

극점배치기법을 이용한 트롤리 및 스프레더의 위치제어 Position Control of the Trolley and Spreader Using Pole-placement Method

이 태 영*, 김 면 희**, 최 원 식***

Tae-Young Lee*, Myun-Hee Kim**, Won-Sik Choi***

<Abstract>

Crane operation for transporting heavy loads causes swinging motion at the loads. This sway causes the suspension ropes to leave their grooves and leads to possibility of serious damages. Generally crane is operated by expert's knowledge. Therefore, a satisfactory control method to suppress object sway during transport is indispensable. The dynamic behavior of the crane shows nonlinear characteristics. when the length of the rope is changed the crane is time varying system and the design of anti-sway controller is very difficult.

In this paper, the nonlinear dynamic model for the industrial overhead crane is derived. and the feedback gain matrix based on the pole-placement method is proposed to suppress the swing motion and control the position of the crane. The performance of the controller for the crane model is simulated on the personal computer.

Key Words : Pole-placement method, Anti-sway controller, Overhead Crane, Position Controller, Trolley

1. 서 론

크레인으로 화물을 이송할 때의 가장 문제점은 스프레더의 흔들림이다. 화물의 하역위치에서 하역하기 위해 기다려야 하므로 작업시간을 증가시킨다. 그리고 화물의 흔들림으로 인하여 중량의 작업물에 의한 안전사고의 위험도 뒤따르고 있으며 정확한 위치에 하역하는데도 많은

어려움이 따르므로 스프레더의 흔들림은 큰 문제점으로 지적되고 있다.^{1),2)}

크레인 시스템을 제어하는 목적은 하역지점에서 로프의 흔들림을 신속하게 감쇄시켜 작업시간을 단축시키는 것과 로프의 흔들림을 억제하여 시스템의 안정성을 높여 내용물의 손상이나 안전사고의 위험을 줄이는 것이다.

작업시간을 단축시키는 것이 목적인 경우에

* 정회원 경북대학교 대학원 기계공학과

** 정회원 경북대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 慶北大學校 工博, 技術士

경일대학교 兼任教授

* Kyungpook National University Graduate School

** Kyungpook National University Graduate School

*** Additional Job Prof. of Kyungil university

는 가능한 한 빨리 이송하여 하역위치에 정지한 후 로프의 흔들림을 가능한한 빨리 감쇄시키는 것이 중요하다. 시스템의 안정성을 높이고자 할 때는 가속 등속 감속구간에서 로프의 진동이 최소한으로 일어날 수 있도록 제어하는 것이 중요하다.^{3),4)}

본 연구에서는 하역위치에서 하역대기 시간을 최소한으로 단축시키는데 제어의 목적을 두었다.

극점배치기법(Pole-placement method)을 사용하여 트롤리의 위치 및 속도 스프레더의 흔들림각 등을 적절히 제어하였다. 트롤리의 이송을 가속구간, 등속구간, 감속구간, 정지위치보정구간^{5),6)}으로 나누어 구간별 특성에 따른 제어방식을 다르게 하여야 하지만⁷⁾ 본 연구에서는 이송중이 끝난 크레인의 정지위치구간에서 트롤리의 위치와 속도 오차, 스프레더의 흔들림을 동시에 감쇄시키는 제어기를 구성하였다.

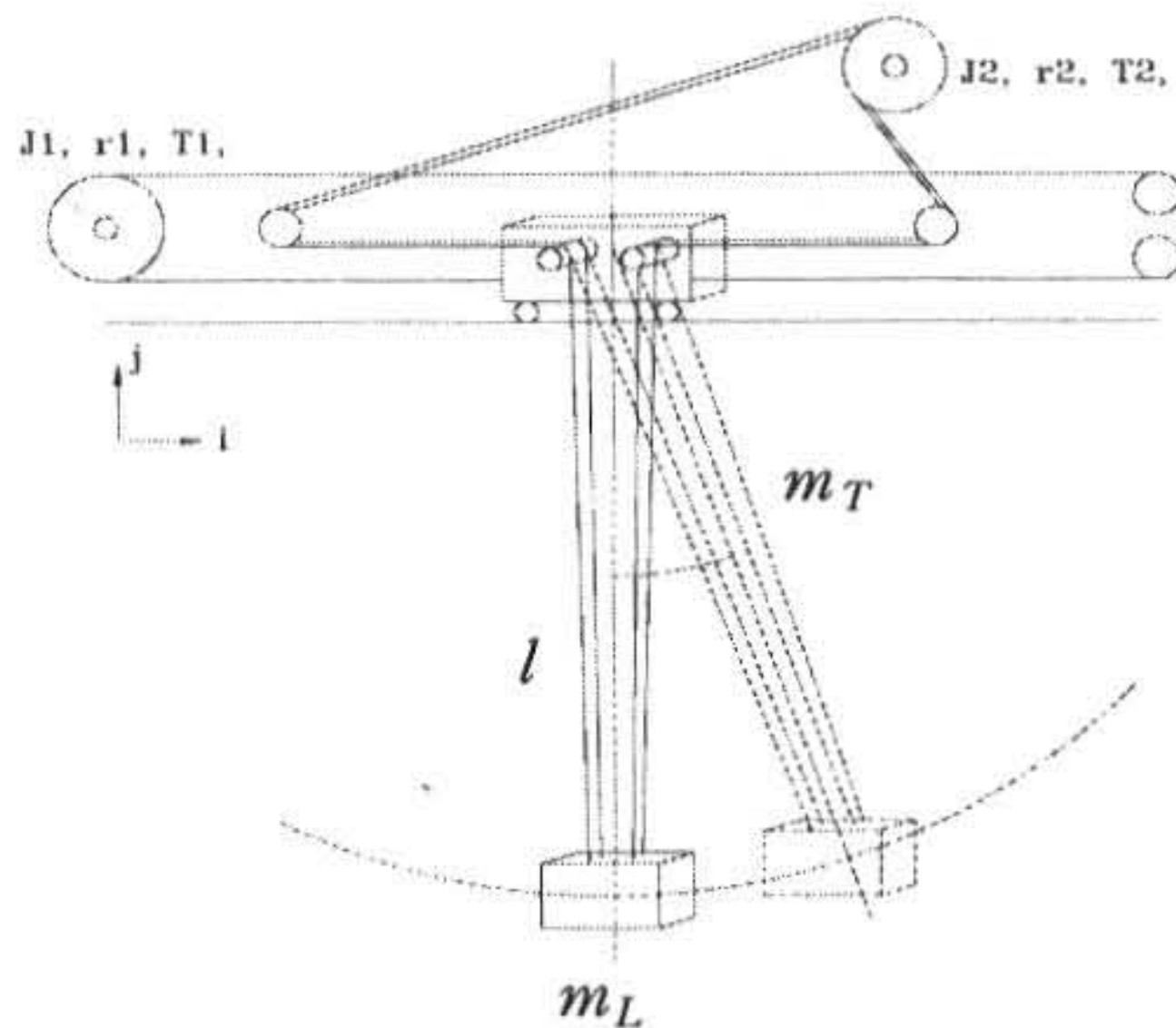


Fig. 4 Crane System

2. 크레인 시스템의 모델링

2.1 운동방정식

컨테이너 크레인 시스템은 Fig. 1과 같다. 트롤리는 수평의 한축 방향으로만 운동을 하며 트롤리 모터의 회전에 의해 수평방향 즉 i 방향으로 운동한다. 호이스트 모터의 회전으로 와이어가 호이스트 드럼에 감기면서 이송물을 매단 와이어의 길이가 줄어들고 이에 따라 이송물은

수직방향 j로 운동을 하게 된다.

