

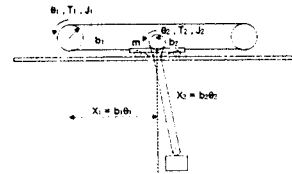
Stacking Crane의 자동 주행을 위한 제어기 설계에 관한 연구

최성욱*, 김정호*, 이진우*, 이영진**, 이권순***
 동아대학교 전기공학과*, 항공기능대학 전기계측저제어과**, 전기전자컴퓨터공학부***

A Study on Controller Design for an Automatic Driving of Stacking Crane

Choi S.U*, Kim J. H*, Lee J. W*, Lee Y. J**, Lee K. W***
 Dept. of Electrical Eng.*, Dept. of Electrical, Electronic & Computer Eng. Dong-A University***

Abstract - During the operation of crane system in container yard, it is necessary to control the crane trolley position and loop length so that the swing of the hanging container is minimized. Recently an automatic control system with high speed and rapid transportation is required. Therefore, we designed a controller to control the Stack crane system .



1. 서 론

그림 1 Stacking Crane 시스템

최근 들어 컨테이너 선박의 대형화에 따른 해상수송 물류량의 증가로 터미널의 운영효율의 향상과 해상수송 물류비용을 절감하기 위해 컨테이너 부두시설의 자동화의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, ECT컨테이너 터미널에서는 무인자동으로 운전되는 야드 크레인을 개발하여 설치 운영해오고 있으며, 최근에 싱가포르의 PSA의 신규 컨테이너 터미널에도 무인 자동으로 운전되는 OHBC(Overhead Bridge Crane)을 개발·적용하여 항만 운영 효율을 극대화시키고 있다.

크레인의 시스템의 동역학적 모델링을 위해서 사용한 변수들은 표 1과 같이 나타내었다.

이와 같이 야드 크레인이 무인 자동 주행하기 위한 기술로서는 첫째, 트롤리, 호이스터 및 크레인 자체의 위치 확인을 하여 각자의 좌표정보를 받아서 정밀 주행 및 Anti-Sway를 할 수 있는 자동 주행 제어시스템(Automatic Travel Control System: ATCS), 둘째, 컨테이너의 양·적하시에 컨테이너의 스택(Stack)상태를 스케닝하고 호이스터와 트롤리의 이동 보장 및 스택 위와 옆의 필요한 여유공간(충돌방지공간)을 결정하기 위하여 스택위로 트롤리가 이동할 때 계속적으로 변화하는 컨테이너의 스택상태의 정보를 수집하는 컨테이너 스케닝시스템(Container Profile Scanning System: CPSS), 셋째, 컨테이너를 야드 바닥이나 컨테이너 위에 정확하게 unloading하거나, 컨테이너를 loading 할 수 있는 자동 랜딩 제어시스템(Automatic Landing Control System: ALCS)이다. 따라서 야드 크레인의 자동화를 위해서는 위와 같은 3가지의 제어시스템 개발이 우선 되어야 한다.

표 1 Stacking Crane 시스템의 파라미터

Parameter	Descriptions
θ_1	Trolley의 회전각속도[rad/sec]
J_1	Trolley의 내부 관성 모멘트[$kg m^2$]
b_1	Trolley의 반경(m)
θ_2	Hoist의 회전각속도[rad/sec]
J_2	Hoist의 내부 관성 모멘트[$kg m^2$]
b_2	Hoist의 반경(m)
ϕ	진동각[rad]
m	트롤리 질량[kg]
M	컨테이너 및 스프레드의 질량[kg]
T_1	Trolley에 작용하는 토크[kg]
T_2	Hoist에 작용하는 토크[kg]
g	중력가속도[m/sec^2]

본 논문에서는 야드 크레인의 자동화에 요구되는 ATCS 및 CPSS의 기술을 이용하여 최적의 컨테이너의 이동경로를 추적하고, 컨테이너의 흔들림을 최소화하여 작업의 생산성을 향상시키고자 한다. 또한, 크레인 시스템에 대하여 다양한 설정위치와 컨테이너의 스택상태에 따른 로프의 길이 변화 등의 효과적인 제어가 될 수 있도록 위치오차, 높이오차 및 진동각의 세 가지 제어변수를 동시에 제어될 수 있는 최적의 제어기를 설계하고자 한다. 또한, 컨테이너의 스택상태에 따른 컨테이너의 최적의 이동경로를 추정하여 이송 물체의 진동을 최소화하면서 최소의 시간 내에 설정된 위치와 높이에 도달할 수 있도록 제어기를 구성하고자 한다 [1,2].

