

겐트리 로봇의 동적 모델링 및 진동해석

A Study on Dynamic Modeling and Vibration Analysis of Gantry Robot

조창제^{1*}, 박동준², 양준석³, 구영목³

Chang-Je Cho, Dong-Jun park, Jun-Seok Yang, Young-mok koo,

〈Abstract〉

In general, gantry robot is very useful handling of heavy objects. But rope-driven yard cranes must have a little of sway and skew motion because ropes are passive mechanical device. So many researches have been concentrated on anti-sway algorithm controlling trolley speed. These approaches require sway angle. But it is very difficult to know sway angle and its derivative. Therefore control algorithm of trolley speed is not practical in general. On the contrary, control strategy using auxiliary rope is very useful to sway control of yard crane because rope length is shorter than quay-side container cranes. In this paper, we derive equations of motion of trolley system which have anti-sway controller to use auxiliary rope. And we propose the control strategy and analyse the behavior of the proposed system.

Keywords : Gantry robot, Dynamic modeling, Vibration Analysis

^{1*}정회원, 교신저자, (주)디엠테크놀로지 대표이사,
E-mail : dmtech7@daum.net
²정회원, (주)디엠테크놀로지 상무이사
³정회원, 경남대학교 첨단공학과

^{1*}Corresponding Author, CEO, Dynamic Motion Technology Co., Ltd.
²Managing director, Dynamic Motion Technology Co., Ltd.
³Dept. of Advanced Engineering, Kyungnam University.

1. 서 론

갠트리 로봇은 크게 기계식과 전기식으로 나눌 수 있으며[1]~[2], 전기식은 다시 능동제어와 수동제어로 나눌 수 있다. 능동제어 장치에 적용된 제어 방법은 그 대부분이 대차에 대한 헤드블록의 상대위치를 감지 또는 예견하여 대차의 이송속도를 제어함으로써 해서 운반물의 흔들림을 억제한다. 그러나 헤드블록의 흔들림 작은 실제의 경우에 있어서 측정하기가 매우 어렵다. 수동제어장치[2]는 헤드블록 운동에 따라 각각의 보조로프에 작용하는 장력차에 의해 움직이는 유압실린더를 이용한 장치로 구성된다. 이러한 수동제어장치는 그 특성상 운반물의 흔들림 정보를 사용하지 않으므로 실용성이 매우 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 이러한 수동제어장치는 능동제어장치에 비해서 제어 성능이 매우 열악하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 보조로프를 이용하는 능동제어방식에 관해 논의 하고자 한다. 구조적으로는 유압실린더를 이용한 장치에 의해서 발생하는 보조로프의 장력차이를 이용하는 수동제어 장치에 기본을 두고 있으나 수동제어장치 보다는 제어 성능이 월등히 뛰어나며 대부분의 능동제어장치와는 달리 제안되는 알고리즘은 운반물의 흔들림에 관련된 정보가 필요 없어서 매우 실용적이라고 할 수 있다. 또한 제안된 방식의 적용의 한계와 문제점에 관해서도 논의 할 것이다.

2. 시스템 모델링

Fig. 1에는 보조로프 제어방식을 사용하는 갠트리의 트롤리와 스프레더에 대한 간단한 모델링을 보여준다. Fig. 1에서 각각의 기호의 의미는 아래와 같다.

