

적응 퍼지 추론 기법을 이용한 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 관한 연구

Stabilization Control of the Inverted Pendulum System by Adaptive Fuzzy Inference Techniques

ABSTRACT

본 논문에서는 부하의란이나 시스템 내부 파라미터의 변동시에 적응력이 저하되는 종래의 PI 제어기와, 정상상태 잔류편차가 존재하는 퍼지 제어기의 단점을 극복하기 위한 적응 퍼지 제어 기법을 제안하였고, 이를 도립 진자 시스템에 적용하였다. 운송차의 위치 및 진자 각도의 오차, 오차의 변화량에 따라 퍼지 추론을 행하여 PI 제어기의 가중치를 결정하는 구조로, P 제어기는 운송차 및 진자의 오차가 과도 상태에서의 영역에서 사용되어 속응성과 고정도의 특성을 얻는다. I 제어기는 정상상태에서의 정도 향상에 이용되었다. 특히, 제안하는 적응 퍼지 제어기는 운송차의 위치 오차에 대한 PI 동작과, 진자의 각도 오차에 대한 PI 동작을 각각 퍼지 추론에 의해 부드럽게 전환함으로써 고유 불안정의 시스템인 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 적용하였다.

I. 서론

도립진자 시스템은 대표적인 고유 불안정의 시스템으로서 그 안정화는 많은 연구자들에 의해 널리 연구되어온 고전적인 제어 문제이다. 이것은 물리적, 수학적 해석이 어렵고, 이로 인해 제어기를 구성하는 데에도 많은 어려움이 따르기 때문이다. 그러나, 인간의 경험과 사고, 지식 등을 적용하여 제어기를 구성할 수 있는 퍼지 추론을 이용하여 제어기를 구성함으로써 이러한 어려움을 극복할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 도립 진자 시스템의 안정화 제어에 적응 퍼지 추론 기법을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하고, 그 성능을 고찰한다. 그리고, 적응 퍼지 제어기가 지니는 고유의 특성과 그 응용 가능성을 제시한다.

II. 도립 진자 시스템의 모델링

도립 진자 시스템의 운송차 및 진자의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\text{운 송 차: } M\ddot{x}(t) + \mu\dot{x}(t) = \alpha \cdot u(t) - H(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{진자의 수평방향: } H(t) &= m \frac{d^2}{dt^2} \{x(t) + L \sin \phi(t)\} \\ &= m\ddot{x}(t) + mL\{\ddot{\phi}(t) \cos \phi(t) - \dot{\phi}^2(t) \sin \phi(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{수직방향: } V(t) - mg &= m \frac{d^2}{dt^2} \{L \cos \phi(t)\} \\ &= -mL\{\ddot{\phi}(t) \sin \phi(t) + \dot{\phi}^2(t) \cos \phi(t)\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{회전방향: } J_b \ddot{\phi}(t) = LV(t) \sin \phi(t) - LH(t) \cos \phi(t) - \eta \dot{\phi} \quad (4)$$

