

Flow Network 을 이용한 자율 청소로봇의 전영역 경로 계획

남상현, 문승빈
세종대학교 컴퓨터 공학과
e-mail : sbmoon@sejong.ac.kr

Complete Coverage Path Planning for Autonomous Cleaning Robot using Flow Network

Sang-Hyun Nam and Seungbin Moon
Department of Computer Engineering, Sejong University

요 약

본 논문에서는 청소로봇이 전 청소 영역을 CCPP(Complete Coverage Path Planning)를 이용해 경로를 생성한 후 재 경로계획 시 장애물의 미소한 변화로도 기존에 생성한 전 경로패턴을 바꾸지 않고 수정 할 수 있는 CD(Cell Decomposition)와 FN(Flow Network)을 이용한 CCPP 방식을 제안 하였다. 그리 고 제안된 경로 계획에 대해 시뮬레이션으로 결과를 제시하였다.

1. 서론

최근 자율 이동로봇 시스템에 대한 많은 경로 계획 들이 개발되어 지고 있다. 이동 로봇들의 대표적인 두 가지 경로 계획은 PTP(Point to Point)[1]와 CCPP (Complete Coverage Path Planning)로 분류된다. PTP는 목표점 까지 최적의 경로를 이루는 중간경로를 만들면서 이동 하는 경로 방법으로 전영역을 청소하기는 적합하지 않다. 청소기의 대표적인 navigation 알고리즘으로 전영역을 청소해주는 경로계획이 필요한데 이러한 경로계획 을 CCPP라 한다. CCPP는 대표적으로 Template을 이용한 방식과, APF(Artificial Potential Field)를 이용한 방식, CD(Cell Decomposition)을 이용한 방식으로 분류할 수 있다.

Template을 이용한 방식은 몇 개의 기본 경로 계획 의 Template들의 정의와 청소 로봇의 kinematics와 청소 할 환경구조를 이용해 경로계획을 한다.[2]-[4] Geometric로 정의된 로봇과 환경에서 알고있는 윤곽 사이의 map을 기반으로 가장 적당한 Template를 이용한다. 대부분 이 방법은 변화되지 않는 환경에서 많이 사용 된다. 그러나 변화된 장애물이 있는 경우에도 로봇이 기본 경로로 반환 될 때까지 예상치 못한 장애물의 윤곽을 단순히 따라가 경로를 생성하는 방법이 제안 되었다.[4]

APF(Artificial Potential Field)를 이용한 방식은 청소 영역을 수치 값을 가진 셀로 표현하였다. 방문한 셀 의 값은 증가하고 주위에서 가장 낮은 값을 가진 셀 로 이동하는 경로 계획을 말한다.[6] 이때 생기는 많은 회전들을 줄이기 위해 셀의 값을 거리함수와 회전 함수로 정의한 방식을 이용하였다.[7][8] 또한 APF와 Template을 복합한 방법도 제안되었다.[9]

CD(Cell Decomposition)를 이용한 방식은 장애물의 변화에 따라 큰 셀로 나누어서 해석하는 경로 계획을 말한다.[10] 보다 효과적인 경로 계획을 위해 CD방 식에 Template방식을 접목시킨 방법도 연구되어졌 다.[11][12]

청소로봇의 경우 많은 사용자들은 전영역을 처음 CCPP(Complete Coverage Path Planning)를 이용해 청소 한 후 다음 경로계획 시에는 좀더 빠르고 효율적으로 청소하기를 원한다. [13] 그러나 장애물의 미소한 변경 에도 기존의 알고리즘들은 전체 영역경로의 패턴을 완전히 수정을 해야 되는 문제점들을 가지고 있다.

이 논문에서는 청소로봇이 전 청소 영역을 CCPP를 이용해 경로를 생성한 후 재 경로계획 시 장애물의 미소한 변화로도 기존에 생성한 전 경로의 패턴을 바꾸지 않고 경로 계획을 할 수 있는 CD(Cell Decomposition)와 FN(Flow Network)을 이용한 CCPP방식을