$F_t(t)$: Trolley를 구동하는 외력

$F_w(t)$: 운반물에 가해지는 풍력

$F_A(t), F_B(t)$: 보조로프에 걸리는 장력

L_m : Hoisting Rope의 길이

L_A, L_B : 보조로프의 길이

L_t : 보조로프의 편심량

M_t : Trolley의 질량

M_s : Container, headblock 및 spreader의 질량

$y(t)$: Trolley의 위치

θ : Spreader의 흔들림 각

보조로프는 스프레더에 수평방향으로 힘을 가하기 위한 도구일 뿐 컨테이너의 상승 및 하강에는 기여하지 않는다. 즉, 보조로프에 연결된 모터의 토크를 제어함으로써 F_A, F_B 를 가하게 된다. 모델링을 단순하게 하기 위해서

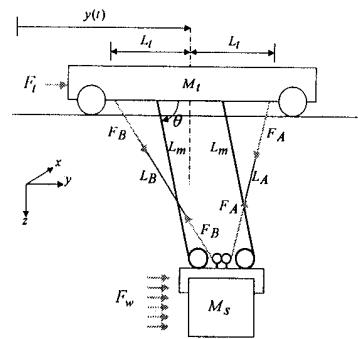


Fig. 1 Modeling of a Gantry

Fig. 1와 같이 로프 대신 장력 F_A, F_B 를 대차와 스프레더에 가해지는 외력으로 고려한다. 물론 F_A, F_B 의 작용점 및 작용 방향은 보조로프의 그것과 동일하다. 물론 F_A, F_B 는 항상 양의 값만 가질 수 있다. 사실 보조로프에 걸리는 장력이 지나치게 커질 경우 로프의 특성이 운동형태에 중요한 영향을 미치게 되지만 본 논문에서는 메인 로프를 강체로 고려한다. 로프의

특성을 고려한 연구는 차후에 진행될 예정이다. Lagrange 방정식에 의하여 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M_s + M_t)\ddot{y} - L_m M_s \cos\theta \dot{\theta}^2 - L_m M_s \sin\theta \ddot{\theta} = F_t + F_w \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L_m^2 M_s \ddot{\theta} - L_m M_s g \cos\theta - L_m M_s \sin\theta \ddot{y} \\ = \left(-\frac{F_a L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos\theta}} \right. \\ \left. + \frac{F_b L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos\theta}} - F_w \right) L_m \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)은 y방향의 운동방정식, 식(2)는 θ 방향의 운동방정식이다.

3. 제어기 설계

Fig. 2에는 본 논문에서 제안하는 제어방식의 기본적인 원리가 소개되고 있다. 운반물의 흔들림은 트롤리와 운반물의 상대적인 위치의 차이에 의해서 발생된다. 따라서 Fig. 2와 같이 운반물에 F_s 를 가해서 트롤리와 운반물이 동일한 가속도를 가지고 운동하도록 하면 흔들림은 방지될 수 있다.

이와 같은 방식으로 제어가 이루어진다면 $F_w = 0$ 일 경우 $\theta \cong 90, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0$ 의 결과를 얻을 수 있다. 이제 이것을 식 (1),(2)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻게된다.

$$F_t = (M_t + M_s)\dot{y} \quad (3)$$

$$\ddot{y} = (F_a - F_b) \left(\frac{L_t}{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}} \right) \quad (4)$$

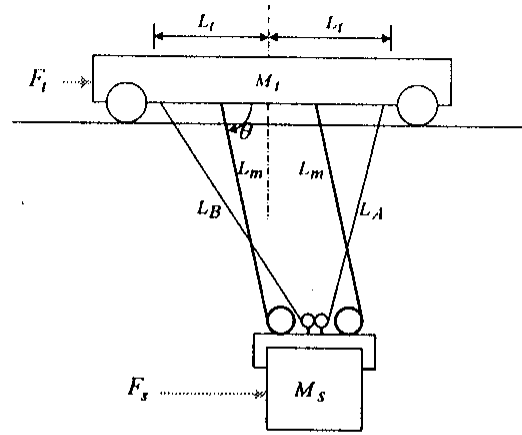


Fig. 2 Principle of the proposed algorithm

정리하면 F_a, F_b 와 F_t 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$F_a - F_b = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s)L_t} \right) F_t \quad (5)$$

즉 두 개의 보조로프 사이의 장력의 차이가 Eq. 5와 같이 되도록 해줌으로써 운반물의 흔들림 발생을 막을 수 있다. F_a, F_b 가 항상 양의 값을 고려하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

