

Dempster-Shafer 이론을 이용한 퍼지 자율이동로봇의 지도 자동구축

김영철^o 조성배 오상록[†]
연세대학교 컴퓨터과학과

^{*}한국과학기술원 생체모방제어시스템연구소
(yckim, sbcho)@candy.yonsei.ac.kr, [†]sroh@amadeus.kist.re.kr

Automatic Map Building for Fuzzy Autonomous Mobile Robot Using Dempster-Shafer Theory

Young-Chul Kim^o Sung-Bae Cho Sang-Rok Oh[†]
Dept. of Computer Science, Yonsei University
[†]Bio-mimetic Control System Lab., KIST

요 약

이 논문에서는 이동 로봇을 위하여 퍼지 이론과 Dempster-Shafer 이론을 이용한 불확실한 환경에서의 센서기반 네비게이션 방법을 제안한다. 제안된 제어기는 장애물 회피 동작과 목적지 찾기 동작을 위한 2개의 행동 모듈로 구성되어 있다. 특히, 실험 환경내에서 안전하게 움직이기 위해서 로봇이 목적지를 찾기 전에 자동으로 지도를 구축(map building) 하도록 하였다. 이 실험에서 구성된 지도는 평면상의 격자를 중심으로 작성되었다. 로봇의 센서에서 읽어들이는 센서 값은 Dempster-Shafer 이론을 이용하여 기존의 지도와 혼합된다. 즉, 로봇이 움직일때마다 실험 환경내에서 새로운 정보를 읽어 들이고, 그 정보로 인하여 기존의 지도가 새로운 지도로 갱신되는 것이다. 이러한 작업을 거치면서 로봇은 장애물과 충돌없이 네비게이션하는 것 뿐 아니라 정해진 목적지까지도 쉽게 찾아갈 수 있다.

1. 서론

지도 구축에 관한 연구로 크게 점유 기반(Occupancy based) 지도 구축[1]과 표식 인지 및 추적(Beacon recognition & tracking)[2] 방법을 들 수 있다. 두 가지 방법은 상호 배타적 관계였지만 사실상 서로의 단점을 보완하기도 한다.

로봇의 경로 탐색 기법은 자율 이동 로봇의 네비게이션 구현에서 가장 중요한 분야로 다음과 같이 두 부분으로 나뉘어 질 수 있다. 하나는 전역 경로 계획(Global path planning)으로 전반적인 환경에 대한 정보를 가지고 있는 것이고, 다른 하나는 국소 경로 계획(Local path planning)으로 센서값에 의존하여 바로 앞에 있는 장애물의 크기나 위치등을 구별하여 불확실한 주변환경에서 보다 안전하게 경로를 탐색하게 해주는 것이다. 전역 경로 계획으로는 특징적인 공간 탐색 기법[3]과, 포텐셜 필드 기법, 일반화한 보로노이 다이어그램, 그리고 그래프 탐색기법 등이 있다.

국소 경로 계획은 초음파 센서나 영상, 레이저 센서들로부터 입력되는 값을 이용하는 방법으로 Brooks[4]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 파

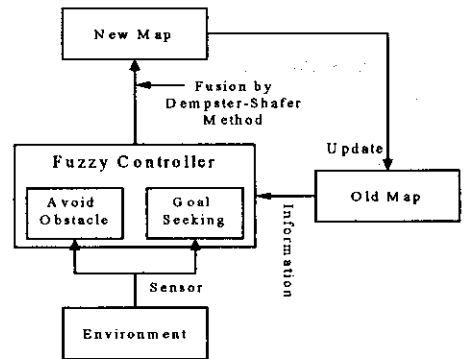


그림 1. 전체 시스템 개략도

른 속도로 움직이는 로봇의 연구를 하기도 하였다.

이 논문에서는 Dempster-Shafer 이론을 이용한 지도 구축에 관한 문제와 이로 인한 장애물과의 충돌없이 목적지를 찾아가는 연구를 수행하였다. 우선 견고하고 안정성있는 퍼지 제어기를 개발하기 위하여 퍼지 제어기를 장애물 피하기와 목적지 찾기의 두 가지 행동으로 구분하여 수행하도록 하였다. 이렇게 제안된 방법은 국소 최적해(Local minima)가 발생하는 주변 환경 내에서

도 훌륭하게 로봇을 움직이게 하였다. 그림 1은 이 논문에서 제안된 시스템의 전체 개략도를 보여준다.

2. 퍼지 제어를 이용한 이동 로봇

기본적으로, 퍼지 모델을 구성하는 설계과정은 다음과 같은 경로를 따른다.

