

PSD 기반 갠트리 크레인 시스템의 적응제어

정상철¹, 김동원², 조현철³, 이형기⁴

^{1 2 4} 부경대학교 제어계측공학과

³ 동아대학교 전기공학과 포닥연구원

¹jsc1924@hanafos.com, ²kam-da@hanmail.net, ³hyunccho@gmail.com, ⁴lhk@pknu.ac.kr

Adaptive Control of PSD Sensor based Gantry Crane Systems

Sang Chul Jeong¹, Dong Won Kim², Hyun Cheol Cho³, Hyung Ki Lee⁴

^{1 2 4} Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Pukyong National University

³ Post-doc researcher, Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - 본 논문은 갠트리 크레인의 시뮬레이터를 제작하여 적응형 흔들림 제어기를 설계한다. 흔들림 감지는 디지털 카메라 센서를 이용하였으며 모델기반 적응제어를 이용하여 제어규칙을 산출한다. 제어규칙은 리아푸노브 안정성이론을 적용하였으며 정의된 리아푸노브 함수의 미분식이 음수를 갖기 위한 크레인의 적응형 제어입력을 계산한다. 제안한 제어기의 성능을 검토하기 위하여 실시간 제어실험을 실시하였으며 이송체의 무게 변화에 대한 적응성을 검토한다. 또한 기존의 PI 제어기도 함께 실험하여 성능의 비교 검토한다.

1. 서 론

갠트리 크레인 은 항만 터미널과 같은 산업현장에서 무거운 물체를 이송하는데 사용되는 중요한 장비이다. 최근엔 여러 가지 목적을 갖는 다양하고 복잡한 구조의 크레인 시스템이 개발되고 있으며 이에 맞는 제어기법 또한 발표되고 있다[1-3]. 일반적으로 크레인 은 아주 복잡한 비선형 동특성 모델로 표현되며, 주로 선형화를 실시 한 후 선형시스템 이론을 접목한 제어기 설계가 이루어지고 있다. 하지만, 이런 기법들은 모델링 오차나 시스템 섭동으로 인하여 실시간 제어오차를 발생시키며 따라서 바람직하지 못한 제어성능을 초래한다.

본 논문은 모델기반 적응형 제어설계 기법을 이용하여 비선형 크레인 시스템 제어에 적용한다. 제어기의 강인 및 적응성을 갖기 위하여 제어규칙은 리아푸노브 안정성 이론[4]을 기반으로 제어규칙을 산출하였다. 실시간 실험을 위하여 제작된 크레인 시뮬레이터를 이용하였으며 PI 제어기와 함께 비교 분석함으로써 성능의 우수성을 입증한다.

2. PSD 기반 갠트리 크레인 시뮬레이터

본 논문에서 제작한 PSD(Position Sensitive Detector) 센서를 이용하여 크레인의 흔들림을 감지하는 크레인 시뮬레이터를 제작하였다 (그림 1 참조). 이송차량은 BLDC 모터에 의해 구동되며 위치와 속도의 정보를 얻기 위해 10 turn 위치센서를 이용하였다. 스프레드의 흔들림 각도를 감지하기 위해 PSD 카메라를 이송차량에 부착하였으며 입출력 보드 및 카메라 보드의 인터페이스 프로그램은 C 언어로 작성하였다. 시뮬레이터의 동작은 우선 PC에서 프로그램 언어로부터 이송차량의 위치와 속도를 지정한 후 BLDC 모터 드라이브에 인가하여 이송차량을 원하는 사양으로 이동시키고, 이동시 발생하는 흔들림의 각도를 PSD 카메라로 측정하여 PC로 전송한다. 전송된 정보는 제어기의 입력으로 적용되어 제어입력의 산출에 이용된다. 이 때 제어기의 출력은 모터에 가해지는 전압으로 12bit D/A 변환기를 통해 흔들림 제어시스템의 DC 모터 드라이브로 입력되어 흔들림을 제어하게 된다. 제어 작동기는 그림 2와 같이 두 대의 프로펠러를 이용하여 풍력에 의해 스프레드의 흔들림을 제어한다.

3. 크레인의 수학적 모델링

그림 1의 크레인 시스템에 대한 기구학적 모델은 그림 2와 같다. 여기서 세 가지의 외부 입력이 적용되며 f 는 이송체에 가해지는 힘이며, F 는 중력 그리고 u 는 스프레드의 흔들림에 대한 제어입력을 각각 나타낸다. 이 힘에 대한 시스템의 운동방정식은 다음

과 같다.

$$m_c \frac{d^2}{dt^2} x(t) = f(t) + F \sin \theta(t) + u \quad (1)$$

$$m_L \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta(t)) = -F \sin \theta(t) - u$$

$$m_L \frac{d^2}{dt^2} l \cos \theta(t) = m_L g - F \cos \theta(t)$$

여기서 중력 F 에 대해 정리하고 이중 미분식을 풀면, 즉

$$\frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) = \ddot{x} + l \ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} l \cos \theta = -l \ddot{\theta} \sin \theta - \dot{\theta}^2 \cos \theta$$

이며 최종적으로 운동방정식은 다음과 같다.

$$(m_L + m_c) \ddot{x} + m_L l (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = f \quad (3)$$

$$m_L \ddot{x} \cos \theta + m_L l \ddot{\theta} + m_L g \sin \theta = -u$$

여기서 $u = u \cos \theta$ 이다. 그림 1의 시스템에서 f 는 일정한 힘을 가하며 정해진 값이며 u 는 제어입력으로서 제어규칙에 의해 설계되어진다.

