

퍼지 시스템 설계를 위한 클러스터링 데이터의 수집

윤용석, 김서광, 공성곤
숭실대학교 전기공학과

The Collection of Clustering Data to Design a Fuzzy System

Yong-Seock Yoon, Seo-Gwang Kim, Seong-Gon Kong
Intelligent Signal Processing Lab. Dept. of Electrical Eng. Soongsil Univ.

Abstract - 전문가의 지식이 없거나 이를 이용하기가 힘든 상황에서 클러스터링과 GA를 이용하여 퍼지 시스템을 설계하는 방법에 관해 연구하였다. 클러스터링에 사용될 데이터의 획득을 위해 두 가지 상황을 고려하여 연구하였다. 먼저 기존의 제어기가 있는 상황에서 개선된 제어기를 설계하기 위해 기존 제어 시스템의 동작시 입력 출력에 관계된 상태를 샘플링하여 데이터를 획득하였으며, 다음으로 기존의 제어기가 없는 상황에서는 사람이 시스템을 최적으로 동작시키고 이때 시스템에 관계된 상태를 샘플링하였다. 획득된 데이터를 클러스터링하여 퍼지 시스템을 설계하고 이의 최적화에는 GA를 사용하였다.

1. 서 론

시스템이 복잡하여 특성을 판별하기 어렵거나 고전제어의 방법들로는 제어가 힘든 시스템들에 대해서 인간의 논리와 유사하고 대략적인 개념을 사용하는 퍼지 논리 제어기(FLC)의 적용은 적합하고도 편리한 방법이라 할 수 있다. 일반적으로 퍼지 논리 제어기를 설계하는데는 전문가의 지식, 경험, 직관에 의존하므로 시스템에 대한 충분한 사전지식이 필요하다. 이와 같은 전문가지식이 부재한 상황이나 이의 적용이 곤란한 상황에 대해 새로운 제어기 설계 방법이 요구된다. 따라서 이러한 문제를 위한 여러 시도가 있어왔다[1].

클러스터링 알고리즘은 데이터들의 대표 값을 찾는 것으로 일종의 반복되는 패턴을 찾기 위한 것이라 할 수 있다. 기존의 제어기의 유무에 따라 제어기를 구성한 뒤 시뮬레이션 상태에서 샘플링하거나 인간의 시스템 동작을 샘플링하여 클러스터링에 사용될 데이터를 얻을 수 있다. 클러스터링의 결과로 퍼지 제어를 위한 규칙을 설정한다.

퍼지 시스템의 설계를 위해서는 클러스터링에 의해 구할 수 있는 규칙에 관계된 파라미터 외에도 멤버쉽 함수의 폭과 같은 기타 파라미터들의 설정이 필요하다. 일반적인 Gradient Descent 방법은 초기 파라미터 설정에 따른 국부 최소점에 수렴할 우려가 있으므로, 본 논문에서는 그 탐색능력을 인정받아 널리 쓰이고 있는 GA를 이용하여 각종 파라메터들을 최적화한다[2]. GA는 시스템의 오차가 작은 최적의 퍼지 시스템을 위한 파라미터들을 찾는 방향으로 진화하도록 한다.

2절에서는 기존 제어기로부터 데이터를 획득하여 개선된 성능을 갖는 퍼지 제어기를 구성하는 방법에 대해 연구하고, 3절에서는 사람이 로봇을 주행시킨 데이터를 이용하여 축구 로봇의 경로를 설정하는 퍼지 시스템을 설계한다. 제안한 방법을 시뮬레이션을 통해 평가한다.

