

3D 크레인 시스템 적응제어에 관한 연구 : 실시간 시뮬레이터 구현 A Study on Adaptive Control of 3D Crane Systems : Implementation of a Real-time Simulator

송창환 · 조현철 · 이진우 · 이영진 · 이권순

C. H. Song, H. C. Cho, J. W. Lee, Y. J. Lee and K. S. Lee

(접수일 : 2008년 11월 17일, 수정일 : 2008년 12월 12일, 채택확정 : 2008년 12월 15일)

Key Words : 3D Crane Simulator(3D 크레인 시뮬레이터), Robust adaptive control system(강인 적응제어 시스템), Environmental disturbance(환경적 외란)

Abstract : A crane is very important mechanical systems in industrial applications to move huge objects. Especially, in marine port terminals, it is used to place container boxes at desired position within given operating time. However, such system is faced with environmental disturbance such as wind from the sea, thus crane control system is required to cope with this nature. This paper proposed robust and adaptive control algorithm of a complicated 3D crane against the environmental disturbance. We simplify a mathematical design procedure to derive our control algorithm. We conduct real-time experiment using a crane simulator to evaluate its superiority and reliability.

1. 서 론

본 연구는 항만 터미널이나 무거운 물체를 이송하는 산업현장에서 널리 사용되는 중요한 사업장비의 하나인 크레인을 제어하기 위해 수행되었다. 항만은 주로 바다에서 불어오는 풍력에 대한 외란에 항상 노출되어 있으며 이러한 환경적 외란에 대하여 강인 및 적응형 형태의 크레인 운영이 요구된다. 현대 제어 기법의 발전으로 인하여 이런 복잡한 기계시스템에 대하여 보다 향상된 제어성능을 위한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 최근에는 보다 복잡한 비선형성을 갖는 크레인 시스템에 대하여 다양한 제어이론이 적용되고 있다.

Lee는 3D 크레인시스템의 선형화 기법을 이용하여 선형제어시스템을 구성하여 실시간 실험을 통해 제어성능을 검증하였으며¹⁾, Chen등은 3D 크레인의

동적 모델링을 비선형 제어기법을 이용하여 나타내었으며²⁾ Deng 등은 constrained 예측제어기법을 적용하였다³⁾. 최근에는 모델매칭 제어기법을 이용하여 복잡한 크레인 시스템의 강인적응제어규칙을 제안하였다⁴⁾.

Sato는 3D크레인시스템의 모델링 및 이득을 제어하였고⁵⁾, Kang등은 제어기 스위칭 기법을 통해 갠트리 크레인의 적응제어기를 설계하였다⁶⁾.

Burg은 비선형 제어기법을 이용하여 천정크레인 제어기법을 제안하였고⁷⁾, Chung은 스윙을 제어하기 위해 비선형 제어기법을 제안하였으며⁸⁾, Fang은 천정크레인에 비선형제어기를 설계하여 제안하였다^{9),10)}.

이러한 연구들은 비선형 크레인 시스템을 선형화하여 기존의 선형시스템 이론을 적용한 제어기 설계가 대부분이다. 하지만 이러한 선형화로 인해 발생하는 모델링 및 섭동에 대한 검증은 이루어지지 않고 있으며 특히 풍력과 같은 환경적 외란에 대한 실험은 더욱 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 3D 크레인 컨트롤러를 이용하여 실험을 통해 항구의 특성상 나타나는 해풍 등의 외란에 대한 강인 및 적응형 크레인 제어시스템 알고리즘을 제안한다. 3D 크레인 시뮬레이터에 제안한

조현철(책임저자) : 동아대학교 대학원 전기공학과 PostDoc. 연구원

E-mail : hyunccho@gmail.com, Tel: 051-200-6950

송창환 : 동아대학교 대학원 전기공학과

이진우 : 동아대학교 대학원 전기공학과 PostDoc. 연구원

이영진 : 한국폴리텍항공대학 항공전기과

이권순 : 동아대학교 전기공학과

제어알고리즘을 적용하여 실시간 실험을 실시함으로써 그 타당성 및 성능의 우수성을 입증하고자 한다. 또한 크레인 시뮬레이터를 이용하여 제안한 제어시스템의 성능을 실시간을 실험을 통해 검증하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 크레인 시스템의 수학적 모델링을 서술하며, 3절에서는 크레인 제어시스템을 설계한다. 4절에서는 본 논문의 실험에 사용된 크레인 시뮬레이터에 대하여 간략히 서술하며 5절에서는 그 실험 및 결과와 검토를 서술하며 마지막으로 6절에서 결론을 기술한다.

