

지도 자동구축을 통한 Fuzzy-GA 기반 Reactive 시스템의 성능 향상

김영철*, 조성배*, 오상록**

*연세대학교 컴퓨터과학과

**한국과학기술연구원 생체모방제어시스템연구실

e-mail:yckim@candy.yonsei.ac.kr

Improving Fuzzy-GA based Reactive System by Automatic Map Building

Young-Chul Kim*, Sung-Bae Cho*, Sang-Rok Oh**

*Dept of Computer Science, Yonsei University

**Bio-mimetic Control System Lab., KIST

요약

이 논문에서는 이동로봇의 자유로운 배회 및 목적지 찾기 행동을 위한 진화형 퍼지 제어기의 설계 방법을 제안 한다. 전체 실험공간을 장애물과 충돌없이 자유롭게 움직이기 위해서 진화연산 알고리즘을 이용한 퍼지규칙과 소속함수의 자동생성을 거친 뒤 이를 통해 전체 지도정보를 구축한다. 여러 시스템에서 응용되는 퍼지 제어기는 일반적으로 시스템을 잘 이해하고 있는 전문가로부터 구축되어 사용되어진다. 그러나 사람의 지식과 경험은 간혹 알려진 범위 내에서만 완벽하게 작동하기 때문에 그 범위를 벗어나면 오류를 범할 수 있다. 이러한 알려진 해법외의 새로운 규칙과 제어 방법을 찾기 위하여 유전 알고리즘을 이용한 퍼지규칙과 소속함수를 구축하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 이 논문에서도 유전 알고리즘을 이용하여 이동로봇의 퍼지 제어기에 사용된 규칙과 소속함수의 최적화를 통해 견고한 퍼지 제어기를 설계한다. 이를 통해 구축된 지도정보는 로봇의 Deliberative한 행동을 위해 사용되며, Fuzzy-GA 제어기는 센서기반 Reactive 시스템에서 이용된다. 전체 실험환경의 구성부터 제안한 이동로봇 퍼지 제어기 구축과 지도 구축작업을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

로봇의 경로 탐색기법은 자율 이동로봇의 네비게이션 구현에서 가장 중요한 분야로 다음과 같이 두 부분으로 나뉘어 질 수 있다. 하나는 전역 경로계획(Global path planning)으로 전체 환경에 대한 정보를 가지고 있는 것이고, 다른 하나는 국소 경로계획(Local path planning)으로, 센서값에 의존한 장애물의 크기나 위치 등을 구별하여 불확실한 주변환경에서 보다 안전하게 경로를 탐색하게 해주는 것이다.

전역 경로계획으로는 특징적인 공간 탐색기법[1]과, 포텐셜 필드 기법, 일반화한 보로노이 다이어그램, 그리고 그래프 탐색기법 등이 있다. 국소 경로계획은 초음파 센서나 영상, 레이저 센서들로부터 입력되는 값을 이용하는 방법으로 Brooks[2]는 실험 환경 내에 로봇을 쫓는 힘과 끌어 당기는 힘의 개념을 도입하여 초음파 센서를 장착한 로봇이 장애물을

피해가는 연구를 하였고, Borenstein과 Koren은 가상 힘의 공간내에서 Brooks 연구의 제약점을 극복한 빠른 속도로 움직이는 로봇의 연구를 하기도 하였다.

퍼지 시스템을 구현하고자 할때, 그 문제에 대한 전문적 지식을 충분히 알고 있다면, 여러 특성을 표현할 수 있는 언어적 변수들을 이용하여 비선형적인 문제라도 충분히 해결할 수 있다. 그러나 이와는 반대로 전문적 지식이 전혀 없거나 혹은 일부분만 알고 있다면 단순히 퍼지 논리를 이용하여 완벽한 해결 방법을 찾을 수는 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 또 다른 해결책을 찾아야 하며, 그것이 바로 퍼지 이론에 신경망 이론이나 유전 알고리즘 등의 여러 소프트 컴퓨팅 기법을 접목하는 것이다. 이런 연구들로서는 생물체의 선택적 유전을 이용하여 염색체중 우수하다고 판별된 부분만 선택하여 이

것을 다음세대로 유전시키는 방법이 있었고[3], 염색체의 의미 있는 부분을 유전 알고리즘에서 해석하여 사용할 것인가 말 것인가를 판단하는 방법이 있었다[4]. 또 다른 연구로서는 소속함수를 필요 이상으로 사용하여 퍼지 입력공간 및 출력공간을 조밀하게 만들어 진화시키는 방법이 있었고[5], 이와는 다르게 단순히 하나의 퍼지 영역분할 방법이 아니라 여러 퍼지 공간을 사용하여 퍼지 입력 및 출력공간의 그 실용성을 입증한 연구가 있었다[6].

