

uDEAS를 이용한 이동 로봇의 최적 전역 경로 계획

Optimized Global Path Planning of a Mobile Robot Using uDEAS

김조환 · 김만석 · 최민구 · 김종욱

Jo Hwan Kim, Man Seok Kim, Min Koo Choi and Jong-Wook Kim

동아대학교 전자공학과

요 약

본 논문에서는 uDEAS(Univariate Dynamic Encoding Algorithm for Searches)를 이용하여 두 가지의 이동 로봇 최적 전역 경로 계획을 제안한다. 이동 로봇의 자율 주행을 위해서는 빠른 시간 내에 작업 공간에서의 최적 경로를 생성해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이동 로봇의 실시간 최적 경로 계획을 위해 전역 경로 계획을 도입하여 장애물 지역과 비장애물 지역을 확인하고, 지도상의 노드점과 노트점을 이용하여 출발 지점과 도착 지점 사이의 기본 경로를 생성한다. 그리고 기본 경로를 사용하여 두 가지의 방법으로 경로를 생성하게 된다. 첫 번째 방법은 기본 경로에서 세 개의 노드점을 이용하여 대각선 경로를 생성하는 방법이다. 두 번째는 혼합 다항식의 파라미터를 uDEAS를 이용하여 탐색하고, 곡선 궤적을 생성하는 방법이다. 시뮬레이션을 통해 두개의 방법에 대해 비교 분석하였다.

키워드 : 경로 계획, 이동 로봇, uDEAS, 연산 최적화 알고리즘

Abstract

This paper proposes two optimal path planning methods of a mobile robot using uDEAS (univariate Dynamic Encoding Algorithm for Searches). Before start of autonomous traveling, a self-controlled mobile robot must generate an optimal global path as soon as possible. To this end, numerical optimization method is applied to real time path generation of a mobile robot with an obstacle avoidance scheme and the basic path generation method based on the concept of knot and node points between start and goal points. The first improvement in the present work is to generate diagonal paths using three node points in the basic path. The second innovation is to make a smooth path plotted with the blending polynomial using uDEAS. Effectiveness of the proposed schemes are validated for several environments through simulation.

Key Words : path planning, mobile robot, uDEAS, heuristic algorithm

1. 서 론

현대의 로봇 기술은 나날이 발전하고 있으며, 최근에는 사람이 직접 조종하지 않는 무인 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 오늘날의 산업현장에서 사람이 수행할 수 있는 많은 분야에서 이동 차량이나 이동 로봇을 이용하여 업무를 수행하고 있다. 따라서 이동 로봇이 예전의 단순 반복 작업에서 벗어나 이동 로봇 스스로 판단하여 주행할 수 있는 자율 주행 방법이 필요하게 되었다[1]. 최근에는 주로 이동 로봇의 경로 계획과 장애물 회피, 위치 추정에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

로봇이 사람의 도움을 받지 않고 주어진 임무를 수행하기 위해서는 고정 및 이동 장애물을 회피하면서 목적지까지 이동할 수 있는 자율 주행 기술이 필요하다. 자율 주행에서는 로봇의 위치를 추정할 수 있는 자기 위치 추정(localization), 이동을 위한 경로 계획(path planning), 장애

물들을 회피(obstacle avoidance) 할 수 있어야 한다[2].

이동 로봇이 목표 지점까지 경로를 인식하여 최적의 경로를 생성해야할 때 두 가지 고려해야할 점이 있다. 첫째, 주행하고자 하는 목표 지점까지 경로를 파악하는 인식성과 둘째, 주행 중에 인식되는 장애물에 대한 적절한 경로를 스스로 생성하여 이동할 수 있는 유연성이 필요하다[3]. 이렇게 이동 로봇이 주행하고자 하는 목표점을 향해 이동하기 위하여 경로 계획을 수립하는 방법은 크게 전역 경로 계획과 지역 경로 계획의 두 가지로 분류할 수 있다[4].

전역 경로 계획은 출발 지점부터 목표 지점까지 주행할 모든 지역의 지형 정보 및 장애물 형태 등의 기하학적 정보를 통해 이동 로봇이 이동할 수 있는 전역 경로를 생성한다. 보통 실외에서 사용되며 GPS 등의 위성 항법 장치를 이용하여 로봇의 절대 위치 좌표를 추정할 수 있다. 지역 경로 계획은 이동 로봇에 부착된 거리 센서, 비전 센서 등을 통해 한정된 공간 내에서 장애물을 회피할 수 있는 최적 지역 경로 및 지도를 생성한다. 보통 실내에서 사용되며 전역 초음파 시스템이나 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)을 이용하여 로봇의 상대적인 위치 좌표를 추정할 수 있다[5].

기존의 경로 계획의 경우 직선으로 경로를 생성한다 [1-2,4,6]. 장애물이나 복잡한 구조물이 없는 경우에는 이동

접수일자 : 2010년 11월 30일

완료일자 : 2011년 4월 15일

본 연구는 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단)로서, 관계부처에 감사드립니다.

로봇이 빠른 속도로 이동할 수 있지만 다수의 장애물이나 복잡한 구조물이 있는 경우 직선으로만 이루어진 경로에서는 경로가 급격히 변하는 구간이 많아진다. 경로가 급격하게 변하는 지점에서는 이동 로봇이 멈추거나 급격하게 방향을 전환해야 하기 때문에 불필요한 에너지를 많이 소모하게 되고, 방향 전환을 할 때 시간을 소모하게 된다. 그러므로 이러한 직선 경로의 단점을 해결하기 위하여 부드러운 곡선 경로를 생성해야 한다. 최근에 많이 사용되고 있는 DWA(dynamic window approach), EB(elastic band), VFH(vector field histogram) 등은 지역경로 계획으로서 센서기반으로 실시간으로 주변 장애물을 인식하여 목표점까지 이동하는 방법을 사용한다. 지역경로계획 방법은 새로운 장애물 발견시 실시간 처리가 가능하고, 로봇의 동역학 특성을 고려할 수 있는 장점이 있지만, 지역적인 제한으로 인해 지역최소문제에 빠져 목표점에 도달하지 못하는 경우가 발생할 수 있다[6].

