



원판의 반작용을 이용한 역진자의 강인 자세 제어

Robust Position Control of a Reaction Wheel Inverted Pendulum

박상형 · 이해창 · 임성목 · 김정수[†]

Sang-Hyung Park, Hae-Chang Lee, Seong-Muk Lim, and Jung-Su Kim[†]

서울과학기술대학교, 전기정보공학과

Dept. of EIE, Seoul National University of Science and Technology

요약

본 논문에서는 원판의 반작용을 이용하는 역진자의 강인 자세 제어를 위한 강인 제어 기법을 소개한다. 이를 위해 원판 반작용을 이용하여 자세 조정이 가능한 시스템을 설계한다. 설계된 시스템의 수학적 모델을 구하고 그 수학적 모델을 이용하여 제어를 설계한다. 설계한 강인 제어 기법은 두 부분으로 구성되어 있다. 초기에는 역진자의 swing up을 위한 수동성 기반의 제어기(passivity based control)를 사용하고 역진자의 자세가 수직 위치 근방에 오면 강인 안정화 제어기로 제어를 변경한다. 강인 안정화 제어가 필요한 이유는 역진자 시스템에서 관성 모멘트를 불확실성을 다루기 위함이다. 모의 실험과 실제 실험을 통해 제안하는 제어기가 효과적으로 원판 반작용에 기반한 역진자의 자세 제어를 달성함을 보인다.

키워드: 역진자 강인 자세 제어, 리액션 휠, 수동성 기반 제어

Abstract

This paper presents a robust control of a reaction wheel inverted pendulum. To this end, a mathematical model is derived using physical laws, and then parameters in the model are identified as well. Based on the model, a robust position control is designed, which consists of two parts: swing-up control using passivity and robust stabilization control using LMI (Linear Matrix Inequality). When the pendulum starts to move, the swing-up control is applied. If the position of the pendulum is near the desired upright position, the control is switched to the robust stabilization control. This robust control is employed in order to deal with the uncertainties in the inertia of the pendulum dynamics. The performance of the proposed control scheme is validated not only simulation but also real experiment.

Key Words: Inverted pendulum, Robust control, Reaction wheel, Passivity based control

Received: Mar. 4, 2016

Revised: Apr. 19, 2016

Accepted: Apr. 19, 2016

[†]Corresponding authors

jungsu@seoultech.ac.kr

1. 서론

역진자 시스템은 여러 분야의 로봇이나 이동 기구 구동에 중요한 부분을 연구하는 목적으로 또는 불안정한 평형점에 대한 제어 이론 연구를 위해 흔히 사용되어 왔다[1-5,14-16]. 이러한 역진자 시스템의 자세 제어를 위하여 진자에 힘을 가하는 여러 가지 방식이 있는데 카트(inverted pendulum on a cart) 위에 진자를 위치시켜 카트를 이용하여 중심을 잡는 방식이 흔히 알려져 있으며 두 개의 나란히 위치한 바퀴를 이용하여 중심을 잡는 형태도 흔히 알려져 있다. 세그웨이가 대표적인 예이다. 원판의 반작용(또는 관성휠)을 이용하는 방법[1,6]도 역진자 자세 제어를 위해 이용되고 비슷한 역학적 원리가 여러 분야에서 사용된다. 실제 기계 수명 관점에서도 원판의 반작용을 사용하는 것이 낫다는 보고도 있다[7]. 또한 제어 기법도 슬라이딩 모드 제어, 최적 제어, 비선형 제어 등 다양한 방법들이 역진자 자세 제어를 위해 설계되고 실제 적용되었다.

본 논문에서는 참고 문헌 [1]에 소개된 원판의 반작용을 이용한 역진자의 자세 제어 문제에 대한 연구를 진행하였다. 특별히, 참고 문헌 [1]의 제안된 제어기법이 역진자 제어 시스템에서 안정화 제어기가 관성 모멘트의 불확실성에 민감할 수 있다는 점을 보완하고자 강인 제어기를 설계하여 그 성능을 모의 실험과 실제 실험을 통해서 검증하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템을 직접 제작하고, 수학적 모델링한 후에 그 수학적 모델을 이용하여 수동성(passivity)에 기반한 swing-up 제어기와 목표 자세 근처에서 이용될 안정화 제어기를 설계하여 그

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성능을 확인하였다.

