

컨테이너 크레인 시스템의 하물중량 추정에 관한 연구

김환성* · 박홍수** · 김상봉***

A Study on the Estimation of Cargo Weight for Container Crane System

H. S. Kim · H. S. Park · S. B. Kim

Key Words : 하물중량(Cargo Weight), 관측기(Observer), 외란 추정 관측기(Disturbance Estimation Observer), 외란 모델(Disturbance Model), 라그랑제 운동방정식 (Lagrange Dynamic Equation), 컨테이너 크레인(Container Crane)

Abstract

In container crane system, the variation of cargo weight have effect on the travelling and sway control of load. For precise travelling and/or anti-sway control of crane system, the cargo weight should be measured and considered with control algorithm. But, an added attachment for measuring the cargo weight put restraint upon the control freedom for travelling and anti-sway.

In this paper, we propose an estimation method for cargo weight in container crane system by using observation technique. First of all, we model the container crane system as a bilinear system and transform this model into linear system with external disturbance model. Second, we propose a generalized type - disturbance estimation observer and set a disturbance model, where, the cargo weight is related with the sway of load, and the sway is represented as a periodic external disturbance. Lastly, by using simulation we verify that the proposed algorithm of disturbance estimation observer is effective to estimate the cargo weight, and it will be used with anti-sway control algorithm.

* 정회원, 한국해양대학교 전임강사

** 부경대학교 대학원

*** 부경대학교 교수

1. 서 론

항만에서 컨테이너 크레인(Container Crane)은 컨테이너를 선박으로 선적 또는 하역할 때 사용되는 중요한 하역 기기로서 점차 크레인의 고성능, 고효율화의 실현을 위해 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1)~6)}. 이는 항만 하역의 전자동화를 목적으로 하는 컨테이너 크레인의 무인화 실현에 대한 연구로서, 대표적으로 크레인의 고속성을 위한 제어법^{2)~4)} 및 하물의 흔들림을 방지하는 엔티스웨이 제어법^{5)~6)} 등을 예로 들 수 있다. 그러나, 하물의 중량을 일정 혹은 중량 변화 폭만을 고려한 제어만이 행해지고 있으므로, 실제의 하물의 중량과의 많은 차이가 발생하며 이로 인해서 제어의 정밀도가 낮아지는 결과를 초래하게 된다.

본 연구에서는 항만 컨테이너 크레인을 대상으로 하여, 컨테이너 하물중량을 추정하는 방법에 대해서 논하고자 한다. 여기서, 컨테이너 중량을 스프레더 중량과 하물중량으로 구분하여 하물중량만을 추정하기로 한다. 먼저, 컨테이너 크레인 시스템을 라그랑주 방정식을 이용하여 선형화시킨 후, Bilinear 모델을 세운다. 또한, 이 모델은 입력항에 외란을 지닌 선형모델로 변형되며, 관측기 설계에 이용된다.

외란 추정 관측기는 일반적인 외란을 지닌 경우로 확장하여 설계하였으며, 본 크레인 시스템에서는 외란의 형태를 하물의 중량변화에 따른 흔들림의 주기성 변화로 간주하여, 이 주기성을 모델화하였다. 외란 모델과 시스템모델을 확대계로 변환시킨 후, 이를 이용하여 외란 추정 관측기를 설계하여 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 결과, 주기성을 고려한 관계로 몇 주기 후에 하물의 중량을 추정할 수 있어 다소 시간이 지연됨을 보여주고 있으나, 하물 중량 추정이 정확함을 보여주고 있어 응용성 면에서 유효성을 확인하였다. 금후, 본 추정 알고리즘과 결합된 제어알고리즘의 개발로 컨테이너 크레인의 무인화를 위한 고속성, 고효율성에 기대되는 바이다.

2. 컨테이너 크레인의 모델링

Fig. 1과 같은 컨테이너 크레인 시스템을 고려하자. 컨테이너 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해, 실제 시스템을 고려하여 다음과 같은 가정을 세우기로 한다.

- (1) 컨테이너 중량은 집중질량으로 스프레더 중량 m_s 와 하물의 중량 m_L 의 합으로 나타내며, 이송중의 하물의 중량은 일정하다.

