

# 주행 유도 방향과 퍼지 제어를 이용한 이동 로봇의 자율 주행

## Autonomous Navigation for a Mobile Robot Using Navigation Guidance Direction and Fuzzy Control

박 지 관\* · 신 진 호\*  
(Ji-Gwan Park · Jin-Ho Shin)

**Abstract** - This paper proposes a generation method of a navigation guidance direction and a fuzzy controller to achieve the autonomous navigation of a mobile robot using a particle swarm optimization(PSO) scheme in unknown environments. The proposed navigation guidance direction is the direction that leads a mobile robot to arrive a target point simultaneously with avoiding obstacles efficiently according to the surrounding local informations. It is generated by selecting the most suitable direction of the many directions in the surrounding environment using a particle swarm optimization scheme. Also, a robot can reach a target point with avoiding the various obstacles by controlling the robot so that it can move from its current orientation to the navigation guidance direction using the proposed fuzzy controller. Simulation results are presented to show the feasibility and validity of the proposed robot navigation scheme.

**Key Words** : Mobile robot, Autonomous navigation, Navigation guidance direction, Fuzzy control, PSO

### 1. 서 론

로봇이 실생활에 미치는 영향이 점차 커짐에 따라 로봇 능력과 자율 주행은 로봇 응용 분야에 있어서 기본적인 필수적인 연구 대상이 되고 있다[1-2]. 자율 주행이 가능한 이동 로봇은 주행 중 스스로 변화하는 환경에서 장애물과의 충돌을 회피하고 안전하게 주어진 목표에 도달할 수 있어야 한다. 이로 인해 로봇이 미리 환경 정보를 가지지 않은 미지의 환경에서 장애물에 충돌하지 않고 안전하게 목표 지점에 도달하기 위한 많은 방법들이 제시되고 있다[3-4]. 대표적으로는 벡터장 방법(Vector Field Method), 퍼지 논리(Fuzzy Logic), 신경망(Neural Network) 등이 있다. 벡터장 방법은 이동 로봇의 연속적인 움직임을 나타내지만 다양한 환경에 적용하는데 한계가 있다[5]. 퍼지 논리는 확실성과 정확성의 정도를 수치화할 수 있다는 장점이 있지만, 입력 변수의 증가에 따라 연산량이 크게 증가하는 단점이 있다[6]. 신경망은 수학적으로 해결 불가능한 문제를 분석하는데 유용하고 경로 예측이나 분류 등에 있어 효과적인 방법이다[7]. 또한 자율 주행 로봇의 경로 계획이나 제어 응용에서 유전 알고리즘(Genetic Algorithm), ACO(Ant Colony Optimization) 및 PSO(Particle Swarm Optimization) 등의 다양한 진화 최적화(Evolutionary Optimization)를 이용하거나, 진화 최적화 방법을 퍼지 기법 및 신경망과의 혼용 방법들도 제시되고 있다[8-17].

본 논문에서는 미지의 환경에서 PSO 기법을 이용한 주행 유도 방향 생성과 퍼지 제어를 이용한 로봇 자율 주행 방법을 제안하였다. 주행 유도 방향은 PSO 기법을 사용해 로봇의 회전각과 목표 지점에서의 방향을 고려한 적합한 이동 방향을 선택하는 방법으로 지역 극소 현상이 발생하기 쉬운 장애물과 이동 장애물이 존재하는 환경에서도 안정적으로 충돌을 회피하며 주행이 가능하도록 한다. 주행 유도 방향이 생성되면 퍼지 제어를 이용해 주행 유도 방향으로 이동하도록 로봇을 제어하며 최종적으로 목표 지점에 도달하게 된다.

미지의 환경에서 제안된 자율 주행 방법의 타당성을 검증하며 효능을 보이기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 2장에서는 본 논문에서 제안한 PSO 기법을 이용한 주행 유도 방향 생성과 퍼지 제어를 이용한 제어를 포함한 자율 주행 시스템의 전체 구조에 대해 설명한다. 3장에서는 제안된 방법의 타당성을 보이기 위해 미지의 환경에서 자율 주행 시 문제점이 발생 할 우려가 있는 몇 가지 환경과 응용 가능성을 보일 수 있는 환경을 제작해 시뮬레이션 결과를 보이며 4장에서 결론을 맺는다.

### 2. 이동 로봇의 자율 주행 시스템

#### 2.1 주행 유도 방향의 생성

주행 유도 방향은 센서를 통한 주변 지역 환경 정보만을 이용한 자율 주행으로 다양한 미지의 환경에서 적용이 가능하며, 지역 극소 현상을 극복하는데 목적이 있다.

주행 유도 방향 생성은 로봇 전체 방향(-180(deg)~180(deg))에서 이동 가능한 영역을 찾는 주변 환경 분석 단

\* Corresponding Author : Dept. of Mechatronics Engineering,  
Dong-eui University, Korea  
E-mail : jhshin7@deu.ac.kr

\* Korea Institute of Science and Technology(KIST), Korea  
Received : October 20, 2013; Accepted : December 3, 2013

계와 PSO 기법을 이용하여 가장 적합한 하나의 방향을 찾는 주행 유도 방향의 생성 단계로 이루어진다.

