

효율적 커버리지 경로 계획 및 동적 환경에서의 경로 주행

Efficient Coverage Path Planning and Path Following in Dynamic Environments

김 시 종¹, 강 정 원², 정 명 진³

Kim Si-Jong¹, Kang Jung-Won², Chung Myung-Jin³

Abstract This paper describes an efficient path generation method for area coverage. Its applications include robots for de-mining, cleaning, painting, and so on. Our method is basically based on a divide and conquer strategy. We developed a novel cell decomposition algorithm that divides a given area into several cells. Each cell is covered by a robot motion that requires minimum time to cover the cell. Using this method, completeness and time efficiency of coverage are easily achieved. For the completeness of coverage in dynamic environments, we also propose a path following method that makes the robot cover missed areas as a result of the presence of unknown obstacles. The effectiveness of the method is verified using computer simulations.

Keywords : Coverage Path Planning, Cell Decomposition, Path Following Method

1. 서 론

본 논문에서는 커버리지 경로 계획(coverage path planning)을 다루고 있다. 일반적인 경로 계획이 시작 점에서 목표점까지 이동하는 최적의 경로를 생성하는 것을 목표로 하는 반면, 커버리지 경로 계획은 주어진 영역의 모든 이동 가능한 영역을 경유하는 경로를 생성하는 것을 목표로 한다. 최근에는 청소 로봇을 비롯한 경비 로봇, 광물 채취 로봇 등의 이동 경로 계획에 많이 응용되고 있다.

가장 많이 사용되는 대표적 접근 방법으로 '나누고 정복하기(divide and conquer)'에 기반한 방법을 들 수 있다¹⁾. 이 방법에서는 영역 구분(cell decomposition) 작업을 통해 주어진 영역을 여러 개의 작은 셀(cell)들로 나눈 다음, 각 셀 영역을 이동 로봇의 간단한 동작으로 커버한다. 기존의 커버리지 방

법 중에서 Choset²⁾의 좌우 교대 영역 구분(boustrophedon decomposition) 방법에서는 스위프 라인(sweep line)이라 부르는 선분을 주어진 영역에 대해 훑어 지나게 한다. 이때 스위프 라인 연결성(connectivity)의 변화에 따라 셀을 구분한다. 셀을 구분한 이후에는 각각의 셀을 좌우 교대 동작이라 부르는 갈지자형(zigzag) 동작을 통해 커버한다. 정해진 셀 순서에 따라 모든 셀에 대해 커버리지를 수행하면 주어진 영역 모두를 커버할 수 있다. 다른 예로, Acar³⁾가 제안한 방법에서는 모스 함수(Morse function)를 이용해 임계점을 구하고 있다. 이 방법은 임계점 사이의 기하학적 특성을 이용해서 완벽한 커버리지를 보장한다. Wong과 MacDonald⁴⁾는 지도의 기하학적 구조를 바탕으로 한 영역 구분 알고리즘을 제안했다. 영역 구분의 결과는 기하학적 지도로 표현되고 로봇은 간단한 갈지자형 동작을 통해 각각의 셀을 커버한다. 이렇게 나누고 정복하는 방법은 작게 나누어진 각각의 셀을 커버하는 것을 통해 전체 영역에 대한 완벽한 커버리지를 보장할 수 있는 매우 유용한 접근 방법이다.

이동 로봇의 커버리지 경로 계획에서 커버리지의 완벽성만큼 중요한 요소로 시간적 효율성을 들 수 있다. Huang⁵⁾은 시간적으로 최적화된 커버리지에 초점을 맞춘

¹⁾ 한국과학기술원 로봇공학계전공 석사과정
(E-mail : terre@cheonji.kaist.ac.kr)

²⁾ 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
(E-mail : kctown@cheonji.kaist.ac.kr)

³⁾ 한국과학기술원 전자전산학과 교수(e-mail : mjchung@ee.kaist.ac.kr)

영역 구분 방법을 제안했다. 이 방법에서는 이동 로봇의 방향 전환(turn) 횟수가 최적화의 기준으로 사용된다. 이동 로봇의 특성상 로봇이 방향을 전환할 때 많은 시간이 소요되는 것을 고려한 방법이다. 이 방법은 최적의 경로를 생성할 수 있지만 간단한 환경에 대해서도 너무 많은 계산 시간이 필요하다는 단점이 있다. Yao^[7]의 방법은 셀 사이의 불필요한 이동 경로를 최소화 하는 것을 통해 최적화된 커버리지를 수행하도록 하는 방법이다. 이 방법의 요점은 셀에서의 진입 지점과 최종 이탈 지점이 주변 셀과 가까워야 한다는 것이다.

