

유전 퍼지 알고리즘 기반의 추종 제어를 위한 비선형 제어기 설계

공정식\*, 안상민\*\*, 이보희\*\*\*, 김진걸\*\*\*\*, 허욱열\*\*\*\*

\*인하대학교 자동화공학과(tempus@dreamwiz.com)

\*\*인하대학교 전기공학과(ahns@huro.inha.ac.kr)

\*\*\*세명대학교 전기공학과(bhlee@semyung.ac.kr)

\*\*\*\*인하대학교 전기공학과(john@inha.ac.kr, uyhuh@inha.ac.kr)

Design of Nonlinear Controller for Tracking Control based on Genetic Fuzzy algorithm

Jung-Shik Kong\*, Sang-Min Ahn\*\*, Bo-Hee Lee\*\*\*, Jin-Geol Kim\*\*\*\*, and uk-youll huh\*\*\*\*

\*Industrial Automation Engineering, Inha University, e-mail : tempus@dreamwiz.com

\*\*Department of Electrical Engineering, Inha University, e-mail : ahns@huro.inha.ac.kr

\*\*\*School of Electrical Engineering, Semyung University, e-mail : bhlee@semyung.ac.kr

\*\*\*\*School of Electrical Engineering, Inha University, e-mail : john@inha.ac.kr, uyhuh@inha.ac.kr

**Abstract** - This paper presents design of nonlinear controller based on genetic-fuzzy algorithm. Motor system that is included at a humanoid robot has many nonlinear parameters such as saturation, backlash and so on. So, it is hard to control a humanoid robot because of these nonlinearities. Also, tracking following ability is also reduced by these nonlinearities. In this paper, fuzzy PID controller is proposed for reducing efficiency by saturation. At that time, genetic algorithm is supplied at making fuzzy rule in order to make optimal fuzzy PID controller. Also, disturbance observer is used to reduce the efficiency of backlash. All these processes are verified by simulation and experiment in the real humanoid robot.

1. 서 론

오늘날 제어를 요하는 시스템은 복잡하고 다양한 형태의 비선형성을 지니고 있다. 제어 시스템에 있어서 비선형성은 시스템에 리밋 사이클을 발생시키며 시스템을 불안정하게 만든다. 특히 모터 시스템에서는 여러 개의 비선형성이 존재하는데 대표적인 예가 포화 와 백래쉬이다. 포화는 모터 시스템에서 한정된 전압에 의해 존재하게 되며 이러한 한정된 전압으로 인해 모터 이외에 다른 시스템이 존재하지 않을 경우에도 포화에 의해 리밋 사이클이 발생하게 된다. 또한 오늘날 적용된 모터 시스템에는 모두 외부 구동부가 설계되어 있는데 이러한 외부 구동부에는 기어가 존재하게 된다. 이러한 기어는 백래쉬를 만드는 기본적인 요소가 되며 이 또한 시스템의 비선형성으로써 시스템을 불안정하게 만들게 된다.

이러한 비선형 적인 문제를 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔다. E. J. Davison[1]은 비선형 문제를 해결하기 위해 Describing Function을 이용하였다. 또 다른 연구로써 Hori[2]는 외란관측기를 이용하여 비선형에 의한 리밋 사이클을 제거하는 방법에 대해서 연구하였고, K.T.Woo 와 C. T. Taof[3,4]는 비선형을 해결하기 위해 인공지능 알고리즘을 적용하였다. 특히 유전알고리즘을 이용한 방법은 비선형 제어에 좋은 효과를 가지고 왔다.[5]

이에 본 논문에서는 이러한 복잡하고 제어하기 어려운 비선형성에 대해 비선형성을 해결하고 제적 추종성을 향

상시키기 위한 유전-퍼지 알고리즘과 외란 관측기를 이용한 비선형 제어기를 제안한다. 먼저 최적의 퍼지 제어기를 구현하기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기를 구현하였다. 그리고 이와 더불어 백래쉬에 의한 리밋 사이클의 영향을 줄이기 위해 외란 관측기를 이용하여 제적의 비선형성에 대한 영향을 감소시킬 수 있도록 한다. 이 모든 과정을 자체 모터 시스템을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 시스템 모델링

대부분의 제어 시스템은 선형 요소와 비선형 요소로 나눌 수 있다. 그림 1은 일반적인 모터 시스템의 블록 다이어그램이다. 일반적으로 비선형을 내포한 시스템에 대해서는 시스템을 선형화 하는 과정을 통해 시스템을 선형 시스템으로 가정하고 문제를 접근한다. 그러나 이렇게 구현한 시스템은 실제 시스템에 적용할 경우 리밋 사이클과 같은 비선형성을 보이게 된다.

