

이동로봇의 자율주행을 위한 행동기반의 퍼지 제어

최현철, 홍석교
아주대학교 전자공학부

Behavior-Based Fuzzy Control of Mobile Robots for Autonomous Navigation

Hyoun-Chul Choi and Suk-Kyo Hong
School of Electronics Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea

Abstract - In this paper, a behavior-based fuzzy control of mobile robots for autonomous navigation is presented. Behaviors of mobile robots are divided into two categories: reactive behavior and purposeful behavior, which are incompatible with each other. The former is reaction performed in terms of the sensory data and the latter is action for achieving the goal. The presented method generates appropriate control inputs to the robot to trade-off between the reactive and purposeful behaviors using fuzzy inferences. The method is applied to an synchro-drive type mobile robot and shown to be useful for autonomous robot navigation by providing simulation results.

1. 서 론

이동로봇은 이동성이 부여되어 고정된 위치에서의 작업을 탈피하고 임의의 위치에서 주어진 작업을 할할 수 있도록 고안된 로봇으로 다양한 응용 및 실용성으로 인해 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-5]. 이러한 이동로봇에 대한 연구는 주로 자율적인 주행에 대한 것으로서 주위 환경 인식 및 이에 대한 반응행동에 대한 연구를 포함하고 있다. 이동로봇의 주행 문제에서는 센서처리와 주행전략을 서로 떼어놓을 수 없는 불가분의 관계로 볼 수 있다. 특히 센서처리에 대한 문제는 현존하는 센서 종류의 다양성으로 인해 한가지의 해답으로 해결될 수 있는 문제가 아니며 이러한 센서처리에 대한 연구는 그 자체로 하나의 독립적인 연구분야를 이루고 있다 [1].

센서처리를 통해 센서로부터 얻은 정보를 의미 있는 정보로 변환하고 로봇의 판단에 영향을 주기 위하여 일반적으로 센서융합을 사용한다. 센서융합을 이용한 이동로봇에 대한 연구는 센서를 이용하여 주위환경에 대한 모델을 만들고 그 모델에 기반 하여 로봇의 주행 및 주어진 작업을 수행하기 위한 동작을 계획하는 방법에 대하여 주로 이루어지고 있다 [2,3]. 그러나 센서융합에 의한 방법은 복잡한 수학적 모델링과 많은 계산량으로 인해 고사양의 시스템을 요구하게 된다.

행동 기반의 자율주행 기법은 비교적 저사양의 시스템으로도 원하는 동작을 얻을 수 있는 기법으로, 간단하기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다 [4,5]. 이러한 기법이 적용되는 행동기반의 로봇이란, 곤충들이 감각에 반응하여 단순한 행동양식을 취한다는 것에 착안하여 고안된 로봇으로 벽면이나 라인 따르기, 광원 따르기, 장애물 회피 및 목표물에 도달하기 등의 단순 동작을 수행하는 로봇을 의미하며, 알고리즘이 간단하고 저사양의 시스템으로 구현이 가능하기 때문에 저가의 교육용 로봇으로 개발되어 많이 이용되고 있다 [5].

본 논문에서는 퍼지논리를 이용하여 이동로봇의 행동에 기반한 자율주행 문제에 대하여 다룬다. 로봇의 센서 정보에 따라 로봇의 충돌에 대한 안전도를 정의하고, 안전도의 정도에 따라 반응적 행동이나 목적 행동을 선택하도록 한다. 각각의 행동을 퍼지규칙화하고, 로봇이 장애물 혹은 벽을 만났을 경우 이를 적절히 회피하거나 따르도록 하며 장애물이 없을 경우 목적지로 향하여 진행하도록 하는 전역적 경로계획 기법을 제안한다. 제안된 기법을 synchro-drive형 이동로봇에 적용하여 모의실험을 행하고 이를 통해 유용성을 확인하고자 한다.

2. 이동로봇의 기구학 모델

본 논문에서 사용된 이동로봇은 전진방향의 속도 및 조향 속도를 제어입력으로 하는 로봇으로서, 두 입력이 서로 영향을 미치지 않고 독립적으로 제어가 가능하다는 가정을 하였다. 이러한 형태의 이동로봇으로 synchro-drive형 이동로봇이 있는데, 이 synchro-drive 기구는 3개 이상의 바퀴가 장착되어 이들이 같은 속도로 동시에 조향(yaw) 및 진행을 하도록 고안된 구동 기구로서 로봇이 진행하는 방향으로의 회전이 모든 바퀴가 동시에 이루어지고 바퀴에 가해지는 힘이 서로 평행하게 작용되므로 바퀴의 미끄러짐을 줄일 수 있고, 추측항법(dead reckoning)의 성능을 개선시킬 수 있어 실내용 이동로봇에 많이 이용되고 있다 [1]. 그림 1에서 로봇의 진행 방향 속도 v 와 로봇의 조향 속도 w 를 제어 입력으로 하면 시간에 대한 운동 궤적 식은 식 (1)-(3)과 같다.