### 2.1.1 주변 환경 분석 단계

본 논문에서는 초음파 센서를 로봇의 전 방향으로 30(deg) 간격으로 총 12개 배치하여 센서의 빔 폭의 중첩을 통해 장애물을 검출한다. 그림 1과 같이 센서 히스토그램(Sensor Histogram)을 생성해 로봇이 장애물을 통과할 수 있는 구역과 범위를 계산하였다. 초음파 센서의 빔 폭의 중첩을 이용해 환경 정보를 얻게 되면, 로봇의 정면 방향인 0(deg)을 기준으로 하여 15(deg) 간격으로 로봇 전체 방향에 대한 환경 정보를 담은 히스토그램을 얻을 수 있다.

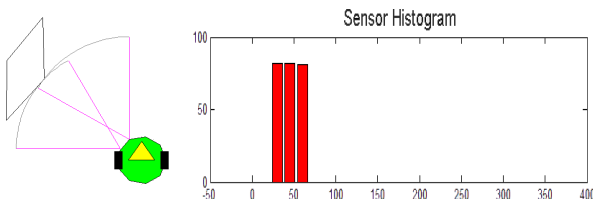


그림 1 센서의 빔 폭의 중첩을 통한 장애물 검출  
Fig. 1 Obstacle detection through the superposition of the beam width of the sensor

환경 분석 단계에서는 로봇 전 방향으로부터 로봇이 통과 가능한 영역과 통과할 수 없는 영역을 히스토그램을 생성해 찾게 된다. 이 때, 로봇이 장애물에 부딪히지 않고 안전하게 이동하기 위해 장애물로부터의 안전거리를 고려한다. 안전거리는 주행 유도 방향 생성에서 로봇의 경로를 결정짓는 요소 중 하나로 안전거리를 작게 설정하게 되면 좁은 지형을 통과할 때 유리하지만 회전반경에 의해 회전 중 장애물과 충돌할 우려가 있다. 반면, 안전거리를 크게 설정하게 되면 상대적으로 안전한 주행이 가능하지만, 좁은 지역을 통과하지 못하거나 불필요한 회전 반경이 발생할 우려가 있다.

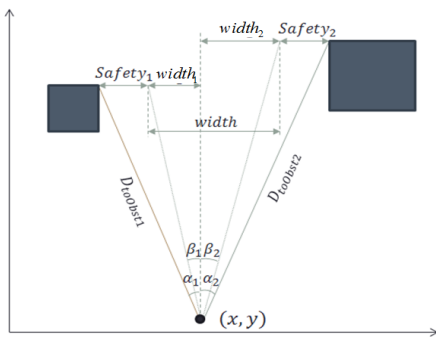


그림 2 안전거리를 포함하여 로봇이 통과 가능한 폭  
Fig. 2 The width that a robot can be pass, including the safety distance

그림 2는 로봇이 장애물과 마주했을 때의 환경을 나타내었다.  $W$ 는 로봇의 폭,  $Safety_1$ 과  $Safety_2$ 는 좌측과 우측 장애물로부터의 안전거리로,  $width_1$ 과  $width_2$ 는 각각의 장애물로부터의 안전거리와 로봇의 폭을 고려한 통과 가능한 폭을 나타낸다.

에물로부터의 안전거리로 사전에 설정한 값에 따른다.  $width_1$ 과  $width_2$ 는 로봇의 중심으로부터 안전거리까지의 폭으로 식 (1)을 이용해 구할 수 있다.  $D_{toObs1}$ 과  $D_{toObs2}$ 는 로봇으로부터 장애물까지의 거리이며  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는 장애물까지의 각도를 나타낸다.  $width_1$ 과  $width_2$ 의 합, 즉  $width$ 가 로봇의 폭 보다 크면 통과 가능하다고 인식하게 되는데, 이때의  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 로봇이 통과 가능한 방향을 나타내며 로봇의 전 방향에서 로봇이 통과 가능한 영역을 후보로 하여 주행 유도 방향을 생성한다.

$$width_1 = D_{toObs1} \sin(\alpha_1) - Safety_1 \tag{1}$$

$$width_2 = D_{toObs2} \sin(\alpha_2) - Safety_2 \tag{2}$$

$$\beta_1 = atan2(width_1, D_{toObs1} \cos(\alpha_1)) \tag{3}$$

$$\beta_2 = atan2(width_2, D_{toObs2} \cos(\alpha_2))$$

### 2.1.2 PSO 기법을 이용한 주행 유도 방향 생성 단계

로봇이 임의의 환경에서 적합한 주행 방향을 찾기 위한 탐색 과정은 임의의 해 공간에서 최적의 해를 찾아내는 최적화 과정과 동일하다[18]. 따라서 본 논문에서는 로봇이 앞 단계에서 도출한 통과 가능한 구역 중 가장 주행에 적합한 방향을 주행 유도 방향으로 선정하기 위한 최적화 기법으로 군집 지능 기법 중 하나인 PSO 기법을 선택하였다. PSO 기법은 병렬처리 특징, 이론의 간결성, 구현의 용이성, 연산의 효율성과 같은 장점을 가지고 있어 짧은 계산시간과 안정적인 수렴 특성이 보장된다.

본 논문에서는 PSO 기법을 이용해 통과 가능한 구역 중 가장 적합한 주행 유도 방향을 생성하기 위해 다음 사항을 고려한 적합도 함수(Fitness Function)를 생성하였다.

