

퍼지추론을 이용한 시스템 모델링 및 오토-튜닝의 구현

이동진, 이은철, 변황우, 남문현
건국대학교 전기공학과

System Modelling with Fuzzy Inference and Its Implementation to Auto-Tuning

Dong-jin Lee, Un-cheol Lee, Hwang-woo Byun, Moon-hyun Nam
Department of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

ABSTRACT

This paper presents a new identification method which utilizes fuzzy inference in parameter identification. The proposed system has an additional control loop where a real plant is replaced by a plant model. The control system to be designed is to satisfy the following specifications:

- 1) It has zero steady-state error.
- 2) It has adequate damping characteristics.
- 3) 1), 2) satisfied, it has a shortest rise-time.

Fuzzy rules describe the relationship between comparison results of the features and magnitude of modification in the model parameter values. This method is effective in auto-tuning because the response of the closed loop is verified. The proposed method is tested in simulation for several plants with first-order lags and dead-times. The results show that the proposed method is effective in practical use.

I. 서론

산업현장에서는 제어대상의 상태방정식이나 전달함수를 완전하게 동정시키지 못하고 있으며 또한 완전한 상태 피드백 방식이 아닌 적당한 보상요소나 제어장치를 이용하여 파라미터를 동조시키는 경우가 많았다. 실제로 동적 시스템을 대상으로 하는 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상의 동특성을 파악할 필요가 있으며, 그 동특성 표현으로서 전달함수로 표현된 제어대상 모델을 이용하는 것이 효과적이다. 이 제어대상 모델의 파라미터 동정법으로는 최소자승법(LSM) 등의 시스템 동정 이론^[1]을 근거로한 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 이것은 제어기의 설계방법이 독립적인 동정 알고리즘이며, 최종목표인 페루프시스템의 응답에 따른 동정결과와 수정이 곤란하다는 점과 정확한 동정값을 얻기 위해서는 동정용신호의 인가가 필요해지는 경우가 많아지는 문제를 갖고있다. 이러한 성질은 응용분야에 따라서 실용상 문제가 되는 경우가 생기고, 예를들면 제어대상에 적합한 제어기 파라미터를 자동적으로 설정하는 오토튜닝에 있어서 동정용 신호의 인가는 바람직하지 않다.^[2,3]

그래서 본논문에서는 제어대상 모델의 파라미터를 동정하는

새로운 개념으로서 퍼지추론에 의한 동정법을 제안하였다. 이 방법은 페루프시스템의 응답파형으로부터 추출한 특징량을 근거로 파라미터 동정을 시행하는 방법이며, 특별한 동정용 신호를 필요로하지 않는다는 점, 제어기의 설계와 연결하기 쉬운 형태인 페루프시스템의 응답을 확인하면서 동정을 해나가는 것이 특징이다. 또 본 논문에서는 이 동정법의 특징을 이용하여 일반적인 제어시스템 설계법을 연결하는 오토튜닝 방법을 제안하였다. 여기서는 퍼지추론에 의한 동정법과 이것을 오토튜닝에 적용하는 방법에 대해서 기술하였고, 두가지의 시스템에 대해서 본 방식의 유효성을 검증하였다.

II. 퍼지알고리즘을 이용한 동정법

그림 1은 퍼지추론을 이용한 모델링 및 자동동조 과정을 나타내는 시스템의 구성도이다. 이 방식은 두개의 페루프계를 구성하며, 하나는 실제의 제어대상을 다른 하나는 컴퓨터상의 모델을, 각각 같은 특성을 갖는 제어기로서 제어하는 구조로 되어 있다. 두개의 페루프시스템 출력응답 파형의 특징량 비교값으로부터 퍼지추론을 하여 제어대상모델의 파라미터를 수정한다. 특징량이라는 것은, 예를들면 스텝응답에서의 오버슈트량 등을 말하며, 퍼지추론은 이 특징량의 비교값과 모델 수정량과의 관계를 표현하기 위해 이용되고 있다. 이 특징량이나 퍼지규칙은 제어대상모델이나 제어기의 구조, 각 파라미터의 특성등에 따라서 적절한 것으로 결정할 필요가 있다.^[3-5]

이 동정법의 개략적인 순서는 다음과 같다. 먼저 제어대상 모델의 파라미터 초기값을 결정한다. 그리고 어떤입력(SV)의 변화에 대해서 얻어진 두개의 페루프 시스템의 출력(PV, MV)으로부터 각각의 특징량을 추출하고, 그 값을 비교한다. 두개의 페루프는 제어대상과 제어대상모델만 다르므로 얻어진 특징량의 차이는 제어대상과 그 모델과의 차이에서 기인하는 것이다. 그래서 특징량의 비교값으로부터 제어대상 모델의 파라미터의 차이를 추정하는 퍼지추론을 하고, 모델의 파라미터를 수정한다. 이상의 순서를 반복하여 특징량의 차가 없어진 시점에서 동정값을 구했다고 판단한다.