제안하였다. 본 알고리즘은 장애물의 위치가 약간 변동되는 경우 사람과 로봇이 공존하는 상황에서 사람에게 로봇의 이동경로에 대한 예측가능성을 높여준다. CCPP알고리즘은 크게 3부분의 경로 계획 방식으로 나뉘어서 해석하였다. 첫번째는 전체 청소영역을 셀 영역으로 해석해 셀과 셀 사이의 최적의 경로 계획을 수립 하였다. 이때, 셀 안의 수 많은 sg(sub-goal)중 다른 셀로 이동할 때 입력/출력에 해당되는 Input/output sg(sub-goal)를 찾게 된다. 두 번째는 셀 안에 세부적인 경로 계획을 생성 하는 방법으로 Input/output sg(sub-goal)의 관계로부터 생성 되어진다. 세 번째는 재 경로계획으로 장애물의 미소한 변화에 따라 전 영역 경로의 민감한 변화를 줄이기 위해 경로계획 수정 시 사용하는 경로 계획이다. 이 논문의 2절에서는 제안한 알고리즘의 배경지식을 살펴보기 위해 CD(Cell Decomposition), FN(Flow Network), Fuzzy방식에 대해 살펴 보았고, 3절에서는 제안하는 CCPP알고리즘의 경로 계획 방식을 설명하였다. 그리고 4절에서 장애물 변경 시 다른 경로계획과 제안된 경로 계획에 대해 시뮬레이션으로 비교하였다.

2. 알고리즘

2.1 CD(Cell Decomposition)

CD(Cell Decomposition)방식은 경로계획 시 장애물로 인해 급격히 변화되는 Critical Point를 기점으로 청소된 영역을 Cell로 나눈다. 그리고 이 장애물을 벗어날 때 장애물을 기점으로 청소된 Cell_c과 장애물 뒤편의 청소 못한 Cell_{nc}로 나누어 해석한다. 경로 계획을 마치면 전 영역을 Cell Decomposition해 Cell단위로 청소 영역을 해석 하게 된다. 그림1에 CD(Cell Decomposition)방법에 대해 나타내었다.

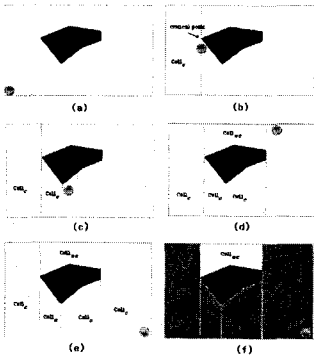


그림 1. Cell Decomposition 경로 계획

2.2 FN(Flow Network)

일반적으로 입력과 출력을 가지면서 방향성을 가지는 가중치 그래프를 FN(Flow Network)이라고 한다. 청소로봇의 CCPP(Complete Coverage Path Planning)경우도 청소를 시작하는 시작점과 마지막 목표점을 가지면서 시작점과 목표점 사이의 경로에 가중치를 갖는 방향성을 갖게 된다. 이러한 유사한 모델을 이용해 FN(Flow Network)을 CD(Cell Decomposition)방식을 이용한 CCPP에 접목 시킬 수 있다. 우선 셀들 사이도 입력과 출력으로 나뉘며 방향성을 가지므로 FN(Flow

Network)으로 해석이 가능하다. 그리고 셀 안의 수많은 sg(sub-goal)도 FN(Flow Network)을 이용해 쉽게 해석할 수 있다. 그림2에 셀의 중심점을 FN(Flow Network)을 이용해 표현하였다.

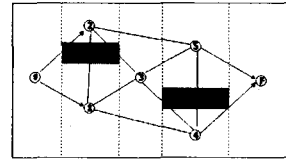


그림 2. Flow Network 경로 계획

그림2에서는 설명을 위해 각 Node마다 가상으로 숫자를 부여하였다. 시작 node S는 바로 옆에 인접한 node 1과 2로만 이동이 가능하다. 그래서 경로를 화살표로 표시하였다. 그리고 1부터 5까지 node들은 서로 양방향으로 이동이 가능하므로 방향성 없는 경로로 표현하였다. 마지막 node F는 바로 옆에 인접한 node 4와 5에서만 이동이 가능하므로 방향성을 갖는 경로로 표현하였다.

2.3 Fuzzy 제어기

FN(Flow Network)에서 거리와 셀의 크기에 따라 각 경로마다 가중치를 주기위해 Fuzzy제어기를 사용하였다. 거리와 셀의 크기에 따른 값들을 멤버십 함수를 이용해 퍼지화하고 look-up 테이블을 이용해 각 경로에 가장 적당한 가중치를 주었다.

