

축소차수 관측기를 이용한 시소시스템의 PI형 상태피드백 제어

류기탁* · 이윤형** · 유희한*** · 정병건*** · 김종수*** · † 소명옥***

*한국해양수산연수원 교관, **한국해양대학교 자동제어실험실, ***한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수

A PI-type State Feedback Control of Seesaw System Using Reduced-order Observer

Ki-Tak Ryu* · Yun-Hyung Lee** · Heui-Han Yoo*** · Byung-Gun Jung***

· Jong-Su Kim*** · † Myung-Ok So***

*Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Pusan 608-080, Korea

**Automatic Control Lab., National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

***Division of Mechatronics Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문에서는 시소 시스템에 PI형의 상태 피드백 제어기와 축소차수 관측기를 결합한 제어시스템을 적용하여 시소 시스템의 안정화 문제를 다루었다. LQ 이론에 근간을 두는 PI형의 상태 피드백 제어기는 계단상의 외란이나 잡음에 대해 양호한 성능을 가지도록 오차에 대한 새로운 상태변수를 고려한 제어기이다. 축소차수 관측기는 상태변수의 계측이 어려운 경우나 경제적인 이유로 센서의 부착이 어려운 경우에 종종 사용되는데 본 논문에서는 시소 시스템의 각도와 대차의 위치로부터 시소의 각속도와 대차의 속도를 추정하기 위해 사용된다. 여러 초기조건과 외란이 인가되는 환경 하에서 실시한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 목적으로 하는 시소 시스템의 안정화가 가능함을 보인다.

핵심용어 : 시소 시스템, PI형 상태피드백 제어, 축소차수 관측기

Abstract : In this paper, a seesaw system composed with a moving cart on the rail and seesaw frame is made to demonstrate the effectiveness of the control theory. The control aim is to maintain an equilibrium of seesaw frame in spite of various initial conditions and an allowable disturbance. To solve this control problem, a PI-type state feedback controller using reduced-order observer is implemented and applied to the seesaw system. The reduced-order observer can be used to estimate the state variables in the case of the limit of sensor number or the constraint on setting sensors and the cost. A series of simulation are carried out to verify the effectiveness of the control system.

Key words : Seesaw system, PI-type state feedback control, Reduced-order observer

1. 서 론

산업현장의 대부분 장치들은 제어이론을 적용한 자동화를 통해 자동화가 이루어졌다. 이렇게 적용되는 제어이론을 곧바로 장치에 적용하고, 입증하기에는 많은 위험요소가 존재하기 때문에 시뮬레이션이나 모형실험장치를 통해 먼저 검증해야 한다.

여러 가지 제어대상이 제어이론의 검증에 사용되고 있으나, 대표적으로 도립진자 시스템과 시소 시스템(Seesaw system)이 주로 이용된다. 이는 위의 두 시스템은 구조상 불안정하여 제어이론을 쉽게 적용하고 검증할 수 있을 뿐만 아니라, 수학적 모델도 비교적 간단하게 유도할 수 있기 때문이다.

시소시스템은 시소라 불리는 구조물 위에 레일을 설치하고, 이 트랙위에 대차가 좌우로 움직이면서 시소의 평형 상태를 계속 유지시켜 주는 시스템이다. 만약, 이 시소시스템에 적절한 제어입력이 주어지지 않아 대차가 시소의 기울임 각에 따라 이동하지 못하면 시소의 평형은 유지될 수 없다.

따라서 본 논문에서는 제어를 통해 대차를 이동시켜 시소를 피벗 중심으로 평형 상태가 되도록 안정화시키는 문제를 다룬다. 결국, 이러한 문제는 대차를 평형점에 안정되도록 하는 조정기(Regulating) 문제이므로 본 논문에서는 LQ제어 이론을 기반으로 하는 상태 피드백 제어를 적용한다. 이때, 계단상의 외란이나 잡음이 존재하는 환경에서도 시소시스템의 안정화 제어를 위해 PI형의 상태 피드백 제어로 확장한다.