2. 원판 반작용 이용 역진자의 수학적 모델

이 장에서는 원판의 반작용을 이용한 역진자의 운동 방정식을 유도하고 본 연구를 위하여 제작한 역진자를 이용하여 운동 방정식에 나타나는 파라미터를 측정하여 운동 방정식을 구한다.

2.1. 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템



그림 1. 원판 반작용을 이용한 역진자 시스템
Fig. 1. System of a reaction wheel inverted pendulum

그림 1은 본 논문에서 고려하는 역진자 시스템을 보인다. 그림 1에서 ①은 반작용을 만드는 원판을 나타내고 ②는 DC 모터이고 ③은 엔코더이며 ④는 링크이다. 이 역진자 시스템은 모터로 원판을 회전시킬 때 발생하는 반작용을 이용하여 역진자를 세운다. 즉, 이 역진자는 시스템의 회전축(pivot)으로부터 링크에 의해 연결된 원판을 구동기로 사용한다. 원판에 토크를 가하면 그 반작용으로 링크에 같은 크기의 토크가 가해지게 된다. 링크에 가해진 토크는 역진자 전체의 각가속도를 유발하며 이를 이용하여 역진자의 자세를 제어할 수 있다.

2.2. 운동 방정식

이 절에서는 참고 문헌 [1]을 참조하여 그림 1에 소개한 역진자 시스템의 동특성을 기술하는 수학적 모델을 구축한다. 이를 위해 그림 2와 같이 그림 1의 역진자 시스템에서 링크와 원판을 고려하자.

그림 2에서 θ 는 역진자 추가 수직 방향과 이루는 각을 의미하고 θ_r 은 원판이 수직 축과 이루는 각도를 의미한다. 시스템 전체의 동적 에너지는 링크의 동적 에너지와 원판의 동적에너지의 합으로 나타나며 다음과 같이 정의된다.

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_r^2$$

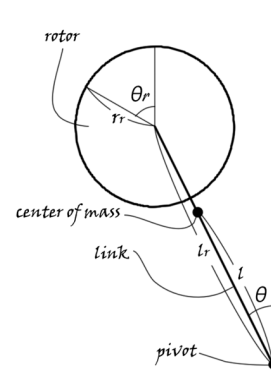


그림 2. 역진자의 원판과 링크
Fig. 2. Rotor and link of the inverted pendulum

여기서 J 는 다음과 같이 정의되는 값이며

$$J = J_p + m_p l_p^2 + m_r l_r^2 + m_m l_m^2$$

J_p 는 링크의 무게 중심에 대한 관성 모멘트이고 m_p 는 링크의 무게이며 l_p 는 링크의 질량중심으로부터 회전축까지의 거리이고, m_r 과 m_m 은 각각 원판의 무게와 모터의 무게이며 l_r 과 l_m 은 각각 회전축으로부터 원판과 모터의 회전 중심까지의 거리이다. 이는 간단하게 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$J = m l^2$$

이 때 m 은 링크와 원판의 무게의 합이고 l 은 링크와 원판 모두의 질량 중심과 회전축의 거리이다. 모터와 원판을 기존 펜들럼의 진자로 간주한다. 진자가 지면을 향했을 때의 위치 에너지를 V 이라고 정의하면 시스템의 위치에너지는 아래와 같다.

$$V = mgl(\cos\theta + 1)$$

여기서 g 는 중력이다. 동적 에너지와 위치 에너지에 의해 라그랑지안 방정식 L 은 다음과 같이 주어진다.

$$L = T - V = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_r^2 - mgl(\cos\theta + 1)$$

라그랑지안 편미분 방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = \dot{\theta}, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta} = -mgl \sin\theta$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_r} = J_r \dot{\theta}_r, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_r} = 0$$

모터의 회전에 의해 각각 $-\theta$ 와 θ_r 방향으로 토크 τ 가 발생된다. DC 모터의 마찰력과 전기적 손실을 무시한 τ 는 아래와 같다.