운동방정식을 유도하기 위해 좌표계와 변수들을 설정한다. 트롤리의 수평운동방향을 i 수직운동방향을 j로 설정한다.

트롤리의 질량을 m_T , 이송물의 질량을 m_L , 로프의 흔들림 각을 ϕ 라고 한다. 그리고 트롤리 모터의 피니언의 반경을 r_1 , 트롤리 모터의 피니언의 관성모우멘트를 J_1 , 트롤리 모터의 토크를 T_1 , 트롤리 모터의 회전각을 θ_1 이라고 한다. 호이스트 모터의 피니언의 반경을 r_2 , 호이스트 모터의 피니언의 관성모우멘트를 J_2 , 호이스트 모터의 토크를 T_2 , 호이스트 모터의 회전각을 θ_2 이라고 한다. 여기서 트롤리의 수평방향의 운동은 $r_1\theta_1$ 이고 와이어의 길이변화는 $r_2\theta_2$ 가 된다.

크레인 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해 라그랑지 방정식을 사용하였다. 트롤리의 위치벡터는 $X_T = r_1\theta_1 i$ 로 구해지며, 이송물의 위치 vector는 다음 식 (1)과 같다.

$$X_L = (r_1\theta_1 + r_2\theta_2\sin\phi)i - r_2\theta_2\cos\phi j \quad (1)$$

시스템의 총 운동에너지는 트롤리 모터의 피니언의 회전운동, 트롤리의 X방향 직선운동 이송물의 각도변화에 따른 운동에너지 등을 고려하고 이송물의 중심축에 대한 회전은 없는 것으로 간주하고 와이어의 비틀림도 없는 것으로 간주하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= \frac{J_1\dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_1}{2} + \frac{m_T\dot{x}_T \cdot \dot{x}_T}{2} + \frac{J_2\dot{\theta}_2 \cdot \dot{\theta}_2}{2} + \frac{m_L\dot{x}_L \cdot \dot{x}_L}{2} \\ &= \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}m_T r_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_L \\ &\quad (r_1^2\dot{\theta}_1^2 + r_2^2\dot{\theta}_2^2\sin^2\phi + r_2^2\dot{\theta}_2^2\dot{\phi}^2\cos^2\phi + 2r_1r_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\phi \\ &\quad + 2r_1r_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\dot{\phi}\cos\phi + 2r_2^2\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\dot{\phi}\sin\phi\cos\phi + r_2^2\dot{\theta}_2^2\cos^2\phi \\ &\quad + r_2^2\dot{\theta}_2^2\dot{\phi}^2\sin^2\phi - 2r_2^2\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\dot{\phi}\cos\phi\sin\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 이송물은 와이어의 끝단에 매달려진 질점으로 간주하였으며, 시스템의 총 위치에너지는 이송물의 회전에 의해 발생하는 중

력장에 대한 위치에너지를 고려하고, 와이어의 비틀림에 의해 생기는 탄성위치에너지는 없다고 가정하여 구하였다. 시스템의 총 위치에너지는 다음 식과 같이 구해진다.

$$V = -m_L g r_2 \theta_2 \cos \phi \quad (3)$$

$L = T - V$ 로 정의 하고 라그랑지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (4)$$

일반화된 좌표계(generalized coordinates)를 $q_i = \theta_1, \theta_2, \phi$ 로 설정하고, 각 좌표에 대해서 운동방정식을 구하면 다음의 식(5)~(7)과 같다.

$$(J_1 + m_T r_1^2 + m_L r_1^2) \ddot{\theta}_1 + m_L r_1 r_2 \ddot{\theta}_2 \sin \phi + m_L r_1 r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} \cos \phi + 2m_L r_1 r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} \cos \phi \quad (5)$$

$$- m_L r_1 r_2 \theta_2 \sin \phi \dot{\phi}^2 = T_1$$

$$(J_2 + m_L r_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_L r_1 r_2 \sin \phi \ddot{\theta}_1 - m_L r_2^2 \theta_2 \dot{\phi}^2 - m_L g r_2 \cos \phi = T_2 \quad (6)$$

$$2r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} + r_2 \theta_2 \ddot{\phi} + r_1 \ddot{\theta}_1 \cos \phi + g \sin \phi = 0 \quad (7)$$

2.2 비선형방정식의 선형화

ϕ 가 아주 작다고 가정하고 위의 식들을 선형화한다. ϕ 와 $\dot{\phi}$ 의 2차 이상 항들을 소거하고 $\cos \phi = 1, \sin \phi = \phi$ 로 두고 식을 정리하면 다음과 같다.

$$(J_1 + m_T r_1^2 + m_L r_1^2) \ddot{\theta}_1 + m_L r_1 r_2 \ddot{\theta}_2 \phi + m_L r_1 r_2 \theta_2 \ddot{\phi} + 2m_L r_1 r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} = T_1 \quad (8)$$

$$(J_2 + m_L r_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_L r_1 r_2 \theta_1 \ddot{\phi} - m_L g r_2 = T_2 \quad (9)$$

$$2r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} + r_2 \theta_2 \ddot{\phi} + r_1 \ddot{\theta}_1 + g \phi = 0 \quad (10)$$

식을 단순화하기 위해 시스템의 제어입력 v_1, v_2 과 δ_1, δ_2 를 다음과 같이 정의한다.

$$v_1 = \frac{r_1 T_1}{J_1 + m_T r_1^2}, \quad v_2 = \frac{r_2 (T_2 + m_L r_2 g)}{J_2 + m_T r_2^2} \quad (11)$$

$$\delta_1 = \frac{m_L r_1^2}{J_1 + m_T r_1^2}, \quad \delta_2 = \frac{m_L r_2^2}{J_2 + m_T r_2^2} \quad (12)$$

크레인 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$r_1 \ddot{\theta}_1 + r_1 \delta_1 \ddot{\theta}_1 + \delta_1 r_2 \ddot{\theta}_2 \phi + \delta_1 r_2 x_2 \dot{\phi} + 2\delta_1 r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} = v_1$$

$$r_1 \delta_2 \ddot{\theta}_1 \phi + r_2 \ddot{\theta}_2 = v_2$$

$$r_1 \ddot{\theta}_1 + r_2 \theta_2 \ddot{\phi} + 2r_2 \dot{\theta}_2 \dot{\phi} + g \phi = 0 \quad (13)$$

우선 제어의 목적을 이송시간의 단축에 두고 정지위치제어기(Stop position controller)를 설계하였다. 정지위치제어기는 트롤리가 하역위치에 정지한 후 로프의 흔들림을 빠르게 감쇄시키고 트롤리 정지위치의 오차를 동시에 신속하게 줄여 화물을 하역하기 위해 대기하는 시간을 최소한으로 줄일 수 있는 제어기이다.

가속구간, 등속구간, 감속구간에서는 최대속도로 이송한 후 정지위치에서 정지위치제어기를 이용하여 각도와 위치를 제어하는 것에 제어의 목적을 두었다.

2.3 상태방정식의 유도

로프의 길이가 일정한 경우는 식을 더욱 단순화 할 수 있으므로, 로프의 길이가 변하는 경우와 다르게 상태방정식을 유도하였다. 우선 상태방정식을 유도하기 위해서 상태 변수를 다음과 같이 설정하였다.

$$x_1 = r_1 \theta_1$$

$$x_2 = r_2 \theta_2$$

$$x_3 = \phi$$

$$x_4 = \dot{x}_1 = r_1 \dot{\theta}_1$$

$$x_5 = \dot{x}_2 = r_2 \dot{\theta}_2$$

$$x_6 = \dot{x}_3 = \dot{\phi} \quad (14)$$

로프의 길이가 변하는 경우에 대하여 상태방정식을 유도하기 위해 위의 식을 상태변수에 대해서 정리하면 다음과 같다.

