

선형 상태 관측기의 실용화 검증을 위한 도립진자 시스템의 출력 피드백 제어 실험

The Output Feedback Control of Inverted Pendulum Systems for The Verification of Practical Use of Linear State Observers

이종연 · 조규정 · 현창호*

Jong-Yeon Lee, Kyu-Jung Cho and Chang-Ho Hyun*

공주대학교 전기전자제어공학부

요 약

본 논문은 선형 상태 관측기의 성능 및 실용화 검증을 위하여 도립진자 시스템의 출력 피드백 제어 실험을 수행하였다. 도립진자 시스템으로는 (주)셈웨어의 CEM-IP-01를 실험에 사용하였다. 동역학 해석을 위하여 라그랑지안 방정식 및 자코비안 선형화 방법을 이용하였고, 모의실험을 통하여 일반 상태 피드백 제어기의 출력 응답과 제안된 제어기의 출력 응답을 먼저 비교 분석하였다. 마지막으로 실제 도립진자 시스템에 적용함으로써 제어기 구현에서 발생하는 문제점을 파악하고 해결함으로써 실용화 가능성을 직접 확인하였다.

키워드 : 도립진자, 라그랑지안, 자코비안, 상태 관측기, 출력피드백제어, 실용화

Abstract

In this paper, the output feedback control of inverted pendulum systems is experimented for the practicality verification of the linear state observer. For the experiment, a pendulum system, CEM-IP-01 of Cemware Inc. is used and Lagrange equation and Jacobian linearization are adopted for the dynamic analysis of the pendulum system. In addition, the output responses of the state feedback control and the output feedback control of the pendulum system are compared before the experiment by Matlab. Finally, we directly verify the practical use of the linear state observer by recognizing and solving some real problem to control the inverted pendulum system in practice.

Key Words : Inverted pendulum, Lagrangian, Jacobian, State observer, Output feedback control

1. 서 론

도립진자 시스템은 불안정한 동적 구조를 가지고 있는 비선형 시스템이자 제어공학에서 널리 사용되고 있는 대표적인 시스템이다. 도립진자시스템은 막대기를 손바닥 위에 세우는 동작과 비유하여 종종 묘사 된다. 이 제어시스템은 자동화 장비나 로봇 시스템에 유용하며 최근에는 로켓 발사대, 주행로봇, 인공위성, 자세제어 등의 기반이 되는 연구 시스템으로 활용범위가 다양하다. 이러한 연구의 중요성으로 인해서 도립진자 시스템은 오래전부터 제어 대상으로 연구되어 왔다.[1-3]

진자를 넘어뜨리지 않는 이러한 자세제어를 위해서는 시스템의 정확한 동역학 해석이 필요하다. 이러한 비선형 시스템을 제어하는데 있어서는 많은 학문적 연구와 이해를 필요로 한다. 그러나 다행히도 도립진자 시스템의 제어 연구

는 폭넓게 진행되어 왔기 때문에 그것의 선형 모델 또한 널리 알려져 있으며, 실제로 많은 공학도들이 이를 바탕으로 선형제어이론 실험을 진행해 온 것이 사실이다. 하지만, 대부분의 공학도들이 여러 가지 이유로 인해 PID 제어나 상태피드백 제어를 실험해 보는데 그치게 된다.

선형제어이론을 소개하는 많은 교재들을 들여다보면 제어성과 관측성의 쌍대성에 대한 내용이 언급되면서 상태 피드백 제어기 설계와 상태관측기 설계에 대한 내용이 후반부에 항상 소개되는 것을 볼 수 있다.[2,4,5] 그러면서 상태관측기에 대해서 센서측정이 불가능하거나 적당한 센서가 없는 경우, 입력과 출력을 이용하여 시스템의 상태를 관측함으로써 실제 제어하는데 유용하게 쓰인다고 소개하고 있다.

본 논문에서는 선형제어이론을 배우는 학부 공학도로서 선형 상태 관측기를 설계하고 이것을 기반으로 한 도립진자 시스템의 출력 피드백 제어를 실제 수행해 보고, 실제로 발생하는 문제점을 분석, 해결함으로써 선형 상태 관측기의 성능 및 실용성을 검증한다.