3. CCPP(Complete Coverage Path Planning)

3.1 셀 사이 최적 경로 계획

전영역 경로 계획을 위해 전 청소영역을 Cell로 나뉘어서 표현하였고 Cell의 중심점을 Network의 Node로 표현하였다. Cell영역에서의 중심점은 아래의 중심점을 구하는 공식을 이용하면 구할 수 있다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m jB[i, j]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B[i, j]} \tag{1}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m iB[i, j]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B[i, j]} \tag{2}$$

여기서, \bar{x} , \bar{y} 는 셀의 중심점을 말하며 $B[i, j]$ 는 각 x, y좌표의 값을 말한다. 시작 점을 갖는 셀의 node가 FN(Flow Network)의 입력S(Start)가 되고 도착점을 갖는 셀의node가 출력F(Final)가 된다. 그리고 Fuzzy제어기를 이용해 Network에서 node사이의 각 경로 가중치를 정하고 가중치로부터 얻은 값이 가장 적은 순서대로 경로계획을 하게 된다.

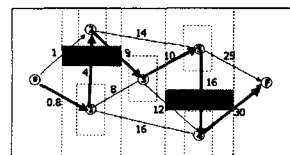


그림 3. 셀들의 경로계획

그림3를 보면 처음 S에서 첫 경로를 정할 때 노드1

이 2보다 값이 적으므로 1로 이동하고 노드1에서는 다음 경로 이동 시 노드2가 값이 가장 작으므로 노드 2로 이동하게 된다. 이러한 방법으로 각 노드간 즉 셀들간 경로 계획을 하게 된다.

3.2 셀 안의 경로 계획

셀 사이의 경로 계획을 한 후 셀 이동 순서에 따라서 셀 안의 수 많은 sg(sub-goal) 중에서도 입력 s(start) 과 출력 f(final)을 찾을 수 있다. 즉 Cell안의 경로 계획도 입 출력이 있는 FN(Flow Network) 방법을 이용하면 좀더 쉽게 경로 계획을 할 수 있다. 쉬운 가정으로 셀의 모양이 사각형이라고 가정하면 각 꼭지 점에 sg(sub-goal)이 4개 존재한다. 이 sg들은 FN의 각 노드에 해당되므로 이중 2개의 입력s과 출력f 노드는 셀 사이의 경로 계획으로 찾을 수 있다. 입력과 출력 노드가 정해지면 FN(Flow Network)으로 쉽게 경로계획을 설계할 수 있다. 그림4는 셀 안의 경로계획을 한 후 셀과 셀 사이 경로를 연결한 전 영역 경로 계획을 나타낸 것이다.

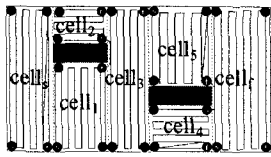


그림 4. 셀 안의 경로계획

그림4에서 이해를 돕기 위해 각 셀 안의 입/출력 노드를 s/f로 표현하였다. Cell₅안의 4개의 노드순서가 정해지면 Template방식으로 Cell₅안의 경로 계획이 완성된다. 이때 다음 셀1로 이동하게 되는데 Cell₅의 f에서 Cell₁의 s로 연결경로가 생성하게 된다. 이러한 방법으로 각 셀들이 연결되고 전 영역의 CCPP가 완성하게 된다.

3.3 재경로 계획

청소기는 청소된 영역을 효율적으로 청소하기 위해 청소된 영역의 경로 계획을 저장하게 된다. 그런데 청소 공간의 장애물들은 미세한 변경에도 기존의 방식들은 전체의 경로 계획패턴이 변경되는 문제점을 갖고 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 재 경로 계획은 셀 중심node에 square 모양의 mask를 설계하였다. 장애물의 변화가 생기면 셀 크기의 변화가 생기고 셀 중심 node의 변화가 생긴다. 장애물의 변화에 따라 셀의 중심 node가 square mask 안에 있으면 장애물의 변화량이 적으므로 전 영역 경로는 수정되지 않는다. 반면 square mask를 벗어 날 경우는 장애물의 변화량이 크므로 전 영역 경로가 수정되게 된다.

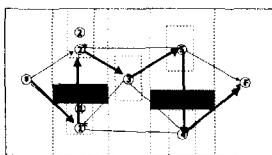


그림 5. 사각마스크를 이용한 재 경로 계획

그림5은 그림3에서 첫번째 장애물을 위에서 아래로 변경 시킬 경우에 셀의 중심점에 있는 node1, 2는 node1*, 2*로 변화하게 된다. 이때 node1*, 2*은 square mask 내부에 있으므로 셀 사이 경로 계획이 변경되지 않음을 볼 수 있다. 만약 장애물이 변화량이 커 node 1*, 2*가 square mask의 외부로 이동 된다면 전역 경로는 변경하게 되고 새로운 square mask가 생성된다.

