

SESIP 시스템의 스윙업과 안정화 제어

소명옥¹ · 유희한² · 류기탁³ · 이윤형⁴ · 이종환[†]

(원고접수일 : 2009년 9월 28일, 원고수정일 : 2010년 1월 4일, 심사완료일 : 2010년 3월 12일)

Swing-up and Stabilization Control of a SESIP System

Myung-Ok So¹ · Heui-Han Yoo² · Ki-Tak Ryu³ · Yun-Hyung Lee⁴ · Jong-Hwan Lee[†]

요약 : 본 논문은 전형적 비선형 시스템인 셀프 이렉팅 도립진자 시스템의 스윙업과 안정화에 대한 제어 방법을 제안한다. 펜던트 상태의 진자를 PV 제어기를 이용하여 스윙업 시키고, 진자가 적절한 위치에 도달했을 경우 PI형 상태피드백 제어기로 스위칭하여 진자가 넘어지지 않게 유지시키도록 한다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기법의 유효성을 확인한다.

주제어 : 셀프 이렉팅 도립진자 시스템, 스윙업, 안정화, 스위칭, PV 제어기, PI형 상태피드백 제어기

Abstract: In this paper, we propose a method for swing-up and stabilization of a SESIP(Self-Erecting Single Inverted Pendulum) system which is one of the typical nonlinear systems. We use PV(Proportional velocity) controller for swinging up the pendulum and employ a PI-type state-feedback controller for stabilizing the pendulum. Control is switched to a stabilizing controller, which is designed to balance the inverted position of pendulum and the cart position to the near vertical position. Computer simulations are performed to illustrate the control performance of the proposed scheme.

Key words: swing-up, stabilization, PV controller, PI-type state-feedback controller, SESIP system

1. 서 론

도립진자 제어는 도립된 불안정한 진자를 넘어지지 않게 하기 위해 대차를 좌우로 움직여 진자의 평형을 유지하게 하는 것으로 많은 연구가 이루어졌다[1,2]. 그러나 진자를 초기의 도립상태로 유지하는 것 보다 초기에 진자가 안정하게 정하방 상태에서 스윙업을 거쳐 도립시킨 후 평형을 유지하는 제어는 좀 더 복잡한 제어문제이다. 이러한 진자의 스윙업(Swing-up)과 안정화(Stabilization) 제어는 많은 비선형 연구 중 매력적인 과제이며 현대

제어이론의 유효성을 검증하는 예로서[3][4] 폭넓게 사용되고 있다. 이와 유사한 형태의 제어기법을 응용한 연구로 2링크 아크로벳 로봇을 3단계 제어로 구분하여 스윙과 도립자세를 실행한 연구가 있다[5].

SESIP(Self-Erecting Single Inverted Pendulum) 시스템은 레일위에서 모터로 구동되는 대차와 대차의 피벗(Pivot)에 연결되어 자유롭게 움직이는 진자로 구성된다. 제어입력은 대차의 구동 모터에 인가되는 전압이며, 이를 통해 대차가

† 교신저자(로이드선급, E-mail:seasame@hanafos.com, Tel:051)702-3421)

1 한국해양대학교 선박전자기계공학부

2 한국해양대학교 선박전자기계공학부

3 한국해양수산연수원 국제교육팀

4 한국항만연수원 부산연수원

좌우로 움직여 진자의 움직임을 제어하게 된다. 이 시스템의 초기 상태는 진자가 안정하게 아래 방향으로 향하고 있으며 이를 펜던트 위치(Pendant position)라 한다.

SESIP 시스템 제어의 최종 목적은 펜던트 상태에서부터 진자를 스윙업시켜 수직의 평형점 부근에 도달했을 때 진자를 도립된 상태로 안정화 시키는 것에 있다. 동시에, 안정화 시킨 후에는 대차를 레일 위의 일정 위치에 유지시키거나 대차 위치의 변화에 대해서도 진자를 넘어지지 않게 해야 한다.