$$\tau = k_r i$$

k_r 는 모터 토크 상수, i 는 모터의 전류이다. 이 때 비보존계에서의 라그랑지안 운동방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau$$

그러므로 라그랑지안 방정식에 의해서 그림 2에 나타난 역진자의 동특성 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} - m_g l \sin \theta &= -k l \\ J_r \ddot{\theta}_r &= k I \end{aligned} \quad (1)$$

2.3. 모델 파라미터 측정과 모델 검증



그림 3. 모터와 링크의 무게
Fig. 3. Weight of the motor and link

이 장에서는 참고문헌 [1]을 참조하여 앞 절에서 소개한 실제 제작한 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템의 동특성 방정식에 나타나는 파라미터들을 측정하여 역진자 시스템의 동특성을 제어하기 위한 수학적 모델을 구축한다. 수학적 모델을 만들기 위해 전체 역진자의 관성 모멘트와 원판의 관성 모멘트를 구해야 하며, 진자 전체의 질량 중심과 추축 사이의 거리를 구해야 한다. 이를 위하여 각 부분의 무게 측정을 그림 3과 4에 보인다. 우선 역진자 전체의 질량 중심을 고려한다. 벡터공간에서의 질량 중심 l 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$l = \frac{\sum m_i l_i}{\sum m_i}$$

여기서 m_i 은 i 번째 점질량의 크기이고 l_i 는 회전축과 m_i 사이의 거리를 나타낸다. 제작한 역진자는 좌우 대칭이기 때문에 1차원 벡터로 생각하여 쉽게 질량중심의 위치를 구할 수 있다.

$$l = \frac{m_p l_p + m_r l_r + m_m l_m}{m_p + m_r + m_m}$$

여기서 전체 질량 m_p 는 실제로 측정된 값을 대입하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$m_p = m_c + m_r + m_m + m_b = 0.5458 \text{ kg}$$

이러한 측정값을 사용하면 아래와 같이 반지름은 $l = 0.0507m$ 을 구할 수 있다. 진자에 사용된 막대의 질량 중심이 축과 같으므로 추의 축을 기준으로 하는 막대의 관성모멘트는 별도로 구해야 하며 다음과 같이 주어진다.

$$J_b = \frac{1}{12} (m^* h^* l) = 9.2399 * 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

따라서 전체 진자의 관성모멘트 J 는 아래와 같다.

$$J = m_m l_m + m_r l_r + m_c l_c + J_b = 0.00571932 \text{ kgm}^2$$

원판의 관성 모멘트 J_r 은 함께 돌아가는 모터의 회전자 때문에 모터 회전자의 관성모멘트를 포함하며 원판의 모양이 원반 형태이므로 아래와 같이 구할 수 있다.

$$J_r = \frac{1}{2} m_r r_r^2$$



그림 4. 원판의 무게
Fig. 4. Weight of the rotor

그러나 실제로는 모터의 회전자가 원판과 함께 돌아가기 때문에 J_r 에는 모터 회전자의 관성모멘트 J_{ma} 를 포함시킨다.

$$J_r = \frac{1}{2} m_r r_r + J_{ma}$$

실제로 측정된 값을 이용하여 J_r 을 구하면 아래와 같다.

$$J_r = 0.0000378 \text{ kgm}^2$$

이러한 파라미터들 중에서 관성 모멘트는 구동 조건의 변화 및 측정 오차 등으로 인해 불확정성(uncertainty)을 가장 많이 포함한다. 다음 장에서는 이렇게 측정한 파라미터 값들과 역진자의 동특성 방정식 (1)을 이용하여 관성 모멘트의 불확정에도 역진자의 자세를 $\theta = 0$ 으로 유지시키는 강인 자세 제어를 설계한다.

