

멀티로봇에 대한 전체영역 경로계획

Complete Coverage Path Planning for Multi-Robots

남상현¹, 신익상², 김재준³, 이순걸^{3,✉}
Sang-Hyun Nam¹, Ik-Sang Shin², Jae-Jun Kim³ and Soon-Geul Lee^{3,✉}

1 청주대학교 전자정보공학부 (Department of Electronics and Information Engineering, Cheong-Ju Univ.)

2 농촌진흥청 국립농업과학원 (National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration.)

3 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyunghee Univ.)

✉ Corresponding author: soonguel@gmail.com, Tel: 031-201-2945

Manuscript received: 2008.11.18 / Accepted: 2008.4.6

This paper describes a path planning algorithm, which is the minimal turning path based on the shape and size of the cell to clean up the whole area with two cleaning robots. Our method divides the whole cleaning area with each cell by cellular decomposition, and then provides some path plans among of the robots to reduce the rate of energy consumption and cleaning time of it. In addition we suggest how to plan between the robots especially when they are cleaning in the same cell. Finally simulation results demonstrate the effectiveness of the algorithm in an unknown area with multiple robots. And then we compare the performance index of two algorithms such as total of turn, total of time.

Key Words: Complete Coverage Path Planning (전체영역경로계획), Cellular Decomposition (셀분할), Cleaning Robot (청소로봇), Multi-robot (멀티로봇)

기호설명

CP = the critical point of obstacle

P = the center of cell is represented a centroid

FN = the network that has the flow

SP = the sub-points of the adjacent two cells

1. 서론

최근 자율 이동 청소로봇의 성능지표 개발과¹ 경로 계획에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이동로봇에 대한 경로 계획은 크게 PTP 방식(Point-to-Point)과² 전체영역 경로계획(CCPP, Complete Coverage Path Planning)방식으로³⁻¹⁵ 분류된다. PTP 방식이란 우편배달 로봇과 같이 주어진 두 점 사이

를 최적의 경로를 이루면서 이동하는 방법을 말하며, CCPP 방식은 청소로봇 또는 지뢰탐사로봇과 같이 전체 영역을 이동하여야 하는 경우에 적용되는 방법을 말한다.

전체영역 경로계획은 대표적으로 템플릿(Temp-late)을 이용한 방식과,³⁻⁶ 포텐셜필드를 이용한 방식,⁶⁻⁸ 셀 분할을 이용한 방식으로⁹⁻¹⁴ 분류할 수 있다. 템플릿을 이용한 방식은 몇 개의 기본 경로 계획 템플릿과 청소 환경을 이용하여 경로계획을 한다. 로봇과 환경 지도를 기반으로 가장 적당한 템플릿을 이용한다.

포텐셜필드(Potential Field)를 이용한 방식에서는 청소 영역을 수치적 값을 가진 셀로 표현한다. 방문한 셀의 값은 증가하고 주위에서 가장 낮은 값을 가진 셀로 이동하는 경로 계획을 말한다. 이때

발생되는 많은 방향전환을 줄이기 위하여 셀의 값으로 거리함수와 방향전환 함수를 이용하였다.⁷

셀 분할을 이용한 방식은 청소공간을 셀로 나눠서 해석하는 경로계획을 말한다.¹⁰⁻¹⁵ Choset 은 장애물을 만나는 임계점에서 셀들을 분리하고, 장애물을 벗어나는 임계점에서 나뉘어진 셀들을 합치는 Boustrophedon 셀 분할방식¹¹ 과 단순한 그래프 탐색 알고리즘인 깊이 우선 탐색방식을 이용해 전체 영역을 방문하는 Morse decomposition 방식을 연구하였다.¹³

공방 등 넓은 공간이나 빠르게 청소할 필요가 있는 경우 싱글로봇은 빠르고 효율적으로 전영역 청소를 하는데 어려움이 많다.^{20,21} 그러나 멀티로봇을 이용한 경로계획은 넓은 공간을 좀더 빠르고 효율적으로 청소할 수 있도록 도와준다.^{17,18} 멀티로봇은 서로 청소작업들을 공유하고 청소영역을 분할함으로써 소요시간을 줄여 작업능력을 개선시켜준다.