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(t) \cos \theta(t) dt \quad (1)$$

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t v(t) \sin \theta(t) dt \quad (2)$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t w(t) dt \quad (3)$$

3. 행동기반 퍼지논리를 적용한 경로 계획

3.1 반응적 행동을 통한 경로 계획

본 연구에서 다루는 반응적 행동이란 로봇의 주행 중 접하는 여러 상황 중 장애물 혹은 벽 등에 대하여 로봇이 반응하여 행동하는 것으로 장애물 회피와 벽면 따르기를 의미한다. 본 절에서는 로봇의 반응적 행동을 결정하는 방법에 대하여 다룬다.

3.1.1 센서 정보에 의한 반응적 행동

센서로부터 얻은 로봇과 장애물 사이의 거리에 따라 로봇의 반응적 행동을 결정하게 되는데, 기본적으로 거리가 가까울수록 로봇이 피하는 방향으로 운동하고, 거리가 멀면 직진주행 하도록 한다. 본 논문에서 사용하는 이동로봇은 3개의 센서를 장착하였는데, 각 센서는 전방향(s_f) 및 양 측방으로 30° 전방을 향하여 배치(s_m_l, s_m_r)되어 있다 (그림 2 참조).

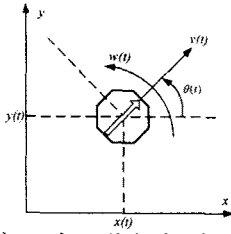


그림 1. 이동로봇의 기하학 모델

Figure 1. Kinematic model of the mobile robot

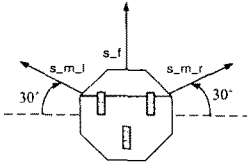


그림 2. 로봇의 센서 배치

Figure 2. Arrangement of robot sensors

그림 3에 로봇이 주행 중 접할 수 있는 주변 환경의 경우를 나타내었다. 그림 3(a), (b)에는 장애물이 로봇의 전방 및 측방에 있는 경우를 나타내었는데, 이 때 로봇은 급하게 조향하게 하여 장애물을 피하게 한다. 또한 그림 3(c), (d)에는 한쪽 측방에만 장애물이 있는 경우를 나타내었는데, 이 때는 적절한 보통의 속도로 조향하도록 한다. 물론, 양 측방에 장애물이 있는 경우(그림에는 나타내지 않았지만)에는 (c)와 (d)의 조합의 경우로 보고 가까이 있는 장애물을 피하는 방향으로 조향하도록 한다. 그러나, 그림 3(e), (f)의 경우는 앞의 경우들과는 행동방식이 달라야 한다. 이 경우에는 양방향으로 조향이 가능하기 때문에 다양한 행동방식이 나올 수 있다. 이러한 경우, 본 연구에서는 정의된 퍼지규칙에 의한 반응적 행동을 하지 않고 일방적으로 로봇이 정지하여 한 방향으로 90° 조향하는 행동을 하게 하였다. 90° 조향이 완료되면 제어권을 다시 퍼지제어기로 넘겨주어 퍼지규칙에 의한 반응적 행동을 하게 하였다.

3.1.2 반응적 행동에 대한 퍼지규칙

반응적 행동에 대한 퍼지규칙은 센서로부터 얻은 장애물과의 거리정보를 기반으로 정의한다. 센서 입력에 대하여 Far (FR), Moderate (MD), Close (CL)의 3가지로 퍼지집합을 정의하고 이들에 대한 소속함수를 그림 4(a)와 같이 정의한다. 또한 로봇 구동 입력으로는 전진방향의 속도 v 와 조향 속도 w 가 있는데, v 는 반응적 행동이 진행되는 동안에는 일정한 속도로 로봇이 천천히 진행하도록 설정되며, w 에 대하여는 조향 속도 크기에 따라 다음과 같이 Turn-Sharp-Left(TSL), Turn-Moderate-Left(TML), Go-Straight(GS), Turn-Moderate-Right(TMR), Turn-Sharp-Right(TSR)의 5가지 퍼지집합으로 정의하고 이에 대한 소속함수를 그림 4(c)와 같이 정의하여 센서정보에 따라 로봇이 적절한 운동을 하도록 한다. 최종 추론 결과는 무게중심법(centroid)을 이용하여 비퍼지화(defuzzification)한다.

