

결합된 퍼지 제어를 이용한 볼과 플레이트 시스템에서의 추정제어기 설계

Tracking Control of Ball and Plate System via Integrated Fuzzy Controllers.

서민석* 현창호** 박민용***
 Seo, Minseok, Hyun, Changho Park, Mignoon

Abstract - A ball moving on a beam is a typical nonlinear dynamic system, which is often adopted to proof test diverse control schemes. Ball and plate system is the extension of the traditional ball and beam problem that moves a metal ball on a rigid plate. In this paper, a trajectory planning and tracking problem is proposed for ball and plate system, which is to control the ball from a point to another without hitting the obstacles. Our scheme is composed of three controllers, TS type optimal path tracking controller, mandani type obstacle avoidance controller and trajectory planning controller that determines the desired trajectory. But this type of construction can give rise to chattering executions. Because the difference of contributions from concurrent controllers can cause behaviors unsmoothly. We propose fuzzy pid supervision controller to handle this problem.

Key Words :Trajectory tracking: Fuzzy control: PID Control: Ball and plate system: Chattering Effects

1. 서론

Ball and Plate 시스템은 기존의 Ball and Beam 시스템의 확장형이다. 이것은 제한한 제어 알고리즘을 검증하기 위해서 자주 사용되지만,[3] 여기서는 금속 구가 평면 위에서 이동하는 문제에 대하여 고려하였다.[1] 평면의 구배는 수직을 이룬 두 방향의 축으로 조정되고, 이 비탈면을 따라 금속 구가 움직이게 된다. 본 논문에서는 다음과 같이 A, B, C, D, E, F, G 지점을 순서대로 지나가는 경로를 계획하고, 이 경로를 추정하면서 장애물을 회피하는 제어를 고려하였다.

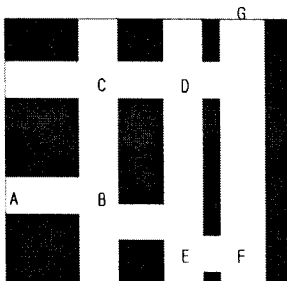


그림1. 금속 구의 이동 경로

여기서는 세 가지의 제어가 필요하다. 우선, 경로를 계획하는 퍼지 경로 계획기가 필요하고, 이 계획기가 구한 경로를 따라 이동하게 하는 퍼지 추정제어기가 필요하다. 마지막으로, 금속 구가 장애물에 부딪히지 않도록 하는 감시제어기가 필요하다.

경로를 추정할 때, 두 제어기에서 상반된 행위를 할 때가 있다. 만일, 장애물을 통과하는 잘못된 경로를 따라가는 추정제어기가 있다면, 장애물이 있을 때 마다, 감시제어기와 다른 제어 입력을 보내기 때문에 행위의 스위칭이 생기고, 따라서 시스템 출력단에서 채터링이 발생한다.

여기서는 장애물 회피하는 감독 제어를 PID 퍼지 제어기로 설계하여, 하이브리드 제어기의 출력이 오르내림 정도를 조정하고, 금속 구의 이동경로가 매끄러운 곡선을 나타내도록 구현해 보았다.

2. 제어 요소 및 수학적 모델

Ball and Plate 시스템을 동역학식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2}mr\dot{r}^2 + \frac{1}{2}J_p(\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) + \frac{1}{2}J\left(\frac{\dot{r}}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}(J(\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) + m(x\dot{\theta}_x + y\dot{\theta}_y)^2)$$

저자 소개

- * 서민석: 延世大學 電氣電子工學科 碩士課程
- ** 현창호: 延世大學 電氣電子工學科 博士課程
- *** 박민용: 延世大學 電氣電子工學科 教授 工博

위식에서 다음과 같은 상태를 정하고 Ball and Plate 시스템의 상태방정식을 나타낼 수 있다.