본 논문에서는 멀티로봇이 방향전환 때 많은 시간과 전력을 소비하기 때문에 청소 할 영역의 모양에 따라 최소의 방향전환을 갖도록 청소공간을 여러 플로우 네트워드로 분리하여 해석하는 방법¹⁵ 을 제안하였다. 본 알고리즘은 전체 청소영역을 셀들로 분리한 후 셀들을 플로우네트웍으로 표현하고 셀들 사이의 경로를 최적화하였다. 그리고 각 셀에 입출력 부분정점을 설계해서 각 셀의 모양에 따라 셀의 모양에 맞는 최적의 경로들을 생성해주는 전 영역 경로계획을 작성하였다. 본 논문의 2 절에서는 전체영역경로계획의 대표적인 3 가지 경로계획을 살펴보았다. 그리고 3 절에서는 청소공간의 맵을 완성하기 위한 벽추종(wall-following) 방식과 임계점(critical Point)을 기준으로 청소영역을 셀들로 나누는 셀 분할방식에 대하여 살펴 보았다. 그리고 플로우네트웍을 이용한 전체영역 경로계획과 최소 방향전환을 위한 셀 내부 경로계획에 대해 세부적으로 설명하였고 멀티로봇이 공동된 셀을 청소 시 협력해서 경로계획을 수행하는 방법에 대해 제안하였다. 그리고 4 절에서는 기존의 방식과 제안된 방식의 전 영역경로계획을 시뮬레이션으로 비교하였고, 마지막으로 5 절에서 결론을 도출하였다.

2. 기존의 전체영역 경로계획

전체영역 경로계획방식은 청소로봇 같이 전체

영역을 이동하여야 하는 경우에 적용된다. 전체영역 경로계획은 대표적으로 템플릿을 이용한 방식과 포텐셜필드를 이용한 방식 그리고 셀 분할을 이용한 방식들이 연구되어 왔다.

2.1 템플릿을 이용한 경로계획

실내 환경에서 청소로봇이 청소를 하기 위해서는 전체 영역을 청소하기 위해 계획된 청소경로가 요구된다. 템플릿을 이용하는 방식은 몇 개의 기본 경로 템플릿을 정의하고 로봇의 동작과 환경정보를 이용해 청소동작 순서를 자동으로 생성하는 rule-based 된 경로 계획 방법이다.

Table 1 Basic Template for Path Planning

Template	Purpose
LT	Move straight forward and change track using L-Trn
SS	Move straight forward and change track using Side-Shift
SM	Move straight forward/backward

표 1 은 3 개의 기본 경로계획템플릿 LT, SS, SM 을 나타내었다. 3 개의 템플릿 중 가장 기본이 되는 경로계획 템플릿은 LT 이다. LT 은 로봇이 장애물을 만나기 전까지 전진하고 전방에 장애물을 감지하면 L 회전을 이용해 경로를 변경하는 경로 템플릿이다. SS 는 전방으로 직선 이동 후 S 자로 후진해 진로를 바꾸는 경로계획템플릿으로 장애물이 근접한 좁은 지역 또는 벽면에 근접해 있을 때 이용된다. 그리고 SM 은 벽면을 추종하거나 3 면이

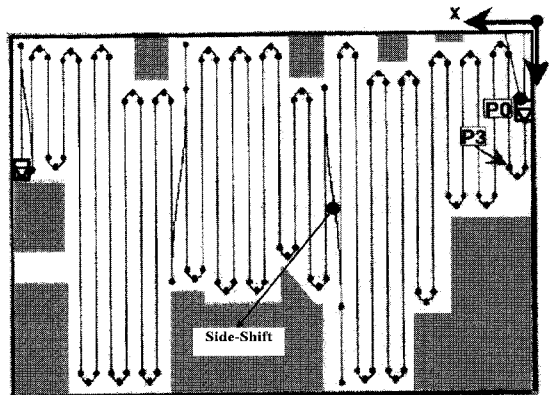


Fig. 1 Path Planning using Template

막힌 지역을 빠져 나올 때 사용되는 경로 계획 패턴이다.

그림 1 은 청소 경로를 완성하기 위해 rules 의 논리적인 순서에 따라 기본 경로 템플릿을 이용한 전체영역 경로계획을 나타내었다.

2.2 포텐셜 필드를 이용한 경로계획

포텐셜 필드를 이용한 방식에는 청소 영역을 격자지도(Grid map)으로 표현하고 청소 영역을 수치적 값을 가진 셀로 표현한다. 이 경로계획은 목적 셀로부터 시작점까지 환경의 모든 자유공간을 지나며 거리 값(distance cost)를 증가시킨다. 이동로봇은 현재의 셀 값과 주위의 셀 값을 비교해서 큰 값을 갖는 셀로 이동하고 큰 값을 갖는 셀이 없는 경우 같은 값을 갖는 셀로 이동하며, 같은 값을 갖는 셀이 없는 경우 작은 값을 갖는 셀로 이동한다. 그림 2 는 시작 셀로부터 목적 셀까지 포텐셜 필드방법을 이용해 전체 경로계획을 나타내었다.