본 논문에서는 이를 위해 안정화 단계 전에 작동하는 스윙업 제어기와 안정화 이후에 작동하는 안정화 제어기를 구분하여 설계하기로 한다. 이때 적용한 스윙업 제어기와 안정화 제어기로는 각각 PV(Proportional-velocity) 제어기와 PI형의 상태피드백 제어기이다. PV 제어기는 제어 초기에 대차의 기준위치를 변경시켜 대차에 매달려 정지되어 있는 안정한 상태의 진자를 흔들려 불안정하게 하여 도립위치까지 흔드는 것이 주목적인 제어기이다. PI형의 상태피드백 제어기는 진자가 도립된 이후에 진자를 지속적으로 안정화 시켜주는 제어기이다. PI형의 상태피드백 제어기를 적용하여 대차의 기준위치 변화에 대해서도 대차가 주어진 위치에 잘 추종할 수 있도록 하였다. 여기서 중요한 설계 요소는 스윙업 제어기를 통해 진자가 흔들려 수직의 적절한 상태에 도달했을 때 제어기의 상호 전환이 정확하게 이루어져야 한다는 것이다. 본 논문에서는 이를 위해 진자가 수직 위치인 $\pm 180^\circ$ 부근에서 두 제어기가 스위칭 되도록 설계하였는데, 이를 통해 진자가 $\pm 180^\circ$ 부근에 위치하면 안정화 제어가 작동하여 마치 초기각도가 존재하는 도립진자의 안정화 제어 문제로 바뀔 수 있도록 고안하였다.

제안한 일련의 방법은 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 확인한다.

2. SESIP 시스템의 모델링

SESIP 시스템은 **Figure 1**과 같이 스윙업(Swing-up)과 안정화 부분(Stabilizing)의 2가지 중요한 구성으로 나누어 볼 수 있다. 따라서 이

에 대한 각도의 정의도 구분되어야 한다.

우선 SESIP 시스템 진자의 전체각도 θ_i 는 **Figure 1**과 같이 진자가 정하방 위치에서 0° 로 정의한다. 진자가 아래쪽에 있을 경우(Swing-up)에는 진자의 각도를 θ_d 로 하고 θ_i 와 같이 정하방 위치를 0° 로 정의한다. 도립된 상태(Stabilizing)에서는 진자의 각도를 θ_u , 정수직 위치를 0° 로 정의한다. 또한, 모든 각의 증가는 반시계 방향을 양의 각으로 정의한다.

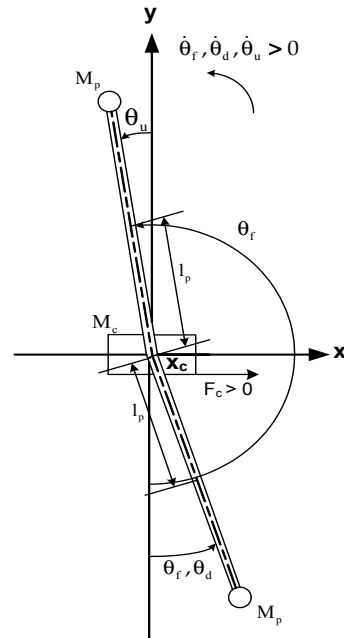


Figure 1: Angle definitions of a SESIP system (Pendulum "Full" angle)

2.1 SESIP 시스템의 비선형 운동방정식

SESIP 시스템은 앞에서 설명한대로 대차 앞에 있는 진자가 정수직 하방의 위치에서 대차를 움직여 진자를 움직이는 스윙업 제어를 거쳐 도립된 진자를 제어하는 것으로 구성되어 있다.

SESIP 시스템은 정하방에 정지해 있는 진자를 흔들려 도립시킨 후 넘어지지 않게 하는 것으로 정하방에 있을 경우를 **Figure 2**와 같이 동역학적 절대 직교 좌표계로 단순화하여 이 좌표로부터 운동 방정식을 유도하기로 한다.