* 대표저자 : 류기탁(정회원), ryukitak@hanmail.net 051)620-5842

** 정회원, domse54@daum.net 051)410-4877

*** 정회원, yoohh@hhu.ac.kr 051)410-4841

*** 정회원, bgjung@hhu.ac.kr 051)410-4269

*** 정회원, jongskim@hhu.ac.kr 051)410-4831

† 교신저자 : 소명옥(중신회원), smo@hhu.ac.kr 051)410-4248

이렇게 구현한 상태 피드백 제어기는 전체 상태변수의 피드백을 요구한다. 그러나 기술적 또는 경제적인 이유로 상태변수의 측정이 곤란한 경우에는 측정신호만으로 나머지 신호를 추정하여야 한다. 이것의 대표적인 방법이 바로 상태관측기인데, Luenberger 상태관측기(Luenberger, 1964; Luenberger, 1971)가 최초의 연구로 알려져 있다. 시소 시스템의 경우 대차의 위치와 시소의 각도는 엔코더로 쉽게 측정이 가능하므로 대차의 속도와 시소의 각속도를 추정하는 축소차수 관측기를 사용한다.

이렇게 구현된 PI형의 상태 피드백 제어기와 축소차수 관측기를 결합한 제어시스템에 대해 다양한 초기조건과 외란이 존재하는 환경 하에서 시뮬레이션을 실시하여 제안한 방법의 유효성을 확인한다.

2. 시소 시스템의 수학적 모델

2.1 대차와 시소의 비선형 운동방정식

시소 시스템은 시소의 트랙 위에 설치되어 있는 대차의 움직임을 조절하여 시소의 균형을 유지하는 구조로 되어 있다. 시소시스템은 시소중양의 피봇점을 중심으로 시소 중심 좌표 (X_s, Y_s) 의 움직임과 레일위에서의 대차 움직임으로 크게 나눌 수 있다. Fig. 1은 시소 시스템의 동역학적 직교 좌표계를 단순화 한 것이다.

이 시스템에서 θ [rad]는 피봇점 수직에 대한 각도, $\dot{\theta}$ [rad/s]는 각속도, x_c [m]는 대차의 레일 위에서의 변위, \dot{x}_c [m/s]는 대차의 속도이다. 대차의 질량을 M_c [kg], 시소 모듈의 중심에 대한 질량을 M_s [kg], 관성모멘트를 J_s [kg·m²], 피봇점과 레일 중심과의 거리를 D_T [m], 피봇점과 시소중심과의 거리를 D_c [m]로 정의한다. 모터 피니언의 점성계동계수를 B_p [N·s/m], 시소피봇점의 마찰에 의한 점성계동계수를 B_s [N·m·s/rad], 중력가속도를 g [m/s²], 대차에 가해지는 힘을 F_c [N]라 가정하여 라그랑지(Lagrange) 방정식을 이용하여 일반화된 좌표 (x_c, θ) 에 대해 모델링한다.

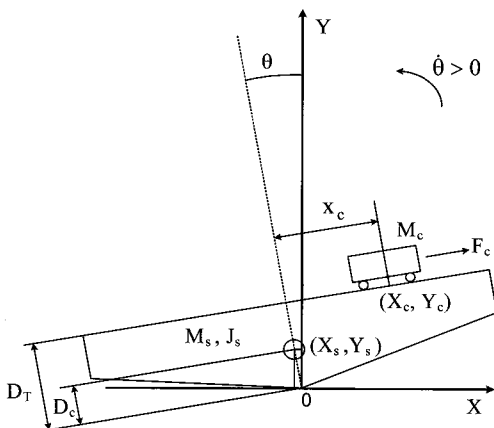


Fig. 1 Coordinate system of a seesaw module system

먼저 대차가 레일 위를 운동할 때 시소와 대차에 대한 중심좌표를 구한다.

