

청소로봇의 전역 경로계획

남상현, 문승빈
세종대학교 컴퓨터공학과

Complete Coverage Path Planning for Cleaning robot

Sang-hyun Nam, Seung-bin Moon
Department of Computer Engineering, Sejong University

요 약

본 논문에서는 전체 영역 경로 계획인 CCPP(Complete Coverage Path Planning)를 이용해 전 청소 영역을 청소하는 방법을 나타내고 청소영역을 해석 하였다. 그리고, Template방법에 CD(Cell Decomposition)을 접목시킨 방법을 이용해 청소영역을 청소 후 재 경로계획으로 청소 안된 영역을 효율적으로 청소하는 방법을 연구 하였다. 또한 청소기의 회전 및 직선 모션에 따른 청소 영역을 비교 해석해 최적 시간과 거리에 따른 경로 계획을 살펴 보았다.

1. 서론

최근 자율 이동로봇 시스템에 대한 많은 경로 계획들이 개발되어 지고 있다. 이동 로봇들의 대표적인 두 가지 종류는 PTP(Point to Point)와 CCPP(Complete Coverage Path Planning)이 있다. PTP는 목표점까지 최적의 경로를 이루는 중간경로를 만들면서 이동하는 경로 방법이지만 전영역을 청소하기는 어렵다. 청소기는 전영역을 청소해주는 경로계획이 필요한데 이러한 경로계획을 CCPP라 한다. CCPP의 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 계획의Template들의 정의와 청소 로봇의 kinematics와 청소 할 환경 구조를 이용해 경로계획을 한다.[1-3] Geometric 으로 정의된 로봇과 환경에서 알고있는 윤곽 사이의 맵을 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 따라 가 경로를 생성하는 방법을 연구 되었다.[4]

APF(Artificial Potential Field)를 이용한 방식은 청소 영역을 수치적 값을 가진 셀을 표현하였다. 방문한 셀의 값은 증가하고 주위의 최고로 낮은 값을 가진 셀로 이동하는 경로 계획을 말한다.[5] 이때 생기는 많은 회전들을 줄이기 위해 셀을 값을 거리함수와 회전 함수로 정의한 방식을 제안 하였다.[6-7] 또한 APF와 Template을 복합한 방법도 연구 되었다.[8]

CD(Cell Decomposition)를 이용한 방식은[9] 장애물의 변화에 따라 큰 셀로 나누어서 해석하는 경로 계획을 말한다. 보다 효과적인 경로 계획을 위해 CD 방식에 Template방식을 접목시킨 방법이 연구 되었다.[10]

이 논문에서는 전영역 청소 경로 계획을 위해 우선 Template 방식으로 청소를 하다가 장애물을 만나면 청소 영역을 Cell로 나누어 해석한 CCPP 방식을 사용 하였다. CCPP 방식으로 전영역 청소 후 청소된 Cell들과 청소 되지 못한 Cell들이 존재하게 된다. 여기서 전영역 효과적으로 청소를 위해서는 청소 안된 영역들의 재 경로 계획이 필요 하다. 그래서 청소 안된 영역을 효과적으로 청소하기 위해 CELL들 사이의 최적의 경로 순서를 정하는 방법과 CELL안에 여러 개의 SG(Sub-Goal)사이 경로 계획을 하는 방법에 대해 제안 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 청소 영역의 수학적 해석과 청소기의 U-Turn과 L-Turn 회전에 대해 살펴 보았다. 3절에서는 기본 CCPP 경로 계획으로 청소 후 청소 안된 영역을 청소하는 재경로 계획을 하는 방법에 대해 설명하였다.

2. 청소 영역 해석

청소기가 반지름 r 로 구성된 원 모양을 하고 있다고 가정하고 Brush의 길이는 d_{clean} 로 정의 된다면 청소기가 경로를 움직일 때 청소 된 A_{path} (경로 영역)를 나타낼 수 있다. 이 때 Brush의 앞인 d_{front} 와 옆인 d_{side} 에 청소가 안 되는 Dead Zone 영역으로 존재하게 된다. 그리고 초기 출발 존재하는 Dead Zone을 해석하기 위해 브러쉬 중심점까지의 거리 d_{brush} 를 정의하였다. 청소로봇에 정의된 거리들은 그림 1에서 나타내었다.

