

분산 자율 이동 로봇 시스템의 협조 지능 및 카오스 행동의 연구

A Study on Cooperative Intelligence and Chaotic Behaviors of Distributed Autonomous Mobile Robot Systems

제갈욱, 강 훈

Uk Jaekal and Hoon Kang

중앙대학교 전기전자공학부

요 약

자율 이동 로봇군은 분산된 자기 조직의 동일 규칙 하에 주어진 과제를 수행하는 로봇의 집단을 말한다. 본 논문에서는 협조 행동을 위한 수행 과제로서 등간격 원을 형성하게 하였다. 여기서, 이를 수행하기 위한 알고리즘을 고안하였고 여기에 퍼지 시스템을 사용하여 알고리즘을 보완하였다. 이 알고리즘을 가지고 시뮬레이션을 통해 다양한 협조 행동 양식이 나타남을 알 수 있으며 특히 이동 속도를 증가 시켰을 때 카오틱 현상이 일어남을 알 수 있다. 그리고 리아프노프 지수를 계산하여 이 카오스 현상의 특성을 증명하였다.

ABSTRACT

Autonomous mobile robot agents(AMRAs) are robots which perform a given task by the same distributed self-organizing rules. In this paper, we let them form an equi-distance circle for the task of cooperative behaviors. Here, we suggest an algorithm to perform the task and then utilize a fuzzy system to improve the algorithm. It is shown that various cooperative activities appear in the simulation and particularly chaotic behaviors also appear by increasing the robot speed. Moreover, we prove the characteristics of this chaotic behaviors by calculating Lyapunov exponent.

1. 서 론

자율 이동 로봇 에이전트는 인공생명[1]이라는 테두리 내에서 진화 전략 및 자기 조직이라는 견지에서 군 지능 및 협조 지능의 행동을 조사하기 위해 수년간 연구되어 왔다. 본 논문에서는 퍼지 시스템을 이용하여 이러한 군 지능 로봇들의 동적 특성을 나타내었으며 이들이 귀향(homing), 집합(agggregation), 및 확산(dispersion) 등의 성질[2]을 가지고 등간격 원을 형성하며 군 지능, 협조 지능 등을 나타내는 것을 보이도록 하였다[3,4]. 즉, 국소 영역에서 로봇들이 기본 행동들의 상호 작용을 통해서 전체 행동 즉, 등간격 원을 형성하는 것을 목표로 하였다. 관련된 연구는 군 지능에 관한 창발적인 행동을 실험한 결과들이 있다[5-9]. 자율 이동 로봇은 또한 카오스적 행동을 보이기도 한다[10,11].

본 논문의 순서를 살펴보면 II장에서는 자율 이동 로봇 에이전트에 주어진 가정을 알아보고 개개의 로봇에 주어지는 입력과 출력에 대해서 알아본다. III장에서는 본 논문에서 다루는 과제인 자율 이동 로봇이 등간격 원을 형성하기 위한 알고리즘을 살펴본다. IV장에서는 III장에서 다룬 알고리즘에 보다 정교한 행동을 수행하기 위하여 퍼지 시스템을 사용하게 된 배경과 퍼지 규칙의 생성 방법 및 퍼지 규칙의 예를 보이며, 추론 방법을 살펴본다[12,13]. V장에서는 위의 두 알고리즘의 결과 비교 및 파라미터의 조정에 따라 나타나는 결과에 대해서 알아보고 아울러 카오틱 현상이 나타남을 보인다. 카오틱 현상을 보기 위해 임의의 로봇의 이동 궤적을 살펴보고 이어서 이를 수식적으로 증명해 본다. 또한 퍼지 시스템을 사용한 알고리즘과 사용하지 않은 알고리즘을 비교하기 위해서 적합도(FM)를 정의하고 이 값을 살펴봄으로써 퍼

※이 연구는 1996년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임(과제번호:96-0102-13-01-3)

지 시스템을 사용한 알고리즘의 우수함을 알아본다. VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 자율 이동 로봇 에이전트

2.1 자율 이동 로봇의 가정

여기서 고려된 자율 이동 로봇은 기본적으로 단일 에이전트이며 이들의 움직임은 각 에이전트들간의 상호작용에 의해 결정된다. 다음은 자율 이동 로봇에 부과된 가정들이다.

- ① 로봇의 이동 속도는 일정하다.
- ② 로봇의 회전각은 임의의 각으로 제한되어 있다.
- ③ 로봇은 자신만의 고유한 상대 좌표를 가지고 있다
- ④ 로봇은 센서의 반경이 임의로 정해져 있다.
- ⑤ 로봇은 자신의 좌표계를 근거로 하여 센서 반경 내의 다른 로봇들의 거리와 각도를 알 수 있다.

2.2 로봇의 입력과 출력

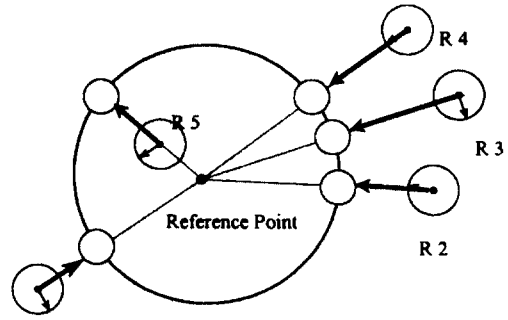
위의 가정 ⑤에서 보듯 타 로봇의 거리와 각도에 대한 정보를 필요로 한다. 이 값들은 입력을 형성한다. 한편 가정 ②에서 나타나듯이 현재 진행 방향에서 회전을 함으로써 진행 방향을 수정하게 되는데 이 회전 각도가 알고리즘의 결과로 나오는 출력값이다. 즉 이 회전 각도를 알맞게 출력함으로써 등간격 원이 형성된다.

3. 등간격 원 형성 알고리즘

모든 자율 이동 로봇들은 동일한 알고리즘을 수행하도록 설계되었다. 등간격 원 형성을 위한 알고리즘을 단계별로 크게 나누면 정보 처리, 모드 결정, 적합도 판별로 나눌 수 있다. 일단 여기서는 퍼지 시스템은 생략하여 설명하며 퍼지 시스템을 이용한 부분은 다음 장에서 설명하기로 한다.