시소의 중심좌표는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} X_s &= -D_c \sin\theta \\ Y_s &= D_c \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

다음으로 대차의 중심좌표는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} X_c &= -D_T \sin\theta + x_c \cos\theta \\ Y_c &= D_T \cos\theta + x_c \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

라그랑지 운동방정식을 이용하기 위해 시소시스템의 위치에너지와 운동에너지를 구한다. 시소 시스템의 총 위치에너지는 식 (3)과 같다.

$$V_T = g(M_c D_T \cos\theta + M_c x_c \sin\theta + M_s D_c \cos\theta) \quad (3)$$

한편, 구동모터의 회전 운동에너지를 무시한 시소 시스템의 총 운동에너지를 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} T_T &= \frac{1}{2} M_c \dot{x}_c^2 - M_c D_T \dot{\theta} \dot{x}_c \\ &+ \left(\frac{1}{2} M_c D_T^2 + \frac{1}{2} M_c x_c^2 + \frac{1}{2} J_s \right) \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

이제, x_c, θ 에 대한 라그랑지 방정식을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 쿨롱(Coulomb) 마찰력은 무시한다.

$$\begin{aligned} L &= T_T - V_T \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_c} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_c} &= Q_{x_c}, \quad (Q_{x_c} = F_c - B_p \dot{x}_c) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = Q_\theta, \quad (Q_\theta = -B_s \dot{\theta}) \quad (6)$$

그러면 최종적으로 라그랑지안(Lagrangian) L을 식 (5), 식 (6)에 대입하여 정리하면 시소 시스템은 다음과 같은 2계 비선형 연립 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M_c \ddot{x}_c - M_c D_T \ddot{\theta} - M_c x_c \dot{\theta}^2 + M_c g \sin\theta \\ = F_c - B_p \dot{x}_c \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} -M_c D_T \ddot{x}_c + (M_c x_c^2 + J_s + M_c D_T^2) \ddot{\theta} + 2M_c x_c \dot{x}_c \dot{\theta} \\ - M_c g D_T \sin\theta + M_c g x_c \cos\theta - M_s D_c g \sin\theta = -B_s \dot{\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

또한 F_c 와 구동 모터에 인가되는 전압 u [V]의 관계를 정리하면 식 (9)로 나타낼 수 있다. 여기서 K_m [V/rad/s]는 모터의 토크상수, R_a [Ω]은 모터의 전기자 저항, r_m [m]는 모터의 피니언 반지름, K_g 는 모터의 기어박스내 기어비, K_b 은 모터의 역기전력 상수를 의미한다.

$$F_c = \frac{K_g K_m}{R_a r_m} u(t) - \frac{K_g^2 K_m K_b}{R_a r_m^2} \dot{x}_c(t) \quad (9)$$

2.2 시소 시스템의 상태공간 해석

θ 의 변동이 미소하다고 가정하여 $\theta \cong 0$ 근방에서 선형으로 근사화한 후, 구동부를 제어대상에 포함시켜 \ddot{x}_c 와 $\ddot{\theta}$ 에 관하여 정리하면 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_c = & -\frac{M_c D_T g}{J_s} x_c + \left(\frac{M_s D_T D_c g}{J_s} - g \right) \theta \\ & + \left(-\frac{B_p}{M_c} - \frac{B_p D_T^2}{J_s} - \frac{K_b K_g^2 K_m}{M_c r_m^2 R_a} - \frac{D_T^2 K_b K_g^2 K_m}{J_s r_m^2 R_a} \right) \dot{x}_c \\ & - \frac{B_s D_T}{J_s} \dot{\theta} + \left(\frac{K_g K_m}{M_c r_m R_a} + \frac{D_T^2 K_g K_m}{J_s r_m R_a} \right) u \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -\frac{M_c g}{J_s} x_c + \frac{M_s D_c g}{J_s} \theta + \left(-\frac{D_T B_p}{J_s} - \frac{D_T K_b K_g^2 K_m}{J_s r_m^2 R_a} \right) \dot{x}_c \\ & - \frac{B_s}{J_s} \dot{\theta} + \frac{D_T K_g K_m}{J_s r_m R_a} u \end{aligned} \quad (11)$$

선형으로 표현된 시소 시스템의 전체 운동방정식인 식 (10)과 식 (11)에서 $x=[x_c \ \theta \ \dot{x}_c \ \dot{\theta}]^T$ 로 상태변수를 정의하고, 상태방정식으로 표현하면 식 (12)를 얻을 수 있다. 이때 시소 시스템에 사용된 상수는 Table 1과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (12)$$

단,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.7695 & -9.1618 & -21.6068 & 0 \\ -14.1562 & 5.1856 & -3.8115 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 3.0972 \\ 0.5463 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Table 1 Constants of a seesaw system

