

## Fuzzy-PID 제어를 이용한 2축 도립진자 시스템의 안정화

유동국\*, 최우진\*, 박정웅\*, 이민우\* 이준탁\*  
\*동아대학교 전기공학과

### Research of Stabilizing For Dual-Axis Inverted Pendulum system using Fuzzy-PID Control

Dong-kuk Yu, Woo-jin Choi, Jung-Woong Park, Min-Woo Lee, John-T. Lee

\* School of Electrical Engineering, Dong-A University, 840, Hadan-dong, Saha-gu, Busan, Korea

**Abstract** - 본 논문에서는 Fuzzy-PID Control을 이용한 2축 도립진자를 제어한다. X-Y 축을 움직이는 카트에는 도립진자가 세워져 있으며 카트가 2축의 평면상에 원하는 위치로 빠르고 정확하게 이동할 수 있게 하는 동시에 도립진자의 균형을 깨뜨리지 않고 움직이는 것을 제어의 목표로 한다. Fuzzy-PID Control은 도립진자의 균형에 대한 제어뿐만 아니라 로봇의 위치 제어까지 적용된다. 본 연구 논문에서는 이러한 Fuzzy-PID 적용 시스템에 대한 시뮬레이션을 실행함으로써 그 우수성을 입증 하고자 한다.

#### 1. 서 론

대부분의 비선형 시스템은 외부적인 외란요소, 기계적 마찰력, 시스템 특성에 영향을 미치는, 모델링에 포함되지 않은 동적특성 등의 불확정성을 가지고 있다. PID제어 기법은 구성이 간편하고 성능의 우수성으로 산업에서 가장 많이 쓰이고 있으나, 이러한 비선형적인 요소에 대해서는 많은 약점을 가지고 있으며 그 성능 또한 기대하기 어렵다. 이러한 문제점을 풀기 위해 지금도 다양한 제어 기법들이 연구되고, 제안되고 있다. 그 중에 본 논문에 쓰이게 될 Fuzzy-PID 제어기법은 지능제어 기법 중 매우 강한 장점을 가진다. 이는 이 제어기법이 Plant에 대한 완벽한 수학적인 모델이 필요치 않으며, 비선형성과 불확정성의 시스템 특성에도 매우 유용한 제어기법이기 때문이다.

제안된 Fuzzy-PID 알고리즘은 fuzzy 시스템의 장점(전문가 지식을 언어적 If-then 룰들로 구성)과 PID의 장점(구성의 편리함)을 가진다. 따라서 PID의 외란과 변화하는 파라미터들에 대한 비효율성을 fuzzy 시스템의 추론기법에 적용함으로써 높일 수 있다.

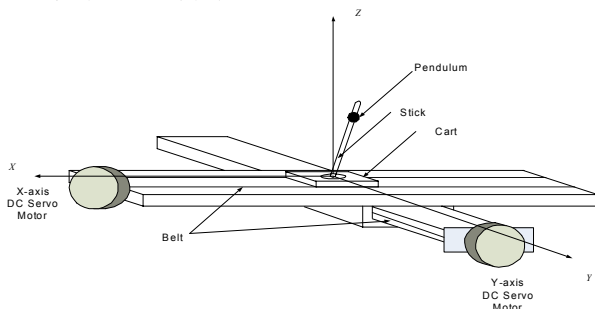
적용된 2축 도립진자는 항상 제어기의 성능을 측정하기 위해 쓰여져 왔다. 예를 들면 다른 작동 상태에서의 다양한 비선형적인 요소들과 물리적으로 발생시킨 외부에서의 외란들에 대한 시스템 성능을 측정하는데 사용되어져 왔다. 그러므로 높은 비선형성의 불안정한 도립진자는 실시간 안정화와 추종제어의 과제로 도전되어져왔으며 본 논문에서도 X-Y 로봇상의 도립진자를 세우는 동시에 원하는 위치까지 넘어 지지 않도록 제어한다. 흔히 도립진자는 자유도가 하나인 도립진자로부터 자유도가 2개인 도립진자, 그리고 2축 제어 도립진자(Dual-Axis Inverted Pendulum)가 있으며 본 연구는 2축 제어 도립진자를 채택하였다 따라서 이를 모델링하고 제안된 제어기를 설계하여 시뮬레이션 함으로써 Neuro-Fuzzy 제어 알고리즘의 우수성을 검증한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Dual-Axis Inverted Pendulum