실험을 위해서 (주)셈웨어의 CEM-IP-01 도립진자 시스템을 사용하였고, 사용된 도립진자 시스템의 동역학 해석을 위하여 라그랑지 방정식과 자코비안 선형화를 이용하여 시스템의 모델을 구한다. 또한, 실험하기 전 Matlab을 이용한 상태 피드백 제어기를 이용한 도립진자 시스템의 제어출력

접수일자 : 2010년 12월 30일

완료일자 : 2011년 4월 15일

본 논문은 2011년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/에너지지립형 그린빌리지 핵심기술사업단)

+교신저자

신호와 선형 상태 관측기 기반의 출력 피드백 제어기를 이용한 그것의 제어출력신호를 비교 분석한다. 마지막으로 설계한 선형 상태 관측기 기반의 출력 피드백 제어기를 CEM-IP-01에 직접 적용함으로써 실제 발생하는 문제점을 파악하고 분석하면서 선형상태관측기의 성능 및 실용성을 검증한다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 2장에서 시스템 모델링을 소개하고, 3장에서 시스템 해석, 4장과 5장에서 각각 상태 피드백 제어기 설계와 상태 관측기 설계에 대해서 나타낸다.

2. 시스템 모델링

도립진자 시스템은 그림 1과 같이 나타낸다.

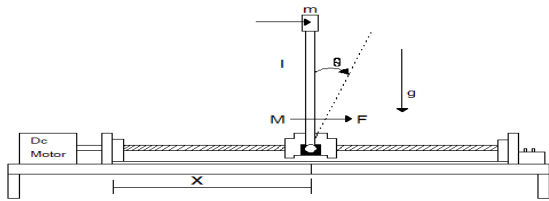


그림 1. 도립진자 시스템
Fig. 1. Inverted Pendulum

표1. 모델링을 위한 파라미터

Table1. Parameters for modeling

파라미터정의	
m	진자의 무게
M	수평링크의 무게
l	진자의 길이
g	중력가속도
X	수평링크의 움직임반경
F	진자에 가해지는 힘
θ	진자와 수직면과의 각도

도립진자 시스템은 모터의 회전력이 폴리와 벨트를 통해 직선운동을 하는 카트에 진자를 연결하여 연결된 진자를 카트의 직선운동을 통해 진자에 병진운동을 발생시켜 진자를 수직으로 세워 유지하는 제어를 하려 한다. 그러기 위해서는 먼저 도립진자 시스템을 직선운동을 하는 카트와 병진운동을 하는 진자로 나누어 라그랑지안 운동방정식으로부터 비선형 방정식을 유도한다. [6]

2.1 도립진자 시스템의 라그랑지 방정식 유도

다음의 라그랑지안(Lagrangian) 동역학식을 이용하여 라그랑지안을 구하고 그것으로부터 라그랑지안 방정식을 유도할 수 있다.

$$L = K - P \quad (1)$$

여기서 K 는 운동에너지를 나타내고, P 는 위치에너지를 나타낸다. 운동에너지와 위치에너지는 그림 1의 동역학 해석을 통해 구하도록 한다.

2.1.1 운동에너지(K)

운동에너지는 $\frac{1}{2}mv^2$ 이고, 속도는 위치를 미분하여 얻을 수 있으므로 우선 위치를 다음과 같이 구하였다.

$$r = (x + l \sin \theta) i + l \cos \theta j \quad (2)$$

위에서 얻은 도립진자의 위치를 다음과 같이 미분하여 v 로 놓고 다음과 같이 속도를 얻었다.

$$v = \frac{dr}{dt} \quad (3)$$

$$v = (\dot{x} + l \cos \theta \dot{\theta}) i - (l \sin \theta \dot{\theta}) j \quad (4)$$

이를 수평링크의 운동에너지와 진자의 운동에너지의 합으로 전체 도립진자 시스템의 운동에너지를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + l^2 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta) \\ &= \frac{1}{2} (M + m) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.2 위치에너지(P)

카트는 수직운동을 하지 않고 수평 운동만을 하기 때문에 위치에너지는 '0'이다. 따라서 진자의 위치에너지만 고려한다. 진자의 위치에너지는 다음과 같다.