2. 크레인 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 다루는 3차원 크레인 시스템의 기구학적 모델은 Fig. 1과 같다.

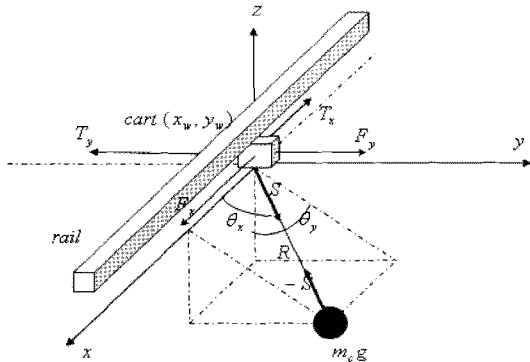


Fig. 1 Kinematic Modeling of 3D Crane system

이 기구학적 모델에서 각각의 변수, x_w 는 rail의 중앙에 해당하는 cart의 위치를 표시하며, y_w 는 크레인의 중앙에 해당하는 rail/cart의 위치를 표시한다. R 은 리프트줄의 길이를, θ_x 는 x 축과 리프트와의 각도를, 그리고 θ_y 는 $y-z$ 평면에 z 축의 음의 방향과 리프트의 투영 사이의 각도를 각각 나타낸다. 또한 m_c 는 추의 질량을 m_w 는 트롤리의 질량을 그리고 m_s 는 움직이는 레일의 질량을 각각 나타낸다. x_c, y_c, z_c 는 추의 위치 벡터 성분을 나타내며 s 는 추에 미치는 중력을 x_c, y_c 는 cart의 위치 벡터 성분을 나타낸다. F_x 는 x 축 방향으로 움직이는 트롤리의 힘을 F_y 는 y 축 방향으로 움직이는 레일과 트롤리의 힘을 T_x, T_y 는 x 축과 y 축방향의 움직임에 상응하는 마찰력을 나타낸다.

Fig. 1의 시스템 모델은 다음의 시변 상태방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = \Phi(t)x(t) + \Gamma(t)\zeta(t) + Gg \quad (1)$$

또한 위의 상태방정식을 행렬형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{26} & 0 & \phi_{28} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{46} & 0 & \phi_{48} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{66} & 0 & \phi_{68} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{86} & 0 & \phi_{88} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{81} & \gamma_{82} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \\ 0 \\ G_4 \\ 0 \\ G_6 \\ 0 \\ G_8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} g$$

여기서 시스템 상태 및 입력벡터는 $x(t) = [x_1, x_2, \dots, x_{10}]^T$, $\zeta(t) = [N_x, N_y, N_z]^T$ 이며 g 는 중력가속도를 나타낸다. 또한 상태행렬은 $\Phi(t) = [\phi_{ij}]_{i,j=1,\dots,10}$ 와 같이 주어지며 여기서 상태각각의 행렬의 요소(element)는 다음과 같다.

$$\phi_{11} = \phi_{13..1,10} = \phi_{21..10,10} = 0,$$

$$\phi_{12} = \phi_{34} = \phi_{56} = \phi_{78} = \phi_{9,10} = 1,$$

$$\phi_{26} = m_c R c_6 M_y x_6 / A, \quad \phi_{28} = m_c s_5^2 M_y x_8 / A,$$

$$\phi_{46} = R m_w m_s s_7 x_6 / A, \quad \phi_{48} = R m_w m_s s_7 s_5^2 x_8 / A,$$

$$\phi_{66} = s_5 c_5 (m_w c_7^2 + m_s) x_6 / RA, \quad \phi_{68} = M R c_5 s_5 x_8 / RA,$$

$$\phi_{86} = \frac{1}{R A s_5} m_w m_s R s_7 c_7 s_5^2 x_6, \quad \phi_{88} = \frac{1}{R A s_5} m_w m_s R s_7 c_7 s_5$$

