

컨테이너 크레인의 모델링 및 흔들림 억제 방법

임창진 김흥근 최종우
경북대학교

Modeling and Anti-sway Control of a Container Crane

Chang-Jin Lim, Heung-Geun Kim, Jong-Woo Choi
Kyungpook National University

Abstract In this paper, the container crane which transports containers between a container ship and trucks in the harbor is modeled. The equation of motion is simplified for control purpose. The pole placement technique is used to control the crane to minimize load swing angle. The objective of the control is to transfer the load as quickly as possible, while minimizing the amplitude of swing at the end of transfer. Computer simulations are provided.

트 부분으로 구성된다. 일반적으로 컨테이너 크레인은 갠트리에 의해 전진과 후진이 이루어지며 트롤리에 의해서는 수평방향으로 화물을 이동하고 호이스트에 의해서 수직방향으로 화물을 이동한다. 즉 호이스트가 화물을 들어올리면 트롤리에 의해서 화물을 선적할 위치로 이동하며 선적할 위치에 도달하면 호이스트에 의해 화물을 내려놓게 된다.

1. 서 론

3면이 바다이며 수출이 많은 우리나라는 컨테이너의 운송량이 증가되고 있는 추세이다. 컨테이너를 선박에서 부두로 또는 부두에서 선박으로 이동시키기 위하여 크레인 운전기사가 직접 운전하는 수동적인 방법은 화물처리 능력에 한계가 있다. 또한 이동시간에 따른 경제성 문제, 크레인 숙련자 부족현상, 크레인 운전기사의 고령화, 열악한 작업환경, 단순 작업의 반복 등을 고려하면 부두의 자동화가 필수적이다.

컨테이너의 운전이 있어서 최대 관건은 주어진 시간에 얼마나 많은 양의 컨테이너들을 옮겨 실는가이다. 컨테이너를 하역 혹은 선적하는 과정에서 와이어로프에 연결된 컨테이너의 흔들림 현상은 트롤리의 정확한 위치 선정과 더불어 작업의 지체를 초래한다. 수동적인 운전 방법은 운전 중에 화물의 흔들림을 수동으로 보정하여 많은 시간이 걸리는 반면에 자동제어방법은 화물이 이동 중에 제어를 하므로 좀더 빠른 시간에 많은 양의 컨테이너를 운송한다는 장점이 있다.

본 논문은 컨테이너 크레인이 화물을 운송할 때 발생하는 화물의 흔들림 현상을 제어하기 위한 연구로서 시스템의 모델링과 제어방법, 속도에 따른 흔들림의 상태 변수들을 이용한 극 배치 제어법에 관한 내용이다.

크레인의 화물 이동시 와이어로프의 길이가 일정하다고 보고 크레인의 흔들림 제어 방법 중 널리 알려진 극 배치 제어법을 사용하여 흔들림 억제 제어를 하였으며 목표지점에 도달하는 시간을 빨리하기 위해서 트롤리가 목표 위치의 95%에 도달하면 흔들림 억제 제어를 수행하였다.

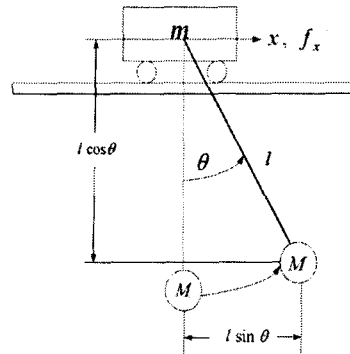


그림 1. 크레인의 트롤리와 화물의 모델링

컨테이너 크레인은 그림1과 같은 구조로 나타낼 수 있다. 트롤리의 질량을 m, 화물의 질량을 M, 호이스트와 화물사이의 와이어로프의 길이를 l, 화물의 흔들림에 의해 생기는 각을 θ 라고 하면 트롤리와 화물을 포함하는 전체시스템에 대해 뉴턴의 제2법칙을 적용하여 x 방향 병진운동(translational motion)방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + M \frac{d^2}{dt^2} x_G = m \frac{d^2}{dt^2} x + M \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) = u \quad (1)$$

이 식에서 (x_G, y_G) 는 로프에 달린 화물의 무게중심의 위치를 나타내며 이 무게중심은 그림 1에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_G = x + l \sin \theta, y_G = l \cos \theta \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

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

호이스트에 달린 질량 M은 호이스트에 고정된 로프 축을 중심으로 회전운동(rotation motion)을 하는데, 이 회전운동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

2. 본 론

2.1 크레인의 모델링

컨테이너 크레인은 갠트리 부분, 트롤리 부분, 호이스

$$M \frac{d^2 x_G}{dt^2} l \cos \theta - M \frac{d^2 y_G}{dt^2} l \sin \theta = -Mgl \sin \theta \quad (4)$$

식 (2)을 식 (4)에 대입하면 회전운동식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} \cos \theta + Ml\ddot{\theta} = -Mg \sin \theta \quad (5)$$

병진운동(translational motion)의 식과 회전운동(rotation motion)의 식은 비선형이다. 크레인의 흔들림 억제 제어는 로프의 흔들림이 없는 것을 목적으로 하므로 각 θ 와 각속도 $\dot{\theta}$ 는 작은 값으로 본다.