이 논문에서는 Dempster-Shafer의 불확실성 추론 이론을 이용하여 Deliberative한 방법에 사용될 지도 구축에 관한 문제와 장애물과의 충돌없이 목적지를 찾아갈 수 있게 센서정보를 이용할 수 있는 Reactive 방법의 혼합 이용에 관한 연구를 수행하였다. 그림 1은 제안된 시스템의 전체 구조를 보여준다.

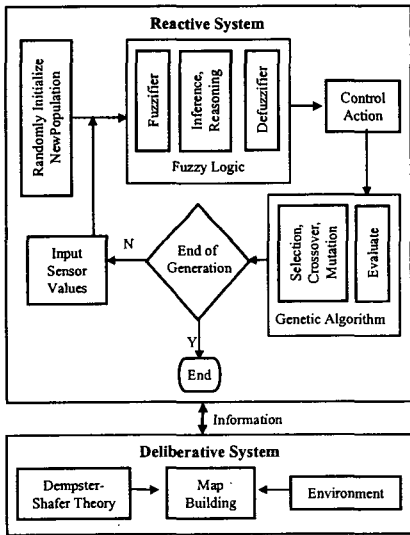


그림 1. 시스템 구조도

2. Fuzzy-GA 제어기

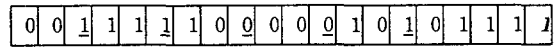
이 논문에서 사용한 Fuzzy-GA 알고리즘은 전체 퍼지규칙과 소속함수로 포함된 개체를 이진수로 표현하여 각 개체에 대해 유전 알고리즘을 적용하였다. 총 100개의 개체를 생성하였고, 각 개체는 404비트의 염색체 크기를 갖는다. 404비트 안에는 5개 입력과 2개 출력변수, 20개의 최대 규칙을 갖도록 설계하였다. 그림 2는 한 개체의 염색체 구조를 나타낸다.

규칙 부분은 하나의 규칙이 20비트로 구성되어 최

대 20개의 규칙이 동시에 존재할 수 있도록 총 400비트로 설계하였다. 각 규칙은 규칙 자체를 퍼지 제어기에 사용할 것인가 아닌가를 결정짓는 비트를 규칙 유전자형의 마지막에 두었고 역시 각 입력변수의 입력이 이 규칙에 사용될 것인가 아닌가를 각 규칙 안에 1개의 비트로 설계하였다. 즉 전체 입력변수 및 전체 규칙을 사용하지 않아도, 퍼지 제어기를 구성할 수 있는 것이다. 그림 3은 이 규칙 부분에 대한 구성을 보여준다.

5 Inputs	2 Outputs	20 Rules
----------	-----------	----------

그림 2. 염색체 구조



← Conditional Part → Consequent Part

- 1 (0) : 입력 변수 사용 여부(1:사용)
- 1 (0) : 전체 규칙 사용 여부(1:사용)

그림 3. 규칙 부분의 유전자 형

입출력 변수에 대한 퍼지 언어적 표현은 표 1과 같고 유전 알고리즘의 변수들은 표 2와 같다.

표 1. 입출력 변수에 대한 퍼지 언어적 표현과 의미

Input		Output	
VN	Very Near	NB	Negative Big
NR	Near	NM	Negative Medium
FR	Far	PM	Positive Medium
VF	Very Far	PB	Positive Big

표 2. 사용된 유전 알고리즘의 변수 값

개체수	100
세대수	500
염색체 크기	404 비트
교차율	0.9
돌연변이율	0.01
선택 기법	우수 개체 보존
교차 방식	1점 교차
돌연변이 방식	1비트 flipping

마지막으로 적합도 함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$f = \alpha(\text{Important locations}) + \beta(\text{Moving distances}) \\ - \gamma(\text{Fuzzy rules}) - \delta(\text{Fuzzy sets})$$

적합도 함수를 결정짓는 4개의 항 중에 중요 지점 통과 횟수와 가급적 멀리 움직인 요소의 계수를 양수로 하고, 이와는 반대로, 퍼지규칙과 퍼지집합 요소의 계수를 음수로 갖게 하였다. 여러번의 실험을 통한 각 계수의 값은 각각 30, 10, 7, 2로 하였다.

3. 지도 구축

Dempster-Shafer 이론을 이용하여 실제 이번 논문에서 응용한 부분은 다음과 같다. 이 실험에서는 전체 지도에 대한 지식을 로봇이 파악하기 위하여 실험 환경을 가로 940여개, 세로 680여개의 격자로 나누어 자료구조를 구축한 뒤, 로봇이 실험환경을 배회하면서 센서로부터 입력받은 정보를 이용하여 전체 지도 정보를 갱신하도록 하였다.