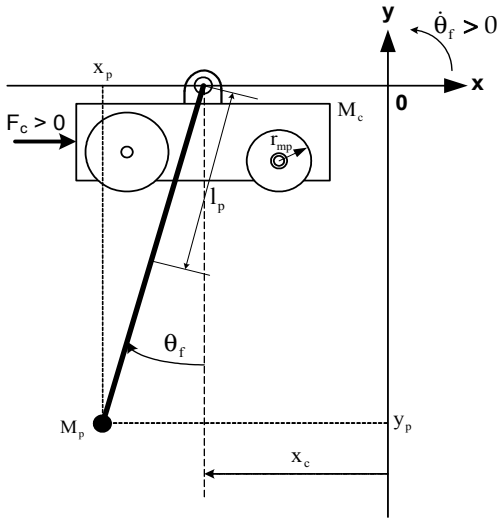


Figure 2: Coordinate system of a SESIP system

여기서 x_c [m]는 대차의 위치, \dot{x}_c [m/s]는 대차의 속도, θ_f [rad]는 진자의 각도, $\dot{\theta}_f$ [rad/s]는 각속도이다. 또한 대차의 질량 $M_c=1.0731$ [kg], 진자의 질량 $M_p=0.230$ [kg], 진자 중심까지의 길이 $l_p=0.3302$ [m], 중력가속도 $g=9.81$ [m/s²], 모터 피니언 점성감쇠계수 $B_{eq}=5.4$ [N·s/m], 진자 축 점성감쇠계수 $B_p=0.0024$ [N·m·s/rad], 진자의 관성모멘트 $I_p=0.00788$ [kg·m²]이고, 대차에 가해지는 힘을 F_c [N]라 한다.

비선형 운동방정식은 라그랑지 방정식을 이용하여 절대 좌표계에서 식 (1)과 식 (2)와 같이 2계 비선형 연립 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$(M_c + M_p)\ddot{x}_c + M_p l_p \ddot{\theta}_f \cos\theta_f - M_p l_p \dot{\theta}_f^2 \sin\theta_f = F_c - B_{eq}\dot{x}_c \quad (1)$$

$$M_p l_p \ddot{x}_c \cos\theta_f + (I_p + M_p l_p^2)\ddot{\theta}_f + M_p g l_p \sin\theta_f = -B_p \dot{\theta}_f \quad (2)$$

또한 F_c 와 구동모터에 인가되는 전압 u [V]의 관계를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$F_c = \frac{K_g K_t}{R_m r_{mp}} u - \frac{K_g^2 K_m K_t}{R_m r_{mp}^2} \dot{x}_c \quad (3)$$

여기서 역기전력 상수 $K_m=0.00767$ [V·s/rad, N·m/A], 모터 토크상수 $K_t=0.00767$ [N·m/A], 기어박스비 $K_g=3.71$, 전기자 저항 $R_m=2.6$ [Ω], 모터의 피니언 반지름 $r_{mp}=0.00635$ [m]이다.

2.2 스윙업을 위한 시스템 모델

여기서는 SESIP 시스템을 스윙업하기 위해 대차를 좌우로 흔들어 진자를 도립시키는데 필요한 대차 모델을 전달함수 형태로 유도한다. 스윙업 제어기 설계에 있어서 대차에 매달려 있는 진자는 무시하고 제어 시스템은 대차에 대해서만 고려하므로 대차 시스템 모델의 입출력은 Figure 3과 같다.

