

LQ 제어를 이용한 천정 크레인의 흔들림 억제 및 위치제어

최부식* · 박종원* · 손정기** · 권순재*
 부경대학교* · 한국항만연수원**

Anti-Sway and Position Control of Overhead Crane Using the LQ Controller

B. S. Choi* · J. W. Park* · J. K. Son** · S. J. Kwon*
 pukung national university · K.P.T.I*

Abstract - Overhead crane must do to control occurrence of Anti-Sway according to work situation that is used in case move industry spot's heavy freight, and do safe transfer of freight.

Transfer process that make use of crane suspends and consist of series action that put down freight to do relevant addition decreasing the speed before objective while move by schedule section equal speed because increasing the speed after lift thing.

This need skill degree by experience because there are operator's function and affinity. Also, must control this effectively because can affect big productivity elevation according to effect that get in transfer of safe freight.

Therefore, illuminate physical characteristic of crane and algorithm of motor drive department and there is purpose of this research to do so that correct control may be available through over head crane's shaking control and position control designing LQ controller.

1. 서 론

천정 크레인은 철강, 제지, 핵폐기물 처리 등 산업체의 생산현장 및 물류창고에서 대형 기구물과 제품의 이송 작업, 항만에서 적·양하 작업을 수행하는 장비로 산업체에서 없어서 안 되는 운반장비이다. 국내외에서 사용되는 천정 크레인의 운전은 자동화되어 있지 않으며 숙련된 운전자의 경험에 의한 조작이 되고 대형 이송장비들을 취급하는 산업현장에서의 물류 자동화에 의한 물류 비용 절감을 막는 걸림돌이 되고 있다.

산업현장에서 사용되는 크레인의 대부분은 와이어 로프를 사용하는 현수 방식으로서 운전제어방식은 전기접점에 의한 ON-OFF 조작에 의존하고 있다. 따라서 이송 작업시 화물의 흔들림 발생은 피할 수 없으며 크레인의 안전한 운전을 위하여 오랜 기간동안 숙련된 운전자가 필요하다. 산업현장의 가동상황에 따라 물류비의 절감과 인건비 상승에 따른 경쟁력 제고를 위해 비숙련자도 쉽게 운전을 할 수 있는 제어시스템이 절실히 요구된다. 따라서 크레인의 역학적 특성과 모터 구동부의 알고리즘을 포함하여 LQ 제어를 설계하여 천정 크레인의 흔들림 억제와 위치제어를 통하여 정확한 제어가 가능하도록 하고 실제 실험을 통하여 적용여부를 검토하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 천정 크레인의 운동방정식

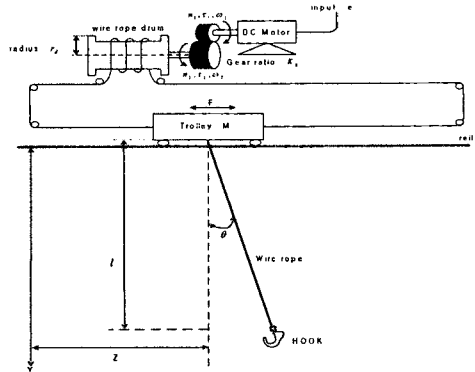


그림 1. 천정 크레인의 모델

천정 크레인의 최종운동방정식을 정리하면 다음과 같은 2계 미분방정식으로 표현된다.

$$\ddot{z} = -\frac{K_g^2 K_m^2}{MR_a r_d^2} \dot{z} - \frac{mg}{M} \theta + \frac{K_g K_m}{MR_a r_d} e \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_g^2 K_m^2}{MIR_a r_d^2} \dot{z} - \frac{(M+m)g}{Ml} \theta + \frac{K_g K_m}{MIR_a r_d} e \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서 \$x_1 = z\$, \$x_2 = \dot{z}\$, \$x_3 = \theta\$, \$x_4 = \dot{\theta}\$로 상태변수를 정의하면 다음과 같은 동적방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Be$$

$$y = Cx \quad (3)$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{MR_a r_d^2} & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{MIR_a r_d^2} & -\frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_g K_m}{MR_a r_d} \\ 0 \\ \frac{K_g K_m}{MIR_a r_d} \end{bmatrix}$$

$$C=[1\ 0\ 0\ 0]$$

위 식에서 $x=[x_1\ x_2\ x_3\ x_4]^T$ 는 상태벡터이고, y 는 출력이다.