① $F_t > 0$ 일 경우

$$\begin{aligned} F_a &= \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s)L_t} \right) |F_t| \\ F_b &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

② $F_t < 0$ 일 경우

$$\begin{aligned} F_a &= 0 \\ F_b &= \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s)L_t} \right) |F_t| \end{aligned} \quad (7)$$

식 (6),(7)에서 얻어진 결과가 적용가능 하다 면 Trolley의 상태에 상관없이 $\theta \cong 90, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0$ 가 만족된다. 물론 실제 상황에서 식 (6),(7)을 정확히 만족 시킬 수는 없다. 따라서 약간의 오차가 발생하였거나 초기 흔들림이 있을 경우 $\theta \cong 90, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0$ 이 만족되지 않으므로 Eq. 6,7로 제어가 이루어 질 경우 제어 성능이 악화될 수 있다. 유압실린더를 이용하는 수동제어방식[2]의 경우를 고려하면 다음과 같은 제어기를 설계할 수 있다.

① $\dot{\theta} > 0$ 일 경우

$$\begin{aligned} F_a &= 0 \\ F_b &= \dot{\theta}K_\theta : (a) \text{ or } F_b = Const. : (b) \end{aligned} \quad (8)$$

② $\dot{\theta} < 0$ 일 경우

$$\begin{aligned} F_a &= \dot{\theta}K_\theta : (a) \text{ or } F_b = Const. : (b) \\ F_b &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8),(9)에서 (a)(b)를 고려한 것은 실질적인 어려움 때문이다. 즉 기하학적으로는 운반물의 흔들림과 보조로프의 길이 사이에는 명확한 함수관계가 있지만 실제의 경우에는 로프의 특성 때문에 운반물의 흔들림이 작을 때는 보조로프의 길이 변화량을 정확히 연어내기 매우 어렵다. 이 때문에 (a)를 사용하여 시뮬레이션 할 경우 $\dot{\theta}$ 에 $\pm 30\%$ 의 에러를 가정했다.

식 (6)~(11)에 의해서 $\theta \cong 90, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0$ 가 성립된다고 가정하면 트롤리의 운동방정식은 아래와 같다.

$$F_t = (M_s + M_t)(\ddot{y}_d + eK_d + eK_p) \quad (10)$$

여기서 $e = y_d - y, \dot{e} = \dot{y}_d - \dot{y}$ 이다. 식 (10)을

식(3)에 대입하면 다음의 오차 운동방정식이 얻어진다.

$$\dot{e} + \dot{e}K_d + eK_p = 0 \quad (11)$$

따라서 $K_d = 2\sqrt{K_p}$ 와 같이 두면 Critical Damping이 된다. 이제 제어 전략을 정리하면 Fig. 3과 같다. 제어기는 Trolley Controller (식 12)와 Spreader Controller (식 6~10)로 구성되고 Trolley Controller의 출력은 다시 Spreader Controller의 입력이 된다. Fig. 3에서 Z^{-1} 은 실제의 경우에 Trolley Controller의 출력 즉 F_t 를 검출해서 Filter를 통과시킨 결과가 Spreader Controller에 입력으로 되기 때문에 발생하는 시간지연을 의미한다.