$$P = mgl \cos \theta \quad (6)$$

따라서 최종적으로 라그랑지안, 식(1)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$L = \frac{1}{2} (M + m) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) - mgl \cos \theta \quad (7)$$

다음 식(8),(9)을 이용하여 최종 라그랑지안 동역학식을 라그랑지안 방정식으로 풀어준다.[1]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (9)$$

라그랑지 방정식을 풀어 \ddot{x} 와 $\ddot{\theta}$ 관한 식으로 나열하면 다음과 같다.

$$\ddot{x} = \frac{F - mg \cos \theta \sin \theta + ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{M + m - m \cos^2 \theta} \quad (10)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-F \cos \theta - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta + (M + m) g \sin \theta}{(M + m) l - ml \cos^2 \theta} \quad (11)$$

2.4 선형화

식(10)과 식(11)에서 얻은 동역학식은 비선형 방정식이다. 여기에 선형제어기를 적용하기 위해서는 주어진 비선형 방정식을 선형화하여야 한다. 본 논문에서는 자코비안 선형화(Jacobian linearization)를 통하여 유도된 비선형 식을 선형화하여 표현한다. 자코비안 선형화란 자코비안 행렬을 이용하여 비선형함수를 미분한 뒤 변화율로 나타내는 것을 말한다.[6]

자코비안 선형화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= h(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= f(x(t), u(t), t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$A(t) := \frac{\partial h}{\partial x} := \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \frac{\partial h_1}{\partial x_3} & \frac{\partial h_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \frac{\partial h_2}{\partial x_3} & \frac{\partial h_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial h_3}{\partial x_1} & \frac{\partial h_3}{\partial x_2} & \frac{\partial h_3}{\partial x_3} & \frac{\partial h_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial h_4}{\partial x_1} & \frac{\partial h_4}{\partial x_2} & \frac{\partial h_4}{\partial x_3} & \frac{\partial h_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad B(t) := \frac{\partial h}{\partial u} := \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial u_1} \\ \frac{\partial h_2}{\partial u_1} \\ \frac{\partial h_3}{\partial u_1} \\ \frac{\partial h_4}{\partial u_1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

도립진자 시스템 모델의 선형화를 위하여 다음과 같이 변수를 지정한다.

$$x_1 = x, \quad x_2 = \dot{x}, \quad x_3 = \theta, \quad x_4 = \dot{\theta} \quad (14)$$

위와 같이 지정한 후 모든 변수를 한 눈에 알아볼 수 있는 장점을 가진 상태공간 표현법으로 나타내기 위하여 각 미분 방정식을 아래와 같이 h_2 와 h_4 로 지정한다.

$$h_2 = \ddot{x} = \frac{F - mg \cos \theta \sin \theta + ml \theta^2 \sin \theta}{M + m - m \cos^2 \theta} \quad (15)$$

$$h_4 = \ddot{\theta} = \frac{-F \cos \theta - ml \theta^2 \sin \theta \cos \theta + (M + m)g \sin \theta}{(M + m)l - ml \cos^2 \theta} \quad (16)$$

지정된 변수 h_2 와 h_4 를 자코비안 선형화에 의해 편미분하여 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같은 선형 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (17)$$

$$x = [x \quad \dot{x} \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T \quad (18)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)g}{ml} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{-1}{Ml} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \quad (19)$$

3. 시스템 해석

3.1 가제어성 판별

모델링이 되어 수치를 적용시킨 시스템이 제어가능한지를 판단하는 방법이다. 임의의 시간 내에 초기치 $x(t_0)$ 를 알고 목표치를 달성할 수 있는 입력 $u(t)$ 를 알 수 있을 때, '제어가능하다' 라고 한다. 가제어성 판별법은 다음 식을 이용하여 판별한다.[2]

$$q = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (20)$$

$rank(P) = n, rank(P) < n$ 확인한 결과 rank가 4로 full rank 이면 제어가능하다.