2. 기존의 제어기보다 개선된 제어기의 설계

2.1 문제 제기

식(1)과 같은 전달함수로 주어지는 플랜트를 위한 제어기를 설계하는 방법이 고찰되었다[3].

$$P(s) = \frac{K}{(1+ts)^2} \quad (1)$$

이때 사용된 제어기의 조건은 4% 이내의 오버슈트, 2초보다 적은 정착시간을 갖도록 하는 것이다. 플랜트를 위한 기존의 제어기는 입력을 전처리 하는 저역 통과 전처리 필터와 PID 제어기로 이루어져 있고, 문제에 대해 만족할만한 성능을 보여주고 있다[3].

$$H(s) = \frac{1024.08}{s^3 + 26s^2 + 274.12s + 1024.08} \quad (2)$$

식 (2)는 $K=2$, $t=1$ 일 때 제안된 제어기를 포함한 플랜트의 전체 전달 함수이다[3].

2.2 Subtractive 클러스터링

본 논문에서는 여러 클러스터링 방법 중 Subtractive Clustering을 사용하며[4], 클러스터링을 위해 기존 시스템의 입력 출력 데이터를 사용한다[1]. 먼저 기존의 시스템을 구성한 뒤 시스템의 기준 입력을 1초간 스텝입력, 다음 1초간 0으로 하고 위 시스템을 시뮬레이션하고, 100Hz로 기준신호와 실제 플랜트 출력간의 오차, 오차의 변화량 그리고 제어기의 출력을 샘플링하고, 이상의 3차원 데이터를 클러스터링한다.

본 논문에서는 포텐셜 함수의 최대 값이 첫 번째 클러스터 중심의 포텐셜 값의 5%보다 작아질 때까지 클러스터를 찾는 과정을 계속하였다[5]. 그 결과 3개의 클러스터 중심을 구하고, 각 단계에서 포텐셜 함수의 모양은 아래와 같다.

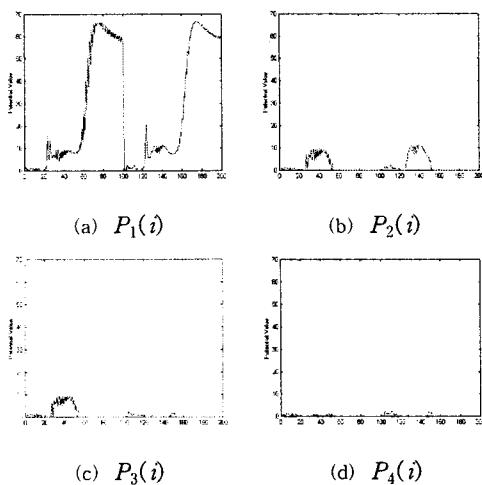


그림 1. 클러스터링 단계에 따른 포텐셜 함수

2.3 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 입력은 클러스터링에 쓰인 데이터와 동일하며 오차($e(k)$)와 오차의 변화량($\Delta e(k)$)을 사용한다. 그리고 클러스터링에 의한 퍼지제어의 규칙은 다음

과 같다.

Rule 1 :

IF $e(k)$ is u_{11} AND $\Delta e(k)$ is u_{12} THEN y is y_1^*

Rule 2 :

IF $e(k)$ is u_{21} AND $\Delta e(k)$ is u_{22} THEN y is y_2^*

Rule 3 :

IF $e(k)$ is u_{31} AND $\Delta e(k)$ is u_{32} THEN y is y_3^*

사용한 퍼지 시스템의 입력 멤버쉽 함수는 가우시안 함수로 다음과 같은 모양으로 표현된다.

$$u_{ij}(\text{Input}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\text{Input} - u_{ij}^*}{\sigma_{ij}}\right)^2\right] \quad (3)$$

식 (3)은 입력(*Input*)인 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 에 대한 멤버쉽 함수로, $i=1, 2, 3$ 은 규칙, $j=1, 2$ 는 입력 변수를 나타낸다. 그리고 u_{ij}^* , σ_{ij} 는 가우시안 멤버쉽 함수 u_{ij} 의 중심과 폭을 나타낸다. 본 논문에서는 적합도 함수에 Singleton 방법을 적용하고, min 연산 대신 product 연산 방법을 사용한다. 그리고 MAMDANI 타입의 퍼지 로직과 Simplified Reasoning에 의한 후건부 계산 방법을 사용한다[6]. 따라서 규칙이 3개로 주어지는 경우, 퍼지 시스템의 최종 출력 y 는 다음과 같이 계산된다.

$$y = v_1 y_1^* + v_2 y_2^* + v_3 y_3^* \quad (4)$$

식 (4)에서 y_i^* ($i=1, 2, 3$)는 i 번째 규칙의 후건부 값이고, $v_i = r_i / \sum_{j=1}^2 r_j$ 으로 정규화된 적합도이다.