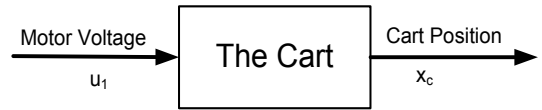


Figure 3: The cart input and output

우선 대차의 움직임에 있어 D'Alembert의 원리와 함께 뉴턴의 제2법칙을 적용하면 대차의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M_c \ddot{x}_c + F_{ai} = F_c - B_{eq} \dot{x}_c \quad (4)$$

단, $M + J_m \left(\frac{K_g}{r_{mp}} \right)^2 = M_c$ 로 나타낼 수 있으며 쿨롱의 마찰력은 무시한다. M 은 구동부를 제외하고 여분의 무게를 포함한 대차의 질량이며, J_m [kg·m²]은 모터 회전자 관성 모멘트로 $3.9e-7$ 의 값을 갖는다. 대차의 구동력(F_c)과 모터 회전과 대차의 움직임에 기인한 전기자 관성력(F_{ai})은 다음과 같다.

$$F_c = \frac{K_g K_t}{R_m r_{mp}} u_1 - \frac{K_g^2 K_m K_t}{R_m r_{mp}^2} \dot{x}_c \quad (5)$$

$$F_{ai} = \frac{K_g^2 J_m}{r_{mp}^2} \ddot{x}_c \quad (6)$$

식 (4)에 식 (5)와 식 (6)을 대입하여 입력(전압, u_1)에 대한 출력(대차 위치, x_c)의 개루프 전달함수로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{x_c}{u_1} = \frac{r_{mp} K_g K_t}{(R_m M_c r_{mp}^2 + R_m K_g^2 J_m) s^2 + (K_g^2 K_t K_m + B_{eq} R_m r_{mp}^2) s} \quad (7)$$

2.3 도립진자 시스템의 선형모델

SESIP 시스템이 진자의 스윙업을 거쳐 도립된 상태에서의 모델 즉, 도립진자 시스템의 모델은 2.1절의 2차 비선형 연립 미분방정식에서 θ_f 가 $\pm 180^\circ$ 의 위치에 있는 것과 동일하다. 따라서 도립진자 시스템 모델은 2.1절의 2차 비선형 연립 미분방정식에 각도를 θ_f 에서 θ_u 로 변환하고, θ_u 의 변동이 미소하다고 가정하여 $\theta_u \cong 0$ 근방에서 선형으로 근사화하면 쉽게 얻을 수 있다^{[6][7]}.

3. 제어 시스템 설계

SESIP 시스템은 Figure 4와 같이 2개의 제어 시스템과 이 두 개를 스위칭 시켜 주는 의사결정 로직으로 구성된다. 한 제어기는 진자를 스윙업(Swing-up)하기 위해 대차 위치를 조작하는 제어 루프로서 PV 제어기를 사용하고, 다른 하나는 도립된 진자를 수직으로 유지시켜 주는 제어루프로서 도립진자의 안정화를 위한 LQR 이론에 기반을 둔 PI형의 상태피드백 제어기이다.

3.1 PV 제어기(스윙업 제어기)

3.1.1 기준입력의 선정

스윙업을 위한 대차의 기준위치(x_d) 선정은 진자를 흔들어 도립시키기 위해 초기의 정지된 진자를 불안정하게 하는 것이 주목적이다. 본 논문에서는 대차 기준위치 선정에 3가지 요소를 감안한다. 먼저 진자의 스윙업시의 각도(θ_d)에 적절한 이득값(K_{pd})을 곱한 값을 사용한다.

$$x_{d1} = -K_{pd} \theta_d \quad (8)$$

그러나 이때에는 각도 θ_d 가 0이 아닐 경우에만 활성화되므로 정지된 상태에서 진자를 스윙업하기 위해 초기위치를 고려하여 다음과 같이 한다.

$$x_{d2} = \frac{K_{xd2} s}{\tau_{ks} s + 1} \quad (9)$$

여기서 K_{xd2} 는 대차 초기 시발점 이득값이며, τ_{ks} 는 1차시간지연 상수이다.