3. 자세 제어를 위한 강인 제어 설계

이 장에서는 앞 장에서 유도한 원판의 반작용을 이용한 역진자의 수학적 모델을 이용하여 역진자의 자세 제어를 위한 강인 제어를 설계한다. 제안하는 자세 제어기는 처음 역진자를 구동시켜 목표 자세 근방까지 이동시키는 swing-up 제어기와 목표 자세 근방에서 역진자를 목표 지점에 위치하도록 하는 강인 안정화 제어기 두 부분으로 구성되어 있다. 또한 제어기 설계 과정에서 두 제어기 사이의 스위칭 조건에 대해서 논의 한다.

3.1 배경 지식: 수동성(passivity)

이 절에서는 제어기 유도를 위한 배경 지식에 해당하는 시스템의 수동성을 간략히 소개한다.

정의 [1,8]. 다음과 같은 비선형 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x)$$

만약 이 시스템에 대해서 다음 관계를 만족하는 에너지 함수라 불리는 양함수(positive definite function) S 가 존재하면 시스템은 수동성을 가진다.

$$\dot{S} = u^T y \quad \text{or} \quad S(T) - S(0) \leq \int_0^T u(s)^T y(s) ds$$

이러한 수동성을 가지는 시스템에 대해서 제어 입력을 $u = -ky$ 로 설계하면 이 제어 입력으로 인한 폐루프 시스템은 안정하다. 여기서 $k > 0$ 이다. 이러한 제어 입력이 안정화 제어 입력이 되는 이유는 다음과 같은 부등식으로 인해 에너지함수 S 가 리아프노프 함수가 됨을 보일 수 있기 때문이다.

$$\dot{S} = u^T y \leq -ky^T y \leq 0$$

3.2 수동성(passivity)을 이용한 swing up 제어 설계

이 장에서는 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템이 적절한 출력 선정을 통해 수동성을 만족한다는 사실을 이용하여 swing up 제어기를 설계한다[1].

시스템의 수동성을 보이기 위해서 우선 출력 변수를 적절히 선정하고 수동성을 보이는 에너지 함수를 찾아야 한다. 이를 위해서 우선 휠의 동특성 방정식에서 입력 I 와 출력 θ_r 사이의 관계는 이중 적분기(double integrator) 관계임을 주목한다. 이 부분에 대한 출력을 $y_1 = \dot{\theta}_r$ 로 정의한다. 또한 역진자 부분의 동특성에 대해서 다음과 같이 출력을 정의한다.

$$y_2 = -k\dot{\theta}(E - E_{ref})$$

여기서

$$E = \frac{1}{2} J\dot{\theta}^2 + mgl(\cos\theta + 1)$$

이고 E_{ref} 는 상수로서 역진자 에너지의 지령치이다.

소정리[1]. 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템은 다음과 같이 정의된 출력에 대해서 수동성을 가진다.

$$y = k_v y_1 + k_e y_2$$

여기서 k_v 와 k_e 는 양의 가중치 상수들이다.

증명. 수동성을 보이기 위해서는 수동성 정의를 만족하는 에너지 함수를 찾아야 한다. 다음과 같은 에너지 함수를 고려하자.

$$S = \frac{1}{2} k_v \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} k_e (E - E_{ref})^2$$

시스템 궤적을 따라서 함수 S 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{S} = (k_v \dot{\theta}_r - k_e k (E - E_{ref}) \dot{\theta}) u = y u$$

따라서 시스템은 수동성을 가진다.

이 소정리에 따라서 제어 입력을 $u = -k_u y$ 로 정하면 역진자의 동특성은 시간이 지남에 따라서 $E = E_{ref}$ 와 $\dot{\theta}_r = 0$ 을 만족하게 된다. 이러한 사실을 바탕으로 역진자를 출발점에서 수직 목표 위치 근처까지 움직이는 swing-up 제어는 $u = -k_u y$ 가 되도록 설정한다.

3.3 안정화를 위한 강인 제어기 설계

역진자가 수직으로 $\theta = 0$ 가 되는 위치에 정지시키는 것이 제어 목표이며 이를 위해 swing up 제어기에 의해서 목표 지점 근처에

역진자가 도달되면 제어 입력을 안정화 제어기로 스위칭을 한다. 스위칭 조건에 대해서는 다음 장에서 설명한다. 원하는 수직 위치인 $\theta=0$ 에 역진자를 멈추게 하기 위해서는 모든 시간에 따라 $\theta(t)=0, \dot{\theta}(t)=0$ 을 만족해야 한다. 따라서 본 논문에서는 $\theta(t)$ 와 $\dot{\theta}(t)$ 을 상태 변수의 일부로 정의하여 이들을 안정화시키는 제어를 설계한다.

