

다중홉 통신 기법을 활용한 네트워크 로봇의 협력적 경로 탐색

준회원 정진홍*, 종신회원 김성륜*

Wireless Multihop Communications for Frontier cell based Multi-Robot Path Finding with Relay Robot Random Stopping

Jinhong Jung* Associate Member, Seong-Lyun Kim* Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 다중 로봇 (multi-robot)을 활용한 응용분야 중, 미지의 영역에 대한 탐색 (exploration) 능력을 향상시켜서, 주어진 미로 (maze)에서 다중 로봇이 통신을 통해서 협력적으로 출구를 찾아가는 효율적인 방안을 제안하였다. 즉, 미로 형태의 임의의 환경을 생성한 후, 로봇을 무작위로 배치시켜 상호간에 통신을 통하여 출구로 신속히 모두 빠져나오는 문제를 다루고 있다. 미로탐색을 위해 다중 로봇의 지역 탐색에서 사용되었던, 프론티어 셀, 셀 유틸리티등 기존 연구를 활용하였다. 또한 로봇간의 다중홉 무선 통신 (multihop wireless communications)을 위해서 이동성 (mobility)에 강한 일종의 홉기반 (hop-by-hop) 라우팅인, 랜덤 베스킷 볼 라우팅을 채용하였다. 또한, 출구를 찾은 로봇이 일정한 확률에 의거하여 출구 앞에서 정지하거나 혹은, 빠져나가는 의사 결정을 하여, 이 확률적인 결정이 다른 로봇의 행동에 어떻게 영향을 주는지를 실험적으로 조사하였다. 즉, 출구를 찾은 로봇이 현재 위치에서 멈추어서, 통신 중계 지점 (relay)으로 어떻게 활동되어야 최적인지에 대한 문제를 모의 실험을 통해 파악해보았다.

Key Words : Wireless multihop communications, Multi-robot, Cooperative path finding, routing

ABSTRACT

This paper presents an algorithm for the path-finding problem in unknown environments with cooperative and commutative multi-robots. To verify the algorithm, we investigate the problem of escaping through the exit of a randomly generated maze by multi-robots. For the purpose, we adopt the so called *frontier cells* and *cell utility functions*, which were used in the *exploration* problem for the multi-robots. For the wireless communications among the mobile robots, we modify and utilize the so called the *random basket routing*, a kind of hop-by-hop opportunistic routing. A mobile robot, once it finds the exit, will choose its next action, either *escape immediately* or *stay-and-relay the exit information for the others*, where the robot takes one action based on a given probability. We investigate the optimal probability that minimizes the average escaping time (out of the maze to the exit) of a mobile robot.

※ 이 논문 또는 저서는 2005년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00534).

* 연세대학교 전기전자공학부 무선자원최적화 연구실 (jung_jinhong@ramo.yonsei.ac.kr), (slkim@ramo.yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-10-431, 접수일자 : 2008년 10월 2일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 28일

1. 서 론

다년간 재난 상황의 구조 로봇, 군사적 목적의 정찰 로봇, 우주에서 탐사 로봇 등 다양한 응용분야에 있어서 로봇의 활용에 대한 연구들이 많이 이루어져왔다^[1]. 이런 응용분야는 주변 환경에 대한 탐사 (exploration) 기법들이 주로 연구되고 제안되어 왔다. 이제까지의 주류로서 이 분야를 이끌어 왔던 연구는 센서를 통한 정확한 탐지 능력^[2], 임의의 환경에서 자신의 위치를 파악하고 수집된 정보를 이용한 지도 형성 기법^[3], 목적지까지의 경로 탐색 알고리즘 기법^[4], 로봇의 정확한 조정 기법들에 대한 것들이었다. 그런데, 앞선 연구들은 보통 단일 로봇의 성능 향상에만 집중되어 왔다.