Parameter	Value	Parameter	Value
M_s	3.6	K_b	0.00767
K_g	3.71	K_m	0.00767
D_T	0.125	M_c	0.57
D_c	0.058	B_{eq}	4.3
J_s	0.395	R_a	2.6
B_s	0	r_{mp}	0.00635

3. 축소차수 관측기가 결합된 제어기 설계

3.1 PI형의 상태피드백 제어

시소 시스템의 안정화 제어를 위해 사용되는 제어기는 기본적으로 LQR(Linear Quadratic Regulator) 이론에 기반을 둔다. 그러나 계단상의 외란과 잡음이 존재하는 환경에서도 안정한 제어가 되도록 하기 위해 오차 보상을 위한 새로운 상태변수 z 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \int [y - y_r] dt \quad (13)$$

식 (12)의 동적방정식과 식 (13)을 이용하여 확장된 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} y_r \quad (14)$$

식 (14)를 다시 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u + D y_r \\ y &= \hat{C}\hat{x} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{단, } \hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{C} = [C \ 0], \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

확장시스템에 근거하여 식 (16)과 같은 2차형식의 평가함수를 선정할 수 있다.

$$J = \int_0^\infty (\hat{x}^T \hat{Q} \hat{x} + u^T \hat{R} u) dt \quad (16)$$

선정된 2차 형식의 평가함수 J 을 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 상태피드백 제어 입력은 식 (17)과 같다.

$$u = -\hat{R}^{-1} \hat{B}^T \hat{P} \hat{x} = -\hat{K} \hat{x} = -\hat{K}_1 x + \hat{k}_1 \int [y_r - y] dt \quad (17)$$

$$\text{단, } \hat{K} = [\hat{K}_1 \ : \ \hat{k}_1]$$

\hat{P} 는 Ricatti 방정식의 해행렬이며, 식 (17)의 상태피드백 제어 입력은 비례-적분(PI) 제어기의 형태를 갖추고 있다.

3.2 축소차수 관측기 설계

이제 계측이 불가능한 상태변수를 추정하기 위한 축소차수 관

측기를 설계한다. 시소 시스템에서 대차의 위치와 시소의 각도는 엔코더로 쉽게 계측 가능하므로($q=2$), 축소차수 상태관측기는 나머지 $2(n-q)$ 개의 상태만을 추정하면 된다.

식 (12)의 상태방정식은 직접 계측 가능한 출력벡터 x_a 와 측정불가능한 상태벡터 x_b 로 나누어지며, 분할된 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u \quad (18)$$

$$y = \begin{bmatrix} I_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 $A_{aa}(q \times q)$, $A_{ab}(q \times (n-q))$, $A_{ba}((n-q) \times q)$, $A_{bb}((n-q) \times (n-q))$, $B_a(q \times 1)$, $B_b((n-q) \times 1)$ 는 분할된 행렬을 나타내고 $I_q(q \times q)$ 는 단위행렬이다.

식 (18)로부터 계측할 수 없는 상태방정식(축소차수 관측기 상태방정식)과 계측가능한 상태방정식(축소차수 관측기 출력방정식)은 다음 방정식으로 다시 표현된다.

$$\dot{x}_b = A_{ba} x_a + A_{bb} x_b + B_b u \quad (20)$$

$$\dot{y} = A_{ab} x_b \quad (21)$$

여기서 $\dot{y} = \dot{y} - A_{aa} x_a - B_a u$ 이다. 따라서 식 (21)은 기지의 신호 y 와 u 의 함수로 이루어진 것을 알 수 있다. 또한 \dot{y} 는 계측 가능하므로 식 (21)을 출력방정식으로 볼 수 있다.

식 (20)과 식 (21)에 대하여 상태관측기를 설계하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{\tilde{x}}_b = (A_{bb} - L A_{ab}) \tilde{x}_b + A_{ba} y + B_b u + L \dot{y} \quad (22)$$

여기서 L 은 상태관측기 이득행렬이며 $(n-q) \times q$ 의 차원을 갖는 행렬이다.

