
도립진자 시스템의 H_{∞} 제어기 설계

서강면* · 강문성*

Design of H_{∞} Controller for the inverted pendulum system

Kang-myun Seo* · Moon-sung Kang*

요 약

본 연구에서는 비선형성이 강한 대표적인 불안정한 시스템으로 새로운 제어이론의 유효성을 실증하고 평가하기에 적합한 도립진자 시스템의 강인 안정 및 강인 제어성능을 확보하기 위하여 H_{∞} 제어이론을 도입하여 최적제어기를 설계하였다. 그리고, 저역통과 필터를 제어대상 시스템과 종속으로 결합시켜 개루프 전달함수의 형성(loop shaping)을 시도함으로써, 감도함수 및 상보감도함수가 바람직한 주파수 특성을 갖도록 하였다.

먼저, 설계한 H_{∞} 제어기를 도립진자 제어시스템에 적용하여 시뮬레이션하였고, 그 결과를 전통적인 기법으로 산업현장에서 널리 사용하고 있는 PID제어기를 채용한 시스템의 출력과 비교하여 그 가능성을 확인하였다. 그런 다음, 설계한 제어기를 실제 시스템에 적용하여 실험하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해, H_{∞} 제어기는 모델링 오차, 외란 및 노이즈의 영향을 줄이면서 제어목표를 잘 추종하는 것으로 나타나 안정도 및 제어성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper describes a systematic method for designing the H_{∞} controller for the inverted pendulum which is a nonlinear and single-input double-outputs system. In particular, the open-loop system is combined with a pre-filter to shape the open-loop transfer function for the sensitivity function and the complementary sensitivity function to be kept the desirable frequency characteristics. Consequently, the loop shaping technique of the open-loop transfer function reduces the impacts of the model uncertainties, measurement noises and exogenous disturbances on the dynamic characteristics of the inverted pendulum.

The results of simulation and experiment show the efficiency of the proposed control method comparing with conventional PID control method.

키워드

sensitivity function, loop shaping, H_{∞} control, robust control

I. 서 론

오늘날 제어분야에 있어서 디지털 컴퓨터의 발달 및 다양한 이론의 확립에 힘입어 다양한 제어방식이 개발되

어 왔으나, 실제 제어대상 시스템에 적절한 제어 방식을 적용하여 제어기를 설계하기 위해서는 먼저 제어대상 시스템의 동특성을 기술하는 수학적 모델을 구축하여야 한다. 그러나 제어대상 시스템은 어느 정도의 비선형 특성을

을 가지고 있을 뿐만 아니라 외란, 측정 오차 등이 존재하기 때문에 현실적으로 제어대상 시스템의 동적 특성을 정확히 기술할 수 있는 모델을 구하는 작업은 대단히 어려운 일이다. 따라서 많은 연구들의 경우, 모델링하기 어려운 요소들을 무시하기도 하나, 이와 같은 불확실성이 존재하는 수학적 모델에 근거하여 구현된 제어시스템은 제어성능 및 안정성을 확보하기가 어려워진다. 이에 이러한 문제점들을 일정부분 해결할 수 있는 강인제어기법을 도입하는 설계 방식이 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다. 대표적인 방법으로서 1980년대 초반 G. Zames에 의해 제안된 H_∞제어이론을 들 수 있으며, 이 이론은 H_∞ norm에 기초한 강인제어(robust control)기법으로서 강인 안정 및 강인 제어성능(robust performance)을 확보할 수 있는 우수한 제어시스템을 설계할 수 있게 한다.[1][2][3][4]

도립진자 시스템은 비선형성이 강한 대표적인 불안정한 시스템으로 새로운 제어이론의 유효성을 실증하고 평가하기에 적합한 시스템이다. 본 연구에서는 도립진자 시스템의 강인 안정 및 강인 제어성능을 확보하기 위하여 H_∞ 제어이론을 도입하여 최적제어기를 설계하였다. 또한 저역통과 필터를 제어대상 시스템과 중속으로 결합시켜 개루프 전달함수의 형성(loop shaping)을 시도함으로써, 감도함수 및 상보감도함수가 바람직한 주파수 특성을 갖도록 하였다. 이와같이 함으로써 외란 및 노이즈의 영향을 줄이면서 제어목표를 잘 추종하도록 하여 안정도 및 제어성능의 향상을 도모하고자 하였다.