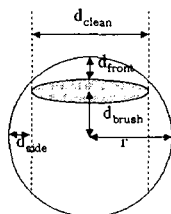


그림 1 청소로봇 기본 구조

청소기를 해석할 때 회전에 대한 해석이 매우 중요하다. 여기서, 청소로봇이 회전할 때를 크게 U-Turn과 L-Turn으로 나누어 해석 하였다. U-turn 경우 Y축 진행방향을 바꿀 때 최소한 d_{detect} (충돌거리)

$= r + r_{turn}$ 전에서 r_{turn} (회전반경)으로 한번의 180°회전으로 바꿀 수 있고, 반면 L-turn 경우는 최소한 $d_{detect} = r$ 전에서 정지 후 90°회전, $2 * r_{turn}$ 만큼 X축으로 이동, 90°회전 세 번의 모션을 갖는다. d_{detect} 와 r_{turn} 은 아래에 식을 정의 하였다.

$$r_{turn} = \frac{(d_{clean} - d_{overlap})}{2} \quad (1)$$

$$d_{detect} = \begin{cases} L-Turn : d_{detect} = r \\ U-Turn : d_{detect} = r + r_{turn} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $d_{overlap}$ 은 청소 경로가 겹친 거리를 말한다. 여기서 L-Turn은 U-turn에 비해 청소 시간은 증가되지만 장애물에 최대한 근접해 $A_{covered}$ (청소된 영역)는 증가 된다. U-Turn과 L-Turn에 대한 해석을 그림2에 나타내었다.

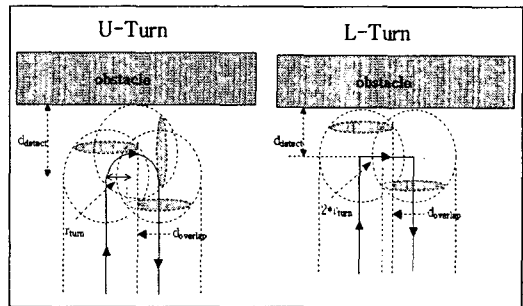


그림 2 U-Turn과 L-Turn 해석

자율 청소로봇의 최종 목적은 최대 작업 영역을 최소 작업시간으로 청소 하는 것이다. 청소로봇 전 영역을 청소하는 운영시간을 t_{op} 는 정 속도의 시간들과 가(감)속 시간으로 나누어서 해석하였다. 정 속도시간은 (v) 정 속도와 s (이동거리)로 표현 하였고 가(감)속도는 t_{acc} 로 나타 내었다. t_{op} 의 수식은 아래와 같다.

$$t_{op} [\text{min}] = \sum_{i=1}^m \frac{s_i}{v_i} + \sum_{j=1}^n t_{accj} \quad (3)$$

여기서, m 은 정 속도의 전체 수를 나타내고, n 은 가(감)속도의 전체 수를 나타낸다. 전체 청소 영역을 해석하기 위해서 다음과 같이 정의 하였다. 전체 청소할 영역 면적은 A_{total} , 청소 된 영역은 $A_{covered}$, 청소 시 겹친 영역은 $A_{overlap}$, 한시간 동안 청소 할 수 있는 청소 영역은 A_{hour} , 청소로봇의 이동경로 영

역은 A_{path} 로 나타내었다.

$$A_{covered} = A_{path} - A_{overlap} \quad (4)$$

$$A_{hour}[\frac{m^2}{h}] = \frac{A_{covered}}{t_{op}} \times 60 \quad (5)$$

$$A_{path} = \sum_{i=1}^k A_{Line_i} + \sum_{j=1}^l A_{circle_j} \quad (6)$$

여기서, k 는 전체 직선 경로 수를 말하고, l 은 전체 회전 경로 수를 말한다. 우선, A_{path} 의 수식은 청소기의 직선 이동 경로의 면적들을 나타낸 A_{Line} 와 청소기의 회전 경로 면적 A_{circle} 의 합으로 나타낼 수 있고 A_{Line} 과 A_{circle} 의 수식은 아래와 같다.