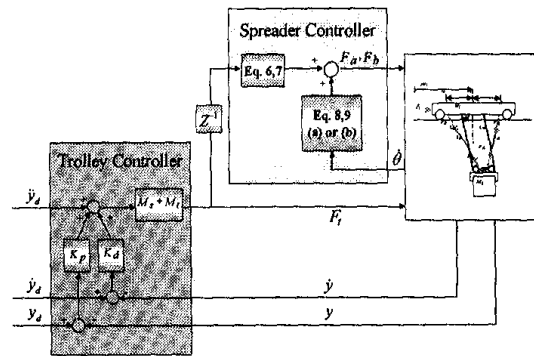


Fig. 3 Block diagram of proposed algorithm

4. 시뮬레이션

본 논문에서 사용된 갠트리의 사양은 Table 1과 같다. 트롤리는 운반물 흔들림의 한 주기 내에 가속되어 최고속도에 도달하고 다시 한 주기 내에 감속하여 정지 상태에 도달하도록 한다. $L_m = 9.8m$ 일 경우 운반물 흔들림의 한 주기는 $2\pi\sqrt{L_m/g} \cong 6.2sec$ 가 된다. 반드시 이러한 조건으로 가-감속되어야 하는 것은 아니지

만 대부분의 능동제어방식[4]이 이와 같은 기준으로 가-감속을 수행하기 때문에 제어성능을 서로 비교하기 쉽도록 이와 같은 속도궤적을 선택했다. 트롤리의 위치 및 속도 기준 선도는 Fig. 4, 5와 같다. 20초부터 40초까지의 시간은 트롤리의 정지후의 운동형태를 관찰하기 위한 시간이다.

Table 1 Simulation Spec.

Trolley 질량	$M_t = 40 \times 10^3 kg$
Spreader + Container + Head block 질량	$M_s = 30 \times 10^3 kg$
메인 로프 길이	$L_m = 9.8m$
보조 로프 폭	$L_t = 2.3m$
Trolley 이동 최고속도	150m/min

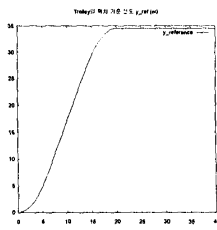


Fig.4. y_{ref}

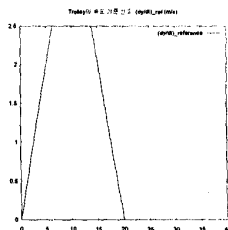


Fig.5. \dot{y}_{ref}

Fig. 6~13은 초기 흔들림이 0.17m인 경우의 시뮬레이션 결과이다. Trolley는 0.005sec (200Hz)의 주기로 제어되었고 Spreader는 0.01sec (100Hz)의 주기로 제어되었다.

Trolley Controller를 위한 계인은 $K_p = 50$, $K_d = 2\sqrt{K_p}$ 로 선택되었다. $\dot{\theta}$ 의 측정시에 $\pm 30\%$ 의 노이즈가 함께 측정되는 것으로 가정했다. 이것은 실제의 경우에는 Skew 현상 등이 발생해서 $\dot{\theta}$ 의 정확한 측정이 어렵기 때문이다. 이제 시뮬레이션 결과를 관찰해 보자. Fig. 7, 10, 11을 보면 트롤리는 Fig. 4, 5의 기준 선도를 거의 완벽하게 따라가서 위치, 속도에러가 거의 0에 가깝

다는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 12, 13을 보면 운반물의 흔들림도 매우 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 12,13은 9.8m 길이의 메인 로프 끝에 매달린 운반물의 y방향 흔들림이다. 특히 Fig. 12를 보면 초기 흔들림이 0.17m 있었음에도 불구하고 시간이 지남에 따라 흔들림이 지수함수 형태로 감소함을 알 수 있다. Fig. 8,9를 보면 보조로프의 장력 값은 가속과 감속 시에는 식 (6),(7)에 의해서 주로 결정되고 등속운동 및 정지 시에는 식 (8),(9)에 의해서 주로 결정된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8, 9에서 보조로프의 장력에 리플이 심한 것은 실제의 경우에 Fig. 6의 F_t 를 측정할 때 $\pm 10\%$ 정도의 오차가 발생할 수 있다고 가정했고 또한 시간 t에서 측정된 F_t 의 값이 시간 δt 의 시간 지연 후에 Spreader Controller로 입력된다고 가정했기 때문이다. δt 는 Filter를 통과시키는 등 측정된 F_t 를 처리하는데 걸리는 시간이다. 이때 시간 지연은 Spreader의 제어 주기(0.01sec)로 가정했다.