본 방식은 동정방법으로서 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 보통 지령으로서 입력변화에 대한 페루프시스템의 응답에서 특징량을 추출하기 때문에 동정을 위한 특별한 입력변화를 요구하지 않는다.
- (2) 파라미터의 수정결과를 확인하면서 반복 수행하기때문에

일시적인 노이즈에도 강하다.

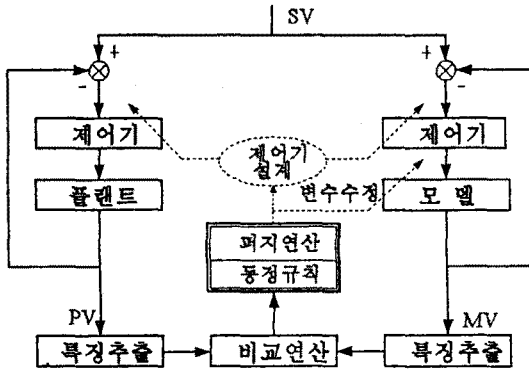


그림 1. 전체 시스템 구성도

III. 자동-동조의 적응(Auto-tuning)

오토-튜닝이라는 것은 제어대상의 특성에 적합한 제어기 파라미터를 자동적으로 설정하는 기능이 있다. 여기서 제안한 동정방법은 일반적인 제어시스템 설계방법과 연결하여 동정용 신호를 인가하지 않고도, 페루프시스템의 응답(특징량)을 확인하면서 파라미터를 설정하는 오토튜닝방식을 수행할 수 있었다.

지금까지 제안되었던 오토-튜닝방식 중에도 특징량을 이용하여 퍼지추론을 하고, 직접 제어기의 파라미터를 변경해가는 것이 있다.^[4,5] 그러나 이러한 방식은 제어대상 모델을 이용하지 않고 특징량과 파라미터 수정량의 관계를 직접 퍼지제어규칙으로서 표현하고 있기때문에 일반성을 갖는 퍼지규칙의 결정이 곤란해서 튜닝결과가 제어대상의 특성에 따라 달라지기 쉽고, 스텝 입력과 같은 특징의 입력변화가 필요하다고 하는 문제가 있다.

여기서 제안한 동정방법을 이용한 오토튜닝방식을 그림 1과 같이 점선부분을 포함하는 블록도로 나타냈다. 여기서 점선부분은 제안한 동정방법에 제어기를 수정하기위한 제어기 설계부분을 추가한 것이다. 즉 퍼지추론에 따라 제어대상 모델의 파라미터가 수정된 경우, 제어기 설계부에 의해 그 시험에서의 제어대상 모델에 최적인 제어기가 결정되고, 두개의 페루프 제어기 파라미터가 수정된다. 최종적으로 제어대상의 동정이 끝났을 때는 제어대상에 가장 적합한 제어기를 설계할 수 있다. 본 논문에서의 퍼지추론을 이용한 동정과정은 그림 2에 나타냈다.

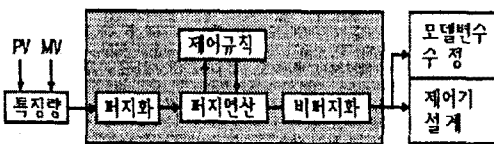


그림 2. 퍼지추론을 이용한 동정과정

그림 1의 제어대상 모델을 포함하는 페루프시스템에서는 그 제어대상 모델에 가장 적합한 제어기를 항상 이용할 수 있기때문에 그 페루프 시스템의 응답은 원하는 결과를 얻을 수 있고, 이 결과로부터 얻어진 특징량은 실제 제어대상 응답의 특징량의 목표기준으로서 가장 적합한것이다. 따라서 이 오토튜닝 방식은 제어대상 모델의 파라미터 동정결과와 제어기의 설계결과

를 통합해서 평가하고, 페루프시스템의 응답을 목표기준에 추종하도록 하는것이라고 할 수 있다.

여기서 기술한 방식은 종래의 특징량을 근거로 직접제어기를 수정하는 퍼지 오토-튜닝 방법에 비해서 아래와 같은 특징을 갖는다.