먼저, 설계한 H_∞제어기를 도립진자 제어시스템에 적용하여 시뮬레이션하였고, 그 결과를 전통적인 기법으로 산업현장에서 널리 사용되고 있는 PID제어기를 채용한 결과와 비교하여 그 가능성을 확인하였다. 그런 다음, 설계한 제어기를 실제 시스템에 적용하였다. 실험을 위해 H_∞제어기는 PC상에서 SIMTool Software를 이용하여 구현되었다. SIMTool 블록에서 pre-filter 및 제어기 이득값은 시뮬레이션에서 구한 값들을 그대로 이용하였다.

실험에서는 카트의 위치 및 진자의 각도에 대한 초기 조건을 준 다음, 원하는 목표값으로 얼마만큼 빨리 수렴하는가 하는 과도응답 상태와 정상상태에서의 오차 등을 조사하였다. 또한, 외부에서 진자에 물리적인 힘을 가하는 방법으로 외란(Disturbance)을 인가하였을때의 출력상태를 확인하였다.

위와 같이 시뮬레이션 및 실험을 통하여, 제안된 제어

기의 가능성 및 유용성을 확인하고자 하였다.

II. 본 론

2.1. 시스템의 선형모델

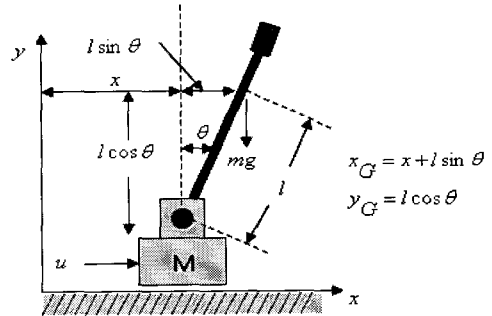


그림 1. 도립진자 시스템
Fig. 1 Inverted Pendulum System

도립진자 시스템은 그림 1.에서 보는 바와 같이 진자와 수직선이 이루는 각을 θ , 진자의 무게 중심의 좌표를 x_G, y_G 라 하고(진자의 무게중심은 기하학적 중심에 위치해 있다고 가정), 각 θ 의 변화범위가 충분히 작다고 가정하여 선형 시스템으로 근사화 하였다.[5]

도립진자 시스템의 운동방정식은 뉴턴의 제 2법칙에 따라 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\sum F : M\ddot{x} + b\dot{x} + m\ddot{x}_G = u \quad (1)$$

$$\sum M : m\ddot{x}_G \cos\theta - m\ddot{y}_G \sin\theta = mgl \sin\theta \quad (2)$$

수직선과 진자간의 각도 θ 의 변화가 작을 경우, Taylor 급수를 사용하면 $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$ 로 볼 수 있으며, 힘 u 를 구동모터의 입력 전압 $v(t)$ 에 관한 식으로 변경하여 식(1)에 대입하여 정리하면 식(3)과 식(4)로 표현된다. 여기서 진자의 관성 모멘트 $I=0$ 이라고 가정했다.

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} = \frac{K_t}{Rr} V(t) \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} = mg\theta \quad (4)$$

이 식을 상태공간 표현법으로 변환하면 식(5)와 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M+m}{Ml}g & 0 & 0 & \frac{b}{Ml} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m}{M}g & 0 & 0 & \frac{-b}{M} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_t}{MlRr} \\ 0 \\ \frac{K_t}{MRr} \end{bmatrix} * V(t) \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

시뮬레이션 및 실험에 사용된 시스템 파라미터는 표 1에 나타내었다. 실험적으로 구한 카트의 마찰저항 b 와 모터상수/모터저항 값인 K_t/R 값은 시스템에 따라 약간의 변동이 생길 수 있으며, 이는 실험을 통하여 보정할 수 있다.