3.1 정보 처리

정보 처리 단계는 다시 세 단계로 나뉘어 지는데, 정보 획득, 로봇의 좌표 계산, 중심점 계산으로 나뉜다. 정보 획득 단계에서는 각 로봇이 센서 반경내에 들어온 로봇에 대해 거리 정보와 현재 진행 방향에 대한 각도 정보를 얻게 된다. 이러한 정보를 가지고 다른 로봇들의 좌표를 계산하는 부분이 로봇의 좌표 계산 단계이다. 다른 로봇의 좌표를 결정하기 위해서는 자신만의 고유한 좌표계가 형성되어 있어야 하는데, 자신의 좌표계는 현재 진행 방향을 양의 x축으로 한 직교 좌표계로 하였다. 이와 같이 다른 로봇들의



R 1
그림 1. 방사 방향으로의 이동에 의한 원 형성.
Fig. 1. Forming a circle by moving radially.

거리와 각도에 대한 정보와 자신의 고유한 직교 좌표계를 가지면 센서 반경내의 모든 로봇의 좌표가 결정된다. 이러한 로봇들의 좌표를 가지고 앞으로 형성할 원의 중심점을 계산하게 되는데 이것이 중심점 계산 단계이다. 이 단계에서는 센서 반경내의 모든 로봇의 좌표를 평균한 값을 원의 중심점으로 계산한다.

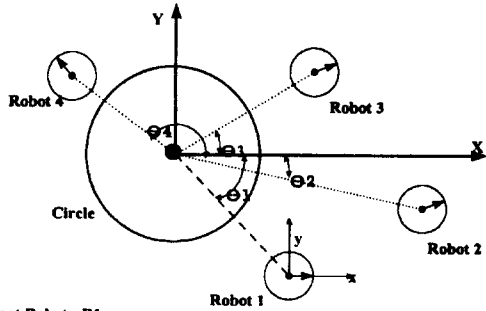
3.2 모드 결정

타 로봇의 좌표를 알게 되면 현재의 로봇은 다른 로봇에 대해서 어떤 위치에 놓여 있는 지를 알 수 있게 된다. 등간격 원을 형성하기 위해서는 원의 중심점에 대한 자신의 위치뿐만 아니라 다른 로봇들의 위치도 중요한 작용을 한다. 만약 등간격이 아닌 단순한 원을 형성하려면 현재 자신의 위치에서 중심점을 향하여 방사 방향으로 이동만 하면 됨을 알 수 있다(그림 1).

하지만 등간격 원을 형성하려면 원의 중심점만 아니라 타 로봇의 분포를 참조하여 이에 알맞은 행동 모드를 가져야만 한다. 하지만 모든 로봇을 고려하는 것이 아니고 이웃 로봇이라는 로봇 하나만을 고려함으로써 등간격을 이룰 수 있다. 여기서는 먼저 이웃 로봇을 찾는 과정을 알아 본 후에, 이 과정에서 얻은 결과로 수행되는 네 가지 모드에 대해 살펴본다. 모드에는 기준 모드, 이동 모드, 회전 모드, 준비 모드가 있다.

3.2.1 이웃 로봇 찾기

이웃 로봇을 찾는 내용이 그림 2에 나와 있다. 그림 2에서는 현재 로봇 R1이 센서 반경내에 있는 로봇들의 정보를 가지고 좌표 계산이 이루어진 후 원의 중심점을 이미 계산한 상태이다. 센서 반경내에는 자신을 제외하고 3개의 로봇이 위치해 있다. 먼저 중심점 또한 자신의 좌표계와 같은 방향의 직교 좌표계를 갖



Present Robot : R1
 $|\theta_1 - \theta_2|$ is the smallest value
 Neighboring Robot : R2

Finding a Neighboring Robot

그림 2. 이웃 로봇 찾기.

Fig. 2. Finding a neighboring robot.

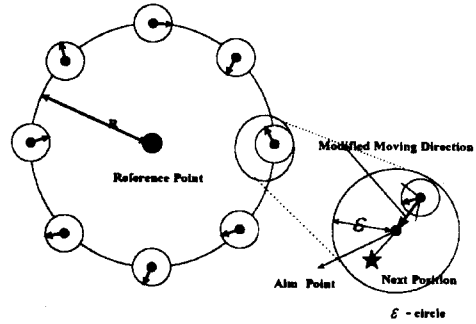
는다고 생각을 한다. 그러면 자신을 포함한 로봇들의 양의 x축에 대한 각도를 계산할 수 있게 된다. 이를 그림에서 보듯 각각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 라고 하고 i번째 로봇이 현재의 로봇이라면, $|\theta_i - \theta_j|$ ($j \neq i, j=1, \dots, 4$)를 계산함으로써 중심점을 기준으로 한 양의 x축에 대해 반시계 방향으로 자신의 위치와 각도 차이가 가장 적게 나는 로봇을 찾을 수 있다. 그림 2에서는 현재 로봇이 R1이므로 R2가 이웃 로봇이 되며 이 로봇을 참조하여 다음의 네 가지 행동 모드들 중 하나를 실행한다.

3.2.2 로봇의 네 가지 행동 모드

로봇이 원의 중심점을 결정하면 다음 단계로서 행동 모드를 결정하게 된다. 모드는 4가지로 나뉘는데 기준 모드, 이동 모드, 회전 모드, 준비 모드가 그것이다. 기준 모드는 원주 상에 가장 가까운 로봇이 행하게 되며 자신의 위치에서 원의 중심점으로 그을 방사 방향으로 이동하는 모드이다. 이동 모드에서는 등간격 원을 형성하기 위해 이웃 로봇을 찾아내어 이 로봇과의 원주 상에서의 거리를 참고로 등간격 원이 형성되기 위한 회전각을 구한 후 이동하는 모드이다. 회전 모드는 이동 모드나 기준 모드에서 구한 출력값인 회전각이 제한된 범위를 벗어난 경우 이동은 하지 않고 회전만 하는 모드이며, 준비 모드는 로봇간의 충돌을 피하기 위해 임의의 방향으로 움직이는 모드이다.

