

## 퍼지 추론을 이용한 파라미터 식별 및 D.C. 서보 모터의 속도제어

이은철<sup>0</sup>, 김종훈\*, 이인희, 남문현

전기안전시험연구원\*, 건국대학교

### Parameter Identification with Fuzzy Inference and Speed Control of D.C Servo Motor

Un-cheol Lee, Jong-hoon Kim, In-hee Lee, Moon-hyon Nam

Electrical-Safety Laboratory Research Institute, Kon-Kuk Univ.

**ABSTRACT** This paper proposes a new identification method that utilizes fuzzy inference in parameter identification. The proposed system has an additional control loop where a real plant has replaced by a plant model. Fuzzy rules describe the relationship between comparison results of the features and magnitude of modification in the model parameter values.

In this paper, the tuning method which determines parameters of PID controller automatically is described through applying this algorithm to DC servo motor. And we intend to investigate effectiveness of the method by experiments.

This method is effective in auto-tuning because the response of the closed loop has verified. The simulated and the experimental results of the dc servo motor are shown to confirm the viability of this method.

### I. 서 론

실제 시스템의 모델을 구성하기 위한 접근 방법으로는 물리적 인 해석에 따라 수학적인 모델을 구하는 방법과 주어진 입력력 데이터에 근거해서 시스템의 전달함수를 추정하는 방법이 있다 [1,2]. 본 논문에서는 출력응답 특성을 이용하여 모델의 전달함수를 구하고 제어기를 설계하기 위한 파라미터 식별방법으로서 퍼지 추론 알고리즘[3]을 도입한 것이다.

파라미터 식별을 자동적으로 수행하기 위한 기존의 자동 동조 방법은 대략적으로 두가지 형태로 구분할 수 있다. 첫번째 형태는 직접 동조법(Direct Tuning Method)[6,7]으로서, 이 방법은 페루프 시스템의 입력과 출력 신호로부터 추출된 임의의 특징에 따라서 제어기 파라미터를 직접 수정하는 방식이다. 직접 동조법에서는 퍼지 추론을 제어기의 파라미터를 수정하는데 사용하고 있다. 그러므로 파라미터를 수정하는데 있어서 전문가의 지식을 쉽게 적용할 수 있다는 것이다. 그러나 이 방법은 퍼지 규칙의 집합이 플랜트 특성에 대한 지식없이 제어기 파라미터를 결정하기 때문에 플랜트의 다양한 형태에 적용이 어렵다.

또 다른 형태는 식별 설계법(Identification Design Method) [8]으로서, 이 방법은 우선적으로 플랜트 모델을 식별하고 난 후, 플랜트와 모델의 출력응답으로부터 구하는 제곱오차의 가중치 적분(Weighted ISE: Weighted Integral of Square Error)을 이용하여 제어기 파라미터를 설계하는 것이다. 이 설계방법은 플랜트 모델을 이용한 제어기 파라미터 결정 방법이기 때문에 광범위한 플랜트에 탄력적으로 적용할 수 있다. 그러나 이 방법은 페루프 신호를 사용하는 숙련된 전문가의 지식으로서 제어기 파라미터를 동조시킬 수 없다는 단점이 있다.

본논문에서는 제어대상 모델의 파라미터를 식별하는 새로운 개념으로서 퍼지 추론에 의한 식별방법[4,5]을 적용하였다. 본 방법은 페루프 시스템의 응답파형으로부터 추출한 특징량을 근거로 파라미터 식별을 시행하며, 제어기의 설계와 연결하기 쉬운 형태인 페루프 시스템의 출력응답을 확인하면서 식별을 수행하는 것이 특징이다.

이전에 발표한 논문[4,5]과 연계하여 플랜트와 모델을 임의의 전달함수로 가정하고, 제어대상의 동특성 변화에 따른 식별결과를 실현 분석하였다. 여기서는 D.C. 서보 모터에 본 알고리즘을 적용하여 PID 제어기의 파라미터를 자동적으로 설정하는 동조방법을 기술하고, 실험을 통해서 본 방법의 유용성을 고찰하고자 한다.