3.1.1절에서 언급하였듯이 로봇의 3개 센서는 각각 전방, 양 측방을 감지하도록 장착되었다고 가정하였다. 이들 센서에 대한 정보는 '전방-좌측', '전방-우측', '좌측-우측'이 쌍을 이루어 각각의 거리에 따른 조향 속도 w 를 퍼지추론에 의하여 결정하도록 한다. 그림 4에 반응적 행동에 사용된 퍼지규칙에 대한 소속함수를 나타내었고 표 1에는 반응적 행동에 대한 각 센서입력과 조향 속도간의 퍼지규칙을 정의하였다.

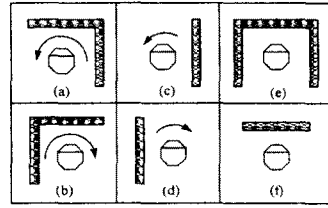


그림 3. 감지된 환경의 다양한 경우

Figure 3. Various cases of sensed environments

3.2 목적 행동을 통한 경로 계획

본 연구에서 다루는 목적 행동이란 미리 주어진 목표점에 도착하기 위한 일련의 행동을 의미한다. 로봇의 주행 중 장애물이나 벽이 비교적 멀리 있거나 로봇의 판단으로 충돌 위험이 없다는 결론이 맺어지면 목표점을 향하여 진행하게 하는 것이 이 목적 행동의 주된 내용이다. 본 절에서는 이러한 로봇의 목적 행동을 결정하는 방법에 대하여 다룬다.

3.2.1 목표점 지향에 의한 경로 계획

그림 5에는 주어진 목표점과 로봇의 기하학적 관계로 목표점 지향에 의한 경로 계획의 개념을 나타내었다. 로봇이 장애물로부터 자유롭게나 목표점으로 직행할 수 있다고 판단하면 목적 행동을 하게 된다. 이 때는 목표점에 대한 로봇의 지향각 오차를 보상하는 방향으로 로봇의 조향 속도가 결정된다. 이 때의 지향각 오차 h_{err} 및 절대좌표상 목표점의 방향각 α 는 다음 식(4), (5)와 같이 정하여 진다.

$$h_{err} = \theta - \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \text{Atan2}(y_g - y, x_g - x) \quad (5)$$

표 1. 센서정보에 따른 행동 규칙: 조향속도 w
Table 1. Rule-base of behaviors in terms of sensory data: turning rate w

s _f \ s _{m,l}	s _{m,r}			s _f \ s _{m,r}	s _{m,l}						
	CL	MD	FR		CL	MD	FR				
CL	TSR	TMR	GS	CL	TSL	TML	GS	CL	GS	TMR	TSR
MD	TSR	GS	GS	MD	TSL	GS	GS	MD	TML	GS	TMR
FR	TSR	GS	GS	FR	TSL	GS	GS	FR	TSL	TML	GS

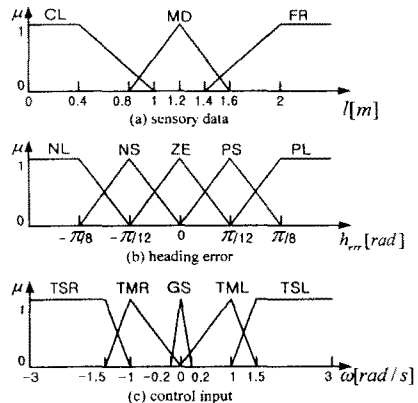


그림 4. 정의된 퍼지집합의 소속함수

Figure 4. Membership functions of the defined fuzzy sets

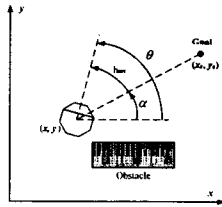


그림 5. 목표점과 로봇의 기하학적 관계
Figure 5. Geometry between the robot and goal

3.2.2 목적 행동에 대한 퍼지규칙

목적 행동에 대한 퍼지규칙은 지향각 오차에 대하여 퍼지집합을 다음과 같이 Negative-Large(NL), Negative-Small(NS), Zero(ZE), Positive-Small(PS), Positive-Large(PL)로 각각 정의한 후 오차를 보상하는 방향으로 결정한다. 지향각 오차에 대한 소속함수는 그림 4(b)와 같이 정의하였고 목적 행동에 대한 퍼지규칙은 표 2와 같이 정의하였다.