2.2 수학적 모델링

그림에서 보는 바와 같이 컨테이너 질량은 하나의 질점으로 고려될 수 있으며, 토크 전달 메커니즘에서 발생하는 마찰력은 무시될 수 있다. 따라서, Lagrange's 운동방정식으로 다음과 같이 유도할 수 있다.

2. Stacking Crane 시스템

2.1 Stacking Crane의 기구학적 모델링

컨테이너 크레인 시스템 제어기는 그림 1과 같이 x축 방향의 트롤리 횡행속도 조작과 y축 방향의 로프 조작으로 크게 나누어 생각할 수 있다.

$$[J_1 + (M + m) b_1^2] \ddot{\theta}_1 + Mb_1 b_2 \ddot{\theta}_2 \sin \phi + Mb_1 b_2 \theta_2 \ddot{\phi} \cos \phi + Mb_1 b_2 (2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} \cos \phi - \theta_2 \dot{\phi}^2 \sin \phi) = T_1 \quad (1)$$

$$Mb_1 b_2 \ddot{\theta}_1 \sin \phi + (J_2 + Mb_2^2) \ddot{\theta}_2 - M b_2^2 \theta_2 \dot{\phi}^2 - Mgb_2 \cos \phi = T_2 \quad (2)$$

$$b_1 \ddot{\theta}_1 \cos \phi + b_2 \theta_2 \ddot{\phi} + 2b_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} + g \sin \phi = 0 \quad (3)$$

여기서, load swing angle ϕ 는 작기 때문에 $\phi^{\alpha} \phi^{\beta}$ 는 무시될 수 있고, $\cos \phi = 1$, $\sin \phi = 1$ 로 근사화시킬 수 있다. 그리고, 상태 변수 x_1, x_2, x_3 과 입력 변수 v_1, v_2 는 다음과 같다.

$$x_1 = b_1 \theta_1, x_2 = b_2 \theta_2, x_3 = \phi \quad (4)$$

$$v_1 = \frac{b_1 T_1}{J_1 + mb_1^2}, \quad v_2 = -\frac{b_2(T_2 - Mgb_2)}{J_2 + mb_2^2} \quad (5)$$

따라서 위 식으로부터 시스템의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4 \\ \dot{x}_2 &= x_5 \\ \dot{x}_3 &= x_6 \\ \dot{x}_4 &= v_1 - \delta_1 x_3 v_2 + \delta_1 g x_3 \\ \dot{x}_5 &= -\delta_2 x_3 v_1 + v_2 \\ \dot{x}_6 &= -\frac{1}{x^2} [v_1 - \delta_1 x_3 v_2 + (1 + \delta_1)g x_3 + 2x_5 x_6] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 파라미터 δ_1, δ_2 는 다음과 같이 정의된다[1].

$$\delta_1 = \frac{Mb_1^2}{J_1 + mb_1^2}, \quad \delta_2 = \frac{Mb_2^2}{J_2 + mb_2^2} \quad (7)$$

3. Container의 경로 문제

야드 크레인이 컨테이너를 야드 내에 양·적하 할 경우, 그림과 같이 전체적으로 5가지의 동작으로 구분될 수 있다. 그림에서 AB 구간은 B지점까지의 호이스트의 수직 운동만 존재하며, 최대 수직 속도만 가진다. BC 구간은 트롤리의 속도가 0에서 최대로 증가하며, 반면에 호이스트의 속도는 최대에서 최소로 줄어든다. 또한, C지점에서는 swing angle는 기급적 0이 되어야 한다. 그리고 CD구간은 swing angle 적게 존재하면서 트롤리의 최대 수평적 이동만 존재하게 된다. 나머지 DE와 EF구간은 AB구간과 BC구간의 반대의 동작을 가지게 된다.