2.4 GA에 의한 퍼지 시스템 최적화

제안한 퍼지제어기에서 최적화 되어야 할 파라미터들은 입력 멤버쉽 함수(gaussian)의 중심과 폭, 그리고 후건부 출력의 중심값이다. 위의 경우에는 규칙이 3개, 입력 변수가 2개이므로 모두 12개의 입력 멤버쉽 함수에 관계된 파라미터와 후건부 중심값 3개를 최적화해야 한다.

설계에서의 편리성과 일관성을 위해 퍼지 제어기의 입·출력 구간을 모두 $[-1, 1]$ 의 범위로 정규화하여 설계하였다.

유전자의 각 염색체는 2진수로 코딩하는 방법을 선택하였고, 파라미터의 분해능을 0.01보다 작게 하기 위해 $(2/2^8 = 0.0078)$ 각 파라미터마다 8비트를 할당하였다. 따라서 염색체의 크기는 120비트가 된다.

제안된 염색체의 구조는 [그림 2]와 같다.

u_{11}^*	σ_{11}	...	u_{21}^*	σ_{21}	...	y_1^*	y_2^*	y_3^*
------------	---------------	-----	------------	---------------	-----	---------	---------	---------

그림 2. 제안된 염색체의 구조

본 연구에서 사용한 유전자 알고리즘의 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 유전자 알고리즘 적용시 파라미터

Population Size(N)	200
Crossover Probability	0.8
Mutation Probability	0.05
Number of Generations	1000

더 나은 파라미터들의 조합을 선택하기 위해, GA의 각 개체는 적합도 함수에 의해 평가된다. 평가 방법은 각 개체의 유전자의 정보로부터 퍼지제어기를 구성하여 2.2절과 같은 기준 입력으로 시뮬레이션 했을 때의 성

능을 이용한다. 즉, 기준 입력에 대한 시스템 출력간의 오차와 오버슈트의 크기를 사용하여 평가한다.

$$J = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^K |e(k)|} \quad (5)$$

식 (5)는 본 연구에서 사용된 적합도 함수이다. 여기서 K 는 시뮬레이션 동안의 샘플링 수이고 $Ref(k)$ 를 기준입력, $y(k)$ 를 플랜트의 실제 출력이라 할 때 오차 $e(k) = Ref(k) - y(k)$ 이다.

그리고 오버슈트가 기준입력보다 2% 이상 커질 때는 (5)의 적합도 값이 높더라도 다음 세대로의 진화를 제한한다. 따라서 GA는 위의 적합도 함수를 최대화하면서 오버슈트가 2% 이내가 되도록 하는 방향, 즉 응답도 빠르고 오버슈트도 작은 안정된 제어기를 찾는 방향으로 진화하게 된다.

2.5 시뮬레이션

GA에 의해 찾은 최적 퍼지 제어기의 멤버쉽 함수와 출력의 파라미터들은 아래와 같다.

$u_{11}^* = -0.168627$, $\sigma_{11} = 0.647059$, $u_{21}^* = 0.882353$, $\sigma_{21} = 0.247059$, $u_{31}^* = 0.419608$, $\sigma_{31} = 0.498039$, $u_{12}^* = -0.654902$, $\sigma_{12} = 0.0196078$, $u_{22}^* = 1$, $\sigma_{22} = 0.623529$, $u_{32}^* = -0.529412$, $\sigma_{32} = 0.137255$ 이다. 그리고 각 규칙에서 후건부의 중심은 $y_1^* = 0.388235$, $y_2^* = 0.929412$, $y_3^* = -0.984314$ 이다.