표 1. 시스템 파라미터 및 상태변수들
Table. 1 System parameters and state variables

M	카트의 질량	0.963 kg
m	진자 질량	0.46 kg
l	진자 길이	0.47 m
g	중력 가속도	9.8 m/sec ²
u	제어입력	[V]
b	카트의 마찰저항	4.815 kg/s
r	모터 축 반경	0.015 m
K _t /R	모터상수/모터저항	0.486kg · m ² /s ²
x ₁	각도(θ):출력	[rad]
x ₂	각도 변화율	[rad/sec]
x ₃	위치(x):출력	[m]
x ₄	위치 변화율	[m/sec]

본 논문에서의 제어목표는 진자를 수직으로 세우고 동시에 중심 위치로 cart를 이동시키는 것이다. 이를 위해 진자의 각도와 cart의 위치를 제어하기 위하여 상태 궤환에 의한 H_∞ 제어를 설계하여 적용하였다. 시뮬레이션 및 실험에서 제어입력 u는 cart를 움직일 수 있는 힘(force)이며, 실제 플랜트에는 모터를 구동시키기 위한 전압으로 바뀌어 인가된다.

2.2. 독립진자 제어 시스템

그림 2.에 독립진자 시스템의 실험장치 구성도를 나타내었다. PID제어기 및 H_∞ 제어기는 PC상에서 SIMTool Software를 이용하여 구현되었다.

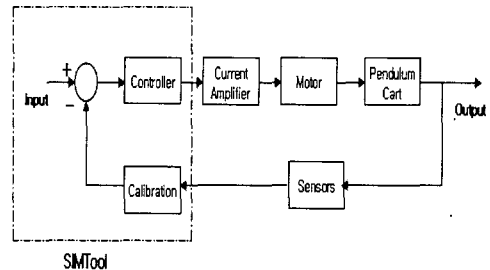


그림 2. 실험 장치 구성도
Fig. 2 Structure of experimental apparatus

도립진자 시스템은 크게 제어부, 구동부와 플랜트로 구성된다. 제어부는 I/O보드가 장착된 범용 PC로 구성되고, 구동부는 DC모터와 구동회로로 구성되며, 플랜트는 카트와 진자로 구성되어 있다. 시스템의 전체적인 사양은 표 2와 같으며, 실제 제작한 시스템 사진을 그림 3.에 보였다.

표 2. 시스템 사양
Table. 1 Specifications of system

이송축		X축
table	size	840mm
motor	용량	25W
	rpm	600
	정격전압/전류	DC 24V/1.7A
timing Belt	type	HTD-3M
	width	12mm
	length	1996.2mm
pulley	type	HTD3M-6F

모터 구동회로에서는 플랜트의 각도 및 위치에 대한 센서값을 계측하여 A/D 변환하고, 이를 제어기에 입력하여 생성된 출력신호를 D/A 변환하여 PWM 신호를 생성한다.

진자와 카트의 각도 및 위치 계측을 위해 각각 1턴 1kΩ과 10턴 10kΩ의 포텐쇼미터를 사용 하였으며, 계측 전압은 최대 ±10V까지 변화시킬 수 있다. 진자가 수직일 때를 기준전압 0V로 하고 좌우로 기울어짐에 따라 전압이 가 변되며 실험에서는 ±15°일 때 ±4V로 제한하였다. 카트가 LM 가이드의 중심에 있을 때를 0V, 양 끝단에 위치할 때를 ±10V로 설정하고 카트의 이탈을 방지하기 위하여 ±9V일 때 PWM 출력전압을 끊어주는 이탈방지 기능을 추가하였다.