목표점 부근에서 시스템을 선형화를 하면 다음과 같은 선형 시스템을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 10 \\ \frac{mgl}{J} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -k_r \\ \frac{k_r}{J_r} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix}, \quad u = i$$

이다. 이 모델에서 파라미터 불확실성이 가장 큰 것은 관성 모멘트 J 와 J_r 이다. 본 논문에서는 이 두 파라미터 값들은 모르지만 그 상하한을 안다는 가정 하에서 강인 안정화 제어를 선형 행렬 부등식을 이용하여 설계한다.

정리. 시스템 (2)의 미지의 파라미터 J 와 J_r 이 다음 부등식을 만족한다고 가정하자.

$$J_{\min} \leq J \leq J_{\max}, \quad J_{r,\min} \leq J_r \leq J_{r,\max}$$

여기서 $J_{\min}, J_{\max}, J_{r,\min}, J_{r,\max}$ 은 아는 값들이다. 시스템 (2)에 대해서 다음 선형 행렬 부등식이 해 Q, Y 를 가지면

$$Q > 0, \quad QA_i^T + A_iQ + Y^TB_i^T + B_iY < 0, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

시스템 (2)는 제어 입력 $u = Kx, K = YQ^{-1}$ 에 의해서 안정화된다. 여기서 A_i, B_i 는 모델 A, B 에서 파라미터 J 와 J_r 를 그것들의 상하한 값들을 사용한 행렬이다. 선형 행렬 부등식을 이용한 강인 제어 이론에 따라 이렇게 상하한을 나타내는 모델들을 모두 안정화시키는 제어를 설계하면 그 상하한의 볼록 결합(convex combination)으로 표현할 수 있는 모든 모델들은 설계된 제어기에 의해 안정화된다[17].

하드웨어의 물리적 한계로 인한 입력 크기의 상하한 제약이 존재하므로 swing up 제어기와 안정화 제어기 모두 계산된 제어 입력은 적절한 크기를 가지는 포화 함수(saturation function)를 거쳐서 시스템에 인가된다.

3.4 제어기 스위칭

앞 장에서는 역진자가 아래로 향한 위치에서 출발해서 역진자가 수직으로 서게 되는 목표 지점 부근까지 움직이는 swing up 제어기와 역진자가 목표지점 부근에서 출발한다고 가정하고 역진자를 목표 지점에 정지시키는 안정화 제어를 소개하였다. 따라서 역진자가 아래로 향한 위치에서 출발시켜서 목표 지점인 $\theta=0$ 에 정지하게 하기 위해서 두 개의 제어를 역진자 동작 중에 θ 와 $\dot{\theta}$ 의 값에 따라 적절히 스위칭해야 한다. 이를 위해 시스템의 안정성을 유지하면서 제어를 변경하는 스위칭 조건이 필요하다. 이론적으로는 swing up 제어기에 의한 수렴 영역(domain of attraction)과 안정화 제어기에 의한 수렴 영역을 구하여 상태 변수가 두 수렴 영역의 교집합에 해당하는 영역에 위치할 때 제어를 스위칭하면 시불변 시스템이라는 가정하에서 안정도는 보장된다. 본 논문에서는 간략화를 위해서 두 수렴 영역이 원점을 공통적으로 포함한다는 사실을 이용하여 상태 변수 θ 와 $\dot{\theta}$ 가 충분히 작게 되는 영역에 포함될 때 제어를 스위칭한다. 즉 다음 부등식이 성립하면 제어를 스위칭한다.

$$|\theta| \leq \theta_0, \quad |\dot{\theta}| \leq \theta_1$$

여기서 θ_0 와 θ_1 은 설계 파라미터들이다.