- (A) 입출력 변수의 퍼지화
- (B) 룰 베이스 구축
- (C) 추론 과정
- (D) 출력 변수의 디퍼지화 과정

(A)와 (C)의 작업은 퍼지 시스템의 구조를 정의하는 데 관련된 작업이고, 작업 (D)는 시스템의 변수들을 조정하는데 필요한 부분이다. 비록 전문가의 경험적 지식이나 모델을 표현하는데 필요한 언어적 설명이 존재하는 경우라도, 시스템의 부정확성과 불일치요소를 제거하기 위하여 많은 시행착오를 거치는 조정단계가 필요하다.

이번 연구의 목적은 불확실한 공간에서 시뮬레이션된 이동로봇이 장애물과의 충돌없이 해당 목적지를 찾아가는 것이다. 입력 변수는 각 센서와 장애물과의 거리 d_i ($i=1,2,\dots,5$), 로봇에 대해 장애물이 놓인 방향 φ , 그리고 로봇과 목적지까지의 각도 θ 로 이루어져 있으며, 출력 변수는 로봇이 다음 단계에서 움직여야할 방향(각도) θ 이다.

입력 변수 d_i, φ, θ 에 대한 언어적 퍼지 집합은 각각 (VN, NR, FR), (NB, NS, ZZ, PS, PB), (NB, NS, ZZ, PS, PB) 이다. 출력 변수 θ 에 대한 언어적 퍼지 집합은 (NB, NM, NS, ZZ, PS, PM, PB) 이다. 이에 대한 의미는 다음과 같다.

- VN : very nearest
- FR : far
- NM : negative medium
- ZZ : zero
- PM : positive medium
- NR : near
- NB : negative big
- NS : negative small
- PS : positive small
- PB : positive big

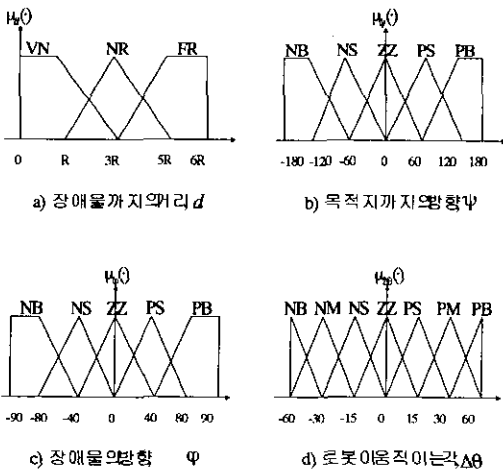


그림 2. 퍼지 입출력 변수들의 멤버십 함수

NB	NB	NB	NB	NB
NB	NB	NM	NM	NM
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	ZZ
PM	PM	PM	ZZ	PS
PB	PB	PB	PB	PB

그림 3. 규칙 베이스. X 축은 로봇과 장애물 사이의 거리, Y 축은 로봇이 다음 단계에서 움직여 나갈 방향

멤버십 함수의 출력값은 0에서 1까지로 이는 멤버십 함수의 확률적 기대 값을 의미하는 것이 아니라 해당 퍼지 집합에 속할 정도를 나타낸다. 각 입출력 변수에 대한 퍼지 멤버십 함수의 모양은 그림 2와 같고, 이 논문에서 사용된 규칙 베이스(Rule base)는 그림 3과 같다.

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 그렇지 않은 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 cell이 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 알 수가 있다.

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

$$m_{ij}(\emptyset) = 0$$

지도의 격자들은 $m_{ij}(E) = m_{ij}(F) = 0, m_{ij}(\{E, F\}) = 1$ 로 초기값이 설정되고, 이 정보로부터 이동로봇이 주변 환경에 대한 센서값을 바탕으로 값을 변화 시켜 지도 정보를 갱신하는 것이다. Dempster-Shafer 이론을 도입하면 지도 정보 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 Empty

와 Full에 대한 확률적 값으로 계산되고 이 논문에서는 둘중의 큰 값이 각 격자의 현 상태 대표값으로 결정짓는 방법을 도입하였다. 수식의 단순화를 위하여 격자의 위치를 나타내는 첨자 i, j 는 생략하였다.

4. 실험 결과

그림 4는 초기 이동로봇의 시작위치와 장애물이 놓인 상태를 보여준다. 이중에는 이동 로봇의 크기보다 작은 장애물도 볼 수 있다. 그림 5는 이동 로봇이 주변 환경에 대한 정보가 없기 때문에 실제 목적지를 찾기 위하여 많이 움직이는 모습을 보여준다. 보다시피 많은 시간과 노력을 들이고 나서 간신히 도착하여야 할 장소를 발견할 수가 있었다. 그림 6은 이동로봇이 장애물과 충돌없이 배회하면서 센서로부터 입력값을 받아들이면서 기존의 지도 정보를 동시에 갱신하고 있다. 여기서 작은 물체의 장애물도 잘 피해나가는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 최종 인식된 지도로 초기의 장애물 위치 및 크기와 거의 비슷한 내용을 보여준다. 장애물중 비교적 크기가 큰 것은 중간이 하얀색으로 되어있는데, 이는 로봇의 센서 반경을 벗어나 로봇이 미처 인식하지 못한 영역으로 실제 로봇의 네비게이션 동작시에는 아무런 문제가 되지 않는다. 그림 8의 (a), (b)는 최종적으로 얻어진 지도 정보를 가지고 이동로봇이 가까운 곳에 위치한 목적지 뿐만 아니라 비교적 멀리 떨어진 곳까지 장애물과 충돌없이 이동하는 것을 보여준다. 그림에서 장애물의 외곽선과 이동로봇의 이동 경로가 다소 충돌한 것처럼 보이는데, 위에서 언급하였듯이 로봇이 인식한 지도에서의 장애물 크기가 실제 환경에서의 장애물 크기보다 커져 있어, 실제 환경에서는 충돌없이 이동하게 된다.