3.2 가관측성 판별

유한시간 내에 출력 $y(t)$ 와 입력 $u(t)$ 를 가지고 유일한 초기상태 $x(t_0)$ 를 알 수 있을 때 관측가능하다. 다음에 관측가

능 판별식을 이용하여 시스템의 관측여부를 판단 한다.[2]

$$rank[Q] = rank \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (21)$$

만약, 시스템의 관측가능성 행렬 계수(rank)가 시스템의 차수(n)와 동일하면 full rank로 관측 가능하다.

4. 제어기 설계

제어기 설계란 시스템이 제어가능과 관측 가능함을 확인한 상태에서 피드백을 통해 시스템의 극점을 원하는 응답곡선을 가질 수 있는 열린 좌 반면 내의 임의의 위치로 이동시키는 피드백 이득을 구하는 것을 말한다. 본 논문에서는 제어기 설계를 위해 극점 배치법(pole placement technique)을 사용하였다. 극점 배치법을 사용하기 위해서 Phase-variable form의 변환 방법을 이용하여 제어이득 K 값을 구하였다. 식(20)의 q 행렬을 이용하여, 제어기를 설계하기 전에 시스템의 특성을 한 눈에 알아볼 수 있고 K 값을 적용시킬 수 있는 Phase-variable form으로 변환하여 변환된 상태방정식에 $u = -Kx$ 를 적용시켜 제어이득 K 를 구한다.

시스템을 다음의 Phase-variable form으로 유도한다.

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

위 Phase-variable form의 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^4 + a_4s^3 + a_3s^2 + a_2s + a_1 = 0 \quad (23)$$

원래의 행렬을 식(22)의 형태로 변환한다.

$$A_c = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad B_c = T^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

변환된 Phase-variable form에 $u = -Kx$ 를 적용시킨 Phase-variable form은 다음과 같다.

$$A - BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(a_1 + k_1) & -(a_2 + k_2) & -(a_3 + k_3) & -(a_4 + k_4) \end{bmatrix} \quad (25)$$

위 Phase-variable form에 $u = -Kx$ 를 적용시킨 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^4 + (a_4 + k_4)s^3 + (a_3 + k_3)s^2 + (a_2 + k_2)s + (a_1 + k_1) = 0 \quad (26)$$

5. 상태관측기 설계

극점 배치법에 있어 상태 피드백 제어기는 모든 상태변수를 알고 있다는 가정 하에서 사용된다. 하지만, 실제적으로는 상태변수를 정확히 파악하기란 쉬운 일이 아니다. 따라서 측정 가능하지 않은 상태변수 값을 출력 신호만으로 추정하는 방법인 상태 관측기(State observer)는 매우 유용하게 사용될 수 있다. 식(17)에 제시된 상태방정식을 고려했을 때 상태방정식에서 상태변수 x 가 측정되지 않는다면 상태 피드백 제어법칙 $u = -Kx$ 를 실행시킬 수 없다. 하지만, 추정된 상태변수를 \hat{x} 으로 놓으면 상태피드백 제어법칙 $u = -K\hat{x}$ 를 구성할 수 있게 된다. 식(27)은 상태 관측기의 구조를 나타낸다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x} - Du) \quad (27)$$

여기서 L 은 이득 행렬이다. 식(27)에 $u = -K\hat{x}$ 를 대입시킴으로써 관측기가 추가되어진 보상기(compensator)의 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{x}} = [A - LC - (B - LD)K]\hat{x} + Ly \quad (28)$$

상태관측기의 추정오차를 $e = x - \hat{x}$ 로 정의 하면 \dot{e} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ &= Ax + Bu - A\hat{x} - Bu - L(y - C\hat{x} - Du) \quad (29) \\ &= A(x - \hat{x}) - LC(x - \hat{x}) = (A - LC)e \end{aligned}$$

따라서 상태방정식에 $u = -K\hat{x}$ 를 대입시켜 정리하면 다음의 상태 관측기가 설계가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax - BK\hat{x} = Ax - BK(x - e) \\ &= (A - BK)x + BKe \quad (30) \end{aligned}$$

6. 실험 및 결과 고찰

본 논문의 모의실험을 위해 사용한 초기 파라미터 값을 표2에 나타내었다.