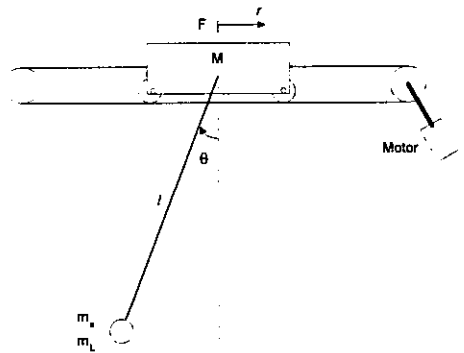


Fig. 1. Container Crane System

- (2) 로프길이 l 은 일정이며, 로프의 질량과 진동마찰은 무시한다.
- (3) 트로리의 질량 M 에는 구동 휠의 무게와 구동모터의 관성이 포함된다.
- (4) 트로리의 주행시 횡행마찰계수 D 에는 구동모터의 역기전력 정수도 포함한다.

위의 컨테이너 크레인 시스템의 운동에너지함수를 T , 손실에너지함수를 E , 위치에너지함수를 Ψ 로 각각 두고, 트로리의 위치 r , 속도 \dot{r} , 로프의 진동각 θ , 각속도 $\dot{\theta}$ 의 함수로 표현하면

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} M \dot{r}^2 + \frac{1}{2} (m_s + m_L) \left[\left\{ \frac{d}{dt} (r - l \sin \theta) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{d}{dt} l \cos \theta \right\}^2 \right] \\ &= \frac{1}{2} (M + m_s + m_L) \dot{r}^2 + \frac{1}{2} (m_s + m_L) l^2 \dot{\theta}^2 \end{aligned}$$

$$-(m_s + m_L)l\dot{r}\dot{\theta}\cos\theta \quad (1a)$$

$$\Xi = \frac{1}{2}D\dot{r}^2 \quad (1b)$$

$$\Psi = (m_s + m_L)g l(1 - \cos\theta) \quad (1c)$$

로 된다. 여기서, 외력은 구동모터에 의한 r 방향의 힘만이므로, 다음의 라그랑제 운동방정식⁷⁾에 의해

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} + \frac{\partial \Xi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Psi}{\partial q_i} = u_i \quad (2)$$

(1)식은 다음의 관계로 유도된다.

$$\begin{aligned} (M + m_s + m_L)\dot{r} + D\dot{r} + (m_s + m_L)l\dot{\theta}^2 \sin\theta \\ = (m_s + m_L)l\dot{\theta}\cos\theta + F \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} (m_s + m_L)l^2\ddot{\theta} + (m_s + m_L)g l \sin\theta \\ = (m_s + m_L)l\dot{r}\cos\theta \end{aligned} \quad (3b)$$

이들 식을 $\theta=0$ 주위에서 선형근사하면($\dot{\theta}^2=0$, $\cos\theta=1$, $\sin\theta=\theta$ 이므로)

$$\begin{aligned} M\dot{r} + D\dot{r} &= -(m_s + m_L)(\dot{r} - l\dot{\theta}) + F \\ &= -m_s g \theta + F - dg \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = \frac{\dot{r}}{l} \quad (4b)$$

단,

$$d(t) = m_L \theta(t) \quad (4c)$$

상태변수를 $x = [r \ \theta \ \dot{r} \ \dot{\theta}]^T$ 로 두고 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같은 Bilinear 시스템으로 표현으로 된다.

$$\dot{x} = Ax + A_0x + B_0u \quad (5a)$$

$$y = Cx \quad (5b)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{m_s g}{M} & -\frac{D}{M} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{m_s g}{lM} + \frac{g}{l}\right) & -\frac{D}{lM} & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{m_L g}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{m_L g}{lM} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \\ -\frac{1}{lM} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u = F$$

또한, 윗식을 달리 표현하면 입력항에 외란을 포함한 시스템으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서,

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{g}{M} \\ -\frac{g}{lM} \end{bmatrix}$$