하지만, 통신 산업과 기술이 성장함에 따라 네트워크 다중 로봇을 이용하여 단일한 임무를 수행해 나가는 연구들이 등장하기 시작하였다. 특히, 에드혹 환경에서의 멀티 흡 통신 기술이 발전함에 따라서, 임의의 환경을 다중 로봇을 이용하여 협력적으로 탐색하는 문제에 많은 학자들이 관심을 가지게 되었다. 통신을 통해 로봇들이 수집한 환경에 대한 정보를 상호간에 교환하고 협력하는 알고리즘을 이용하여 임무를 보다 정확하고 빠르게 수행할 수 있도록 하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 로봇 기술과 통신 기술이 접목되 출구가 임의의 위치에 무작위로 자리하게 된다. 모든 로봇이 멀티 흡 통신을 활용하여 상호간에 정보를 교환하고 협력하면서 출구에 빠른 시간에 도착하도록 하는 것이다. 이 문제는 본 저자들의 선행연구^[5]에 의해서 시도되었다. 본 연구와 선행 연구^[5]와는 차이점은 사용된 다중흡 통신 기법에 있어서 일종의 우선 순위 (priority)를 두어서 우선 순위가 높은 데이터 (특정 로봇의 목표 지점)를 로봇간에 먼저 전송한다는 점, 그리고 출구를 찾은 로봇에게 확률적으로 미로를 빠져나가는 의사결정을 하게 한 점, 마지막으로 주어진 로봇이 목표지점을 찾아가는 알고리즘에 있어 로봇이 일종의 순 효용도 (net utility)를 고려하였다는 점에서 차이가 있다.

본 연구는 기존에 알려진 프론티어셀을 기반으로 한 탐색 기법^[6] 및 유틸리티를 활용한 협력 기법^[7]을 활용하였다. 일반적으로 이 기법들은 새로운 종류에 기여를 하기 위해서, 다음과 같은 문제를 고려하였다. 문제는 그림 1과 같은 임의의 미로 환경을 구성하고, 그 미로 속에 다중 로봇과 미지의 지역을 빠른속도로 전역 탐사 (exploration)하는 것에 목적을 두고 있다. 반면, 본 연구에서 다루는 문제는 주어진 미로의 출구로 빠르게 빠져나가는 것이 목표이므로 지역 전체를 탐사할 필요는 없다는 점이 차이점이다. 그럼에도 불구하고 위 [6] [7] 기법들은 본 연구의 문제에도 활용 가능하여 응용하였다.

본 논문에서 알고리즘을 설계하는데 가장 중점적으로 두었던 주안점은 다음과 같다. 즉, 기존에 잘 알려진 탐색 기법을 다중흡 통신 기법과 효율적으로 접목시켜 어떻게 알고리즘의 성능 향상을 이끌어 낼 것인가의 이슈를 해결하고자 했다. 이를 위해서, 첫째, 로봇간의 다중흡 통신 기법으로 연세대학교 전기전자공학부 무선자원 최적화 연구실에서 개

구^[5]에 의해서 시도되었다. 본 연구와 선행 연구^[5]와는 차이점은 사용된 다중흡 통신 기법에 있어서 일종의 우선 순위 (priority)를 두어서 우선 순위가 높은 데이터 (특정 로봇의 목표 지점)를 로봇간에 먼저 전송한다는 점, 그리고 출구를 찾은 로봇에게 확률적으로 미로를 빠져나가는 의사결정을 하게 한 점, 마지막으로 주어진 로봇이 목표지점을 찾아가는 알고리즘에 있어 로봇이 일종의 순 효용도 (net utility)를 고려하였다는 점에서 차이가 있다.

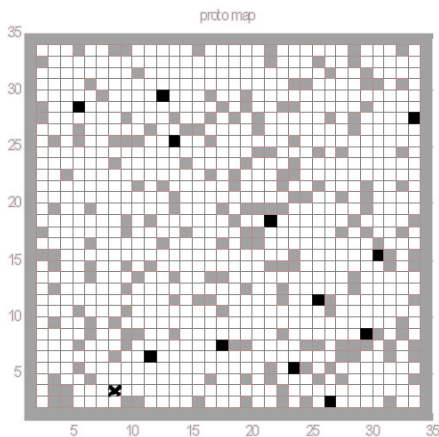


그림 1. 랜덤 미로. 검정색이 로봇, 하얀색이 빈공간, 회색이 장애물, X표시가 출구
Fig. 1. Random maze. Black denotes robot; white, vacancy; grey, obstacle; X mark, exit



그림 2. 프론티어 셀. 회색이 장애물, 백색이 빈공간, 검정색이 미탐색, 점선이 프론티어셀
Fig. 2. Frontier cell. Black denotes unexplored area; white, vacancy; grey, obstacle; dotted line, frontier cell

발한 랜덤 베스킷볼 라우팅 기법 [8]을 활용하였다. 이는 일종의 휴 기반 opportunistic 라우팅으로, 이 동중인 노드간의 통신에 최적의 성능을 발휘하도록 설계되어 있다. 둘째, 탐색에 필요한 출구 정보를 찾은 로봇은 출구를 바로 빠져나가야 되는지, 아니면 출구 정보를 다른 로봇들에게 전달하며 다른 로봇들의 길 찾기에 도움을 줘야할지 선택을 하는 점을 고려하였다. 이를 위해서 본 논문에서는 확률적인 접근 방법을 선택하였다. 이 방법은 출구를 찾은 로봇이 확률적으로 출구를 빠져나갈지를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 확률적 결정이 어떻게 출구를 빠져 나가는 시간을 줄일 수 있는지를 모의 실험을 통해서 검증하고 있다.