따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해 두 가지 방법의 전역 경로 계획을 제안한다. 이동 로봇의 절대 좌표와 장애물의 정보를 이용하는 전역 경로 계획을 도입하여 장애물 지역과 비장애물 지역을 확인한다. 그리고 지도 상에 이동 로봇이 이동할 수 있는 경로의 탐색점인 노트점과 노트점을 이용하여 출발 지점과 도착 지점 사이의 기본 경로를 생성한다. 생성된 기본 경로를 이용하여 본 논문에서는 두 가지 방법의 경로를 생성한다. 첫 번째는 삼각형에서 두 변의 길이의 합보다 대각선의 길이가 더 짧은 점을 이용하여 기존의 직선 경로를 개선하는 방법이다. 두 번째는 혼합 다항식(Blending Polynomial)을 이용하여 곡선 경로를 생성하는 방법이다. 혼합 다항식의 경우 복잡한 수식으로 이루어져 있기 때문에 고속의 연산을 통하여 빠르게 파라미터를 탐색해야 한다. 이를 위해서 고속의 연산 최적화 알고리즘인 uDEAS(Univariate Dynamic Encoding Algorithm for Searches)를 이용하여 혼합 다항식의 파라미터를 탐색하였다. 두 가지 방법을 시뮬레이션을 통해 검증하고 최적화된 경로 계획을 제안한다.

2. 기본 경로 생성과 최단 경로 생성 방법

본 논문에서는 기존에 사용되고 있는 경로 생성 방법을 기본 경로 계획 알고리즘으로 활용하여 기본 경로를 생성한다[7]. 그리고 생성된 기본 경로를 바탕으로 두 가지의 개선된 경로를 생성한다. 그 중 첫 번째 방법을 이번 절에서 설명한다.

본 논문에서는 이동 로봇이 주행하기에 앞서 다음과 같은 조건이라고 가정하였다.

- 1) 이동 로봇은 작업 공간 내에 존재하는 장애물들과 비장애물 지역에 대해 알고 있다.
- 2) 이동 로봇의 사용자가 최적 경로 계획을 수행하여 획득한 절대 좌표들을 이용하여 이동 로봇이 주행하게 된다.

이동 로봇의 경로 계획의 알고리즘은 이동 지역 내에 장애물들과 비장애물 지역에 대해 출발 지점과 도착 지점 사이의 노트점과 노트점을 이용하여 최적 경로를 생성한다.

그림 1은 이동 로봇의 경로 계획에 사용되는 노트점과 노트점에 대해서 나타낸 것이다. 그림 1에서 기준 경로는 출발 지점과 도착 지점 사이의 장애물을 무시한 최단 직선

경로이다. 그리고 노트점은 최단 경로를 기준으로 하여 수직하는 점들로써 일정한 간격으로 나뉘어져 있다. 이 노트점을 기준으로 이동 로봇이 이동할 수 있는 후보 경유 지점을 노트점이라고 한다.

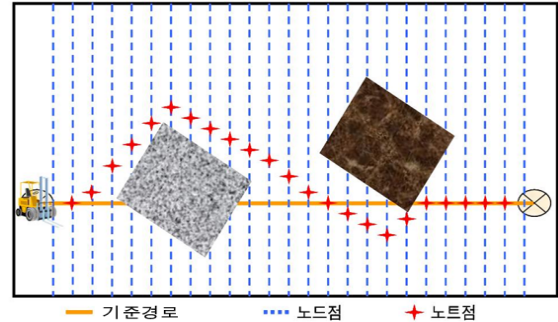


그림 1. 이동 로봇의 경로 계획
Fig. 1. Path planning of a mobile robot

본 논문에서의 각 노트점 사이의 간격은 이동 로봇의 최소 회전 반경을 기준으로 고정값으로 설정하였고, 각 노트점마다의 노트점의 범위는 일정하게 하였다.

본 논문에서 이동 로봇의 기본 경로 계획 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 이동 로봇의 출발 지점과 도착 지점을 설정한다.
- 2) 출발 지점과 도착 지점 사이의 장애물을 무시한 최단 경로를 생성한다.
- 3) 최단 경로를 기준으로 수직으로 각 노트점들을 생성한다.
- 4-1) 장애물이 존재하지 않는 지역에서는 최단 경로를 따라 움직인다.
- 4-2) 장애물이 존재하는 지역에서는 노트점에서 각 노트점들 사이의 거리를 계산하여 거리가 가장 짧은 노트점을 선택하여 최단 경로를 생성한다.

위와 같은 경로 계획 알고리즘을 통해 기본 경로를 생성하게 된다. 위의 경로 계획을 통해 생성된 경로의 경우 불필요하게 많은 노트점과 노트점을 통과하게 되어 이동 로봇의 이동 거리 및 시간을 증가시키게 된다. 따라서 생성된 경로에 대해 불필요한 노트점과 노트점을 없애는 과정을 통해 최단 경로를 생성해야 한다.