3.2.3 적합도 판별

위에서 설명한 네 가지 모드 중 준비 모드를 제외한 세 가지 모드는 전부 로봇이 이동해야 할 목적점을 가지고 있다. 하지만 이 목적점이 현재의 위치에서 크게 벗어나지 않는 경우에는 이 로봇은 정지하고 있



Nest Position is also in ϵ -circle

Stopping at Present Position

그림 3. 적합도 판별 및 멈추기.

Fig. 3. Checking the sufficient condition and stopping.

게 된다. 다시 말하면, 반경 ϵ 를 정해 놓고 목적점을 중심점으로 하여 반경 ϵ 인 원을 형성하였을 경우 현재의 위치가 이 ϵ 원 안에 들어온 경우에는 이미 만족할 만한 적합도를 가지고 등간격 원이 형성되었다고 판단하여 로봇은 정지하는 것이다(그림 3).

4. 퍼지 시스템을 도입한 알고리즘

4.1 퍼지 규칙

앞에서 퍼지 시스템을 사용하지 않은 등간격 원형성을 위한 알고리즘의 단점은 센서 반경내의 하나의 로봇(이웃 로봇)만을 참조한다는 것이다. 등간격 원을 이루는데 있어서 하나의 로봇을 근거로 이동하는 것 보다는 여러 개의 로봇의 분포를 참조하면서 이동하는 것이 효과적일 것이다. 이런 생각을 바탕으로 분포를 고려한 퍼지 규칙을 적용하면 로봇은 하나의 로봇만이 아닌 다수의 로봇을 참조로 이동하게 되므로 보다 나은 행동양식을 보일 것이 예상된다. 실제로 이러한 퍼지 규칙을 적용하면 로봇의 행동양식이 향상되며 이는 뒤에서 보일 것이다. 퍼지 규칙의 전건부는 타 로봇의 분포를 고려한 것과 진행 방향과 중심점을 바라본 가상 선(eye)과의 각도 차이로 구성되는 것이 있으며, 후건부는 회전 각도로 구성된다. 이 회전 각도는 앞의 알고리즘에서 구한 출력을 보정하여 주는 역할을 한다.

4.1.1 분포에 대한 규칙의 구성

전건부의 구성 중 타 로봇의 분포에 대한 부분을 살펴보면 그림4와 같다. 먼저 중심점을 바라보는 가상 선을 생각하고 이를 eye라 하자. 그림에서 보듯이 이 eye 를 중심으로 45°내의 범위를 F(front)라 하고

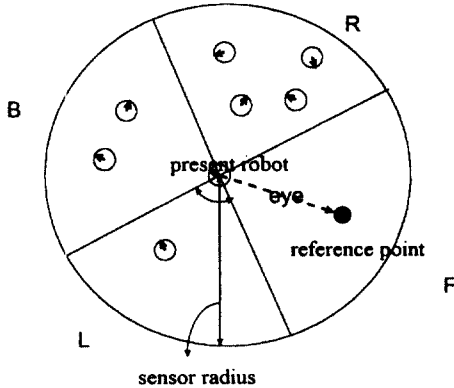


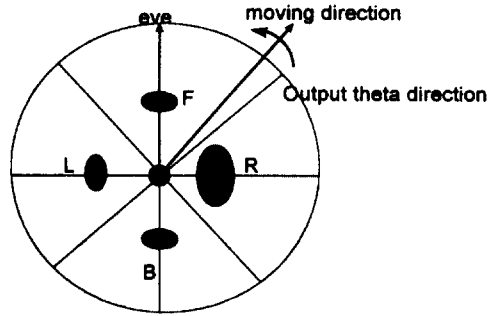
그림 4. 전진부.
Fig. 4. IF-part.

RFLB = 4012

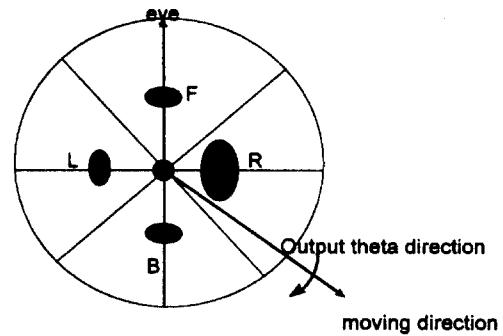
F의 왼쪽으로 90°범위는 L(left), 오른쪽 90°범위는 R(right), 뒤쪽은 B(back)라 하자. 그리하여 퍼지 규칙을 구성하는데 만약 왼쪽(L)에 로봇이 많이 분포하면 오른쪽으로 회전해라 하는 식으로 구성한다. 그림 4에서의 전진부에 들어오는 분포 입력은 R에 속한 로봇이 4개이고 B, R, F에 속한 로봇이 각각 2, 0, 1개이므로 이들 로봇의 수로 나눈 4/7, 2/7, 0, 1/7이 전진부의 분포에 대한 입력이 된다.

4.1.2 진행 방향에 의한 규칙의 구성

위의 분포에 대하여서 규칙을 작성하였을 경우 왼쪽에 로봇이 많이 분포하면 결론부에서는 오른쪽으로 이동 방향을 돌리도록 한다. 하지만 만약 현재의 이동 방향이 이미 오른쪽으로 향하고 있거나 오른쪽으로 많이 틀어져 있는 경우에는 무작정 오른쪽으로 회전하여서는 안된다. 즉, 로봇의 분포 외에도 현재의 진행 방향이 전진부에 고려되어야 한다. 이상의 개념을 설명한 것이 그림 5이다. 먼저 eye를 양의 x축으로 하여 직교 좌표계를 형성한다. 그리고 이 좌표계에 대해서 현재의 진행 방향이 몇 사분면에 속해 있는지를 알아낸다. 그리하여 두 번째 전진부인 진행 방향에 대한 부분으로의 입력이 된다. 그림 5(a)는 현재의 진행 방향이 4사분면에 속하며 분포가 오른쪽에 많이 있는 경우이다. 이 경우에는 그림에서 보이듯이 현재의 진행 방향을 분포가 적은 쪽으로 회전하도록 출력값이 나오게 된다. 그림 5(b)는 현재의 진행 방향이 3사분면에 속하는 경우로 마찬가지로 분포가 적은 쪽으로 회전하도록 출력값이 나온다. 이렇게 나온 값들은 퍼지 시스템을 사용하기 전에 이웃 로봇만을 참고로 한 출력값인 진행 방향의 회전각을 보다 좋은 행동 양식이 나오도록 수정하는 역할을 한다.