##### 2.1.1 Motor Control configuration

X-Y 평면상을 움직이는 시스템을 구상하기 위하여 <그림 1>과 같은 로봇 시스템을 구성하였다.



<그림 1> X-Y Table Robot. (a) Mechanism configuration  
시스템은 두 개의 DC 서보모터가 X축과 Y축으로의 카트의 운송을 담

당하며, 모터는 전류제어 방식의 PWM(Pulse Width Modulation)방식으로 제어된다. 모터제어를 위한 수학적인 모델링은 아래와 같다.

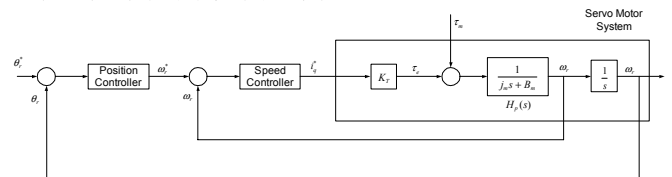
$$\tau_e = K_T i_q^* \quad (1)$$

$$K_T = \frac{3}{2} P_t L_{md} I_{fd} \quad (2)$$

$$H_p(s) = \frac{1}{(J_m s + B_m)} \quad (3)$$

$$\tau_e = \tau_m + B_m \dot{\theta}_r + J_m \ddot{\theta}_r \quad (4)$$

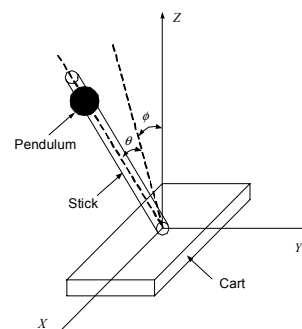
$\tau_e$ 는 전기적 토크,  $K_T$ 는 토크 상수이다.  $i_q^*$ 는 인가된 전류이며  $P_t$ 는 모터의 극수,  $L_{md}$ 는 상호 인덕턴스,  $I_{fd}$ 는 d-축의 등가 자기 전류이다.  $\tau_m$ 는 부하토크,  $B_m$ 은 마찰계수,  $J_m$ 은 회전자와 스크류의 관성모멘트이다. (이는 X축 빔이 올라가 있으므로 Y축을 담당하는 모터의 관성이 큰 것을 전제로 한다)  $\theta_r$ 과  $\omega_r$ 은 회전자의 위치와 각속도,  $\theta^*$ 와  $\omega^*$ 는 원하는 회전자의 위치와 각속도이다.



<그림 2> Block Diagram of DC Servomotor Control system

##### 2.1.2 Inverted Pendulum Mathematical Modeling

X-Y 로봇의 카트 위에는 도립진자가 세워져 있다. 가상의 평행점(Equilibrium Point)으로부터 이 도립진자는 로봇이 2차원 평면상을 움직이는 동안 외란을 받게 되고 시스템은 이 도립진자를 최대한 안정한 상태에서 운동하게 된다.



<그림 3> Inverted Pendulum Structure

이 카트와 연결된 진자의 동적 방정식은 다음과 같은 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{V} + B\dot{V} = GV + D \quad (5)$$

이때  $U = [i_q^* \ 0 \ 0 \ i_q^*]^T$ 는 제어 벡터이며,  $V = [x \ \phi \ \theta \ y]^T$ 는 유효한 상태벡터이다. 그러나 동특성 방정식은 두 가지로 나뉜다. 하나는 로봇 위치에 대한 부분이며, 하나는 도립진자의 각도에 대한 문제가 된다. 이를 고려하여 다음과 같이 식(5)로 나타낼 수 있다.

