

하이브리드 방식을 이용한 크레인의 안티스웨이 제어

Anti-sway Control of Crane System using Hybrid Control Method

박홍수(부경대·원), 박준형(부경대·학부), 이종식, 이동훈(삼성중공업), 김상봉(부경대)
H.S. Park(Graduate School, Pukyung Univ.), J.H. Park(Pukyung Univ.),
J.S. Lee, D.H. Lee(Samsung Heavy Industry), and S.B. Kim(Pukyung Univ.)

ABSTRACT

In the crane control system, it is required that the travelling time of the crane must be reduced as much as possible and the swing must be stopped at the end point. In paper, we present a hybrid control method which include the optimal regulator and velocity pattern controller in order to make high performance of the anti-sway. To implement the control algorithm, the dynamic equation is linearized at an equilibrium point, so that the linear time invariant state equation can be obtained. In order to experiment the crane control, we consider 1 over 10 of the gantry crane which is used in a port. As a result, the hybrid control method improve efficient anti-sway control more than conventional velocity pattern control. It is expected that the proposed system will make an important contribution to the industrial fields.

Keywords : hybrid control(하이브리드 제어), velocity pattern(속도 패턴), optimal regulator(최적 레귤레이터), anti-sway control(안티스웨이 제어)

1. 서론

흔들림 방지 시스템은 많은 종류의 크레인에 공통적으로 적용시킬 수 있는 제어 시스템으로 그 유효성은 이미 여러 연구에서 검증되었다^{[1]-[9]}. 그 중에서 크레인의 고효율·고성능화에 적합한 속도 패턴 제어법을 이용한 흔들림 방지 제어는 국내에서도 연구가 활발하게 수행되어 왔다^[9].

그러나 속도패턴에 의한 제어의 경우 크레인의 출발점부터 도착점까지의 입력을 미리 정해두고 피드포워드(Feed-forward) 제어를 행하게 된다. 이러한 피드포워드 제어방식에서는 파라미터 변동이나 미지외란 등이 존재하는 경우는 문제가 발생한다.

따라서, 본 논문에서는 속도패턴 제어법을 이용한 흔들림 방지 제어법을 크레인에 적용시켜 거드(Girder)와 크레인의 주행시 발생하는 흔들림을 최소화하고 이송시간을 최단화함으로 크레인의 고능률화를 실현함과 동시에 크레인이 목표점 부근에 도달하면 최적 레귤레이터를 적용하여 콘테이너의 흔들림을 최소화할 수 있는 하이브리드 제어방식을 적용하여 실험을 행하도록 한다.

2. CRANE 실험장치의 해석

Photo. 1은 실제 실험에 사용된 크레인의 실물사진을 보여준다. 본 장치는 항만 컨슈리 크레인을 10분의 1로 축소하여 제작하였고, 레일의 길이는 20m로 제작되었다. 동력원은 주행부에 AC 모터(1.5kw 2개), 트롤리부는 AC 모터(0.75kw 2개)를 사용하였으며, 호이스트 구동은 AC 유도모터(2.2kw 1개)를 사용하였다. 그리고 주행, 크레인, 호이스트의 위치 센서는 각각에 300 pulse 엔코더를 사용하였고 컨테이너의 흔들림은 포텐쇼메터(10kΩ 0.25%)를 사용하여 측정하였다.

2.1 크레인의 모델링

Fig. 1은 크레인의 개략도를 보이고 있으며, 등가 질량을 M , 등가점성마찰계수를 D , 컨테이너의 질량이 m , 로우프의 길이 l , 크레인의 구동력을 F , 컨테이너의 출발점으로부터 착화점까지의 거리를 L , 출발점으로부터 이동한 크레인까지의 거리를 r , 로우프의 흔들림각을 θ 라고 하여, 다음과 같은 Lagrange 운동방정식을 이용하면 다음과 같은 크레인계의 운동방정식을 얻을 수 있다.