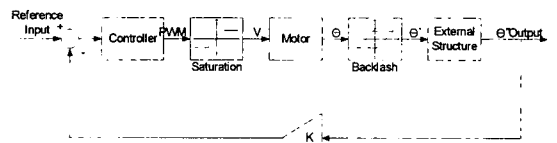


그림 1 일반적인 모터 제어 시스템의 블록 다이어그램

모터 시스템에서 모터는 입력 전압에 대한 각 위치로서 표시가능하다. 식(1)은 모터시스템의 전달함수이다.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_a}{L_a J_m s^3 + (L_a f_m + R_a J_m) s^2 + (R_a f_m + K_a K_b) s} \quad (1)$$

여기서  $V(s)$ ,  $\theta(s)$ ,  $L_a$ ,  $R_a$ ,  $J_m$ ,  $f_m$ ,  $K_a$ ,  $K_b$ 는 각각 입력 전압, 출력 각 위치, 아마추어 인덕턴스, 아마추어 저항, 모터의 inertia, 점성마찰 계수, 모터 토크 상수, 역기전력 상수이다. 모터 시스템에서 포화는 모터에 인가된 최대 전압에 기인한다. 식 (2)는 포화의 수학적 모델을 나타낸다.

여기서  $V_{Max}$ ,  $V_{Min}$ 는 모터에 인가될 수 있는 최대 최소 전압을 의미하며,  $P$ 는 모터에 들어오는 전압을 의미한다. 포화의 경우 제어에 의해 인가해야 할 전압에 대해 인가된 전압의 한계를 넘어갈 때 인가된 전압 이상으로 전압을 주지 못하게 되서 발생하게 된다.

그리고 일반적으로 모터 시스템은 외부 시스템과 연결 되는데 외부 시스템과 연결할 때 기어를 이용함으로써 비선형성의 하나인 백래쉬가 발생한다. 식(3)은 백래쉬의 수학적 모델을 나타낸다.

$$\theta = \begin{cases} \theta - B & \dot{\theta} > 0 \text{ and } \theta' = \theta - B \\ \theta + B & \dot{\theta} < 0 \text{ and } \theta' = \theta + B \\ \theta' & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기에서  $B$ ,  $\theta$ ,  $\theta'$ 는 각각 백래쉬 간격, 입력 각 위치, 출력 각 위치를 나타낸다.

### 3. 제어 시스템

본 논문에서는 제어 시스템과 시뮬레이션의 정확성을 기하기 위해 최적의 데이터를 찾는 과정에서 유전 알고리즘을 사용하였다. 유전 알고리즘은 전역적 탐색 알고리즘으로써 어떠한 수학적 도출 없이 간단한 수식만으로 최적의 해를 탐색할 수 있는 알고리즘이다. 그림 2는 본 논문에서 적용한 유전 알고리즘의 블록 다이어그램이다.

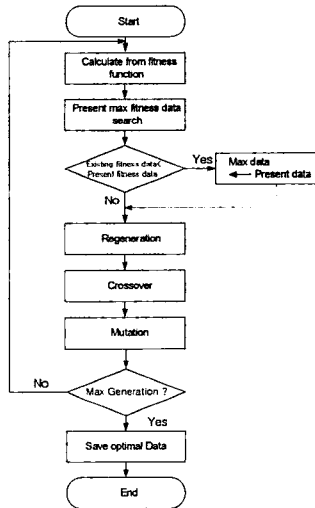


그림 2 유전 알고리즘의 블록 다이어그램

본 논문에서는 모터 시스템에서 시뮬레이션 결과를 실험에 어떤 후 처리 과정 없이 적용하기 위해 먼저 모터 모델을 identification을 수행하였다. 그러기 위해서 모터 모델을 그림 3과 같이 정의 하였다.

#### Motor System

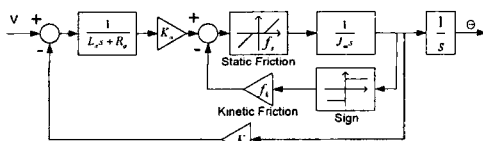


그림 3 실제 모터 모델의 블록 다이어그램

$$V = \begin{cases} V_{Max} & P \geq V_{Max} \\ V_{Min} & P \leq V_{Min} \\ P & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

본 논문에서는 모터 모델을 명확하게 하기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 Identification을 수행하였다. 표 1은 유전 알고리즘에 의해 구해진 모터 변수들의 값이다.