(1) 제어기 설계부에 있어서 제어이론에 근거한 일반적인 제어시스템 설계법을 사용할 수 있으므로 특징이 크거나 다른 제어대상에도 적용할 수 있다.

(2) 제어대상과 제어대상 모델의 응답을 비교하여 튜닝을 수행하기때문에 튜닝순서의 반복에 있어서 매번 엄밀하게 같은 입력변화가 필요치 않다.

아래에서는 여기서 제안한 방식에 대해서 두가지의 구체적인 예를 들고 그 유효성을 검증한다.

IV. 플랜트 제어시스템에 있어서

Auto - Tuning

1차지연 + 데드타임 요소로 구성된 제어대상을 PI(비례-적분) 제어기로서 제어하는 경우, PI 파라미터의 결정은 앞에서 설명한 오토-튜닝 방식을 적용하고, 시뮬레이션에 의해서 그 유효성을 검증한다. 이 제어대상은 플랜트를 제어하는데 있어서 일반적인 특성으로 이용되고 있는 것이다.

제어기의 전달함수 C(s)는 아래식으로 표현한다.

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{K_{is}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

단, K_p 는 비례이득, K_{is} 는 적분 시정수를 나타내며, 이 두가지가 오토-튜닝에서 결정하는 PI 파라미터이다. 또, 제어대상의 전달함수 P(s)는 아래식으로서 표현할 수 있다.

$$P(s) = \frac{K \exp(-Ls)}{Ts + 1} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 L은 데드타임의 크기, T는 1차지연 시정수, K는 플랜트 이득을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 모델의 전달함수 $P_m(s)$ 를 제어대상과 같은 1차지연 + 데드타임 구조를 갖는 시스템이라고 가정하자.

$$P_m(s) = \frac{K_m \exp(-L_m s)}{1 + T_m s} \dots \dots \dots (3)$$

여기서 첨자 m은 제어대상 모델의 파라미터를 나타낸다. 모델변수 L_m, T_m, K_m 이 퍼지추론 결과에 따라 수정된다.

여기서는 특징량 및 비교값으로서 그림 3에 나타낸 것을 이용하였다. 그림 3의 각 특징량(MO, OR, Td, Tr)은 각각 제어대상 및 모델의 출력응답에 대한 검출값을 나타낸다. 특징량의 비교값(C-MO, C-OR, C-Td, C-Tr)은 퍼지추론의 입력 데이터가 된다.

퍼지추론을 위한 제어규칙을 그림 4에 몇가지 예를 들었고, 전체적으로는 13개의 규칙을 사용한다. 그리고 소속함수를 그림 5에 나타냈다. 이것들은 제어에 있어서 일반적인 지식으로부터 얻어지는 정성적인 관계를 근거로 결정했다. 퍼지추론 방식으로서의 일반적인 MIN-MAX-중심법을 사용하였다.^[8,9,10]

k번째의 제어대상 모델의 파라미터 수정은 퍼지추론 결과인 $dL(k), dT(k), dK(k)$ 를 이용해서 다음식과 같이 결정할 수 있다.

$$L_m(k+1) = 2dL(k) \cdot L_m(k) \dots \dots \dots (4)$$

$$T_m(k+1) = 2dT(k) \cdot T_m(k) \dots \dots \dots (5)$$

$$K_{im}(k+1) = 2dK(k) \cdot K_{im}(k) \dots \dots \dots (6)$$

또, 제어기 설계방법으로 이용하는 PI 파라미터 결정법으로는 부분적 모델매칭방법^[7]을 적용하였다.

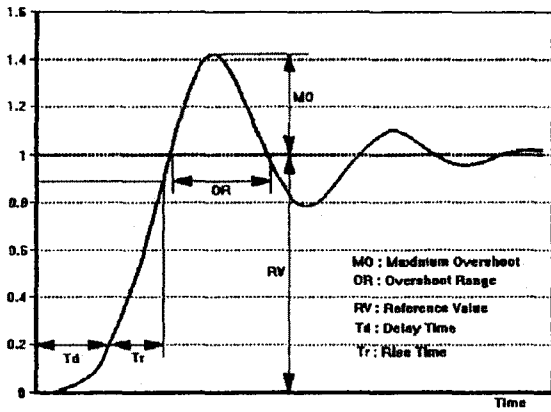


그림 3. 특징량 및 비교값 검출

특징량의 비교 : $C-MO = PMO - MMO$, $C-Tr = \frac{PTr}{MTr}$
 $C-Cd = \frac{PTd}{MTd}$, $C-OR = \frac{POR - MOR}{MTR + MTR}$

```

RULE1: IF C-MO is NL AND C-Tr is L
      THEN dK is negative.
RULE2: IF C-MO is NL AND C-Tr is M
      THEN dK is zero.
RULE3: IF C-MO is NL AND C-Tr is S
      THEN dK is Positive
RULE4: IF C-MO is ML THEN dK is positive
      .
      .
      .
      dL is positive
      .
      .
      .
      dT is negative
  