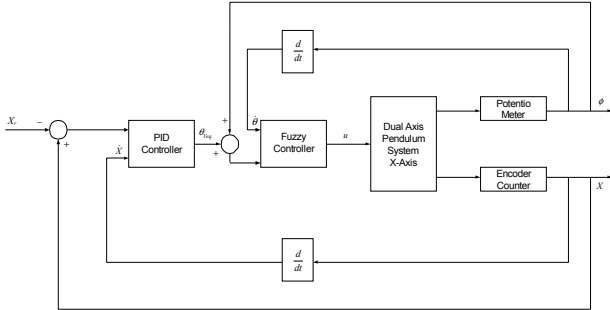
$$M_A(\theta, \phi)\ddot{A} + B_A(\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi})\dot{A} = T_1 F + G_A(\theta, \phi) \quad (6)$$

$$M_P(\theta, \phi)\ddot{P} + B_P(\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi})\dot{A} = T_2 F + G_P(\theta, \phi) \quad (7)$$

여기서  $F = [K_{IX}^{i^*} \quad K_{IY}^{i^*}]^T$  제어 벡터이며,  $A = [\phi \quad \theta]^T$ 와  $P = [Y \quad X]^T$ 는 로봇위의 도립진자 각과 X-Y 테이블 로봇의 위치벡터이다.

## 2.2 Fuzzy-PID Controller

제안된 Fuzzy-PID Controller의 개요는 <그림 4>와 같다.



<그림 4> Structure of Fuzzy-PID Controller

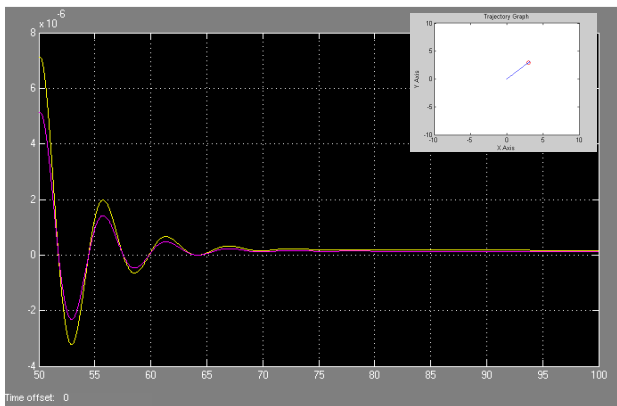
제안된 시스템은 두 개의 독립된 PID제어기와 Fuzzy 추론 알고리즘을 갖고 있으며 이는 각각 Fuzzy 추론제어의 멤버쉽 함수층과 If-Then 룰을 가지는 층으로 구성되어 있으며, PID제어기와 Fuzzy Controller는 유기적으로 결합되어있다.

## 2.3 Simulation Result

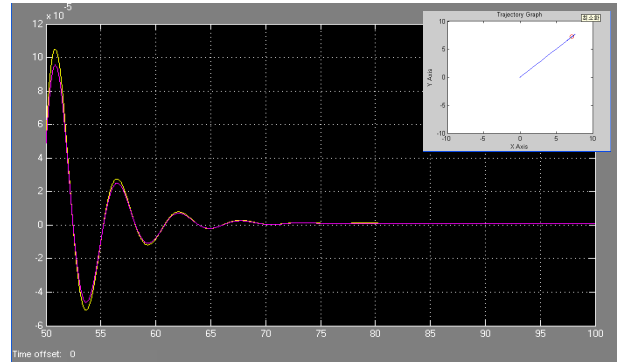
위의 제안된 제어기를 바탕으로 Matlab, Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 결과는 아래와 같다. 첫 번째 실험에서는 가상의 포인트 '0'에서 약 30cm 이동시에 발생하는 도립진자의 변위각( $\theta$ ,  $\phi$ )이며, 두 번째 실험은 약 60cm에 해당하는 변위를 실행했을때의 진자의 변위각, 세 번째 실험은 구형과 인가시의 도립진자의 변위각을 나타낸다. <표 1>은 시뮬레이션 시에 사용되었던 파라메타들에 대한 값이다.