3. 외란 추정 관측기에 의한 화물중량 추정법

본 장에서는 컨테이너 화물중량 추정을 위해 컨테이너 화물중량을 스프레더에 가해진 외란항으로 고려하여, 이 외란항을 추정하여 화물중량을 구하는 방법에 대해 논하기로 한다. 이에 대해, 입력항으로 인가되는 외란항을 적극적으로 추정하는 방법으로 외란 모델에 의한 방법을 고려하기로 하자. 먼저, 외란 모델이 미분방정식으로 주어진 경우로서, 다음과 같이 일반화 모델이 주어진다.

$$P_\delta(D)\delta = 0$$

$$= \frac{d^m \delta}{dt^m} + \alpha_{m-1} \frac{d^{m-1} \delta}{dt^{m-1}} + \dots + \alpha_1 \frac{d\delta}{dt} + \alpha_0 \quad (7)$$

여기서, D 는 미분연산자 $\frac{d}{dt}$ 를 의미하고,

$P_\delta(D)$ 는 미분다항식을 나타낸다.

윗식을 Laplace 변환시키면 다음과 같이 표현된다.

$$P_{\delta}(s) = s^m \delta(s) + a_{m-1} \delta(s) + \dots + a_1 \delta(s) + a_0 \quad (8)$$

다음과 같이 변수를 정의하자.

$$\begin{aligned} z_1 &= \delta \\ z_2 &= \frac{dz_1}{dt} = \frac{d\delta}{dt} \\ &\vdots \\ z_m &= \frac{dz_{m-1}}{dt} = \frac{d^{m-1}\delta}{dt^{m-1}} \\ z_{m+1} &= \frac{dz_m}{dt} = \frac{d^m\delta}{dt^m} \end{aligned}$$

위의 정의로부터 상태변수를 $z = [z_1 \dots z_m]^T$ 로 하여 상태공간표현을 하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{z}(t) = \Gamma z(t), \quad z \in R^m \quad (9a)$$

$$d(t) = H z(t) \quad (9b)$$

단,

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & \dots & \dots & -a_{m-1} \end{bmatrix},$$

$$H = [1 \ 0 \ \dots \ \dots \ \dots \ 0]$$

위의 외란 모델은 자유시스템으로서, 출력 $d(t)$ 에 나타나지 않는 동적 모드는 의미가 없으므로 항상 가관측성 (H, Γ) 이 성립한다.

본 크레인 시스템의 적용을 위해 다음과 같이 외란 모델을 표현할 수 있다.

크레인 시스템 (4b)식은

$$\ddot{\theta}(t) + \omega^2 \theta(t) = \frac{\dot{x}(t)}{l} \quad (10)$$

로 표현될 수 있으며, ω 는 진자의 고유진동수를 나타낸다. 단,

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

윗식은 진자의 길이 l 과 트로리의 가속도 $\dot{x}(t)$ 에 의해 지배를 받고 있으므로, 트로리의 가속도가 일정한 구간에서는 진자의 고유진동수도 일정이다. 이 경우, 위의 크레인 시스템의 흔들림각 θ 의 해는

$$\theta(t) = a \sin \omega(t) \quad (11)$$

로 표현되어 흔들림이 ω 에 의해 예상할 수 있다. 여기서, $a = \frac{\dot{x}}{\omega l}$ 로서, 흔들림각의 진폭을 나타내며, 일정가속도의 크기에 의해 영향을 받는다.

크레인 시스템의 하물중량의 변화는 외부 외란의 변화로 간주되어 (4c)식과 같이 진자의 흔들림각에 비례함을 알 수 있다. 따라서, 외란 모델을

$$\begin{aligned} d(t) &= m_L \theta(t) \\ &= m_L a \sin \omega(t) \end{aligned} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다.

