

날개구동을 위한 퍼지규칙의 조직적 설계

이석빈, 김현승, 서성엽, 이광택, 김창욱, 구본순
국방과학연구소

Systematic Design of Fuzzy Rule for Control Vane Actuator

Seok Bin Lee, Hyun Seong Kim, Sung Youb Seo, Kwang Taik Lee,
Chang Ok Kim and Bon Sun Koo
Agency for Defence Department

ABSTRACT

To design a fuzzy controller for DC servo-motor, a systematic procedure is proposed. Fuzzy rule base is simply designed through utilizing both the PID gain and the pole-zero cancellation. The results of simulation show that the control system has good performances.

1. 서론

조종날개 구동부의 정밀한 위치제어를 위해 퍼지논리^[1]를 도입한다. 추론과정의 선형근사화를 통하여 수학적 제어이론을 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller: FLC)의 조직적 설계에 활용한다. 확률밀도함수 형태의 멤버십 함수(membership function)와 선형화된 제어공간을 얻을 수 있는 제어방책을 결정하여 퍼지제어규칙을 설계하고, 그 추론 결과를 PID제어기의 구조를 이용한 디지털 보상기에 통과시켜 시스템에 적합한 제어를 얻는다.

제안된 방법에 의해 설계된 직구동형 직류서보모터의 FLC의 적용가능성을 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)을 통해 보인다.

2. 제어 시스템 모델

제어 시스템은 Fig.1과 같이 날개를 직접구동하는 토크모터, 위치를 감지하는 회전형 전위차계(potentiometer) 및 감지된 위치와 구동명령간의 오차를 보상해 주는 FLC로 구성된다.

직류서보모터 구동시스템으로부터 $i_a(t)$, $\omega(t)$, $\theta(t)$ 를 상태 변수로 하고 모터의 제어입력과 출력을 u_a 와 $y(t)$ 로 하여 상태방정식을 세우면 식(1)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A x(t) + B u(t) + E d(t) \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_B}{L_a} & 0 \\ \frac{K_T}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \left[0 \ 0 \ \frac{180}{\pi} \right]$$

d 는 부하 외란입력(= T_L)이며,

R_a : 전기자 저항, L_a : 전기자 인덕턴스,
 K_T : 토크 상수, J : 관성 모멘트,
 B : 점성마찰계수, K_B : 역기전력 상수
이다.

부하외란 입력 T_L 은 비행체의 속도, 양각(angle of attack)과 제어편각에 따라 예측하지 못하게 변하는 공력부하로서 날개축에 작용하는 힌지 모멘트이다. 전동기에 직접 연결되는 공력제어면을 요구하는 각도로 회전시키기 위해서는 강한 공력부하를 이겨야 하므로, T_L 은 이 시스템에서 중요하게 고려되어야 한다. 상태공간 모델식은 모터의 파라미터값^[4]들을 식(1)에 대입하여 직접 구할 수 있다.

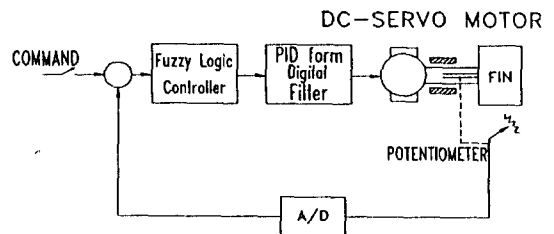


Fig.1 System block diagram

3. 퍼지 PID 제어기 설계

퍼지논리가 불확실성에 대한 대처능력이 있음에도 불구하고 제어 대상물에 대한 사전지식이 없다면, 처음부터 FLC를 손쉽게 설계하기는 어렵다. 그리고 실제 공장에서 이용되는 대상물일지라도 개략적인 수학적 모델링이나, 실험적 방법으로 수학적 제어기를 설계할 수가 있다. 이러한 접근이 모두 곤란할 때 유용하게 이용될 수 있는 FLC도 시행착오적인 경험에 의존하는 경우 보다는 제어공학의 지식을 이용하여 설계하는 것이 효율적이다. 더우기 새로운 시스템의 FLC 개발에서도, 제어지식을 조직적으로 이용할 수 있다면 창의력 있는 대치가 될 것이다. 이에 입각하여 먼저 Ziegler-Nichols 조정방법^[1]을 이용하여 식(2)와 같은 PID제어기를 설계한다.