- 1) 로봇은 안전하게 목표 지점에 도달한다.
- 2) 로봇은 순간적으로 급격한 회전을 가지지 않는다.
- 3) 로봇의 주행 방향은 목표 지점을 향하도록 유도된다.
- 4) 로봇의 주행은 목표 지점에 가까워지도록 유도된다.

위의 사항을 고려한 적합도 함수는 식 (3)과 같다.

$$Fitness\ Function = w_1 p^2 + w_2 O_{ptg}^2 + D_{goal} \tag{3}$$

여기서  $w_1$ 과  $w_2$ 는 가중치 값으로  $w_1$ 이 클 경우 로봇의 현재 방향에 우선하여 주행 유도 방향을 생성하게 되고,  $w_2$ 가 클 경우 목표 지점으로 가기 위한 목표 지점에서의 방향에 우선하여 주행 유도 방향을 생성하게 된다.  $p$ 는 PSO 기법에서 탐색되어진 최적 지점으로 로봇의 회전 방향과 같다.  $p$ 가 클수록 로봇이 회전을 크게 해야 한다.  $O_{ptg}$ 는 탐색되어진 최적 지점( $p$ )으로부터 목표지점까지의 각도 차이이며  $O_{ptg}$ 가 작을수록 목표 지점을 향하게 된다.  $D_{goal}$ 는 로봇의 현재 위치에서 목표 지점까지 직선상으로 남은 거리이다.

PSO 기법에서 위 적합도 함수 값을 이용하여 매 세대 최적의 값에 수렴하게 되는데 이 때 환경에 따른 적당한 반복 횟수의 설정이 로봇의 주행 성능과 연산량을 좌우하는 중요한 부분이다. 본 논문에서는 PSO 기법의 종결 조건을 반복 횟수 50회, 수렴도 95%이상으로 설정하였다. 주행 유

도 방향 생성의 전체 과정은 다음과 같으며, 그림 3에 제시된다.

Step 1) 주변 환경 정보를 통한 매개변수 초기화  
 로봇의 전 방향에서 얻은 통과 가능한 영역으로부터 객체의 이동 가능 범위( $p_j^{min}, p_j^{max}$ )와 제한 속도( $v_j^{min}, v_j^{max}$ )를 계산한다. 이 때, 객체의 이동 속도는 각 영역 범위의  $\pm 20\%$ 를 최대로 제한한다.

$$v_j^{min} = -(p_j^{max} - p_j^{min})/5, \quad v_j^{max} = (p_j^{max} - p_j^{min})/5 \quad (4)$$

Step 2) 군집(Swarm)의 초기화  
 첫 번째 세대에서의 각 영역의 범위에 제한되는  $n$ 개의 *particle*과 *velocity*를 임의로 생성한다.

$$\begin{aligned} v_{i,j}(k) &= v_j^{min} + (v_j^{max} - v_j^{min})rand \\ p_{i,j}(k) &= p_j^{min} + (p_j^{max} - p_j^{min})rand \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 *rand*는 0과 1사이의 랜덤 값이다.

Step 3) 적합도 평가, *pbest*와 *gbest* 갱신  
 생성된 *particle*들은 식 (3)의 적합도 함수에 의해 평가된다. 각 세대에서 *particle*은 이전 세대의 평가 값과 비교하여 *pbest*와 *gbest*를 갱신한다.

Step 4) 새로운 속도와 위치 계산  
 모든 *particle*들은 제한 조건  $-v_j^{max} \leq v_{i,j}(k) \leq v_j^{max}$ 에 따라 새로운 속도를 구하며, 이 새로운 속도에 따라 통과 가능한 구역  $p_j^{min} \leq p_{i,j}(k) \leq p_j^{max}$  안에서 다음 위치를 결정한다.

Step 5) PSO 기법의 종료  
 위의 과정을 최대 세대에 도달하거나, 객체의 수렴도가 일정 기준 이하가 될 때까지 반복한다. 알고리즘의 종료 시점에서의 *gbest*가 주행 유도 방향이 된다.

```

Check Passible area(dimension)
Initialize the position and velocity of each particle
repeat
  for each particle
    Evaluate the fitness function f at the positions of all particles
  end
  for each particle
    Update the personal best position (pbest)
  end
  Update the global best position (gbest)
  for each dimension
    for each particle
      Update the velocity
      Compute the new position
    end
  end
until Stopping criterion is satisfied
    
```

그림 3 주행 유도 방향 생성의 전체 과정  
 Fig. 3 The whole process for generating the navigation guidance direction

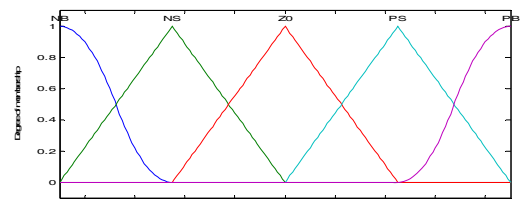
## 2.2. 퍼지 제어를 이용한 이동 로봇의 제어

본 논문에서는 주행 유도 방향에 따라 자율 주행을 하기 위해 퍼지 제어를 이용하여 입력(모터 전압)을 결정한다.