4. 모의 실험 및 실험

그림 5는 본 논문에서 설계한 제어기의 모의 실험을 위한 Simulink 블록을 나타낸다.

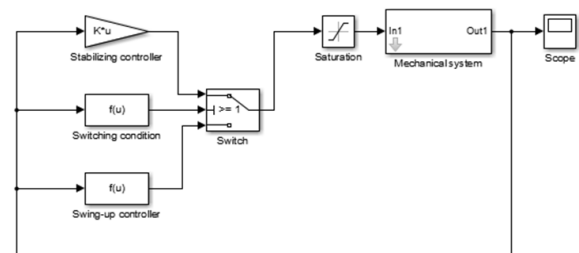


그림 5. 모의 실험을 위한 Simulink 블록
Fig. 5. Simulink block diagram of the system

swing-up 제어기의 k_u , k_v , k_e 값은 실험적으로 시뮬레이션을 반복수행하여 구하였으며, 이 때 각각의 값은 아래와 같다.

$$k_u = 30, \quad k_e = 4000, \quad k_v = 2$$

안정화 제어기의 제어 이득 K 는 정리의 선형 행렬 부등식 (3)을 풀어서 구하였으며 다음과 같다.

$$K = [156.6439, 22.1347, 0.0309]$$

모의 실험에서 관성 모멘트 J 가 공칭 값에 비해 20% 오차가 있도록 설정하였다. 제어기 스위칭을 위한 파라미터는 $\theta_0 = 0.15$, $\theta_1 = 1.05$ 를 사용하였다.

우선 강인성을 고려하지 않은 참고 문헌 [1]에 제안된 제어기를 사용하였다. 그림 6에 보이는 바와 같이 참고 문헌 [1]에 소개된 안정화 제어기는 파라미터 불확실성을 효과적으로 다루지 못 함을

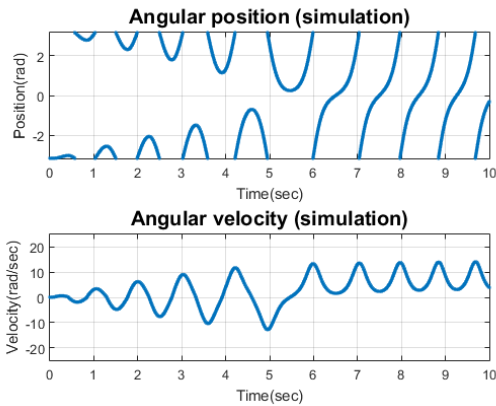


그림 6. 모의 실험을 통한 역진자의 자세 제어. J 의 불확실성으로 인해 자세 제어 달성에 실패함.
Fig. 6. Stabilizing control of the inverted pendulum, The result is unstable because of uncertainty of J .

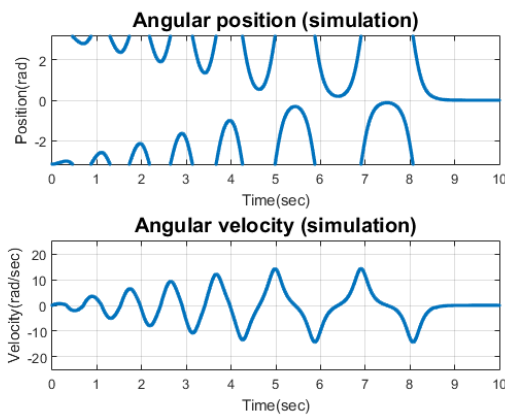


그림 7. 모의 실험을 통한 역진자의 강인 자세 제어. J 의 불확실성에도 불구하고 자세 제어 달성
Fig. 7. Robust stabilizing control of the inverted pendulum, The result is stable despite uncertainty of J .