```

그림 4. 퍼지 제어규칙(플랜트제어시스템)

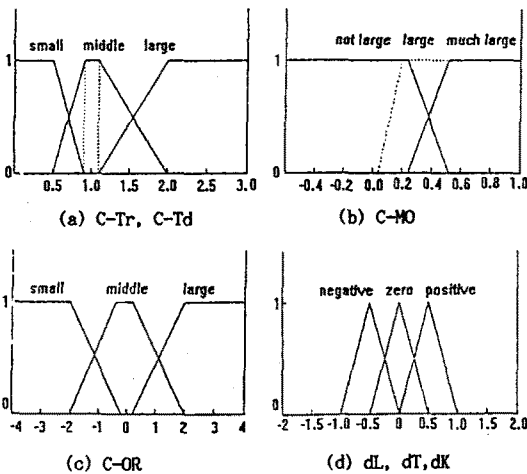


그림 5. 소속함수

V. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 6에 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 그림 7, 8은 각각 특성의 크기가 다른 제어대상에 대한 동정결과를 나타내며, 실선은 제어대상을 포함한 페루프시스템의 출력 PV, 점선은 모델을 포함한 페루프시스템의 출력 모델 PV를 표시한다. 제어대상

의 응답은 동조 전에는 모델의 출력응답과 다르므로 바람직하지 않았지만, 최종적으로는 일치하여 목표사양을 만족시키는 것을 알 수 있다.

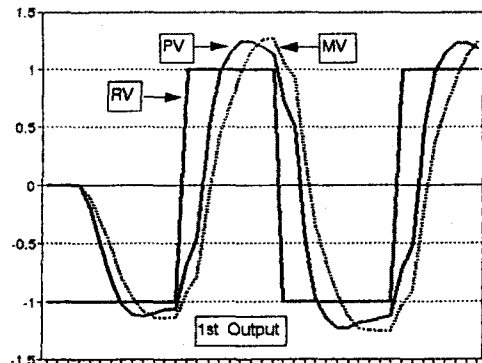
그림 6에서 적용한 제어대상에 대해 다양한 초기값으로부터 동조를 시행한 경우의 동정결과를 표 1.에 나타냈다. 초기값에 관계없이 10% 이내의 오차로서 동정이 완료됨을 알 수 있었다.

표 1. 플랜트의 동정결과

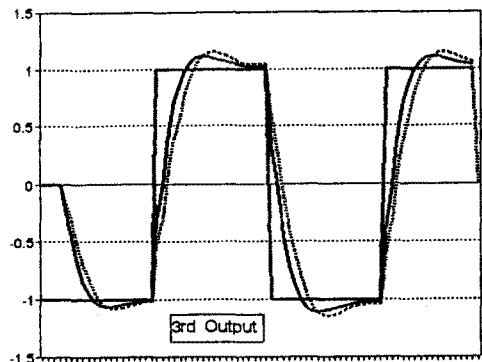
($L=3.02, T=3.02, K_1=1.5$)

초기값			동정결과		
L_m	T_m	K_m	L_m/L	T_m/T	K_m/K
6.04	6.04	3.0	0.98	1.05	1.03
2.03	6.04	3.0	0.96	1.04	1.02
1.015	1.015	3.0	1.08	0.91	0.93
6.02	6.02	0.8	0.99	1.00	1.05
5.06	1.325	0.8	0.93	0.91	0.97

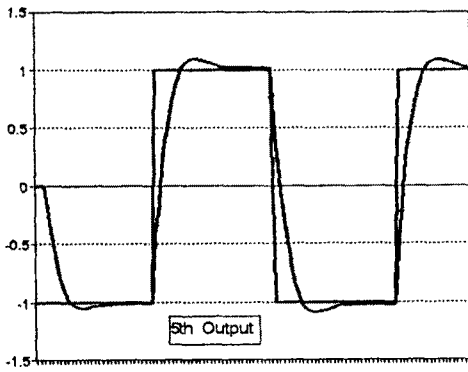
다음으로 제어대상의 특성에 따라서 동정결과에 오차가 발생한다. 이것은 페루프 시스템의 응답에 오차의 영향이 나타나지 않는 경우에 일어나며, 예를들면 그림 7, 8에서는 이 제어대상의 특성이 주로 L 과 K의 값에 의해서 영향을 받기때문에 T의 동정결과에 큰 오차가 존재한다. 그러나 이 동정오차는 페루프시스템의 응답에서는 거의 영향을 미치지 못하므로 자동동조를 실행하는데 있어서 전혀 문제가 되지 않는다.