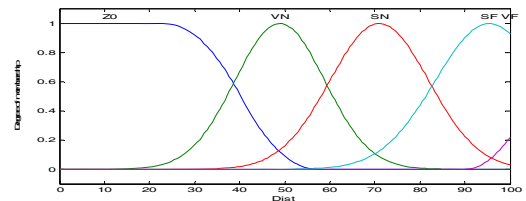
그림 3은 본 논문에서 사용된 입·출력 소속 함수를 나타내며, 소속 함수의 의미는 표 1과 같다. 좌우 모터의 출력을 위한 제어 규칙은 표 2와 표 3에 나타내었다. 소속 함수와 제어 규칙이 정해지게 되면 추론 과정에서 추론의 합성규칙을 이용하여 정확한 제어기 출력 값을 구하게 되는데, 여기서, 추론 방법으로는 Mamdani의 추론법, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 이용하였다.

표 1 소속 함수의 의미  
 Table 1 The meaning of the membership functions

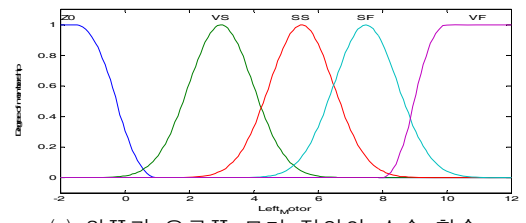
방향각 오차( $e$ )	남은 거리( $d$ )	제어입력(모터 전압)
NB 큰 음수	Z0 도착	Z0 정지
NS 조금 큰 음수	VN 아주 가깝다	VS 아주 느리다
ZO 0	SN 조금 가깝다	SS 조금 느리다
PS 조금 큰 양수	SF 조금 멀다	SF 조금 빠르다
PB 큰 양수	VF 아주 멀다	VF 아주 빠르다



(a) 방향각 오차의 소속 함수



(b) 목표 지점까지의 남은 거리의 소속 함수



(c) 왼쪽과 오른쪽 모터 전압의 소속 함수

그림 4 입력 및 출력 소속 함수  
 Fig. 4 Input and output membership functions

표 2 왼쪽 모터 전압을 위한 퍼지 규칙  
 Table 2 Fuzzy rules for the left motor output

$e \setminus d_{goal}$	Z0	VN	SN	SF	VF
NB	VS	VF	SF	SF	VF
NS	VS	VF	SF	SF	VF
ZO	VS	SS	ZO	SF	VF
PS	VS	VS	VS	SS	SS
PB	VS	VS	VS	VS	VS

표 3 오른쪽 모터 전압을 위한 퍼지 규칙

Table 3 Fuzzy rules for the right motor output

$e \setminus d_{goal}$	Z0	VN	SN	SF	VF
NB	VS	VS	VS	VS	VS
NS	VS	VS	VS	SS	SS
Z0	VS	SS	Z0	SF	VF
PS	VS	VF	SF	SF	VF
PB	VS	VF	SF	SF	VF

2.3. 전체 자율 주행 시스템

그림 5와 그림 6에서 본 논문에서 제안한 로봇의 자율 주행 시스템의 전체 흐름도와 블록선도를 나타내었다.

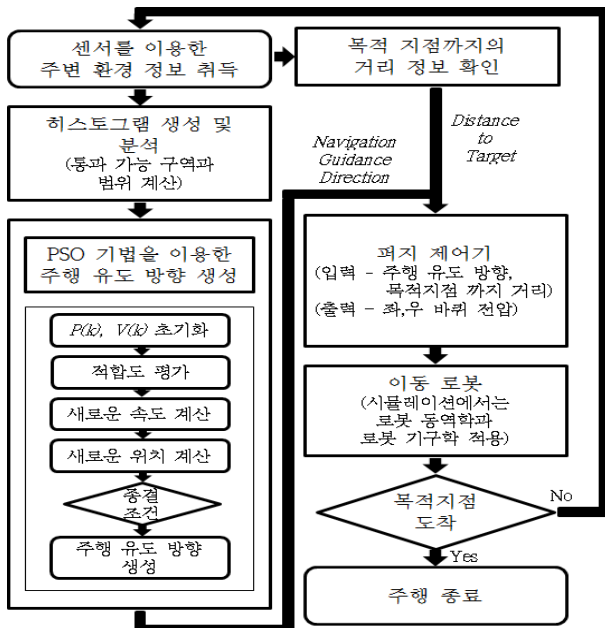


그림 5 제안된 주행 시스템의 전체 흐름도  
Fig. 5 Flowchart of the proposed navigation system

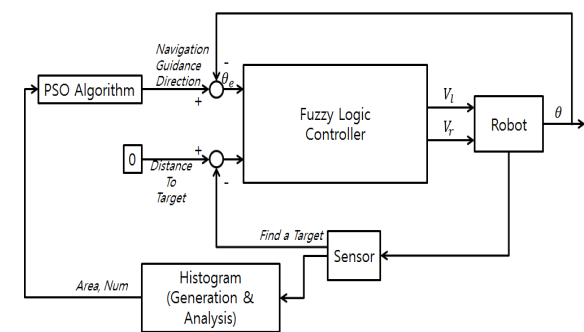


그림 6 제안된 로봇 자율 주행 시스템의 블록선도  
Fig. 6 Block diagram of the proposed autonomous navigation system of a robot

로봇의 자율 주행은 다음 4 단계를 반복하여 안전하게 장애물을 회피하며 목표 지점에 도달하게 된다.