(a) 반시계 방향으로 이동



(b) 시계 방향으로 이동

그림 5. 진행 방향을 고려한 회전각 보정.

Fig. 5. Modification of rotating angle by considering moving direction.

앞에서 퍼지 규칙이 로봇의 분포와 진행 방향을 고려해서 만들어진다고 하였다. 하지만 로봇의 분포를 고려하여서 규칙을 만들 경우에는 로봇이 원주의 근처에 위치하였을 경우에 퍼지 규칙의 적용이 전체 작업 수행에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이는 전체의 로봇이 원주 상에 등간격으로 놓이게 될 경우를 생각해 보면 알 수 있다. 즉 이런 상황에서는 모든 개개의 로봇에 들어오는 분포 입력이 항상 같게 되는데 이 분포 입력은 원주의 길이를 전체 로봇의 개수로 나눈 수의 함수이다. 그런데 이때의 분포 입력에 대한 퍼지 규칙의 출력값은 우리가 원하는 방향으로 로봇을 이동하게 해주지 못할 수도 있다. 그래서 퍼지 규칙을 적용함에 있어서 원주의 근처에 일정한 반경의 데드존(dead zone : D)을 구성한다. 이 데드존에서는 퍼지 규칙을 적용하지 않은 알고리즘이 사용된다.

4.1.3 퍼지 규칙 테이블

표 1은 퍼지 규칙의 구성을 보인 것이다. 물의 개수

표 1. 퍼지 규칙 테이블
Table 1. Fuzzy rule table

규칙 #	전건부 1	전건부 2	후건부	규칙 #	전건부 1	전건부 2	후건부
1	R	1	Zero	13	B	1	Zero
2	R	2	Zero	14	B	2	Neg.
3	R	3	Neg.	15	B	3	Pos.
4	R	4	Pos.	16	B	4	Zero
5	F	1	Pos.	17	R&L	1	Pos.
6	F	2	Zero	18	R&L	2	Neg.
7	F	3	Zero	19	R&L	3	Pos.
8	F	4	Neg.	20	R&L	4	Neg.
9	L	1	Neg.	21	F&B	1	Neg.
10	L	2	Pos.	22	F&B	2	Pos.
11	L	3	Zero	23	F&B	3	Neg.
12	L	4	Zero	24	F&B	4	Pos.

는 총 24개로 하였다. 규칙 1부터 규칙 4까지는 오른쪽에 다른 로봇들이 몰려 있는 경우이고 규칙 5부터 규칙 8까지는 전방에 다른 로봇들이 몰려 있는 경우이다. 규칙 9부터 규칙 12까지와 규칙 13부터 규칙 16까지는 각각 좌측과 후방에 다른 로봇이 많이 분포한 경우이다. 또한 규칙 17부터 규칙 20까지는 좌우측에 로봇이 많이 분포한 경우이고 규칙 21부터 규칙 24까지는 전후방에 분포한 경우이다. 이와 같이 타 로봇들의 분포에 따라 전건부 1이 형성되고 이 6가지의

전건부 1들은 다시 4개의 규칙을 갖고 있다. 이 4개의 규칙은 진행 방향에 따라 각기 다른 전건부 2를 갖고 있는데, 즉 진행 방향이 eye를 양의 x축으로 한 좌표 축에서 몇 사분면에 속하는가에 따라 각기 다른 전건부 2를 갖는다. 즉 분포에 의한 전건부 1의 6가지와 진행 방향에 의한 전건부 2의 4가지가 고려됨으로서 총 24개의 규칙을 가지게 된다. 후건부는 보정될 회전각의 방향을 알려준다. Pos.라 함은 반시계 방향을 말하고, Neg.라 함은 시계 방향을 말한다. 예를 들면 앞의 그림 5(a)의 경우는 우측에 로봇의 분포가 많고 진행 방향이 4사분면에 속하는 경우이므로 규칙 4에 해당된다. 그러므로 후건부는 반시계 방향인 Pos.이 된다. 마찬가지로 그림 5-(b)는 규칙 3이 되고 후건부는 시계 방향인 Neg.가 된다.

4.2 퍼지 추론

그림 6은 본 연구에서 사용한 퍼지 추론의 한 예를 보인 것이다. 그림 7과 같이 현재의 로봇들의 분포가 주어지고 로봇의 진행 방향과 eye가 주어져 있다고 가정하자. 그림 7에서 보듯 #RFLB는 7201이며 진행 방향은 1사분면에 속하고 있다. 자신을 제외한 로봇의 총수는 10개이므로 전건부 1에 대한 입력 1은 #RFLB/N에 의해서 (N은 센서 반경내의 로봇 수) 0.7 0.2 0.0 0.1이 된다. 또한 진행 방향이 1사분면에 있으므로 전건부 2에 대한 입력 2는 1.0 0.0 0.0 0.0이 된다. 추론법은 전건부 1의 4개의 성분(element)과 입력 1의 4개의 성분을 비교해서 작은 값을 찾은 후 이들