또한 입력행렬은 $\Gamma(t) = [\gamma_{i,j}]_{i,j=1,\dots,10}$ 와 같이 표현되며 각각의 요소는 다음과 같으며

$$\gamma_{11} = \gamma_{12..10,2} = 0, \quad \gamma_{10,3} = 1,$$

$$\gamma_{21} = (m_c s_5^2 s_7^2 + m_y) / A, \quad \gamma_{22} = m_c s_5 s_7 / A,$$

$$\gamma_{41} = m_c s_5 c_5 s_7 / A, \quad \gamma_{42} = (m_w + m_c c_5^2) / A,$$

$$\gamma_{61} = s_5 (M_y + m_c s_7^2) / RA, \quad \gamma_{62} = -c_5 s_7 (m_w + m_c) / RA,$$

$$\gamma_{81} = m_c c_5 c_7 s_5 s_7 / R A s_5, \quad \gamma_{82} = c_7 (m_w + m_c c_5^2) / R A s_5$$

마찬가지로 $G = [G_i]_{i=1,\dots,10}$ 와 같이 주어지며 각각의 요소는

$$G_1 = G_3 = G_5 = G_7 = G_9 = 0$$

$$G_2 = m_c s_5 c_7 / A, \quad G_4 = m_w m_c s_5^2 c_7 s_7 / A,$$

$$G_6 = M c_5 c_7 / RA$$

$$G_8 = (m_w^2 + m_w m_c + m_w m_s + m_c m_s c_5^2) s_7 / R A s_5$$

와 같다.

위의 식에서 각각의 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 M &= m_w^2 + m_c m_s + m_w m_s + m_c m_w, \\
 M_y &= m_w + m_s, \\
 N_x &= F_x - T_x, \quad N_y = F_y - T_y, \\
 A &= m_w^2 + m_w m_s + m_c m_w \sin^2 x_5 \sin^2 x_7 + M_y m_c \cos^2 x_5, \\
 s_n &= \sin x_n, \quad c_n = \cos x_n, \\
 u_1 &= F_x, \quad u_2 = F_y, \quad u_3 = F_z, \\
 N_x &= u_1 - T_x, \quad N_y = u_2 - T_y, \quad N_z = u_3 - g - T_z, \\
 x_1 &= x_w, \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x}_w, \\
 x_3 &= y_w, \quad x_4 = \dot{x}_3 = \dot{y}_w, \\
 x_5 &= \theta_x, \quad x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\theta}_x, \\
 x_7 &= \theta_y, \quad x_8 = \dot{x}_7 = \dot{\theta}_y, \\
 x_9 &= R, \quad x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{R}
 \end{aligned}$$

본 논문에서 고려할 크레인 시스템은 위의 식에서 나타내어진 것과 같이 3차원에서의 시스템이기 때문에 복잡한 비선형 형태로 나타내어 질 수 있다.

3. 크레인 제어시스템 설계

2절에서 본 바와 같이 본 연구에서 다루는 3D 크레인 시스템은 아주 복잡한 비선형으로 구성되어 있으며, 제어가 설계를 하기 위해 복잡한 수학적 과정을 거치게 되며, 그 해를 구하는 것 또한 만만치 않다. 따라서 본 연구에서 다루는 3D 크레인 시스템의 제어를 설계하기 위해서는 근사화를 통하여 복잡한 방정식을 선형모델로 구한 다음 잘 알려진 제어이론을 적용하여 제어를 설계하여야 한다.

또한 본 논문에서는 복잡한 크레인시스템에 대하여 외란에 강인한 제어시스템을 설계할 것이다. 일반적으로 외란은 수학적으로 표현하기가 어려우며 제어가 설계에 있어 그 동특성은 가정 하에 이루어진다.

3D 크레인의 동특성 방정식인 식 (1)에 임의의 외란 항을 적용한 시스템 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \Phi x(t) + \Gamma \zeta(t) + Gg + Dd(t) \quad (2)$$

여기서 $d(t)$ 와 D 는 외란 벡터와 행렬을 각각 나타낸다.