위의 외란 모델은 (10)으로부터 유도되었으므로, 표현의 간단화를 위해 (10)식을 Laplace 변환시키면

$$\theta(s) = a \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (13)$$

로 되며, 상태공간표현에 의해 다음과 같이 외란 모델 행렬이 구해진다.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \ 0] \quad (14)$$

다음은 외란 모델 이용한 컨테이너 하물중량의 추정법에 대해 살펴보기로 하자. 컨테이너 크레인 시스템 (6)식과 외란 모델(9)식을 이용하여 확대계를 설계하면 다음과 같다.

$$\dot{\zeta} = \bar{A} \zeta + \bar{B} u \quad (15a)$$

$$y = \bar{C} \zeta \quad (15b)$$

여기서,

$$\zeta(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A & GH \\ 0 & \Gamma \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C} = [C \quad 0]$$

따라서, (15)식에 대해 일반관측기를 구성하는 것

에 의해 외란 추정치 $\hat{z}(t)$ 를 얻을 수 있다.

위의 확대계 (15)식에 대해 관측기가 구성되기 위한 필요충분조건은 다음 Lemma 1과 같이 나타내어진다.

Lemma 1⁸⁾ : 확대계 (15)식에 대한 외란 추정 관측기가 구성 되기 위한 필요 충분조건은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$(i) (C, A) \text{ 는 가관측} \quad (16a)$$

$$(ii) \text{rank} \begin{bmatrix} A - \lambda_i I & NH \\ 0 & \Gamma - \lambda_i I \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + m, \quad (16b)$$

where λ_i are eigenvalues of Γ

□

확대계 (15)식에 대해 외란 추정 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{z}} = (\tilde{A} - K\tilde{C})\hat{z} + Ky + \tilde{B}u \quad (17)$$

여기서

$$\hat{z}(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{z}(t) \end{bmatrix}$$

이며, 윗첨자 $\hat{\cdot}$ 는 추정치를 나타낸다.

따라서, 외란 추정 관측기 (17)식을 이용하면 하물중량 추정치는 다음과 같이 계산된다.

$$m_L = -\frac{\hat{d}(t)}{a \sin \omega(t)} \quad (25)$$

단,

$$\hat{d}(t) = H\hat{z}(t)$$

[Remark 1] 외란 추정관측기에 의해 외란의 변화를 실시간적으로 추정이 가능하므로, 컨테이너 하물중량이 일정하다고 하면, 컨테이너 이송 중에 가해지는 다른 외력(풍력 등)의 변화크기를 추정할 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과

본 연구의 유효성을 검증하기 위해 다음의 컨테이너 파라미터를 고려하여 시뮬레이션을 행하기로

한다. 컨테이너 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 2. Parameters of Crane System

Symbol	Name	Nominal Value	Units
M	Trolley Mass	100	kg
m_s	Spreader Mass	100	kg
m_L	Load Mass	300	kg
l	Rope Length	4	m
D	Friction Coeff.	60	
g	Gravity Acceleration	9.8	m/s ²

샘플링주기를 5ms로 이산화한 컨테이너 크레인 시스템과 외란 모델에 대한 각각의 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0001 & 0.0050 & 0.0000 \\ 0 & 0.9999 & 0.0000 & 0.0050 \\ 0 & -0.0489 & 0.9970 & -0.0001 \\ 0 & -0.0490 & -0.0015 & 0.9999 \end{bmatrix}$$

$$B = 10^4 \times \begin{bmatrix} 0.0012 \\ 0.0006 \\ 0.4992 \\ 0.2496 \end{bmatrix}, \quad G = 10^3 \times \begin{bmatrix} -0.0012 \\ -0.0006 \\ -0.4893 \\ -0.2446 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0050 \\ -0.0245 & 0.9999 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \quad 0]$$

크레인 시스템과 외란 모델 이용한 확대계의 외란 추정 관측기의 관측기 계인은 다음과 같이 구하였다.

$$K = \begin{bmatrix} 0.9292 & -0.0007 \\ -0.0006 & 0.9316 \\ 2.3936 & -0.1600 \\ -0.1166 & 2.8169 \\ -0.7351 & -0.3540 \\ 1.1710 & 0.5036 \end{bmatrix}$$

시뮬레이션시 입력은

$$u = 100$$

로 단위입력을 가하였다.

하물중량의 추정을 위해 외란 추정관측기에 의한 추정된 값을 이용하였으며, 이때 외란 추정치의 위상지연이 발생하므로, 이 지연된 위상에 의해 정확

한 하물추정이 어려우므로, 단위 주기당의 최대치에 의해 계산하는 방법을 취하였다.