$$A_{Line} = d_{clean} \cdot (L_{Line} + aL_{side}) \quad (7)$$

$$A_{circle} = d_{clean} \cdot \pi r_{turn} \quad (8)$$

여기서, L_{Line} 은 각 Y축 직선 경로 이동 직선거리를 말하고, L_{side} 는 각 X축 직선 경로당 이동거리를 말한다. 그리고 a 는 변수로 U-turn시 $a=0$, L-turn시 $a=1$ 의 값을 가진다. A_{circle} 은 회전반경 r_{turn} 으로 180° 회전 시 청소된 영역을 나타내었다. 청소 후 전체 청소된 정도를 P_{total} 로 청소 영역이 겹친 정도를 $P_{overlap}$ 로 나타내었다.

$$P_{total}[\%] = \frac{A_{covered}}{A_{total}} \times 100 \quad (9)$$

$$P_{overlap}[\%] = (\frac{A_{path}}{A_{covered}} - 1) \times 100 \quad (10)$$

3. 재 경로 계획

기본 4 개의 Template 인 SM(Straight Move),SS(Side Shift),UT(U-Turn),RT(R-Turn)로 구성하였다. 이 4 개의 Template 들을 이용해 경로 계획을 하다가 장애물들을 만날 때 청소 영역을 Cell로 나누어 해석을 하는 CCPP 방식을 이용해 청소 하였다. 청소를 마치면 청소된 Cell 과 청소되지 못한 Cell 들이 존재하게 된다. 그래서 이 절에서는 전 영역 청소 후 청소 못한 영역을 효과적인 재경로 계획 만드는 방법에 대해서 살펴 보려고 한다. 재 경로 계획은 로봇이 최종 도착점인 $G_r = (X_g, Y_g, \theta)$ 에서 출발해 Charge Station 인 $G_{cs} = (X_s, Y_s, \theta)$ 까지 최적의 거리와 시간을 가진 경로를 이동하기 위해서 다음과

같은 방법을 제안 하였다. 우선 경로 계획은 크게 2 가지로 첫째로 CELL 들 사이의 최적의 경로 순서를 정하는 방법이고 둘째로 CELL 안의 4 개의 SG 이 있다는 가정 하에 4 개의 SG_{1-4} 에서 경로 계획을 하는 방법이다. CELL 의 이동 순서를 정한 방법에 대해 그림 3에 나타내었다.

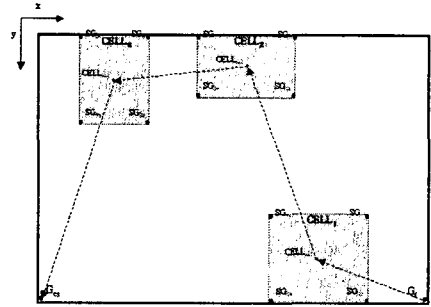


그림 3 CELL 사이의 경로 계획

화살표는 CELL 중심으로 이동하는 CELL 의 이동순서를 가리킨다.

3.1 CELL 들 사이의 경로 계획

- ① CELL 전체 $CELL_{ce}$ (CELL 의 중심 좌표)를 구함
- ② G_r 과 $CELL_{ce}$ 관계에서 CELL 이동 순서 정함
CELL 의 중앙은 $CELL_{ce} = (CELL_{ce_x}, CELL_{ce_y}, 0)$ 로 표현할 수 있으며 머신 비전에서 이용하는 센터를 구하는 공식으로 중앙을 구할 수 있다.

$$CELL_{ce_x} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m jB[i,j]}{A} \quad (11)$$

$$CELL_{ce_y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m iB[i,j]}{A} \quad (12)$$

여기서, $A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B[i,j]$ 는 CELL 의 면적을

말하고 n 는 x 축 좌표 m 는 y 축 좌표의 최대값을 말한다. $B[i,j]$ 는 각 셀들을 표현한다. 그리고 G_r 와 $CELL_{ce_i}$ 사이 최소 거리 순서로 정렬해 CELL 이동 순서 정한다. 셀의 순서를 구하는 식은 다음과 같다.

$$CELL_i = Min_Sort\{\sum_{i=1}^n |G_r - CELL_{ce_i}|\} \quad (13)$$

n 은 셀의 전체수를 말한다.

