

퍼지 제어를 이용한 Underactuated Robot의 광범위 제어

유기정, 양동훈, 최현철, 홍석교  
아주대학교 전자공학과

Wide-Range Stabilization Control of Underactuated Robot using Fuzzy Controller

Ki-Jeong Yoo, Dong-Hoon Yang, Hyoun-Chui Choi, Suk-Kyo Hong

**Abstract** - This paper presents the control of an underactuated two-link robot called the Pendubot. Combining linearized state feedback control with Takagi-Sugeno(T-S) fuzzy controller wide-range stabilization of Pendulum is achieved. The local stabilization controller is designed by linearizing the dynamic equations about the several desired set point and using LQR(Linear Quadratic Regulator) techniques. Takagi-Sugeno methodology is used to control the nonlinear models near different operation points. Fuzzy controller is obtained by the fuzzy blending of the local controllers. The paper includes a description of the algorithm as well as real time experimental results for the Pendubot.

도 회전이 가능하도록 설계되어 있다. 모델링에 사용된 변수들을 보면, 각 축의 무게를  $m_1, m_2$ , 길이를  $l_1, l_2$ , 무게 중심까지의 거리를  $l_{c1}, l_{c2}$ , 기준 좌표에 대한 각도를  $q_1, q_2$ , 각 축의 관성모멘트를  $I_1, I_2$ , 중력가속도를  $g$ 라 한다.

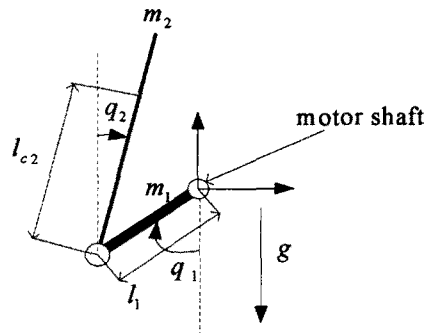


그림 1. 펜더봇의 구조

1. 서 론

펜더봇(Pendubot)은 단일 구동부를 가지는 2축의 회전 관절로 연결된 매니퓰레이터 시스템으로 높은 비선형성으로 인해 비선형 제어 실험이나 교육용으로 많이 사용되는 로봇이다.[1]

첫 번째 축은 DC 모터에 의해서 구동되며, 두 번째 축에는 구동부가 없어 간단한 도립전자 시스템으로 볼 수 있다. 두 번째 축은 첫 번째 축에 대해 자유로운 회전 운동을 하므로, 하단에 위치한 평형점과 상단에 위치한 불안정한 평형점이 존재하게 된다. 이와 같이 자유도보다 적은 동력원을 가진 시스템을 Underactuated 시스템이라고 한다.

본 논문에서는 개루프에서 불안정한 평형점을 모델 기반 퍼지 제어기인 Takagi-Sugeno 방법[2]를 통해 펜들럼의 균형 제어를 하고자 한다.

우선, 국소 모델에 대해 선형 제어 이론을 이용하여 제어를 설계한다. 이렇게 국소 모델에 대한 선형 모델이 얻어진 이후에, 전체 제어기는 국소 제어기의 퍼지 조합에 의해 구성된다.[3]

본문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 시스템 모델의 구성과 동력학 방정식을 유도하고, 2.2절에서는 모델의 제어 알고리즘을 구체적으로 제시한다. 2.3절에서는 제안된 알고리즘을 실험을 통해 제어기의 성능을 확인한다.

2. 본 론

2.1 시스템의 구성 및 모델

이 장에서는 시스템의 하드웨어 구성과 동력학식을 유도한다. 펜더봇은 두 개의 관절로 구성되어 첫 번째 축은 베이스에 고정되어 있는 모터의 축에 직접 연결되어 있고, 두 번째 축은 구동기 없이 자유회전이 가능하도록 첫 번째 축에 연결되어 있다. 두 개의 축 모두가 360

2.1.1 비선형 모델 동역학식

펜더봇의 동역학식은 라그랑지 동력학에 의해서 다음과 같이 얻어진다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

$$D(q) = \begin{bmatrix} \theta_1 & -\theta_3 \cos(q_1 - q_2) \\ -\theta_3 \cos(q_1 - q_2) & \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_3 \sin(q_1 - q_2)\dot{q}_2 \\ -\theta_3 \sin(q_1 - q_2)\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$g(q) = \begin{bmatrix} \theta_4 g \sin(q_1) \\ -\theta_5 g \sin(q_2) \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$$

$$\theta_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$\theta_3 = m_2 l_1 l_2 \quad (3)$$

$$\theta_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1$$

$$\theta_5 = m_2 l_{c2}$$

2.1.2 선형 모델

펜더봇의 비선형 모델을 다음의 평형점에 대해서 각각 테일러 급수로 전개하여 선형화 한다.

$$f_a(x, u) = f_a(x_r, u_r) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_r, u_r} (x - x_r) + \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_r, u_r} (u - u_r) \quad (4)$$

$$x_r = [q_1, 0, 0, 0], \quad i=1, 2, 3$$

$$q_1 = 0^\circ, q_2 = 30^\circ, q_3 = 60^\circ$$

따라서, 각 지점에서 선형 행렬  $A_i, B_i$ 를 얻는다.