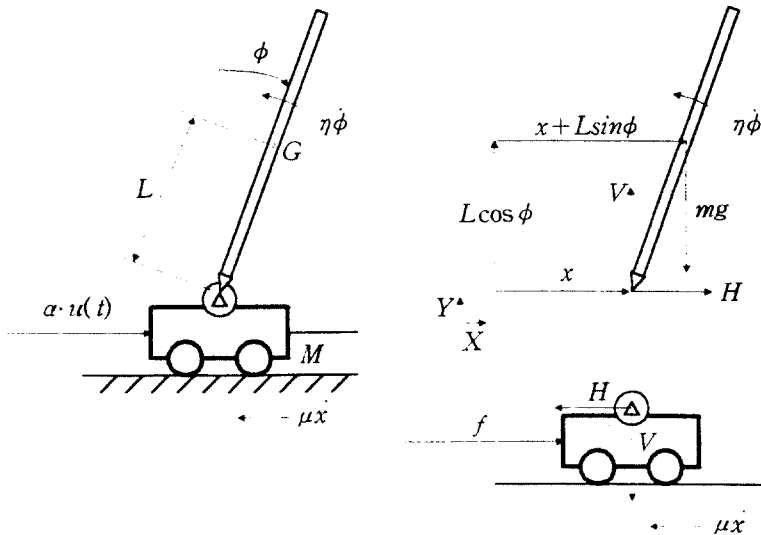


Fig. 1. Mathematical modeling of the pendulum system

III. 제안하는 적응 퍼지 제어기

본 논문에서 제안하는 적응 퍼지 제어기는 두 개의 부 제어 시스템(Subcontrol System)으로 구성되며, 각각은 오차와 오차의 변화량에 따른 PI 동작을 퍼지 추론에 의해 행한다. 먼저, 운송차의 위치 오차에 따른 PI 동작의 가중치 α 와 진자의 각도 오차에 대한 가중치 β 를 도입하면, 도립 진자 시스템의 각각의 조작량은 다음의 식(5), 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_1(t) &= \alpha \times K_{I_x} e_x(t) + (1-\alpha) \times K_{I_x} \int_0^T e_x(t) dt \\
 &= \alpha \times u_{P_x} + (1-\alpha) \times u_{I_x} \quad (\text{운송차의 위치에 대한 조작량})
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 u_2(t) &= \beta \times K_{P_\phi} e_\phi(t) + (1-\beta) \times K_{I_\phi} \int_0^T e_\phi(t) dt \\
 &= \alpha \times u_{P_\phi} + (1-\alpha) \times u_{I_\phi} \quad (\text{진자의 각도에 대한 조작량})
 \end{aligned} \tag{6}$$

로 된다. 그러므로, 전체 조작량 $u(t)$ 는

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \tag{7}$$

로 주어진다. 단, u_{P_x} , u_{I_x} 는 각각 운송차의 위치 오차에 대한 조작량이고, u_{P_ϕ} , u_{I_ϕ} 는 각각 진자의 각도 오차에 대한 P 제어기와 I 제어기의 조작량이다. 각각은 가중치 α , β 에 의해 결정된다. 운송차의 위치와 진자의 각도가 크면, 가중치를 크게 하여 P 제어를 실행하고, I 동작은 약화시킨다. 제안하는 적응 퍼지 제어기는 이렇게 가중치를 퍼지 추론에 의해 결정함으로써, 오차에 적응하는 고정도의 제어를 실행할 수 있다. 가중치 α 와 β 에 대한 제어 규칙표는 표 1과 같다.

Table-1. Fuzzy Control Rule Table for the Inverted Pendulum.

α, β		e				
		NB	NM	ZO	PM	PB
e	NB	PB	PB	PB	PB	PB
	NM	PM	PM	PS	PM	PM
	ZO	PS	ZO	ZO	ZO	PS
	PM	PM	PM	PS	PM	PM
	PB	PB	PB	PB	PB	PB

단,

NB: Negative Big NM: Negative Medium NS: Negative Small
 ZO: Approximately Zero PS: Positive Small PM: Positive Midium
 PB: Positive Big

이다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

도립 진자 시스템의 운송차의 위치 및 진자의 각도 제어를 시뮬레이션 한 결과는 그림 2와 같다. 단, 이때의 도립진자 시스템의 제원은 다음 표 2와 같다. 안정화된 도립 진자에 임펄스 형태의 외부 외란을 가했을 때, 약 2초 후에 운송차 및 진자는 원래의 안정 영역에 수렴하였다.

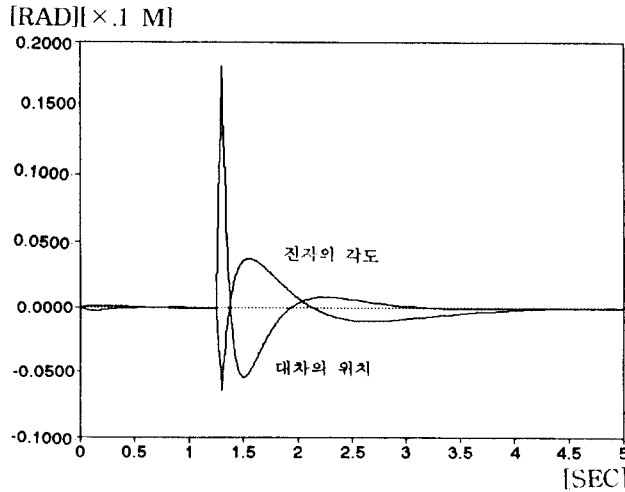


Fig. 2. Responses of Adaptive Fuzzy Controller

Table-2. Specification of inverted pendulum system

PARAMETER	DESCRIPTION	VALUE	UNIT
m	Mass of the pendulum	0.067	kg
L	Length from the fulcrum to the mass center of pendulum	0.15	m
V	Vertical reaction force at the fulcrum	—	kg · m/s ²
H	Horizontal reaction force at the fulcrum	—	kg · m/s ²
J_p	Inertia moment of the pendulum	0.00205	kg · m ²
M	Mass of the cart	0.886	kg
x	Horizontal position of the cart	—	m
ϕ	Angle of the pendulum from the vertical line	—	rad
r	Wire belt pulley radius	0.047	m
α	Driving Force coefficient	0.738	kg · m/s ² / V
u	Input voltage to push the cart	—	V
G	Mass center of pendulum	—	—
g	Gravitational constant	9.8	m/s ²
μ	Friction coefficient	2.215	kg/s
η	Coefficient related to Rotation Moment of the Pendulum	0.00185	kg · m ² /s

V. 실험

그림 3은 적응 퍼지 제어기의 시스템 구성도를 나타낸다. 운송차의 이동은 직류 서보 전동기에 접속된 펄스 엔코더로부터 구해지며, 진자의 각도는 전위차계(Potentiometer)로부터 얻는다. 또, 목표치와 현재의 값으로부터 위치 및 각도 오차와 그 변화량이 연산되어 컴퓨터상에서 PI 연산을 행한다. 최종적인 조작량이 결정되면, DT-2801 Data Acquisition Board를 통하여 D/A변환을 거쳐 도립 진자 시스템에 포함된 전동기 구동회로의 입력신호로 된다. 이로써 직류 서보 전동기는 와이어가 감긴 풀리로서 운송차를 좌우로 이동시켜 도립 진자의 안정화 제어를 행한다.