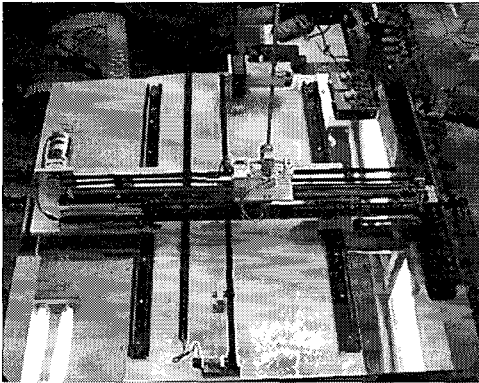


그림 3. 도립진자 시스템 사진
Fig. 3 Photograph of Inverted Pendulum System

또한, 모터 구동장치에는 모터의 정·역 회전 판별을 위한 판별회로와 단락 방지기능이 있다. PC와 모터구동장치의 인터페이스를 위한 상업용 I/O 보드(RG-IO3)가 PCI슬롯에 장착되었다. 각도 및 위치를 제어하기 위해 I/O보드상의 아날로그 입력 2채널과 아날로그 출력 1채널이 사용된다.

III. 도립진자를 위한 H_∞ 제어기 설계

H_∞ 제어기 설계를 위하여 그림 4.와 같이 Two-Port Block Diagram으로 나타낸 도립진자의 일반화 플랜트를 생각한다.[6] 여기서 두개의 입력은, 플랜트를 동작시키

기 위해 구동기에 인가되는 제어입력 u 와 외란이나 측정 잡음 또는 제어목표 신호를 포함하는 외부입력 w 를 의미한다. 또한, 두개의 출력은 특정한 상태변수나 오차신호와 같은 제어량 z 와 제어기의 입력으로 이용되는 출력신호 y 로 구성된다. 그리고, W_n , W_d , W_z 및 W_u 는 각각 가중치(weights)를 나타낸다.

이 시스템의 전달함수 표현은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} z &= P_{zw}w + P_{zu}u \\ y &= P_{yw}w + P_{yu}u \\ u &= Ky \end{aligned} \tag{7}$$

여기에서,

$$\begin{aligned} P_{zw} &= \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_{zu} = \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix}, \\ P_{yw} &= [-G \quad -1], \quad P_{yu} = [-G] \end{aligned}$$

이 식들로부터 다음 식(8)의 페루프 전달함수가 얻어진다.

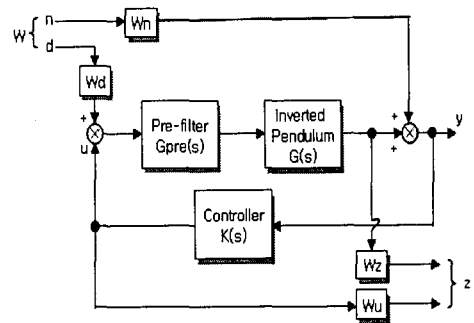


그림 4. Two-Port 블록도
Fig. 4 Two-Port Block Diagram

$$T_{zw} = \frac{z}{w} = P_{zu}K(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw} + P_{zw} \tag{8}$$

여기서, H_∞ 제어기 $K(s)$ 는 페루프 전달함수 T_{zw} 의 무한대 norm이 적절한 양의 값 γ 에 대하여 다음 식(9)를 만족하여야 한다.

$$\|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma \quad (9)$$

이 제어를 구하기 위하여, 일반화 플랜트의 상태 공간식은 다음 식(10)과 같이 표현하기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \quad (10)$$

이 시스템이 내부 안정하고 또한 강인한 성능을 갖기 위한 제어기 $K(s)$ 는 다음 식(11)을 만족하는 두 개의 Riccati방정식의 해 (12) 및 (13)식에 의해 얻을 수 있다.[7]

$$X_{\infty} \geq 0, Y_{\infty} \geq 0, \lambda_{\max}(X_{\infty}Y_{\infty}) < \gamma^2 \quad (11)$$