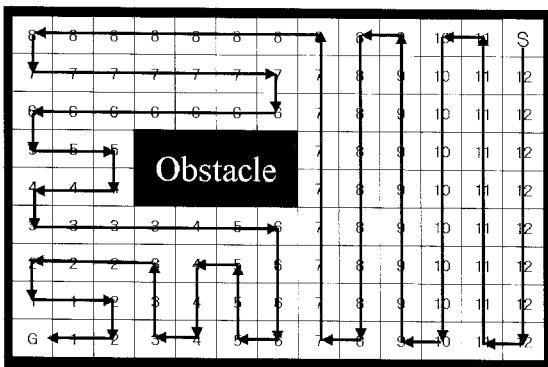


Fig. 2 Path Planning using Potential Field method

2.3 셀분할을 이용한 경로계획

셀 분할 방식은 장애물의 변화에 따라 청소영역을 큰 셀로 나눠서 해석하는 경로계획을 말한다. 전체 청소영역은 큰 셀로 표현되고 셀과 셀사이의 경로계획을 함으로써 계획된 모션을 줄일 수 있다. 셀 내부를 청소할 때는 단순한 기본모션으로 경로계획을 하게 된다. 장애물을 처음 만날때와 장애물을 벗어날 때 임계점(Critical Point)을 이용해 셀을 분할하고 합치게 된다. 즉 장애물을 만나는 임계점은 셀을 분할하게 되고, 장애물을 벗어나는 임계점은 셀을 합치게 된다. 셀분할을 이용한 전체영역 경로계획은 그림 3 에 나타내었다.

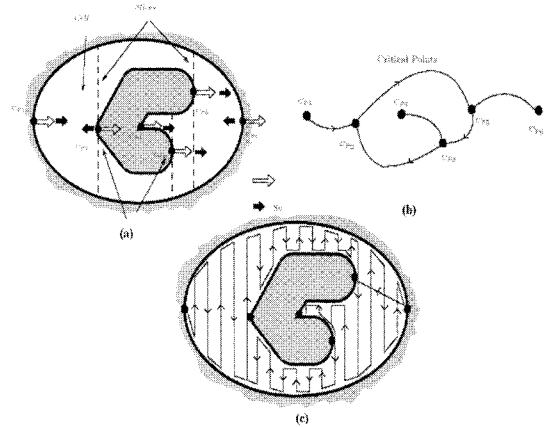


Fig. 3 Path Planning using Cellular Decomposition

그림 3-(a)에서 slice 가 청소 진행방향 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면서 slice 연결의 변화가 생기고 이때 임계점이 생성됨을 볼 수 있다. 그림 3-(b)는 임계점을 기준으로 셀이 분할되고 임계점을 정점(node)으로 표현하고, 각 셀들 사이의 이동 경로는 간선(branch)으로 표현한 것이다. 임계점과 정점과 간선을 이용해 셀과 셀사이 경로계획을 하게 된다. 그림 3-(c)는 각 셀들은 기본 모션을 이용해 경로계획을 하고 간선을 이용해 셀과 셀사이를 이동하면서 전체 경로계획을 완성하게 된다.

3. 플로우네트웍을 이용한 최소화전 경로계획

3.1 wall-following

실내환경에서 벽과 장애물을 인식하기 위해 LRF(Laser Range Finder)를 이용해 벽추종(wall-following)을 한다. 청소로봇은 서로 반대방향에서 시계방향으로 이동하고 두 대의 로봇이 다른 로봇의 출발점에 도착할 때 벽 추종 방식은 완료된다. 벽 추종시 로봇 왼쪽의 센서 값은 벽을 인식하고 오른쪽의 센서 값은 장애물을 인식하게 된다. 이때 정확한 환경인식을 위해서는 로봇의 자기위치 추정 이 꼭 필요하다. 로봇은 천정에 마크를 부착하고 카메라로 마크를 감지해 절대위치와 절대 각을 찾는 방법으로¹⁴ 주행 시 발생하는 오차를 보정하게 된다.