3. LQ 제어기 설계

식 (3)의 동적방정식을 오차시스템으로 표시하기 위하여 상태 x_1, x_2, x_3, x_4 와 이들의 각 정상값 $x_{1r}, x_{2r}, x_{3r}, x_{4r}$ 와의 오차신호를 식 (4)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= x - x_r \\ \Delta u &= e - e_r \\ \Delta y &= y - y_r \end{aligned} \quad (4)$$

단, $x_r=[x_{1r}\ x_{2r}\ x_{3r}\ x_{4r}]^T$ 이고, y_r 는 기준입력이다.

그리고 정상상태에 대한 동적방정식으로 표현하고 x_r 과 e_r 을 구하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\dot{x}_r = Ax_r + Be_r \quad (5)$$

$$y_r = Cx_r$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ y_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 오차시스템에 대한 동적방정식을 구하면 다음과 같으며

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta e \\ \Delta y &= C\Delta x \end{aligned} \quad (7)$$

오차 동적방정식에서 식 (8)과 같은 2차형식의 평가함수를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 LQ 제어 법칙은 식 (9)으로 주어진다.

Q 와 R 는 설계자가 선정하는 하중행렬과 하중계수로서 $Q \geq 0, R > 0$ 인 관계를 가진다.

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta x^T Q \Delta x + \Delta e^T R \Delta e) dt \quad (8)$$

$$\Delta e = -R^{-1} B^T P \Delta x = -K \Delta x \quad (9)$$

$$\text{단, } K = [k_1\ k_2\ k_3\ k_4] = R^{-1} B^T P$$

여기서 K 는 피드백 이득행렬이며 P 는 다음 식의 리카치 방정식의 해 행렬이다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

식 (4)을 이용하여 식 (9)을 다시 표현하면 다음과 같게 된다.

$$e = e_r - k_1(x_1 - y_r) - k_2(x_2 - x_{2r}) - k_3(x_3 - x_{3r}) - k_4(x_4 - x_{4r}) \quad (11)$$

여기에서 정상상태의 값은 다음과 같다.

$$x_{1r} = y_r, \quad x_{2r} = x_{3r} = x_{4r} = 0, \quad e_r = 0$$

그림. 2는 천정 크레인의 제어 시스템을 나타내고 있으며 점선 부분이 LQ 제어기이다.

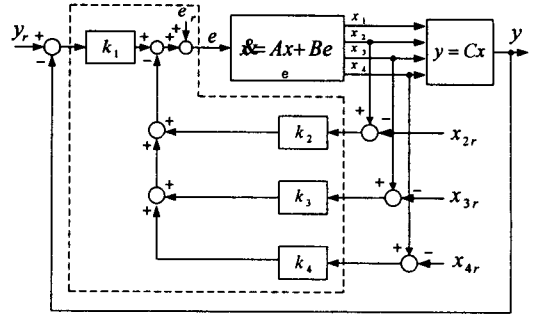


그림 2. 천정 크레인의 LQ 제어기 블록

4. 실험 및 결과

본 연구에서 사용된 실험 장치와 파라미터는 다음과 같다.