호이스트 모터의 토크를 제어하지 않고 트롤리 모터의 토크만 제어하는 경우에는 행렬은 4×4 로 줄어들고 제어 입력 변수도 1개로 된다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_4 \\
 \dot{x}_2 &= x_5 \\
 \dot{x}_3 &= x_6 \\
 \dot{x}_4 &= \ddot{x}_1 = v_1 - \delta_1 x_3 \dot{x}_5 + \delta_1 g x_3 \\
 \dot{x}_5 &= \ddot{x}_2 = v_2 - \delta_2 x_3 \dot{x}_4 \\
 \dot{x}_6 &= \ddot{x}_3 = -\frac{1}{x_2} \{v_1 - \delta_1 x_3 \dot{x}_5 \\
 &\quad + (1 + \delta_1) g x_3 + 2x_5 x_6\}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 x_1 &= r_1 \theta_1 \\
 x_2 &= \phi \\
 x_3 &= \dot{x}_1 = r_1 \dot{\theta}_1 \\
 x_4 &= \dot{x}_2 = \dot{\phi} \\
 \dot{x}_1 &= x_3 \\
 \dot{x}_2 &= x_4 \\
 \dot{x}_3 &= \ddot{x}_1 = v_1 + \delta_1 g x_2 \\
 \dot{x}_4 &= \ddot{x}_2 = -\frac{1}{r_2 \theta_2} \{v_1 + (1 + \delta_1) g x_2\}
 \end{aligned} \tag{16}$$

이 경우에는 상태변수를 다음과 같이 4개를 정의하고 r_2 와 θ_2 는 상수가 된다. 이상의 식들로 부터 구한 상태방정식은 다음식과 같다.

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \tag{17}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \theta_1 \\ \phi \\ r_1 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad U = [v_1] \tag{18}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \delta_1 g & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1 + \delta_1)g}{r_2 \theta_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{r_2 \theta_2} \end{bmatrix}$$

이 경우 시스템의 제어 입력은 v_1 이며 트롤리의 위치와 속도 와이어의 흔들림 각도와 각속도등은 v_1 에 의해 제어된다. 호이스트 모터는 고정되어 있으며 와이어의 길이는 항상 일정하다. 시스템의 출력으로는 상태변수 $x_1, x_2, x_3, x_4 = [x, \phi, \dot{x}, \dot{\phi}]$ 네 개가 되며 퍼지제어기의 출력은 시스템의 제어입력은 v_1 이 된다. 크레인 시스템의 비선형 미분방정식은 Runge-Kutta방법으로 해를 구하였으며 0.1초 시간간격으로 PC에서 모사하였다.

3. 제어알고리즘

3.1 계획로 제어

크레인 진동방지 시스템(Anti-sway system)의 제어목적은 화물의 이송 및 하역에 소요되는 작업시간을 단축시키는 것이며, 다른 하나는 화물을 이송할 때 로프의 흔들림을 감쇄시키는 것이다. 어디에 중점을 두느냐에 따라 제어의 목적과 제어하는 방법과 결과등이 달라지게 된다.

첫번째 경우, 즉 작업시간(이송및 하역에 소요되는 시간)을 최소로 단축시키는 것이 제어 목적인 경우에는 이송도중 화물의 흔들림이 어느 정도까지 허용되느냐에 따라서 제어하는 방법이 달라진다. 만일 이송 도중 로프의 흔들림이 문제시 되지 않는다면, 마지막 하역위치에서 흔들림을 빠르게 감쇄시켜 단시간에 하역시킬 수 있게 하는 것이 제어의 목적이다. 따라서 최대한 빨리 가속시키고 최대속도로 이송한 후, 감속할 때도 최대한 빠르게 감속시켜 원하는 위치에 정지시킨다. 정지 후 트롤리 정지위치와 하역위치간의 오차와 로프의 흔들림을 신속하게 제거하는 제어알고리즘이 필요하다. 정지 했을 때 원하는 하역위치와의 오차와 잔류되어 있는 로프의 흔들림을 신속하게 제거 시켜주는 제어 알고리즘을 사용하여 정확한 위치에 정지시킨 후 하역한다. 이송 도중에는 제어가 이루어 지지 않고 미리 정해진 가속, 등속, 감속의 속도 패턴에 의해 이송하는 순차적인 제어방법이며, 정지위치의 오차와 로프의 흔들림을 빠른 시간 내에 줄이기 위해 제어기를 설계하는 것이 가장

중요하다.

두번째 경우, 이송 도중에 발생하는 로프의 흔들림이 내용물에 손상을 가져오거나 시스템의 안정성 면에서 문제가 되는 경우이다. 우선 약간의 속도손실을 감수하면서라도 이송중에 생기는 로프의 흔들림 각도를 0에 최대한 가깝게 수렴시키면서 이송하기 위해 속도를 적절하게 제어하는 방법이 있다. 다른 방법으로는 이송 도중 로프의 흔들림이 어느 기준치를 벗어나면 안된다고 하는 범위가 있다면 그 범위 내에서 최대속도로 이송하는 방법이 있다. 이 경우 미리 θ_{max} 의 허용 한도가 반드시 제시되어야 하며 θ_{max} 의 범위를 벗어나지 않기 위해서는 가속하다가 θ 가 θ_{max} 에 도달하면 더 이상 가속시키지 못하고 등속으로 이송하다가 로프의 흔들림이 감쇄되면 다시 가속하는 방법을 사용한다. 그러나 가속구간 중간에 일어나는 등속이송구간은 속도증가가 지연되므로 이송시간이 길어진다. 그러므로 θ_{max} 의 범위가 문제가 되지 않는다면 가속구간의 속도패턴 변형은 바람직하지 못하다. 앞장에서 구한 상태방정식을 기초로하여 대상으로 삼은 시스템의 사양들은 다음의 표 1과 같다.

Table. 1 System Parameter

System Parameter	Parameter values
Inertial Moment of Trolley (J1)	5 kg m ²
Mass of trolley (mt)	100 Kg
Radius of trolley pinion (r1)	0.2 m
Mass of the Load (ml)	1000 Kg
Length of the rope	10 m

상태방정식에 사용되는 행렬은 다음의 식과 같이 구해진다.

$$AS = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 15.696 & 0 & 0 \\ 0 & -2.5506 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$BS = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0080 \\ -0.0040 \end{bmatrix},$$

$$CS = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$DS = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

우선 이 시스템의 극점(pole)은 아래의 Fig 2와 같다. 극점의 위치가 허수축에 존재하므로 이 시스템의 응답특성은 마찰이 없다는 가정하에서 이론적으로 무한한 진동을 가지는 시스템이다. 단위 계단입력(unit step input)에 대한 시스템의 응답특성은 Fig. 3에 나타나 있고 단위 임펄스 입력(unit impulse)에 대한 응답특성은 Fig. 4와 같다.

스프레더가 흔들림을 일으켜서 로프의 각도가 흔들리고 있으며 이로 인해 트롤리의 위치도 흔들리고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 진동을 감쇄시키기 위해서는 전체 시스템의 극점을 재배치할 필요가 있다.

