

제트엔진의 예견 퍼지슬라이딩제어

남세규, °한동주, 김병교
국방과학연구소

Application of Predictive Fuzzy Sliding Control for the Fuel System of Turbojet Engines

Sae-Kyu Nam, °Dong-Ju Han, Byung-Kyo Kim
Agency for Defence Department

ABSTRACT

An algorithm of fuzzy predictive sliding control is proposed to design a jet engine control system. Sliding control using predictive scheme is adopted to compensate the time delay of fuel injector. Fuzzy rule-base is also introduced to adjust the command input for suppressing the surge. The potential of the proposed algorithm is shown through simulations utilizing a typical engine-only model.

다. 더욱이, 엔진실속(surge) 방지를 위해서 실험을 통하여 얻은 가속도 계획(accelerating map)의 효과적인 반영 역시 어려운 일이다. 이러한 한계를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 제트엔진의 비선형 특성에 강인함과 동시에 연성 영향을 다룰 수 있는 다변수 슬라이딩제어기를 설계하고, 여기에 연료분사과정의 시간지연을 보상하는 예견제어 기능을 부가한다. 그리고, 가속도 계획을 제어명령에 효과적으로 적용하기 위해서 퍼지논리를 도입한다.

2. 엔진 모델

1. 서 론

제트엔진의 성능향상과 안전성 제고를 위한 제어시스템 설계는 항공기의 비행성능에 직접적인 영향을 주기 때문에, 제어공학자들에게 흥미로운 연구테마였다. 그러나, 광범위한 작동영역과 비선형적 동특성을 다루어야 하는 제트엔진의 제어는 용이한 일이 아니었다. 현재, 많은 제트엔진의 제어시스템은 개루프 이득계획을 이용하는 비례적분제어를 적용하고 있으나, 이 방법은 엔진조정을 위한 이득찾음표(lookup table)의 작성에 많은 시간과 경비가 소요된다. 또한, 선형화된 엔진모델은 정당성이 어느 한 작동점 부근에 제한되므로, LQG/LTR [1]과 같은 강인 제어기법 역시 같은 문제에 봉착한다. 한편, 비선형시스템에 직접 응용이 가능한 슬라이딩제어를 가솔린엔진에 적용하여 강인성을 보여 준 바 있었다[2]. 그러나, 이러한 단일입출력시스템을 위한 슬라이딩제어 방법으로는 제트엔진과 같은 다변수시스템의 연성(coupling)영향에 대한 적절한 대처가 곤란할 뿐만 아니라, 연료공급과정의 시간지연으로 인한 채터링을 피할 수가 없다[3]. 물론, 슬로틴[4]이 제안한 포화함수를 이용한 평탄화기법이나 최근 발표되고 있는 퍼지논리를 이용한 평탄화기법으로도 시간지연에 의한 채터링을 효과적으로 줄이기는 힘들

제어시스템의 설계관점에서 Fig. 1과 같이 정형적인 제트엔진의 모델을 구성한다. 엔진 모델식의 유도를 위해 여러가지 시뮬레이션 프로그램이 개발되었는데 이 중에서 특히 Geysers의 DYGABCD 코드[5]는 상태방정식을 제공하므로 엔진 제어기 설계에 유용하다. 비정상(unsteady) 연속방정식과:

$$\dot{m}_o = \dot{m}_i - \frac{PV}{RT} \quad (1)$$

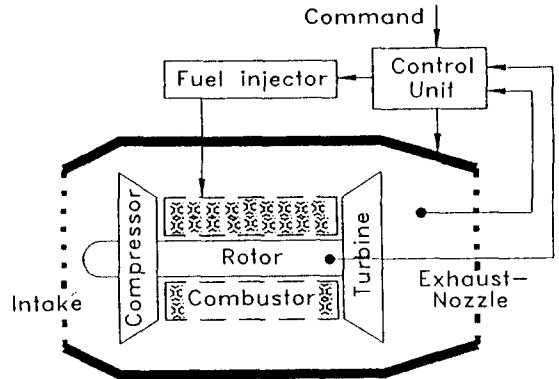


Fig. 1. Schematic of jet engine control system

여기서 \dot{m} 은 질량 유동율, P 는 압력, V 는 체적, 그리고 R 은 기체상수를 뜻한다. 에너지 보존방정식은:

$$\dot{m}_o h_o = \dot{m}_i h_i - (\dot{m}_i - \dot{m}_o)u - \frac{\dot{u}PV}{RT} \quad (2)$$