마지막으로 짧은 시간 내에 진자 스윙업을 이루기 위해 스윙업 초기에 일정 기간동안 식 (8)에 일정한 이득값을 곱한 값을 사용한다.

$$x_{d3} = K_{xd3} x_{d1} \quad (10)$$

상기의 각 이득값은 시행착오를 거쳐 적절한 값 ($K_{pd}=9.0$, $K_{xd2}=0.03$, $\tau_{ks}=0.05$, $K_{xd3}=4.9$)을 선택하며, 최종적인 기준위치 x_d 의 선정은 위 세항목의 합으로 식 (11)과 같이 결정된다.

$$x_d = x_{d1} + x_{d2} + x_{d3} \quad (11)$$

3.1.2 PV 제어기 이득 산정

제어기를 설계하기 위해 페루프 전달함수를 영점이 없는 일반적인 2차 지연 시스템으로 다음과 같이 고려한다.

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

PV 제어기를 설계하기 위해 두가지 요소를 고려하는데 하나는 위치오차에 대한 비례이득(K_p)과 다른 하나는 대차 현재 위치의 미분값인 속도에 대한 비례이득(K_v)이며 PV 제어기 출력은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1 = K_p(x_d - x_c) - K_v \dot{x}_c \quad (13)$$

PV 제어기의 이득을 구하기 위해 식 (7)과 식 (13)을 이용하여 식 (12)와 같은 형태의 페루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{x_c(s)}{x_d(s)} = \frac{C}{As^2 + Bs + C} \quad (14)$$

여기서 $A = R_m M_c r_{mp}^2 + R_m K_g^2 J_m$,

$$B = K_g^2 K_t K_m + K_g K_t K_v r_{mp} + B_{eq} R_m r_{mp}^2,$$

$$C = K_t K_g K_p r_{mp} \text{ 이다.}$$

그러면 서로 등가인 식 (12)와 식 (14)를 서로 비교하여 ω_n 과 ζ 에 대해 정리하고, K_p 와 K_v 를 구

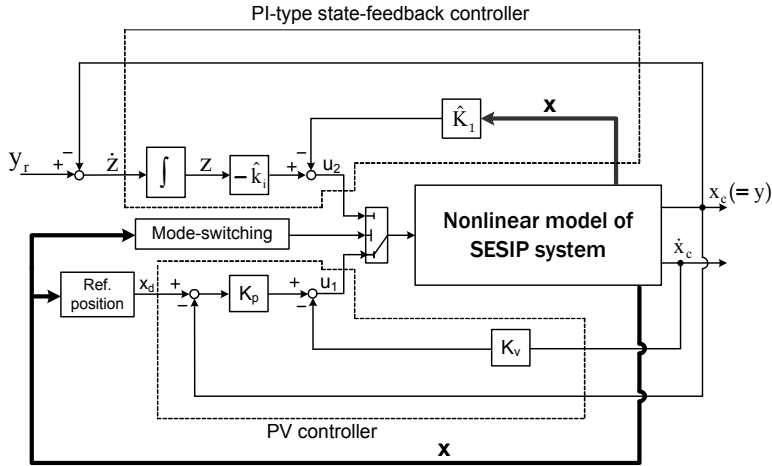


Figure 4: Block diagram of SESIP control system

하면 다음과 같으며 Figure 4의 PV 제어기로 표시하였다.

$$K_p = \frac{\omega_n^2 R_m (M_c r_{mp}^2 + K_g^2 J_m)}{r_{mp} K_g K_t} \quad (15)$$

$$K_v = \frac{2\zeta\omega_n R_m M_c r_{mp}^2 + 2\zeta\omega_n R_m K_g^2 J_m}{r_{mp} K_g K_t} + \frac{-K_g^2 K_t K_m - B_{eq} R_m r_{mp}^2}{r_{mp} K_g K_t} \quad (16)$$

여기서 $\zeta = \frac{\left| \ln\left(\frac{PO}{100}\right) \right|}{\sqrt{\ln\left(\frac{PO}{100}\right)^2 + \pi^2}}$, $\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1-\zeta^2}}$ 이다.