식 (2)와 같이 외란항을 가정한 시스템의 방정식을 구하였다. 다음으로 본 절의 서두에 언급한 바와

같이 3D 크레인 시스템의 복잡한 비선형 방정식을 기존의 피드백 선형화 기법을 이용하여 식 (2)의 비선형 항을 제거한다. 즉,

$$(\Phi(t)x(t) + \Gamma(t)\zeta(t) + G(t)g) = 0 \quad (3)$$

으로 하기 위하여 제어규칙은 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta(t) = -\Gamma^*(t)(\Phi(t)x(t) + Gg) + F(t) \quad (4)$$

Pseudo 역행렬

식(4)의 Γ^* 는 pseudo 역행렬로서 일반적으로 역행렬은 정칙행렬에서만 존재하고 수학적으로 나타낼 수가 있다. 다음과 같은 경우,

$$[a \ b] \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5]$$

에서 다음과 같이 간단히 표현하였을 때 $AX=Y$ 의 계수 a, b를 구하기 위해 X 의 역행렬을 구하면 쉽게 계산이 될 수 있으나 X 는 정칙행렬이 아니기 때문에 역행렬을 구할 수 없다. 이러한 경우 X 에 자신의 transpose를 곱해 준 뒤 역행렬을 구할 수 있으며, 이러한 방법을 Pseudo inverse라고 한다. 다음과 같이 정리하면,

$$\begin{aligned}
 AXX^T &= YX^T \\
 AXX^T(XX^T)^{-1} &= YX^T(XX^T)^{-1}
 \end{aligned}$$

a, b의 계수를 구할 수 있다. 따라서, $\Phi(t)x(t) + Gg$ 의 비선형 항을 제거하기 위하여 Γ^* 를 다음과 같이 정리할 수 있으며,

$$\Gamma^*(t) = (\Gamma^T \Gamma)^{-1} \Gamma^T \Gamma \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 복잡한 비선형 시스템의 비선형항을 제거한 후 임의의 제어입력 F 를 통해 제어를 설계한다. 새로운 제어입력 F 는 다음의 선형방정식으로 주어지며

$$F(t) = K_1 \dot{x}(t) + K_2 x(t) + r \quad (6)$$

여기서 K_1, K_2 는 제어행렬이며, r 은 설정치 벡터를 각각 나타낸다. 식 (6)을 적용하면 최종적으로 시스템 모델은 다음과 같이 선형 식으로 주어진다.

$$\dot{x}(t) = K_1 \dot{x}(t) + K_2 x(t) + r + Dd(t) \quad (7)$$

또한 여기서 외란은 유한하다고 가정한다. 즉,

$d(t) \leq M \ll \infty$ 이며, 따라서 제어기 설계는 외란 d 에 강인한 제어행렬 K_1, K_2 를 적절하게 선정하는 것이다.

4. 3D 크레인 시뮬레이터

본 논문에서는 환경적 외란에 강인한 제어를 설계하기 위하여 것을 구성한 제어기법의 제어성능을 검증하기 위하여 Fig. 2의 3D 크레인 시뮬레이터를 이용하여 실시간 실험을 실시하였다. 적용하여 Fig. 2의 3D 크레인 시뮬레이터를 이용한 실시간 실험을 통해 제어성능을 검증하였다.

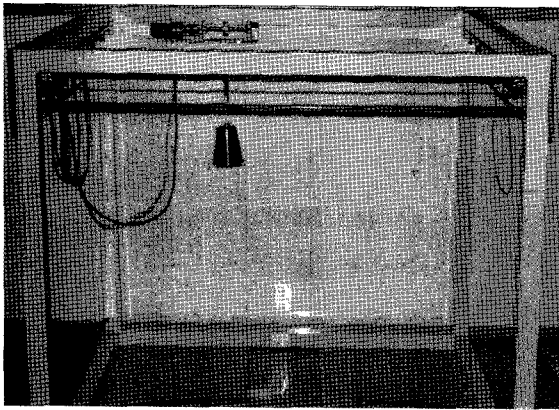


Fig. 2 A 3D Crane simulator

또한 Fig. 3의 크레인 컨트롤러는 크레인 시뮬레이터와 크레인 시뮬레이터를 제어하기 위한 제어용 컴퓨터를 연동시켜주는 장치로서 각축의 센서와 모터제어부가 제어용 컴퓨터의 보드를 통해 연동되어 matlab과 simulink © 소프트웨어를 통하여 시뮬레이터의 제어가 가능하다.