3.2 셀 분할

그림 4 에서 보는 바와 같이, 청소영역은 장애물의 임계점(critical points)에 따라서 여러 개의 셀,

Cell₅로 나타낸다. 여기서 임계점은 장애물의 진입부와 마지막 부분에 있는 돌출부분을 나타내는 것으로,¹⁰ 그림 4 에서는 CP₁로 표시하였다. 그림 4 에서 청소영역은, CP₁을 기준으로 Cell₁과 Cell₂의 두 개의 셀로 분리되며, CP₂를 벗어나면 한 개의 셀 Cell₃로 합쳐지게 된다. 이렇게 분리된 각 셀의 중심은 무게중심 P_i로 그림 4 에 나타내었다.

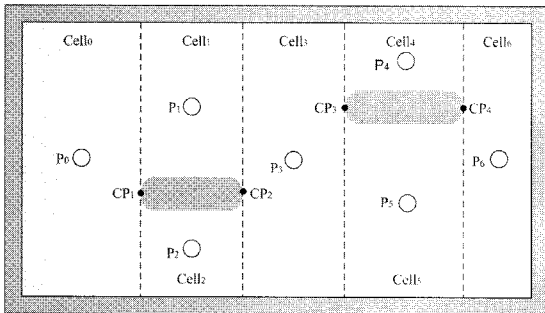


Fig. 4 Partitioning of an area by cellular decomposition

3.3 플로우네트웍

그림 5 는, 그림 4 에서 보여주었던 분할된 청소영역을 흐름을 갖는 플로우네트웍으로 나타내기 위하여, 각각의 셀을 중심점 P_i에서의 정점(node)으로 표현하고, 각 셀들 사이의 이동 경로는 간선(branch)으로 표현한 것이다. 즉, FN₀는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐름을 갖고, FN₁는 오른쪽에서 왼쪽으로 흐름을 갖는 플로우네트웍으로 나타낸다.

간선은 단방향 간선과 양방향 간선이 있는데, 단방향 간선이란 화살표로 표시된 방향으로만 이동이 가능한 간선을 의미하며 시작정점은 출력방향의 간선을 갖고, 도착정점은 입력방향 간선을 갖는다. 양방향 간선이란 양쪽 방향으로 모두 이동이 가능한 간선을 말하고 시작정점과 도착정점을 제외한 중간정점들은 양방향 간선을 갖게 된다.

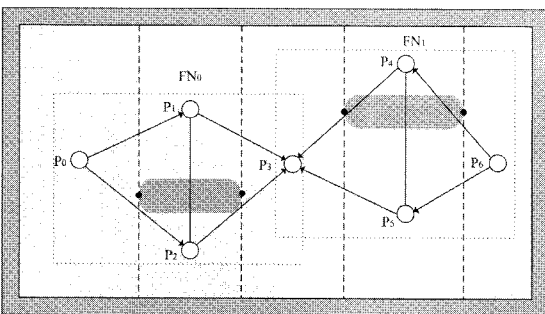


Fig. 5 Flow network for cleaning area

양방향 간선은 도착정점의 입력 단 방향 간선보다 경로계획 시 우선순위를 높게 함으로서, 도착 정점에 도달하기 전에 양방향 간선과 연결된 모든 중간정점을 거치도록 한다. 그림 5 의 플로우네트웍은 FN₁={P₀, P₁, P₂, P₃}과 FN₂={P₃, P₄, P₅, P₆}두개의 플로우네트웍으로 구성되어 된 것을 볼 수 있다.

3.4 셀들 사이 경로계획

전체영역 경로계획을 완성하기 위하여, 첫째로 각 셀간의 경로계획을 하여야 한다. 이를 위하여, 그림 6 에서와 같이 두개의 플로우네트웍, FN₁과 FN₂에 대하여 너비우선검색 알고리즘을¹⁵ 이용하여 경로 계획을 작성한다.