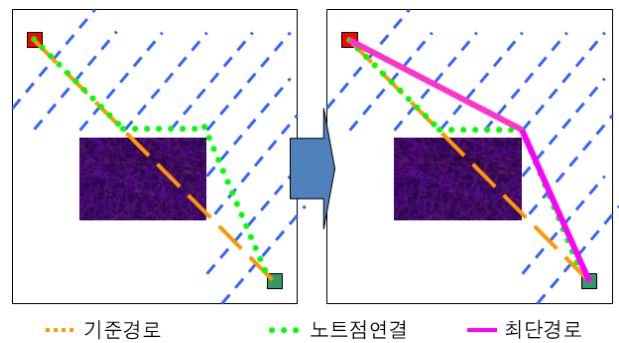


그림 2. 경로 계획의 최단 경로 생성 과정
Fig. 2. Concept of generating the shortest path

그림 2는 앞에서 설명한 경로 계획의 최단 경로 생성 과정을 나타낸 그림이다. 그림 2의 (a)와 같이 기본 경로 계획 알고리즘을 통해 각 노드점과 노드점들을 서로 연결하여 기본 경로를 생성한다. 하지만 기본 경로의 경우 기본 경로 계획 알고리즘을 통해 경로를 생성하였기 때문에, 도착 지점까지 장애물 주위를 돌면서 이동하므로 필요 이상의 노드점과 노드점들을 지나게 된다. 따라서 최단 경로 생성 과정을 통해 이러한 점들을 지나지 않아야 한다. 삼각형에서 두 변의 길이의 합보다 대각선의 길이가 더 짧다는 점을 이용하여 그림 2의 (b)와 같이 최단 경로 생성 과정을 거쳐 새로운 경로를 생성한다.

본 논문에서 첫 번째로 제안하는 최단 경로 생성 과정의 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 출발 지점을 기준으로 기본 경로에서 경로의 각도가 급격하게 변하는 지점까지 한 변을 이룬다.
- 2) 각도가 급격하게 변하는 지점을 기준으로 다음 노드점까지 한 변이 된다.
- 3) 1과 2에서 얻게 되는 두 변을 이용하여 대각선 길이를 계산한다.
- 4) 생성된 대각선 길이와 나머지 전체 경로의 거리를 계산한다.
- 5) 2)의 과정으로 돌아가 각도가 급격하게 변하는 지점과 2)에서 사용했던 노드점의 다음 노드점을 기준으로 한 변을 생성하고 4)의 과정까지 계산한다.
- 6) 다음의 각도가 급격하게 변하는 지점까지 5)의 과정을 반복한다.
- 7) 최종적으로 거리가 가장 짧은 대각선 경로를 생성한다.

최단 경로 생성 과정을 거치게 되면 그림 2의 (b)와 같이 불필요한 노드점과 노드점들을 지나지 않고 대각선 경로를 생성하기 때문에 이동 로봇의 이동 거리가 줄어들음을 알 수 있다. 하지만 최단 경로 생성 과정 또한 직선으로 이루어져 있기 때문에 경로의 각도가 급격하게 변하는 지점에서는 이동 로봇이 멈추거나 급격하게 방향을 전환해야 하기 때문에 불필요한 에너지를 많이 소모하게 된다.

따라서 본 논문에서 이러한 단점을 해결하기 위해서 혼합 다항식을 이용하여 부드러운 곡선을 생성하게 된다. 이러한 곡선 경로를 이용하여 이동 로봇이 속도를 줄이지 않고 계속 해서 경로를 따라 이동할 수 있으므로 에너지 소모 및 시간을 줄일 수 있다.

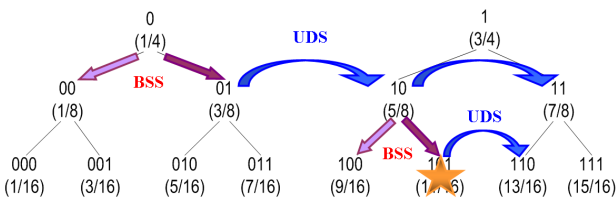


그림 3. BSS와 UDS의 1차원 지역탐색 원리
Fig. 3. Search principles of BSS and UDS in one-dimensional space.

3. uDEAS

곡선 경로 생성 방법에 앞서, 이번 절에서는 혼합다항식

의 파라미터 탐색에 사용된 uDEAS 알고리즘에 대해서 설명한다.

DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)는 비선형 최적화 기법으로 비용함수(cost function)의 미분정보를 사용하지 않고 잘 계획된 컴퓨터 연산만으로 비용함수의 전역 최적화를 탐색하는 최적화 기법이다. DEAS는 이진 스트링의 최하위 비트에 0을 붙이고 복호화하면 이진 스트링의 복호화된 실수값보다 감소하고, 1을 붙이고 복호화하면 이진 스트링의 실수값보다 증가하는 성질을 이용했다 [8-9].

DEAS는 이진 스트링이나 이진 행렬로 표현되는 현재 해의 가장 오른쪽 비트(least significant bit, LSB)나 열(column)에 0과 1을 붙임으로써 탐색 방향을 찾고, 찾아진 방향에 대해 비용함수가 최소가 될 때까지 증가(INC, increment addition) 혹은 감소(DEC, decrement subtraction) 연산을 수행함으로써 주변 지역으로 탐색을 확장한다. 이러한 ‘방향 탐색-확장 탐색’이 결합되어 한 session을 이루고 탐색이 진행되므로 심화탐색(exploitation)과 확장탐색(exploration)이 DEAS에서는 매 session마다 조화롭게 작용한다.

일반적으로 DEAS는 크게 지역최적화(local search)와 전역최적화(global search) 과정으로 나눌 수 있으며, 지역 최적화는 탐색점 주변을 면밀히 탐색하는 bisectional search(BSS, 양분탐색)와 BSS에서 얻은 정보를 기반으로 이웃 영역을 확장 탐색하는 unidirectional search(UDS, 단방향 탐색)로 나눌 수 있다. 그리고 전역최적화를 위해서는 가장 용이하면서도 간단하게 구현할 수 있는 multistart 기법을 채용했다[8].

DEAS는 지역 탐색을 위해 BSS와 UDS라는 탐색 루틴을 사용한다. BSS에서는 그림 3에서 보는 것처럼 이진 스트링에 0과 1을 붙여서 복호화하고 비용함수를 계산한 후 최적의 탐색 방향을 선택하는 과정을 수행한다. 그리고 UDS에서는 비용함수가 계속해서 감소할 때까지 BSS에서 계산된 최적 방향으로 확장된 탐색을 수행한다. 그리고 multistart 기법은 임의의 시작점에서 지역최적화를 통해 지역해를 발견한 후 다시 임의의 시작점으로부터 지역최적화를 반복하는 방법으로 전역해를 찾는 전역최적화 방법이다. 이 방법에서 전역해는 탐색된 모든 지역해 중에서 최소인 것으로 선택된다.