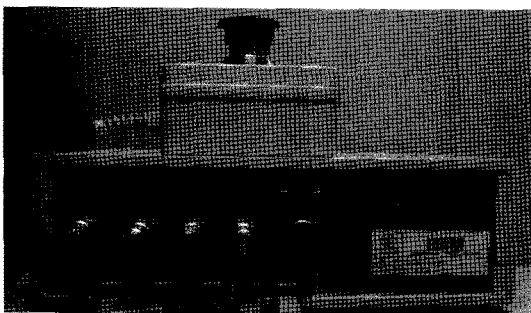


Fig. 3 A crane controller

본 논문에서 사용된 크레인 시뮬레이터는 Fig. 4에서와 같이 x축과 y축 그리고 z축으로 움직이는 각각의 서브모터와 각 축의 센서로 구성되어 있다.

크레인 컨트롤러의 payload는 z방향으로 올려지고 내려지며, rail과 cart는 x축방향으로 가로운동을 할 수 있다. cart는 또한 rail을 따라서 y축방향으로 가로운동을 할 수 있다. 그러므로 payload는 3차원으로 자유롭게 리프트 라인의 끝에 가까워 질 수 있으며, 3D 크레인은 3개의 DC 모터에 의해 움직인다.

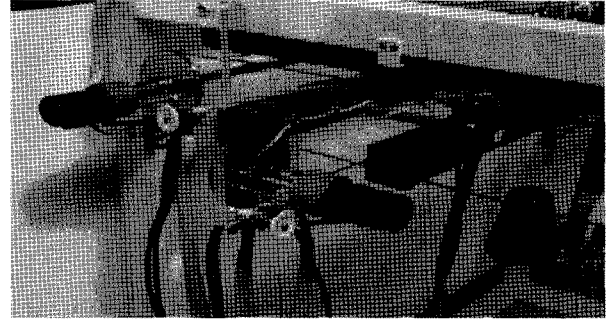
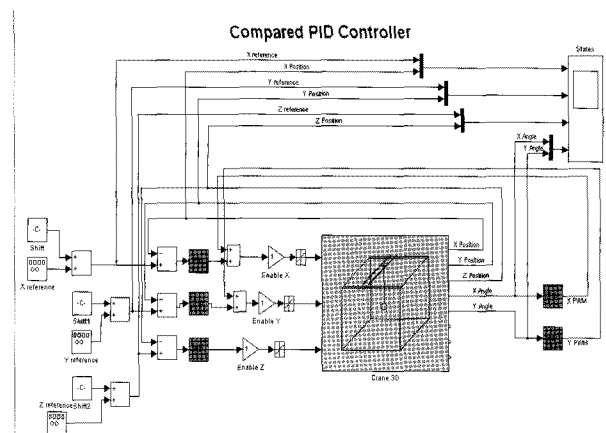


Fig. 4 Driving mechanism of a 3D crane simulator

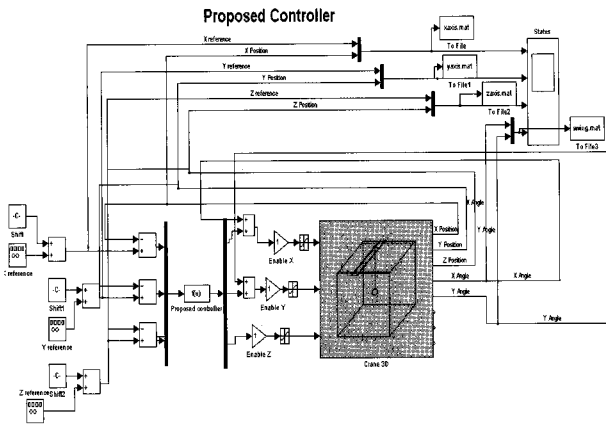
5. 실시간 실험 및 결과검토

본 논문에서는 Fig. 3의 크레인 시뮬레이터를 이용하여 제안하는 제어규칙을 코드화하여 실시간으로 실험을 실시하였다. Fig. 5는 3D 크레인 시뮬레이터와 연동된 제어용 컴퓨터의 simulink © 프로그램의 블록도이다. 실험의 오차를 줄이고 각각의 제어를 비교하기 쉽게 하기 위하여 제어를 제외한 나머지 입력 등의 부분은 동일하게 블록도를 작성하였다.