기존의 제어기로 제어한 시스템에서의 시뮬레이션 동안의 오차의 절대값의 평균 $\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |e(k)| = 0.2881$ 이고, 제안된 퍼지제어기의 오차의 평균은 0.1398로 기존의 제어기보다 더 나은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 아래의 [그림 3]은 기존 제어기의 출력과 퍼지제어기의 출력을 비교한 것이다.

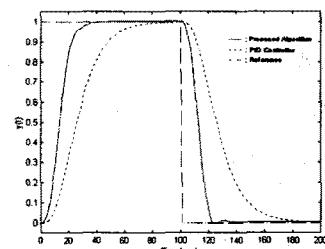


그림 3. 제어기 출력의 비교

3. 기존의 제어기가 없는 상황에서의 제어기 설계

3.1 문제 제기

로봇 축구 경기[7]에서 득점하기 위해 축구 로봇을 제어하는데 많은 노력이 있어 왔다[8]. 축구로봇의 웃동작은 바로 득점으로 연결되는 중요한 동작으로 이를 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 웃동작을 위한 제어기를 구현하기 위해서는 일단 로봇이 움직여야 할 경로 설정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 축구 로봇의 경로 설정을 위한 퍼지 시스템의 설계에 대해 연구한다.

3.2 클러스터링 데이터 획득

사람이 로봇의 웃동작을 가정하여 로봇을 최적이라 생각되는 경로로 여러 번 움직여 주고, 이때 비전 시스템을 이용하여 정해진 샘플링 시간마다 시스템의 상태를 저장한다. 즉, 공과 로봇을 임의의 장소에 위치시키고

로봇을 움직여 주며, 샘플링 시간마다 저장할 때는 공과 로봇의 절대좌표, 로봇의 진행 각도를 계산하여 저장한다.

아래 [그림 4]는 로봇의 최소회전 반경을 고려하여 여러번 주행시키고 이때의 샘플링된 데이터를 나타낸다. 실제 시스템 구현시 공의 위쪽과 아래쪽은 대칭이 되므로 위쪽의 데이터만 구하면 된다.

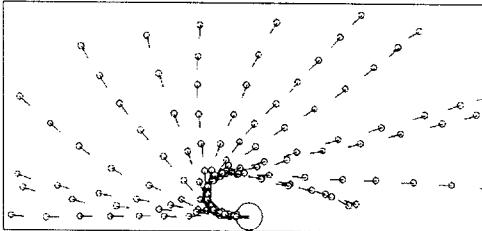


그림 4 경로 주행시의 샘플링 데이터

3.3 데이터 클러스터링 및 퍼지 시스템 설계

이렇게 얻어진 데이터의 클러스터링 방법으로는 2.2 절에서와 같이 Subtractive 클러스터링을 이용한다. 클러스터링에서의 종료조건은 계속되는 다음 번의 클러스터를 구하는 과정에서 포텐셜 함수의 최대값이 초기의 포텐셜 함수 최대값의 5%이하가 되면 종료하게 하였다. 결과로 모두 10개의 클러스터의 중심을 구할 수 있다.

따라서, 퍼지 규칙은 모두 10개가 된다. 이때 퍼지 시스템의 입력은 절대좌표에서의 로봇과 공의 상대적인 거리와 각도가 되고, 출력은 이 좌표에서 로봇이 춰어야 할 진행 방향으로의 각도(Heading Angle)가 된다. 규칙의 모양은 다음과 같다.

$$\text{IF } distance \text{ is } u_i \text{ AND } Angle \text{ is } v_i \text{ THEN } y \text{ is } y_i \quad (6)$$

여기서 i 는 규칙의 번호, u_i , v_i 는 거리와 각도에 대한 각각의 멤버쉽 함수이다.

2.3절과 마찬가지로 입력으로 가우시안 멤버쉽 함수를 이용하였으며, 후건부 추론에는 Simplified Reasoning을 적용하였다.