4. 시뮬레이션

첫번째 장애물을 왼쪽에서 오른쪽으로 30cm 이동했을 경우 기존의 CCPP방식과 제안한 방식의 전역 경로계획을 시뮬레이션으로 비교하였고 청소 영역 순서를 알파벳 순서로 표기 하였다.

4.1 Artificial Potential Field 방식

APF방식은 청소 영역을 수치적 값의 작은 셀로 표현하였다. 방문한 셀의 값은 증가하고 주위의 최고로 낮은 값을 가진 셀로 이동하는 경로 계획 방법이다. 그러나 목표점에 도착해도 청소 안된 영역이 존재하는 문제점을 갖고있다. 그러므로 청소 안된 영역의 재 경로 계획이 필요하다.

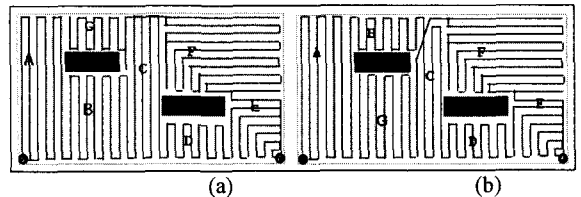


그림 6. 장애물 이동 시 APF의 재 경로계획 비교
(a) 원래 경로 계획 (b) 이동 후 경로계획

그림 6을 보면 A,B,C,D,E까지 경로계획 후 청소 안된 영역이 존재하기 때문에 F,G 셀 영역을 경로 계획하였다. 그리고 그림6(a)는 첫번째 장애물이 변화하기 전의 경로 계획이고, 그림6(b)는 첫번째 장애물이 30cm정도 오른쪽으로 이동 후 경로 계획이다. 장애물 이동 후 전 영역의 경로계획이 변화 됨을 볼 수 있다.

4.2 Template방식

Template을 이용한 방식은 몇 개의 기본 경로 계획의 Template들의 정의와 청소 로봇의 kinematics로 청소 할 환경 구조를 이용해 경로계획을 한다. Template 방식도 APF방식과 마찬가지로 청소 안된 영역이 존재하는 문제점을 갖고 있다.

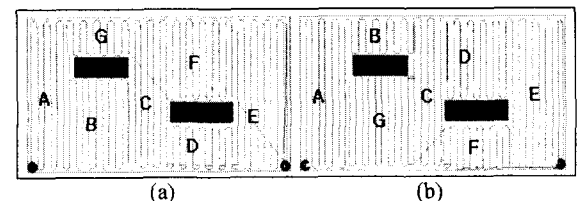


그림 7. 장애물 이동 시 Template의 재 경로계획 비교
(a) 원래 경로 계획 (b) 이동 후 경로계획

그림 7을 보면 A,B,C,D,E까지 경로계획 후 청소 안

된 영역이 존재하기 때문에 F,G 영역을 경로 계획 하였다. 그리고 그림7(a)는 첫번째 장애물이 변화하기 전의 경로 계획이고, 그림7(b)는 첫번째 장애물이 30cm정도 오른쪽으로 이동 후 경로 계획이다. 장애물이 이동 후 전 영역의 경로계획이 변화 됨을 볼 수 있다.

4.3 Cell Decomposition 방식

CD(Cell Decomposition)를 이용한 방식은 장애물의 변화에 따라 큰 셀로 나누어서 해석하는 경로 계획을 말한다. 각 셀의 내부는 Template 방식을 이용해 경로 계획한다. 다음 셀로 이동 시 가장 가까운 셀로 이동해 최종 목표점이 있는 셀을 가장 마지막에 경로 계획하게 된다.

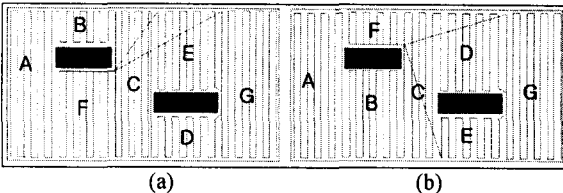


그림 8. 장애물 이동 시 CD의 재 경로계획 비교
(a) 원래 경로 계획 (b) 이동 후 경로계획

그림8(a)를 보면 A,B,C,D,E 순서대로 경로 계획 후 청소할 영역을 F,G중 하나를 선택해야 되는데 G영역이 마지막 경로가 되어야 하므로 F영역을 경로계획 후 G영역을 경로계획을 한다. 장애물이 이동 후 전 영역의 경로계획이 변화 됨을 볼 수 있다.