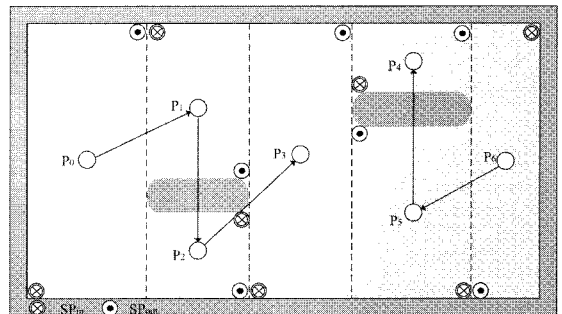


Fig. 6 Path planning among the cells employing flow network

입력정점에서 인접한 정점까지 해당 간선의 가중치를 부여하여 거리 가중치가 가장 적은 정점으로 이동한다. 정점(P₀)는 정점(P₁, P₂)와 간선이 연결되어 이동할 수 있으나 입력(P₀)와 x 축 거리가 가장 가까운 정점(P₁)으로 이동한다. FN₁의 P₀부터 P₃까지 생성된 경로의 순서는 Path₁={P₀, P₁, P₂, P₃}이고 도착 정점인 P₃에 도착했을 때 FN₁은 완성된다. FN₂의 P₆부터 P₃까지 경로계획에서 FN₂의 경로 순서는 Path₂={P₆, P₅, P₄}이다. 여기서, FN₁과 연결하는 연결 정점 P₃이 생략된다. 즉, 2 개의 플로우네트웍 사이의 경로계획을 그림 6 에 나타내었다.

3.5 최소회전을 위한 내부 셀의 경로계획

플로우네트웍을 이용하여 셀간의 경로계획이 끝나면 셀 내부 경로계획이 필요하다. 각 셀들은 외각에 4 개의 부분정점(sub-point)이 존재하게 되는데, 서로 인접한 두 셀의 부분정점 중에서 경로

시작점이 되는 입력 부분정점인 SP_{in} 과 경로의 최종점이 되는 출력 부분정점인 SP_{out} 을 구한다.

3.4 에서 설명한 바와 같이 셀 내부에서의 경로 계획은 방향전환 횟수를 최소화하기 위하여 SP_{in} 과 SP_{out} 의 위치 및 셀의 방향에 따라 주 경로가 긴 방향으로 하는 템플릿 경로를 선택한다. 그림 7 는 부분정점의 모양에 따라 6 가지 청소패턴을 나타낸 것이다. 여기서, 그림 7(d), (e), (f)는 각각 그림 7(a), (b), (c)와 셀의 방향만 틀릴 뿐 청소형태는 동일함을 알 수 있다. 그리고, 3 면이 닫혀있는 오목한 형태의 지역은 그림 7(a) 또는 (e)의 경로계획을 하면 된다.

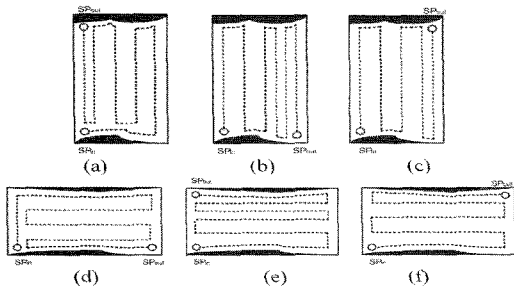


Fig. 7 Path planning in relation to position of SP_{in} and SP_{out}

3.6 전체영역경로계획

3.4 절에서의 셀간 경로계획과 3.5 절에서의 셀 내부의 경로계획을 통합하면 그림 8 과 같이 전 영역 경로계획을 구할 수 있다. 각 셀마다의 경로 계획을 살펴보면 그림 8 에서 $Cell_0$ 와 $Cell_1$ 는 그림 7(c) 형태의 경로계획임을 알 수 있고 $Cell_2$ 는 그림 7(e) 형태이고 $Cell_3$ 는 그림 7(b) 형태이다.

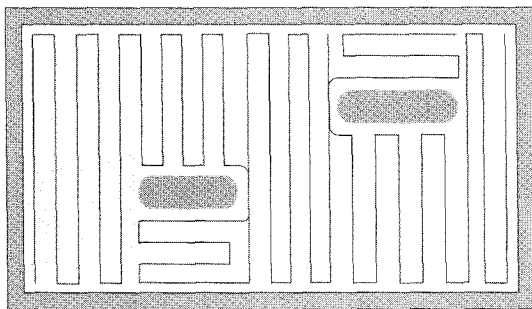


Fig. 8 Suggested complete coverage path planning

3.7 멀티로봇 시스템의 협동작업

멀티로봇이 효율적인 협동작업을 위해 실시간

으로 셀을 할당하는 동적 분할방식을 이용하였다. 이 방법은 청소영역을 셀 분할하고 로봇들에게 셀 들이 할당된 후 할당된 셀들은 플로우네트웍으로 표현하고 셀들 사이의 경로를 최적화 하게 된다.

할당된 셀들을 청소하면서 로봇들은 서로의 정보를 공유함으로써 서로 충돌을 피할 수 있고, 할당된 셀들의 청소를 완료 후 청소 안된 영역의 청소를 도와줄 수 있으며, 경로의 겹치는 영역을 줄임으로써 청소시간을 줄일 수 있다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 최소 방향전환 경로계획의 장점을 보이기 위하여, 기존의 셀 분할 방식을[11] 이용한 멀티로봇의 경로계획과 제안하는 멀티로봇의 경로계획 알고리즘을 시뮬레이션으로 비교하여 보았다.