(a) 플랜트 및 모델의 초기상태
($L=3.02, T=3.02, K=1.5$)



(b) 3회 동조결과의 출력



(c) 5회 동조결과 출력

그림 6. 퍼지추론을 이용한 동정 및 자동동조 결과

VI. 결 론

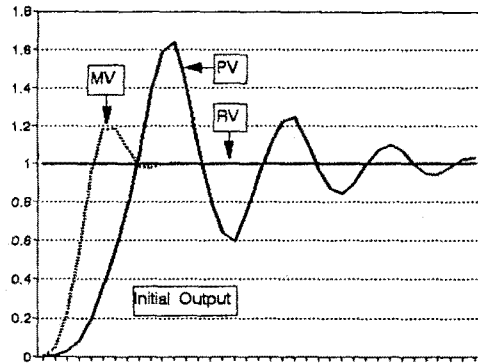
퍼지추론에 따라 페루프 시스템 응답의 특징량으로부터 플랜트의 동정을 실행하는 방법을 제안하였고, 또 이 동정방법에 근거한 자동동조 방식을 실행하였다. 이 자동동조 방식은 특정한 동정용 신호가 없어도 광범위한 플랜트에 탄력성 있게 대응하는 것이 특징이다. 플랜트 제어의 모델로서 일반적으로 사용하고 있는 1차지연 + 데드타임 구조를 갖는 시스템을 고려하였고, 파라미터가 변동하는 시스템에 대해서 본 논문이 제안한 방식을 적용하여 시뮬레이션과 실험에 의해 그 유효성을 확인하였다.

본 논문의 방법에는 위에서 기술한 바와 같이 동정 파라미터가 많아지면 퍼지추론 규칙이 복잡해진다고 하는 문제점이 남아 있다. 이러한 문제점은 적용하는 플랜트에 대응해서 해결해 가는 것이 앞으로의 과제이다.

참고 문헌

- [1] T. Soderstrom and P. Stoica., System Identification, Prentice Hall, 1988
- [2] K.J. Astrom and B.Wittenmark., Adaptive Control, Addison-Weseley, 1989
- [3] 特集: 시스템 同定 - 最近의 理論と 應用, 計測と 制御, 28-4, 289/368, 1989
- [4] K. Nomoto, M.Kondo., "The Recursive Fuzzy Reasoning and Its Application to an Auto-Tuning Controller", IWFS, 81-92, Iizuka
- [5] Iwasaki, T. and Morita, A., Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification, Proc. of NAFIPS'90, pp 90-93, 1990
- [6] 北 森., 制御對象の 部分的 知識に 基づく 制御系 の 設法, 計測自動制御學會 論文集, 15-4, pp 549-555, 1979
- [7] Takagi, T. Sugeno, M., "Fuzzy Identification of System and Its Application to Modelling and Control", IEEE Tr.on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-15, No.1, pp 116-132, Jan/Feb, 1985.
- [8] Procyk, T. M., Mamdani, E. H., "A linguistic SOC", Automatica, Vol.15, pp15-30, 1979.

- [9] Mamdani, E. H., "Application of Fuzzy algorithms for control of simple Dynamic Plant", IEE proc. Control and Science, vol.121, No.12, pp 1585-1588, Dec.1974.
- [10] Zadeh, Lotfi A., "Outline of a new approach to the analysis of complex system and decision process", IEEE Tr. on System, Man and Cybernetics, Vol.SMC-3, NO.1, pp 28-44, January 1973.



(a) T 파라미터가 큰 경우
(L=3.02, T=800, K=2)

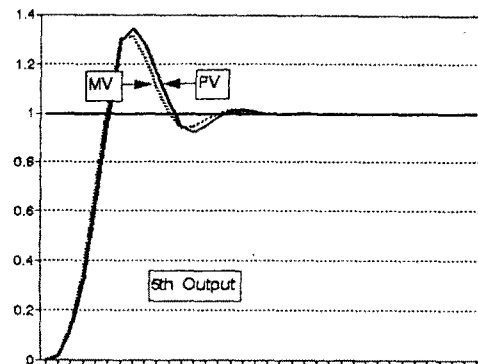


그림 7. 플랜트의 특성이 L 과 K 값에 의존하는 경우