따라서 $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta$ 이므로 식 (3)과 식 (5)을 선형화하여 다음과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$(m+M)\ddot{x} + Ml\ddot{\theta} = u \quad (6)$$

$$M\ddot{x} + Ml\ddot{\theta} = -Mg\theta \quad (7)$$

여기서 상태변수를 $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$, 출력변수를 $\mathbf{y} = \theta$ 로 지정하면 선형화된 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Mg}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{(m+M)g}{mL} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ -\frac{1}{mL} \end{bmatrix} u, \quad (8)$$

$$\mathbf{y} = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \mathbf{x}$$

2.2 제어기 구성

크레인 시스템은 일반적인 시스템과는 달리 입력이 하나(u)이고 출력이 두개(x, θ)인 비구동 관절 기계시스템이다.

트롤리의 위치를 제어할 수 있는 구동기는 있지만 화물의 흔들림을 제어할 수 있는 구동기는 없다. 일반적으로 관측 가능하고 제어 가능한 시스템에서는 폐루프시스템의 극점을 복소평면의 원하는 위치에 배치할 수 있다.

극 배치 제어기법은 크레인 억제 제어 시스템을 구현하기 위해 모든 상태에 대한 정보가 필요하다. 모든 상태가 유효하지 않은 경우에는 폐루프시스템의 모든 극점을 원하는 위치에 배치할 수 없다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (9)$$

$$u(t) = 0$$

$$u(t) = -\mathbf{k}\mathbf{x}(t) \text{로 주어지면}$$

$$\text{식 (9)은 } d\mathbf{x}(t)/dt = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{k}\mathbf{B}\mathbf{x}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{k}\mathbf{B})\mathbf{x}(t)$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_0 e^{-(\mathbf{A} - \mathbf{k}\mathbf{B})t} \quad (10)$$

식 (10)에서와 같이 응답속도가 \mathbf{k} 값에 의해 변한다. 및 식 (9), (10)에 의한 방법에 의해 식 (8)에 $u = -[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4] \mathbf{x}$ 대입한다.

아래와 같은 특성 방정식 ($[s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{k}\mathbf{B}] = 0$)을 얻을 수 있다.

$$s^4 + \left(\frac{k_2}{m} - \frac{k_4}{mL}\right)s^3 + \left(\frac{(m+M)g - k_3}{mL} + \frac{k_1}{m}\right)s^2 + \frac{gk_2}{mL}s + \frac{gk_4}{mL} = 0 \quad (11)$$

특성방정식의 근을 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 이라고 하면 특정방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(s - \beta_1)(s - \beta_2)(s - \beta_3)(s - \beta_4) = 0 \quad (12)$$

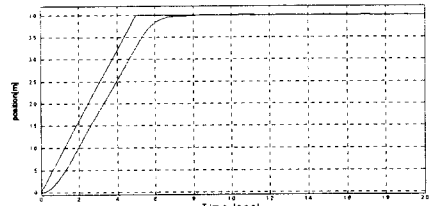
식 (12)의 근을 사중근으로 설정한다면 식(11)와 식 (12)의 계수를 비교함으로써 \mathbf{k} 값을 선정할 수 있다.

여기서 β 값을 선정하는데 있어서 β 값이 너무 작으면 추정치가 실제 값에 수렴하는데 오랜 시간이 걸리고, β 값이 너무 크면 측정상의 잡음 또는 고려하지 않은 구현상의 시지연(Time delay)에 의해 관측기가 불안정해질 우려가 있다.

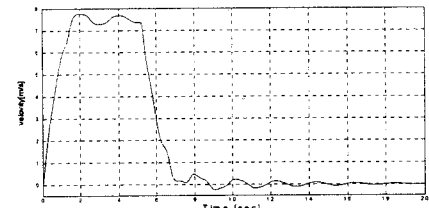
2.3 시뮬레이션 및 고찰

일반적인 흔들림 억제 제어기는 크레인의 트롤리가 이동과 동시에 제어가 시작된다. 이 제어의 문제점은 화물의 중량이 크고 트롤리의 속도가 빠를 때 흔들림 방지 제어가 이루어지는 시점부터 속도제어기에 영향을 주어 속도가 빠르게 가속을 가지지 못하는 것을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

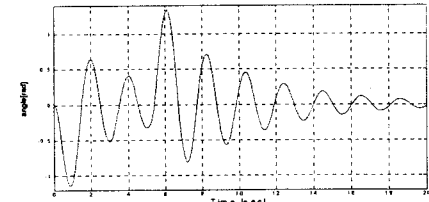
그림 2에서 속도 가속 구간이 안정하여 빨리 목표점에 도달하는 반면에 그림 3에서는 속도가 트롤리와 화물의 질량에 의해 목표점에 느리게 도착함을 볼 수 있다. 이를 방지하기 위해 화물이 이동하고자 하는 위치 95%에 도달하였을 때부터 흔들림 방지 제어를 시작한다. 결국 95%이전에는 흔들림 방지 제어를 하지 않고 95%이후에 제어를 시작하여 보다 빠른 시간 안에 목표점에 도달하고 흔들림 억제를 하는 것이다. 그림 4처럼 빠르게 목표점에 도달하는 것을 볼 수 있다.