4.1 시뮬레이션 환경

그림 9 는 두 대의 이동로봇을 이용한 시뮬레이션 환경을 나타내었다. 이 논문에서 기술한 알고리즘은 MSRS(Microsoft Robotics Studio)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 실험을 하기 위한 시뮬레이션 환경은 5m*5m 실내이고 2 개의 장애물이 놓여있고 장애물 정보는 알 수 없다.

로봇의 크기는 50[cm]의 지름을 갖고 LRF(Laser Range Finder)를 이용하여 환경정보를 얻었다. LRF 의 측정거리는 8[m]이고 0~180°의 검출 범위를 갖는다.

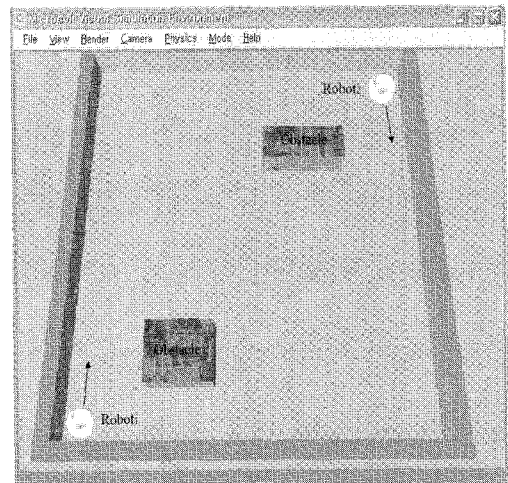


Fig. 9 Workspace for Simulation

이 논문에서는 이 논문의 장점을 보이기 위해 기존의 셀분할 방식과 제안하는 멀티로봇의 경로계획을 비교하였다. 제안된 방법은 실내환경에서 협력하여 청소하기 위해 멀티로봇을 적용하였고 두 알고리즘의 실행인덱스를 비교하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

환경정보를 얻기 위해, 청소로봇들의 벽 추종 항해는 서로 반대 방향으로부터 출발하였고 시계 방향으로 이동하여 서로 다른 로봇의 출발점에 도착하면 완료되었다. 즉, 로봇들은 LRF 와 함께 실내 환경의 크기와 장애물의 윤곽을 얻기 위해 벽 추종 항해를 실행하였다. 벽추종시 로봇 왼쪽의 센서 데이터는 벽으로 인식되고 오른쪽의 센서 데이터는 장애물로 인식하게 된다.

그림 10 은 LRF 로 얻어진 센서 데이터의 결과를 볼 수 있다. 셀 분할 지역은 그림 10 에서 장애물의 임계점을 기준으로 나뉜다.

그림 11 은 기존의 셀 분할방식을 이용한 멀티로봇의 경로계획을 나타내었다. 넓이 우선방식, BFS(breadth first search)을 이용하였고, 로봇은 시작 셀(Cell₀)로부터 가장 가까운 셀로 경로계획을 함을 볼 수 있다.

그림 11 에서, 로봇이 Cell₀ 로부터 가장 가까운 Cell₁ 까지 경로계획을 만들기 위해 이동함을 볼 수 있고 그때 두 번째로 가까운 Cell₂ 로 이동한다.

그러나 Cell₂ 에서, X 축의 길이가 Y 축의 길이보다 크므로 Y 축으로 청소하는 경로는 더 많은 회전을 요구하게 된다. 우리는 Cell₂(1.25, 0.25)로부터 Cell₂ 로부터 빠져 나오기 위해 Cell₃(2.43, 0.25)까지