4. 적응제어기 설계

본 논문은 모델 기반 적응제어기법을 이용하여 제어기를 설계하고자 한다. 우선, (3)을 변수분리법을 이용하여 상태방정식으로 도출하기 위하여, 다음과 같이 상태(State)를 정의한다.

$$\zeta = [x_1 \ x_2 \ \theta_1 \ \theta_2]^T \quad (4)$$

$$= [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$$

시스템의 운동방정식은 다음과 같은 미분방정식으로 나타낸다.

$$\dot{\zeta} = [x_1 \ x_2 \ \theta_1 \ \theta_2]^T \quad (5)$$

여기서

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{m_L \sin \theta_1 (g \cos \theta_1 + l \theta_2^2) + f_1 + u \cos \theta_1}{m_c + m_L (1 + \cos^2 \theta_1)}$$

$$\dot{\theta}_1 = \theta_2$$

$$\dot{\theta}_2 = - \frac{(m_L g \sin \theta_1 - u)(m_L + m_c) + m_L \cos \theta_1 (f_1 + m_L l \theta_2^2 \sin \theta_1)}{m_L l (m_c + (m_L (1 - \cos^2 \theta_1)))}$$

모델기반 적응제어규칙을 산출하기 위하여 다음과 같은 선형모델을 정의한다.

$$\dot{\zeta}_d = A \zeta_d + B v \quad (6)$$

또한 실제 비선형 시스템 모델 $\dot{\zeta} = f(\zeta, u, t)$ 에 대한 모델오차는

$$e = \zeta_d - \zeta \quad (7)$$

이며 미분식은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \dot{\zeta}_d - \dot{\zeta} \\ &= Ax_d + Bv - f(\zeta, u, t) \\ &= Ae + A\zeta - f(\zeta, u, t) + Bv\end{aligned}\quad (8)$$

(7)과 (8)로부터 제어목적은 상태 ζ 와 $\dot{\zeta}$ 가 ζ_d 와 $\dot{\zeta}_d$ 으로 각각 수렴하여야 하며 또는 $e = \dot{e} = 0$ 이 되기 위한 제어입력 u 의 제어규칙을 산출하여야 한다. 우선, 리아푸노브 함수를 (7)의 모델로 차를 이용하여 나타내면

$$V(e) = e^T P e \quad (9)$$

이며, 미분식은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(e) &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} \\ &= [e^T A^T + \zeta^T A^T - f^T(\zeta, u, t) + v^T B^T] P e \\ &\quad + e^T P [Ae + A\zeta - f(\zeta, u, t) + Bv] \\ &= e^T (A^T P + P A) e + 2e^T P [A\zeta - f(\zeta, u, t) + Bv]\end{aligned}\quad (10)$$

리아푸노브 이론에 의하여 $\dot{V} < 0$ 이어야 하며, 따라서 다음의 조건들을 갖는다.

- 1) $A^T P + P A = -I$ 를 만족하는 행렬 P 를 선택하여야 하며
- 2) 다음으로, $\dot{V} < 0$ 하기 위한 제어입력 u 의 규칙을 산출하여야 한다.

우선, (6)의 모델에 관한 행렬과 (9)의 리아푸노브 행렬을 다음과 같이 정의하며

$$\begin{aligned}A &= \text{diag}\{a_1, a_2, a_3, a_4\} \\ B &= [0 \ b_1 \ 0 \ b_2]^T \\ P &= \text{diag}\{p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4\}\end{aligned}$$

여기서 $a_1, a_2, a_3, a_4 < 0$, $|P| > 0$ (Positive definite) 이다. 위의 행렬을 (10)에 대입하여 전개한 후 리아푸노브 안정성 조건을 만족하는 제어규칙을 전개하면 다음과 같다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^9 n_i}{d_1 + d_2} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned}n_1 &= c_1 c_2 e_1 p_1 a_1 x_1, \quad n_2 = c_1 c_2 e_2 p_2 a_2 x_2 \\ n_3 &= c_1 c_2 e_3 p_3 a_3 \theta_1, \quad n_4 = -c_1 c_2 e_1 p_1 x_2 \\ n_5 &= -c_1 e_2 p_2 (f_1 + m_L \sin \theta_1 (g \cos \theta_1 + l \theta_2^2)) \\ n_6 &= c_1 c_2 e_3 p_3 \theta_3, \\ n_7 &= c_2 e_4 p_4 [m_L g \sin \theta_1 (m_L + m_c) \\ &\quad + m_L \cos \theta_1 (f_1 + m_L l \theta_2^2 \sin \theta_1)] \\ n_8 &= c_1 c_2 e_2 p_2 b_1 v, \quad n_9 = c_1 c_2 e_4 p_4 b_2 v \\ d_1 &= e_4 p_4 (m_L + m_c), \quad d_2 = e_2 p_2 \cos \theta_1\end{aligned}$$