여기서 u 는 내부에너지이다. 로타의 회전동력학 방정식은:

$$\dot{m}_i \Delta h_t = \dot{m}_c \Delta h_c + I\dot{W} \frac{dW}{dt} + \text{power extraction} \quad (3)$$

여기서 I 는 로타의 유효 회전관성량, W 는 엔진각속도, h 는 엔탈피이다. 엔진의 동특성을 표현하는 이러한 지배방정식에 의해 얻어진 엔진모델의 비선형방정식을 운용점(operating point)에서 섭동법(perturbation method)으로 선형화한다.

$$\frac{dX_i}{dt} = A_{ij} X_j + B_{ij} U_j \quad (4)$$

$$Y_k = C_{ik} X_i$$

여기서 상태벡터 X_i 는 '엔진회전속도, 터빈입구 내부에너지, 압축기출구 내부에너지, 터빈출구 내부에너지, 터빈입구 압력, 압축기출구 압력, 터빈출구 압력'을 나타내고, 제어입력 U_j 는 연료유량과 배기구면적을 선정하고 피이드백을 위한 출력 변수는 엔진회전속도와 터빈출구 압력을 선정하여 2입력2출력인 다변수 시스템을 얻는다. 그러나, 운용조건에 따라 시스템 행렬이 경직(stiff)된 경우가 많으므로, 제어기 설계에 적합한 선형화 모델의 획득은 시간적분의 발산이 일어나지 않도록 행렬의 재구성성이 필요하다.

연료계의 상태는 뒤짐(lag)과 시간지연(time-delay)을 결합한 1차 지연 필터 형태의 연료분사 동특성에서 알 수 있다.

$$C_f \cdot \dot{U}_f + U_f = U_i \quad (5)$$

여기서 U_f 는 연소실에 들어가는 실제 연료분사율이고, U_i 는 제어기에서 명령된 연료분사율이고, C_f 는 연료공급시정수이다. 위에서 언급한 엔진 모델의 물리적 매개변수들은 실험에 의하여 경험적으로 결정된다. 본 논문에서는 연료분사제어의 실시간 시뮬레이션을 위하여, Garg가 발표한 터보팬 엔진의 정형적인 모델의 제원과 매개변수를 사용한다[1].

3. 예전 퍼지 슬라이딩제어

3.1 다변수 슬라이딩제어

원하는 궤적 (Y_{1d} , Y_{2d})를 추종하기 위하여 슬라이딩제어를 설계한다. 출력 피이드백에 의하여 제어가능한 시스템이므로 스위칭 평면 S_i 를 다음과 같이 원하는 궤적과 출력의 차이인 추종오차 e_i 의 함수로 정의한다.

$$S_i = e_i + \int_0^t e_i \cdot dt, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

흡입다양체(attractive manifold) 개념의 다음식과 같은 슬라이딩 조건식이 만족되면, 상태공간상에서 궤적이 유한시간 내에 스위칭 평면 $S(t)=0$ 에 도달하여서 슬라이딩 운동과 채터링을 지속하게 된다.

$$\dot{S} = -\eta \cdot \text{sign}(S), \quad \eta > 0 \quad (7)$$

'슬라이딩 조건식과 모델오차를 함께 고려하기 위하여, 식 (7)에 식(6)을 미분한 식과 식(4)를 대입하여 정리하면, 슬라이딩 제어 법칙은:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Y_{1d} - \sum_{j=1}^2 a_{1j} x_j - \lambda_1 e_1 - \eta_1 \text{sign}(S_1) \\ \frac{1}{c_2} Y_{2d} - \sum_{j=1}^2 a_{2j} x_j - \frac{1}{c_2} (\lambda_2 e_2 - \eta_2 \text{sign}(S_2)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 강인성 변수 η_i 는 모델오차를 감안하여 정해진다.

3.2 채터링 감소방안

슬라이딩제어는 스위칭평면으로 구속된 제어공간을 설정하고, 원하는 상태궤적이 이 공간상에 유지되도록 마찰감쇠(friction damping) 개념의 구속력을 제어입력에 포함시킨 것이다. 그러므로, 이방법은 시스템 불확실성에 강인한 반면, 제어불연속에서 기인되는 채터링을 피할 수 없다. 제어불연속을 선형적으로 평탄화하기 위하여 $S(t)=0$ 근방의 스위칭 경계역에서 부호함수 $\text{sign}(S(t))$ 를 포화함수 $\text{sat}(S(t)/\lambda^{-1}\phi)$ 로 대체하면, $S(t)$ 는 모델링 오차나 외란 등의 불확실성 요소들을 입력으로 하는 저역통과 필터가 되어 채터링을 제거하는 역할을 하게 된다. 그러나, 채터링의 크기는 강인성변수 뿐만 아니라, 연료분사과정에 소요되는 지연시간 t_d 에도 비례하기 때문에 효과적인 채터링 감소를 위한 별도의 평탄화 방법이 필요하다. 본 논문에서는 스미스에측기(Smith predictor)를 적용하여 지연시간을 보상한다.