표 2. 초기 파라미터 값
Table 2. Initial values of parameters

파라미터정의	값	단위
m 진자의 무게	1	Kg
M 수평링크의 무게	1	Kg
l 진자의 길이	1	m
g 중력가속도	9.8	m/s^2
X 수평링크의 움직임반경	1.5	m
F 진자에 가해지는 힘		N
θ 진자와 수직면과의 각도		rad

모델링된 식에 파라미터 값을 대입시켜 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 20 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} u, y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (31)$$

목표로 하는 극점이 다음과 같을 때,

$$(s + 10)(s + 10.1)(s^2 + 4s + 16) = 0 \quad (32)$$

$$s^4 + 24.1s^3 + 197.4s^2 + 726.6s + 1616 = 0 \quad (33)$$

$u = -Kx$ 를 적용시킨 Phase-variable form을 이용하여 목표로 하는 극점 값과 비교하여 K 값을 구하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_c - BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1616 & -726.6 & -197.4 & -24.1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

설계된 제어기를 모의실험 한 결과 다음 그림 2, 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

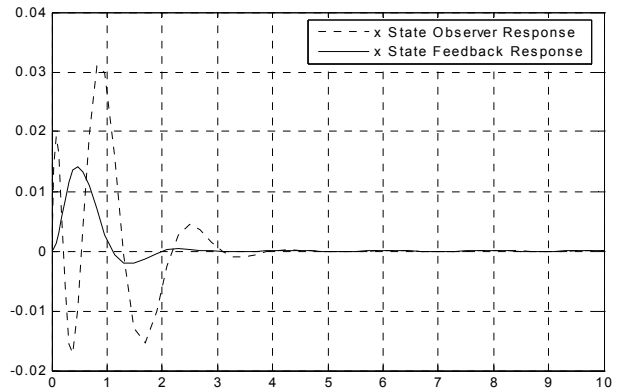


그림 2. x 에 대한 상태관측기와 피드백제어기의 응답
Fig. 2. Response of Feedback controller and state observer for x

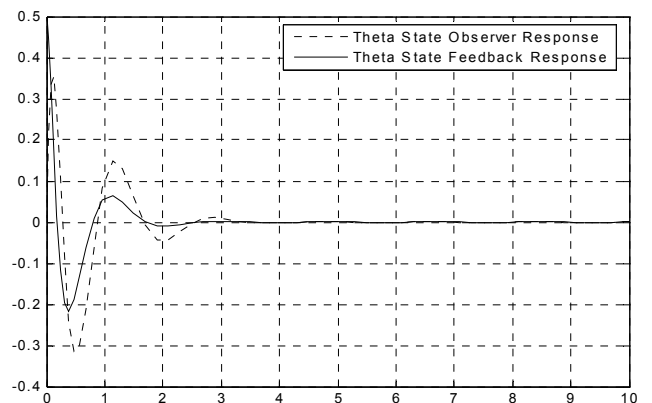


그림 3. θ 에 대한 상태관측기와 피드백제어기의 응답
Fig. 3. Response of Feedback controller and state observer for θ

그림 2, 3은 x 와 θ 에 관한 일반 피드백 제어기의 출력과 상태 피드백 제어기를 추가한 출력 응답을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 상태 관측기 기반의 출력 피드백 제어 응답이 과도응답에서 상태 피드백 제어보다 출렁임이 심함을 보여주고 정착시간 또한 약 2초 정도 늦는 것을 알 수 있으나, 일반 상태 피드백 제어기의 출력과 출력 피드백 제어기의 출력 모두 약 4초 후에 0으로 수렴함을 모의실험 결과로 분석할 수 있다.

실제 실용화 가능성 실험을 위하여 출력 피드백 제어기를 (주)셈웨어의 CEM-IP-01에 적용하여 보았다. 다음 그림 4와 5는 CEM-IP-01에 적용한 실험 결과이다. 실제 시스템에 적용한 그림4는 상태 관측기 기반의 출력제어로 도립진자를 세운 것을 보여준다. 그림5는 도립진자의 움직임에 따른 출력파형을 볼 수 있다. 도립진자가 세워짐에 따라 그에 따른 출력 파형은 0으로 수렴함을 나타내고 있다.