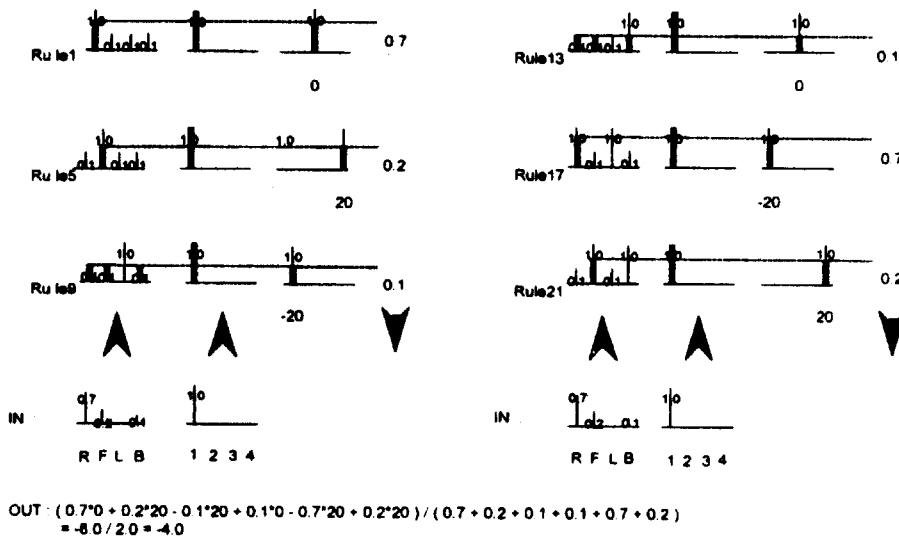


그림 6. 퍼지 추론의 예.
Fig. 6. An example of fuzzy reasoning.

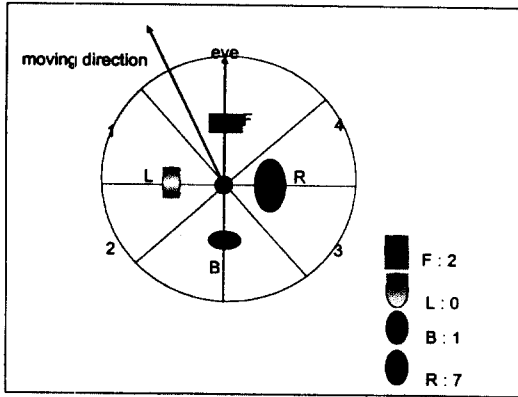


그림 7. 로봇의 분포 및 진행방향.

Fig. 7. Robot distribution and moving direction.

중 가장 큰 값을 찾는다. 같은 방법으로 입력 2에 대한 값을 찾아낸 후 이 2개의 값들 중 작은 값을 규칙에 대한 적합도로 취한다. 그림 7과 같은 입력에서는 입력 2 부분이 1.0 0.0 0.0 0.0이기 때문에 표 1의 24개의 규칙 중에서 오직 1, 5, 9, 13, 17, 21번째 규칙만이 활성화된다. 이중 첫 번째 규칙을 보면 입력 1이 0.7 0.2 0.0 0.1이고 전전부 1이 1.0 0.1 0.1 0.1이므로 각 성분의 작은 값은 0.7 0.1 0.0 0.1이 되고 이중 가장 큰 값인 0.7(그림의 굵은 선)이 결정된다. 이 값과 입력 2와 전전부 2 사이에 결정된 1.0을 비교하여 작은 값인 0.7이 규칙 1에 대한 적합도가 된다. 이와 같이 각 규칙에 대한 적합도를 구하면 그림에서 보듯 각각 0.7, 0.2, 0.1, 0.1, 0.7, 0.2가 된다. 출력을 계산하기 위해서는 이산적인 centroid decoding 방법을 사용하였다. 즉, 각 규칙의 적합도와 후건부는 곱한 후 더하고 이를 적합도의 합으로 나누어서 출력값을 구한다. 아래의 수식들은 일반적인 경우를 보이는 퍼지 추론식이다. 식 1은 i번째 룰의 적합도를 알아내기 위한 식이며, 식 2는 출력을 구하는 식이다. 그림 8에는 이상의 알고리즘을 순서도로 정리하여 나타내었다.

$$r_i = \left\{ \bigcup_{j=1}^4 (e_j^1 \wedge I_1^j) \right\} \wedge \left\{ \bigcup_{j=1}^4 (e_j^2 \wedge I_2^j) \right\} \quad (1)$$

$i, j=1, 2, \dots, N$

r_i = i 번째 퍼지 룰의 적합도

e_j^i = i 번째 룰의 j 번째 성분

I_1^j = 입력 1의 j 번째 성분

I_2^j = 입력 2의 j 번째 성분, N=룰의 개수

\cup = T-conorm 연산자(maximum 연산)

\wedge = T-norm 연산자(minimum 연산)

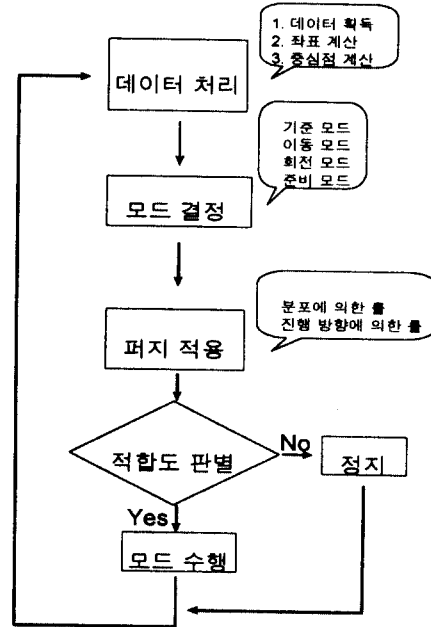


그림 8. 알고리즘의 순서도.