### II. 퍼지 추론을 이용한 파라미터 식별

본 알고리즘은 두개의 페루프 시스템으로 구성하며, 하나는 실제의 제어대상을 다른 하나는 컴퓨터상의 모델을, 각각 같은 특성을 갖는 제어기로서 제어하는 구조로 되어 있다. 두개의 페루프 시스템 출력응답의 특징량을 추출하고, 그 비교값을 이용해서 퍼지 추론을 한 후, 모델의 파라미터를 수정한다. 특징량이라는 것은, 예를들면 스텝응답에서의 오버슈트링 등을 말하며, 퍼지 제어규칙은 이 특징량의 비교값과 모델 수정량과의 관계를 표현하는데 이용하고 있다. 이 특징량이나 퍼지 규칙은 플랜트 모델이나 제어기의 구조, 각 파라미터의 특성등에 따라서 적절한 것으로 결정할 필요가 있다[4,5].

본 식별방법의 개략적인 순서는 다음과 같다. 먼저 제어대상 모델의 파라미터 초기값을 결정한다. 그리고 어떤 입력(SV)의 변화에 대해서 얻어진 두개의 페루프 시스템의 출력(PV, MV)으로부터 각각의 특징량을 추출하고, 그 값을 비교한다. 두개의 페루프는 제어대상과 모델만 다르므로 얻어진 특징량의 차는 제어대상과 그 모델의 차이에서 발생하는 것이다. 그래서 특징량의 비교값으로부터 제어대상 모델의 파라미터 차이를 추정하는 퍼지추론을 하고, 모델의 파라미터를 수정한다. 이상의 순서를 반복하여 특징량의 차가 없어진 시점에서 식별값을 구했다고 판단한다.

본 방식은 식별방법으로서 다음과 같은 특징이 있다. 첫째는 입력변화에 대한 페루프 시스템의 응답에서 특징량을 추출하기 때문에 식별을 위한 특별한 입력변화를 요구하지 않으며, 둘째는 파라미터의 수정결과를 확인하면서 반복 수행하기 때문에 일시적인 노이즈에도 강하다고 할 수 있다. 따라서 본 알고리즘은 모델의 파라미터 식별결과와 제어기의 설계를 통합해서 평가하고, 페루프 시스템의 응답을 목표기준에 추종시키는 것이다.

### III. 플랜트의 자동 동조 구현

#### 1) 이론적 고찰

표준적인 전동기의 위치제어 시스템에 대해서 본 방식을 적용한 경우의 블록도를 그림 1에 나타냈다. 기본이 되는 위치제어 시스템은 전류, 속도, 위치의 신호가 피드백되고 각각 비례(P) 또는 비례·적분(PI)제어를 하고 있다. 그림에서  $J$ 는 실제 플랜트의 부하 관성,  $J_m$ 은 모델의 부하 관성을 나타낸다.  $J_m$ 을  $J$ 와 일치시키는 것이 본 알고리즘의 목적이다. 또  $K_{vp}$ ,  $K_{cl}$ ,  $K_{cp}$ ,  $K_{vl}$ ,  $K_{pp}$ 는 제어기 파라미터를 나타내고, 각각 전류비례 이득, 전류적분부분, 속도비례 이득, 속도적분부분, 시정수, 위치비례 이득이다.

그림 1에서 부하관성  $J$ 를 포함하는 페루프 시스템이 실제의 모터 제어 시스템이고, 위의 페루프 시스템이 모델의 제어 시스템이며, 두개의 페루프 시스템은 부하관성  $J$ 와  $J_m$ 만이 다르다. 그밖의 각 정수 및 이득은 결정된 모터의 파라미터로서 주어진 값 및 제어대상의 제어기 이득을 사용하고, 두개의 페루프 시스템으로서 일치시키고 있다.

본 알고리즘을 적용하는 경우, 보다 정확한 식별결과를 얻기위해서는 특징량을 적절하게 선택할 필요가 있다. 그림 1의 제어 시스템에서는 전류  $I$ , 속도  $\theta$ 와 위치  $\theta$ 의 신호를 이용할 수 있으므로 적절한 특징량은 이러한 모든 신호에 대해서 추출이 가능한지를 검토한다.