### 2.2 퍼지논리를 통한 제어 알고리즘

세 지점에서 얻어진 선형 모델로부터 구해진 상태궤환 이득으로부터 퍼지 제어를 통해, 첫 번째 축의 연속된 구간에서의 상태궤환 이득을 구할 수 있다.

$i^{\text{th}}$  Plant Rule

IF  $z_i(t)$  is  $M_{li}$  .....  $z_j(t)$  is  $M_{ji}$ .....  $z_q(t)$  is  $M_{qi}$

THEN

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}$$

$i^{\text{th}}$  Controller Rule

IF  $z_i(t)$  is  $M_{li}$  .....  $z_j(t)$  is  $M_{ji}$ .....  $z_q(t)$  is  $M_{qi}$

THEN

$$u = -K_i(x-r)$$

따라서 최종 출력은 다음과 같다.

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_i(z(t)) \{-K_i(x(t)-r)\}}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))} \quad (5)$$

이때  $K_i$ 는 (A-BK)를 안정하게 하는 상태궤환이득으로, LQ 알고리즘을 통해 구한다. 각 선형화 지점에서의 상태궤환이득은 다음과 같다.

(1)  $q_1=0$  인 경우

$$K_1 = [-67.7972 \quad 370.6764 \quad -18.9041 \quad 78.2062]$$

(2)  $q_1=\pi/6$ 인 경우

$$K_2 = [-63.9823 \quad 443.6409 \quad -19.7042 \quad 94.1583]$$

(3)  $q_1=\pi/3$ 인 경우

$$K_3 = [-52.6283 \quad 822.5199 \quad -21.3045 \quad 176.4364]$$

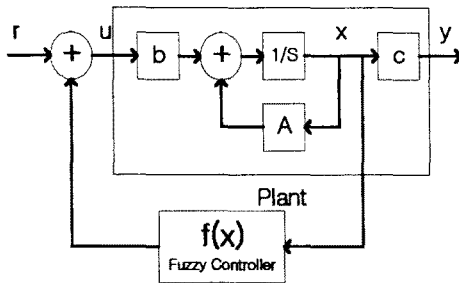


그림 2. 퍼지 제어 시스템

## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 팬더봇의 평형점

팬더봇은 일반적인 수레형 도립진자 시스템과 비슷한 문제를 가지고 있지만, 동력원인 첫 번째 축이 회전운동을 하므로 일반적인 수레형 도립진자보다도 비선형성이 강하다. 또한 첫 번째 축의 각도가  $\pm\pi/2$  인 경우에는 제어가 불가능하다. 본 실험의 목적은 팬더봇의 첫 번째 축의 각도를 원하는 위치에, 두 번째 축의 각도는 지면을 기준으로 도립 시키는 것으로 다양한 형태의 평형점 형태를 가질 수 있다. [그림3] 즉 첫 번째 축의 위치제어와 두 번째 축의 도립제어를 동시에 고려하여야 한다.

또한  $q_1=0$ ,  $q_1=\pm\pi$  인 경우에는 첫 번째 축이 평형점에서 중력의 영향을 받지 않지만, 그 이외의 평형점에서는 평형점을 유지하기 위해 중력 보상을 해주어야 한다.

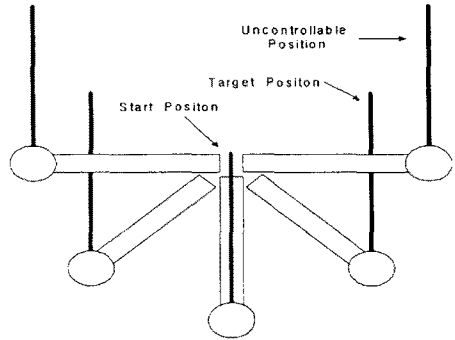


그림 3. 팬더봇의 다양한 평형점

### 2.3.2 실험 시스템 구성

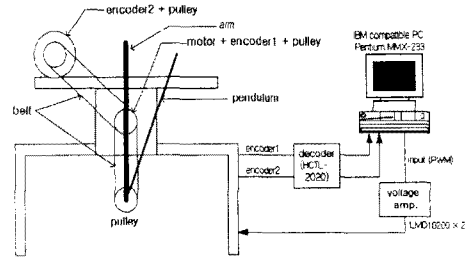


그림 4. 시스템 구성

실험 장비의 하드웨어 구성으로 IBM PC(Pentium MMX)와 Digital IO CARD를 사용하였으며, 모터 드라이버는 LMD18200을 사용하여 직접 제작하였다. 모터 드라이버는 전압 구동방식으로 직접 토크 제어를 하지 못하는 관계로 모터의 시스템을 포함하는 동력학식으로 변환하여 제어를 하게 된다.