(a) 트롤리 위치

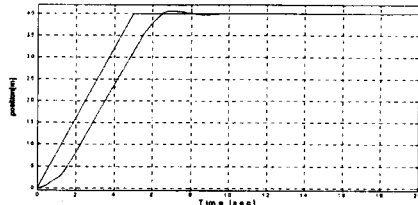


(b) 트롤리 속도

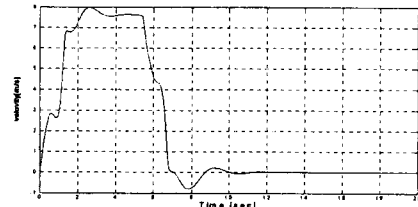


(c) 흔들림 각도

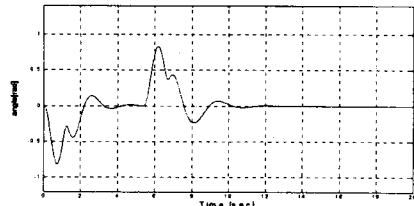
그림 2. 흔들림 억제 제어를 하지 않은 경우



(a) 트롤리 위치

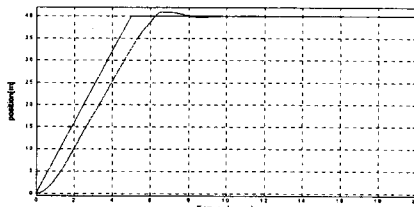


(b) 트롤리 속도

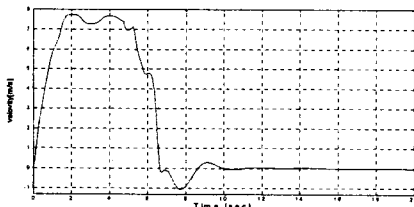


(c) 흔들림 각도

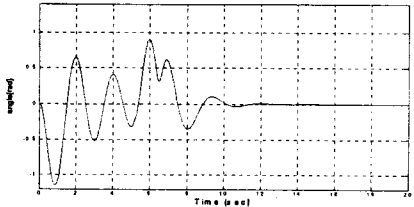
그림 3. 흔들림 억제 제어를 사용한 경우 (기존 방법)



(a) 트롤리 위치



(b) 트롤리 속도



(c) 흔들림 각도

그림 4. 흔들림 억제 제어를 사용한 경우 (제안된 방법)

3. 결 론

본 논문은 항만에서 컨테이너 크레인 이 컨테이너를 운반할 때 발생하는 화물의 흔들림을 제어하기 위한 연구이다. 흔들림을 제어하기 위한 모델링과 흔들림 제어 방법을 제시하였으며 기존의 방법에 비해 목표지점에 도달하는 시간이 향상되어짐을 볼 수 있다.

기존의 방법은 트롤리가 움직이기 시작한 시점부터 제어를 하지만 본 논문은 화물의 목표 지점 95%에서부터 제어를 시작한다.

실제로 항만에는 바람과 같은 외란이 발생하고 있다. 이는 본 논문에서 제시한 제어기의 이득 값을 적절히 조절함으로써 매우 효과적으로 제어할 수 있다.

본 논문에서 제시하고 시뮬레이션으로 얻은 결과는 실제의 항만의 컨테이너 크레인에 직접적인 자동화 구축 시스템에 사용할 수 있을 뿐만 아니라 크레인의 무인자동화운전에도 직접적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. C. Chung and J. Hauser, "Nonlinear control of a swinging pendulum. Automatica", vol.31, no. 6, pp.851-862, 1995.
- [2] K. S. Hong, J. H. Kim, and K. I. Lee, "Control of a container crane: fast traversing, and residual sway control from the perspective of controlling an underactuated system", Proc. of ACC 1998, pp.1294-1298, 1998.
- [3] Y. Hakamada and M. Nomura, "Anti-sway and position control of crane system", 4th International Workshop on Advanced Motion Control Proceedings, vol. 2, pp. 657-662, 1996
- [4] R.M. Harris, R.L. Wolfe, and W.T. Martin, "Hoisting apparatus with improved anti-sway system", United State Patent, 1979.
- [5] Y. Kim, H. Seo, and S.K. Sul, "A new anti-sway control scheme for trolley crane system", 36th IEEE Conf. on Industry Applications, pp. 548-552, 2001.
- [6] Y. Sakawa and Y. Shindo, "Optimal control of container cranes", Automatica, vol. 18, no. 3, pp. 257-266, 1982.
- [7] T. Watanabe, "Device for preventing the swaying of he suspending means in a crane", United State Patent, 1975.
- [8] K. Yoshida, "Nonlinear controller design for a crane system with state constraints", Proc. of 1998 ACC, pp.1277-1283, 1998.
- [9] Y.S. Kim, "Control system for suppressing sway of a suspended load without a vision system", seoul national university. 2002
- [10] 설승기, "전기기기제어론", 브레인 코리아, 2002