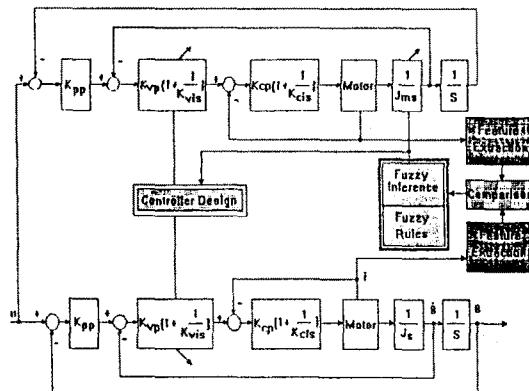


그림 1. 전동기의 위치제어 시스템

식별을 위한 특징량은 부하관성  $J$ 와  $J_m$ 의 차이에 따라 가능한 커다란 차이가 나는 것이 바람직하다. 그래서 입력  $u$ 로부터 전류, 속도, 위치까지 각각의 전달함수에 대해서  $J$ 와  $J_m$ 만이 다른 두개의 페루프 시스템 사이의 비율을 계산하면 (단, 간단히 하기 위해 전류 투프의 응답은 대단히 빠르다고 하고 속도 투프는 비례제어만으로 한다), 먼저 입력  $u$ 로부터 전류  $I$ 까지의 전달함수의 비는 아래와 같다.

$$\frac{G_{ci}}{G_c} = \frac{(J/K_T) s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp} J_m}{(J_s/K_T) s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp} J} \quad (1)$$

여기서  $G_c$ ,  $G_{ci}$ 은 각각  $J$ 와  $J_m$ 에 대한 전류  $I$ 까지의 전달함수를 표시한다. 또 입력  $u$ 로부터 속도  $\theta$ , 위치  $\theta$ 까지의 전달함수의 비는 아래와 같다.

$$\frac{G_{cv}}{G_v} \approx \frac{G_{cm}}{G_p} = \frac{(J/K_T) s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}}{(J_s/K_T) s^2 + K_{vp}s + K_{pp}K_{vp}} \quad (2)$$

여기서  $G_v$ ,  $G_{cv}$ ,  $G_p$ ,  $G_{cm}$ 은 각각의 부하관성  $J$ 와  $J_m$ 에 대한 속도  $\theta$ , 위치  $\theta$ 까지의 전달함수를 나타낸다.

제어대상 모델  $J_m$ 의 수정은 퍼지추론 출력  $dJ$ 를 근거로 실행된다. 또  $J_m$ 을 수정할 때마다 속도 투프의 이득  $K_{vp}$ ,  $K_{vl}$ 를 최적인 상태로 변경하는 자동 동조를 수행한다.

#### 2) 특징량 추출 및 제어규칙

식 (1), (2)로부터  $J$ 와  $J_m$  차가 속도, 위치신호보다는 주로 전류신호에 현저하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 식별을 위한 특징량은 스텝 형태의 위치지령 값을 입력  $u$ 로한 경우의 전류신호로부터 추출하였다. 다시 말하면 위치지령 값 입력 후, 전류값이 포지티브 구간인 시간적분 값으로 특징량으로서 이용하고, 제어대상과 모델의 특징량 비인  $cmp\ I$ 를 비교값으로 하였다.  $cmp\ I$ 를 입력하는 퍼지 추론을 위한 규칙과 소속함수를 그림 2, 3에 나타냈다. 이 경우는 식별하는 파라미터가 하나이므로 퍼지추론은 단순하다. 아래 그림은 제어에 있어서 일반적인 지식으로부터 얻어지는 정성적인 관계를 근거로 결정했다.

퍼지추론 방식으로서는 제어규칙의 조건부와 결론부를 모두 언어변수로 대응시킬 수 있고, 정성적으로 알기 쉬우며 연산과정의 그래프 표현이 간단한 Max-Min 합성법[10]을 사용하였다.

- 규칙 1 : IF  $cmp\ I$  is large THEN  $dJ$  is positive
- 규칙 2 : IF  $cmp\ I$  is middle THEN  $dJ$  is zero
- 규칙 3 : IF  $cmp\ I$  is small THEN  $dJ$  is negative

그림 2. 퍼지 제어규칙의 예(모터 제어 시스템)

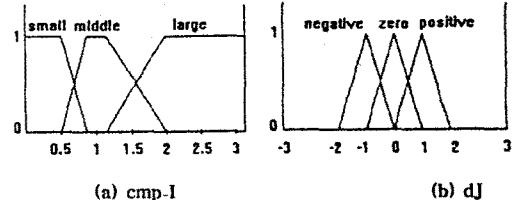


그림 3. 소속함수(모터 제어 시스템)

#### 3) 파라미터 설정

플랜트와 모델의 출력응답으로부터 추출된 특징량에 근거하여 플랜트의 동특성을 식별하기 위한 방법[7]은 다음과 같다.  $k$ 번째 플랜트 모델의 파라미터 수정은 퍼지추론 결과인  $dL(k)$ ,  $dT(k)$ ,  $dK(k)$ 를 이용하여 결정할 수 있다.