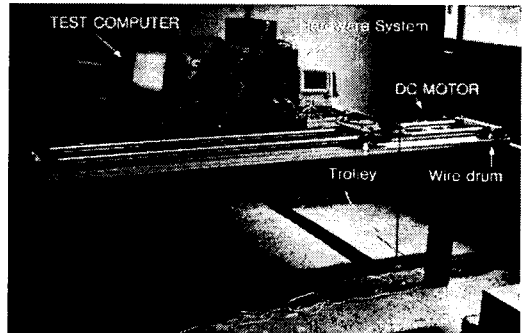


그림 3. 실험장치

표 1. 천정 크레인의 파라미터 값

파라미터	데이터	내용
M	1.2 [kg]	트롤리의 질량
m	1 [kg]	화물의 질량
l	1.2 [m]	와이어 로프의 길이
R_a	0.2 [Ω]	모터 아마추어 저항
K_m	0.0034 [V/rad/s]	모터 상수
K_g	1/2	기어비
r_d	0.02 [m]	와이어 드럼의 반지름

4.1 계단상의 기준입력 변화에 대한 검토

기준입력 변화에 대한 제어시스템의 추종 성능을 알아보기 위하여 트롤리의 위치에 대해 계단상의 기준입력을 변경시켜 보았다. 제어 시작과 동시에 초기위치 0[m]에서 전진방향으로 목표위치 1[m]의 기준입력을 가하고 4초 후 다시 같은 전진방향으로 1[m]의 기준입력을 가하여 총 목표위치가 2[m]가 되도록 하였다. 8초 후에는 후진방향으로 1[m]의 기준입력을 가하고 12초 후 다시 같은 후진방향으로 1[m]의 기준입력을 가하여 최종위치가 초기

위치인 0[m]가 되도록 정했다.

그림 4는 계단상의 기준입력에 대한 LQ 제어기에 의한 응답곡선으로 (a)는 트롤리의 위치 (b)는 이송화물의 흔들림 각도 (c)는 모터의 인가전압을 각각 나타내고 있다. 결과를 보면 약 2.5초에 목표위치에 도달하고 큰 오버슈트나 정상편차 없이 안정한 제어결과를 얻고 있으며 이동중의 최대 흔들림 각은 대략 0.22[rad]이고 제어시작 후 2.25초에서 흔들림 각도가 0[rad]으로 된다. 모터의 인가전압은 목표치 변경시 순간적으로 약 15[V]를 나타내는 것을 제외하고는 약 3[V]이하로 인가되고 있다.