볼 수 있다. 즉 J 에 불확실성이 있는 경우에 역진자의 자세 제어를 달성하지 못하였다. 반면에 그림 7은 역진자의 안정화를 위하여 본 논문에서 제안하는 부등식 (3) 풀어서 구한 제어 이득을 이용한 강인 제어를 사용했을 때의 상태 변수 궤적을 나타낸다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 J 에 존재하는 파라미터 오차에도 불구하고 강인 안정화 제어로 인해 성공적으로 자세 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

이러한 원판의 반작용을 이용한 역진자 시스템을 위한 강인 제어 입력을 실제 시스템에 적용하여 설계한 제어 입력이 실제 시스템에서도 효과적으로 동작함을 보인다. 이를 위해 본 연구에서는 표 1에 요약된 하드웨어 요소들을 이용하여 제어 시스템을 구성하였다.

표 1. 하드웨어 상세 사항
Table 1. Hardware specifications

MCU	STM32F103 [9] (CorTex M3)
DC Motor	MB-3866E [10]
Motor driver	DCM-A1 [11]
Encoder	E50S8-2048-3-T-5 [12]
Slip Ring	SRS1802 [13]

그림 8은 역진자 자세 제어를 위한 제어 보드 CorTex M3와 모터 드라이브 보드를 보인다. 그림 9는 앞 장에서 소개한 swing-up 제어기와 강인 안정화 제어기를 적용한 실험 결과이다. 그림 9에 보이듯이 앞 장에서 소개한 강인 안정화 제어기가 실제 역진자 시스템도 성공적으로 자세 제어를 달성함을 확인할 수 있다.

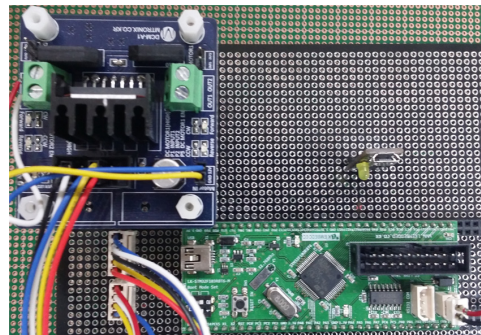


그림 8. 제어를 위한 ARM 보드와 모터 드라이버
Fig. 8. ARM board and the motor driver

자세 달성($\theta = 0$) 후에 외부적인 힘을 원판에 가함으로 시스템에 외란을 가했을 때에도 어느 정도 수준까지는 자세를 유지함을 확인하였다. 또한 외부적인 힘이 커서 역진자의 자세가 다시 아래로 향하더라도 다시 swing-up 제어기와 강인 안정화 제어기가 동작하여 $\theta = 0$ 인 자세로 안정화됨을 확인할 수 있었다.



그림 9. 원판의 반작용을 이용하여 안정된 역진자
Fig. 9. Stabilized reaction wheel inverted pendulum

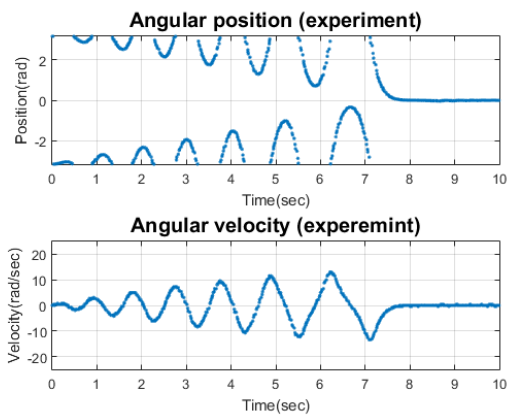


그림 10. 역진자의 강인 자세제어 실험 결과
Fig. 10. Simulation result of the robust control of the inverted pendulum

5. 요약 및 향후 연구

본 논문에서는 원판의 반작용(관성휠)을 이용하는 역진자 시스템을 제작하여 그 수학적 모델을 구한 후 수동성(passivity)을 이용하여 swing-up 제어를 설계하고 관성 모멘트의 불확실성에도 불구하고 안정화를 달성하는 강인 안정화 제어를 설계하였다. 설계한 제어가 역진자가 수직으로 서는 자세를 성공적으로 달성함을 모의 실험과 실제 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서는 제어기 설계에서는 입력 제약을 고려하지 않고 시스템 입력 단에 포화 함수를 설정하여 실제 시스템에는 제한된 입력만이 인가되도록 하였다. 향후 연구에서는 제어기 설계 과정에서 입력 제약 조건을 달성하는 제어 기법을 설계하고자 한다.