Fig. 8. Flow chart of algorithm.

$$\text{출력 } d\theta = \frac{\sum_{i=1}^N r_i c_i}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (2)$$

c_i = i 번째 룰의 후건부

5. 결 과

5.1 모의 실험

그림 9는 센서 반경을 250으로 하고 원의 반경을 60으로 했을 때의 스텝당 로봇의 분포를 보여 주는 그림이다. 로봇의 개수는 10개이며 이동 속도는 1로 주었으며 적합도에 관계되는 ϵ 반경은 1로 주었다. 마지막으로 회전의 제한 각도는 30도로 하였다. 그림 9(a)는 로봇의 초기 분포이며, 그림 9(b), (c), (d)는 각각 시간이 200, 300, 400일 때의 분포이다. 그림 10은 센서 반경이 280이고 원의 반경이 100일 때를 보인 것이다. 그림 10(a)는 로봇의 초기 분포이며, 그림 10(b), (c), (d)는 각각 시간이 200, 500, 700일 때의 분포이다. 로봇의 개수는 15개이며 나머지 조건은 앞과 같다. 이 두 경우를 살펴보면 처음에는 로봇의 센서 반경내에 몇 개의 로봇만이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그리고 각 로봇은 자신의 센서 반경내에 들어온 로봇만을 가

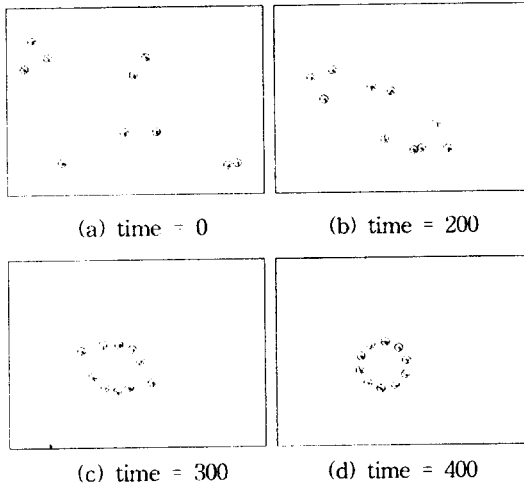


그림 9. 센서 반경 : 250, 원 반경 : 60.
Fig. 9. Sensor radius 250, circle radius 60.

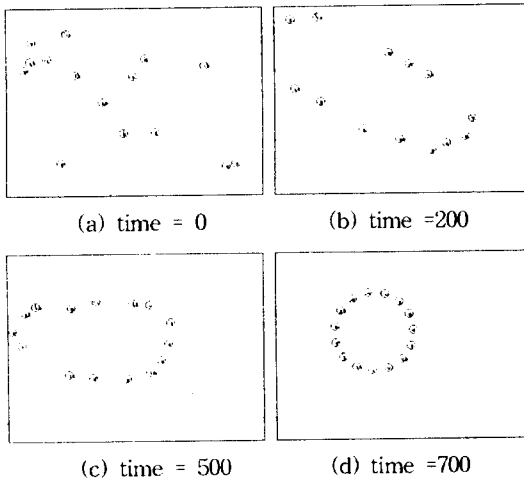


그림 10. 센서 반경 : 280, 원 반경 : 100.
Fig. 10. Sensor radius 280, circle radius : 100.

지고 원을 형성하려고 이동한다. 하지만 이렇게 이동하는 동안 각 로봇의 센서 반경의 일부가 겹쳐지게 되고 각각의 로봇이 참조할 수 있는 로봇의 수가 늘어나게 된다. 결국 최종적으로 모든 로봇이 센서 반경내에 들어오게 되며 등간격 원을 형성하게 된다. 즉 국소적으로만 로봇의 분포를 참조하면서 등간격 원을 형성하려고 이동하다가 최종적으로는 모든 로봇이 참여하여 전체 수행 과제인 등간격 원을 형성하게 된다.

5.2 카오틱 현상

5.1절의 결과를 보면 이동 속도와 ϵ 원의 반경이 일치

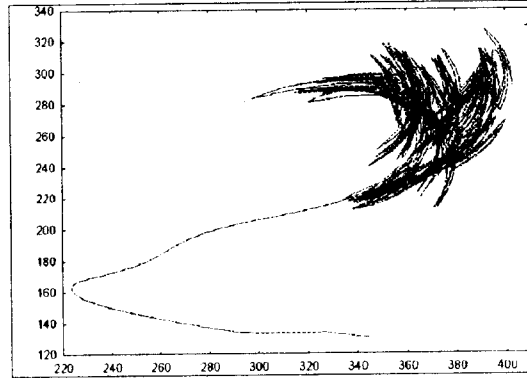


그림 11. 자율 이동 로봇의 카오틱 행동.
Fig. 11. Chaotic behavior of autonomous mobile robot.

하는 경우로서 이때는 모든 로봇이 동시에 ϵ 원 내로 들어가게 되어서 결국 완전한 원을 형성하는데 성공한 후 모두 멈추게 된다. 하지만 이동 속도보다 작은 ϵ 을 주게 되면 모든 로봇이 동시에 멈추는 경우가 발생하지 않게 되어 계속해서 로봇들이 움직이게 됨을 관찰할 수 있다. 이 경우에는 전체적인 로봇의 분포는 원의 모양을 형성하나, 자체적으로 정한 적합도를 만족하지 못한 로봇의 움직임 때문에 모든 로봇이 정지하는 경우가 발생하지 않는 것이다. 이 끊임없는 로봇의 움직임을 관찰하면 카오틱한 움직임을 볼 수 있는데 그림 11은 이를 보여 주고 있다. 그림 11은 그림 9(a)와 같은 초기 분포에 대해 로봇에 대한 자취를 보인 것으로서 로봇의 이동 속도는 2, 등간격 원의 반경은 50, ϵ 원의 반경은 1이며 센서의 반경은 250이다. 카오틱 현상이 실제로 일어나는지 알아보기 위해서는 수식을 통한 검증이 필요하다. 카오틱 현상을 수식적으로 알아보기 위한 방법에 리아프노프 지수(Lyapunov exponent)가 있다. 이 수치를 구하여서 만약 0보다 크게 나오면 카오틱 현상이 나타났다고 말한다. 로봇의 궤적은 2차원의 좌표를 가지므로 2차원에서 사용할 수 있는 리아프노프 지수의 수식은 다음과 같다.

$$\Lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \frac{d_{2n+1}}{d_{2n}} \quad (3)$$

$$d_{2n} = \| (x_{(2n+1)k}, y_{(2n+1)k}) - (x_{(2nk+1)}, y_{(2nk+1)}) \| \quad (4)$$