표 1 Identification에 의한 모터 변수

Symbol	Value	Symbol	Value
$L_a$	0.00034	$J_m$	$8.085 \times 10^{-7}$
$R_a$	6.09146	$f_m$	$1.506 \times 10^{-5}$
$K_a$	0.01933	$f_s$	0.00194
$K_b$	0.01688	$f_k$	0.00657

유전 알고리즘에 의해 구현된 모터 시스템은 시뮬레이션 수행 시 후 보정 없이 실험에 바로 적용할 수 있는 퍼지 PID 제어기 Gain을 구할 수 있도록 하는데 이용되었다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 제어기의 블록 다이어그램이다. 본 논문에서의 모터 제어기는 크게 2개의 블록으로 나뉘어 진다. 첫 번째 블록은 퍼지 PID 부분이다. 이 블록은 모터 시스템 제어 시 처음으로 발생하게 되는 포화에 의한 비선형성을 해결하기 위한 부분이다. 퍼지 PID 제어기 구현 시 유전 알고리즘을 이용하여 Defuzzification에 이용할 각각의 PID Gain을 구하였다. 표 2는 유전 알고리즘에 의해 구해진 퍼지 PID Defuzzification 경계 값을 나타낸다.

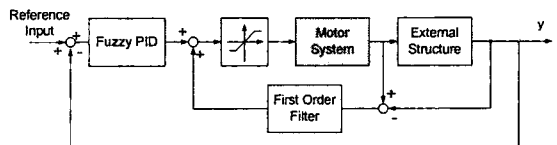


그림 4 모터 시스템 블록 다이어그램

표 2 유전 알고리즘에 의한 최적 Defuzzification 경계값

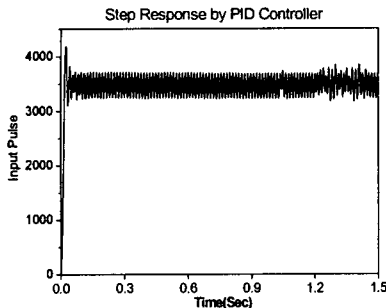
Boundary	Kp	Ki	Kd
$ E  = 80$	83.0267	0.115764	12.8525
$ E  = 60$	34.8719	0.000447	16.1197
$ E  = 40$	6.35713	0.131804	13.3967
$ E  = 20$	6.58674	0.790909	9.88247
$E = 0$	27.9824	0.784173	9.75448

그리고 두 번째로 외부 구조물에 의해 발생하여지는 비선형성에 대해서는 외관관측기로서 1차 필터를 사용하여 1차 필터의 Gain을 조절함으로써 외부 구조물에 의해 발생하는 Backlash와 같은 비선형에 의한 영향을 줄였다.

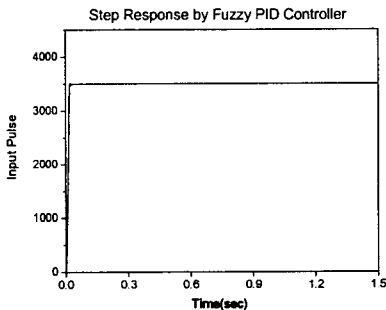
### 4. 실험

본 논문에서는 제안된 제어 알고리즘을 적용하기 위해 자체 개발한 TT사의 320F2810 기반의 모터 제어 시스템에 모터 입력단의 엔코더와 기어와 배벨 기어가 달린 출

력 단에 출력 엔코더를 연결하였다. 먼저 모터에 달린 엔코더를 이용하여 모터 제어를 수행 시 퍼지 PID 제어와 유전 알고리즘을 통해 구해진 최적의 PID 이득 값을 이용한 결과는 그림 5에 나타나있다.



(a) PID에 의한 결과



(b) 퍼지 PID에 의한 결과

그림 5. 입력 엔코더 상에서의 PID제어기와 퍼지 PID제어기 비교

그림 5로부터 유전알고리즘을 통해 구현한 퍼지 PID와 유전 알고리즘을 통해 최적화 되어 있는 PID 제어기를 비교해 보았을 때 퍼지 PID제어기가 포화에 의해 발생하는 비선형성에 의한 리밋 사이클이 제거할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6은 외부 구조물이 장착되어 있을 경우의 각 제어기의 결과를 나타낸다.