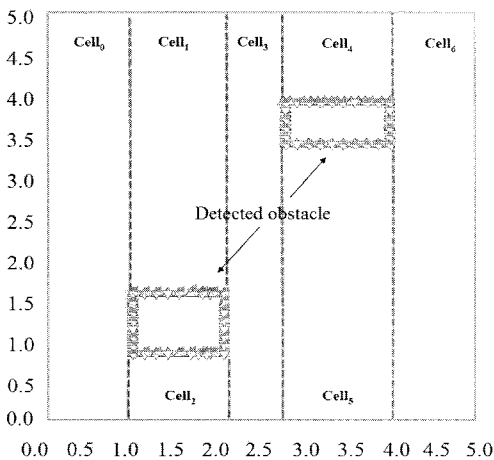


Fig. 10 Sensor data detected by LRF

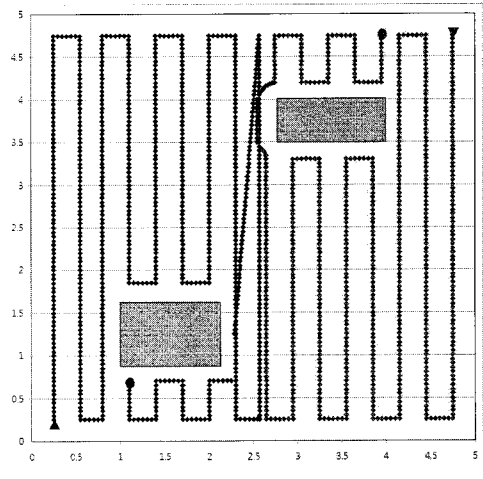


Fig. 11 Simulation result of Algorithm¹¹

새로운 경로를 생성하였다. 그림 11 에서 경로계획은 다음과 같다. Path={Cell₀, Cell₁, Cell₂, Cell₃, Cell₄, Cell₅, Cell₆}.

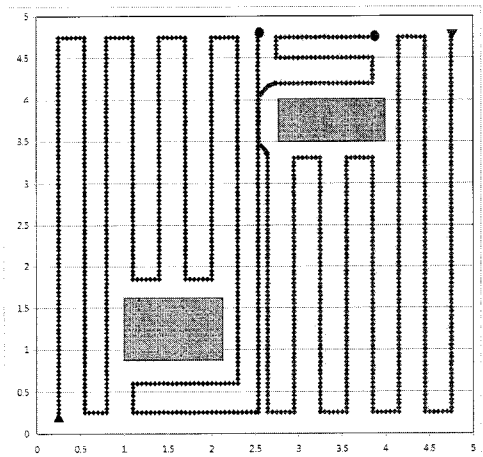


Fig. 12 Simulation result of Multi Robot

그림 12 는 두 대의 로봇의 경로계획을 나타내었다. Robot₁ 은 좌표(0.25, 0.25)로부터 출발하였고 FN₀ 에 일치되는 지역을 청소한다. 각 셀의 중심점은 로드 'Pi'로 나타내었다. P₀와 P₃ 로부터 생성된 경로는 Path₁={P₀, P₁, P₂, P₃}과 같고 도착 로드, P₃에 도착할 때 완료된다. 전체영역 경로계획을 하기 위한 셀경로 Path₁={Cell₀, Cell₁, Cell₂, Cell₃}과 같다. Robot₂ 는 좌표(4.75, 4.75)로부터 출발하고 FN₂ 에 일치되는 영역을 청소하게 된다. FN₂ 에서 P₆와 P₄로부터 생성된 경로는 Path₂={P₆, P₅, P₄}이다. 전

체경로계획을 하기 위한 셀 경로, $Path_2 = \{Cell_6, Cell_5, Cell_4\}$ 와 같다. 이동로봇이 방향전환을 하기 위해서는 우선 정지 후 회전을 해야만 됨으로 많은 시간과 많은 전력이 소비되므로 기존의 방식보다 방향전환 횟수와 총시간을 시뮬레이션으로 비교 하였다.

Table 2 Simulation results

	Total of Turns	Total of time
Proposed Algorithm	38	153[sec]
Algorithm ¹¹	49	179[sec]

테이블 2 는 로봇이 청소지역을 30cm/s 으로 빠르게 청소할 때, 기존의 기존의 알고리즘과 제안된 알고리즘을 이용하여 청소가 완료되었을 때 전체 회전수와 총 소비되는 시간을 볼 수 있다. 제안된 알고리즘은 기존의 방식보다 전체 회전수와 소비되는 시간이 22.4%와 15%로 줄어들었다. 시뮬레이션 결과에서, 제안된 멀티로봇이 기존의 알고리즘보다 적은 회전과 총소비 시간을 가짐으로써 기존의 알고리즘 보다 더 효율적인 경로계획을 제공한다.