3.2 PI형 상태피드백 제어기(안정화 제어기)

상태피드백 제어기는 계단상의 외란과 잡음이 존재하는 환경에서도 안정한 제어가 되도록 오차 보상기를 이용한 PI형 상태피드백 형태를 적용한다. 이 제어기는 이전의 연구[6,7]에서 종종 사용되었던 형태로서 제어기 출력을 나타내면 다음과 같고, Figure 4의 PI형 상태피드백 제어기로 표현할 수 있다.

$$u_2 = -\hat{K}_1 x - \hat{k}_i \int (y_r - y) dt \quad (17)$$

3.3 스위칭 조건

스윙업 제어와 안정화 제어의 상호 스위칭은 진자의 적정한 도립위치와 각속도 등을 고려해야 한다.

우선 스윙업 제어를 적용하여 θ_f 가 $\pm 180^\circ$ 부근에 접근했을 때 안정화 제어로 전환해 주어야 하는데 이 때 다음과 같은 조건을 고려하였다.

- 가. 진자 각도 θ_u 는 $\pm 15^\circ$ 이내에 있어야 한다.
- 나. 실제 실험 상황을 고려하여 대차가 제어시작점(트랙중앙)에서 $\pm 20cm$ 이내에 있어야 한다.
- 다. 진자 각속도 $\dot{\theta}_u$ 는 150 deg/s를 넘지 않아야 한다.

다음으로 안정화 제어에서 스윙업 제어로 전환될 경우를 고려한다. 안정화 제어 중 진자에 큰 외란이 발생한다면 진자는 넘어지게 되고, 이때는 곧바로 스윙업 제어로 전환되어 다시 진자를 도립시킬 수 있어야 한다. 즉, 진자 각도 공차가 너무 크거나 대차가 너무 멀리 있거나 진자의 움직임 속도가 너무 빠르다면 시스템은 스윙업 제어로 전환된다.

4. 시뮬레이션 및 검토

4.1 스윙업 제어기의 이득

우선 스윙업 제어대상의 전달함수를 구하기 위해 식 (7)에 Quanser사에서 제공하는 IP02장치의 계수들을 사용하여 다음을 얻을 수 있다^[8].

$$G(s) = \frac{0.0001807}{0.0001265 s^2 + 0.001376 s} \quad (18)$$

다음으로 퍼센트 오버슈트 PO와 최대상승시간 t_p 는 각각 5%와 0.2sec로 선정한다. 식 (15)와 식 (16)에 PO와 t_p 및 각 파라미터를 대입하여 제어기 이득 K_p , K_v 를 구하면 다음과 같다.

$$K_p = 329.7082 [V/m] \quad (19a)$$

$$K_v = 13.3519 [V \cdot s/m] \quad (19b)$$

4.2 안정화 제어기 이득

SESIP 시스템에서 진자가 도입된 상태에서 이를 안정시키기 위한 PI형의 상태피드백 제어기를 설계하기 위한 선형모델은 2.3절의 모델에 Quanser사⁽⁸⁾에서 제공하는 IP02장치의 계수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.5216 & -11.6329 & -0.0049 \\ 0 & 26.1093 & -26.8035 & -0.0841 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.5278 \\ 3.5202 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1000] \mathbf{x} \quad (20)$$

식 (20)의 선형모델을 안정화시키기 위하여 PI형의 상태피드백 제어기를 구한다. 양의 반한정 행렬 \hat{Q} 와 양의 하중계수 \hat{R} 을 시행착오적으로 식 (21)과 같이 선정하였다.

$$\hat{Q} = \text{diag}(0.4, 0.01, 0, 0, 20), \quad \hat{R} = 0.0002 \quad (21)$$

이로부터 피드백 이득행렬 \hat{K} 를 산정하면 식 (22)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\hat{K} = [-238.5496 \quad 223.7510 \quad -94.4296 \quad 46.4687 \quad -316.2278] \quad (22)$$

4.3 제어시스템의 응답특성

최종적으로 제어기의 유효성을 확인하기 위해 2.1절에 언급된 비선형 SESIP 시스템에 설계된 제어기를 적용 하며, 시뮬레이션은 MATLAB 7.0 버전의 m-file로 프로그래밍 하였으며 샘플링 시

간은 0.01[s]이다.