이 과정을 구체적으로 살펴보면 모든 격자에 대한 상태 정보는 장애물이 없을 경우(Empty)와 있는 경우(Full)로 나뉘게 되고 이것을 기호 θ 를 사용하여 유한 집합인 FOD(Frame Of Discernment)로 나타내면 $\theta = \{E, F\}$ 가 된다. 여기서 E와 F는 격자가 Empty 혹은 Full일 확률적 값을 나타낸다. 이것을 멱집합(Power Set) 형태로 나타내면 부분집합은 $\Lambda = 2^\theta = \{\emptyset, E, F, \{E, F\}\}$ 이 된다.

그리고 여기서 i, j 로 나타낼 수 있는 각 격자에 대해서 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$\sum_{A \in \Lambda} m_{i,j}(A) = m_{i,j}(\emptyset) + m_{i,j}(E) + m_{i,j}(F) \\ + m_{i,j}(\{E, F\}) = 1 \\ m_{i,j}(\emptyset) = 0$$

지도의 격자들은 $m_{i,j}(E) = 0, m_{i,j}(F) = 0, m_{i,j}(\{E, F\}) = 1$ 로 초기값이 설정되고, 이 정보로부터 이동로봇이 주변환경에 대한 센서값을 바탕으로 값을 변화시켜 지도정보를 갱신하는 것이다. Dempster-Shafer 이론을 도입하면 지도정보 갱신을 위하여 다음과 같은 두 개의 수식을 얻을 수 있다.

$$m_M \oplus m_S(E) = \\ \frac{m_M(E)m_S(E) + m_M(E)m_S(\{E, F\}) + m_M(\{E, F\})m_S(E)}{1 - m_M(E)m_S(F) - m_M(F)m_S(E)} \\ m_M \oplus m_S(F) =$$

$$\frac{m_M(F)m_S(F) + m_M(F)m_S(\{E, F\}) + m_M(\{E, F\})m_S(F)}{1 - m_M(E)m_S(F) - m_M(F)m_S(E)}$$

여기서 S는 센서로부터 얻은 정보를 확률적으로 나타내기 위한 첨자이고, M은 이전까지 알고있던 지도에 대한 각 격자의 확률적 정보를 의미한다. 수식에서 보듯이 이전의 지도 정보와 센서로부터 얻은 정보가 각각 Empty와 Full에 대한 확률적 값으로 계산되고 이 논문에서는 둘중의 큰 값이 각 격자의 현 상태 대표값으로 결정되는 방법을 사용하였다. 수식의 단순화를 위하여 격자의 위치를 나타내는 첨자 i, j 는 생략하였다.

4. 실험결과 및 분석

그림 4의 (a)는 진화를 거친 최고 적합도의 개체가 퍼지 규칙을 이용하여 주어진 실험 환경을 자유롭게 움직이는 모습을 보여주고, (b)는 같은 규칙을 적용한 전혀 다른 환경에서의 실험을 보여준다. 그림 5는 이 진화 과정을 각 세대별 최고 적합도와 각 세대별 평균 적합도의 도표로 보여준다.

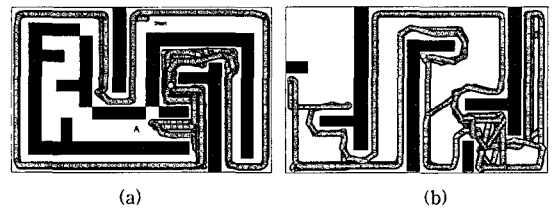


그림 4. (a) 최고 적합도를 가진 개체의 움직임, (b) 전혀 다른 환경에서의 움직임

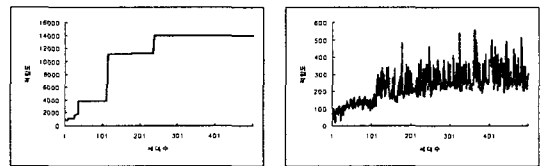


그림 5. 각 세대별 최고 적합도와 평균 적합도

그림에서와 같이 엘리트 보존 방식에 따라 최고 적합도는 계속 증가하고, 대략 250세대에서 최고 적합도를 보이는 개체가 마지막 500세대까지 계속 유지되고 있다. 110세대에서 최고 적합도 개체가 갑자기 출현하는 것과 마찬가지로 평균적합도도 대략 110세대에서 크게 증가함을 볼 수 있고 이후 증감을 받

복하고 있다. 아래는 이 개체의 탐색체를 해석한 후 사용된 규칙을 정리한 것이다. 최대 20개의 규칙을 가질 수 있지만 총 4개의 규칙만 사용되었다. 각 규칙에서도 5개 입력 변수의 입력값이 모두 사용되지는 않았음을 볼 수 있다.