$$L_m(k+1) = 2^{dL(k)} * L_m(k) \quad (3)$$

$$T_m(k+1) = 2^{dT(k)} * T_m(k) \quad (4)$$

$$K_m(k+1) = 2^{dK(k)} * K_m(k) \quad (5)$$

DC 서보 시스템에서의 모델 파라미터  $J_m$ 의 수정은 식(6)과 같다. 또한 제어기 설계방법으로 이용하는 PI 파라미터 결정법으로는 부분적 모델매칭방법[11]을 적용하였다.

$$J_m(k+1) = 2^{dL(k)} * J_m(k) \quad (6)$$

### IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 1) 시뮬레이션

$$P1(s) = \frac{4(3s+2)}{(s+1)(5s+2)(4s+1)(s+4)} \quad (7)$$

$$P2(s) = \frac{1}{(1+1.0925s)(1+0.2114s)^5} \approx \frac{1}{(1+1.0925s)} e^{-s}$$

$$P_3(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-Ls} \quad K=1, L=1, T=100 \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$P_4(s) = \frac{12s+8}{5s^4+113s^3+147s^2+62s+8} \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$P_5(s) = \frac{12s+8}{40s^4+113s^3+147s^2+62s+8} \quad \dots \dots \dots (11)$$

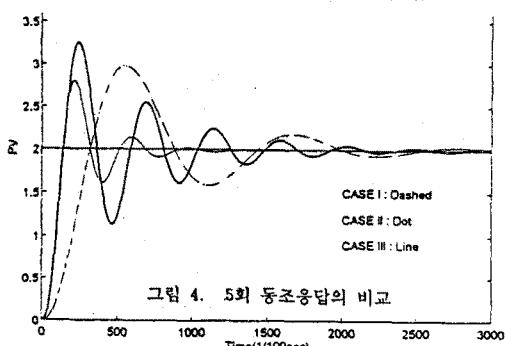
제어대상 P1 과 P2 의 동조 결과나 P3 의 시정수를 서서히 변화 시킨 경우로 부터 전체적인 경향을 고찰 해보면 제어대상의 시간 지연이 커질수록 비례 이득도 커짐을 알 수 있다. 적분시간이나 미분시간도 시간지연과 함께 증가하는 경향을 보이지만, 특히 비례이득에 있어서 현저하게 나타났다. 이것은 주로 비례제어로서 속도성을 개선하고 있기 때문일 것이다. 파라미터가 변화해도 계단응답이 거의 변치 않는 P1, P4, P5 인 경우를 비교하면 대부분 자동등조시킨 PID 파라미터는 변화를 일으키고 있다.

본 장에서는 퍼지 식별 알고리즘을 사용하여 다양한 플랜트 모델에 대해서 파라미터를 변경시킨 후, 시뮬레이션을 통하여 식별 및 동조성능을 비교 분석하였다. 퍼지 식별 알고리즘을 적용한 결과, 제어대상의 응답은 동조 이전에는 모델의 출력응답과 다르므로 바람직하지 않았지만, 최종적으로는 일치하여 목표사양을 만족시키는 것을 알 수 있었다.

그림 4에서 적용한 제어대상에 대해 다양한 초기값으로부터 동조를 시행한 경우의 식별결과를 표 1에 나타냈다. 이 때 플랜트의 파라미터( $L=3.02$ ,  $T=3.02$ ,  $K=1.5$ )에 대해서 시뮬레이션한 결과, 초기값에 관계없이 9 % 내외의 오차범위에서 식별이 완료됨을 알 수 있었다.

표 1. 플랜트의 식별결과( $L=3.02$ ,  $T=3.02$ ,  $K=1.5$ )