DEAS는 그림 3과 같이 BSS와 UDS라는 기본 탐색원리는 유지하고 계산량의 차이와 이웃 행렬을 구성하는 방법에 따라 eDEAS(exhaustive DEAS) [10]와 uDEAS(univariate DEAS) [9], mDEAS(modular DEAS)[11]가 개발되었다. eDEAS는 가장 초기 알고리즘으로 개발되었고, 그 다음으로 각 변수 별로 BSS와 UDS를 생성하는 알고리즘인 uDEAS가 개발되었다. uDEAS는 모든 변수에게 동시에 변화를 주며 이웃행렬을 생성하는 방법 대신, 그림 4에서와 같이 나머지 변수는 고정된 채 한 변수에 대해서만 BSS와 UDS를 수행한 후 그 다음 변수로 진행시키는 방식으로 개선되었으며, x_1 부터 x_n 까지 생성된 이웃행렬의 총 수는 파라미터의 약 2배수에 불과하지만, 30차원의 고차 함수는 물론 저차의 테스트 함수에 대해서도 eDEAS와 거의 동등한 탐색 성능을 보였다. 그리고 다차원 문제나 비선형문제에 대해 탁월한 최적화 성능을 보였으며 DEAS series 중 가장 탐색 속도가 빠르다[9].

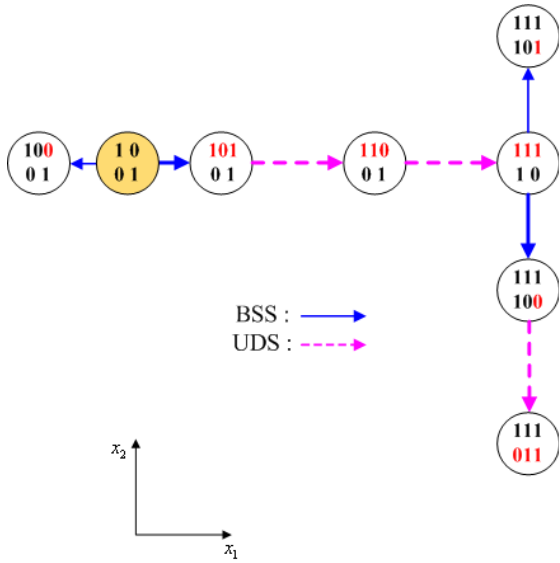


그림 4. 2차원에서의 uDEAS 지역탐색 원리
Fig. 4. Local search aspect of uDEAS in two-dimensional space

따라서 본 논문에서는 실시간 최적화를 위해 탐색 속도가 가장 빠른 uDEAS를 이용하여 혼합 다항식의 파라미터를 검색한다. 그리고 이를 이용하여 기본 경로 과정을 통해 생성된 직선 경로를 곡선 경로로 새롭게 생성한다.

4. 곡선 경로 생성 방법

이번 절에서는 두 번째로 제안하는 곡선 경로 생성에 사용된 혼합다항식의 수식과 uDEAS로 탐색하게 될 혼합다항식의 파라미터에 대해서 설명한다.

혼합 다항식은 전체 궤적의 경유점 사이를 부분 궤적으로 분할하고 각 부분 궤적 경유점에서 함수값과 기울기 값을 부여해주면, 연속조건을 이용해서 전체 궤적을 수식으로 표현하는 방법이다[12].

혼합 다항식은 저차의 다항식을 이어 붙인 것이기 때문에, 고차의 다항식이 필요한 부드러운 곡선을 보다 효율적으로 표현할 수 있다. 즉, 어떤 단위 궤적의 초기 시간 t_0 와 최종 시간 t_f 에 대해 3차 다항식을 구하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= a_{0x} + a_{1x}(t-t_0) + a_{2x}(t-t_0)^2 + a_{3x}(t-t_0)^3 \\ y(t) &= a_{0y} + a_{1y}(t-t_0) + a_{2y}(t-t_0)^2 + a_{3y}(t-t_0)^3 \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 시간 t 에 대한 x 좌표와 y 좌표를 의미한다. 그리고 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 식 (2)와 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} x(t_0) &= x_0, x(t_f) = x_f \\ y(t_0) &= y_0, y(t_f) = y_f \\ \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_0} &= v_{0x}, \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_f} = v_{fx} \\ \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=t_0} &= v_{0y}, \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=t_f} = v_{fy} \end{aligned} \quad (2)$$

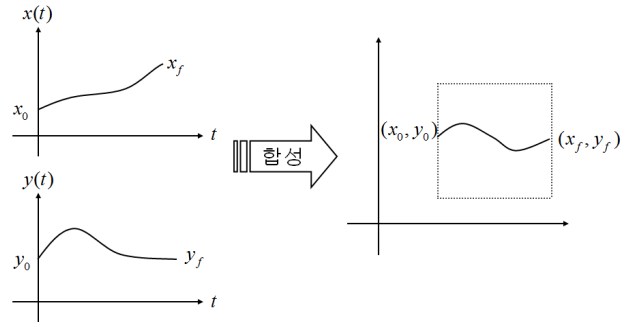


그림 5. 혼합다항식을 이용한 2차원 로봇 궤적 생성
Fig. 5. Generation of a two-dimensional robot trajectory using two blending polynomials

여기에서 x_0 와 x_f , y_0 와 y_f 는 출발 지점과 도착 지점의 x 좌표와 y 좌표를 나타내며, v_0 와 v_f 는 초기 속도와 최종 속도를 각각 의미한다. 그리고 식 (3)은 식 (1)에서의 각각의 가중치를 의미한다.