5. 결론

본 논문은 청소로봇의 경로계획 시 셀 영역의 모양과 크기에 따라 셀 내부의 최소 방향전환 경로계획을 설계함으로써 기존의 방식보다 방향전환 횟수가 적은 멀티로봇을 이용한 전 영역 청소계획 방식을 제안하였다. 이동로봇이 방향전환을 하기 위해서는 우선 정지 후 회전을 해야만 됨으로 많은 시간이 소비되며 정지 후 가/감속을 하기 위해서는 많은 전력이 소비된다. 그러므로 청소할 영역의 모양에 따라 최소의 방향전환을 하도록 플로우네트웍을 이용한 셀 분할방식을 제안하였다. 넓은 청소영역을 여러 플로우네트웍으로 분리하여 해석함으로써 좀더 쉽게 경로계획을 할 수 있었다. 각 셀들 사이의 경로계획을 한 후 셀 내부의 최적의 경로계획을 함으로써 제안한 전체영역경로계획을 완성하였다. 그리고 시뮬레이션을 이용해 제안된 전체영역경로계획방식이 기존의 방식보다 효율성이 양호함을 보였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 지원(No. R01-2008-000-20645-0)에 의한 결과입니다.

참고문헌

1. Ryu, J. C., Park, K. H., Lee, S. G. and Rhim, S. S., "A Study on Development of Performance Metrics for Autonomous Cleaning Robot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 7, pp. 7-13, 2006.
2. Ge, S. S. and Cui, Y. J., "New potential function for mobile robot path planning," IEEE Trans. Robotics and Automat., Vol. 16, No. 5, pp. 615-620, 2000.
3. Zelinsky, A., Jarvis, R. A. and Byrne, J. C., "Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 533-538, 1993.
4. Hofner, C. and Schmidt, G., "Path planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robots," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 14, No. 2-3, pp. 199-212, 1995.
5. Schmidt, G. and Hofer, C., "An advanced planning and navigation approach for autonomous cleaning robot operations," Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Sys., Vol. 2, pp. 1230-1235, 1998.
6. Carvalho, R. N., Vidal, H. A., Vieira, P. and Ribeiro, M. I., "Complete coverage path planning and guidance for cleaning robots," Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 677-682, 1997.
7. Zenlinsky, A., "A mobile robot exploration algorithm," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 8, No. 6, pp. 707-717, 1992.
8. Oh, J. S., Park, J. B. and Choi, Y. H., "Complete coverage navigation of clean robot based on the triangular cell map," Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics, Vol. 3, pp. 2089-2093, 2001.
9. Gabriely, Y. and Rimon, E., "Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Vol. 2, pp. 1927-1933, 2001.
10. Acar, E. U., Choset, E. U., Zhang, Y. and Schervish, M., "Path planning for robotics demining: robust sensor-based coverage of unstructured environments and probabilistic methods," Int. J. Robot. Res., Vol. 22, No. 7-8, pp. 441-466, 2003.

11. Choset, H., "Coverage of known spaces: the boustrophedon cellular decomposition," *Autonomous Robots*, Vol. 9, No. 3, pp. 247-253, 2000.
12. Acar, E. U. and Choset, H., "Critical point sensing in unknown environments," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat.*, Vol. 4, pp. 3803-3810, 2000.
13. Acar, E. U., Choset, H., Rizzi, A. A., Atkar, P. N. and Hull, D., "Morse decompositions for coverage tasks," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 21, No. 4, pp. 331-334, 2002.
14. Nam, S. H., Suk, S. W., Moon, S. B. and Lee, K. M., "Obstacle recognition and localization for vacuum cleaning robots employing vision cameras," *Proc. 32nd Int. Symp. Robot.*, pp. 1266-1270, 2001.
15. Nam, S. H. and Moon, S. B., "Minimal Turning Path Planning for Cleaning Robots Employing Flow Networks," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 11, No. 9, pp. 789-794, 2005.
16. Weiss, M. A., "Data Structures and Algorithm Analysis In C," Addison Wesley Longman, pp. 295-303, 1997.
17. Hert, S. and Richards, B., "Multiple Robot Motion Planning=Parallel Processing + Geometry," *Sensor Based Intelligent Robote*, LNCS 2238, Springer, pp. 195-215, 2002.
18. Jager, M. and Nebel, B., "Dynamic Decentralized Area Partitioning for Cooperating Cleaning Robot," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot*, Vol. 4, pp. 3577-3582, 2002.
19. Saitov, D., Umirov, U., Park, J. I., Choi, J. W. and Lee, S. G., "Effective Map Building Using a Wave Algorithm in a Multi-Robot System," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 9, No. 2, pp. 69-74, 2008.
20. Kim, E.-S. and Joo, K.-S., "Moving Path Following of Autonomous Mobile Robot using Fuzzy," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 84-92, 2000.
21. Cha, Y.-Y., "Global Path Planning of Mobile Robot Using String and Modified SOFM," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 69-76, 2008.