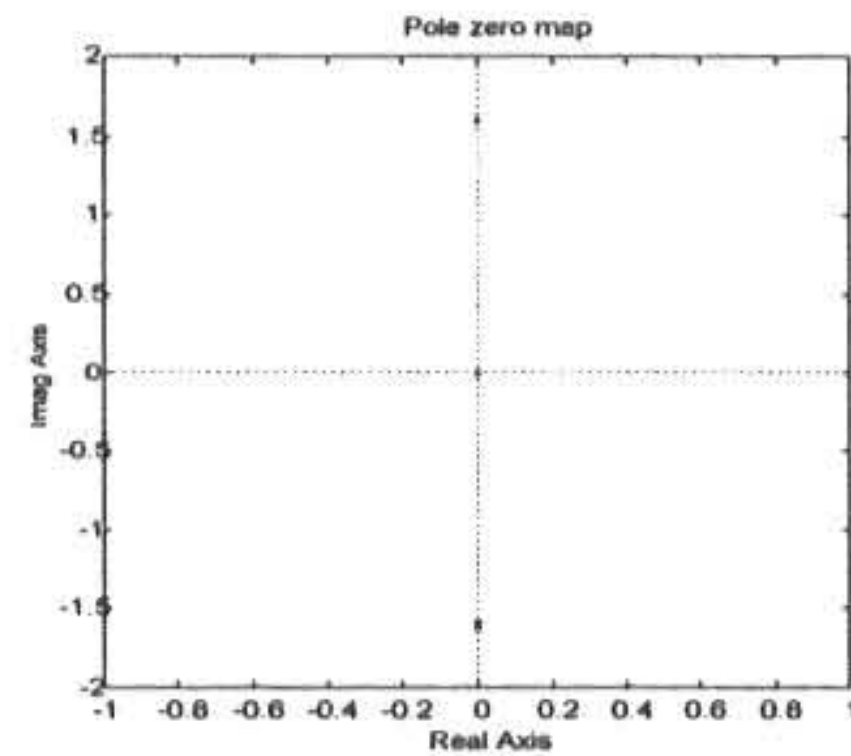
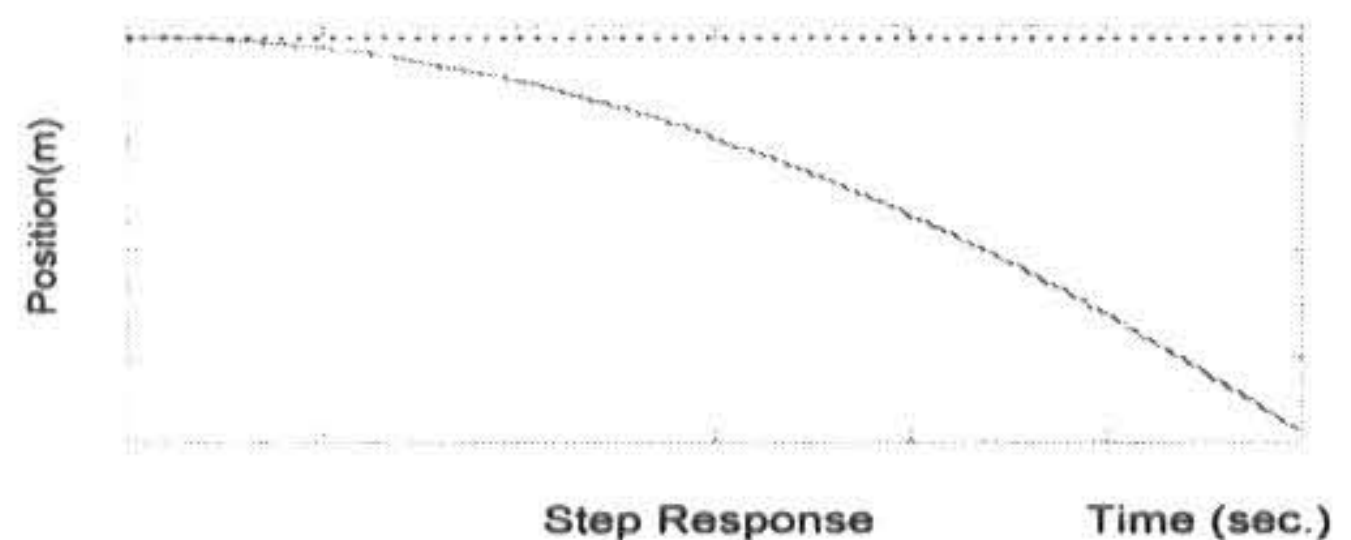