5. 결론 및 향후 연구

이 논문에서는 Dempster-Shafer 이론을 이용한 전체 지도 인식과 퍼지 이론을 이용한 장애물 회피 및 목적지 찾아가기에 관한 연구를 하였다. 전체맵 인식을 위하여 실험 환경내에서 자유롭게 움직일수 있게 퍼지 규칙을 이용한 배회 행동을 먼저 구현한 뒤 이로부터 센서값을 이용하여 주변환경을 인식하는 실험을 하였는데 제안된 시스템은 두 가지의 행동, 즉 장애물 회피와 목적지 찾기로 구성되어있다.

퍼지 규칙을 두 개로 분류해 하나는 장애물 피해가기를 위하여 학습 되었고, 나머지는 목적지를 찾아가는 작업을 위하여 학습시켰다. 초기의 퍼지 규칙에 의해 움직인 로봇은 장애물과 충돌하기 일쑤였고, 목적지와는 정반대로 움직이기도 하였다. 그러나 실험을 통하여 불필



그림 4. 이동로봇의 시작 위치와 초기 장애물

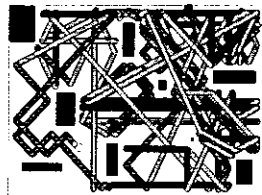


그림 5. 맵에 대한 정보가 없는 로봇의 목적지 찾기

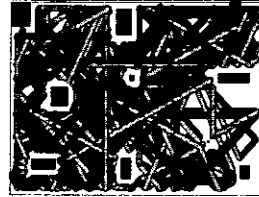


그림 6. 장애물 회피 및 새로운 맵 정보 갱신

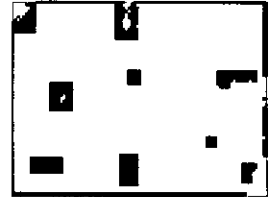
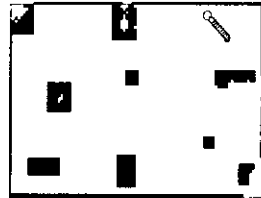
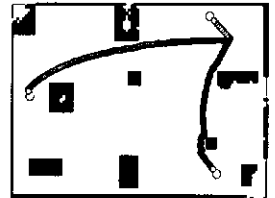


그림 7. 이동로봇이 최종 인식한 전체 실험 환경



(a) 가까운 목적지 찾기



(b) 중간거리 목적지 찾아가기

그림 8. 다양한 거리의 목적지 찾아가기

요한 규칙의 제거와 반영되지 않은 새로운 규칙의 추가 및 중복되는 규칙의 단일화 과정을 통하여 로봇은 점점 의도대로 움직이기 시작하였다.

향후 연구로는 실험자의 경험이나 지식같은 인간의 기준에 의해 설정되는 퍼지 규칙 대신 로봇 스스로 규칙을 생성하는 방법이 필요하다. 즉 진화하는 퍼지 규칙 생성 시스템을 연구해 사람이 모든 지식을 완벽하게 입력하지 않더라도 로봇 스스로 학습하고 진화하여 의도한대로 학습되는 로봇을 만들고자 한다.

참고문헌

- [1] A. Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation," *IEEE Trans. Robot. & Auto.*, vol. RA3, pp. 249-265, 1987.
- [2] B. Barshan and R. Kuc, "Differentiating sonar reactions from corners and planes by employing an intelligent sensor," *IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intell.*, vol. 12, pp. 560-569, 1990.
- [3] 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.
- [4] R.A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *IEEE Trans. Robot. & Auto.*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
- [5] G. Oriolo and M. Vendittelli, "Real-time map building and navigation for autonomous robots in unknown environments," *IEEE Trans. Systems, Man and Cyber., Part B*, vol. 28, no. 3, pp. 316-333, 1998.
- [6] J.A. Castellanos, J.M.M. Montiel, J. Neira and J.D. Tardos, "The SPMAP : a probabilistic framework for simultaneous localization and map building," *IEEE Trans. Robot. & Auto.*, vol. 15, no. 5, pp. 948-952, 1999.