본 논문에서 제안한 새로운 커버리지 경로 계획 알고리즘은 완벽한 커버리지를 수행하는 동시에 시간적 효율성을 보장 하는 것을 목표로 하고 있다. 추가적으로 실생활에 응용하기 위해 동적인 환경에서의 경로를 주행하는 방법도 제안하고 있다. 실내 환경을 대상으로 하였고, 주어진 영역에 대한 점유격자지도(occupancy grids map)를 알고 있다고 가정한다.

커버리지의 완벽성을 위해서 나누고 정복하기 방법을 통해 접근한다. 시간적 효율성을 위해서는 가장자리(edge) 성분이 가장 많은 방향을 기준으로 최소 시간 경로를 생성한다. 또한 확률지도의 불확실성에 의해 생성된 작고 가는 셀은 주변의 큰 셀로 병합시킨다. 이것은 불필요하게 많은 셀로 나눔으로써 발생할 수 있는 쓸데없는 이동 경로를 줄여서 시간적 효율성을 높이기 위한 것이다. 동적 환경의 경로 주행(path following)을 위해서는 상태 기계(state machine)를 통해 미확인 장애물에 대한 회피 동작을 수행하고 이로 인해 놓친 영역에 대해 다시 커버하도록 한다.

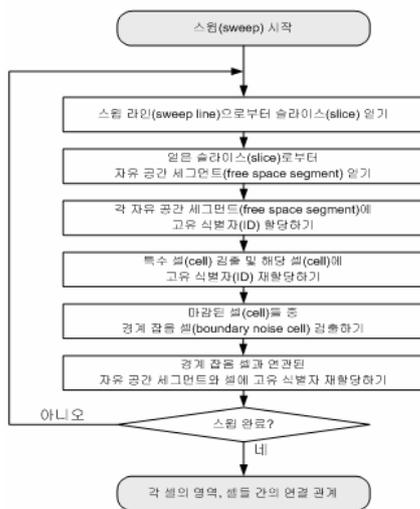


그림 1. 영역 구분 알고리즘

2. 본 론

2.1 커버리지를 위한 경로 생성

2.1.1 영역 구분 과정

제안된 영역 구분 알고리즘에서는 점유격자지도를 영상 처리 기법 중 하나인 모폴로지(morphology) 기법을 사용해 형상 공간(configuration space) 지도로 표현한다. 지도를 형상 공간으로 표현하는 이유는 원형 로봇을 점(point) 로봇으로 간주하기 위해서이다. 영역 구분의 기준으로는 자유 공간 세그먼트(free space segment)들 사이의 관계의 변화를 이용한다. 또한 시간적 효율성을 높이기 위해 불필요한 셀을 제거한다. 이를 통해 셀 사이의 불필요한 이동 경로가 늘어나는 것을 막을 수 있다.

그림 1은 제안된 영역 구분 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 영역 구분 과정에서는 스윙 라인을 주어진 영역의 왼쪽에서 오른쪽으로 훑고 지나가게 한다. 이때 매 순간의 스윙 라인을 슬라이스(slice)라고 정의하자. 이 슬라이스로부터 자유 공간 격자들의 집합인 자유 공간 세그먼트들을 얻는다. 현재의 자유 공간 세그먼트와 이전 순간의 자유 공간 세그먼트 사이의 관계를 고려해 고유 식별자(ID)를 부여한다. 이때 총 4가지 경우가 발생하는데 이는 그림 2에서 확인할 수 있다. 그림에서 격자에 나타난 각각의 무늬들은 같은 고유 식별자를 가지는 격자를 표현한다. 같은 고유 식별자를 갖는 자유 공간 세그먼트들의 집합이 하나의 셀을 나타내게 된다. 하나의 셀이 여러 개의 셀로 분할(그림2 (a))되거나 여러 개의 셀이 하나의 셀로 병합(그림2 (b)) 될 때, 혹은 새로운 셀이 시작(그림 2 (c)) 될 때 현재 자유 공간 세그먼트에 새로운 고유 식별자가 부여된다. 이에 반해 하나의 셀이 연속(그림 2 (d))되는 경우에는 현재의 자유 공간 세그먼트에 이전 고유 식별자를 계속 부여한다.