그림 4. CEM-IP-01의 적용 결과
Fig. 4. Applied response to the CEM-IP-01

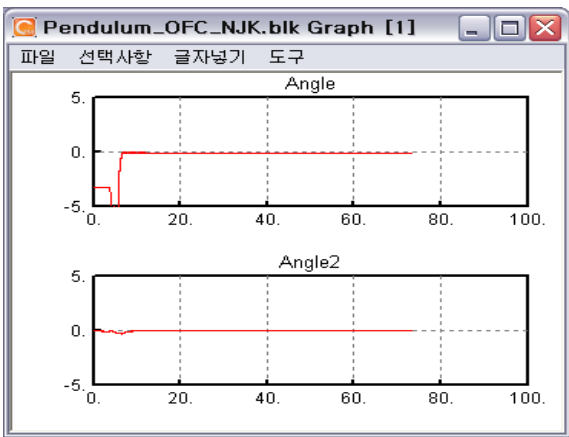


그림 5. CEM-IP-01 출력 파형
Fig. 5. The output response of the CEM-IP-01

7. 결 론

본 논문에서는 상태 관측기 기반의 출력 제어기를 설계하고 그것의 성능 및 실용화 검증을 위하여 도립진자 시스템에 적용하여 실험 하였다. 실험을 위하여 주어진 시스템의 동역학 해석 및 선형화를 수행하였고, 상태 피드백 제어기와 상태 관측기를 설계하였다. 설계된 제어기와 관측기를 Matlab을 이용한 모의실험을 통하여 그 성능을 확인하였고,

상태 관측기 기반의 출력 피드백 제어기의 실제 시스템에 대한 실용성 검증을 위하여 (주)셈웨어의 CEM-IP-01에 적용하였다. 그 결과, 상태변수를 모르는 상태에서도 상태 관측기를 통해 추정된 상태 변수로도 출력이 정상상태오차 없이 설정치에 잘 추종하는 것을 확인하였다. 실험 과정에서, 도립진자의 swing-up 제어 시, 상태 피드백 제어기를 사용하였을 때 비해 상태관측기 기반의 출력피드백을 사용하였을 때 하드웨어 사양에 보다 의존하는 것을 알게 되었다. 이러한 약점의 극복을 위해서 출력 피드백 제어 시 극점의 위치를 조정하였고, 결과적으로 swing-up제어에 성공할 수 있었다. 이것으로써 상태 관측기 기반의 출력 피드백제어기 또한 실제 시스템에 사용가능 함을 검증 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Asada and J.-J. E. Slotine, *ROBOT ANALYSIS AND CONTROL*, Wiley Interscience, 1986.
- [2] Chi-Tsong Chen's, *Linear System Theory and Design 3rd ed*, Oxford University Press, 1999.
- [3] 신춘식 외 2명 공저, *MATLAB과 함께한 제어시스템해석 및 설계*, 동일, 1999.
- [4] 정현술 저자, *MATLAB 제어시스템 해석 및 설계*, 아진, 2008.
- [5] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, WILY, 2008.
- [6] 이춘우 외 3명 공저, *공대생을 위한 일반물리학*, 성안당, 2008.

저 자 소 개



이종연(Jong-Yeon Lee)
2011년 : 국립공주대학교 전기전자제어
공학부 공학사
2011년~현재 : 국립공주대학교 전기전자제어
어공학과 석사과정 재학 중

관심분야 : 비선형제어, 퍼지제어, 적응제어, 로봇비전
E-mail : jungkyu@kongju.ac.kr



조규정(Kyu-Jung Jo)
2011년 : 국립공주대학교 전기전자제어
공학부 공학사

관심분야 : 자동제어, 제어시스템, 선형제어
E-mail : jkj5125@kongju.ac.kr



현창호(Chang-Ho Hyun)

1999년 : 광운대학교 제어계측공학과
공학사

2002년 : 연세대학교 전기전자공학과
공학석사

2008년 : 연세대학교 전기전자공학과
공학박사

2008년 3월 ~ 2009년 8월 : 삼성전자
책임연구원

2009년 ~ 현재 : 국립공주대학교 전기전자제어공학부 교수

관심분야 : 퍼지제어, 비선형제어, 퍼지시스템, 지능로봇, 지
능형자동차

E-mail : hyunch@kongju.ac.kr