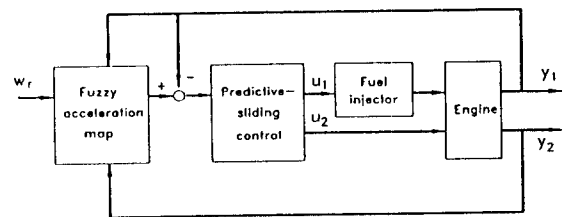


Fig. 2. Predictive sliding controller with fuzzy logic

4	B	S	S	S
3	M	S	M	B
2	S	M	B	B
P	P_i	S	M	B
	E_i			
	e_r	100	500	1000

Fig. 3. Fuzzy rule-base for acceleration map

$$U_1(k) = U_1^*(k) - U_{1d}(k) \quad (9)$$

여기서 시간지연보상을 위한 $U_{1d}(k)$ 항은 다음과 같다.

$$U_{1d}(k+1) = (1 - \frac{h}{C_f})U_{1d}(k) - \frac{h}{C_f} [U_1^*(k) - U_1^*(k-k_d)] \quad (10)$$

3.3 퍼지논리를 이용한 가속도 계획

운전조건 변화에 따라, 엔진작동의 상태는 비연료소모율 혹은 속도유지를 위한 진정추력의 제어동이 필요한 정상운전 상태와 시동이나 급가속 등의 과도운전 상태로 분류된다. 그리고 슬라이딩제어에서 토크력을 주는 제어부분은 정상운전 상태의 공연비제어에는 적합한 제어구조이지만, 과도운전 상태에서는 오버슈트나 정상상태 도달시간을 크게한다. 더욱 큰 문제는 이로 인한 엔진실속(surge)이다. 두 상태를 모두 만족시키기 위한 절충설계의 방안으로, 실험을 통하여 얻은 실속방지를 위한 가속도 계획(accelerating map)을 Fig.2의 블록선도와 같은 제어구조를 도입하여 효과적으로 반영한다. 이 방법은 기준명령을 실속방지를 위한 가속도 계획의 많은 정보를 멤버쉽함수에 의하여 표현되는 언어변수로 처리하기 때문에, 설계 및 구현이 유연하게 된다. 퍼지규칙은 배기구 압력과 엔진회전속도를 입력변수로 하여 실속방지와 높은 엔진성능을 가능케 하는 연료분사량을 출력하도록 Fig.3과 같은 규칙기반을 고안하였다. 「어떤 상황에서 무엇을 할 것인가,」라는 관점에서 단원성(modularity)이 뛰어난 Mamdani형 퍼지규칙[6]을 이용하면,

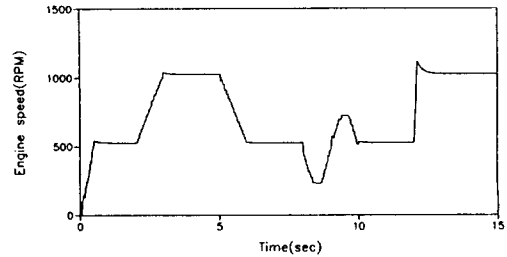
$$\text{ALSO (IF } E \text{ is } A_i \text{ and } P \text{ is } B_i, \text{ THEN } A \text{ is } C_i)$$

여기서 퍼지변수 A 는 출력인 엔진 회전가속도를 뜻한다. 명용사 A_i, B_i 와 C_i 는 멤버쉽함수로 표현되는 속성 "B, M, S" 중의 하나인데, 각각 "크다, 적당하다, 작다" 를 의미한다. 또한, 하

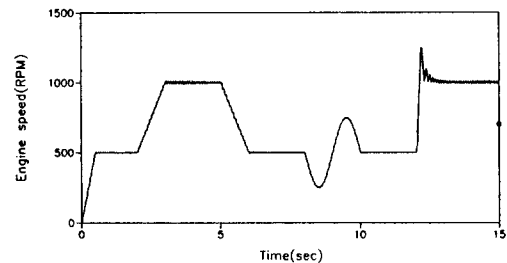
첨자 i 는 규칙의 번호이다. 이의 추론은 상용화된 마이크로프로세서에서 계산량을 감소시킬 수 있는 가속화 방법을 사용한다[7]. 제안된 방법의 특징은 퍼지논리로 실속을 방지할 수 있는 제어입력의 제한을 결정하고, 엔진의 비선형성과 시간지연을 예견 슬라이딩제어의 보완적인 구조가 안전성과 성능을 함께 향상하는데 유효하다는 것으로 요약된다.