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)^t$$

$$= (x, x, \theta_x, \dot{\theta}_x, y, y, \theta_y, \dot{\theta}_y)^t$$

$$Y = h(X) = (x_1, x_5)^T$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ B(x_1 x_4^2 + x_4 x_5 x_8 - g \sin x_3) \\ x_4 \\ 0 \\ x_6 \\ B(x_5 x_8^2 + x_1 x_4 x_8 - g \sin x_7) \\ x_8 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

$$B := m/m(m + J/R^2)$$

사용한 매개변수는 다음과 같다.

m (구의 질량, 0.11kg)

R (구의 반경, 0.02m)

x, y (plate위에서의 공의 x, y 위치)

\dot{x}, \dot{y} (금속 구의 x, y 축 상으로의 이동 속도)

v_{\max} (금속 구의 최대 이동속도 4mm/s)

θ_x, θ_y (plate의 x, y 축 상으로의 각도)

$\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y$ (plate의 x, y 축 상으로의 각속도)

u_x, u_y (plate의 x, y 축 상으로의 가속도)

J (금속 구의 관성질량 $1.76e - 5 \text{kgm}^2$)

J_p (plate의 관성질량 0.5kgm^2)

g (중력가속도 9.8m/s^2)

3. Fuzzy control scheme

3.1 Fuzzy Planning Control

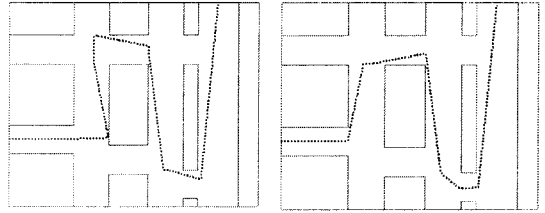
Ball이 A->B->C->D->E->F->G이 지나는 경로는 mandani type의 퍼지 제어기로 구현하였다. 퍼지규칙은 금속 구가 지정된 경로에 가까이 왔을 때, 금속 구가 어느 방향으로 경로를 바꾸어야 하는지에 대하여 규칙을 만들었다. 예를 들어 A지점에서 B점으로 이동할 때의 퍼지 규칙은 다음과 같이 정할 수 있다.

IF the distance to Point B is PL, Then adjust the desired trajectory to left Z..

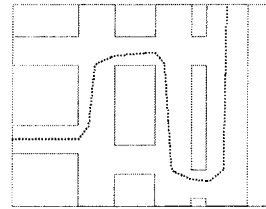
:

IF the distance to Point B is Z, Then adjust the desired trajectory to left PSS.

여기서 거리에 해당하는 금속 구의 방향 변화의 정도는 설계자의 지식에 관여하지만, 미흡한 지식은 금속 구의 예상 경로가 장애물에 부딪히도록 할 수도 있다.



경로 계획을 잘못된 경우



경로 계획이 제대로 된 경우

3.2 Fuzzy Tracking Control

추정 제어기는 다음과 같은 조건이 만족하도록 feedback gain 값을 정한다.

$$J = \int_{t=0}^{\infty} (\bar{x}^T Q \bar{x} + u_{xt}^T R u_{xt}) dt$$

위의 상태방정식은 금속 구의 속도가 느리게 움직일 경우, x, y 각 축의 방향으로 움직이는 힘의 영향을 무시할 수 있으므로 다음과 같이 두 상태 방정식으로 분해할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ B(x_1 x_4^2 - g \sin x_3) \\ x_4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 \\ B(y_1 y_4^2 - g \sin y_3) \\ y_4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_y$$

여기서 각 상태 방정식의 첫 번째 변수만 아래와 같이 수정하고, 오차 범위를 정한다다음에 그 점에서의 시스템을 선형화를 통해 LQR 게인 값을 구한다.

$$e_x = x_d - x$$

$$e_y = y_d - y$$

feedback gain 값을 다음과 같은 TS 퍼지 시스템의 후건부 인자로 사용한다.