제 II 장에서는 위에서 언급한 각 기법들을 소개하고, 다중 로봇의 미로 찾기 기법을 위한 세부적인 방법 역시 소개한다. 제 III 장에서는 설계된 미로 탐색 기법을 실험하고 그 결과를 분석한다. 제 IV 장은 논문의 결론을 다루고 있다.

II. 미로 탐색 기법의 구성요소

2.1 프론티어 셀 기반의 탐색⁵⁾

오래전부터 알려져 온 미로의 오른쪽 벽을 따라 나가는 알고리즘 (우수법)은 다양하게 존재한다^{[10][11]}. 하지만, 우수법은 복도 형태의 미로에서만 가능하고 넓은 공간형태의 환경에서는 적절치 않다. 문제의 환경은 장애물들이 넓은 공간에 무작위의 위치와 방향으로 산재해 있기 때문에, 우수법과 같은 방법으로는 풀어 나갈 수 없다. 이런 환경에서는 프론티어 셀을 이용한 탐색 기법이 [6] 효율적으로 활용될 수 있다.

프론티어셀이란 이미 탐색되거나 알려진 지역과 아직 탐색되지 않은 지역 사이에 존재하는 경계 부분이다. 만약 로봇이 이 프론티어 셀로 이동하게 된다면, 로봇은 미탐색지역을 탐색하게 되고 새로운 정보를 얻을 수 있게 된다. 반대로 프론티어셀이 아닌 곳은 이동하여도 새로운 정보를 얻을 수 없다. 그러므로 적절한 프론티어셀을 선택함으로써 로봇은 지속적으로 자신이 보유한 지도 정보를 확장하고 완성시킬 수 있다.

2.2 지도 정보의 저장

실험환경은 그림 1과 같으며, 32x32 격자로 구성되어 있으며, 로봇이 통과할 수 없는 장애물은 전체 공간에 0.2의 확률로 임의로 분포되어있다. 로봇들

표 1. 로봇이 가지고 있는 맵 정보를 숫자로 표기
Table 1. Cell value for robot map

Item	Value ($V_{x,y}$)
장애물	2
빈공간	0.1
외벽	3
로봇	19
출구	16
미탐색 지역	20

과 출구 또한 임의의 위치에 배치된다. 각 로봇들은 환경에 대한 정보를 저장하기 위해 32x32 배열을 가지며, 탐색된 정보를 해당 셀 마다 표 1에 표기된 바와 같이 숫자로 표기하여 저장하였다. 값은 임의로 지정할 수 있으나, 빈공간과 그렇지 않은 공간간에는 두 차수 이상의 차이가 있어야, 3절에서 소개하는 기법을 사용할 수 있다.

2.3 등고선법을 이용한 경로설정

로봇이 위치한 곳에서부터 임의의 목적지까지 이동하기 위한 최적의 경로는 등고선법의 개념을 이용하여 구하였다. 로봇이 위치한 곳은 0이라는 숫자를 쓰고, 로봇과의 사이에 직접적인 장애물이 없는 인접 셀까지의 거리를 인접 셀에 수치로 표시한다. 기표기한 셀과 벽이 없이 인접한 셀에는 다시 셀간의 거리를 더하여 인접셀에 표기한다. 이와 같이 목적지가 위치한 곳까지 번호를 매겨서 가장 적은 숫자가 나오는 경로를 최단 거리 경로로 잡는 것이 등고선법의 개념이다. 예를 들어, 셀간 거리가 모두 1로 동일하다면, 로봇이 있는 셀에는 0, 로봇과 벽 없이 인접한 셀은 1이 되고, 다시 벽 없이 인접한 셀은 2가 되는 것이다. 이 개념을 바탕으로 식 (1), (2)를 통해 로봇으로부터 각 셀까지의 거리를 업데이트 한다⁷⁾. $A_{x,y}$ 를 로봇에서 부터 x, y 좌표에 해당되는 셀까지의 계산된 거리값이라고 하자. 이때 장애물, 빈공간, 외벽, 로봇, 미탐색지역을 각각 거리계산에 고려하기 위해서 표 1과 같은 $V_{x,y}$ 를 사용하였다. $V_{x,y}$ 는 로봇으로부터 x, y 좌표의 셀까지 거리를 구할 때 일종의 가중값으로 아래 (2)와 같이 사용된다. $V_{x,y}$ 를 통해, 본 논문에서 사용하는 $A_{x,y}$ 는 [7]에서 x, y 좌표 셀의 상태만을 고려하여 장애물을 인식하지 못하는 문제점을 보완하였다.