식 (22)에서 \tilde{x}_b 를 추정하기 위해서는 y 의 미분신호 \dot{y} 가 필요하다. 그러나 계측 가능한 출력신호에 잡음이 포함되어 있다면 \dot{y} 는 잡음을 증폭시키므로 \dot{y} 를 소거하기 위해 새로운 변수 $\tilde{\eta}$ 를 정의한다.

$$\tilde{\eta} = \tilde{x}_b - L y \quad (23)$$

그러면 이를 식 (22)에 대입하고 정리하면 축소차수 관측기는 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\eta}} = H \tilde{\eta} + D y + G u \quad (24)$$

단,

$$\begin{aligned} H &= A_{bb} - L A_{ab} \\ D &= H L + A_{ba} - L A_{aa} \\ G &= B_b - L B_a \end{aligned}$$

또한, \tilde{x} 와 y 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x_a \\ \tilde{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \tilde{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-q} \end{bmatrix} [\tilde{x}_b - L y] + \begin{bmatrix} I_{n-q} \\ L \end{bmatrix} y \quad (26)$$

여기서 0 는 $n-q$ 개의 0으로 구성된 행벡터이며 $N = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-q} \end{bmatrix}$,

$M = \begin{bmatrix} I_{n-q} \\ L \end{bmatrix}$ 이라 정의하면, \tilde{x} 를 다음과 같이 $\tilde{\eta}$ 와 y 로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x} = N \tilde{\eta} + M y \quad (27)$$

Fig. 2는 이렇게 구성한 제어시스템을 나타내고 있다.

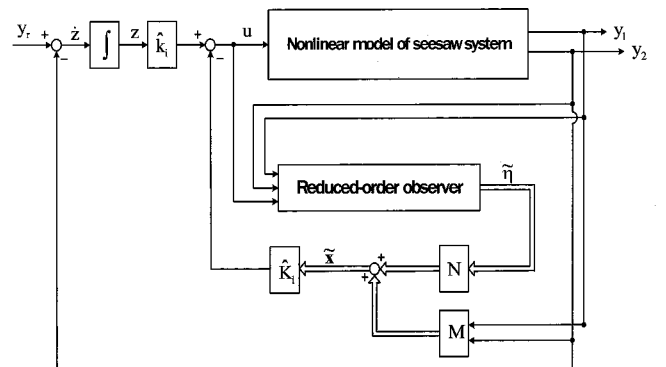


Fig. 2 The observer-based control system of a seesaw

4. 시뮬레이션

여기에서는 축소차수 관측기가 결합된 PI형 상태피드백 제어기를 식 (7)과 식 (8)로 표현된 비선형 시소 시스템에 적용하고, 0.01[s]의 샘플링 시간으로 시뮬레이션을 실시하여 제어 성능을 검토한다.

우선 PI형의 상태피드백 제어기의 이득을 구하기 위하여 하중행렬 \hat{Q} 와 하중계수 \hat{R} 을 바라는 제어응답이 되도록 시뮬레이션을 거쳐 다음과 같이 선정하였다.

$$\hat{Q} = \text{diag}(970, 2780, 0, 0, 8450), \quad \hat{R} = 6.3, \quad (28)$$

그러면, 이득행렬 \hat{K} 은 식 (29)와 같고, 페루프 시스템은 고 유치가 모두 s평면의 좌반 평면에 존재하는 안정한 시스템이 된다. 한편, 축소차수 관측기를 설계하기 위해 페루프 시스템의 극점에 5배(김, 1993)정도로 관측기의 이득행렬 L 을 구하면 식 (30)과 같다.

$$\hat{K} = [102.53 \quad -100.98 \quad 8.78 \quad -31.71 \quad -36.62] \quad (29)$$

$$L = \begin{bmatrix} -10.44 & 0.0 \\ -3.81 & 11.17 \end{bmatrix} \quad (30)$$

4.1 축소차수 관측기의 성능 검토

제안한 제어시스템의 유효성을 살펴보기 전에 우선 축소차수 관측기가 시스템의 상태를 잘 추정하는지 살펴본다. Fig. 3은 비선형 시소 시스템과 축소차수 관측기의 응답을 나타낸 것으로 관측기의 초기치는 0이고, 시스템이 $x_0 = [-0.05 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0]^T$ 의 상태에서 제어될 때의 응답이다.

그림에서 축소차수 관측기는 초기치의 차이에도 불구하고 빠른 시간 안에 시소 시스템의 상태를 잘 추정하고 있다.