Fig. 5 Real-Imaginary plane



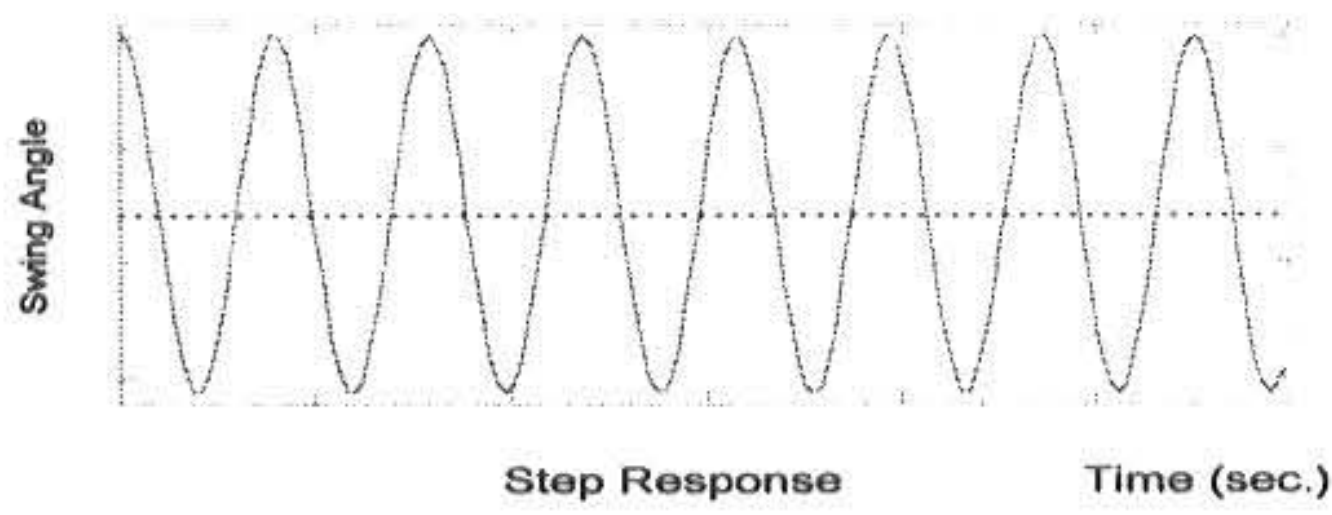


Fig. 3 Step response of the crane system

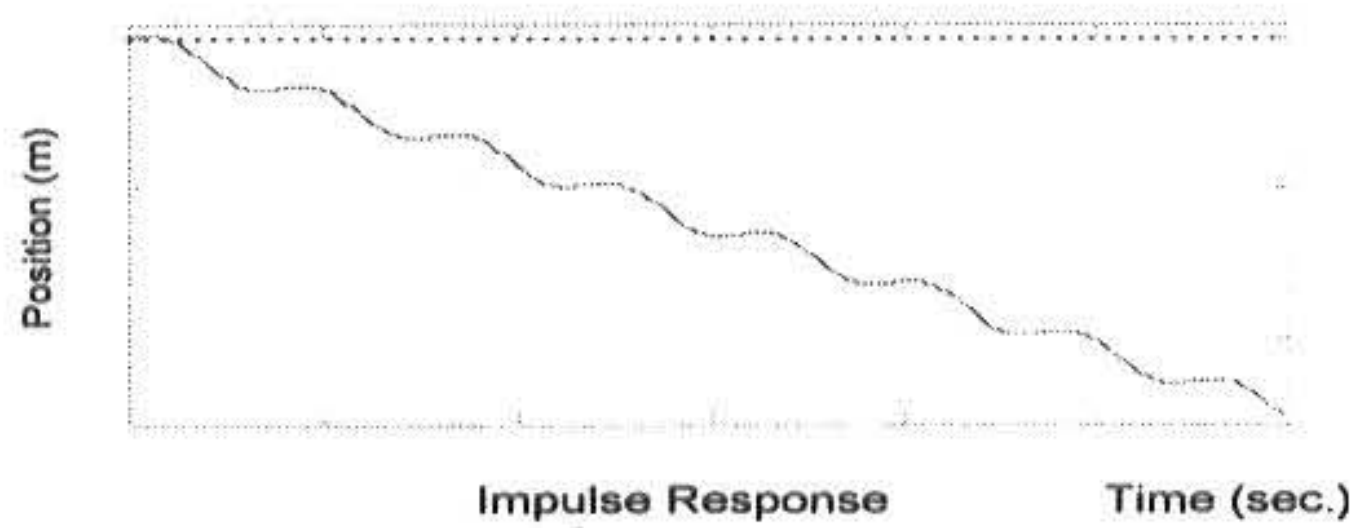
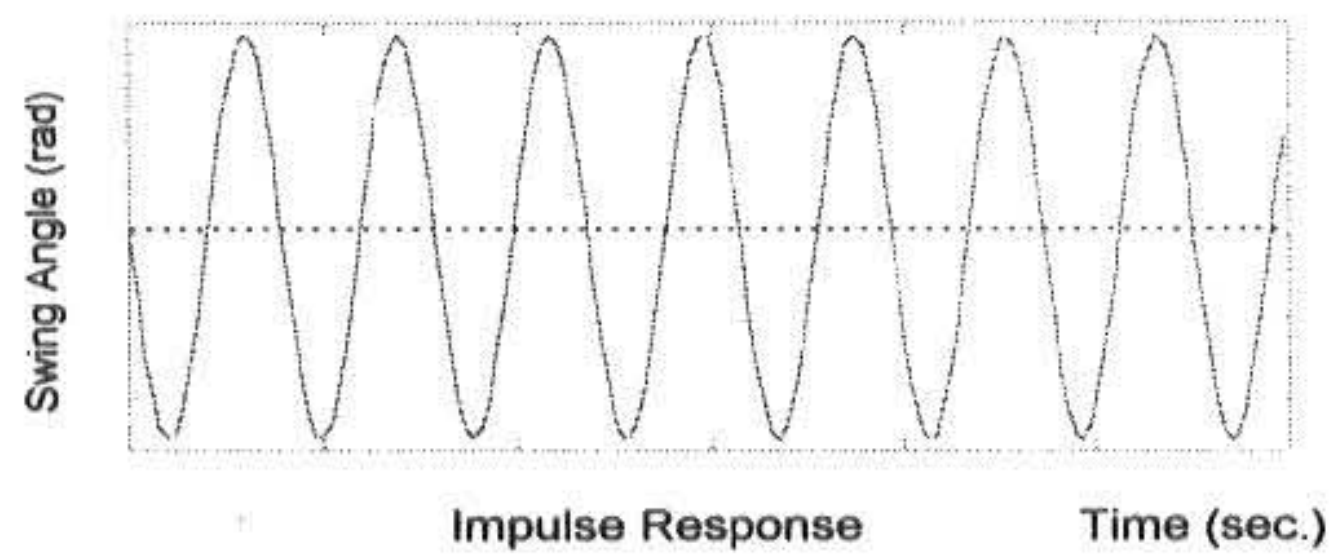


Fig. 4 Impulse Response of the Crane system



트롤리의 위치와 스프레더의 흔들림각이 계속해서 진동하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 시스템의 응답특성을 바꾸어서 트롤리의 위치와 로프의 흔들림 각도를 수렴시키기 위해서는 시스템의 극점(pole)을 바꾸어야 한다. 이 극점을 바꾸기 위해서 극점배치기법을 사용한다.

3.2 극점배치법(Pole-placement method)

시스템의 제어를 위한 블록선도는 다음 Fig. 5와 같다. 극점배치기법은 시스템 전체의 극점의 위치를 바꾸어 응답특성을 바꾸는 방법이다. 시스템의 극점의 위치를 바꾸기 위해 이득행렬을 사용한다.

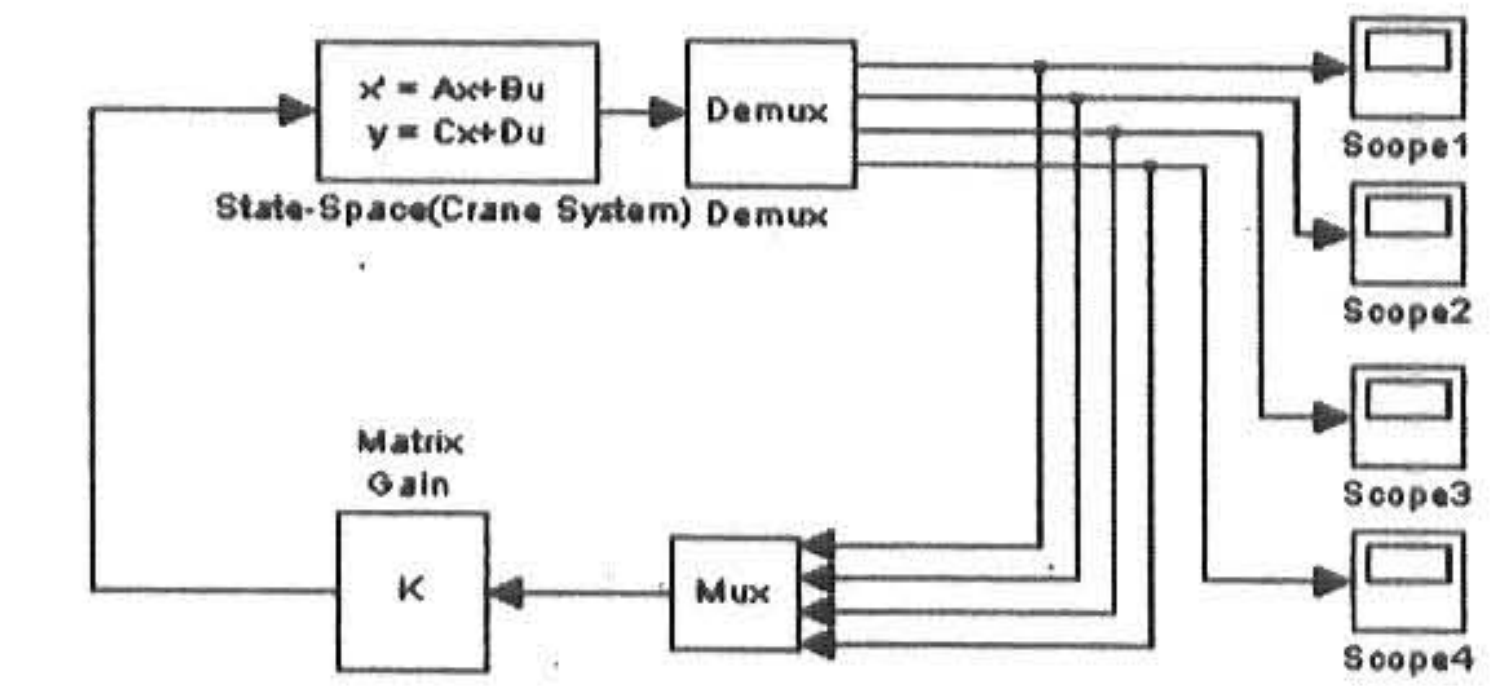
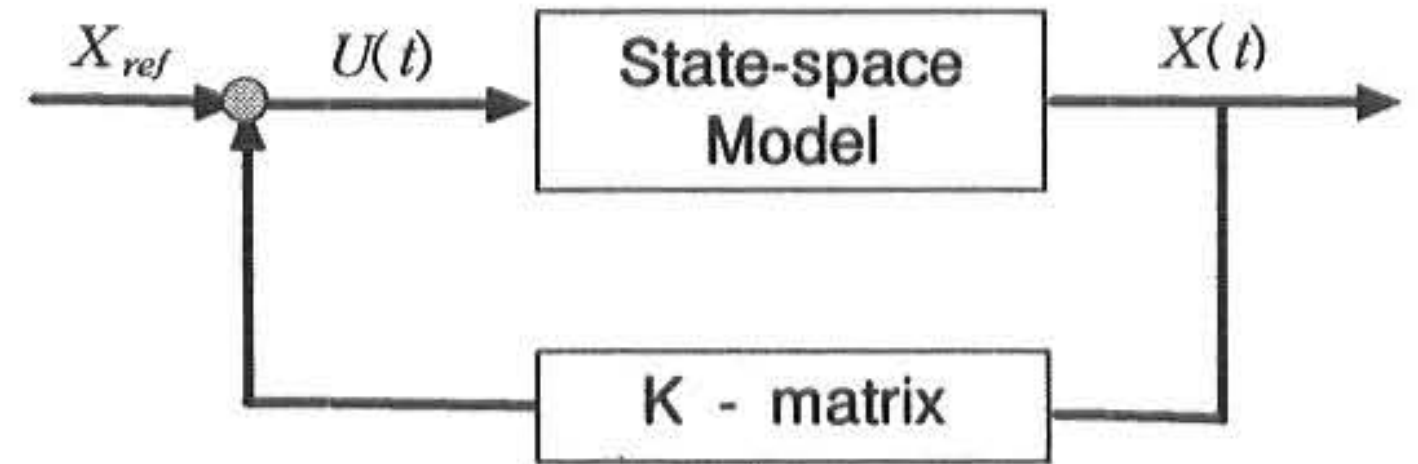