3.2 CELL 안의 SG 경로 계획

① CELL 안의 SG의 SG_{in} (입력 SG)와 SG_{out} (출력 SG)구함

② 방향과 경로 가중치를 이용해 SG 순서 정합 CELL_{ce}들 사이의 관계를 이용해 각 CELL에 SG_{in} 과 SG_{out} 를 구할 수 있는 수식은 아래와 같고, 이 수식으로 X와 Y 좌표의 (+/-)를 해석해 SG_{in} 과 SG_{out} 를 찾을 수 있다.

$$SG_{in i} = \sum_{j=1}^n CELL_{ce j} - CELL_{ce(i-1)} \quad (14)$$

$$SG_{out i} = \sum_{j=1}^n CELL_{ce j} - CELL_{ce(i+1)} \quad (15)$$

여기서, n은 셀의 전체 수를 말하고 $CELL_{ce0} = G_f$, $CELL_{ce(n+1)} = G_{cs}$ 이다. 그림4는 CELL_i의 SG 경로 계획을 나타낸 것이다.

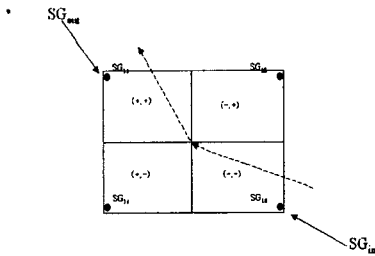


그림 4 SG 경로 계획

3.3 G_{cs}에 도착하면 경로계획 마침

- ① 마지막 CELL에서 SP(Start Point)인 G_{cs}에 도착하면 경로 계획 마침
- ② 수정된 MAP으로 전체 MAP을 재 생성한다.
- ③ 충전 모드로 바꿈

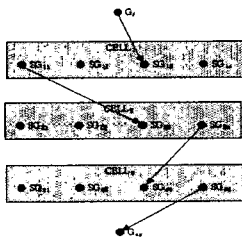


그림 5 청소 안된 영역의 재 경로계획 순서도

그림 5는 그림 3을 각 CELL의 경로 계획과 SG 경로 계획의 순서를 표현한 것이다.

4. 결론

이 논문에서, 자율주행 청소 로봇으로 CCPP를 할 때 청소 영역에 대해 수식화 하였다. 그리고 Template과 CD방법을 같이 이용한 CCPP방식을 사용한 기본 경로 계획을 마친 후 청소 되지 않은 영역을 재 경로 계획하는 방법에 대해 제안 하였다. 재경로를 할 때 크게 셀 사이 경로계획과 셀 안의 중간경로사이의 경로 계획 즉, 2개의 경로 계획으로 나눠서 하였다. 그리고 시뮬레이션으로 제안된 알고리즘의 효율성을 증명하였다.

5. 참고 문헌

- [1] K.L.Doty, R.R.Harrison, "Sweep Strategies for a sensory-driven, Behavior-Based Vacuum Cleaning Agent", AAAI, October, 1993.
- [2] Christian Hofner, Gunther Schmidt, "Path Planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robots", Robotics and Autonomous systems, Vol. 14, pp.199~21, 1995.
- [3] G. Schmidt, C. Hofer, "An Advanced Planning and Navigation Approach for Autonomous Cleaning Robot Operation", IEEE/RSJ, pp.1230-1235, 1998
- [4] R. N. Carvalho, H.A. Vidal, P. Vieira, M. I. Ribeiro, "Complete Coverage Path Planning and Guidance for cleaning Robots", ISIE, pp.677-682, 1997.
- [5] Prizadeh, A. and Snyder, W. "A unified solution to coverage and search in explored and unexplored terrains using indirect control", In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp.2113-2119, 1990.
- [6] Alexander Zelinsky, "A Mobile Robot Exploration Algorithm", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No.6, December, pp.707~717, 1992.
- [7] 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, November, 1993.
- [8] J. S. Oh and J. B. Park and Y. H. Choi, "Complete coverage navigation of clean robot based on the Triangular Cell Map", ISIE, pp.2089-2093, 2001
- [9] 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
- [10] Howie Choset, "Coverage of Known Spaces : The Boustrophedon Cellular Decomposition", Autonomous Robots vol.9, No.3, pp. 247~253, 2000.