

퍼지제어방식을 이용한 SI엔진 속도제어

신동목, 김응석, 김문철, 민종진
삼성종합기술원 자동차전장실

Spark Ignition Engine Speed Control Using Fuzzy Control Strategy

Dong-Mok Shin, Eungseok Kim, Moon-Cheol Kim, Jong-Jin Min
Automotive Electronics Laboratory, Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract - In this paper, we study the idle speed control of the spark ignition engine. Engine idle speed control is a difficult problem because of troublesome characteristics such as severe process nonlinearities, variable time delays, time-varying dynamics and unobservable internal system states and disturbances. We investigate the intelligent control algorithms such as neural network controller and fuzzy controller for 4-cylinder 4-stroke engine.

1. 서 론

엔진의 공회전 속도를 일정하게 유지 시킴으로써 성능향상을 위한 1차적인 조건을 만족시키려는 시도가 있다[1]~[6]. 엔진의 공회전시 동특성을 정확히 알 수 있다면 정확한 제어가 가능하겠지만 비선형 이면서 입출력 간의 전달지연이 큰 특성으로 인해 일반적인 형태의 정확한 제어모델을 얻기가 쉽지 않다. 이에 따라 [1]~[2] 등에서는 초기학습을 위한 시간 및 노력을 줄이기 위해 퍼지제어방식을 제안하였다. [3]~[5] 등에서는 뉴럴네트워크 방식을 이용한 제어를 구성하여 해결할 수 있는 가능성을 보이고 있다.

본 논문에서는 우선 제어모델에 대해 요구되는 정보량이 적은 퍼지제어를 PI제어기와 혼합한 형태로 설계하여 각각의 제어기의 장점을 최대한 이용하고자 한다. 그리고 뉴럴네트워크 역모델 식별기를 이용한 적분동작을 갖는 뉴럴 제어기를 설계하였다.

2. 엔진모델

다음식으로 주어진 엔진 모델은 [3]~[6] 등에서도 사용한 모델로서 케환선형화가 어려운 모델이다.

$$\dot{P} = k_p(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}), \quad k_p = 42.40 \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ai} = (1 + 0.907\alpha + 0.0998\alpha^2)g(P) \quad (2)$$

$$g(P) = \begin{cases} 1 & , \text{if } P < 50662 \\ 0.0197(101325P - P^2)^{1/2} & , \text{if } P \geq 50662 \end{cases} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ao} = -0.0005968N - 0.1336P + 0.0005341NP + 0.000001757NP^2 \quad (4)$$

$$m_{ao} = \dot{m}_{ao}(t - \tau)/(120N), \quad \tau = 45/N \quad (5)$$

$$\dot{N} = k_N(T_i - T_i), \quad k_N = 54.26 \quad (6)$$

$$T_i = -39.22 + \frac{325024}{120N} \dot{m}_{ao} - 0.0112\delta^2 + 0.635\delta + (0.0216 + 0.000675\delta)N(2\pi/60) - 0.000102N^2(2\pi/60)^2 \quad (7)$$

$$T_i = (N/263.17)^2 + T_d \quad (8)$$

여기서 T_i 는 입력토크이고, T_i 은 속도의 제곱에 비례하는 부하토크이며, T_d 는 토크외란이다. 윗 식으로부터 스로틀개도 α 및 점화시기 δ 는 흡기다기관내 압력 P 및 엔진속도 N 과 선형관계가 만족되지 않음을 볼 수 있다. 따라서 기존의 선형모델에 근거한 제어기의 설계가 용이하지 않다. 또한 식(1)-(3)으로 주어진 스로틀개도와 흡기다기관내압력과의 관계로부터 비선형시스템에 대한 케환선형화 제어기의 설계도 용이하지 않음을 알 수 있다.

3. 속도 제어기 설계

식(1)~(8) 로 주어진 엔진모델에 대해 기존의 PI 제어기를 적용하기 위해서는 엔진의 비선형 특성, 시변성이 큰 전달지연, 시변 파라미터, 측정이 어려운 내부 상태치들 및 부하변동에 따른 외란 등으로 인해 제어기의 비례이득 및 적분이득을 최적화하는

것이 어려우며, 미리 예상한 운전상태에 대해 계획된 이득값을 결정해주어야 하는 어려움이 있다. 따라서 이 절에서는 다음과 같이 뉴럴네트워크 식별기를 이용한 적분동작을 갖는 Feedforward Neural Network 제어기와 PI제어기와 퍼지제어기의 혼합형 제어기를 제시하기로 한다.