Fig. 5의 <a>는 잘 알려진 기존의 PID 제어기의 최적값으로 설계하여 x, y, z 입력 값 그리고 payload출력 값에 제어를 적용시킨 블록도이며, 는 식(7)로부터 설계한 제어를 <a>와 같은 방식으로 적용한 블록도이다.



a) Block diagram of compared PID controller

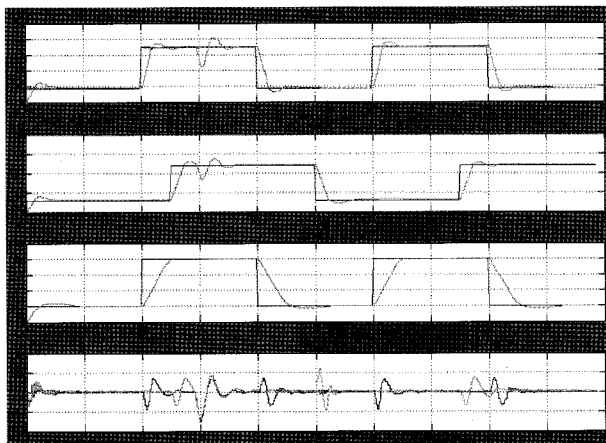


b) Block diagram of proposed PID controller
Fig. 5 Block diagram of each controller

Fig. 6은 Fig. 5 <a>의 PID 제어기를 적용한 제어방식과 Fig. 5 의 본 논문에서 제안한 제어방식을 각각 적용하여 시스템의 응답파형을 비교하였다. Fig. 6은 각각 x축의 흔들림, y축의 흔들림, z축의 흔들림, 그리고 payload의 흔들림을 실시간으로



a) PID control



b) The proposed control

Fig. 6 Response of each control system

나타내고 있으며, 실험과형에서도 알 수 있듯이 제안한 제어방식의 경우 비교적 우수한 성능을 보이고 있다. 또한 15초에 외란을 인가하였으며 이 경우 정상상태에 복귀하는 성능이 기존의 제어방식 보다 월등히 우수함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 제어를 설계하기 위하여 우선 선형화 모델을 수립하였으며, 이를 바탕으로 강인 적응제어를 설계하였다. 제안한 제어기의 성능의 우수성과 타당성을 검증하기 위하여 3D 크레인 시뮬레이터를 이용한 실시간 실험을 실시하였으며, 기존의 PID 제어방식과 비교 분석하였다. 실험을 통해 외란이 적용되었을 경우 만족스러운 제어성능을 발휘함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008학년도 동아대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. H. Lee, 1998. "Modeling and control of a three-dimensional overhead cranes," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, pp. 471~476.
2. H. Chen, B. Gao, and X. Zhang, 2005. "Dynamic modeling and nonlinear control of a 3d crane," Proc. of Conf. on Control & Automation, pp. 1085~1090.
3. J. Deng and V. Becerra, 2004. "Application of constrained predictive control on a 3D crane system," Proc. of Conf on Robotics, Automation & Mechatronics, pp. 583~587.
4. 조현철 외 4인, 2007. "모델매칭 기법을 이용한 시스템 섭동을 갖는 비선형 크레인시스템 제어," 한국항해항만학회 논문지, Vol. 31, No. 6, pp. 523~530.
5. M. Sato, S. Azuma and T. Suigie, 2006. "Modeling of 3D Crane and Gain Scheduling Control," Proc. of the Con. of the institute of Systems, Control & Information Engineers,

- vol. 50, pp. 453~454.
6. Z. Kang, S. Fujii and C. Zhou, 1999 "Adaptive Control of a Planar Gantryawawawawaw Crane by the Switching of Controllers," Transactions of the Society of instruments & Control Engineers, vol. 35, pp. 253~261.
 7. T. Burg, D. Dawson, C. Rahn, and W. Rhodes, "Nonlinear control of an overhead crane via the saturating control approach of teel, 1996, " Proc. IEEE int. Conf. Robotics and Automation, pp. 3155~3160.
 8. C. Chung and J. Hauser, 1995, "Nonlinear control of a swinging pendulum," Automatica, Vol. 31, No. 6, pp. 851~862.
 9. Y. Fang et al., 2001, "Nonlinear coupling control laws for an overhead crane system, " Proc. IEEE Conf. Control Applications, pp. 639~644.
 10. Y. Fang et al., 2001, "Nonlinear coupling control laws for a 3-DOF overhead crane system," Proc. IEEE Conf. Decision and Control, pp. 3766~3771.
 11. Intelligent Technology for Control Ltd, 2006, 3D Crane : Installation and Commissioning Version 1.4 Krakow, Poland : inteco.