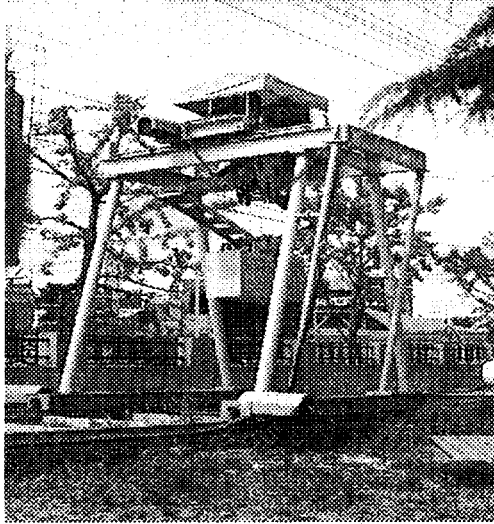


Photo. 1 Photograph of gantry crane system

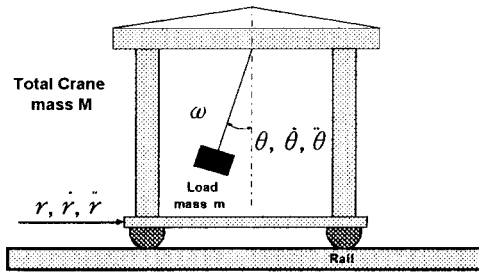


Fig. 1 Coordinate of crane system

$$(M+m)\ddot{r} - ml\ddot{\theta} \cos\theta + ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + D\dot{r} = F \quad (1)$$

로우프에 대한 마찰을 무시하여, 로우프계에 대한 운동방정식을 세우면

$$ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin\theta = ml\ddot{r} \cos\theta \quad (2)$$

로 되며, 여기서, $\theta \approx 0$ (컨테이너의 평형점)으로 하여 선형 근사화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{r} + D\dot{r} = -m(\ddot{r} - l\ddot{\theta}) + F \quad (3)$$

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

식(3)과 식(4)를 상태방정식으로 정리하면

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5a)$$

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

로 된다. 여기서,

$$x(t) = \begin{bmatrix} \dot{r}(t) \\ \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = u_a(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & g/l & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1/l \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. 제어계 설계

본 논문에서는 크레인이 목표점까지 이동할 때는 진자의 주기를 고려한 속도패턴으로 제어를 행하고 목표 위치 부근에서는 최적 레플레이터로 전환하여 컨테이너의 흔들림이 최소화 할 수 있는 하이브리드 제어 방식을 택하도록 한다.

3.1 속도선도

크레인 시스템에서, l 이 비교적 길고, 대차의 속도가 V_m 을 초과할 경우, \dot{r} 가 V_m 에 도달할 때 $\dot{r} = V_m$ 의 속도로 대차를 주행하면, 등속 구간에서 최단시간으로 목표 지점까지 이동할 수 있다. 등속 구간의 전후에 가속 구간과 감속 구간을 설치하여, 이 사이의 시간을 최단시간으로 제어한다. 이 경우 등속 구간의 직전에서 화물의 진동은 정지되며, 등속 구간 중에서는 화물의 진동은 거의 없다. 감속 구간에서는 가속 구간의 역 패턴으로 제어하면 된다. 또, 감속 구간에 들어가는 위치는 가속 구간과 감속 구간에서 이동 거리가 같으므로, 전체 이동거리로 부터 가속 구간에서 이동 거리를 뺀 위치를 취하면 된다.

제어 속도패턴을 사다리꼴로 가·감속할 경우 로우프 끝에 매달린 컨테이너의 흔들림을 해석해 보자. 등가·감속구간에서 제어입력 $u(t)$ 는 상수가 된다. 즉 $u(t) = C(\text{constant})$ 인 경우가 되며, 이때의 (4)식의 해는

$$\theta(t) = \frac{C}{g}(\cos \omega t - 1) \quad (6)$$

이 된다. 여기서 $\omega = \sqrt{g/l}$ 이다.