References

[1] D. Block, K. Astrom, M. W. Spong. *The reaction wheel*

pendulum, Morgan and Claypool, 2007.

[2] Jung Moon Hwang, Beom Sik Pyo¹, and Jung Han Kim, "Control of Inverted Pendulum using Twisted Gyro-Whee", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 28(10), pp. 1181-1188, 2011

[3] M.-S. Park and D. Chwa, "Swing-Up and Stabilization Control of Inverted-Pendulum Systems via Coupled Sliding-Mode Control Method", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56(9), pp.3541-3555, 2009.

[4] Hyung Gi Min, Ji Hoon Kim, Ju Han Yoon, Eun Tae Jeung, and Sung-Ha Kwon, "A Control of Balancing Robot", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 16(12), pp. 1201-1207, 2010.

[5] Hee-Joo Yeo and Hun Park, "Design of Balancing Robot Controller using Optimal Control Method", *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 31(2), pp. 190-196, 2014.

[6] N. Matsuda, M. Izutsu, J. Ishikawa, K. Furuta and K. J. Astrom, "Swinging-Up and Stabilization Control Based on Natural Frequency for Pendulum Systems", *Proceedings of American Control Conference*, 2009.

[7] Michael Muehlebach, Gajamohan Mohanarajah, and Raffaello D'Andrea, "Nonlinear Analysis and Control of a Reaction Wheel-based 3D Inverted Pendulum", *Proceedings of IEEE Control and Decision Conference*, 2013.

[8] M. L. Dertouzos, J. K. Roberge, "High Capacity Reaction Wheel Attitude Control," *IEEE Trans on Applications and Industry*, Vol. 83(71), pp. 99-104, 1964.

[9] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Third Ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002

[10] <http://goo.gl/vU9gTX>

[11] <http://goo.gl/13zBLp>

[12] <http://goo.gl/jCJhUu>

[13] <http://goo.gl/q1RGuj>

[14] <http://goo.gl/BPDwuZ>

[15] Minsu Ha, and Seul Jung, "Balancing Control of a Single-wheel Mobile Robot by Compensation of a Fuzzified Balancing Angl", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 25(1), pp. 001-006, 2015

[16] Se-Han Lee, Sang-Yong Rhee, "A Mixed H_2 / H_∞ State Feedback Controller Based on LMI Scheme for a Wheeled Inverted Pendulum running on the Inclined Road", *Journal of*

Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 20(5), pp. 617-623, 2010

- [17] Yue Xu, Byung-Jae Choi. "Control of Flexible Joint Cart based Inverted Pendulum using LQR and Fuzzy Logic System", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 23(3), pp. 268-274, 2013
- [18] S. boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, V. Balakrisnan, "Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory". SIAM, 1994.



임성묵(Seong-Muk Lim)

2016년 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과
전기정보공학사

관심분야 : Linear control

Phone : +82-10-3339-5013

E-mail : ssd0023@gmail.com

저자 소개



박상형(Sang-Hyung Park)

2016년 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과
전기정보공학사
2016년~현재 : 동대학 석사과정

관심분야 : Unstable System, Robust Control, Nonlinear Control

Phone : +82-10-9925-3009

E-mail : sctrees@gmail.com



이해창(Hae-Chang Lee)

2016년 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과
전기정보공학사

관심분야 : Linear control

Phone : +82-10-8835-2540

E-mail : gockd25@naver.com



김정수(Jung-Su Kim)

1998년 : 고려대학교 전기공학과 공학사
2000년 : 고려대학교 전기공학과 공학석사
2005년 : 고려대학교 전기공학과 공학박사
2006년 : 서울대학교 박사후 연구원
2006년~2007년 : 독일 Stuttgart 대학 박사후
연구원

2008년 : 영국 Leicester 대학 박사후 연구원

2013년 : 독일 Stuttgart 대학 방문 연구원

2009년~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수

관심분야 : MPC, Nonlinear control, Control in microgrid

Phone : +82-2-970-6547

E-mail : jungsu@seoultech.ac.kr