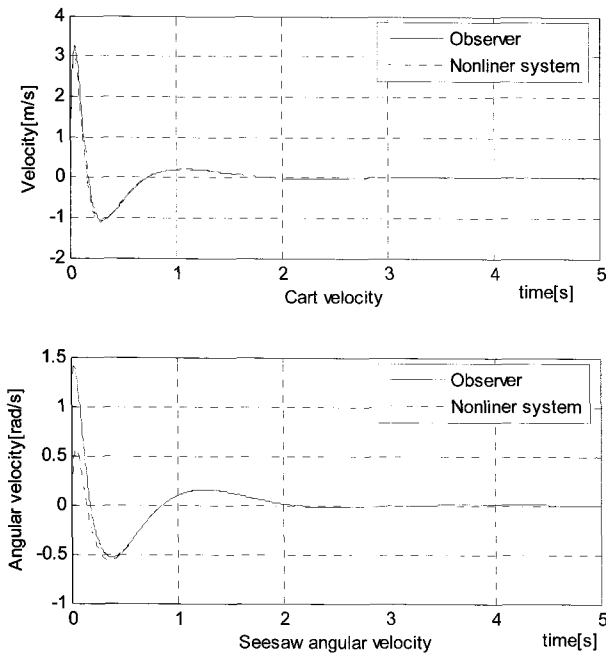


Fig. 3 Responses of the nonlinear system and the reduced-order observer

4.2 초기조건 변화에 대한 검토

축소차수 관측기가 시스템의 상태를 잘 추정하는 것을 확인하였으므로, 이제는 관측기가 결합된 PI형 상태피드백 제어기의 성능을 확인한다.

우선 초기조건에 대한 제어성능을 살펴보기 위해 시스템이 $x_0 = [-0.05 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0]^T$ 인 상태에서 제어를 시작하였다. 이 초기조건은 시소의 기울어진 방향에 대차가 위치한 것으로, 시소

의 안정화를 위한 조건 중에서 가장 가혹한 조건에 해당한다. 제안된 제어시스템은 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 가혹한 초기조건에 대해서도 약 2.5[s] 이내에서 시소의 평형을 이루고 있다.

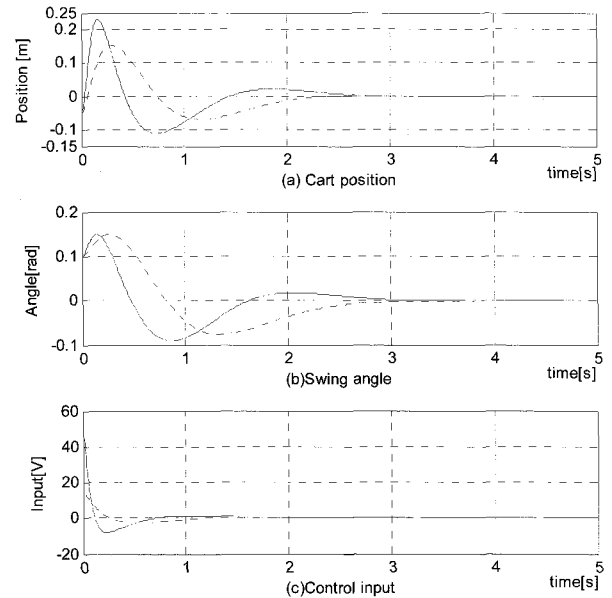


Fig. 4 Responses of the observer-based PI type state feedback controller(solid line) and PI type state feedback controller(dotted line)

(Initial values $x(0) = [-0.05 \quad 0.10 \quad 0 \quad 0]^T$ and $\tilde{x}_b = [0 \quad 0]^T$)

한편, 점선은 관측기를 사용하지 않고 PI형 상태피드백 제어만을 시행한 경우로 관측기 기반의 상태피드백 제어와 유사한 결과를 보이고 있다. 그러나 만약 기술적 또는 경제적인 이유로 상태변수의 측정이 곤란한 경우에는 상태피드백 제어기는 사용이 어려우므로, 본 연구에서 사용하는 관측기가 결합된 상태피드백 제어기가 유용하게 사용될 수 있다.