$$\begin{aligned} a_{0x} &= x_0, a_{0y} = y_0, a_{1x} = v_{0x}, a_{1y} = v_{0y} \\ a_{2x} &= \frac{3(x_1 - x_0) - (2v_{0x} + v_{1x})(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^2} \\ a_{3x} &= \frac{2(x_0 - x_1) + (v_{0x} + v_{1x})(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^3} \\ a_{2y} &= \frac{3(y_1 - y_0) - (2v_{0y} + v_{1y})(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^2} \\ a_{3y} &= \frac{2(y_0 - y_1) + (v_{0y} + v_{1y})(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^3} \end{aligned} \quad (3)$$

그림 5는 혼합 다항식을 적용하여 2차원에서의 로봇 궤적을 생성한 예를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에서 각각 하나의 경유점 사이를 두 개의 단위 궤적을 가지는 곡선을 생성하게 된다. 그리고 두 개의 생성된 곡선을 합성하면 최종적으로 하나의 곡선이 된다. 이 곡선이 이동 로봇이 이동하는 경로가 된다.

본 논문에서는 기본 경로에서 시간 t 의 1/2지점을 경유점으로 하여 2개의 단위 궤적을 가지는 궤적을 설정하였고, 1/3, 2/3지점을 경유점으로 하여 3개의 부분 궤적을 가지는 궤적을 설정하였다.

한 개의 경유점을 지나는 경우 두 개의 단위 궤적을 이용해서 하나의 최적 경로 궤적을 근사화 한다. 이 경우 $t_0 \sim t_m$ 구간과 $t_m \sim t_f$ 구간에서 단위 궤적을 만든 후, 이어 붙여서 하나의 궤적을 만드는 경우 결정해야 할 계수는 식 (4)와 같이 총 9개가 된다. 여기에서 P_{2x} 와 P_{2y} 는 각각 식 (1)~(3)에서 $x(t)$ 와 $y(t)$ 에 대해 uDEAS를 이용하여 탐색해야 할 파라미터들을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} P_{2x} &= [t_0 t_m t_f x_0 x_m x_f v_{0x} v_{mx} v_{fx}] \\ P_{2y} &= [t_0 t_m t_f y_0 y_m y_f v_{0y} v_{my} v_{fy}] \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 t_0 와 t_f 는 각각 출발 지점과 도착 지점의 시간 계수를 의미하며, t_m 은 경유점을 지나는 시간 계수이다. 초기 속도와 최종 속도는 궤적의 시작과 끝을 부드럽게 하기 위해 $v_{0x} = v_{fx} = v_{0y} = v_{fy} = 0$ 으로 설정하였다. 출발 지점과 도착 지점의 좌표는 x_0 와 x_f , y_0 와 y_f 이다. 그러므로 식

(4)에서 최종 미지수로 남은 값은 식 (5)와 같이 경유점에서의 x 좌표와 y 좌표인 x_m, y_m 과 그 속도인 v_{mx}, v_{my} 가 되며, 이 파라미터들의 최적값 θ_2 를 uDEAS를 이용하여 탐색하였다.

$$\theta_2 = [x_m y_m v_{mx} v_{my}] \quad (5)$$

두 개의 경유점을 지나는 경우 세 개의 단위 제적을 필요하며, 전체 제적을 구성하는 계수는 식 (6)과 같이 총 12개가 된다.

$$P_{3x} = [t_0 t_{m1} t_{m2} t_f x_0 x_{m1} x_{m2} x_f v_{0x} v_{m1x} v_{m2x} v_{fx}] \quad (6)$$

$$P_{3y} = [t_0 t_{m1} t_{m2} t_f y_0 y_{m1} y_{m2} y_f v_{0y} v_{m1y} v_{m2y} v_{fy}]$$

각 계수의 설정은 앞의 식 (4)와 같은 방법으로 설정하고 최종 미지수로 남은 값은 식 (7)과 같다. 앞에서와 마찬가지로 각각의 경유점에서의 x 좌표와 y 좌표인 $x_{m1}, y_{m1}, x_{m2}, y_{m2}$ 와 그 속도인 $v_{m1x}, v_{m1y}, v_{m2x}, v_{m2y}$ 의 최적값 θ_3 를 uDEAS를 이용하여 탐색하였다.

$$\theta_3 = [x_{m1} x_{m2} y_{m1} y_{m2} v_{m1x} v_{m1y} v_{m2x} v_{m2y}] \quad (7)$$

5. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 사용된 최적 경로 시뮬레이터는 Visual Studio를 사용하여 제작하였다. 고정 장애물은 3m×3m와 2m×2m로 설정하였다. 두 개의 고정 장애물을 지나서 한 개의 경유점을 지나는 경우와 세 개의 고정 장애물을 지나서 두 개의 경유점을 지나는 경우로 시뮬레이션을 수행했다.

혼합다항식의 각 파라미터의 최적값을 탐색하기 위해서, 이동 로봇이 이동할 때 이동하는 거리와 각도 변화가 최소가 될 수 있도록 비용 함수를 식 (8)과 같이 설정하였다.

$$J(\theta) = \frac{1}{C_1} \sum_{i=1}^m d_i + \frac{1}{C_2} \sum_{i=1}^m \nabla \theta_i + P(\theta) \quad (8)$$

여기에서 d_i 와 $\nabla \theta_i$ 는 식 (9)와 같다. C_1 과 C_2 는 가중치로서 C_1 은 기본 경로의 총 거리이고 C_2 는 기본 경로의 총 각도 변화이다. 기본 경로의 거리와 각도 변화를 나누어준 것은 두 번째 항의 총 각도 변화가 첫 번째 항의 총 거리에 비해 상대적으로 훨씬 큰 값을 가지기 때문에 표준화를 통해 동등한 수준의 값을 가지기 위함이다.

$$d_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

$$\nabla \theta_i = \left| \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) \right| \quad (9)$$

$$P(X) = \begin{cases} 100 & \text{if point are generated in obstacles} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

식 (8)의 비용함수 값이 최소가 될 수 있도록 식 (5)와 (7)에서 혼합다항식의 파라미터를 uDEAS를 이용하여 탐색한다. 또한 혼합다항식을 통해 생성된 경로는 곡선 경로이므로 장애물을 통과하는 경로가 생성될 수 있다. 이러한 점을 해결하기 위해서 장애물 지역을 페널티 함수로 구현하여 장애물 지역으로 x 좌표와 y 좌표를 생성할 경우 비용 함수에 큰 값의 벌칙함수값을 더한다.

