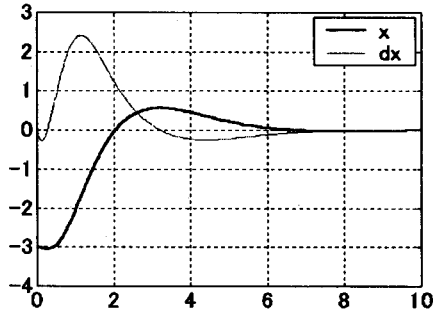


Fig. 3 Time evolution of states(x, dx)

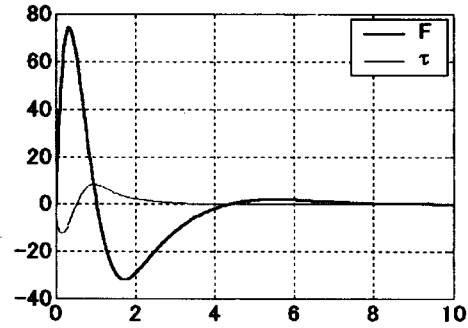


Fig. 5 Time evolution of control input

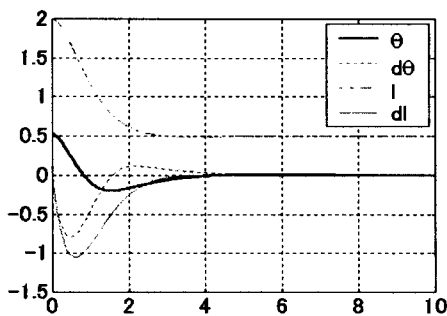


Fig. 4 Time evolution of states($\theta, d\theta, l, dl$)

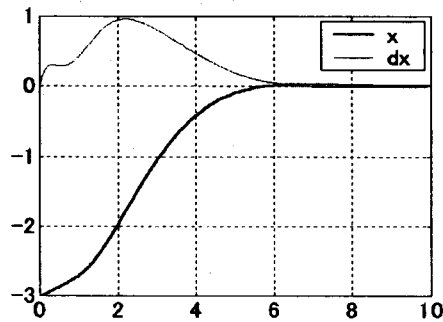


Fig. 6 Time evolution of states(x, dx)

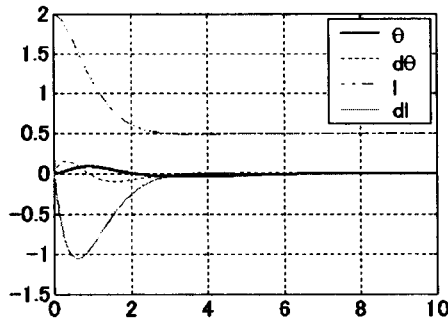


Fig. 7 Time evolution of states(θ , $d\theta$, l , dl)

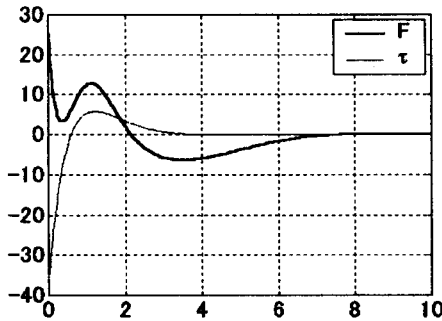


Fig. 8 Time evolution of control input

작을 없애고자 하는 제어목적이 달성되고 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 로프의 길이가 가변인 크레인 시스템에 대해 선형화 기법을 이용하여 로프의 길이와 진동 그리고 크레인의 위치를 동시에 제어하는 방법을 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어 기법의 유용성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] A. Isidori, Nonlinear control systems (3rd

Edition), Springer.

- [2] 美多, 金井, “트롤리-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中, 15-6, pp. 833-838, 1980.
- [3] 美多, “非線形制御入門-劣驅動ロボットの技能制御論”, 昭光堂, 2000.
- [4] B. Vikramaditya, R. Rajamani, “Nonlinear control of a trolley crane system”, Proc. of the ACC (American Control Conference), pp. 1032-1036, 2000.
- [5] G. Bartolini, et.al, “Load swing damping in overhead cranes by sliding mode technique”, 39th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1697-1702, 2000.
- [6] A. Sakawa, Y. Shindo, “Optimal control of container cranes”, Automatica, 18-3, pp. 257-266, 1982.
- [7] 최재준, 소명옥, “퍼지-LQ 제어기법을 이용한 강인한 제어시스템의 설계”, 한국박용기관학회지, Vol. 25, No. 3, pp. 623-630, 2001.
- [8] A. Giua, C. Seatzu, G. Usai, “Observer-controller design for cranes via Lyapunov equivalence”, Automatica, 35-4, pp. 669-678, 1999.

[부 록]

완전선형화에 대해서는 아래의 정리가 알려져 있다.

[정리.1]⁽¹⁾ 연속적이고 매끄러운 벡터장 $f(z)$, $g(z)$ 를 갖는 비선형시스템 $\dot{z} = f(z) + g(z)u$ 이 완전 선형화되기 위한 필요충분조건은 아래의 조건을 만족하는 영역 Ω 가 존재하는 것이다. 단, $z \in R^n$ 은 상태변수, $u \in R$ 은 제어입력을 나타

낸다.

1. 벡터장 $\{g, ad_f g, \dots, ad_f^{n-1} g\}$ 이 Ω 내에서 선형독립이다.
2. 집합 $\{g, ad_f g, \dots, ad_f^{n-2} g\}$ 는 Ω 내에서 Involutive 이다.

(13)의 시스템에 대한 완전선형화 가능여부를 체크하기 위해 $\{g, ad_f g, \dots, ad_f^3 g\}$ 를 계산하면

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{l_d} & 0 & -\frac{g}{l_d^2} \\ \frac{1}{l_d} & 0 & -\frac{g}{l_d^2} & 0 \end{pmatrix} \quad (A1)$$

가 된다. (A1)의 Ω 는 선형독립($\text{rank}(\Omega)=4$)인 것으로부터 정리.1의 첫 번째 조건을 만족하고 있는 것을 알 수가 있다. $\{g, ad_f g, ad_f^2 g\}$ 가 정수의 벡터인 것으로부터 정리.1의 두 번째 조건을 만족시킨다. (A1)로부터 (13)의 시스템이 완전선형화 가능한 시스템이라는 것을 알 수 있으므로, 여기에서는 입출력 선형화에서 상대차수가 4차인 출력함수 y_1 을 구한다. 이 관계를 만족하는 y_1 은

$$\begin{aligned} L_{ad_i g} y_1 &= 0, \quad i=0, 1, 2. \\ L_{ad_i^2 g} y_1 &\neq 0 \end{aligned} \quad (A2)$$

로부터 구할 수가 있다. (A2)의 관계식을 순차적으로 풀어나가면

$$L_g y_1 = 0 \text{으로부터}$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial z_2} + \frac{\partial y_1}{\partial z_4} \frac{1}{l_d} = 0 \quad (A3)$$

$$L_{ad_g} y_1 = 0 \text{으로부터}$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial z_1} + \frac{\partial y_1}{\partial z_3} \frac{1}{l_d} = 0 \quad (A4)$$

$$L_{ad_f^2 g} y_1 = 0 \text{로부터}$$

$$-\frac{\partial y_1}{\partial z_4} = 0 \quad (A5)$$

$$L_{ad_f^3 g} y_1 \neq 0 \text{로부터}$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial z_3} \neq 0 \quad (A6)$$

를 얻을 수가 있다.