아래의 [그림 5]는 클러스터링에 의한 결과로 만들어진 퍼지 시스템의 출력이다. 가우시안 함수의 폭과 같은 파라미터들이 최적화되지 않아서 오차가 크다.



그림 5 클러스터링에 의한 퍼지시스템의 결과

3.4 GA에 의한 퍼지 시스템 최적화

퍼지 시스템의 입력 멤버쉽 함수(gaussian)의 중심과 폭, 그리고 후건부 출력의 중심과 같은 파라미터들을 최적화하기 위해 유전자 알고리즘을 이용한다. 2.3절에서와 같은 방법으로 최적화할 변수는 모두 50개가 있다. GA를 이용하여 다음의 적합도 함수를 최대화하는 방향으로 개체를 진화시키게 된다.

$$J = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^K |e(k)|} \quad (7)$$

여기서 $Ref(k)$ 를 클러스터링에 사용된 실제 출력 데이터, $y(k)$ 를 퍼지 시스템의 출력이라 할 때, $e(k) = Ref(k) - y(k)$ 이고, K 는 클러스터링에 사용된 데이터의 개수이다. GA는 모든 샘플링 데이터를 가장 잘 추종하는 퍼지 시스템으로 진화하게 한다.

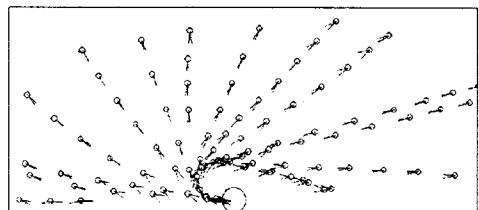


그림 6 GA에 의해 최적화 된 시스템의 출력

클러스터링에 의한 퍼지 시스템에서는 전체 에러의 평균값($\sum_{i=1}^K e_i / K$)이 64.26이고 GA 최적화 후에 28.25로 향상된 것을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전문가의 지식이 없거나 이의 적용성이 곤란한 상황에서 퍼지제어기의 설계 방법에 대해 연구하였다. 기존의 제어기가 있는 상황과 없는 상황으로 구분하여 플랜트의 제어와 축구 로봇의 경로 설정을 위한 퍼지 시스템의 설계 문제에 적용하여 고찰해 보았다. 먼저 퍼지 제어기의 규칙의 수를 결정하기 위해 기존 제어기의 동작과 인간의 제어행동에서 시스템에 관계된 데이터를 샘플링하여 이를 클러스터링하였다. 퍼지시스템은 가우시안 멤버쉽 함수와 Simplified Reasoning을 적용하여 구현하였고, 퍼지 시스템의 여러 파라미터들은 GA를 사용하여 최적화하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 퍼지 제어기가 기존의 제어기보다 우수하고, 축구로봇의 경로 설정을 위한 시스템에 성공적으로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 앞으로의 연구방향으로는 유전자 알고리즘의 적용에 있어서 강인성, 주파수 특성 등을 고려한 더욱 개선된 제어기를 설계하는 것과, 축구 로봇이 설정된 경로를 추정하도록 하는 동작제어기를 위한 퍼지 시스템의 설계가 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Ching-Chang Wong and Chia-Chong CHEN, "A Clustering-based Method for Fuzzy Modeling", IEICE Trans. on Information & Systems, V.E82-D N.6, 1058-1065, 1999
- [2] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley, 1989
- [3] Dorf, Richard C. and Bishop, Robert H. Modern Control Systems, Addison Willey, 1998
- [4] S. Chiu., "Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Vol. 2, No3, Sept. 1994
- [5] 윤용석, 공성곤, "클러스터링과 GA를 이용한 퍼지 제어기 설계 자동화", 전기학회 학계 학술대회, 2000.7
- [6] Ronald R. Yager, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [7] FIRA Homepage, <http://www.fira.net>
- [8] 로봇 축구 공학 워크샵 논문지, KAIST, Nov.1998.