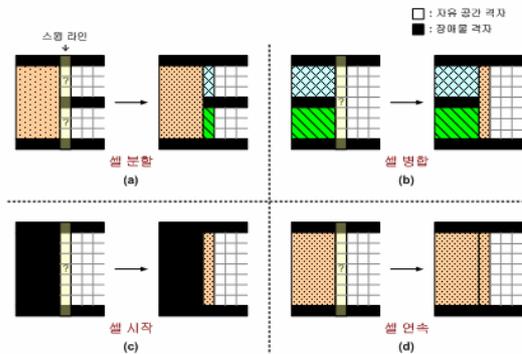


그림 2. 고유 식별자 부여

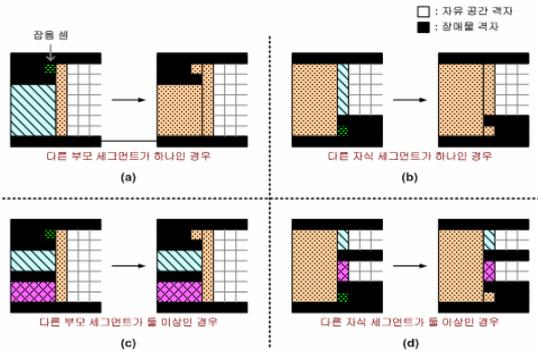


그림 3. 잡음 셀 제거

커버리지 경로 계획에 사용되는 지도는 센서 정보를 이용해 생성된 확률지도이다. 이때 환경의 복잡성과 센서 잡음 등으로 인해 지도는 실제 환경보다 복잡한 형태를 갖게 된다. 이로 인해 영역 구분 과정에서 매우 작고 가는 셀이 생길 수 있는데 이러한 셀을 잡음 셀(noisy cell)이라 정의한다. 이러한 잡음 셀은 경로 생성의 복잡성을 증가시키고 셀 사이의 불필요한 이동 경로를 증가시켜 커버리지 효율성에 악영향을 끼친다. 따라서 효율적인 경로 생성을 위해서는 잡음 셀을 제거해 줄 필요가 있다. 그림 3은 잡음 셀을 제거하는 방법을 나타낸다. 일반적으로 잡음 셀은 장애물 옆에 위치하거나 스윕이 끝나는 셀들 중에 존재한다. 잡음 셀로 인해 셀 분할 또는 셀 병합이 일어났다면 이 과정은 불필요한 과정이다. 이 경우 그림 3의 (a), (b)와 같이 분할 또는 병합을 취소한다. 반면 잡음 셀 이외의 둘 이상의 셀이 분할이나 병합 과정에 영향을 미치는 경우 취소 과정이 아닌 잡음 셀의 병합 과정을 통해 잡음 셀을 제거한다. 이는 그림 3의 (c), (d)를 통해 확인할 수 있다. 이런 과정을 거쳐 잡음 셀을 제거하고 영역 구분을 완료하면 주어진 영역은 각 셀들의 연결 관계를 고려한 인접 그래프(adjacency graph)로 표현된다.

2.1.2 경로 생성 과정

주어진 영역을 셀들로 나눈 후, 다음 과정으로 커버리지 경로를 생성하게 된다. 이를 위해 일종의 그래프 검색 알고리즘을 사용하게 되는데 이는 그림 4에 나타났다. 경로 생성 알고리즘에서는 열린 리스트(OPEN list), 닫힌 리스트(CLOSED list), 우선권 리스트(PRIORITY list)를 통해 셀 순서를 결정한다. 열린 리스트는 다음 순서로 선택될 수 있는 후보 셀들을 담고, 우선권 리스트는 후보 셀들 중에서 높은 우선권을 가진 셀들을 담는다. 마지막으로 닫힌 리스트는 선택 완료된 셀들을 담는다.