표 2. 지향각 오차에 따른 행동 규칙: 조향속도 w
Table 1. Rule-base of behaviors in terms of orientation error to the goal: turning rate w

h_{err}	NL	NS	ZE	PS	PL
w	TSL	TML	GS	TMR	TSR

3.3 안전도에 따른 상태 전환

3.1, 3.2절에서 다룬 행동은 서로가 상충하는 관계로서 두 가지 행동을 동시에 행하는 것은 적절하지 못하다. 따라서 서로 배타적으로 수행하여야 하는데, 이를 위하여 안전도를 정의하고 이에 따라 이 상태들을 서로 전환하도록 하였다. 만약 반응적 행동규칙으로부터 로봇의 조향 속도가 일정값 이상 되면 장애물의 영향을 받는 것이므로 안전하지 못하다고 판단하여 반응적 행동 상태로 전환하게 하고, 만약 반응적 행동규칙에 의하여 결정된 조향 속도가 거의 0에 가까우면, 즉 직진주행하게 되면, 이는 장애물로부터 자유롭거나 목표점에 직행할 수 있는 조건이 되므로 목적 행동 상태로 전환하게 한다.

3.4 국부 최소 문제

이동로봇이 기본적인 행동 기반의 자율주행을 행할 경우 일반적으로 목표점은 인력을 작용하고 장애물은 척력을 작용한다. 이 때 그림 6과 같이 목표점과 로봇 사이에 장애물이 가로 막혀 있는 경우는 특별히 대책을 강구하지 않는 한 국부 최소 문제에 봉착하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대처하기 위하여 이러한 경우 정의된 퍼지규칙에 의한 반응적 행동을 하지 않고 일방적으로 로봇이 정지하여 한 방향으로 90° 조향하는 행동을 하게 하고, 90° 조향이 완료되면 제어권을 다시 퍼지제어기로 넘겨주어 국부 최소를 회복하도록 하였다.

4. 모의실험 결과

제안된 기법의 유용성을 알아보기 위하여 모의실험을

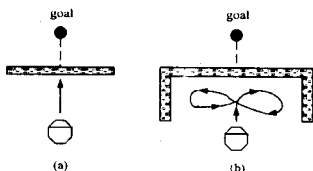


그림 6. 국부 최소에 봉착하는 경우
Figure 6. Problems of getting trapped and wandering

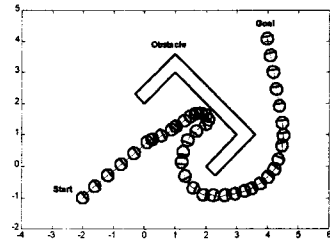


그림 7. 국부 최소를 회복하면서 목표점까지 도착
Figure 7. Reaching the goal while recovering a local minimum

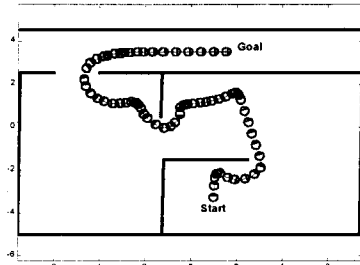


그림 8. 복도 환경에서의 자율주행
Figure 8. Autonomous navigation in corridor environment

행하였다. 우선은 국부 최소 회복 가능성(그림 7)에 대하여 알아보았고 다음으로 복도 환경에서의 자율주행에 의한 목표점 도착 가능성(그림 8)에 대하여 알아보았다. 모의실험 결과 제안된 기법을 통하여 국부 최소를 회복할 수 있으며 복도와 같은 환경에서 목표점까지 도착할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 이동로봇의 자율주행을 위하여 행동기반의 퍼지제어 기법에 대하여 다루었다. 이를 위하여 로봇의 센서 정보에 따라 로봇의 충돌에 대한 안전도를 정의하고, 안전도의 정도에 따라 퍼지논리화된 반응적 행동이나 목적 행동을 선택하도록 하여 로봇이 장애물 혹은 벽을 만났을 경우 이를 적절히 회피하거나 마르도록 하고 장애물이 없을 경우 목적지로 향하여 진행하도록 하는 전역적 경로계획 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 이동로봇에 적용한 모의실험을 통해 이의 유용성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. R. Everett, *Sensors for Mobile Robots: Theory and Application*, A K Peters, Ltd., 1995
- [2] A. Elfes, "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation," *IEEE J. of Robot. and Automat.*, Vol. RA-3, No. 3, pp.249-265, 1987
- [3] D. Laurent M. El Mustapha, P. Claude, and V. Pascal, "A Mobile Robot Localization Based on a Multisensor Cooperation Approach," *Proc. of the 1996 IEEE IECON*, Vol. 1, pp.155-160, 1996
- [4] W. L. Xu, S. K. Tso, and Y. H. Fung, "Sensor-based Reactive Navigation of a Mobile Robot through Local Target Switching," *Proc. of the IEEE ICAR '97*, pp.361-366, 1997
- [5] B. Yilma, M. A. Sief, "Behavior-based Artificial Intelligence in Miniature Mobile Robot," *Mechatronics*, Elsevier Science Ltd., Vol. 9, pp.185-206, 1999