$\lambda_{\max}(X_{\infty}Y_{\infty})$ 는 행렬 $X_{\infty}Y_{\infty}$ 의 최대 고유값을 의미한다.

$$X_{\infty} = Ric \begin{bmatrix} A - B_2\bar{D}_{12}D_{12}^T C_1 & \gamma^{-2}B_1B_1^T - B_2\bar{D}_{12}B_2^T \\ -\bar{C}_1^T C_1 & -(A - B_2\bar{D}_{12}D_{12}^T C_1)^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Y_{\infty} = Ric \begin{bmatrix} (A - B_1\bar{D}_{21}D_{21}^T C_2)^T & \gamma^{-2}C_1^T C_1 - C_2^T \bar{D}_{21} C_2 \\ -\bar{B}_1 \bar{B}_1^T & -(A - B_1\bar{D}_{21}D_{21}^T C_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기에서,

$$\bar{D}_{12} = (D_{12}^T D_{12})^{-1}, \quad \bar{D}_{21} = (D_{21} D_{21}^T)^{-1},$$

$$\bar{C}_1 = (I - D_{12} \bar{D}_{12} D_{12}^T) C_1,$$

$$\bar{B}_1 = B_1 (I - D_{21}^T \bar{D}_{21} D_{21})$$

따라서, 제어기 $K(s)$ 는 다음 식(14)와 같이 구해진다.[6]

$$K(s) = C_1^c (sI - A^c)^{-1} B_1^c \quad (14)$$

여기서,

$$B_1^c = B_1 D_{21}^T + Y_{\infty} C_2^T,$$

$$B_2^c = B_2 + Y_{\infty} C_1^T D_{12} \gamma^{-2},$$

$$C_1^c = -(D_{12}^T C_1 + B_2^T X_{\infty}) (I - \gamma^{-2} Y_{\infty} X_{\infty})^{-1}$$

$$A^c = (A - B_1 D_{21}^T C_2) +$$

$$Y_{\infty} (\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_2^T C_2) + B_2^c C_1^c$$

또한, 이를 상태 궤환 제어기로 구성하기 위해 이득 K_c 를 구하면 다음 식(15)와 같이 나타난다.[7]

$$K_c = \bar{D}_{12} (B_2^T X_{\infty} + D_{12}^T C_1) \quad (15)$$

그리고, 본 논문에서는 그림 4.에서 보는 바와 같이 pre-filter를 제어대상 시스템과 종속으로 결합시켜 개루프 전달함수의 형성(loop shaping)을 시도하여 감도함수 및 상보감도함수가 바람직한 주파수 특성을 갖도록 하였다.

IV. 시뮬레이션 및 실험

H_{∞} 제어기의 유용성을 확인하기 위하여, 독립진자 시스템의 각도 및 위치에 대한 동특성(Dynamic characteristics)을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다. 그런 다음, 산업현장에서 가장 폭 넓게 사용하고 있는 전통적인 PID 제어를 채용한 경우의 출력과 비교하였다.

먼저, 시뮬레이션에 사용된 시스템 행렬들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 30.81 & 0 & 0 & 10.64 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.68 & 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = [0 \quad -71.58 \quad 0 \quad 33.64]^T$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{12} = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

$$D_{22} = [0 \quad 0]^T$$

그리고, pre-filter로서는 다음의 식(16)식과 같은 저역 통과 필터를 이용하였다. Pre-filter의 종속결합 전후의 H_∞ 제어기는 두 개의 Riccati 방정식의 해를 이용하여 구해진다.

$$G_{pre}(s) = \frac{20 \times 377}{s + 377} \quad (16)$$

우선 실험에 앞서 도립진자시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5.는 도립진자시스템이 PID제어기와 H_∞ 제어기를 각각 채용한 경우에 대한 각도와 위치에 대한 동특성을 나타낸다.