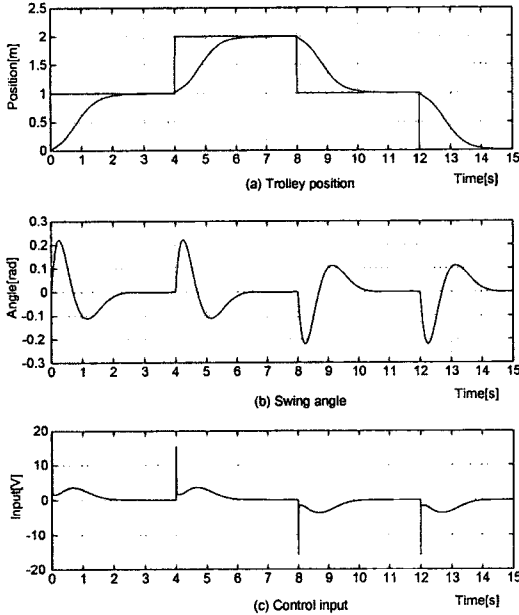


그림 4. 계단상의 기준입력변화

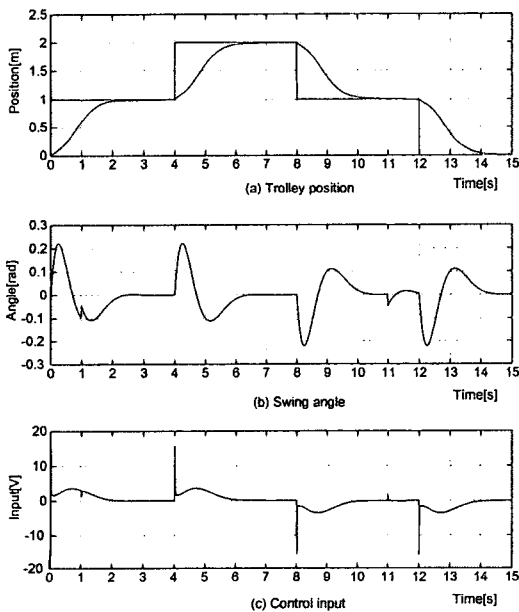


그림 5. 외란에 대한 변화

4.2 외란에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 운전중 외란이 가해지거나 부하가 변동될 수도 있다. 따라서 외란에 대해서도 본 제어기는 출력이 정상편차 없이 기준입력을 잘 추종할 수 있다는 것을 보이기 위해서 제어 시작 후 각각 1초와 11초 시점에서 돌풍과 같은 외란이 작용하여 컨테이너 화물이 아주 급격하게 흔들린다고 간주하여 $\pm 1[\text{rad}]$ 크기의 흔들림을 1초 동안 가하여 보았다. 1초에서의 외란은 대차가 전진방향으로 진행중일 때 진행방향과 같은 쪽으로 가해지는 경우이고 11초에서의 외란은 후진방향으로 진행중일 때에 진행방향과 같은 쪽으로 가해지는 경우이다. 그림 5를 보면 외란이 가해지더라도 오버슈트나 정상상태 오차가 없음을 알 수 있으며 약 11초에 인가된 외란에 대해서는 12초에 목표점에 도달하고 있다. 이동중의 최대 흔들림 각은 대략 0.22[rad]이며 제어 시작 후 2.8초에 흔들림 각도가 0[rad]으로 된다. 구동모터의 인가전압은 목표치 변경시 순간적으로 약 15[V]를 나타내는 것을 제외하고는 약 3[V]이하로 인가되고 있으며 외란이 가해지는 순간 그 외란에 대응하기 위해서 적절히 변경되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 물류 이송에 많이 사용되고 있는 천정 크레인을 비숙련자에게도 쉽게 사용을 할 수 있는 제어시스템과 화물을 목표위치까지 이송할 때 발생하는 흔들림 및 위치제어를 가능한 빠른 시간 내에 제거할 수 있는 LQ 제어를 제안하였고 여러 가지 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 계단상의 목표위치 변경에 대하여 추종능력이 양호하며 빠른 응답특성을 가진다.
- 돌풍과 같은 외란과 화물의 질량 변화로 야기되는 시스템의 파라미터 변화에 대해서도 어느 정도 적응성이 있고 강인하다.

이와 같은 결과를 종합해볼 때, 본 연구에서 제안한 천정 크레인의 LQ 제어를 좀 더 개선하여 실용화하면 산업현장에서 발생하는 안전사고와 효과적으로 화물을 이송할 수 있으므로 우리나라의 경제발전에도 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Kerkerinck and W. Trautnitz, "Siemens, Z.", Vol. 40, No. 7, pp. 522, 1966
- [2] C. F. Alsop, G. A. Forster and F. R. Holmes, "Ore Unloader Automation a Feasibility Study", IFAC 東京大會論文集, VII-22~VII-35, 1966
- [3] 배상욱 외 2인 "천정 크레인의 비숙련 운전자 보조 제어 알고리즘", 산업기술연구소논문집, pp593-600, 1999.
- [4] 윤지섭, 박병석, 이재설, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구", KACC, Vol. 1, pp.292-297, 1990
- [5] 홍금식, 이신섭, "크레인 진자계의 최적제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 832-837, 1995
- [6] 정승현, 박정일, "퍼지제어를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, Vol. 3, No. 3, pp.435-442, 1997
- [7] 손승철 외 2인, "컨테이너 크레인의 흔들림 제어", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, Vol. 3, No. 1, pp. 23-30, 1997