Step 1) 로봇 주변의 환경을 인식하고 안전거리를 포함하여 로봇이 통과 가능한 영역을 구한다.

Step 2) PSO 기법을 이용하여 로봇 전 방향에서 주행에 가장 적합한 하나의 방향을 선택한다. 주행 유도 방향의 적합도는 로봇의 회전 각, 목표 지점까지의 방향 오차 및 목표 지점까지의 거리 오차를 고려하여 도출하게 된다.

Step 3) 퍼지 제어기를 이용하여 생성된 주행 유도 방향을 따라 로봇이 주행하도록 한다. 이 때, 제어기의 입력은 주행 유도 방향과의 방향 오차, 목표 지점까지의 거리 오차이며 출력은 양 모터 전압이다.

Step 4) 퍼지 제어기에서 출력된 양 모터의 전압 값을 제어 입력 값으로 하여 로봇이 구동되게 된다.

3. 시뮬레이션

본 장에서는 제안한 자율 주행의 성능 평가를 위한 시뮬레이션을 실행하였다. 주행 공간은 2000(cm) x 2000(cm)로 주행 시 목표 지점을 제외한 전역적인 환경 정보는 주어지지 않았다. 본 시뮬레이션에서는 이륜 이동 로봇의 기구학, 동역학 및 모터 동역학 모델을 이용하였으며, 주행 유도 방향을 이용하여 임의의 환경에서 장애물을 회피하면서 안전하게 목표 지점에 도달하는 것을 목표로 하였다.

시뮬레이션은 먼저 PSO 기법이 주행 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 다음으로 제안한 자율 주행 방법의 유효성을 보이기 위해 고정된 장애물과 이동 장애물이 복합적으로 존재하는 환경, 고정 장애물과 이동 장애물이 복합적으로 존재하면서 목표 지점이 변화하는 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 시뮬레이션에서는 각각 PSO 기법의 적합도 함수의 가중치를 변경하여 가중치에 따른 주행 결과를 비교하였다.

제안된 PSO 기법의 파라미터들은 다음과 같이 설정하였다. 개체수는 1 구역당 10마리이며, 여기서 1 구역이란 장애물이 없을 때, 로봇이 통과가 가능한 범위이다. 예를 들어, 로봇의 방향에서 -10(deg) ~ 40(deg)과 90(deg) ~ 180(deg)에 장애물이 있을 때, 로봇이 통과 가능한 구역은 [40(deg)+안전거리 ~ 90(deg)-안전거리]과 [180(deg)+안전거리 ~ 350(deg)-안전거리]의 2 구역임을 알 수 있다. 이 때, 로봇의 통과 가능 여부는 2장에서 보였듯이 센서 히스토그램과 주변 환경 분석을 통해 판단할 수 있다. PSO의 반복 회수는 50회로 설정하였으며, PSO의 종결 조건에서 수렴도는 95%이상으로 하였다. 수렴도 95%이상이란 각 구역에서 개체의 95%이상(10마리 중 9.5마리 이상)으로서 거의 모든 개체가 지역 최적화 값에 수렴하게 되면, 해당 구역의 검색을 종료하며, 모든 통과 가능한 구역에서 개체의 검색이 종결되면, 최종 최적화 값이 로봇의 주행 유도 방향이 된다. 로봇이 자율 주행하면서 온라인으로 계산하여 반복 회수를 제한하였기 때문에 구한 해가 완전한 최적화된 해가 아니라 실현 가능해(feasible solution)로 볼 수도 있다.

또한, 개체의 최대 속도는 각 구역 폭×0.2로서 정방향 최대 속도로 구역 폭의 20%를 샘플링 시간에 이동할 수 있음을 나타낸다. 개체의 최소 속도는 구역 폭×(-0.2)로서 역방향의 최대 속도를 나타내며, 구역 폭의 -20%를 샘플링 시간 동안 이동함을 가정하였다. 매 세대의 개체의 속도는 현재 위치에서 최소 속도에서 최대 속도 사이로서 매 세대 새

로운 속도를 가지고 이동하게 된다. 속도가 너무 낮을 경우에 전 구역을 검색하지 못하고 최대 세대가 지나버릴 수가 있으며, 속도가 높을 경우에는 정확도가 낮아질 수 있다. 제안된 PSO 기법의 경우에 로봇이 통과 가능한 폭을 찾는 부분에서 충분히 로봇의 충돌 여부를 고려하였으며, 실시간성을 생각해서 높은 속도를 보장하기 위해 보다 빠르게 각 구역을 검색하여, 가능하다면 최대 세대 이전에 검색을 종결시키는 것을 목표로 약간 높은 속도를 설정하였다.

3.1 PSO 기법의 성능 시뮬레이션

PSO 기법의 확률성이 주행 결과에 미치는 영향에 대한 검증을 위해 동일한 조건에서의 반복 주행을 실시하였다. 첫 번째 주행 결과를 기준으로 각 주행마다 동일 구간에서의 속도, 방향각, 주행 유도 방향, PSO 적합도 값의 각 오차 결과를 표 4에 나타내었다. 속도를 제외한 각 요소는 최대 오차에서 차이를 나타냈지만 이는 경로의 차이가 아닌 회전 구간에서 샘플링 시간의 차이에 의해 오차가 발생한 것으로서, 평균 오차와 RMS(Root Mean Square) 오차는 큰 차이가 없이 작게 반복 주행을 이룬 것을 알 수 있다.