Fig. 5 Block Diagram of Feedback control



우선 원하는 극점(desired pole)의 위치를 다음 식과 같이 결정한다.

$$CP = [-1+j, -1-j, -1, -1.5] \quad (21)$$

이 때 이 극점을 위하여 A-B*K 행렬의 극점이 위의 원하는 극점(desired pole)의 위치가 되도록 이득행렬(gain matrix)을 결정한다. 이렇게 해서 얻은 이득행렬은 다음 식과 같다.

$$K = [-70.8 \quad -1628.9 \quad -188.8 \quad -1502.5] \quad (22)$$

이득행렬을 곱하면 전체의 시스템 행렬은 수정이 되어야 한다. 새로 바뀌어진 시스템 행렬은 다음 식과 같다.

$$AS = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 0.5663 & 28.7274 & 1.5102 & 12.0203 \\ -0.2832 & -9.0663 & -0.7551 & -6.0102 \end{bmatrix}$$

$$BS = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0080 \\ -0.0040 \end{bmatrix},$$

$$CS = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$DS = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

시스템의 행렬에 이득행렬을 곱해서 구해진 새로운 행렬의 극점의 위치는 다음과 같다. 극점의 실수값이 모두 음수이므로 시스템은 모두 수렴하게 된다. 이 극점의 위치를 어떻게 바꾸느냐에 따라 시스템의 응답특성은 변하게 된다.