5. 실시간 실험 및 고찰

실제 크레인을 대신하여 제작된 시뮬레이터의 시스템 파라미터는 표 1에 나타내었다. 또 스프레드를 제어하기 위한 시스템 파라미터는 여러 번의 실시간 실험을 행하여 파라미터 추정법을 통하여 결정하였으며 제어식 (11)의 산출에 이용, 실시간 제어시스템에 적용하였다. 또한 기존에 널리 사용되는 PI 제어도 함께 실험하여 성능을 비교하였다. 그림 3은 제안한 제어기와 PI 제어기의 시스템 응답에 대한 파형을 보여준다. 시간 1초와 5초에 외란으로 풍력을 가하였으며, PI 제어의 경우 주어진 제어시간동안 응답특성이 계속 진동함을 알 수 있다. 반면, 제안한 적응제어의 경우 약 1초 후에 정상상태 응답으로 도달함을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 제어기법이 보다 우수한 성능을 발휘함을 실험을 통하여 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 비선형 갠트리 크레인 시스템에 대한 제어기법을 제안하였으며, 리아푸노브 안정성이론을 적용하여 강인 및 적응 제어규칙을 산출하였다. 제작한 PSD 기반 크레인 시뮬레이터에 제안한 제어기법을 적용하여 실시간 제어실험을 실시하였으며 기존의 PI 제어와 비교 분석하여 성능의 우수성을 입증하였다. 향후 연구는 2축 PSD 센서를 기반으로 하여 3차원 크레인 시뮬레이터를 제작하여 보다 복잡한 제어기법을 개발할 예정이다.

표 1. 시스템 파라미터 값

파라미터	값
PSD 카메라 감도	26 [μm]
렌즈 초점 길이	85 [mm]
화소 수	2048 [pixels]
이송차량의 무게	2.7 [kg]
서프레드의 무게	1.5 [kg]
로프의 길이	0.9 [m]

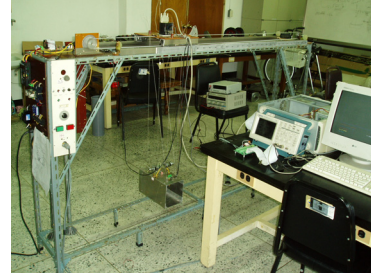


그림 1. 크레인 시뮬레이터.

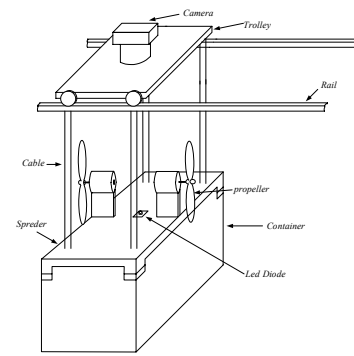


그림 2. 흔들림 제어시스템.

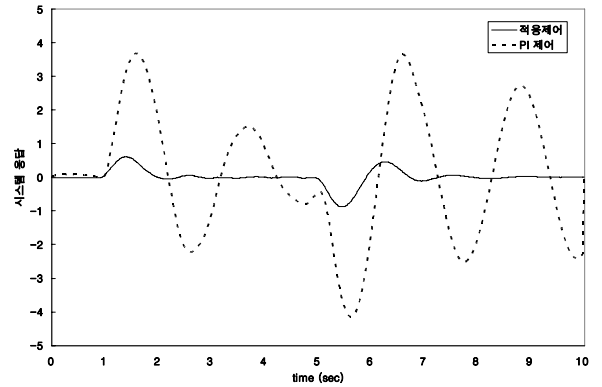


그림 3. 크레인 시스템 응답.

[참고 문헌]

- [1] I. Fantoni, R. Lozano, and M. W. Spong, "Energy based control of the pendubot," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 45, pp. 725-729, 2000.
- [2] Y. Fang, E. Zergeroglu, W. E. Dixon, and D. M. Dawson, "Nonlinear coupling control laws for an overhead crane system," *Proc. of IEEE Conf. on Control Applications*, pp. 639-644, 2001.
- [3] Hyun C. Cho, M. Sami Fadali, Young J. Lee, and Kwon S. Lee, "Neural robust control for perturbed crane systems," *J. of Mechanical Science & Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 591-601, 2006.
- [4] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.