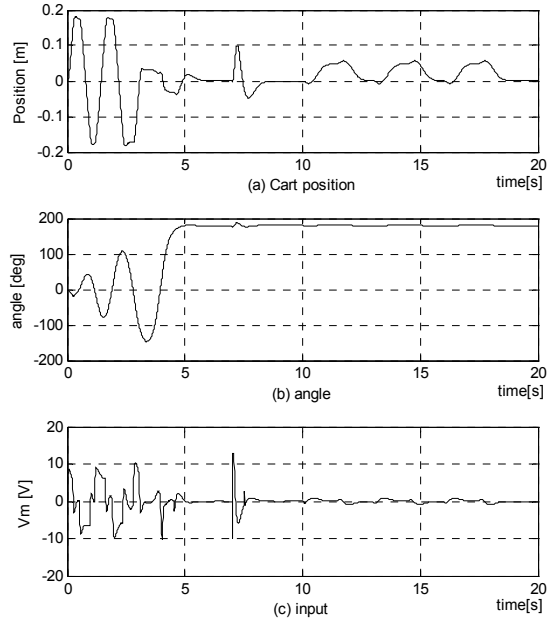


Figure 5: Responses of swing-up and stabilization with disturbance about angle and cart position to a square wave(Dist.: 5[deg] at 7.0[s], square wave of amplitude: 50[mm] from 10.0[s] to 19.0[s])

Figure 5는 진자의 스윙업과 안정화 제어 동안 x_c 와 θ_f 의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 처음 진자가 펜던트(Pendant) 위치에서 대차의 진동(Oscillation)에 의해 스윙업 되기 시작한다. 4.54초까지 PV 제어기에 의해 진자가 스윙업 되어 도입되며 이후 PI형 상태피드백 제어기에 의해 진자가 안정된다. 안정화된 상태인 7.0[s]에서 각도(θ_f)에 $+5^\circ$ 의 외란을 인가한 경우에도 대차와 진자 모두 잘 안정화 되고 있다. 10.0[s]에서 19.0[s]까지 0.33[Hz] 50[mm]크기의 구형파 입력력을 가했을 경우에 안정된 제어성과 추종성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 6은 진자가 펜던트 위치에서 도입된 후 각도(θ_f)에 대해 과도한 외란이 가해졌을 경우 제어성을 확인하기 위해 10.0[s]에 -50° 의 외란을 가하였다. 제어기는 상태피드백 제어기에서 PV 제어기로 전환되어 대차의 진동에 의해 진자가 처음

도립된 방향과 반대 방향으로 재도립되어 14.33초에 완전히 상태피드백 제어기에 의한 안정화 제어로 변환되어 안정된 제어성능을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

제어입력은 실제입력전압을 고려하여 $\pm 13[V]$ 로 제한하였다.

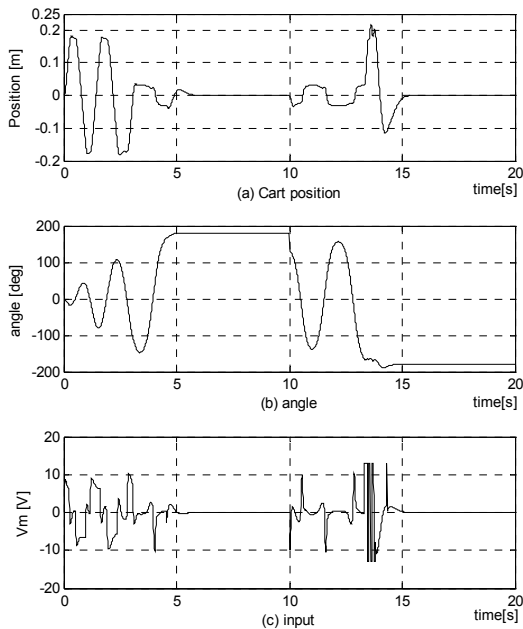


Figure 6: Responses of swing-up and stabilization with disturbance about angle(Dist.: $-50[deg]$ at $10.0[s]$)