5.1 최단 경로와 곡선 경로 비교

그림 6은 이동 로봇의 경로 계획 알고리즘을 통해 생성된 기본 경로를 나타낸 것으로 두 개의 고정 장애물 사이를 통과하여 경로를 생성하였다. 그림 6의 상단에 위치한 원은 출발 지점, 하단의 사각형은 도착 지점을 나타낸 것이다. 그리고 출발 지점과 도착 지점 사이의 선은 장애물을 무시한 기준 경로이고, 기준 경로를 기준으로 수직인 선들은 각 노드점을 연결한 것을 나타낸 것이다. 최단 경로 생성 과정을 수행하지 않아서 아직 많은 노드점과 노트점을 지나는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 6에서 생성된 경로를 이용하여 최단 경로를 생성하는 것을 나타낸 것이다. 그림 6에서 생성된 경로에서 출발지점과 첫 번째 각도가 급격하게 변하는 지점이 한 변을 이루고, 각도가 급격하게 변하는 지점에서 그 다음 노드점까지 한 변을 이루어 대각선 경로를 생성된다. 반복 과정을 거쳐 두 번째 각도가 급격하게 변하는 지점에서 최종적으로 대각선 경로가 생성된다.

그림 6에 비해 선택된 노드점과 노트점이 줄어드는 것을 확연하게 알 수 있다. 하지만 직선으로만 이루어져 있기 때문에, 경로의 각도가 급격하게 변하는 지점에서는 이동 로봇이 멈추거나 급격하게 방향을 전환해야 하기 때문에 불필요한 에너지를 많이 소모하게 된다.

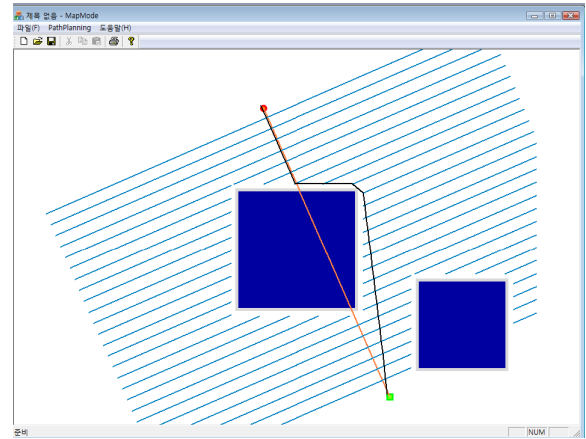


그림 6. 이동 로봇의 기본 경로 생성

Fig. 6. Generation of a basic path for a mobile robot

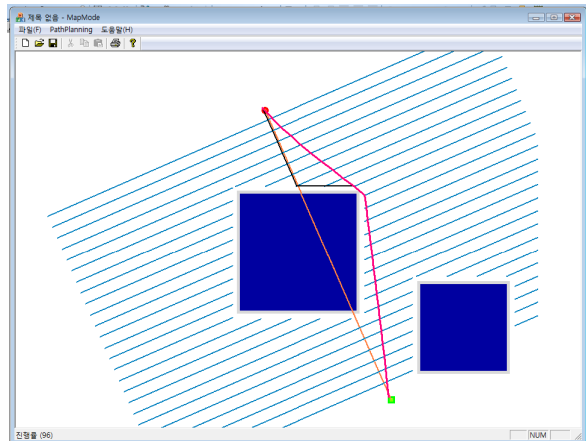


그림 7. 이동 로봇의 최단 경로 생성

Fig. 7. Generation of a shortest path for a mobile robot

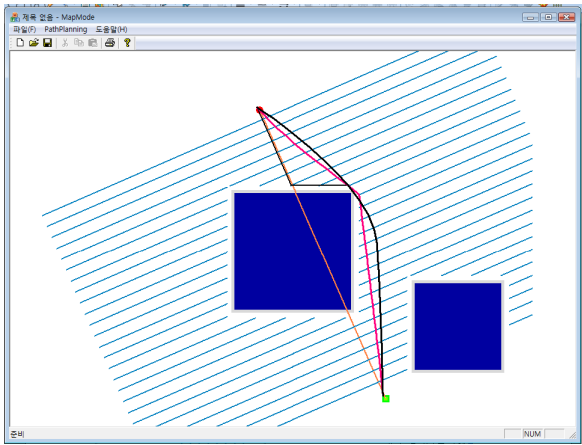


그림 8. 이동 로봇의 곡선 경로 생성

Fig. 8. Generation of a smooth path for a mobile robot

그림 8은 그림 6에서 생성된 기본 경로에서 혼합다항식을 적용하여 곡선 경로를 생성한 것이다. 그림 6의 x 좌표와 y 좌표를 혼합다항식에 적용하여 새롭게 x 좌표와 y 좌표를 생성하고 이를 이용하여 곡선 경로를 만든다. 이 때 혼합다항식의 각 파라미터들을 uDEAS를 이용하여 탐색했다. 그림 6과 그림 7에 비해 부드러운 곡선을 생성하였고, 각도가 급격하게 변하는 지점이 없어진 것을 확인할 수 있다.