1) 초기 설정

$$A_{x,y} = \begin{cases} 0 & (x,y) \text{가 로봇일 때} \\ \infty & (x,y) \text{가 로봇이 아닐 때} \end{cases} \quad (1)$$

2) 루프 업데이트

$$A_{x,y} = \min \left[\begin{array}{l} A_{x+\Delta x, y+\Delta y} + \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \\ \cdot \{V_{x,y} + V_{x+\Delta x, y+\Delta y}\} / 2 \\ \lfloor \Delta x, \Delta y \in \{-1, 0, 1\} \rfloor \end{array} \right] \quad (2)$$

루프 업데이트는 수렴할 때까지 계속 이루어져야 한다. 수렴하고 난 후에는 목적지에서부터 시작하여, 주변 셀 중 가장 낮은 값을 가지는 셀을 따라 가면 로봇까지 도착하게 된다. 이 경로가 최단거리 경로가 된다.

예를 들어, 그림 3과 같은 지도 정보를 로봇이 가지고 있을 때, 로봇의 위치는 (4,3) 이 된다. 이때

(1,2) 지점이 로봇의 목적지라고 가정을 하자. 이 맵 정보를 이용하여 (1), (2)의 수식을 통해 최단 경로를 구하면, 그림 4와 같은 거리정보를 얻게 되고, 최단 거리는 목적지 인접셀 중 가장 작은 값을 가지는 셀을 따라가면 (1,2)→(2,3)→(3,3)→(4,3)를 구할 수 있다.

2.4 유틸리티를 이용한 협력 모델⁷⁾

유틸리티란 로봇이 어느 지점에 도달하게 되면, 그 지점으로부터 새로 얻을 수 있는 정보의 양이라고 정의한다. 단일 로봇의 경우 프론티어셀의 유틸

20	20	20	20	2	0.1
20	20	20	0.1	0.1	0.1
20	20	20	0.1	0.1	0.1
20	20	2	2	0.1	0.1
0.1	0.1	0.1	19	0.1	2
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
20	2	2	2	2	0.1

그림 3. 검정색은 미탐색 지역으로 20, 백색은 빈공간으로 0.1, 회색은 장애물로 2, 밝은 회색은 로봇으로 19로 좌표 (4,3)에 위치

Fig. 3. Black cell is unexplored area with value 20, white cell is vacancy with value 0.1, grey cell is obstacle with value 2, light grey is robot with value 19 at coordinates (4,3)

20	20	20	20	1.39	0.48
20	20	20	0.38	0.34	0.38
20	20	20	0.28	0.24	0.28
20	20	1.15	1.05	0.14	0.24
0.3	0.2	0.1	0	0.1	1.15
0.34	0.24	0.14	0.1	0.14	0.24
20	1.29	1.19	1.15	1.19	0.28

그림 4. 최단 경로는 목적지 인접셀 중 가장 작은 값을 가지는 셀을 따라가면 (1,2)→(2,3)→(3,3)→(4,3)와 같이 구해진다

Fig. 4. Steepest decent route (1,2)→(2,3)→(3,3)→(4,3)

리티는 쉽게 구할 수 있는 반면, 다중 로봇은 그렇지 않다. 인접한 프론티어셀에 두 로봇이 가면, 새로 얻을 수 있는 정보가 겹치게 되고, 총 얻을 수 있는 정보의 양은 줄어들기 때문이다. 그래서 로봇들은 상호간에 충분한 거리를 유지하면서 탐색해야 더 빠르게 협력적으로 문제를 해결할 수 있다.

초기 조건으로 모든 프론티어셀 t 는 같은 유틸리티 U_t 를 가지고 시작하게 된다. 한 로봇이 자신의 목표 지점으로 t' 을 선택하게 되면, 목표 지점 t' 의 주변 노드들은 로봇에 의해 탐색될 것이기 때문에 그 유틸리티를 낮추어주어 다른 로봇의 중복 접근을 방지한다.