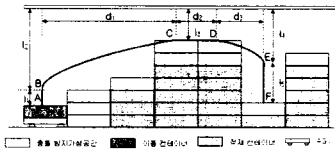


그림 2 컨테이너의 각 구간별 이동 경로

이와 같이 빠른 시간 내에, 다른 컨테이너와의 충돌이 없이 최적의 이동경로 문제를 제기하고자 한다. 이를 위해서 컨테이너의 야적 상태를 알 수 있는 시스템이 필요하며, 이를 위해서 레이저 거리 미터기를 이용하여 컨테이너의 각각의 상대 높이를 구하고, 컨테이너 이동시 야적 상태의 컨테이너와 충돌을 회피하기 위해서, 충돌 방지 구간을 두어 가상 컨테이너 이동경로를 만든다. 앞에서 컨테이너의 이동 상태를 5가지의 구간으로 나누었으며, 각 구간마다 trolley와 hoist의 속도 제한을 두어 가상 컨테이너 이동경로를 이동할 수 있도록 한다[3].

본 연구에서는 화물운송을 위한 최적 경로를 설정하기 위해 그림 2에서 보는 바와 같이 화물입출 장소(A)와 적재 장소(F)를 연결하는 충돌회피경로를 효율적으로 검색할 수 있는 경로 설정과 설정된 충돌 회피경로를 추종함과 동시에 최단 시간 내에 화물운송작업을 완료하기 위한 컨테이너의 경로계획을 수행하였다[4].

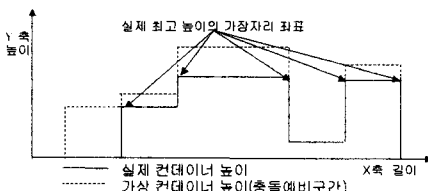


그림 3 컨테이너 가상 이동경로 높이 설정

그림 3은 레이저 거리미터기로 측정된 컨테이너의 스택을 나타내고 있다. 컨테이너의 이동경로는 실제 최고 높이의 가장자리의 좌표를 측정한 후 가상의 공간 즉, 충돌 방지 공간의 가장자리 좌표를 설정하여 이동경로로 선정하였다.

4. 제어기 설계

4.1 신경회로망 PID제어기

본 논문에서는 크레인 시스템을 제어하기 위해 기존의 PID 제어기로 하였으며, 제어기의 파라미터 동조는 신경회로망 자기동조기를 구성하여 동조하였다. 그림 4는 신경회로망 PID 제어기에 의하여 구동되는 크레인 제어시스템의 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

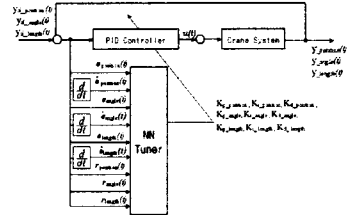


그림 4 크레인 제어 시스템의 블록 다이어그램

제한한 신경회로망 PID 제어기는 신경회로망 자기동조기와 PID 제어기로 나눌 수 있다. 그림 5는 신경회로망 자기동조기의 구조를 나타내고 있다. 여기서, 신경회로망 학습을 위하여 모델링 오차 역전파 학습 알고리즘을 이용하였으며, 입력층 벡터는 위치 오차(Position error)와 진동각 오차(Swing angle error), 위치 오차의 변화분과 진동각 오차의 변화분 및 위치 목표치와 진동각 목표치로 하였다. 그리고, 출력은 PID 파라미터인 $K_{p-p}, K_{i-p}, K_{d-p}, K_{p-a}, K_{i-a}, K_{d-a}, K_{p-l}, K_{i-l}, K_{d-l}$ 로 하였다[5].