표 4 PSO 기법의 성능 시뮬레이션 결과

Table 4 Simulation results for the PSO performance

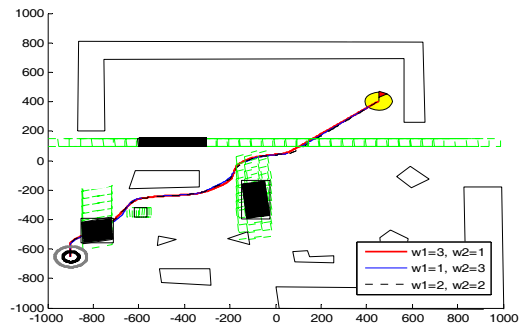
반복 횟수		2회	3회	4회	5회	전체
속도 (cm/s)	최대오차	0.3529	0.5593	0.1913	0.0454	0.5593
	평균오차	0.0435	0.0642	0.0137	0.0037	0.0313
	RMS 오차	0.0699	0.1365	0.0252	0.0075	0.0778
방향각 (deg)	최대오차	3.2979	5.6437	1.1824	0.3830	5.6437
	평균오차	0.3919	0.4848	0.0808	0.0145	0.2430
	RMS 오차	0.6658	0.9231	0.1977	0.0351	0.5778
주행 유도 방향 (deg)	최대오차	47.7691	57.9714	43.0188	12.045	57.9714
	평균오차	0.6365	0.6293	0.2300	0.0692	0.3912
	RMS 오차	3.1717	4.0394	2.1669	0.5272	2.7996
적합도 값	최대오차	10.0987	5.9360	10.0954	0.1872	10.0987
	평균오차	0.0517	0.0398	0.0213	0.0014	0.0285
	RMS 오차	0.5781	0.3903	0.3811	0.0086	0.3974

※ 각 오차 값은 1회의 주행 결과를 기준으로 나타내었다.

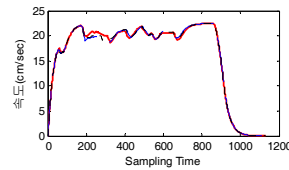
3.2. 고정 및 이동 장애물을 가진 복합적인 환경

그림 7과 표 5는 고정 장애물과 이동 장애물을 가진 복합적인 미지의 동적 환경에서 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림에서 이동 장애물은 검정색 모양으로 나타냈으며, 각각 다른 이동 거리와 이동 속도를 가지고 움직인다. 이동 거리를 점선으로 표시하였다.

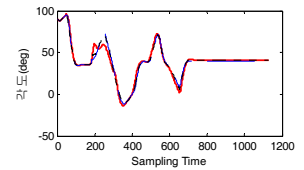
시뮬레이션은 적합도 함수의 가중치 값을 다르게 하여 3회 실행하였다. 이번 시뮬레이션에서는 적합도 함수의 가중치 값을 다르게 한 3가지의 주행에서 모두 이동 로봇이 안전하게 이동 장애물을 회피하며 목표 지점에 도달하였다. 이 결과를 통해 최종 경로가 직선에 가까운 장애물 환경에서는 적합도 함수의 가중치 값이 주행에 큰 영향을 미치지 않으며 장애물 회피 시 회전 반경에서 약간의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.



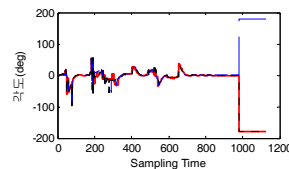
(a) 로봇의 주행 경로



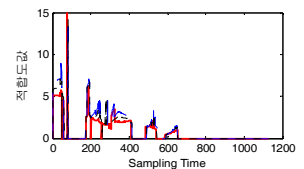
(b) 이동 로봇의 속도



(c) 이동 로봇의 방향각



(d) 주행 유도 방향



(e) PSO 기법의 적합도 값

그림 7 고정 및 이동 장애물을 가진 동적 환경에서 주행 Fig. 7 The navigation in a dynamic environment with fixed and moving obstacles

표 5 고정 및 이동 장애물을 가진 동적 환경에서 주행 결과 Table 5 Results of the navigation in a dynamic environment with fixed and moving obstacles

주행 시간 (초)	$w_1 = 3, w_2 = 1$	112.8	완주
	$w_1 = 1, w_2 = 3$	112.9	완주
	$w_1 = 2, w_2 = 2$	112.8	완주
주행 거리 (cm)	$w_1 = 3, w_2 = 1$	1833.0	완주
	$w_1 = 1, w_2 = 3$	1825.7	완주
	$w_1 = 2, w_2 = 2$	1826.2	완주

3.3. 복합 장애물을 가진 목표 지점이 변경되는 환경

그림 8과 표 6은 목표 지점이 임의의 시간에 변경되는 환경에서 시뮬레이션을 한 결과이다. 검정색의 장애물은 이동 장애물로 3.2절의 시뮬레이션과 동일한 움직임을 가지며, 목표 지점은 임의의 시간에서 ①→②→③으로 변경된다.