본 논문에서는 이를 위해서 [7]에서 사용된 기법을 활용하였다. 따라서 주어진 로봇에서 최적 목적지는 해당셀의 유틸리티 값에서 그 셀까지의 거리 $A_{x,y}$ 를 뺀 순 유틸리티 값 (net utility)이 최대인 셀이 된다. 단, 출구에 대한 정보를 얻게 되면 로봇의 목적지는 출구가 된다.

2.5 데이터 우선 순위를 기반으로 한 다중홉 무선 통신 기법

다중 로봇이 효율적으로 협력하면서 임무를 수행하기 위해서는 로봇간의 통신이 중요하다. 로봇은 수시로 자신이 수집한 임의의 환경에 대한 정보를 서로 공유한다. 또한, 자신이 목표로 다음 목적지로 설정한 프론티어셀 정보를 빠르게 주변으로 전달하여 효율적인 탐색이 이루어지도록 해야 한다. 이를 위해서는 적절한 통신 기법이 요구된다. 특히 다중홉 기법의 무선 통신 기법이 요구되는데, 이를 위해서 랜덤 베스킷 볼 라우팅 기법 (Random basketball routing algorithm, BR) [8] [9] 이 그 역할을 한다고 판단하였다. 그 이유는, 기존의 애드혹 망에서 주로 사용되는 AODV나 DSR은 임의의 환경에서 역동적으로 움직이는 노드들간의 통신에는 단점을 가진 것으로 알려져 있지만, BR 경우는 역동적으로 움직이는 노드들간의 통신에 오히려 적합하도록 설계되었기 때문이다.

BR은 다중홉 통신을 기반으로 media access control 계층과 routing 계층을 하나의 계층으로 통합한 기법으로써, 중계 확률 p 라는 주요 변수를 통해 일정 시간에 $1-p$ 의 확률로 전송 노드가 되거나 p 의 확률로 중계 노드가 된다. 이 p 를 최적으로 조절함으로써, 간단히 routing 과 MAC을 통제할 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한, 앞서 소개된 탐색 기법은 로봇이 서로 공

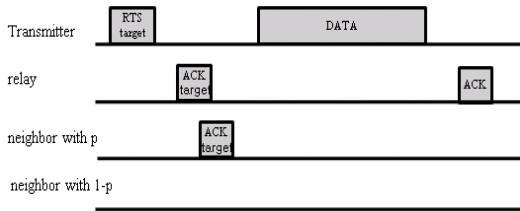


그림 5. 수정된 BR의 signaling process.
Fig 5. Modified signaling process of BR.

유해야 할 정보가 두가지가 있는데, 이는 (1) 목적지 셀 (2) 전체 맵 정보가 있다. (1)은 정보의 양이 적고 신속하게 주변 로봇들에게 빠르게 전달되어야 한다. 이는, 주변 로봇들의 목적지 정보를 바탕으로 자신의 목적지를 정하는 협력적 탐색 기법 때문이다. 반면, (2)는 상대적으로 정보의 양이 많고, 정보가 주변만이 아닌 멀티 홉을 통해 먼 거리에 있는 로봇에게까지 전달되어야 한다. 만약, 정보의 성격이 판이하게 다른 (1)과 (2)를 하나의 DATA에 담아 전송하게 된다면, (2)가 전송되기를 기다리는 시간동안 (1)의 전송이 지연되어 로봇간의 협력이 저하될 수 있다. 이런 특성을 고려하여 기존 BR의 signaling process를 그림 5와 같이 수정하였다. RTS와 ACK에 (1)의 정보를 추가하여 전송함으로써, (1)을 전송하기 위한 추가적인 signaling process 없이 주변 로봇간에 정보를 자연스럽게 공유할 수 있다. (2)는 멀티 홉 통신을 통해 먼 거리에 있는 로봇에게까지 전달 될 수 있다.

2.6 확률 모델에 따른 중계 로봇의 결정

정의된 문제는 다중 로봇들이 협력을 통해서 미로를 빠르게 빠져 나오는 것이다. 미로를 빠져 나오기 위해서는 상호간에 협력도 잘 이루어져야 하지만, 출구 정보를 발견하거나 알게 되었을 때는 이를 다른 로봇에게 빠르게 전달해야만 한다. 출구 정보를 빠르게 전달하기 위한 기법으로 확률적인 정지를 통한 중계 기지화를 제안한다.