시뮬레이션에 사용된 PID제어기의 P, I, D계수는 저자가 발표했던 논문에서 설계한 값을 이용하였다. 즉, 각도에 대한 P, I, D계수는 각각 9.77, 19.96, 0.08을 사용하였고, 위치에 대해서는 1.32, 0.16, 0.01을 사용하였다.[8] 시스템의 초기조건은 각도 4.4°, 위치 21.3cm로 동일하게 설정하였고, 샘플링 시간은 2ms로 하여 Matlab Software로 구현하여 시뮬레이션 하였다. 또한, 그림에서 보인 각도와 위치의 단위는 각각 degree [°]와 센티미터[cm]로 스케일링 되었다. 그림에 나타난 것처럼 시스템의 수학적 모델을 이용하고 H_∞ 제어방식을 채용하여 시뮬레이션한 결과는 목표값으로의 수렴속도 및 정상상태에서의 성능이 PID제어기 보다 우수한 것으로 나타났다. 특히, 각도 및 위치에 대한 목표값으로의 수렴속도가 2.3초, 1.8초로 각

각 나타나 PID제어기의 3.7초, 12초보다 현저하게 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 제어방식 모두 위치보다는 각도에 대한 동특성이 정상상태로 수렴하는 시간이 더 빠름을 알 수 있다. 이것은 도립진자 시스템의 제어특성상 각도제어를 위치제어 보다 우선시 하도록 설계하였기 때문이다.

또한, 그림 6.에서 볼 수 있는 바와 같이, pre-filter를 도입함으로써 시스템의 특이치(singular values)가 저주파 영역에서는 증가하고 고주파 영역에서는 감소하여 고주파 노이즈 및 외란의 영향을 줄이면서 제어목표를 잘 추종하도록 하였다.

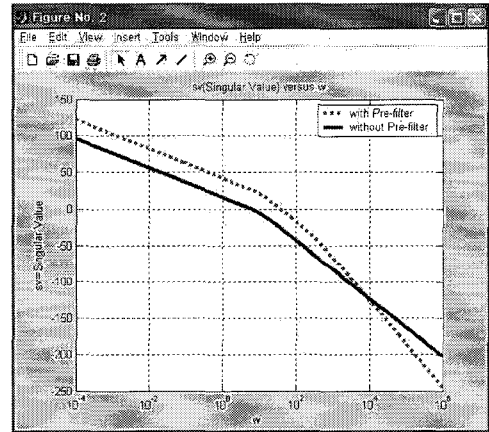


그림 6. 전향경로 전달함수의 특이치 변화
Fig. 6 Singular values of feedforward transfer function

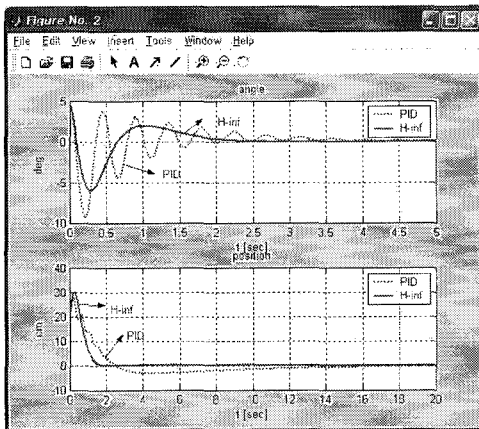


그림 5. 도립진자시스템의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results of Inverted Pendulum

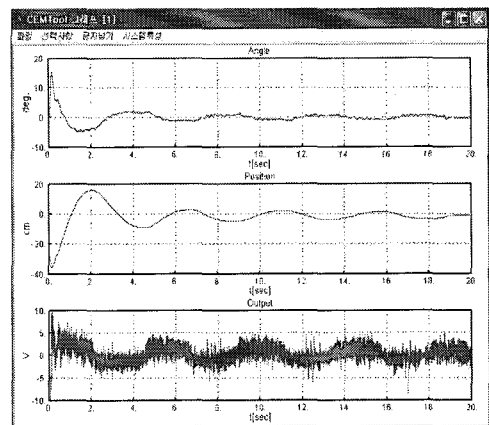


그림 7. PID제어기의 실험 결과
Fig. 7 Experimental results of PID controller

그림 7.은 초기조건 각도 0°, 위치 22cm로 하였을 때의 PID제어의 실험결과를 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 위치와 각도에 대한 제어성능은 비교적 우수였으나, 카트의 위치는 ±4[cm], 진자의 각도는 ±1[°]의 오차를 가지면서 계속 진동하는 것을 알 수 있다.