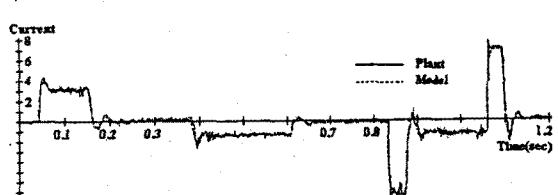
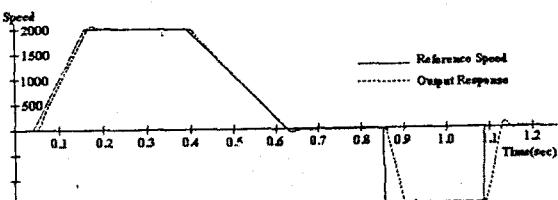
초기 값			식별 결과			식별 오차 (%)		
L <sub>0</sub>	T <sub>0</sub>	K <sub>0</sub>	L <sub>m</sub> /L	T <sub>m</sub> /T	K <sub>m</sub> /K	L	T	K
6.02	6.04	3.0	0.98	1.05	1.03	2	5	7
2.03	6.04	3.0	0.96	1.04	1.02	4	4	2
1.01	1.01	3.0	1.08	0.91	0.93	8	9	7
6.02	6.02	0.8	0.99	1.00	1.05	1	0	5
5.06	1.32	0.8	0.93	0.91	0.97	7	9	3
2.00	1.20	5.0	0.94	0.91	0.98	6	9	2



## 2) 실제 적용 예

그림 5는 실험에 있어서 전류신호의 변화형태를 나타내고 있다. 그림의 (a), (b), (c)는 각각 1, 2, 3회의 입력에 대한 전류신호를 나타내고, 실선은 실제 플랜트의 전류값, 점선은 모델의 전류값을 나타낸다. 이 결과는  $J_m$ 의 초기값을 모터의 회전자 관성 모멘트의 값으로 하고, 모터에 회전자 관성 모멘트의 2.5배 부하가 걸린 경우의 결과 그래프이다.

그림 6은 시간에 따라 목표값(속도)이 변화하는 경우의 속도응답을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 속도형태(profile)를 사다리꼴과 구형파로 지정했을 때, 기준 속도가 서서히 변화하는 경우에는 거의 실시간으로 추종하는 출력응답을 보여 주었으며, 구형파처럼 급격한 속도 변화에 대해서는 오버슈트 및 상승시간이 증가하였다. 그림 6에서 최고 회전속도는 2000[rpm]이었으며, 1.2초 동안 정역회전시킨 경우의 출력응답이다.



## V. 결 론

본 논문에서는 퍼지추론 알고리즘을 도입하여 페루프 시스템 응답의 특징으로부터 플랜트의 식별을 수행하고, 또한 이 방법에 근거한 자동 동조가 가능함을 확인하였다. 이 자동 동조방식은 광범위한 플랜트에 탄력성 있게 대응하는 것이 특징이다. 플랜트 제어의 모델로서 일반적으로 사용하고 있는 1차 및 2차 지연 시스템 구조를 고려하여 모의실험 하고, 실제 실험대상으로서 D.C 서보 모터의 부하관성 변화에 대한 동조성능을 평가하였다.

동특성 파라미터가 변동하는 경우와 부하외란이 인가된 비선형 시스템에 대해서 본 논문이 제안한 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 결과, 기존의 알고리즘과 비교하여 동조성능 면에서 우수한 결과를 얻었으며, 비선형 시스템에 대해서는 그 유용성이 보다 더 증명될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] T.Soderstrom and P.Stoica, *System Identification*, Prentice-Hall, 1988, pp.320-348.
- [2] K.J.Astrom and B.Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, 1989, pp.58-85, pp.328-340.
- [3] 片山徹, “システム同定 - 最近の理論と應用”, 計測と制御, 28-4, pp.289-368, 1989.
- [4] 李殷哲과 南文鉉, “DC 서보 전동기의 부하관성 변화에 대한 식별 및 자동동조”, 大韓電氣學會夏季學術論文集, 1994.7.
- [5] 李殷哲과 南文鉉, “퍼지추론을 이용한 플랜트 식별 및 PI 제어기의 자동동조”, 大韓電氣學會論文集, 제43권, 제10호, 1994.
- [6] K. Nomoto, M.Kondo, “The Recursive Fuzzy Reasoning and Its Application to an Auto-Tuning Controller,” IWFS, pp.81-92, 1988.
- [7] T.Iwasaki, and A.Morita, “Fuzzy Auto-Tuning for PID Controller with Model Classification,” Proc. of NAFIPS'90, pp.90-93, 1990.
- [8] Y.Nishikawa, N.Sannomiya, “A Method for Auto-Tuning of PID Control Parameter,” Automatica, Vol.20, No.3, pp.321-332, 1984.
- [9] S.Z. He, P.Z. Wang, “Design of an on-line Rule Adaptive Fuzzy Control System,” IEEE Int.conf.Fuzzy Syst., pp.83-91, 1992.