4.4 제안된 Flow Network을 이용한 방식

본 논문에서 제안한 FN(Flow Network)와 CD(Cell Decomposition)을 이용한 경로계획을 제안하였다. 그림9(a)는 첫번째 장애물이 변화하기 전의 경로 계획이고, 그림9(b)는 첫번째 장애물이 30cm정도 오른쪽으로 이동 후 경로 계획이다. 제안된 경로 계획은 장애물이 이동 시 청소 영역의 순서는 변화가 없고, 전 영역의 경로 계획은 A와 D영역에서만 미소한 경로가 변경됨을 그림9(b)에서 볼 수 있다.

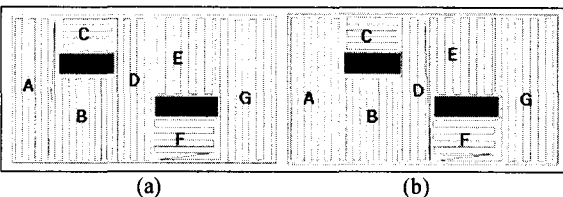


그림 9. 장애물 이동 시 제안한 재 경로계획 비교
(a) 원래 경로 계획 (b) 이동 후 경로계획

5. 결론

이 논문에서, 자율주행 청소 로봇으로 전영역을 청소하는 경로 계획에 대해 설명하였다. 청소 로봇은 전 경로 계획을 마친 후 다시 청소 공간을 청소하게 된다. 이때 장애물의 미세한 변화에도 이전의 전 경로계획의 변화량이 적은 CCPP(Complete Coverage Path

Planning)방식을 제안하였다. 즉 본 알고리즘은 장애물의 위치가 약간 변동되는 경우 사람과 로봇이 공존하는 상황에서 사람에게 로봇의 이동경로에 대한 예측 가능성을 높여준다. 그리고 시뮬레이션으로 제안된 알고리즘의 효율성을 증명하였다.

참고문헌

- [1] S.S.Ge and Y. J. Cui, "New Potential Function for Mobile Robot Path Planning", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.16, No.5, October, pp.615-620. 2000.
- [2] K.L.Doty, R.R.Harrison, "Sweep Strategies for a sensory-driven, Behavior-Based Vacuum Cleaning Agent", American Association for Artificial Intelligence, October, 1993.
- [3] Christian Hofner, Gunther Schmidt, "Path Planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robots", IEEE Trans. on Robotics and Autonomous systems, Vol. 14, pp.199-21, 1995.
- [4] G. Schmidt, C. Hofer, "An Advanced Planning and Navigation Approach for Autonomous Cleaning Robot Operation", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1230-1235, 1998
- [5] R. N. Carvalho, H.A. Vidal, P. Vieira, M. I. Ribeiro, "Complete Coverage Path Planning and Guidance for cleaning Robots", IEEE Int. Sym. on Industrial Electronics Proceedings, pp.677-682, 1997.
- [6] Prizadeh, A. and Snyder, W. " A unified solution to coverage and search in explored and unexplored terrains using indirect control", Inte. Trans. on Robotics and Automation, pp.2113-2119, 1990.
- [7] Alexander Zelinsky, " A Mobile Robot Exploration Algorithm", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 6, pp.707-717, 1992.
- [8] A. Zelinsky, R. A. Jarvis, J.C. Byrne, " Planning Paths of Complete Coverage of an Unstructured Environment by a Mobile Robot", In Proceedings of International Conference on Advanced Robotics, pp. 533-538, Tokyo, Japan, Nov., 1993.
- [9] J. S. Oh and J. B. Parka and Y. H. Choi, "Complete coverage navigation of clean robot based on the Triangular Cell Map", IEEE Int. Sym. on Industrial Electronics Proceedings, pp2089-2093, 2001
- [10] John F. Canny and Ming C. Lin, "An Opportunistic Global Path Planner", Algorithmica, In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Cincinnati, Ohio, pp.1554-1559, 1990
- [11] Howie Choset, "Coverage of Known Spaces : The Boustrophedon Cellular Decomposition", IEEE Int. Trans. on Autonomous Robots vol.9, No.3, pp. 247-253, 2000
- [12] 남상현, 문승빈, "청소로봇의 전영역 경로계획의 재경로 계획", 한국정보처리학회, pp2431-2434, Nov., 2002.
- [13] S. H. Nam and S. B. Moon, " Obstacle Recognition And Localization For Vacuum Cleaning Robots Employing Vision Cameras", Int. Symp. Robotics, 19-21, pp1266-1270, 2000.