그림 8.과 그림 9.는 각각 H_{∞} 제어기 블록도와 실험 결과를 나타낸다. 그림 8.은 PC상에서 SIMTool Software를 사용하여 구현하였다.

그림 8.에서 왼쪽은 독립진자 시스템의 현재 각도와 위치 정보를 입력받아 스케일링하여 계측하고, 중앙에는 Pre-filter 와 제어기 이득값, 오른쪽에 제어기 출력 즉 모

터를 구동하여 카트를 이동시키는 전압이 출력된다. 중앙의 Pre-filter 와 제어기 이득(Matrix Gain)값은 시뮬레이션을 통해 얻은 값을 이용하였다. Pre-filter는 앞에서 구한 식(16)이, 제어기 이득값은 식(15)로부터 얻어진 -22.05, -4.36, -3.01, -9.84가 각각 사용되었다.

그림 9.는 초기값을 각도 0°, 위치 12cm로 하였을 때의 출력을 나타낸다. 그림에 나타난 것처럼 정상상태에서 진자의 각도는 ±1° 범위내에 수렴하고, 카트의 위치는 ±2.5 cm의 오차 범위에서 원하는 목표값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, 정상상태에서 인위적인 외란을 가한 경우의 위치 및 각도에 대한 제어특성을 그림 10에 나타내었다. 외란을 인가하기 위해 물리적인 힘을 순간적으로 진자에 가하는 방법을 사용하였다. 그림에 나타난 것처럼, 대략 5초, 8초, 13초, 17초에 진자에 힘을 가함으로써 카트의 위치 및 진자의 각도가 일시적으로 정상상태를 이탈하나 빠른 시간에 목표값으로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