여기서 N 은 전체 시뮬레이션 스텝 수이며, d_{2n} 은 식(4)과 같이 주어지는 유클리디안 거리(Euclidean distance)이다. k 는 N 을 나누는 구간의 스텝 크기이며 P 는 $N/k-1$ 로 정의된다. 표 2는 k 의 변화에 따른 리아프노프 지수를 보인 것이다. 여기서 보듯이 리아프노

표 2. 리아프노프 지수
Table 2. Lyapunov exponent

Speed=2, ε=1		Speed=3, ε=1	
k	Lyapunov exponent	k	Lyapunov exponent
30	0.055411	30	0.037241
31	0.029060	31	-0.038721
32	0.025369	32	0.034085
33	-0.040998	33	-0.002817
34	0.031905	34	0.044803
35	0.044738	35	-0.027420
36	-0.011673	36	-0.014030
37	-0.009929	37	0.014622
38	0.076202	38	0.034986
39	0.004588	39	-0.042499
40	0.017200	40	-0.026671
41	0.009523	41	0.007327
42	0.024448	42	-0.043284
43	-0.023137	43	0.012007
44	0.014810	44	0.015841
45	-0.035183	45	0.019348
46	-0.010248	46	-0.003780
47	-0.059973	47	0.039586
48	0.035900	48	0.056887
49	0.006679	49	0.041094
50	-0.005715	50	0.012271
$A_{avg} = 0.008523$		$A_{avg} = 0.008137$	

프 지수가 양수가 될 수도 있지만 음수인 경우도 나타나므로 간헐적인 카오틱 현상이 발생함을 알 수 있다. 하지만 전체적으로 평균을 구하면 A_{avg} 값이 양수가 나와 카오틱 현상이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 주어진 ε원 반경에 대해 이동 속도를 빠르게 하면 카오틱 현상이 일어난다. 즉 이동 속도가 증가할수록 작업이 수행되는 시간이 단축되어지기는 하지만 이동 속도가 ε원 반경보다 커지면 로봇의 움직임이 카오틱 궤적을 그리게 된다.

5.3 적합도(Fitness Measure : FM)

본 논문에서 정의된 적합도는 다음과 같이 확률의 앙상블 평균이다.

$$fitness\ measure : FM = \frac{1}{T_{obs}} \sum_{t \in T_{obs}} P(t) \quad (5)$$

여기서 T_{obs} 는 관측시간이고 $P(t)$ 는 귀향(homing) 및 집합(aggregation)등의 특성을 나타내는 확률로서 몇 개의 이동 로봇들이 ε원안에 들어왔는지를 나타내는 확률 값이다. 그리고, 이러한 기준 위치는 상대적 좌표계들의 계속적인 이동으로 끊임없이 변화한다. 시간 t에서의 확률은 $P(t)=M(t)/N$ 이며, 여기서 N은 자율 이동 로봇의 전체 개체 수이며 $M(t)$ 은 그림 3에서와 같이 반경 ε의 작은 기준원내에 들어와서 조건을 만족하는 이동 로봇 에이전트들의 개체 수이다. P(t)는 작업이 성공하면 1이 될 것이고 적합도는 시간이 지남에 따라 1로 수렴할 것이다. 이 적합도의 1에 대한 수렴 속도가 빠르면 로봇의 행동 양식이 좋다는 것을 의미한다. 그러므로 퍼지 시스템을 이용한 알고리즘이 퍼지 시스템을 이용하지 않은 알고리즘보다 좋은지 나쁜지는 이 적합도의 그래프를 비교함으로써 알 수 있다. 표 3은 퍼지 시스템을 적용함에 있어서 데드존(dead zone: D)의 변화에 따른 FM값들을 구한 것이다. 여기서는 로봇의 개수는 20, 등간격 원의 반경이 60, ε원의 반경은 1, 센서 반경은 250, 관측시간(T_{obs})은 800, 로봇의 이동 속도는 1인 경우이다. 표에서 보듯 퍼지 시스템을 적용하지 않은 경우에 비해 FM값이 향상되긴 하나 그다지 눈에 띄게 좋아지는 않음을 알 수 있다. 표 4는 표 3과 같은 조건 하에 로봇의 이동 속도를 3으로 ε원의 반경을 2로 한 경우이다. 표 3과는 달리 FM값이 눈에 띄게 향상됨을 알 수 있다. 이는 퍼지 시스템의 적용 근거가 로봇

표 3. FM값의 비교(ε=1, 이동 속도=1)
Table 3. FM value

퍼지 시스템 비 적용시의 FM	퍼지 시스템 적용	
	D	FM
0.63081	20	0.643600
	30	0.639375
	40	0.636937
	50	0.641062

표 4. FM값의 비교(ε=2, 이동 속도=3)
Table 4. FM value

퍼지 시스템 비 적용시의 FM	퍼지 시스템 적용	
	D	FM
0.720063	20	0.709000
	30	0.782438
	40	0.807625
	50	0.845500

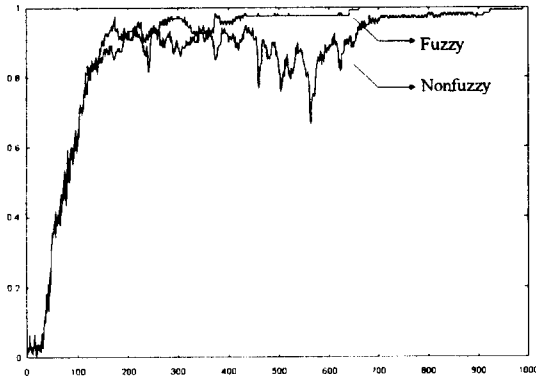


그림 12. 적합도 값의 비교 그래프.

Fig. 12. Graph of FM values.

의 분포를 미리 분산시키면서 등간격 원을 형성하는데 있는데, 이동 속도가 증가함으로써 이 작용의 효과가 커지게 됨을 알 수 있다.