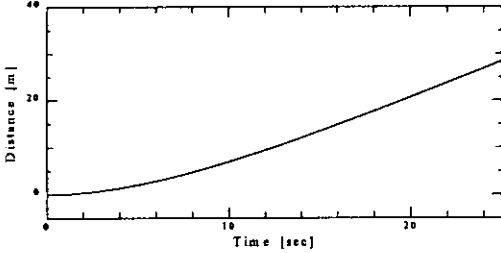


Fig. 2 Trolley distance of crane system

Fig. 2는 시뮬레이션시의 트로리의 이동거리를 나타내며, Fig. 3은 하물의 흔들림을 나타내고 있다. 이때, 하물의 중량은 300kg으로 하여 시뮬레이션을 행하였으며, 이 결과, 추정된 하물중량은 Fig. 4와 같이 300kg 부근에서 수렴하고 있는 것을 보여주고 있다.

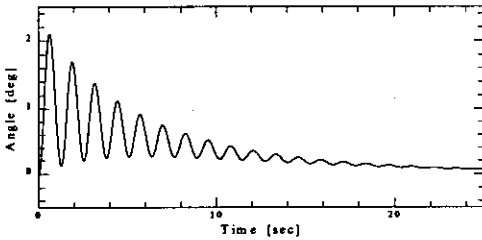


Fig. 3 Load angle of crane system

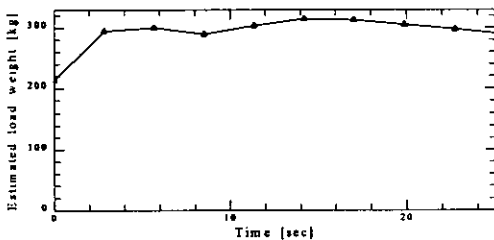


Fig. 4 Estimated load weight of crane system

실험결과, 이론적으로 가속도가 일정한 상태의 실현이 어려웠고, 또한 위상지연으로 인하여 정밀도가 다소 떨어졌으나, 이에 대한 보완문제는 차후 중요한 연구과제이다.

5. 결 론

본 연구에서는 외란 추정 관측기를 이용한 관측기 설계 기법으로 컨테이너의 하물 중량의 추정에 관해 논하였다. 하물중량 변동은 하물의 흔들림에 영향을 미치므로, 이러한 흔들림의 주기성에 기인하여 외란 모델 설계하였다. 외란 모델 시스템의 확대계 구성으로 외란 추정 관측기를 설계하였으며, 이로 인해 비교적 정확한 하물중량을 추정치를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 알고리즘을 이용한 제어알고리즘의 개발로 컨테이너 크레인의 무인화에 기대된다.

참고문헌

- 1) Y. Sakawa and Y. Shindo, "Optimal control of container cranes", *Automatica*, Vol. 18, No. 3, pp. 257~266, 1982
- 2) J. W. Auering and H. Thoger, "Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hosting of Load", *Automatica*, Vol. 23, No. 4, pp. 437~447, 1987
- 3) 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어 : 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, Vol. 3, No. 1, pp. 23~31, 1997
- 4) 坂和愛幸, "天井走行クレーンのモデリングと最適制御", 計測自動制御學會論文集, Vol. 34, No. 8, pp. 962~967, 1998
- 5) 김환성, 박홍수, 이동훈, 박준형, 김상봉, "Anti-sway용 압을 가진 젠트리 크레인의 흔들림저감 제어", 한국동력기계공학회 논문집, 제2권, 제1호, pp. 87~93, 1998
- 6) 박홍수, 김환성, 박준형, 이동훈, 김상봉, "하이브리드 방식을 이용한 크레인의 엔티스웨이 제어", 한국동력기계공학회 논문집, 제2권, 제1호, 제2권, 제1호, pp. 81~86, 1998
- 7) 川路茂保, 岩井善太, 井上 昭, "オブザ-バ", コロナ社, 1988
- 8) 김상봉, 하주식, 메카니칼 시스템제어, 도서출판 한미, 1992