정지 확률 P_h 에 의해 출구까지의 경로 정보를 발견/습득한 로봇은 그 위치에 정지하여 다른 로봇에게 출구 정보를 전달하기 위한 중계 기지가 되거나, 출구를 즉시 빠져 나온다. 단, 출구 정보는 입수했지만, 출구까지의 경로 정보가 없으면 계속해서 탐색을 한다. P_h 가 1이면 모든 로봇이 정지하게 되고 반대로 P_h 가 0이면 모든 로봇은 정지하지 않고 출구로 바로 나오게 된다. 그림 6은 P_h 가 1일 경우의 예시이다. (가)에서 로봇 ①이 목적지를

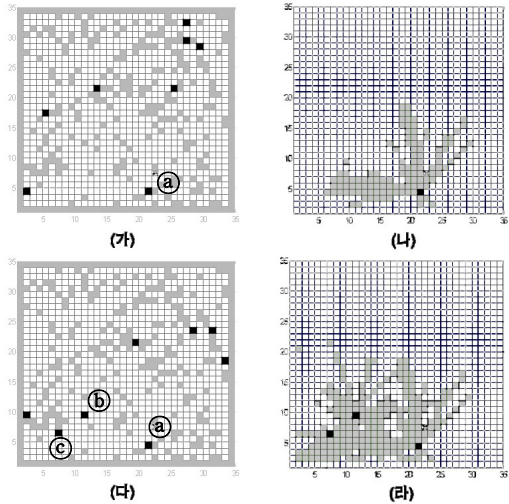


그림 6. 정지를 통한 중계기지화. (가) 로봇 ① 출구 발견 (나) 로봇 ①의 통신 범위 (다) 로봇 ②③ 출구 정보 수신 (라) 로봇 ①②③의 통신 범위
Fig. 6. Halt with probability for relay point. (가) robot ① finds exit (나) communication coverage of robot ① (다) robot ②, ③ receive information about exit (라) total communication coverage of robot ①②③

발견하고 그 자리에 멈추어서 중계기지가 된다. (나)는 로봇 ①이 중계기지가 되어 다른 로봇을 기다리며 만들게 되는 통신 범위가 된다. 그림 (다)에서는 로봇 ②, ③이 로봇 ①로부터 출구에 대한 정보를 수신하게 된다. 그 후 수신한 자리에 멈추어서 중계기지가 되어 (라)와 같이 통신 범위를 더 크게 넓히게 된다. 같은 방식으로 모든 로봇이 출구 정보를 확인할 때까지 중계 기지화를 하다가, 모든 로봇이 출구를 알게 되면 출구로 빠져 나온다.

III. 모의 실험

3.1 기본 가정

다중 로봇을 활용한 연구분야에는 다양한 주제들에 여전히 산재해 있다. 로봇의 설계 및 통제, 로봇의 위치 파악 기법 설계, 센서의 설계 및 판독 방법에 이르기까지 아직 연구 중인 문제들이 많다. 본 논문의 주목적은 통신 기법을 활용하여 다중 로봇의 미로 탐색 기법의 성능 향상을 이끌어내는데 있으므로, 다음과 같은 수용 가능한 가정들을 한다.

실험에 사용하는 로봇은 적외선 기반의 센서 장비를 갖추어서 360도 방향으로 최대 3셀의 거리만큼 측정할 수 있고, 장애물 너머로는 측정할 수 없다.

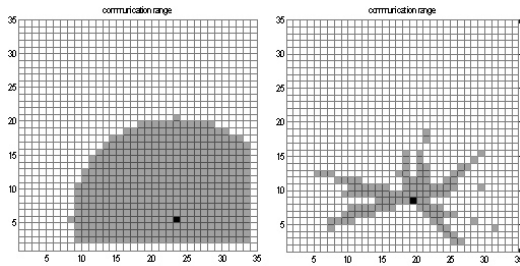


그림 7. 통신 반경. 좌측은 장애물 없을 때, 우측은 장애물이 있을 때

Fig. 7. Communication range. Without obstacles (left). With obstacles (right)

그림 7은 실험에서 가정한 통신모델이다. 단일 채널을 사용하였고, 전파신호는 장애물을 통과하지 못하고 Line of sight (LOS) 상태에서만 상호간의 통신이 가능하다. 프로토콜 모델을 사용하였으며, 이는 간단히 통신범위 안에 있으면 통신이 가능하고, 통신범위 밖에 있으면 통신이 불가능하다고 가정하였다.