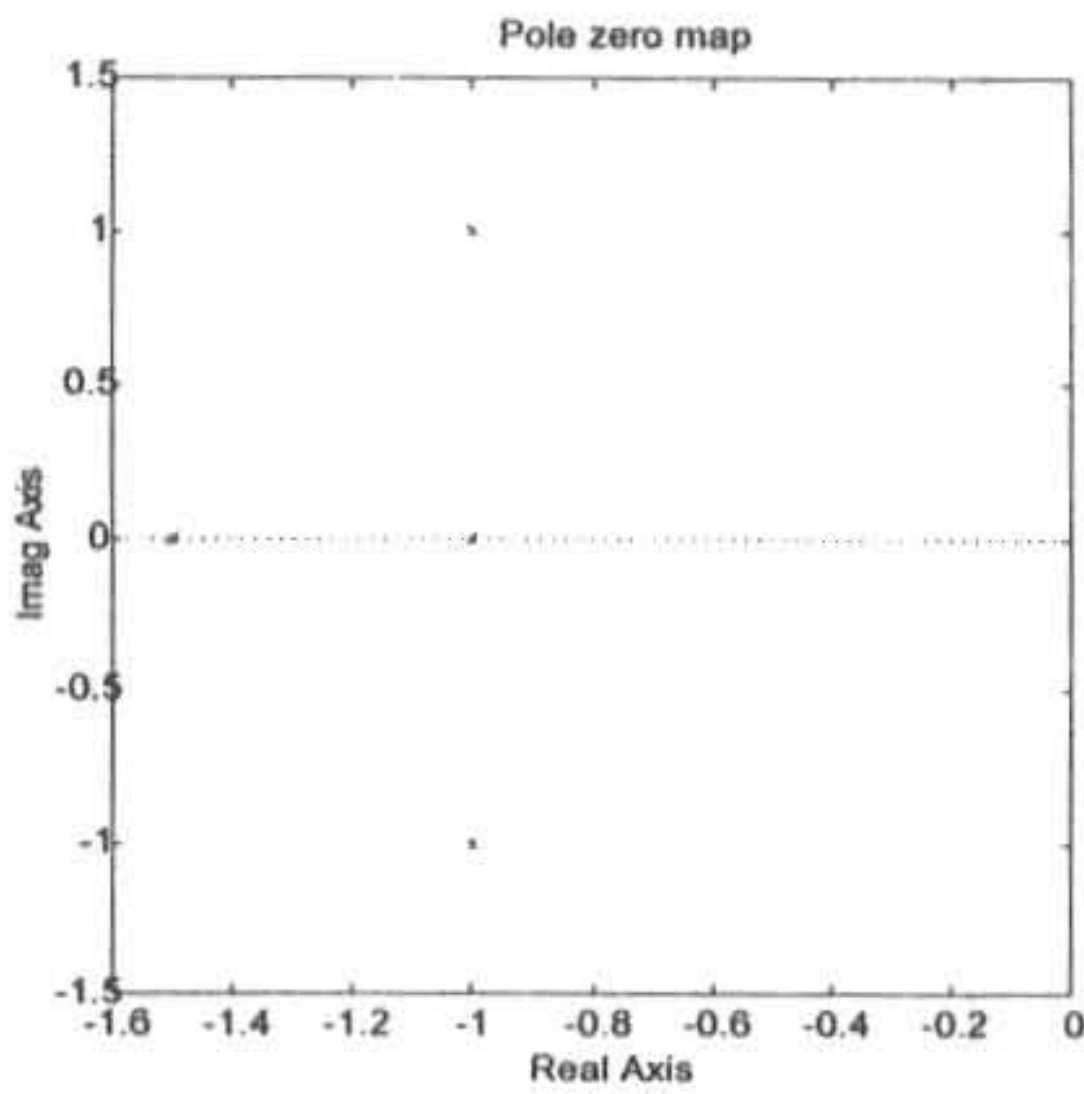


Fig. 6 Real-Imaginary plane

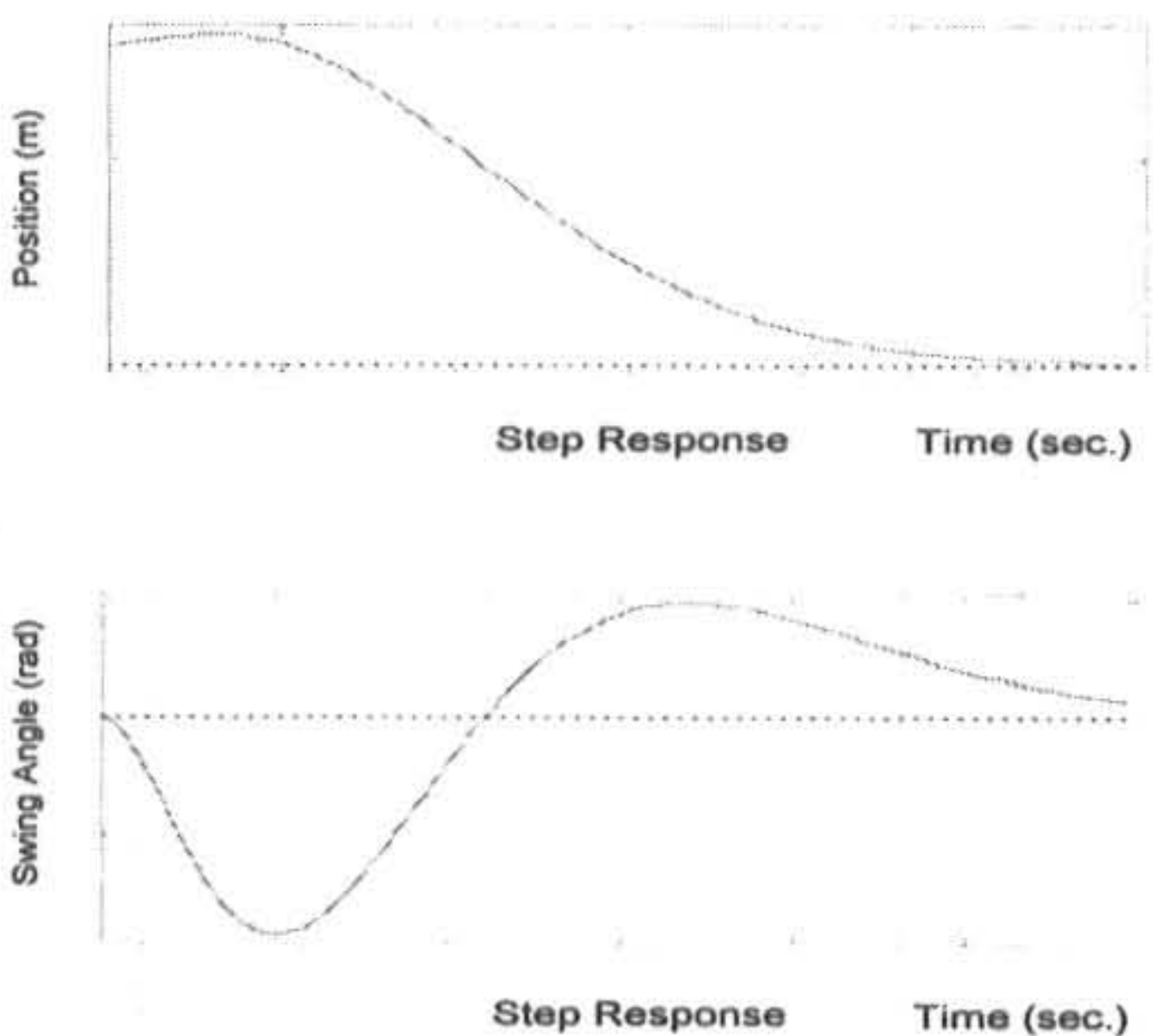


Fig. 7 Step response of feedback system

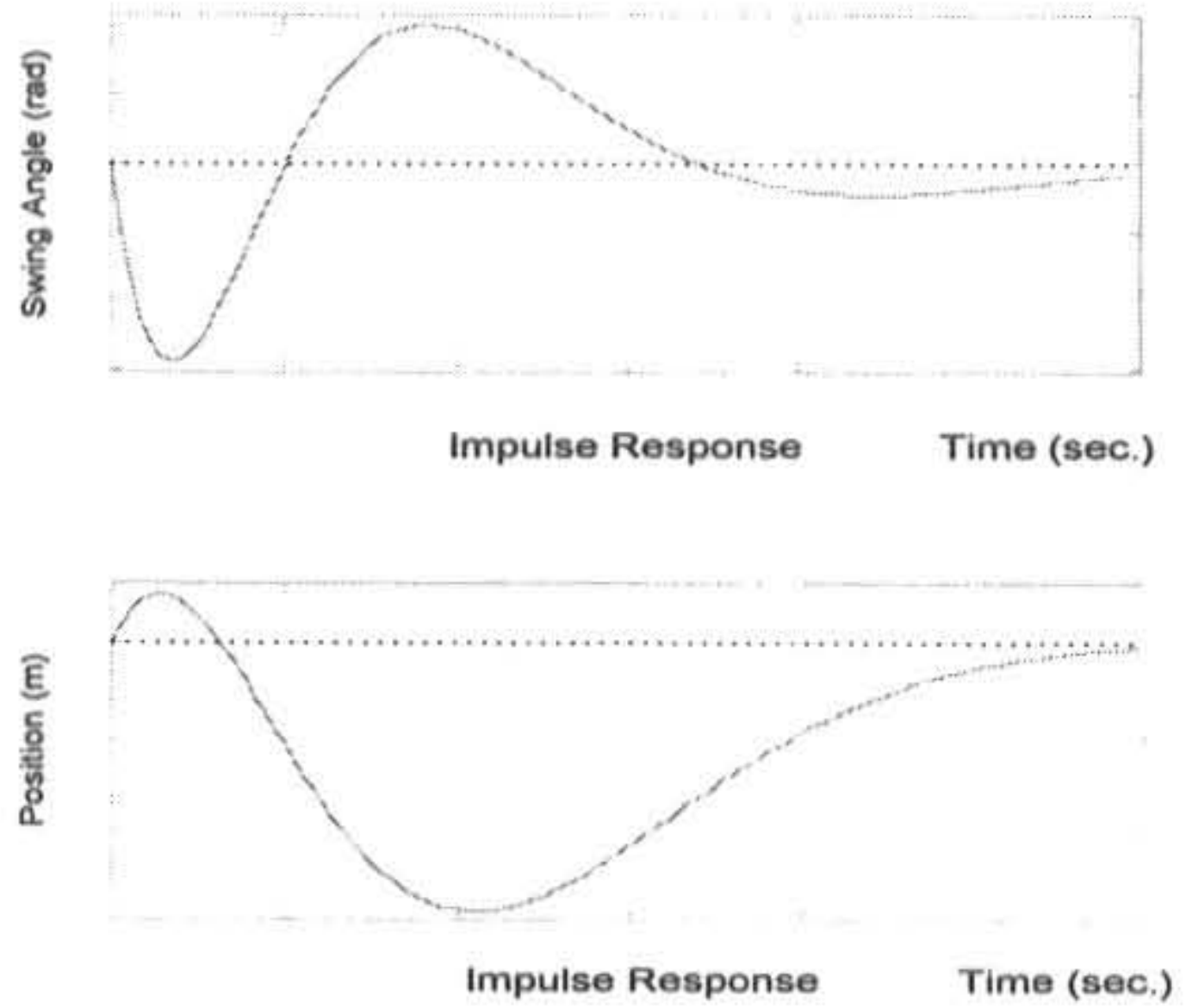


Fig. 8 Impulse response of feedback system

Fig. 7에서 보면 단위 계단 입력에 대해 크레인 시스템은 진동하지 않고 안정된 감쇄특성을 보여주고 있다. Fig. 8은 단위 임펄스 입력에 대해 크레인 시스템은 신속하게 진동을 감쇄시키면서 트롤리의 위치를 제어하는 결과를 보여준다.