엔진을 점화시기 δ 와 스로틀개도 α 를 제어입력으로 하고, 흡기다기관내 압력 P 와 엔진 회전속도 N 을 출력으로 하는 black box로 간주하기로 한다. 이때 점화시기 δ 는 15[degree]로 고정하고 스로틀개도 α 는 5-25[degree] 범위에서 조정될 수 있는 것으로 하였다.

3.1 뉴럴 네트워크 제어기

다음의 그림 3.1은 본 논문에서 제시한 뉴럴네트워크제어시스템의 블록선도이다.

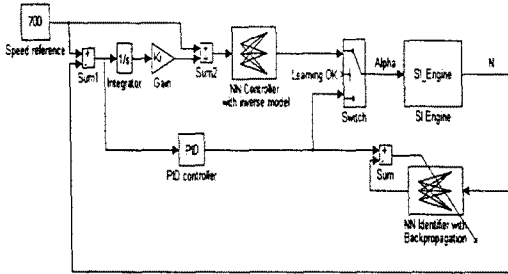


그림 3.1 뉴럴 네트워크 제어시스템 블록선도.

위의 그림 3.1에서와 같이 우선 뉴럴 네트워크 식별기를 이용하여 엔진의 역모델을 추정한다. 이때 제어기는 기존의 PID 제어기를 이용한다. 역모델에 대한 학습이 끝나면 역모델을 이용한 Feedforward 보상기로 스위칭한다. 이때 역모델 추정오차에 대한 별도의 보상효과 및 전체시스템의 안정도 향상을 위해 NN 보상기 전단에 그림에서와 같이 적분동작을 갖는 제어기를 직렬로 연결하여 전체 제어시스템을 구성한다. 이에 대한 개략적인 내용을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 우선 회전속도 기준치 N_r [rpm]에 대해 회전속도 오차를 $N_e = N_r - N$ 로 정의하면 스로틀 개도 α 는

$$\alpha = E^{-1}\left(\frac{K_f}{s} N_e + N_r\right) \quad (9)$$

이 된다. 여기서 E^{-1} 은 NN식별기를 통해 추정된 엔진역모델이고, s 는 미분연산자이다. 이 관계로부터 식(1)~(8)로 주어진 엔진모델에 대해 정리하면

$$\dot{N}_e + K_f N_e = 0 \quad (10)$$

이 성립됨으로써 $N_e, \dot{N}_e \rightarrow 0$ 이 만족된다.

3.1.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션시 흡기다기관내 압력 P 와 엔진속도 N 의 측정치에 각각 표준편차가 1 [Kpa]과 2.5[rpm]인 백색잡음이 포함되어있는 것으로 하였다. 토크외란 T_d 는 25 [N.m]로 50초 마다 toggle 형태로 발생하도록 하였다. 속도기준치는 700[rpm]으로 하였다. 그림으로부터 뉴럴네트워크 제어기는 학습의 결과에 따라 성능이 달라질 수 있으며 학습에 많은 노력을 들여야 되는 문제는 기존의 PID 제어기에서와 다를바 없음을 알 수 있다.

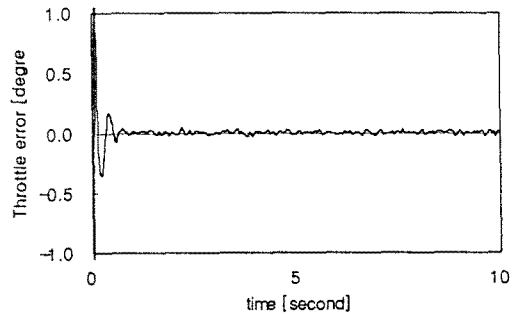


그림 3.2 식별기 오차(5회 학습).

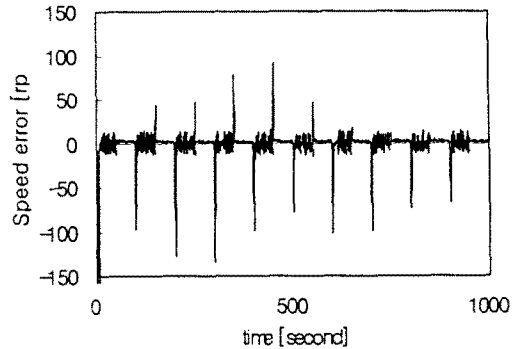


그림 3.3 학습후 제어시 엔진 속도오차.