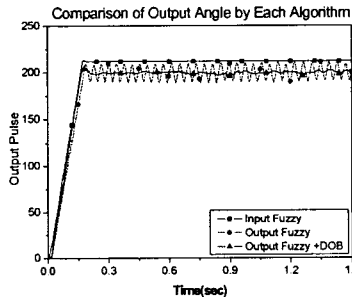


그림 6. 외부 구조물이 장착된 경우의 각 제어기 비교

그림 6으로부터 제안된 퍼지 PID로 입력측만 제어했을 경우 입력 제어는 잘 수행되지만 기어에 의한 백래쉬 때문에 출력 단을 비교해 보면 정상상태 오차가 10.5% 정도 나는걸 알 수 있었다. 이에 이를 해결하기 위해 출력 단을 이용하여 퍼지 PID를 구현했을 경우 백래쉬에 의해 리밋 사이클이 발생함을 확인할 수 있었다. 이에 이러한 리밋 사이클을 줄이기 위해 기존 퍼지 제어기에 외란 관측기를 설계하여 수행한 결과 백래쉬에 의한 리밋 사이클이 줄어들게 되었다. 이에 본 논문에서는 제적 추종을 위해 휴머노이드 로봇에 들어가는 로봇 제적을 넣

어서 제어기 성능을 평가하였다. 그림 7은 퍼지 PID제어기와 퍼지 PID에 외란관측기를 사용한 상황에서의 제어기의 제적 추종 능력에 대한 결과이다.

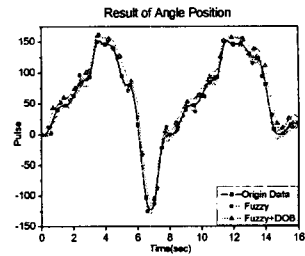


그림 7 각 제어기의 제적 추종 결과

그림 7로부터 출력 단에 퍼지 PID 제어기만 사용했을 경우 제적 추종 시 리밋 사이클이 걸리지만 퍼지 PID제어기에 외란 관측기를 사용했을 경우 제적 추종 시 발생하는 리밋 사이클의 크기가 줄어들었음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 여러 개의 비선형 요소를 가지고 있는 시스템에서의 비선형성에 의해 발생하는 요소를 제거하면서 제적 추종을 수행할 수 있도록 유전 알고리즘 기반의 퍼지 PID 제어기와 외란 관측기를 이용한 비선형 제어기를 구현하였다. 이와 같이 구현된 비선형 제어기를 통해 포화에 의한 영향과 Backlash의 영향에 의한 리밋 사이클을 없앨 수 있었고 제적 추종을 원활하게 수행할 수 있었다.

향후 적응 제어 시스템을 이용하여 제적 추종 능력의 향상 시킬 수 있도록 하는 연구가 진행되어야 할 것이며 이와 더불어 로봇 등과 같은 복잡하고 다축 시스템에 적용할 수 있는 제어기를 구성해야 할 것이다.

## [참고 문헌]

- [1] E.J. Davison, "Application of the Describing Function Technique in a Single-Loop System with Two Nonlinearities," IEEE Trans. On Automatic Control, pp.168-170, 1968
- [2] Satoshi Komada, Noriyoshi Machii and Takamasa Hori, "Control of Redundant Manipulators Considering Order of Disturbance Observer," IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 47, No. 2, pp. 413-420, 2000
- [3] Kohji Yamada, Satoshi Komada, Muneaki Ishida, and Takamasa Hori, "Characteristics of Servo System Using High Order Disturbance Observer," Conf. on Decision and Control, pp. 3252-3257, 1996
- [4] K.T. Woo, Li-Xin Wang, F.L. Lewis, and Z.X. Li, "A Fuzzy System Compensator for Back-lash," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 181-186, 1998
- [5] C. W. Tao, "Fuzzy Control for Linear Plants with Uncertain Output Backlashes," IEEE Trans. On systems, Man and Cybernetics, Vol. 32, No. 3, pp. 373-380, 2002
- [6] Ali A. Jamshidifar and Caro Lucas, "Genetic Algorithm Based Fuzzy Controller for Nonlinear Systems," Int. Conf. on Intelligent Systems, pp. 43-47, 2004