시뮬레이션은 적합도 함수의 가중치 값을 다르게 하여 3회 실행하였다. 적합도 함수의 가중치에 따른 각 주행 결과는 다음과 같다.

1)  $w_1 = 3, w_2 = 1$ 인 경우

대체적으로 큰 회전을 요구하지 않아 적합도 값이 작게 형성되며, U형 장애물 및 목표 지점 변경 시에도 조금씩 회전하며 경로를 수정하여 장애물과 충돌을 일으키지 않고 안전하게 목표 지점에 도달하였다.

2)  $w_1 = 1, w_2 = 3$ 인 경우

U형 장애물 목표 지점이 후방에 위치하게 되는 시점에서 지역 국소현상이 발생하여 충돌을 일으키게 되었다.

3)  $w_1 = 2, w_2 = 2$ 인 경우

전체적인 적합도 값이 1)의 경우에 비해 약간 높게 형성되어 있지만, 목표 지점이 변경되는 시점에서 1)의 경우에 비해 빠르게 회전하여 이동하는 것을 확인할 수 있다.

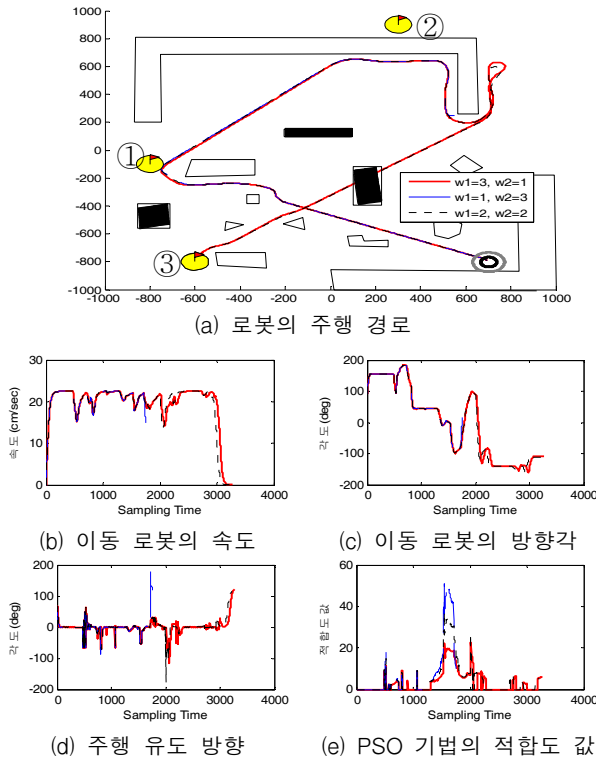


그림 8 목표 지점이 변하는 동적 환경에서의 주행

Fig. 8 The navigation in a dynamic environment with changing the target positions

표 6 목표 지점이 변하는 동적 환경에서 주행 결과

Table 6 Results of the navigation in a dynamic environment with changing the target positions

주행 시간 (초)	$w_1 = 3, w_2 = 1$	327.3	완주
	$w_1 = 1, w_2 = 3$	175.5	충돌
	$w_1 = 2, w_2 = 2$	322.0	완주
주행 거리 (cm)	$w_1 = 3, w_2 = 1$	6359.4	완주
	$w_1 = 1, w_2 = 3$	3643.0	충돌
	$w_1 = 2, w_2 = 2$	6265.3	완주

3.2절과 3.3절에서 PSO 기법을 이용한 주행 유도 방향 생성 시 적합도 함수의 가중치 값에 따른 주행 성능의 차이를 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 가중치 값은 로봇이 다양한 환경에서 자율 주행을 하기 위해 영향을 미친다는 것을 알 수 있었고 로봇의 회전반경을 크지 않도록 유도하는 가중치인  $w_1$ 이 로봇이 목

표 지점을 향하도록 유도하는 가중치인  $w_2$ 에 비해 크거나 같은 경우 좋은 성능을 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 미지의 환경에서 PSO 기법을 이용한 주행 유도 방향의 생성과 퍼지 제어를 이용한 자율 주행 방법을 제안하였다. 로봇 주변의 지역 정보만을 이용한 기존의 자율 주행 방법에서는 지역 국소 현상이 발생할 수 있고, 주행 환경의 변화에 유동적이지 못한 문제점을 가지고 있었다. 제안한 방법은 이러한 문제점들을 극복하여 다양한 주행 환경에서 효과적인 자율 주행을 가능하도록 하였다.

제안한 자율 주행 방법은 PSO 기법을 이용하여 로봇이 장애물을 효과적으로 회피하면서 자율 주행을 유도하는 방향, 다시 말해서, 주행 유도 방향을 생성하고, 퍼지 제어 방법을 이용하여 로봇이 주행 유도 방향으로 계속적으로 향하도록 하고 최종적으로 목표점에 안전하게 도달하도록 제어하였다.