$$K(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad (2)$$

여기서 실험에서 구한 임계이득 K_c 와 임계주기 T_c 를 이용하여, 비례이득 $K_p (=0.6K_c)$, 적분시정수 $T_I (=0.5T_c)$ 그리고 미분시정수 $T_D (=0.125T_c)$ 를 선정한다. 이러한 Ziegler-Nichols 조정방법으로 얻은 PID제어기의 이득을 설계사양인 스텝입력에 대한 최대오버슈트(20%), 정상상태오차(5%), 상승시간(64msec)을 만족시키도록 반복 수정한다. 그리고 Fig.2와 같은 제어기의 구조를 이용하여 FLC의 입출력구조와 축척을 다음과 같이 결정한다.

식(2)를 이산시간계로 유사변환(analogy)하여 k 번째 샘플링 시각의 목표값과 출력값의 크리스프한 오차 $e(k)$ 와 오차의 변화량 $ec(k)$ 로부터 추론한 u^0 값을 제어의 차분값으로 취하는 식(3)의 속도형에서는 PI제어기능을 갖게 하고, u^0 값을 그대로 사용하는 식(4)의 위치형에서는 PD제어기능을 갖도록 한다. 속도형과 위치형을 병렬연결하면 PID제어기와 유사한 구조인 퍼지 PID(FPID)제어기가 구성된다.

$$\Delta u(k) = FLC_{PI} [e(k), ec(k)] \quad (3)$$

$$u(k) = FLC_{PD} [e(k), ec(k)] \quad (4)$$

FPID구조의 입출력 스케일링 값은 PID제어기와 FLC를 각각 디지털화한 보상기 구조에서 분자의 계수를 비교하여 결정한다.

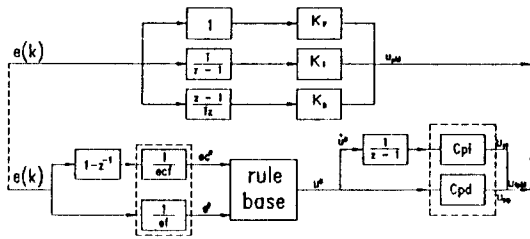


Fig.2 Analogy of PID and FPID controller

이때, 미분항은 후향차분(backward difference)을 사용하고 적분항은 오일러 방법(Euler method)으로 이산화하면 식(5)의 디지털 보상이 유도된다.

$$D(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \Bigg|_{PID} \quad (5)$$

$$= \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \Bigg|_{FPID}$$

식(5)의 계수간의 관계를 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(6)에서 FPID의 입출력 스케일링 값을 정한다.

$$z^0 : K_p + \frac{K_d}{T} = \frac{Fpd}{ef} + \frac{Fpd}{ecf} \quad (6-1)$$

$$z^{-1} : -K_p + K_i T - 2 \frac{K_d}{T} = -\frac{Fpd}{ef} - 2 \frac{Fpd}{ecf} + T \frac{Fpi}{ef} + T \frac{Fpi}{ecf} \quad (6-2)$$

$$z^{-2} : \frac{K_d}{T} = \frac{Fpd}{ecf} - T \frac{Fpi}{ecf} \quad (6-3)$$

여기서 Fpd 는 위치형, Fpi 는 속도형 출력의 스케일링 계수이고, ef 는 오차, ecf 는 오차량에 대한 스케일링 계수이고, T 는 샘플링시간, K_p , K_i 및 K_d 는 각각 P, I 및 D 제어기의 이득이다. FPID의 4개의 미지수 ef , ecf , Fpd , Fpi 를 구하는 방법은 여러 가지가 있지만, ef 는 e_{max} 로, ecf 도 ec_{max} 로 취하고 제어기 성능을 감안하여 위의 식을 만족하는 Fpd 와 Fpi 를 반복적으로 구하는 것이 효율적이다.