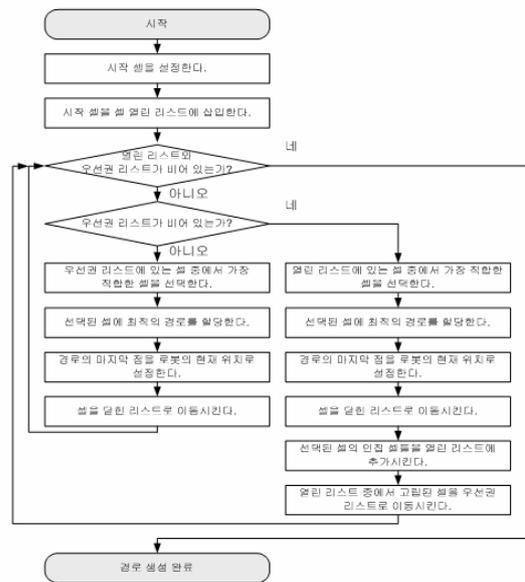


그림 4. 커버리지 경로 생성 알고리즘

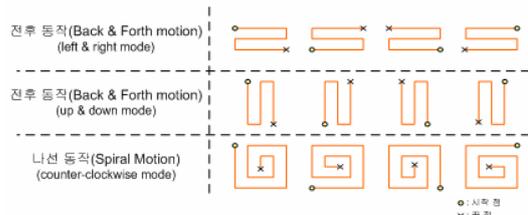


그림 5. 미리 정의된 경로

다음 셀을 선택하는 단계에서는 열린 리스트와 우선권 리스트를 조사한다. 우선권 리스트가 하나 이상의 셀을 가지고 있다면 그 셀들 중에서 현재 위치에서 최소 시간으로 커버 가능한 셀이 선택된다. 우선권 리스트에 셀이 없는 경우 열린 리스트에서 현재 위치에서 최소 시간으로 커버 가능한 셀이 선택된다. 이때 현재 위치에서 최소 시간으로 커버 가능한 셀을 선택하기 위해 미리 정의된 경로를 할당하고 비교하는 과정을 거친다. 이 과정에서 미리 정의된 경로를 할당하는 것은 계산적 부담을 최소화하기 위해서이다. 간단한 로봇 동작을 기본으로 정의한 12가지 타입의 경로는 그림 5에서 확인할 수 있다. 경로 할당을 위해서 허프 변환(Hough transform)을 통해 각 셀의 선 성분들 중 가장 큰 값의 각도를 구하고 이를 이용해 각 셀을 회전시킨다. 이것은 셀 가장자리 성분이 가장 많은 방향에 나란한 경로를 생성하기 위한 과정이다. 로봇이 경로를 따라 이동할 때 셀 내에서 회전하는 횟수는 커버리지 시간에 큰 영향을 미치는 요소이다. 셀을 셀

가장자리 성분이 가장 많은 방향으로 정렬한 다음 이에 나란한 경로를 생성하게 되면 로봇의 회전 횟수가 최소인 경로를 생성할 수 있고 결과적으로 커버리지에 필요한 시간을 줄일 수 있다. 이는 모든 가능한 영역 구분 상황과 각도에 대해 경로를 생성해 보고 최적의 경로를 찾았던 Huang의 방법¹⁶⁾이 너무 많은 계산적 부담으로 인해 실제 상황에 이용될 수 없었던 한계를 해결한 것이라 할 수 있다. 리스트에 있는 셀들 중에서 현재 위치에서 12가지 경로의 시작점까지의 이동 시간과 해당 경로를 통한 커버 시간의 합이 최소가 되는 경로를 생성할 수 있는 셀을 다음 셀로 선택한다. 이렇게 선택된 셀은 닫힌 리스트에 담기고, 선택된 셀의 주변 셀들은 열린 리스트에 추가된다. 그리고 열린 리스트의 셀들 중에서 인접한 셀이 존재하지 않는 셀은 우선권 리스트로 이동시킨다. 여기서 인접한 셀이 존재하지 않는 셀을 고립된 셀이라 정의한다. 고립된 셀을 우선적으로 커버하는 것은 추후에 고립된 셀을 커버하기 위해 먼 거리를 되돌아오는 불필요한 이동 경로를 생성하지 않기 위해서이다. 열린 리스트의 셀이 전부 선택될 때까지 위 과정을 반복하게 되면 전체 영역에 대한 경로가 결정된다.