$\theta(t)$ 는 진폭이 C/g 이며, 주파수가 ω 인 단진동 운동이다. 따라서 $t = T_{up} = 2\pi/\omega$ 에서 완전히 1-cycle

이 끝나고 $\theta(t)$ 가 0이 됨을 알 수 있다. 만약 $t = T_{up}$ 에서 가하는 제어입력을 $u(t) = 0$ 으로 전환하면, 이때의 초기조건이

$$\theta(T_{up}) = \dot{\theta}(T_{up}) = 0 \quad (7)$$

이 되어 $\theta(t) = 0$, $t \geq T_{up}$ 으로 지속됨을 알 수 있다. 즉, 제어입력은 $u(t) = V_{max}/T_{up}$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 가속구간중 크레인의 이동거리

$$r_{travel} = \frac{1}{2} V_{max} T_{up} = \pi V_{max} \sqrt{l/g} \quad (8)$$

가 되고, 따라서 감속구간에서도 최종 위치로부터 r_{travel} 거리만큼 떨어진 지점에서 감속작용에 들어가게 되면 정확히 원하는 위치에서 흔들림이 없이 정지하게 된다.

3.2 최적 레귤레이터

크레인의 안티스웨이 제어를 위해 최적 레귤레이터법에 의해 제어계를 구성한다. 레귤레이터란 외란에 의해 평형점으로부터 벗어난 상태변수를 원래의 위치로 되돌리기 위한 피드백제어계를 말한다. 이러한 레귤레이터는 제어계 설계시 동일한 극을 갖는 많은 피드백 행렬 F 가 고려되어 질 수 있으므로, 어떠한 해가 가장 좋은 제어성능을 가지는 가는 분별하기가 어렵다. 이와 같은 문제의 해결방법으로 지정한 평가함수를 최소로 하는 F 를 결정하는 방법이 최적 레귤레이터 설계법이다. 제어대상을 다음과 같이 표현하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

여기서, 소비에너지를 적게 하면서 상태를 가능한 빠른 영상태로 하는 제어문제를 생각하자. 즉, 평가함수(performance index)

$$J_p = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (10)$$

를 최소로 하는 제어입력 $u(t)$ 를 구하는 문제로 귀착된다. 단, R 과 Q 는 하중행렬을 설계사양으로 선택할 수 있다. (10)식을 최소로 하는 최적제어입력 $u(t)$ 는, 상태피드백

$$u(t) = -Fx(t) \quad (11)$$

단,

$$F = R^{-1}B^T P$$

여기서, 행렬 $P \in R^{n \times n}$ 는 다음의 리카치방정식의 정정대칭해이며, (A, B) 가 가제어일 때, 이와 같은 P 는 유일하게 존재한다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (12)$$

(11)식을 (9)식에 대입했을 때의 폐루프계를 최적레귤레이터라 하며 다음식으로 정리된다.

$$\dot{x}(t) = (A - BR^{-1}B^T P)x(t) \quad (13)$$

4. 실험결과

속도페턴제어를 행하여 크레인이 목표위치의 부근에 도달하였을 때 최적 레귤레이터에 의한 제어기로 전환하여 안정화 제어를 행한다. 시스템의 파라미터는 다음과 같다.

Table. 1 시스템의 파라미터

symbol	명칭	value	unit
M	크레인의 질량	2000	[Kg]
m	컨테이너의 질량	3.5	[Kg]
l	컨테이너의 로프 길이	2.0	[m]
J	크레인의 관성모멘트	987.0634	[Kg m^2]
j	컨테이너의 관성모멘트	34.25	[Kg m^2]
D	크레인의 점성 마찰 계수	43.56	[Kg m^2 /sec]
d	컨테이너의 점성 마찰 계수	1.1761	[Kg m^2 /sec]

시뮬레이션에서 제어거리는 10[m], 크레인의 최대속도 V_m 은 1.25[m/s], 순간 가속도 α_m 은 0.7[m/s²]으로 선택하였을 경우, (5)식의 상태방정식 행렬 A , B 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -9.8/2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1/2 \end{bmatrix}$$

이 때 샘플링시간 50[msec]으로 이산화하면, 이산화 상태 방정식은 다음과 같이 된다.