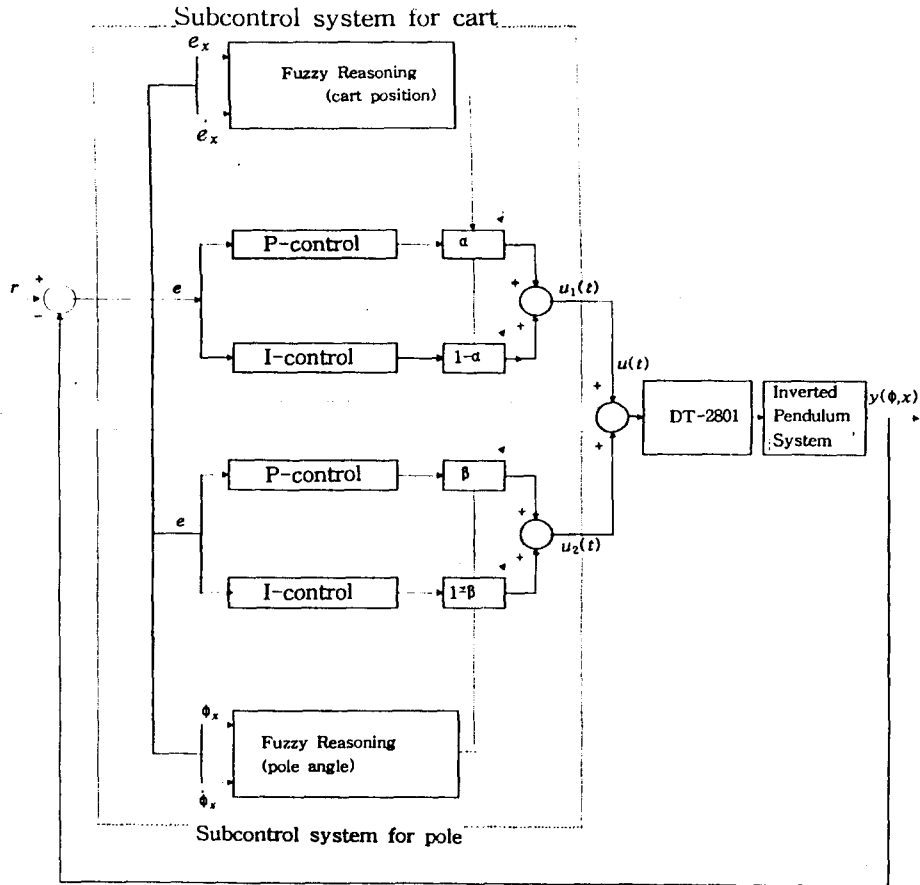


Fig. 3. Stabilization controller for the inverted pendulum system by fuzzy inference

VI. 결론

본 연구에서는 비선형성이 강한 도립 진자 시스템의 안정화 제어를 위하여 적응 퍼지 제어 기법을 제안하였다. 즉, 운송차의 위치 오차 및 오차 변화, 도립 진자의 각도 오차와 오차 변화에 따라 가중치 α 및 β 를 퍼지 추론하여 PI 제어기의 이득을 결정함으로써, 부하외란이나 시스템 내부 파라미터의 변동시에 적응력이 약화되는 종래의 PI 제어기와, 정상상태 편차가 존재하는 퍼지 제어기의 단점을 최소화하였다. 향후, 도립 진자와 운송차 간의 상호 동특성을 고려한 소속 함수의 정량적 분석 및 자기조정 기법이 요망된다.

VII. 참고문헌

1. M.H.Perng, H.H.Chang, "Intelligent supervision of servo control", IEE Proceedings-D, Vol.140, No.6, pp.405-412, 1993.
2. C.J.Harris, C.G.Moore & M.Brown, Intelligent Control, World Scientific, 1993.
3. 菅野道夫, "あいまい集合と論理の制御への應用", 計測と制御, Vol.18, No.2, pp.150-160, 1979.
4. 川路 茂保, 松永 信智, "ファジィ制御の理論と倒立振り子への應用", 인터フェース, pp.137-153, Sept, 1993.
5. 川谷亮治, 土井智晴, 外川一仁, "倒立振り子系に對する非線形オブザーバの一構成法, 計測自動制御學會論文集, Vol.30, No.11, pp.1408-1410, 1994.