이러한 방법으로 PID이득으로부터 FPID의 입출력 스케일링 값을 구하면 Table 1과 같으며 샘플링 시간은 2msec로 한다.

모터의 제한된 동작범위로 인한 포화현상 때문에 발생하는 wind-up을 방지하기 위하여, 속도형제어기의 적분항에 덤드론형의 비선형요소를 식(7)와 같이 추가한다.

$$\Delta u = FLC [e(k), ec(k)] + [\min(\max(u, u_{min}), u_{max}) - u_{old}] \quad (7)$$

여기서 u_{min} , u_{max} 는 포화한계 값이고, u_{old} 는 제어기에서 계산된 값이다.

Table 1. Gain of PID and FPID controller

PID 제어기이득	FPID 스케일링 값
K_p : 2.0	ef : 15.0
T_I : 0.04	ecf : 1.0
T_D : 0.01	Fpi : 750.0
	Fpd : 11.25

이렇게 설계된 FPID제어기는 PID제어기와 구조와 이득이 유사하므로 성능도 큰 차이가 없는 선형근사화된 퍼지 제어기가 된다. 그러나 PID제어기는 이득조정이 주파수영역에서 이루어 지는데 비하여 FPID제어기는 위상평면의 부분영역에서 제어규칙을 수정하여 이득을 조정할 수 있다는 장점이 있다. 전술한 방법으로 얻은 제어 규칙들은 PID제어기와 같은 종래의 수학적 제어지식을 퍼지제어에 도입한 것이다. 이 규칙들은 만족스러

운 성능이 얻어질 때까지 부분영역의 제어규칙을 자가학습이나 설계자의 직관으로 반복 수정할 수 있다.

일반적으로 제어대상물의 페루프 전달함수의 극점 중 s 평면의 허수축에 근접한 지배극점의 제어가 문제가 된다. 따라서 PID제어기 전단에 전향성분(F_p, F_i, F_d)을 직렬로 접속하여 식(8)과 같이 표현되는 PID제어기(MPID)를 구성하면 극점-영점 상쇄가 가능해진다.^[1]

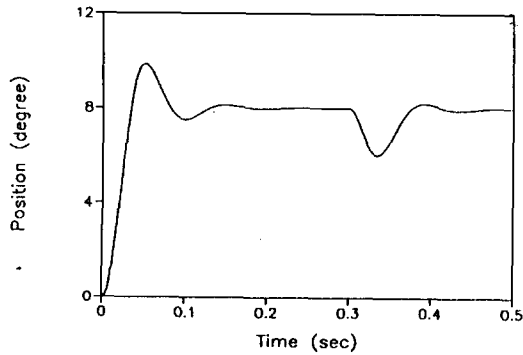
$$K'(s) = K_p \left[F_p + \frac{F_i}{T_i s} + F_d T_d s \right] \quad (8)$$

이러한 방법에 착안하여, 수정된 FPID제어기를 구성한다.

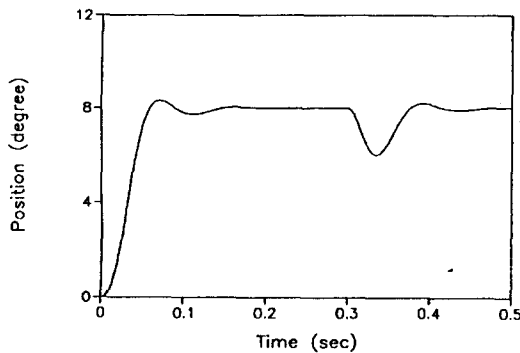
4. 시뮬레이션

Fig.3은 8도의 스텝 명령입력과 0.3초에서 스텝외란 T_d 을 부가한 상태로 얻은 각 제어시스템의 응답특성이다.