3.2 퍼지 제어기

이 절에서는 그림 3.4와 같이 PI 제어기와 퍼지제어기를 혼합설계하였다. PI 제어기의 이득을 최적화할 경우에는 PI 제어기의 성능이 Rule을 최적화하지 못한 퍼지제어에 비해 훨씬 성능이 우수하지만 적절한 Rule을 갖춘 퍼지제어기는 동일한 종류의 엔진들에 대해서도 각기 다른 성능을 보이는 PI 제어기에 비해 성능편차가 거의 없다는 장점이 있다. 이는 모든 엔진에 대해 이득조정을 할 수 없다는

점을 고려할 때 상당히 유리한 점으로 생각할 수 있다. 시뮬레이션시 PI 이득은 각각 $P=0.1$, $I=0.1$ 로 하였으며, 퍼지제어기에서는 속도오차 및 속도오차의 변화율을 입력으로 이용하여 그림 3.5와 같이 Rule을 생성하였다.

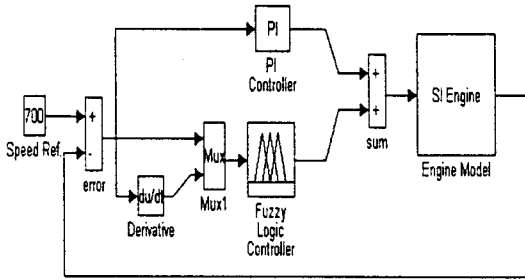


그림 3.4 퍼지 제어시스템 블록선도.

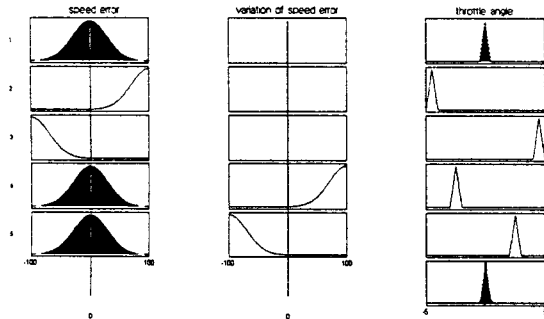


그림 3.5 퍼지제어 규칙

3.2.1 시뮬레이션 결과

아래의 그림 3.5는 위의 퍼지제어기를 이용한 엔진 속도제어시 속도오차이다. 시뮬레이션시 앞의 뉴럴제어에서와 마찬가지로 흡기다기관내 압력 P 와 엔진속도 N 의 측정치에 각각 표준편차가 1 [Kpa] 과 2.5[rpm] 인 백색잡음이 포함되어있는 것으로 하였다. 토크외란 T_d 는 25 [N.m]로 50초마다 toggle형태로 발생하도록 하였다. 시뮬레이션 도구는 Matlab을 이용하였다.

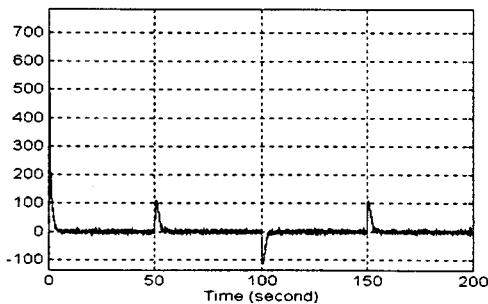


그림 3.6 엔진 속도오차.

4. 결 론

본 논문에서는 뉴럴네트워크를 이용한 제어방식과 퍼지제어방식을 통해 자동차 엔진의 공회전 속도 제어시스템에의 적용 가능성을 검토하였다. 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 엔진의 비선형 시변특성상 초기학습이 필요치 않은 퍼지제어방식이 보다 유리하다는 것이 입증되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. Vachtsevanos, "Idle Speed Control of an Automotive Engine Using a Systematic Fuzzy Logic Methodology", IFAC 12th Triennial World Congress, Sydney, Australia, 1993, pp.29-34.
- [2] Angelo S. Martinez and Mohammed Jamshidi, "Design of Fuzzy Logic Based Engine Idle-Speed Controllers", Proc. 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1993, pp.1544-1547.
- [3] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Automotive Engine Idle Speed Control with Recurrent Neural Networks", Proc. 1993 American Control Conf., San Francisco, California, 1993, vol. 1, pp.311-316.
- [4] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Truncated Backpropagation Through Time and Kalman Filter Training for Neurocontrol", The 1994 IEEE International Conf. on Neural Networks, Orlando, Florida, 1994, pp.2488-2493.
- [5] R. A. Zitar and M. H. Hassoun, "Neurocontrollers Trained with Rules Extracted by a Genetic Assisted Reinforcement Learning System", IEEE Trans. on Neural Networks, vol.6, no.4, pp.859-879, 1995.
- [6] D. Shim, J. Park, P. P. Khargonekar, and W. B. Ribbens, "Reducing Automotive Engine Speed Fluctuation at Idle", IEEE Trans. on Control Systems Technology, vol.4, no.4, pp.404-410, 1996.