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$$

여기서,

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9939 & 0.0499 \\ 0 & -0.2445 & 0.9939 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0.0500 \\ 0.0006 \\ 0.0249 \end{bmatrix}$$

하이브리드 제어시 크레인의 위치가 목표위치의 80%를 넘었을 때 최적 레귤레이터로 전환하도록 한다. 최적 레귤레이터의 하중행렬 Q, R 을

$$Q = \text{diag}([100, 100, 1, 1]), \quad R = 1$$

로 선택하여 피드백 행렬 F 를 최적 레귤레이터 설계법에 의해 다음과 같이 구한다.

$$F = [-0.0316 \quad 5.2612 \quad -0.1460 \quad 2.7730] \times 10^{-4}$$

실험결과는 Fig. 2, Fig. 3과 같이 나타내며, 점선은 외란이 없는 경우, 실선은 외란이 있는 경우에 대한 속도패턴 제어법과 하이브리드 제어법에 의한 결과를 보여주고 있다.

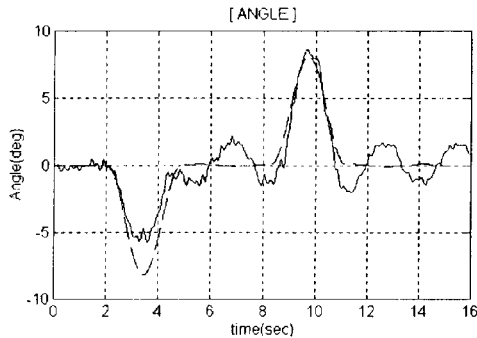


Fig. 2 Velocity pattern control with disturbance

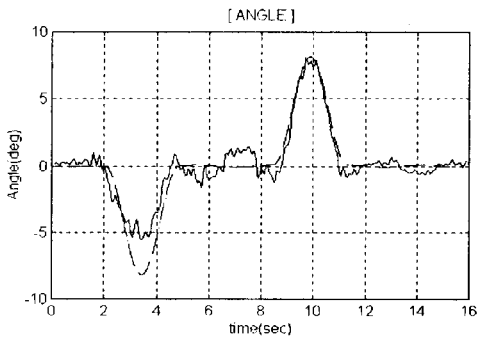


Fig. 3 Hybrid control with disturbance

속도패턴제어를 통해서도 빠르게 흔들림을 제어할 수 있지만 외란이나 실제 크레인 시스템에 적용했을 때 발생할되는 진동에 의해 계속적으로 미소 흔들림이 있는 반면, 하이브리드 제어 방식을 통해서는 이러한 미소 흔들림을 없앨 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 크레인의 가속도를 입력으로 하고 진자의 주기에 의한 속도 패턴제어를 행하여 목표위치의 80%에 도달한 지점에서 최적 레귤레이터로 진자의 안정화 제어를 행하는 하이브리드 제어법에 의한 크레인의 Anti-sway 제어를 행하였다. 따라서, 본 논문에서는 하이브리드 제어방식을 적용함으로써 빠른 제어와 동시에 목표지점에서 컨테이너의 미소 흔들림의 최소화를 실현할 수 있었다.

후기

본 연구는 1997년 삼성중공업과의 공동연구과제에 의해 수행된 연구 결과의 일부임을 밝혀두며, 본 연구를 지원하여 주신 삼성중공업 조선플랜트연구소에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 丸子, “パルスモータを用いたクレーンの振れ止め制御”, 長岡技術科學大學卒業論文, 1979
- [2] 北森, “クレーンの最適運轉法”, 第3回SICE學術講演會告集, pp. 347-348, 1964
- [3] 美多, 金井, “トロリーの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, Vol. 15, No. 6, pp. 833-838, 1979
- [4] 山岸俊雄, “トロリーの振れ止め制御”, 第16回自動制御聯合講演前刷, pp. 353-354, 1969
- [5] J.W. Auering and Thoger, “Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hosting of Load”, Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 437-447, 1987
- [6] 김상봉, 신민생, 김환성, 정용길, “이동 크레인의 제어에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, Vol. 9, No. 1, pp. 47-56, 1991
- [7] 이동철, 신민생, 김상봉, 하주식, “디지털 재설계법에 의한 크레인의 제어”, 대한기계학회논문집, Vol. 16, No. 1, pp. 41-52, 1992
- [8] 신민생, 이동철, 김상봉, “컨테이너 크레인의 자동화에 관한 기초연구”, 한국박용기관학회지, Vol. 18, No. 2, pp. 83-90, 1994
- [9] 홍금식, 손성철, 이만형, “컨테이너 크레인의 흔들림 제어 : 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어” 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 3, No. 1, pp. 23-31, 1997