2.2 동적 환경에서의 커버리지 경로 주행

전체 영역에 대한 커버리지 경로를 생성했다면, 실제로 로봇을 통해 경로를 주행해야 한다. 그러나 실제 환경에서는 예상하지 못한 장애물에 의한 예외 상황이 발생할 수 있다. 본 논문의 알고리즘은 이러한 예외 상황에서 회피 동작을 수행하고 이로 인해 놓친 영역에 대해 다시 커버하는 동작을 수행한다. 여기서 동적 환경이란 주어진 지도에는 없었던 장애물이 경로 주행 도중에 발견될 수 있는 환경을 말한다.

제안된 경로 주행 알고리즘은 그림 6에 나타난 상태 기계(state machine)를 통해 실행된다. 처음에는 표준 모드에서 시작하고 현재 셀의 커버리지가 완료되면 놓친 영

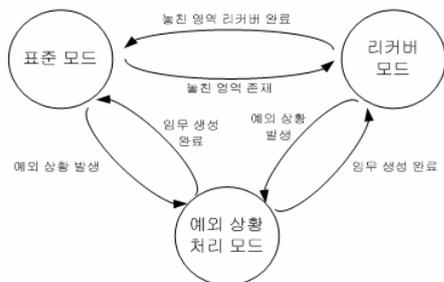


그림 6. 상태 전환 도표

역이 있는지를 검사한다. 이때 놓친 영역이 있다면 리커버(re-cover) 모드로 전환해서 놓친 영역을 다시 커버하게 된다. 만약 표준 모드 또는 리커버 모드에서 장애물이 발견된다면 예외 상황 처리 모드로 전환되고 예외 상황의 처리를 완료하면 이전 모드로 돌아간다. 이때 장애물과의 충돌을 피하기 위한 경로를 생성하기 위해 D* 알고리즘을 사용한다¹⁸⁾. 위 방법을 사용하면 로봇은 동적 환경에서 문제 없이 주어진 경로를 따라 이동할 수 있다.

3. 실험 결과

3.1 잡음 셀 제거의 효과 검증

그림 7는 영역 구분 과정과 경로 생성 과정에서 잡음 셀 제거의 효과를 보여주고 있다. 이때 실험 지도의 크기는 '177격자 x 122격자'이다. 왼쪽에 위치한 그림들은 각각의 경우에 대한 영역 구분 결과를 보여주고 오른쪽에 위치한 그림들은 그에 따른 경로 생성 결과를 보여준다. 실험 지도에서는 너비가 높이보다 크기 때문에 그림 7 (a)에서와 같이 좌우 이동 동작을 통해 커버하는 것이 효과적이다. 그러나 그림 7 (b)에서는 잡음 셀인 셀 1과 셀 3에 의해 여러 셀들로 영역이 나누어지고 이 경우 각 셀들은 높이가 너비보다 크기 때문에 위 아래 이동 동작을 통해 셀을 커버한다. 로봇의 속력은 0.5m/s, 가속도는 0.25m/s², 반지름은 0.16m, 격자의 크기는 '20mm x 20mm' 일 때 두 경우에 대한 커버리지 시간은 표 1과 같다. 이 결과를 통해 잡음 셀 제거 과정이 커버리지 효율성을 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 커버리지 경로 생성