5. 결 론

본 논문에서는 SESIP 시스템의 비선형 운동방정식을 도출하고, PV 제어기를 이용한 스윙업 제어와 PI형 상태피드백 제어기를 이용한 안정화 제어를 비선형 운동방정식에 적용하여 진자가 정지상태에서 도립상태로 되어 안정화되는 제어시스템을 제안하였다.

PV 제어기가 대차를 진동시켜 진자는 자연적인 펜던트 상태에서 도립되며, 상태피드백 제어기에 의해 도립된 진자의 균형을 유지하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이때 대차의 추종성능도 함께 확인하였으며, 진자 각도(θ_f)에 대한 과도한 외란에 대해서도 양호한 제어성능을 보이는 것을

확인하였다.

제안한 기법은 시뮬레이션을 통해 정상상태와 외란이 주어지는 경우에도 진자가 적절하게 제어되는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 강문성, "도립진자 시스템의 강인 제어기 설계", 청주대학교 산업과학연구, vol. 23, no. 2, pp. 159-165, 2006.
- [2] 소명옥, 류길수, "도립진자 시스템의 뉴로-퍼지 제어에 관한 연구", 한국박용기관학회지, vol. 20, no. 4, pp. 333-341, 1996.
- [3] K. Yoshida, "Swing-up control of an inverted pendulum by energy-based methods", Proceedings of the American Control Conference, pp. 4045-4047, 1999.
- [4] M. Bugeja, "Non-linear swing-up and stabilizing control of an inverted pendulum system", EUROCON 2003 Ljubljana, 2003.
- [5] 남택근, 소명옥, 박진길, "아크로벳 로봇의 정준형과 도립제어", 한국박용기관학회지, vol. 26, no. 4, pp. 432-438, 2002.
- [6] 안중갑, 이윤형, 유희한, 소명옥, 진강규, "RCGA를 이용한 도립진자 시스템의 파라미터 추정 및 안정화 제어", 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 6호, pp. 746-752, 2006.
- [7] 이윤형, 안중갑, 진강규, 소명옥, "상태관측기를 이용한 도립진자 시스템의 제어", 한국마린엔지니어링학회지, vol. 31, no. 4, pp. 462-467, 2007.
- [8] Quanser user manual. Liner Motion Servo Plants : IP02, SESIP, 2005.

저 자 소 개



소명옥(蘇明玉)

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과 석사, 1997년 동 대학원 박사. 한국항만·운송노동연구원 연구위원. 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수. 현재 한국 해양대학교 선박전자기계공학부 교수.



유희한(柳熙漢)

1956년 1월생. 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사). 1982~1989년 한국기계연구소 선임연구원, 1991~1998년 포항공대 가속기연구소 선임연구원. 2003~2004

년 Idaho State University 파견교수, 1998년~현재 한국해양대학교 해사대학 선박전자기계공학부 교수.



류기탁(柳基倬)

2001년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2008년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과(석사). 현재 한국해양수산연수원 전임강사



이윤형(李潤炯)

2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부(공학사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사), 2007년 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학(박사). 현재 한국항만연수원 부산연수원 교수



이종환(李宗桓)

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사), 2008년 한국해양대학교 메카트로닉스공학과 석사과정. 1986~1997 대우조선근무, 1993~1996 잠수함건조감독(독일 HDW조선소), 현재 로이드선급협회 검사관.