4. 시뮬레이션

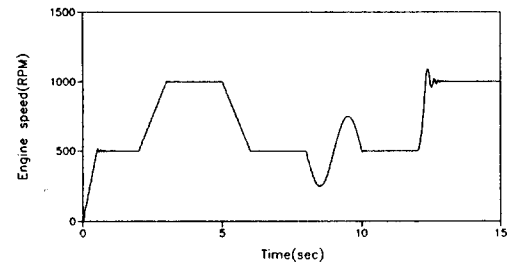
엔진속도와 배기구압력을 측정하여 인젝터에 연료공급을 명령하는 제어를 엔진속도 9600rpm인 작동점에서 10ms로 충분히 여유 있게 선정한 샘플링시간으로 시뮬레이션하여서 제안된 제어구조의 가능성을 보고자한다. 엔진모델에 대하여 (a) 시간지연이 없다고 가정 한 슬라이딩제어, (b) 시간지연을 고려한 슬라이딩제어, (c) 퍼지 예견 슬라이딩제어를 이용하여 설계



(a) Sliding control



(b) Sliding control with time delay



(c) Predictive sliding control with fuzzy logic

Fig.4. Comparison of control methods

된 제어기들을 작동점에서 1000 rpm 정도의 추종명령을 주어 시뮬레이션한 결과, Fig. 4과 같은 엔진회전속도의 응답을 얻었다. (a)의 슬라이딩제어가 좋은 결과를 보이지만 실제 시간지연을 감안하면 채터링이 (b)와 같이 심각해진다. 그러나 (c)는 채터링을 효과적으로 개선하고 있음을 보인다. 그 이유는 슬라이딩 제어의 스미스예측기가 시간지연에 의한 채터링을 감소시키고, 퍼지 가속도계획에 의하여 급격히 변하는 가속도가 제한을 받기 때문이다. 물론, 가속도의 제한은 엔진성능의 제한과 같은 맥락으로 생각되지만, 퍼지규칙기반을 이용하여 실화방지를 위한 최소한의 제한을 줄 수 있다.

5. 결 론

제트엔진의 성능을 향상하기 위하여 예전 퍼지슬라이딩 제어를 제안한다. 슬라이딩제어는 비선형인 제트엔진 모델에 직접적인 적용이 가능하지만 연료분사과정의 시간지연에서 기인하는 채터링현상에는 취약성을 예견제어부를 추가하여 보완한다. 또한, 퍼지논리를 도입하여 가속도계획을 제어명령에 반영함으로써 실속의 위험을 줄여 안전성을 높일 수 있는 유연성 있는 설계방법이 된다. 정형적인 엔진모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 가능성을 보인다. 그러나, 본 논문의 제어기는 제안된 제어방법의 가능성 판단을 위한 단편적인 것일 따름으로, 실제 제어기 개발에서는 실험을 통한 강인성 변수의 조정과 규칙기반의 산정이 필요하다.

참고문헌

- [1] S. Garg, "Turbofan engine control system design using the LQG/LTR methodology," *NASA-CR-182303*, June, 1989.
- [2] 남세규, 유완석, "연료분사식 자동차엔진의 퍼지가변구조 제어시스템," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제7호, pp. 1813-1822, 1993.
- [3] S. K. Nam, M. H. Lee and W. S. Yoo, "Predictive sliding control with fuzzy logic for fuel-injected automotive engines," *IMEchE Proc. Instn. Mech. Engr., Part I: Jour. of Syst. Contr. Engr.*, vol. 206, pp. 237-244, Dec. 1992.
- [4] J. J. E. Slotine and S. S. Sastry, 1983, "Tracking control nonlinear system using sliding surfaces with application to robot manipulators", *Int. J. of Control*, Vol.38, No.2, pp. 465-492.
- [5] L.C. Geyser, "DYABCD-A program for calculating linear A,B,C, and D matrices from a nonlinear dynamic engine simulation," *NASA-TR-1295*, 1978.
- [6] E. H. Mamdani, "Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers," *International Journal of Man-Machine Study*, vol. 8, no. 6, pp. 669-678, 1976.
- [7] 남세규, 정인수, "퍼지제어를 위한 가속화 추론방법," '93한국자동제어학회회의논문집, 국내편, KS36-3, 계제예정, 1993.