<표 1> Virtual Parameters of X-Y Table Robot

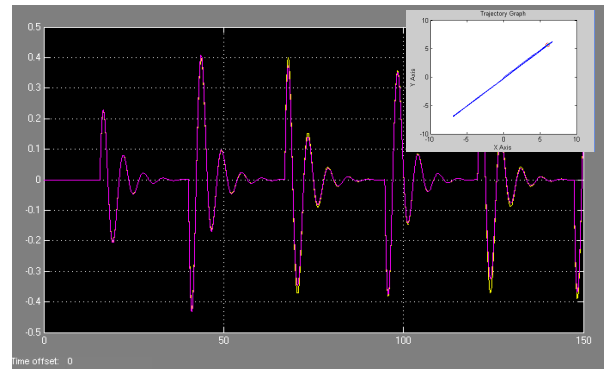
	Parameter	
Mass of cart	2.3	kg
Mass of stick	0.05	kg
Mass of Pendulum	0.04	kg
length to center point of stick	0.15	m
Length of stick	0.16	m
Gravity Force	9.8	$m/s$
Inertia Moment of Motor 1	$0.7 \times 10^{-6}$	$kg \cdot m^2$
Inertia Moment of Motor 2	$3.6 \times 10^{-4}$	$kg \cdot m^2$



<그림 5> Simulated result of Neuro-Fuzzy control system(30cm)



<그림 5> Simulated result of Neuro-Fuzzy control system(60cm)



<그림 5> Simulated result of Neuro-Fuzzy control system(Pulse)

## 3. 결 론

2축 도립진자 시스템을 이용한 제어는 도립진자의 강한 비선형성에 얼마만큼 빠르고 안정된 제어기를 설계하는가에 대한 문제가 되어왔다. 본 논문에서는 Fuzzy-PID 제어기법을 적용하고 시뮬레이션 하였다. 그 결과 제어기는 매우 빠르고 우수한 성능을 보였으며 향후 이를 바탕으로 로봇의 하드웨어적 소프트웨어적인 구현으로 실질적인 실험을 통한 성능 검증을 수행할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Rong-Jong Wai, Li-jung Chang "Stabilizing and Tracking Control of Nonlinear Dual-Axis Inverted Pendulum system Using Fuzzy Neural Network., IEEE Transaction on Fuzzy systems. Vol 12 No.1 February 2006
- [2] S. Jung and Sun Bin Yim, "Experimental studies of Neural network technique for nonlinear systems", ICASE, Vol. 7, No.11, pp. 918-926, 2001
- [3] S. Jung and H. T. Cho, "Decentralized neural Network reference Compensation technique for balancing two degrees of freedom inverted pendulum", ICCAS Korea-Japan Joint Workshop on Intelligent system October 2002
- [4] Hyun-Taek Cho and Jung Seul, "Neural Network Position Tracking Control of an Inverted Pendulum by an X-Y Table Robot", 2003 IEEE/RSJ
- [5] Dr. Don Jacobs, "Inverted Equilibrium of vertically Driven Physical Pendulum", 1997
- [6] J-S. R. Jang C.-T. Sun E. Mizutani "Neuro-Fuzzy and Soft computing", 1997
- [7] 권옥현, "도립진자를 이용한 고전 및 현대 제어기의 설계", 2004
- [8] 최우진, 박정훈, 이오걸, 이준탁, "퍼지추론 기법을 이용한 도립진자 시스템의 안정화제어에 관한 연구", 1995 한국 퍼지 및 지능시스템 학회 부산·경남지회 동계학술 발표대회 논문집, pp 29-24, 1995

[본 논문은 한국전력공사에서 지원한 전력변환 시스템 신기술 연구센터(과제번호2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.]