3.2 다중 로봇 탐색 기법 검증

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 32x32 크기의 임의의 환경 속에 총 4대의 로봇을 배치하였다. 로봇의 통신 반경은 15셀이고, 센서의 반경은



그림 8. 총 4대의 로봇을 이용한 협력적 탐색 과정. 검정색이 탐색된 공간, 회색이 미탐색 공간

Fig. 8. Cooperative exploration with 4 robots. Black area is explored, grey area is unexplored

3셀이다. 판단기준은 모든 로봇이 출구를 통해 빠져 나갈 때까지의 시간으로 하였으며, 마지막 로봇이 빠져 나가는 시간을 임무 완료 시점으로 삼았다.

그림 8은 매 10 단위 시간마다 저장된 실험의 과정을 보여준다. 초기에는 로봇 R_1, R_2, R_3, R_4 가 서로 통신범위 밖으로 위치하여 각자 탐색을 하며 각자의 지도를 완성해 나간다. 3번째 줄에서는 R_1 과 R_3 가 서로 통신을 하여 서로의 지도 정보를 공유한 것을 살펴볼 수 있다. 5번째 줄에서는 R_3 의 지도 정보가 멀티 홉 기법을 통해 R_4 를 거쳐서 먼 거리에 있는 R_2 에게까지 전달이 되는 것을 확인할 수 있다. 6번째 줄에서 R_1 이 출구를 발견하고 정지하여 중계 기지화 된다. 7번째 줄에서는 모든 로봇이 출구에 대한 정보를 가지게 되고 모두 출구를 향해 움직이게 된다.

3.3 결과 분석

성능의 측정은 두 가지 변수를 조정하며 이루어졌다. 첫 번째 변수는 중계기지화를 위한 P_h 로서 0부터 1까지 변화시켜 보았다. 두 번째 변수는 로봇의 숫자로, 1부터 15까지 변화시켜보았으며, 실험의 신뢰도를 위해서 매 설정마다 500회의 실험을 실시하여 모든 로봇이 빠져나가는 시간을 임무완료 시간으로 하여 다음의 그래프들을 얻었다. x축은 로봇수의 변화를 나타내며, y축은 임무 완료 시간을 나타낸다. 5종류의 마커를 통해 P_h 의 변화를 나타내었다.

그림 9는 두 가지 변수의 변화에 따른 임무 완료 시간을 보여주고, 그림 10은 임무 완료시간의 표준편차를 보여준다.

그림 9를 통해, P_h 가 0 또는 1을 가져, 바로 출구로 빠져나가거나 모두 정지하여 중계기지화 되는

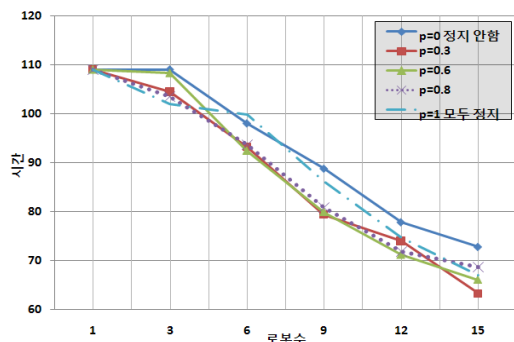


그림 9. 다중 로봇을 이용한 평균 미로 탐색 임무 완료 시간
Fig. 9. Average exploration time

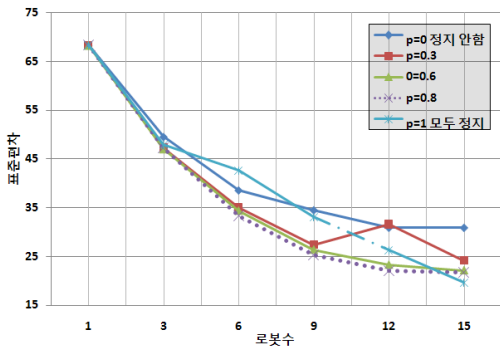


그림 10. 다중 로봇을 이용한 미로 탐색 임무 완료 시간의 표준 편차

Fig. 10. Standard deviation of exploration time

경우보다, 0과 1의 사이의 값을 가질 때 더 빨리 임무를 완료하여 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히, P_h 가 0.6과 0.8의 값을 가질 때 가장 우수한 성능을 보인다. 이를 통해 정지를 통한 중계 기지화 기법이 효과적으로 성능을 향상시키는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 변수, 로봇 숫자의 변화에 따른 결과는 모든 P_h 에서 로봇의 수가 증가함에 따라서 최종 임무 완료 시간이 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이것은 로봇들이 효과적으로 협동하면서 임무를 수행하는 것을 보여주며, 더 많은 로봇을 사용 할수록 더 좋은 성능을 보임을 나타낸다.