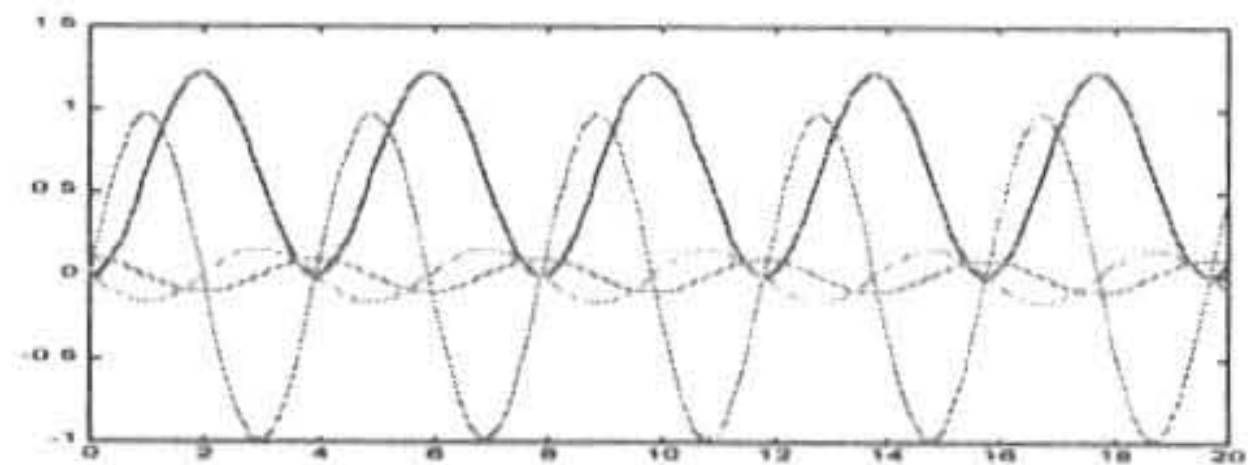


Fig. 9 Response of Open-loop system

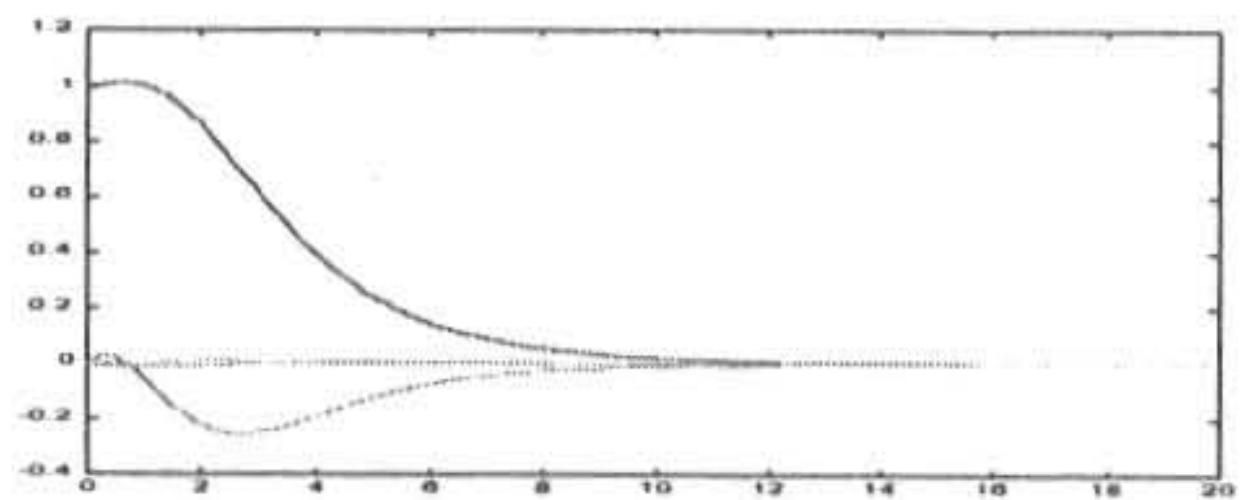


Fig. 10 Response of Closed-loop system

Fig. 9와 Fig. 10은 개회로시스템(open loop system)과 폐회로 시스템(closed loop system)의 응답특성을 비교하기 위한 그래프이다. 개회로시스템에서는 시스템의 모든 변수들이 진동을 일으키고 있다.

4. 결론

컨테이너 크레인의 로프의 흔들림을 감쇄시키고 하역위치에서 대기시간을 줄여 작업시간을 절약하기 위해 극점배치기법을 이용하여 시스템의 상태변수를 궤환시켜 트롤리의 위치와 스프레더의 흔들림각을 적절히 제어하였다. 개발한 제어기를 단위 계단함수 및 단위 임펄스함수에 대해 적용하였으며 다양한 초기값에 대해 적용하여 성능을 확인하였다.

향후 이송중인 크레인의 화물의 흔들림도 제어하는 제어기를 개발한다면 더욱 실용적인 제어기가 될것으로 기대한다.

8. Moustafa. K. A. and Ebeid. A. M, "Nonlinear Modeling and Control of Overhead Crane Load Sway" ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, Vol.110, pp. 266~271, 1988.

9. 이태영, 이상룡, "퍼지를 이용한 비선형 천정 크레인의 진자각제어" 대한기계학회 논문집 제 24권 제 3호, 1999.

10. 홍금식, 손성철 "크레인 진자운동의 시간최적제어에 대한 단계적 접근" 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A) pp.453-457. 1996.

(1999년 6월21일 접수, 1999년 10월15일 채택)

참고문헌

1. Sakawa.Y. and Shindo. Y, "Optimal Control of a Rotary Crane", J. Optimize. Theory Appl., Vol. 35, pp 535~557, 1981.
2. J.W. Auernig and H. Troger, " Time Optimal Control of the Overhead Cranes with Hoisting of the Load" , International Federation of the Automatic control. Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 437~447, 1987.
3. A.J.Ridout,"Anti-swing Control of the Overhead crane using linear feedback" IE Aust., Vol. 9. No. 1/2. pp. 17~26, 1989.
4. F. Boustany, B. d'Andrea-Novel, "Adaptive control of an overhead crane using dynamic feedback linearization and estimation design" IEEE. International Conference on Robotics and Automation, 1992.
5. Masakazu Sakumoto and Toru Hayashi, " ファジイ制御の コンテナ クレーン振れ止め システムへの適用" 日本機械學會 論文集 58卷 550號. pp. 1792~1797, 1996.
6. 윤지섭 , " 무진동 크레인의 구현을 위한 여러 가지 제어방식의 비교연구" 대한기계학회논문집 제 19권 제 9호. pp. 2399~2411, 1995.
7. 정승현, 권판조, 박정일, 이달해 "크레인의 Anti-Swing 및 위치 제어기의 개발" 한국자동제어학술회의 논문집(I) pp. 277~281, 1996.