### 2.3.3 계단응답 실험

그림 5는 첫 번째 축의 각도 기준 입력으로 0.5rad 의 계단 입력을 준 경우로, 그림을 보면 기준 입력에 대해 실제 응답이 잘 추종함을 볼 수 있다. 이때의 수렴시간은 3초 미만이다. 또한, 동시에 그림 6을 보면, 두 번째 축의 각도는 항상 지면을 기준으로 도립 되어있음을 확인할 수 있다. 두 번째 축의 수렴시간은 약 2초 미만이다.

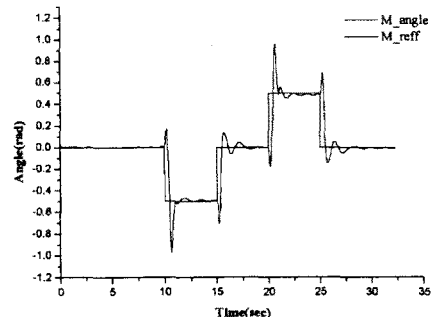


그림 5. 첫 번째 축 각도 (계단응답)

### 3. 결 론

본 연구에서는 모델 기반 퍼지 제어기인 T-S 퍼지 제어기를 이용한 펜더봇의 균형제어 알고리즘을 제안하였다. LQR을 이용한 선형 국소 모델 제어를 설계하고, 각 선형 제어기의 퍼지 조합에 의해 전체 비선형 시스템에 대한 제어를 설계하였다.

또한 제안된 알고리즘의 검증을 위해, 실험을 통해 성능을 확인하였다. 첫 번째 축에 대해 계단 입력과 정현파 입력을 가했을 때, 두 번째 축을 도립 상태로 유지하면서, 첫 번째 축에 대한 입력을 잘 따라감을 볼 수 있었다. 실험에서는 모터의 최대 토크의 제약으로 인해 0.5rad(30도)에서 -0.5rad (-30도)까지의 범위에서 동작을 시켜 확인하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] D. Block, "Mechanical design and control of the Pendubot", Thesis, B.S of University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 1995.
- [2] T.Takagi and M.Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. 15, No. 1, pp. 116-132 1985.
- [3] Begovich, O.; Sanchez, E.N.; Maldonado, M. "T-S scheme for trajectory tracking of an underactuated robot" Fuzzy Systems, 2000. FUZZ IEEE 2000. The Ninth IEEE International Conference on , Vol.. 2 , pp. 798 -803 2000.
- [4] Hiroyuki Kajiwara, Pierre Apkarian, and Pascal GAhinet, " LPV Techniquew for Control of an Inverted Pendulum", IEEE Control Systems, pp. 44-54, 1999.
- [5] 양동훈, "2축 회전 진자의 스윙업 제어" 아주대학교 전자공학과 석사학위논문, 2000.

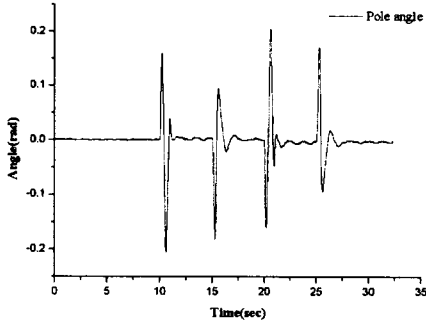


그림 6. 두 번째 축 각도(계단응답)

#### 2.3.4 정현파 응답 실험

그림 7은 첫 번째 축에 진폭 0.5rad에 0.1Hz의 주기를 갖는 정현파 기준 입력을 따라가도록 한 경우로, 그림을 보면 기준 입력에 대해 실제 응답이 잘 추종함을 볼 수 있다. 또한 이때 두 번째 축의 오차는 약 0.001 rad미만으로 지면에 대해 도립하고 있음을 볼 수 있다.(그림 8)

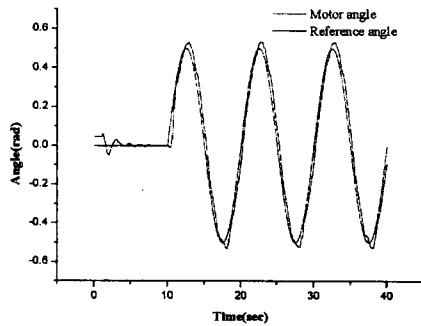


그림 7. 첫 번째 축 각도(sine 응답)

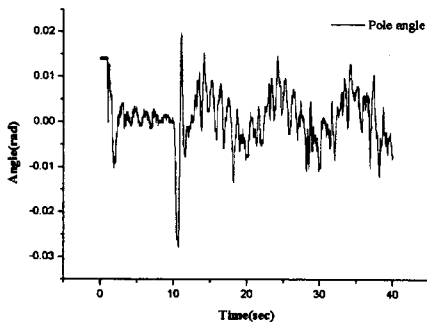


그림 8. 두 번째 축 각도(sine 응답)