표 1은 그림 6에서 8가지의 각 경로에 대한 수치를 나타낸 것이다. 기본 경로의 경우 5.98m의 거리를 지나며, 총 425.54°의 각도가 변화했다. 최단 경로의 경우 5.61m의 거리를 지나며, 331.10°의 각도가 변화했다. 곡선 경로의 경우 그림 상에서는 약간 더 길어 보이지만 수치 상으로는 총 길이 5.59m, 총 각도변화 324.32°의 경로이어서 가장 좋은 결과임을 알 수 있다. 기본 경로의 경우 가장 먼 거리로 이동하였고, 가장 많은 각도 변화를 보여 다른 경로 계획에 비해 비효율적임을 알 수 있다. 최단 경로의 경우 불필요한 노드점과 노트점을 통과하지 않으므로 보다 효율적이긴 하지만, 기본 경로의 정보로부터 직선 경로의 꺾임이 발생하는 코너 점을 찾는 과정에서 탐색 시간이 소요되는 문제점이 있다. 곡선 경로의 경우 uDEAS를 이용함으로써 최단 경로 탐색 시 보다 탐색시간이 짧았으며, 생성된 최적 곡선 경로가 가장 이동 거리가 짧고 각도 변화의 총합도 가장 작아 세 가지의 경로 중 최소 에너지가 소요되는 경로라고 할 수 있다.

표 1. 각 경로의 수치

Table 1. Data of each path

	총 거리(m)	총 각도변화(°)
기본 경로	5.98	425.54
최단 경로	5.61	331.10
곡선 경로	5.59	324.32

표 1에서 계산된 총 각도변화 값은 각 샘플링 시간에서의 각도 변화량의 절대 값을 단순히 더한 것이다. 만약 이동로봇이 정속으로 주행하고 있으며 정지한 상태에서 제자리 회전을 시 동일한 속도를 유지한다면 세 가지 경로에서의 총 각도변화와 주행시간은 비례할 것이다. 그러나 이동로봇

의 하중이 커질수록 정지하는 데 시간이 걸리고 저속으로 제자리 회전을 하게 되므로, 제자리 회전이 없는 곡선경로 상에서 주행하는 경우가 시간이 조금 더 단축된다. 특히 하중이 큰 이동로봇의 경우 잦은 정지는 구동 에너지의 손실과 브레이크 장치의 수명저하를 일으키므로 곡선 경로가 더욱 필요하다고 할 수 있다.

5.2 한 개의 경유점을 지나는 곡선 경로

그림 9는 한 개의 경유점을 지나는 곡선 경로를 생성한 두 가지 예를 나타낸 것이다. 5.1의 시뮬레이션을 통해 곡선 경로의 경우가 가장 효율적임을 알 수 있었다. 또한 최단 경로 또한 기본 경로와 마찬가지로 각도가 급격하게 변하는 지점이 있는 단점이 있기 때문에 두 가지 방법 중 더 효율적인 곡선 경로에 대해 집중적으로 비교 분석하였다. 따라서 지금부터의 시뮬레이션의 경우 기본 경로와 곡선 경로만을 비교한다.

표 2는 그림 9의 각 경로의 수치를 비교한 것이다. 두 그림 모두 기본 경로에 비해 곡선 경로의 경우 이동 거리가 더 짧고, 각도 변화도 더 작은 것을 확인할 수 있다. 그리고 총 경로거리에 비해 상대적으로 총 각도 변화의 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있는데 이것은 직선 경로에서 경로가 급격히 변하는 부분이 곡선으로 바뀌게 되므로, 각도 변화가 작아지게 된다.

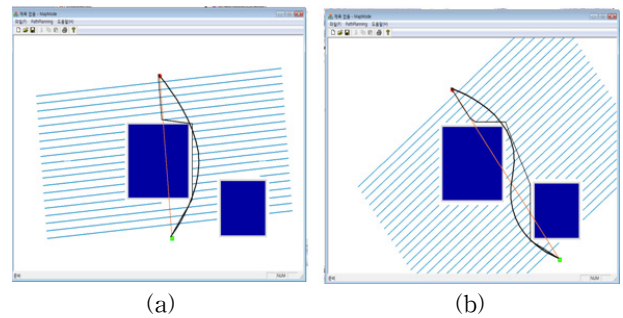


그림 9. 한 개의 경유점을 지나는 곡선 경로의 예
Fig. 9. Examples of smooth trajectories generated by one via point

표 2. 각 경로의 수치

Table 2. Data of each path

		총 거리(m)	총 각도변화(°)
그림 9(a)	기본 경로	5.41	414.24
	곡선 경로	4.95	309.42
그림 9(b)	기본 경로	6.54	431.11
	곡선 경로	6.37	365.27

5.3 두 개의 경유점을 지나는 곡선 경로

그림 10은 두 개의 경유점을 지나는 곡선 경로를 생성한 예를 나타낸 것이다. 총 세 개의 장애물 사이를 통과하여 곡선을 생성하여야 하므로 두 개의 경유점을 가지는 혼합다항식을 이용하여 곡선을 생성하였다.

표 3은 그림 10의 각 경로의 수치를 비교한 것이다. 앞의 한 개의 경유점을 지나는 곡선의 경우와 마찬가지로 곡선

경로가 기본 경로보다 더 효율적임을 알 수 있다. 하지만 한 개의 경유점을 지나는 곡선의 경우보다 그 수치가 크게 나아지지는 않았다. 이것은 두 개의 경유점을 지나는 곡선의 경우 세 개의 부분 궤적을 이어 전체 궤적을 생성하므로 전체 곡선의 양이 많아 하나의 경유점을 지나는 곡선보다 다소 효율성이 떨어지기 때문이다. 향후 이에 대해 보다 효율적으로 개선할 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