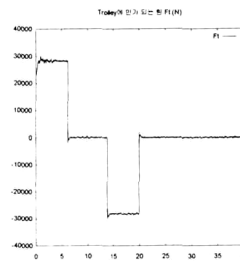


Fig.6. $F_t(t)$

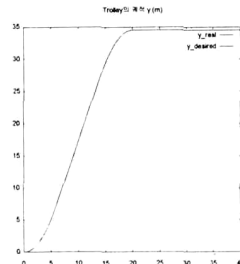


Fig.7. $y(t)$

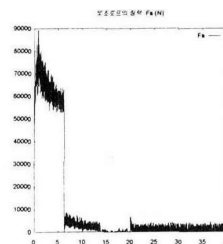


Fig.8. $F_a(t)$

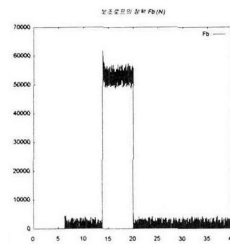


Fig.9. $F_b(t)$

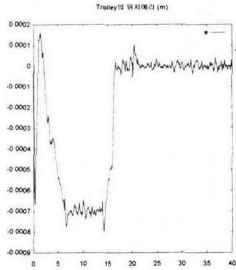


Fig.10. $y_{ref} - y_{real}$

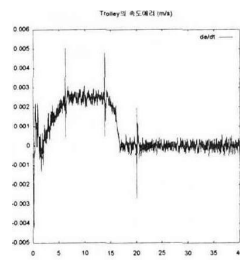


Fig.11. $\dot{y}_{ref} - \dot{y}_{real}$

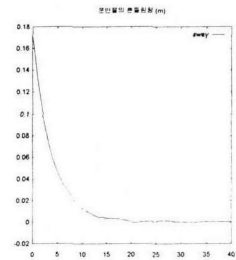


Fig.12. Sway

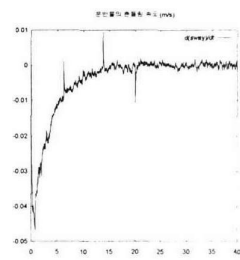


Fig.13. $d(\text{Sway})/dt$

5. 결론

본 논문에서는 운반물의 흔들림 정보를 사용하지 않는 갠트리 로봇의 흔들림 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해서 그 유효성을 보였다. 제안된 알고리즘은 운반물의 흔들림 정보를 이용하지 않기 때문에 기존의 제어 방식에 비해서 매우 유용하다고 할 수 있다. 왜냐하면 현실적으로 운반물의 흔들림 정보를 얻어내는 것은 매우 어렵기 때문이다.

차후에는 로프의 특성이 운동방정식에 반영되게 할 수 있도록 연구가 진행될 것이다. 또한 2차원적인 해석의 범위를 벗어나서 3차원적인 해석 및 제어기법 개발에 관한 연구가 진행될 예정이다.

참고 문헌

- 1) 박찬훈, 박경택, “무인 갠트리 크레인.” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 696~699, 1999
- 2) 조대승, “컨테이너 크레인의 헤드블록 횡동요 해석,” 한국소음진동학회지, 제 7권, 제 5호. pp. 765~772, 1997
- 3) 박찬훈, 박경택, 김두형, 신영재, “새로운 형태의 컨테이너 크레인의 개발에 관한 연구.” 한국항만학회 추계학술대회논문집, pp. 273~280, 1999
- 4) 이호훈, 조성근, “천장크레인 부하의 위치 및 흔들림 제어.” 대한기계학회논문집(A). 제 21권, 제 2호. pp. 297~304, 1997

(접수:2014.08.27. 수정:2014.09.02. 게재확정:2014.09.09.)