알고리즘의 성능을 검증하기 위해 본 논문에서 제안된 알고리즘의 결과와 기존의 나누고 정복하기 방법에 기반

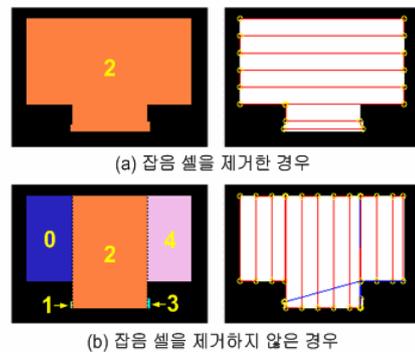


그림 7. 잡음 셀 제거의 효과

표 1. 잡음 셀 제거 여부에 대한 결과 비교

	커버리지 시간
잡음 셀을 제거한 경우	84초
잡음 셀을 제거하지 않은 경우	128초

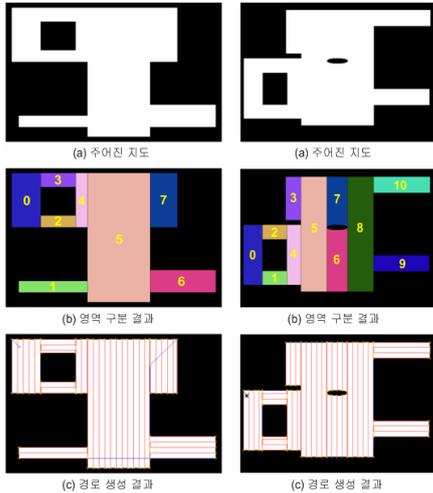
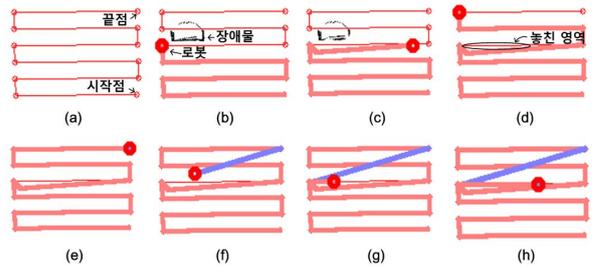


그림 8. 제안된 경로 생성 알고리즘의 성능 비교

표 2. 제안된 경로 생성 알고리즘의 성능 비교 결과

	환경 1에 대한 커버리지 시간	환경 2에 대한 커버리지 시간
제안된 알고리즘을 통해 생성한 경로	710.25초	593.92초
좌우 이동 동작에 의한 경로	1000.56초	719.89초
위아래 이동 동작에 의한 경로	832.79초	690.94초

한 알고리즘의 결과를 비교해 보았다. 그림 8은 제안된 알고리즘의 커버리지 경로 생성 결과를 보여준다. 왼쪽에 위치한 그림들은 실험 환경 1에 대한 그림들이고, 오른쪽에 위치한 그림들은 실험 환경 2에 대한 그림들이다. 그림 8 (a)는 결과 비교를 위한 ‘433격자 x 643격자’ 크기의 형상 공간 실험 지도이다. 주어진 영역에 대한 영역 구분 과정을 마친 결과는 그림 8 (b)에서 확인할 수 있다. 그림 8 (c)는 경로 생성 결과를 보여준다. 여기서 로봇의 초기 위치를 ‘x’표시가 된 위치로 가정하면 로봇은 셀 0에 위치하게 되고 셀 0은 커버리지를 위한 시작 셀이 된다. 미리 정의 된 12가지 타입의 경로 중 최소 시간을 만족시키는 경로를 셀 0에 할당한 후 이 경로의 마지막 로봇 위치에서 최소 시간으로 커버 가능한 셀이 다음 셀로 선택된다. 이 경우 셀 3이 다음 셀로 선택된다. 이런 과정을 모든 셀에 대해 반복하면 전체 영역에 대한



얇은 선은 계획된 경로, 굵은 선은 커버한 경로를 뜻한다.

그림 9. 동적 환경에서의 커버리지 경로 주행

커버리지 경로가 생성된다. 로봇의 속도, 가속도, 반지름 그리고 격자의 크기를 이전과 동일하게 설정한 경우에 제안된 알고리즘과 기존의 경로 생성 알고리즘을 비교한 결과는 표 2와 같다.

위 결과를 통해 커버리지를 위해 단순히 일정한 동작을 할당하는 기존의 알고리즘에 비해 제안된 알고리즘이 더 빠른 시간 안에 커버리지를 수행 할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 일정한 동작만을 사용하는 커버리지의 경우에는 나누고 정복하기 방법을 사용해서 완벽한 커버리지는 보장할 수 있을지라도 시간적 효율성을 보장할 수는 없다. 반면 제안된 알고리즘은 나누고 정복하기 방법을 통해 완벽한 커버리지를 보장하는 동시에 각각의 셀에 가장자리 성분이 가장 많은 방향과 나란한 경로를 할당하고 셀간의 이동 거리를 최소로 하는 경로를 생성하는 것을 통해 시간적 효율성을 보장할 수 있다.