그림 12는 로봇의 개수를 120, 시뮬레이션 스텝 1000, 센서 반경 300, 등간격 원 반경 60, 데드존이 40일 때의 경우로서 퍼지 시스템을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우에서의 적합도 값을 그래프로 보인 것이다. 그림에서 보듯이 퍼지 시스템을 이용하면 보다 빠른 시간 내에 적합도가 1로 수렴한다. 또한 수렴 과정이 완만하게 일어남을 알 수 있고 이는 퍼지 규칙을 로봇의 분포를 고려하여 작성하였기 때문에 예상되었던 결과이기도 하다. 즉 로봇이 다른 로봇들의 분포를 참조하면서 이동하기 때문에 자연스럽게 모든 로봇들의 분포가 고르게 됨으로써 적합도가 완만하게 증가 폭선을 그리게 된다.

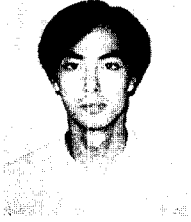
6. 결 론

본 논문에서는 자율 이동 로봇의 행동에 대한 시뮬레이션에 대해 알아보았다. 많은 과제가 있으나 여기서는 등간격 원 형성이라는 과제를 수행하는 것을 목표로 하였다. 이를 위한 알고리즘을 알아보았으며 여기에 퍼지 시스템을 이용하여 더욱 정교한 알고리즘을 구현하였다. 여기서는 다루지 않았으나 이 알고리즘을 조금만 변형하면 어떤 다각형도 등간격으로 형성할 수 있다. 즉, 국소적 영역(센서 반경에서의 몇 가지 기본 행동의 상호 작용을 통해 전체 행동(등간격 원 형성을 발현하였다. 또한 퍼지 시스템을 적용하지 않은 것과 적용한 것을 비교하기 위해 FM값을 도입하였다. 이는 관측 시간 동안 얼마나 많은 수의 로봇이 등간격 원 형성을 위해 제 위치에 있는가에 대한 확률 값의 합이다. 그러므로 FM값이 1에 가까

울수록 더 좋은 행동을 보였음을 알 수 있는데, 퍼지 시스템을 사용하면 이 수치가 향상됨을 보였다. 아울러 로봇의 행동 중에는 파라미터의 조정에 의해 카오틱한 행동이 나타나게됨을 알아보았다. 먼저 그래프를 통해 임의의 로봇의 이동 궤적이 카오틱함을 살펴본 후에 이를 리아프노프 지수를 사용하여 수치적으로 검증해 보았다.

참고문헌

- [1] C. Langton, "Artificial Life" in Artificial Life, C. Langton (ed.), Addison-Wesley, 1-47, 1989.
- [2] M. J. Mataric, "Designing Emergent Behaviors: From Local Interactions to Collective Intelligence," Proc. 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, 432-441, 1993.
- [3] 강훈, 최병걸, 제갈욱, "퍼지 셀룰라 오토마타를 이용한 자율 이동 로봇 에이전트의 창발적 행동," 인공지능, 신경망 및 퍼지 시스템 종합학술대회 논문집, 291-296, 1997
- [4] 강훈, 조용근, 제갈욱, "퍼지 시스템을 이용한 자율 이동 로봇군의 시뮬레이션," 한국 퍼지 및 지능 시스템학회 추계학술대회 논문집, 7(2), 445-448, 1997
- [5] C. R. Kube and H. Zhang, "Collective Robotic Intelligence," Proc. 2nd Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, 460-468, 1993.
- [6] O. Miglino, H. H. Lund, and S. Nolfi, "Evolving Mobile Robots in Simulated and Real Environments," Artificial Life, 2(4), 417-434, MIT Press, 1996.
- [7] 홍연준, 장병탁, "비동기 귀환 신경망을 이용한 이동 로봇의 협조행동 학습," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, G, 2286-2289, 1997
- [8] 심귀보, 전효병, 이동욱, "동적으로 변환하는 환경에서 강화 학습에 의한 자율이동로봇의 행동계획," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, G, 2290-2292, 1997
- [9] 김장현, 공성곤, "클러스터링에 의한 자율이동로봇의 정렬 알고리즘 구현," 한국퍼지 및 지능시스템학회 추계학술대회 논문집, 7(2), 79-82, 1997
- [10] F. C. Moon, Chaotic and Fractal Dynamics: An Introduction for Applied Scientists and Engineers, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [11] Thomas S. Parker and Leon O. Chua, "Chaos: A Tutorial for Engineers," Proc. IEEE, 75(8), August 1987.
- [12] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Informal Control, 8, 338-353, 1965.
- [13] Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I,II," IEEE Trans. on Systems, Man, And Cybernetics, 20(2), 404-435, April 1990.



제갈 욱(Uk Jae-Kal)

1996년 2월 : 중앙대학교 제어계측학과
(공학사)

1998년 2월 : 중앙대학교 제어계측학과
대학원(공학사)

주관심분야 : 퍼지시스템 및 지능 제어,
카오스 시스템

강 훈(Kang Hoon)

1982년 2월 : 서울대학교 공학사

1984년 2월 : 서울대학교 대학원 공학석사

1989년 9월 : GEORGIA INST. OF TECH. 공학박사

1989년 9월~1990년 9월 : GEORGIA TECH. POST DOCTOR

1991년 1월~1991년 12월 : AUTOMATION CONCEPTS &
SYS., INC. 연구원

1992년 3월~1995년 2월 : 중앙대학교 제어계측공학과 조교수

1995년 3월~현재 : 중앙대학교 제어계측공학과 부교수

1992년 9월~1997년 12월 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 재무위원

1996년 1월~1996년 12월 : 한국통신학회 편집위원

1997년 9월~현재 : 제어자동화시스템공학회 편집위원

1997년 9월~현재 : 대한전자공학회 논문지 편집위원

1998년 1월~현재 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 학술위원

주관심분야 : 퍼지시스템 및 지능제어, 카오스 시스템, 신경망 패턴인식 및 제어, 진화연산시스템 및 인공생명기법