R02 : IF ($d_2=FR$) THEN ($\Delta l\theta=NB$, $\Delta r\theta=NM$)

R04 : IF ($d_1=NR$) AND ($d_4=FR$) THEN
($\Delta l\theta=NB$, $\Delta r\theta=NM$)

R06 : IF ($d_4=VF$) THEN ($\Delta l\theta=PB$, $\Delta r\theta=NB$)

R08 : IF ($d_2=NR$) THEN ($\Delta l\theta=PB$, $\Delta r\theta=NB$)

그림 6은 위에서 얻은 결과를 가지고 그림 4의 (b)환경에서 실제 지도 구축을 하는 모습을 보여주고 있으며, (c)와 (d)는 Deliberative 시스템에서 구축한 지도정보와 센서 기반의 Reactive 시스템의 국부 정보를 활용하여 장애물과의 충돌없이 목적지를 찾아가는 상황을 보여준다.

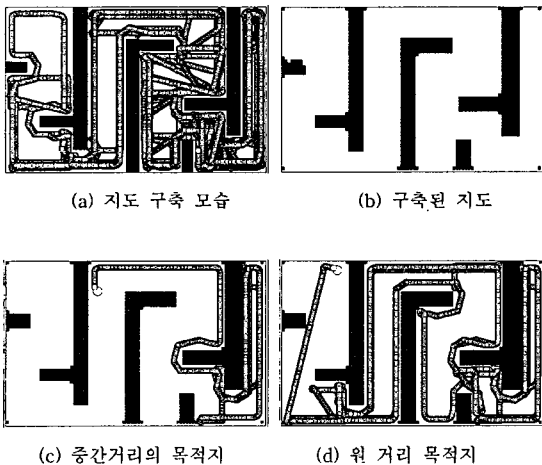


그림 6. 지도구축과 진화형 시스템을 이용한 목적지 찾기

5. 결론 및 향후연구

이 논문에서는 Fuzzy-GA를 이용해서, 이동 로봇의 퍼지 입출력 함수와 퍼지 규칙의 자동 생성 및 최적화를 연구하였고, 이를 통한 Reactive 시스템의 성능을 보다 향상시키기 위하여, Dempster-Shafer 이론을 이용한 전체 지도 정보를 구축함으로써 목적지를 찾아가는 Deliberative 시스템 구성에 관한 연구를 하였다. 5개의 센서와 좌우측 2개 바퀴는 4개의 퍼지 집합으로 구성되었으므로 최대 4⁷개의 퍼지

규칙이 필요하겠지만 유전 알고리즘의 이용으로 단 4개의 규칙으로 장애물 회피 및 주어진 공간을 자유롭게 이동함을 보였다. 또한 전체 지도 정보를 알고 있기 때문에 많은 시간이나 노력을 들이지 않고서, 목적지를 쉽게 찾아가는 능력을 발휘하였다. 두 시스템을 혼합한 방법으로 각각의 단점 보완은 물론, 상호 협조를 가져 올 수 있었다.

향후 연구로는 보다 복잡한 환경에서의 실험을 성공시킨 뒤 다양한 행동중 적절한 행동을 선택할 수 있는 행동 선택에 관한 연구와 목적지까지의 경로 계획을 통한 최단거리 선택에 대한 연구가 필요하다. 이로 인해 이동로봇은 장애물 회피 및 자유로운 이동이 보장되며, 목적지까지의 최단 거리 탐색으로 보다 지능적인 행동을 보여줄 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

- [1] T. Lozano-perez and M.A. Wesley, "An algorithm for planning collision free paths among the polyhedral obstacles," *Comm. of the ACM*, vol. 22, no. 10, 560-570, Oct. 1979.
- [2] R.A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
- [3] N.E. Nawa, T. Furuhashi, T. Hashiyama and Y. Uchikawa, "A study on the discovery of relevant fuzzy rules using pseudobacterial genetic algorithm," *IEEE Trans. on Industrial Elec.*, vol. 46, no. 6, pp. 1080-1089, Dec. 1999.
- [4] K. Tand, K. Man, Z. Liu and S. Kwong, "Minimal fuzzy memberships and rules using hierarchical genetic algorithms," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 1, pp. 162-169, Feb. 1998.
- [5] K.C.C. Chan, V. Lee and H. Leung, "Generating fuzzy rules for target tracking using a steady-state genetic algorithm," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 189-200, Sep. 1997.
- [6] H. Ishibuchi, K. Nozaki, N. Yamamoto and H. Tanaka, "Selecting fuzzy If-Then rules for classification problems using genetic algorithms," *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 260-270, Aug. 1995.