4.3 외란에 대한 검토

다음은 제어시스템의 운전 중에 발생할 수 있는 외란에 대한 제어성능을 살펴본다. 외란에 대해서 시소 시스템이 평형을 유지할 수 있는지를 확인하기 위해 시소가 평형점을 찾아가는 과도상태와 평형점을 찾은 정상상태에서 외란을 인가한다. 이를 위해 과도상태인 1.0[s]시점에서 $-0.05[\text{rad}]$ 크기의 각을 인가하고 평형을 찾은 후 5.0[s]에서 $0.12[\text{rad}]$ 크기의 외란을 가하였다.

Fig. 5는 과도상태와 정상상태에 주어진 외란에 대해 관측기 기반의 상태피드백 제어기가 3[s]를 전후해 시소의 평형을 이루고 있는 것을 보여준다. 점선은 관측기를 사용하지 않은 상태피드백 제어기로 제안한 제어기와 유사한 결과를 보이고 있다.

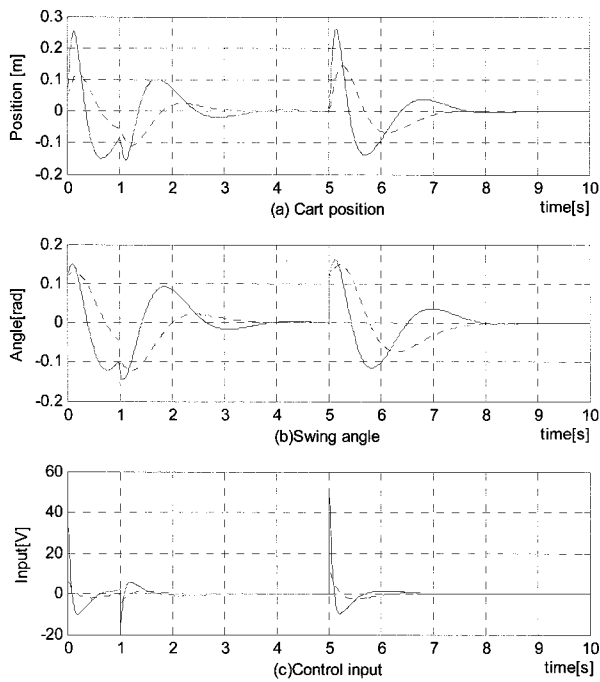


Fig. 5 Responses of the observer-based PI type state feedback controller(solid line) and PI type state feedback controller(dotted line)

(Initial values $x(0)=[0.05 \ 0.12 \ 0 \ 0]^T$ and $\tilde{x}_i=[0 \ 0]^T$,
Disturbance: $-0.05[\text{rad}]$ at $1.0[\text{s}]$ and $0.12[\text{rad}]$ at $5.0[\text{s}]$)

5. 결론

본 연구에서는 계단상의 외란과 잡음이 존재하는 환경 하에서도 양호한 제어가 이루어지도록 PI형의 상태피드백 제어기를 설계하고, 계측하는 상태변수를 제외한 나머지 상태만을 추정하는 축소차수 관측기를 제어기에 결합하여 시소 시스템에 적용하였다. 시뮬레이션을 통해 초기조건의 변화와 과도상태 및 정상상태에서 외란이 주어지는 경우에도 빠르게 수평을 유지하는 것을 확인하였다. 이 방법은 상태 변수의 측정이 어렵거나 고가의 센서를 설치해야하는 제어 환경에서 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

이후에는 이러한 시뮬레이션 결과를 토대로 실제 모형실험 장치에 제어기를 설계하여 그 성능을 확인하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 김종식(1993), "선형제어시스템공학", 청문각.
- [2] Luengberger, D. G.(1964), "Observing the State of a Linear System," IEEE Trans. on Military Electronics", Vol. MIL-8, pp. 74-80.
- [3] Luengberger, D. G.(1971), "An Introduction to Observers", IEEE Trans. on, Automatic Control, Vol. AC-16, No. 6, pp. 596-602.
- [4] QUANSER User Manual. Liner Motion Servo Plants : IP01 and IP02, Seesaw

원고접수일 : 2007년 8월 16일

원고채택일 : 2007년 12월 24일