제안한 자율 주행 방법의 타당성과 효능을 보이기 위해 다양한 환경에서 시뮬레이션 결과를 보였다. 로봇이 비교적 부드러운 회전을 가지며 목표 지점으로 향하도록 주행 유도 방향이 생성될 경우 지역 국소 현상을 포함한 다양한 동적 환경에서 안정적인 자율 주행이 가능함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과로부터 제안된 자율 주행 방법이 미지의 주행 환경에서 효과적이며 타당하다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 자율 주행 방법은 안내 로봇, 가정용 로봇, 탐사 로봇 등과 같이 고정 장애물, 이동 장애물, 이동 중 목표점 변경 등이 복합적으로 혼재하는 미지의 환경에서 작업하는 이동 로봇에 효과적으로 적용이 가능하다. 실제 이동 로봇의 자율 주행을 실시간 실험을 통해 제안된 자율 주행 기법을 검증하는 것이 추후 과제로 진행될 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 : 2012AA163)

#### References

[1] J. L. Jones. "Robots at the Tipping Point: The Road to the iRobot Roomba," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 13, pp. 76-78, 2006.

[2] J. Forlizzi and C. DiSalvo, "Service Robots in the Domestic Environment: A Study of the Roomba Vacuum in the Home," Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conf. on Human-Robot Interaction HRI, pp. 258-265, 2006.

[3] S. Tan, A. Zhu, and S. X. Yang, "A GA-Based Fuzzy Logic Approach to Mobile Robot Navigation in Unknown Dynamic Environments with Moving Obstacles," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Granular Computing, pp. 529-534, Aug., 2009.

- [4] Z. Li, X. Chen, and W. Xiao, "A New Motion Planning Approach Based on Artificial Potential Field in Unknown Environment," PDCAT 2004, LNCS 3320, pp. 376-382, 2004.
- [5] Y. Koren and J. Borenstein, "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile robots", IEEE J. Robotics and Automation, Vol.7, No. 3, pp.278-288, 1991.
- [6] S. Yasunabu, S. Miyamoto, and H. Ihara, "Fuzzy Control for Automatic Train Operation System," Proc. 4th IFAC/IFIP/IFRS Int. Conf. on Transportation Systems, Baden-Baden, pp. 33 - 39, 1983.
- [7] B. Ni, X. Chen, L. Zhang, and W. Xiao, "Recurrent Neural Network for Robot Path Planning," PDCAT 2004, LNCS 3320, pp. 188 - 191, 2004.
- [8] C. -F. Juang and Y. -C. Chang, "Evolutionary-Group-Based Particle-Swarm-Optimized Fuzzy Controller with Application to Mobile-Robot Navigation in Unknown Environments." IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 379-392, 2011.
- [9] V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonte, "Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning." IEEE Trans. on Industrial Informatics, Vol. 9, No. 1, pp. 132-141, 2013.
- [10] H. -Y. Chung, C. -C. Hou and S. -C. Liu, "Automatic Navigation of a Wheeled Mobile Robot Using Particle Swarm Optimization and Fuzzy Control." Proc. of the IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics(ISIE), pp. 1-6, 2013.
- [11] L. Lu and D. Gong, "Robot Path Planning in Unknown Environments Using Particle Swarm Optimization." Proc. of the IEEE Fourth Int. Conf. on Natural Computation, pp. 422-426, 2008.
- [12] Y. Li and X. Chen, "Mobile Robot Navigation Using Particle Swarm Optimization and Adaptive NN." Advances in Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science(LNCS), Vol. 3612, pp. 628-631, 2005.
- [13] N. A. Shiltagh and L. D. Jalal, "Optimal Path Planning for Intelligent Mobile Robot Navigation Using Modified Particle Swarm Optimization." Int. Journal of Engineering and Advanced Technology, Vol. 2, Issue 4, pp. 260-267, 2013.
- [14] S. Ahmadzadeh and M. Ghanavati, "Navigation of Mobile Robot Using the PSO Particle Swarm Optimization." Journal of Academic and Applied Studies(JAAS), Vol. 2, No. 1, pp. 32-38, 2012.
- [15] H. Mei, Y. Tian, and L. Zu, "A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Path Planning of Robot in Dynamic Environment," Int. Journal of Information Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 78-88, 2006.
- [16] I. Chaari, A. Koubaa, H. Bennaceur, S. Trigui, and K. Al-Shalfan, "smartPATH : A Hybrid ACO-GA Algorithm for Robot Path Planning," IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2012), June, Australia, pp. 1-8, 2012.
- [17] P. Raja and S. Pugazhenthii, "Optimal Path Planning of Mobile Robots: A Review," Int. Journal of Physical Sciences, Vol. 7, No. 9, pp. 1314-1320, 2012.
- [18] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization." Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, pp. 1942-1948, 1995.

## 저 자 소 개



### 박 지 관 (朴志冠)

2011년 동의대학교 메카트로닉스공학과 졸업(공학학사). 2013년 동의대학교 지능시스템공학과 졸업(공학석사). 2013년 ~ 현재 : 한국과학기술연구원(KIST) 인턴연구원

<관심분야> : 로봇공학, 자율 주행, 인지 지능, 영상 인식, 환경 인식 등  
E-mail : ji22gwan@gmail.com



### 신 진 호 (申鎭鎬)

1991년 한양대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학학사). 1993년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1999년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사). 2002년 ~ 현재 : 동의대학교 메카트로닉스공학과 교수

<관심분야> : 로봇공학, 제어시스템, 자율 주행, 지능 제어, 환경 인식, 임베디드 시스템, 인지 지능, 영상 인식 등  
E-mail : jhshin7@deu.ac.kr