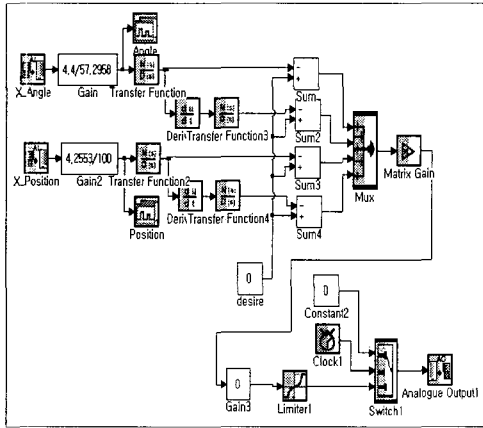


그림 8. H_{∞} 제어기 블록도
Fig. 8 Block diagram of H_{∞} controller

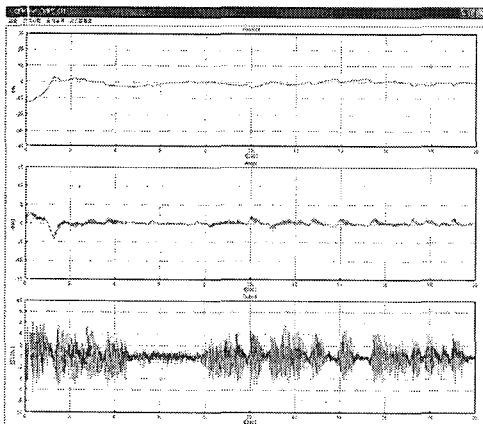


그림 9. H_{∞} 제어기의 실험 결과
Fig. 9 Experimental results of H_{∞} controller

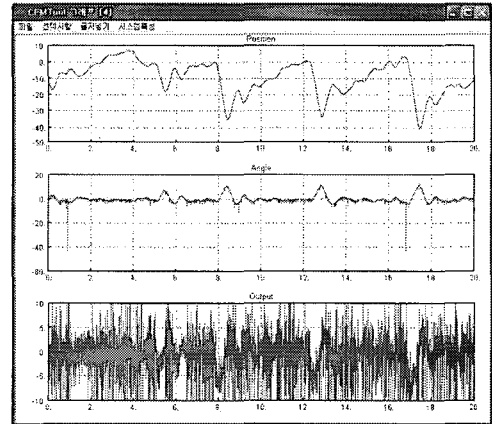


그림 10. 외란에 대한 시스템 응답
Fig. 10 System responses to disturbances

V. 결 론

본 논문에서는 H_{∞} 제어이론을 도입하여 독립진자 시스템의 최적 제어를 설계하였다. 또한, 시스템의 감도 함수 및 상보감도함수가 바람직한 주파수 특성을 갖도록 저역통과 필터를 제어대상시스템과 중속으로 결합시켜 개루프 전달함수의 형성(loop shaping)을 시도하였다. 이

와 같이 함으로서 외란 및 노이즈의 영향을 줄이면서 제어 목표를 잘 추종하도록 하여 안정도 및 제어 성능의 향상을 도모할 수 있었다.

먼저, 도립진자 제어 시스템에 PID제어방식과 H_∞ 제어방식을 채용하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고, 두 제어기에 대한 시스템의 출력을 확인하여 제안된 제어방식의 가능성을 확인할 수 있었다. 그런 다음, 실제 도립진자 시스템에 적용하여 위치 및 각도에 대한 동특성을 확인하였다. 또한, 진자에 물리적인 힘을 가하는 방법으로 외란(Disturbance)을 인가하여 출력상태를 확인한 결과, H_∞ 제어기 및 pre-filter의 유용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 · 산업기술평가원 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] HelenePanagopoulos, Karl J Astrom, "PID Control Design and H_∞ Loop Shaping", in Proc. Conf. Control Appli., pp.103-108, Hawaii, August, 1999.

[2] M. Mattei, "Robust multivariable PID control for linear parameter varying system", Automatica, Vol. 37, pp.1997-2003, 2001.

[3] J. C. Martinez, A. S. Ponyak, "Switching structure state and parameter estimator for MIMO non-linear robust control", INT. J. CONTROL, Vol. 74, No. 2, pp. 175-189, 2001.

[4] 강기원, 이종성, 박기현, "LMI기법을 이용한 2자유도 표준모델에 대한 비결합 제어기의 H_∞ 설계", 제어 · 자동화 · 시스템 공학 논문지, 제7권, 제3호, pp.183-192, 2001.

[5] 강문성, "도립진자 제어시스템의 강인 제어기 설계", 청주대학교 산업과학연구소 논문집, 제23권, 제2호,

pp.159-165, 2006.

[6] 최연욱, 현대제어 이론의 기초-상태방정 식에서 H_∞ 제어까지, 청문각, 2001.

[7] B. Shahian and M. Hassul, CONTRL SYSTEM DESIGN USING MATLAB, Prentice Hall, 1993.

[8] 서강면, 강문성, "2차원 도립진자를 위한 GA 및 Heuristic한 제어규칙 기반 PID제어기의 실험적 연구", 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제9권, 제8호, pp. 623-631, 2003.

저자소개



서 강 면(Kang-Myun Seo)

청주대학교 전자공학과 공학석사
청주대학교 전자정보공학부 박사
수료

※관심분야: 마이크로프로세서 응용 및 지능제어



강 문 성(Moon-Sung Kang)

한양대학교 전기공학과 공학석사
교토대학교 전기공학과 공학박사
청주대학교 전자정보공학부 교수

※관심분야: 지능제어 이론 및 응용