또한, 그림 10을 통해 임무 완료시간의 표준편차를 볼 수 있는데, 표준편차 역시 P_h 가 0.6과 0.8의 값을 가질 때 가장 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 로봇 수가 증가함에 따라서 크게 표준편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 로봇의 숫자가 늘어남에 따라서 임무 수행 시간이 안정화되는 것을 뜻하며, 이는 다수의 로봇이 서로 협력을 하여 상호적으로 그 능력을 보완하고, 소수의 로봇이 임무 수행할 때보다 랜덤성이 줄어들기 때문에, 로봇의 숫자가 늘어남에 따라 그 성능이 안정화되는 것으로 볼 수 있다. 제한된 자원에서 다중 로봇을 활용한 임무 수행을 할 때에 소수의 고성능 로봇보다, 다수의 저성능 로봇이 더욱 안정화된 임무 수행을 할 수 있다는 것을 시사한다.

IV. 결 론

본 논문은 다중 로봇이 임의의 환경에서 협력하여 출구로 빠져나오는 문제를 다중홉 통신 기법 관

점에서 살펴보았다. 즉, 탐색 알고리즘과 다중홉 통신 기법을 효율적으로 결합하였고, 출구를 찾은 로봇의 확률적인 중계 기지화를 통한 탐색 능력의 향상도 이끌어 내었다. 실험 결과를 통해서 로봇의 수가 늘어남에 따라 임무 수행 시간이 줄어들 뿐 아니라, 상호간에 협력으로 능력을 보완해주어 신뢰성이 높은 안정적인 임무를 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 다수의 로봇을 이용한 임무수행이 더욱 유리하다는 것을 보이고, 다수의 로봇간에 통신을 보다 효율적으로 제어할 수 있는 연구가 필요함을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] G. Bekey and J. Yuh, "The status of robotics," IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol.15, No.1, pp.80-86, 2008.
- [2] P. I. Corke and S. A. Hutchinson, "A new partitioned approach to image-based visual servo control," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.17, No.4, pp.507-515, 2001.
- [3] A. Howard "Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters," Int. Journal of Robotics Research. Vol.25, No.12, pp.1243-1256, 2006
- [4] V. S. Gordon and Z. Matley, "Evolving sparse direction maps for maze pathfinding," Proc. IEEE Congr. EVol.Comput., 2004.
- [5] S. J. Park, J. H. Jung, S.-L. Kim, "Cooperative Path-finding of Multi-robots with Wireless Multihop Communications," Proc. WIOPT Workshop on Wireless Multihop Comm. in Networked Robotics, 2008.
- [6] B. Yamauchi, "Frontier-based exploration using multiple robots," Proc. Int. Conf. Autonomous Agents, 1998.
- [7] W. Burgard, M. Moors et al.. "Coordinated multi-robot exploration," IEEE Trans. Robotics, Vol.21, No.3, pp.376-386, 2005.
- [8] D. M. Kim, Y. J. Hwang, S.-L. Kim, "Random basketball routing for ZigBee based sensor networks," Proc. IEEE VTS Asia Pacific Wireless Comm. Symp., 2007.
- [9] Y. J. Hwang and S.-L. Kim, "The capacity

of random wireless networks,” to appear in IEEE Trans. Wireless Comm., 2008.

- [10] Ivan E. Sutherland, “A method for solving arbitrary-wall mazes by computer,” IEEE Trans. Computers, Vol.18, No.12, pp.1092-1097, 1969.
- [11] Robert A. Dain, “Developing mobile robot wall-following algorithms using genetic programming,” Applied Intelligence, pp.33-41, 1998.

정진홍 (Jinhong Jung)

준회원



2008년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사
2008년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사 과정
<관심분야> 무선네트워크, 네트워크 로봇

김성륜 (Seong-Lyun Kim)

종신회원



1994년 8월 KAIST 경영과학 (Management Science) 공학박사
1994년 9월~1998년 6월 ETRI 선임연구원
1996년 9월~2000년 8월 스웨덴 KTH, 방문 연구원, 조교수
2000년 9월~2004년 8월 ICU 조교수, 부교수
2004년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수, 교수
<관심분야> 무선네트워크, 무선자원관리, 정보이론, 네트워크 로봇