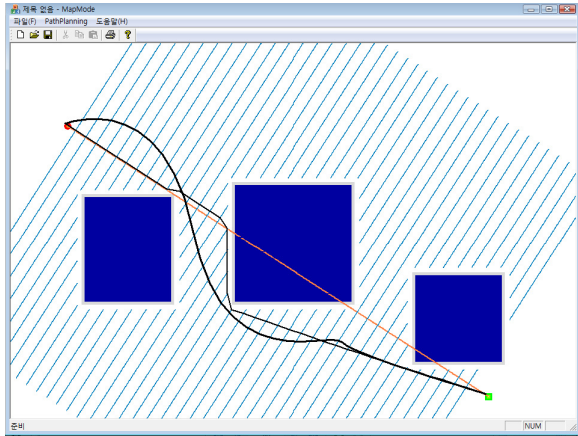


그림 10. 두 개의 경유점을 지나는 곡선 경로의 예
Fig. 10. Example of a smooth trajectory generated by two via points

표 3. 각 경로의 수치
Table 3. Data of each path

	총 거리(m)	총 각도변화(°)
기본 경로	9.31	399.89
곡선 경로	9.29	391.99

5. 결 론

본 논문에서는 이동 로봇의 실시간 최적 경로 계획을 위해 이동 로봇의 절대 좌표와 장애물의 정보를 이용하는 전역 경로 계획을 도입하여 장애물 지역과 비장애물 지역을 확인하고 지도상에 노트점과 노드점을 이용하여 출발 지점과 도착 지점 사이의 기본 경로를 생성한다. 그리고 두 가지의 방법을 이용하여 개선된 경로를 생성한다. 첫 번째 방법은 세 개의 노트점을 이용하여 대각선 경로를 생성하여 최단 경로를 생성하는 방법이고, 두 번째 방법은 연산최적화 알고리즘인 uDEAS를 이용하여 혼합 다항식의 파라미터를 검색하여 곡선 경로를 생성하는 방법이다. 이 두 가지 방법을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였으며, 시뮬레이션 결과 최단 경로와 곡선 경로 두 가지 모두 기본 경로보다 총 거리 및 총 각도변화에서 개선되었음을 확인할 수 있었다.

향후에는 이동 로봇의 실제 주행에 적용하기 위해, 본 논문에서 제안된 부드러운 전역경로를 기반으로 실시간 최적 지역경로를 생성하는 방법을 연구할 것이며, 실험을 통해 이동 로봇의 자율 주행 성능을 검증할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 박경진, 이기성, 이종수, “디중이동로봇의 장애물 회피 및 경로계획 알고리즘에 관한 연구,” *대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집*, pp. 31-34, 2000.
- [2] 김정민, 김연태, 김성신, “확장 칼만 필터를 이용한 로봇의 실내위치추정,” *한국지능시스템학회 논문지*, 제18권, 5호, pp. 706-711, 2008.
- [3] T. J. Park, B. G. Ryu, C. S. Han, J. K. Park, J. Y. Lee and S. H. Back, “Development of the path algorithm for an unmanned ground vehicle,” *proceeding of KIMST*, pp. 895-898, 2005.
- [4] 김상겸, 김성균, 이용우, “무인자율차량을 위한 경로 계획 알고리즘 및 시뮬레이터 개발,” *한국자동차공학회 논문지*, 제15권, 3호, pp. 1-9, 2009.
- [5] M. Montemerlo and S. Thrun, “Simultaneous Localization and Mapping with Unknown Data Association Using FastSLAM,” *Proc. of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1985-1991, 2003
- [6] 윤희상, 박태형, “자율이동로봇의 부드러운 주행을 위한 통합적 경로계획방법,” *CICS 2010 정보 및 제어 학술대회 논문집*, pp.51-52, 2010.
- [7] 김정민, 허정민, 김성신, “수정된 유전자 알고리즘과 퍼지 추론 시스템을 이용한 무인자율주행 이송장치의 다중경로계획,” *한국해양정보통신학회 논문지*, 제13권, 8호, pp. 1483-1490, 2009.
- [8] J. -W. Kim and S. W. Kim, “Numerical method for global optimization: dynamic encoding algorithm for searches (DEAS),” *IEE Proc.-Control Theory and Appl.* vol. 151, no. 5, pp. 661-668, Sept. 2004.
- [9] J. -W. Kim, T. Kim, J. -Y. Choi and S. W. Kim, “On the global convergence of univariate dynamic encoding algorithm for searches (uDEAS),” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 571-582, Aug. 2008.
- [10] J. -W. Kim and S. W. Kim, “PID control design with exhaustive Dynamic Encoding Algorithm for Searches (eDEAS),” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 5, no. 6, pp. 691-700, Dec. 2007.
- [11] 김은수, 김조환, 김종욱, “최적화 기법인 mDEAS의 개발 및 휴머노이드 이족보행 시 최적 관절궤적 생성에의 적용,” *대한전기학회 논문지*, 제68권, 2호, pp. 382-390, 2009.
- [12] M. W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*, John Wiley & Sons, INC, 2006.

저 자 소 개



김조환(Jo Hwan Kim)
2009년 : 동아대 전자공학과 졸업
2009년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정

관심분야 : 최적화알고리즘, 영상처리
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : kimhades@hotmail.com



김만석(Man Seok Kim)
2009년 : 동아대 전자공학과 졸업
2009년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정

관심분야 : 임베디드시스템, PID제어
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : luhyoun@hotmail.com



최민구(Min Koo Choi)
2010년 : 동아대 전자공학과 졸업
2010년~현재 : 동 대학원 전자공학과 석사과정

관심분야 : 휴머노이드 로봇, 임베디드시스템
Phone : 051-200-5579
Fax : 051-200-7712
E-mail : choimk@hotmail.com



김종욱(Jong-Wook Kim)
2004년 : 포항공대 전자전기공학과 대학원 박사
2006년~현재 : 동아대학교 전자공학과 조교수

관심분야 : 휴머노이드 로봇, 최적화 알고리즘, 지능제어
Phone : 051-200-7714
Fax : 051-200-7712
E-mail : kjwook@dau.ac.kr