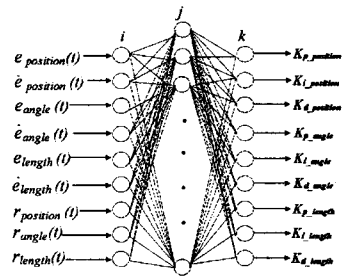


그림 5 신경회로망 동조기의 구조

PID 제어기의 제어입력은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) &= (K_{p-p}(e_p(t) - e_p(t-1)) + K_{i-p}e_p(t) \\ &\quad + K_{d-p}(e_p(t) - 2e_p(t-1) + e_p(t-2))) \\ &\quad + (K_{p-a}(e_a(t) - e_a(t-1)) + K_{i-a}e_a(t) \\ &\quad + K_{d-a}(e_a(t) - 2e_a(t-1) + e_a(t-2))) \\ &\quad + (K_{p-l}(e_l(t) - e_l(t-1)) + K_{i-l}e_l(t) \\ &\quad + K_{d-l}(e_l(t) - 2e_l(t-1) + e_l(t-2))) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 평가함수는 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} E_{\text{position}} &= \frac{1}{2} [y_{d-\text{position}}(t) - x(t)]^2 \\ E_{\text{angle}} &= \frac{1}{2} [\theta_{d-\text{angle}}(t) - \theta(t)]^2 \\ E_{\text{length}} &= \frac{1}{2} [y_{d-\text{length}}(t) - y(t)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

최경성사법에 의해 출력층과 은닉층의 가중치는 식 (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} + \epsilon \Delta W_{jk}(t-1) \quad (10)$$

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} + \epsilon \Delta W_{ij}(t-1) \quad (11)$$

여기서, η 는 학습률이고, ϵ 는 모멘텀 상수이다. 그리고, 출력층의 오차신호는 식 (12)과 같다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial net_k} \quad (12)$$

여기서, $net_k = \sum_j W_{jk} O_j + \theta_k$ 이다. 출력층에 대한 K_{p-p} , K_{i-p} , K_{d-p} , K_{p-a} , K_{i-a} , K_{d-a} , K_{p-l} , K_{i-l} , K_{d-l} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{p-p} &= f(netk_1), K_{i-p} = f(netk_2), K_{d-p} = f(netk_3) \\ K_{p-a} &= f(netk_4), K_{i-a} = f(netk_5), K_{d-a} = f(netk_6) \\ K_{p-l} &= f(netk_7), K_{i-l} = f(netk_8), K_{d-l} = f(netk_9) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $f(\cdot)$ 는 활성화 함수이다. 연쇄법칙(chain rule)을 사용하여 은닉층과 출력층의 기중치를 변경한다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \eta \delta_k O_j + \epsilon \Delta W_{jk}(t) \quad (14)$$

출력층 각 노드의 오차 신호는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \delta k_{p-a} &= (y_{d-position}(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{p-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{p-a}} \\ \delta k_{i-a} &= (y_{d-position}(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{i-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{i-a}} \\ \delta k_{d-a} &= (y_{d-position}(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{d-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{d-a}} \\ \delta k_{p-a} &= (\theta_{d-angle}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_p}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p} \\ \delta k_{i-a} &= (\theta_{d-angle}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{i-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{i-a}} \\ \delta k_{d-a} &= (\theta_{d-angle}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{d-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{d-a}} \\ \delta k_{p-a} &= (\theta_{d-length}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_p}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p} \\ \delta k_{i-a} &= (\theta_{d-length}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{i-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{i-a}} \\ \delta k_{d-a} &= (\theta_{d-angle}(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{k_{d-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{d-a}} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $\frac{\partial y(t)}{\partial u(t)}$ 는 시스템의 자코비안이며, $f(\cdot)$ 는 신경회로망의 각각의 노드에 대한 출력의 미분식을 나타낸다.

5. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 그림 4와 같이 구성된 신경회로망PID 제어기를 적용하여 컨테이너의 위치 및 진동제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고 제어성능을 분석해 보았다. 신경회로망 PID 제어기를 구성하는데 있어 모델링에 사용된 신경회로망은 3층 구조로 하였으며, 입력층, 은닉층 그리고 출력층에 대한 각 층의 노드수는 각각 9, 15, 9로 하였다. 그리고, 신경회로망 모델링 학습에 대한 학습율과 모멘텀 계수는 각각 0.5, 0.5로 설정하였다. 각 층에 대한 연결강도의 초기값은 모두 0.5로 하였고, 은닉층과 출력층에 대한 활성화 함수는 시그모이드 함수와 항등 함수를 각각 적용하였다.

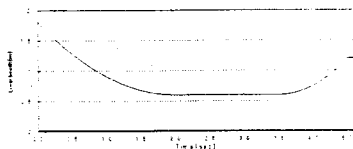
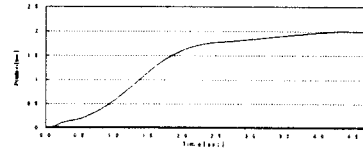


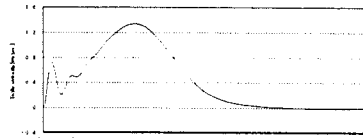
그림 6 Loop length[m]

그림 6은 레이저 거리미터기를 이용하여 컨테이너 스택을 스캐닝 한 후 초기 좌표위치, 최종 좌표위치를 설정 후 컨테이너 스택의 최고 높이의 가장 자리의 좌표를 잡아서 컨테이너의 이동경로를 설정하고, 신경회로망 PID 제어기를 이용하여 컨테이너 이동경로에 따라 시뮬레이션을 하였다.

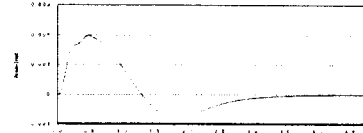
크레인의 최종 목표위치를 2[m], 초기 진동각을 0[rad]으로 설정하고, 목표위치인 2[m]을 추종함에 있어서 위치보정 시간은 약 7.5초였으며, 오버슈트나 오실레이션이 없이 잘 추종함을 보이고 있다. 또한, 흔들림의 교정에서는 초기 0.013[rad] 만큼 진동함을 볼 수 있으며, 약 4.5초 후에 흔들림이 없이 목표치인 2[m]에 추종함을 볼 수 있다.



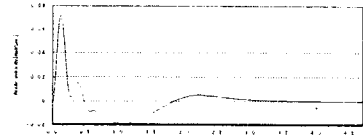
(a) Trolley Position[m]



(b) Trolley Velocity[m/sec]



(c) Angle[rad]



(D) Angle velocity[rad/sec]

그림 7 신경회로망 PID 제어기의 응답

6. 결 론

본 논문에서는 실제 항만 야드에서 발생하는 환경변화에 대하여 컨테이너의 흔들림을 최소화하면서 트롤리를 목표지점까지 신속하게 이동시키기 위해 강인하고 보다 안정된 최적의 크레인 제어시스템을 설계하였다. 크레인 시스템을 제어하기 위하여 신경회로망 제어기를 구성하여 크레인 모델에 적용하였으며 목표 추정, 위치 보정 및 진동을 최적화하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y.Sakawa, Y. Shindo, "Optimal control container crane", I FAC, Vol. 18, No. 3, pp. 257-266, 1982.
- [2] M. Nomura, Y. Hakamada, and H. Saeki, "Anti-sway Position Control of Crane based on Acceleration Feedback and Predicted Pattern Following Method", Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan D, Vol. 117, No. 11, pp. 1341-1347, 1997.
- [3] 윤지섭, 강이석, "천정크레인의 무진동/위치 제어기개발에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- [4] A. Marttinen, J. Virkkunen, and R. T. Salminen, "Control Study with a Pilot Crane", IEEE Trans. on Education, Vol. 33, No. 3, pp. 298-305, 1990.
- [5] S. Omatu, M. Khalid and R. Yusof, Neuro-Control and its Applications, Springer, 1996.s