3.3 동적 환경에서의 커버리지 경로 주행

동적인 환경이란 알지 못했던 장애물이 환경에 추가된 경우라 정의한다. 이때 로봇은 거리 센서를 가지고 있다고 가정하고 동적 환경에서 장애물을 만났을 경우의 결과를 그림 9에서 보이고 있다. 그림 9 (a)는 주어진 실험 공간에서의 커버리지 경로를 나타낸다. 로봇이 경로를 주행하는 도중에 장애물을 만나면 (그림 9 (b)) 장애물을 회피하고(그림 9 (c)), 남은 경로에 대한 커버리지를 수행한다(그림 9 (d)). 경로의 끝에 도달하면(그림 9 (e)) 놓친 영역을 다시 커버하기 위해 놓친 영역의 시작 위치로 돌아오고 (그림 9 (f)) 놓친 영역에 대해 다시 커버리지를 수행한다(그림 9 (g), (h)). 이 실험 결과는 제안된 경로 주행 방법을 통해 완벽한 커버리지가 수행될 수 있음을 보이고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 커버리지 완벽성뿐만 아니라 효율성까지

지 고려한 이동 로봇의 경로 생성 방법을 다루었다. 커버리지 완벽성을 위해서는 이미 잘 알려진 방법인 ‘나누고 정복하기’ 방법을 사용하였고 이를 위해 새로운 영역 구분 알고리즘을 제안했다. 제안된 알고리즘은 불필요한 작은 셀을 주변의 큰 셀로 병합하는 과정을 통해 불필요한 이동 경로를 줄일 수 있으므로 보다 효율적인 커버리지 경로를 생성할 수 있다. 영역 구분의 결과로서 셀 사이의 연결 관계를 고려한 인접 그래프를 얻을 수 있다. 시간적 효율성은 각 셀에 최적의 경로를 할당하고 셀 간의 이동 경로를 최소화 하는 것을 통해 보장 받을 수 있다. 또한 동적 경로 주행 방법을 통해 경로 주행 도중에 알지 못했던 장애물을 만날 경우 장애물 회피 동작을 수행하고 그로 인해 놓친 영역을 다시 커버할 수 있다. 제안된 알고리즘을 통한 커버리지의 완벽성과 효율성 그리고 동적 환경에서의 커버리지 수행은 시뮬레이션을 통해 검증했다.

완벽한 커버리지를 수행하면서도 효율성을 높이기 위해서는 커버리지에 필요하지 않은 이동 경로를 최소화하는 것이 필요하다. 이를 위해 예상 이동 경로를 커버리지 경로로 사용할 수 있도록 한다면 불필요한 경로를 최소화한 커버리지 경로를 생성할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] H. Choset, "Coverage for robotics - A survey of recent results," *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, vol. 31, no. 1-4, pp.113-126, 2001.

[2] H. Choset, "Coverage of known spaces: the Boustrophedon cellular decomposition," *Autonomous Robots*, vol. 9, no. 3, pp.247-253, 2000.

[3] E. U. Acar, H. Choset, A. A. Rizzi, P. N. Atkar, and D. Hull, "Morse Decompositions for Coverage Tasks," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 4, pp.331-344, 2002.

[4] S. C. Wong and B. A. MacDonald, "A topological coverage algorithm for mobile robots," in *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Lag Vegas, USA, 2003, pp.1685-1690.

[5] S. C. Wong and B. A. MacDonald, "Complete coverage by mobile robots using slice decomposition based on natural landmarks," in *Proc. of the 8th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*, Auckland, New Zealand, 2004, pp.683-692.

[6] W. H. Huang, "Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms," in *Proc. of the IEEE International*

Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001, pp.27-32.

[7] Z. Yao, "Finding efficient robot path for the complete coverage of a known space," in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Beijing, China, 2006, pp.3369-3374.

[8] A. Stentz, "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments," in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, USA, 1994, pp.3310-3317



김 시 종

2006 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부(공학사)
2006~현재 한국과학기술원 로봇공학학제전공 석사과정

관심분야: mobile robot, path planning



강 정 원

2004 고려대학교 전기전자전파공학부(공학사)
2006 한국과학기술원 전자전산학과(공학석사)
2006~현재 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정

관심분야: mobile robot, navigation



정 명 진

1973 서울대학교 공과대학 전기공학과(공학사)
1977 미시간대학교 전기공학과(공학석사)
1983 미시간대학교 제어공학과(공학박사)
1976 국방과학연구소 연구원
1981~1983 미시간대학교 CRIM 연구 조교
1983~현재 한국과학기술원 전자전산학과 교수

관심분야: 서비스 로봇, human-robot interaction