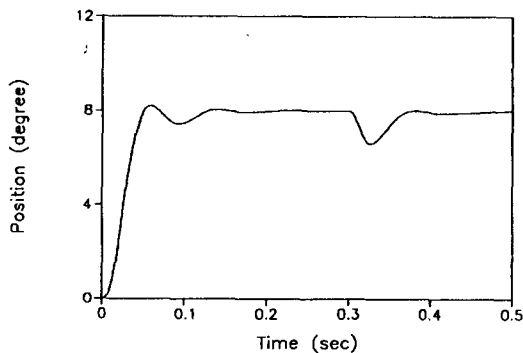
결과로 부터 과도응답은 PID에 비해 MPID와 FPID 모두 현저히 줄고 외란제거성능은 FPID가 약간 개선된 것을 알 수 있다. MPID는 실제 제어대상물인 경우 극점과 영점을 정확히 나타낼 수 없으므로 문제가 되며, 일반적인 PID제어기는 외란제거성능과 우수한 명령추종성을 동시에 만족하도록 설계하기가 어렵다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 극점-영점 상쇄에 착안한 FPID 제어시스템과 정상상태에서의 외란제거성능을 향상시키기 위해 정상상태 근방의 부분영역에서 높은 이득을 갖도록 FPID의 제어규칙을 수정한 FLC를 병용하여 구한 결과를 Fig.4에 나타낸다. 이것으로 부터 과도상태에서는 감도(sensitivity)에 비중을 두어서 명령추종성을, 정상상태에서는 외란제거성능을 향상시키고자 하는 설계목적이 달성되었음을 알 수 있다. 그러나, 퍼지제어의 단점인 안정성 판단이 곤란한 점은 여전히 문제로 남아 있다.



(a) PID controller



(b) MPID controller



(c) FPID controller

Fig.3 Step response of the controllers

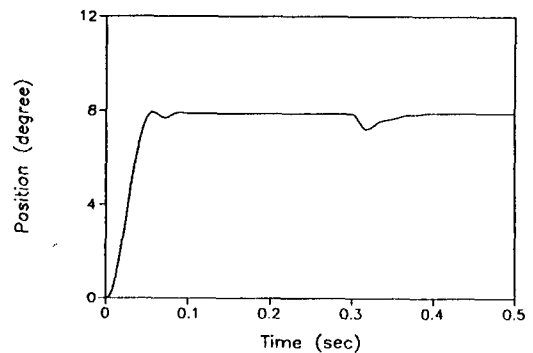


Fig.4 Step response of Modified FPID controller

5. 결 론

퍼지논리제어기를 선형근사화하여 조직적으로 설계하는 절차를 제안하여 경험에 의존하는 시행착오적 방법보다 제어공학 적 지식에 기반을 둔 조직적인 설계가 전기-기계적 시스템에 유용함을 보였다. 또한, 극점-영점 상채에 착안하여 명령추종 성 향상을 꾀하였고, 부분영역의 제어규칙을 수정하여 외란에 강한 제어를 설계할 수 있었다. 직류서보모터로 강한 외란이 작용하는 비행체 조종날개를 위치제어하는 문제에 제안된 방법을 적용하여 FPID제어기의 조직적 설계와 강인한 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 파악하였다.

참고문헌

- [1] Zadeh, L. A., "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process," IEEE Trans., S.M.C., Vol.3, pp. 28~44, 1973.
- [2] Karl Johan Aström & Tore Hägglund, "Automatic Tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, 1988.
- [3] Ricardo J. Mantz & Eugenio J. Tacconi, "Complementary Rules to Ziegler and Nichols' Rule for A Regulating and Tracking Controller," INT,J.Control, Vol.49, No.5, pp.1465-1471, 1989.
- [4] 남세규, 김종식, 유완석, "퍼지제어 셀을 이용한 퍼지논리 제어기의 조직적인 설계방법," 대한기계학회 논문집, 제6권, 제7호. pp.1234-1243, 1992.