$IF e_x \text{ is } X^j \text{ and } \dot{x} \text{ is } R^j \text{ and}$
 $\theta_x \text{ is } \Theta \text{ is and } \dot{\theta}_x \text{ is } \Omega^j$

$$\text{Then } u_{xt} = k_1^j e_x + k_2^j \dot{x} + k_3^j \theta_x + k_4^j \dot{\theta}_x$$

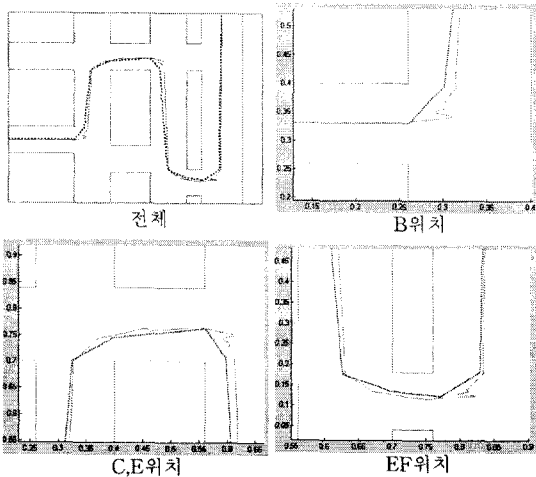
여기서 추정제어에 대한 안정성 판별은 H^∞ 제어 이론으로 검증할 수 있으나, 여기서는 생략하겠다.

3.3 Fuzzy Supervision Control

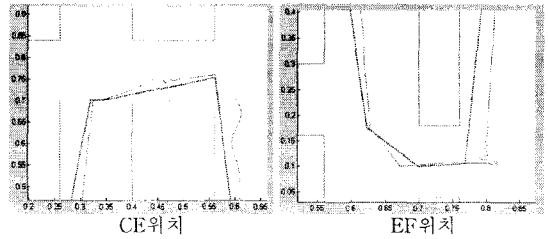
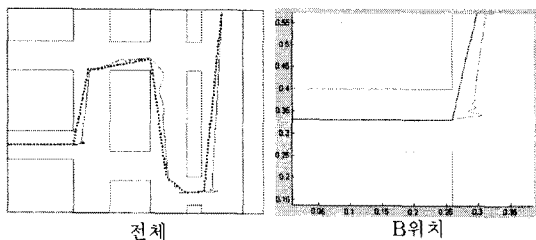
gain schedule 기반의 퍼지PID 제어기를 설계하였다. 응답에 대한 mandani 규칙을 이용하여, overshoot 및 steady state time을 조절하여, 복수의 제어기의 chattering 문제를 상쇄한다.

4. 시뮬레이션

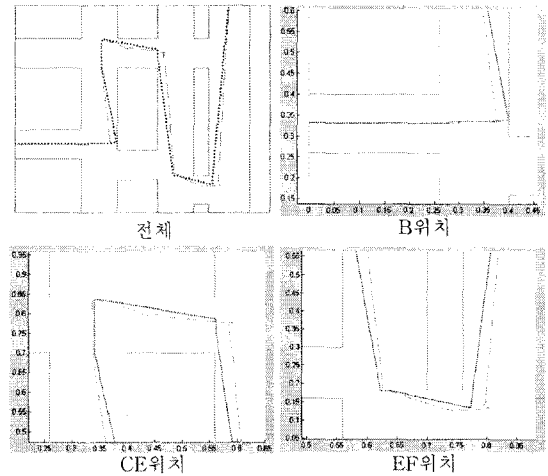
5.1 Path Planning이 잘된 경로 추적



5.2 Path Planning이 잘못된 경로 추적



5.3 Path Planning이 잘못된 경로 추적(조정된 PID계인)



5. 결론

supervision Control을 PID제어기로 설계함으로써 응답 속도 및 반응을 시스템적으로 접근하여, tuning함으로 복수의 제어기를 사용한 시스템에서의 chattering문제를 해결해 보고자 하였다..

참 고 문 헌

- [1] Fan, X., Zhang, N., Teng, S., "Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme", Fuzzy sets and systems, vol.144 no.2, 2004, pp297-312
- [2] Francesco Borelli, "Constrained Optimal Control of Linear and Hybrid Systems", Springer, vol.290 2003, pp177-184
- [3] Giuseppe Oriolo, "A Framework for the Stabilization of General Nonholonomic Systems With an Application to the Plate-Ball Mechanism", IEEE Trans. Robotics, vol. 21, no. 2, April 2005, pp 162-175
- [4] Egerstedt, M., Hu, X., "A hybrid control approach to action coordination for mobile robots", automatica, vol. 38, no. 1, 2002, pp125-130
- [5] Li-Xin Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall Inc., 1997