

## 형상 추론과 기하학적 검색 기반의 다단계 경로 계획

### Multi-Stage Path Planning Based on Shape Reasoning and Geometric Search

황용구 · 조경래<sup>\*</sup>

Yong K. Hwang and Kyoung R. Cho

정보통신대학교 디지털 미디어 랩

\*\* 동서울대학 기계공학부

#### 요약

전통적인 경로 계획기는 로봇의 최적 경로를 찾기 위해 광대한 기하학적 검색을 수행한다. 완전성이 있는 경로 계획기는 만약 해가 존재하면 반드시 찾아야 한다. 때문에 많은 검색 시간을 소요하여 해를 찾든지, 아니면 해가 없는 경우에는 없다고 증명을 하여야 함으로 역시 많은 시간을 소요한다. 그러나 인간의 경우는 대부분의 경우에 충돌 회피 경로가 있는지 없는지 빨리 파악할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 극단적으로 어려운 문제들을 제외하고는 무둔 경우의 수를 나열하지 않고도 쉽게 해를 찾는다. 본 연구의 목표는 이러한 인간의 사고 능력을 알고리즘화하여, 이동로봇의 운동 경로를 보다 빠르게 찾거나, 아니면 컴퓨터의 계산자원을 낭비하지 않고 일찍이 포기하게 한다. 다각형 환경과 다각형 로봇에 대한 경로 계획에, 정량적인 형상 추론과 광대한 기하학적 검색을 결합한 새로운 경로 계획 방법을 제시한다. 제시되어진 알고리즘은 울타리 검증을 통해 해가 없는지를 먼저 검색하고, 만약에 해가 있으면, 정량적인 추론을 통해서 해를 찾고, 그래서 해가 존재하지만 해를 찾을 수 없으면, 완전 검색 알고리즘으로 해를 찾게 된다. 본 연구의 기여는 여러 개의 능률적인 기하학적 검사를 통해, 많은 계산량의 완전 알고리즘을 가능하면 사용하지 않고 해를 찾거나 해가 없음 증명하여, 운동 계획기의 평균 계산량을 최소화한다.

#### Abstract

A novel approach for path planning of a polygonal robot is presented. Traditional path planners perform extensive geometric searching to find the optimal path or to prove that there is no solution. The computation required to prove that there is no solution is equivalent to exhaustive search of the motion space, which is typically very expensive. Humans seem to use a set of several different path planning strategies to analyse the situation of the obstacles in the environment, and quickly recognize whether the path-planning problem is easy to solve, hard to solve or has no solution. This human path-planning strategies have motivated the development of the presented algorithm that combines qualitative shape reasoning and exhaustive geometric searching to speed up the path planning process. It has three planning stages consisting of identification of no-solution cases based on an enclosure test, a qualitative reasoning stage, and finally a complete search algorithm in case the previous two stages cannot determine of the existence of a solution path.

**Key Words :** 경로 계획, 정량적 형상 추론, 서비스 로봇, 주행

#### 1. 서 론

경로 계획은 산업용 로봇 뿐만 아니라 서비스 로봇에서 중요한 지능 모듈로 간주되어 왔으며 변화하는 환경에서의 이동로봇과 머니풀레이터에서 많은 알고리듬이 제시되었다. 일반적으로 경로 계획(path planning)은 다양한 물건이 놓여져 있는 2차원 혹은 3차원 공간에서 이동로봇이 하나의 점 혹은 다면체로 간주되어 운동 계획(motion planning)을 하는 것으로 다루어져 왔으며, 여기서 경로 계획과 운동 계획은 동일

한 의미로 사용되어져 왔다.[10]

이 연구는 다각형 장애물 사이를 움직이는 다각형 이동로봇의 경로 계획 방법에 대한 논문이며, 3차원 다면체 공간으로 쉽게 확장할 수 있는 알고리즘이다. Fig. 1은 가정용 인간형 로봇으로서 4각형 모양의 모바일 베이스를 가지고 있다. 이 로봇은 Fig. 2에서 보여주는 미래의 유비쿼터스 기반의 가정집에서 사용하기 위해 개발 중이다. 이러한 로봇은 수초 내에 반응을 해야 하는 실시간 환경의 요구 조건을 만족하기 위해서 경로 계획 모듈이 매우 빨라야 한다. 이 로봇의 모바일 베이스는 3개의 자유도를 가지며 A\* 검색 방법을 사용하여 경로를 계획할 경우, 쉬운 문제는 수초 내, 어려운 문제는 수십초 내에 해를 찾으므로 보다 신속한 경로 생성기가 필요하다.

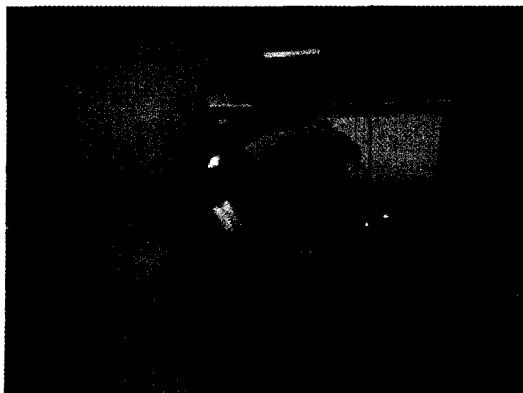


Figure 1. A humanoid robot for household service.



Figure 2. A residential home in a ubiquitous computing environment.

일반적인 경로 계획은 운동공간(configuration space)라 불리우는 로봇의 모든 가능한 운동공간을 검색하는 방식을 취하고 있다. 이러한 알고리듬은 매우 복잡한 환경에서도 해를 찾을 수는 있지만, 때로는 문제의 해와는 상관없는 과다하게 많은 부분의 형상공간을 검색하기 때문에 시간을 많이 소용되기도 한다.[10] 인간은 충돌을 피하기 위해서 정확한 수치계산은 떨어지지만, 경험적인 접근(heuristics)과 추론적 방법으로 충돌 회피 경로를 매우 효율적으로 찾는다. Fig. 3의 (a)는 사람이 해를 잘 찾는 문제이며, Fig. 3의 (b)는 정확

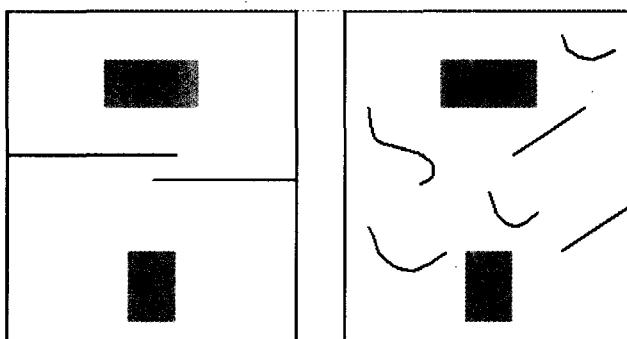


Figure 3. (a) An example problem humans are good at disproving, i.e., detecting no solution condition. (b) A path-planning problem for which a computer algorithm is better than humans.

한 충돌여부를 계산하여야 함으로 컴퓨터 알고리듬이 해를 잘 찾는 경우이다.

이러한 관점에서 본 논문은 인간의 정량적 형상 추론 능력과 컴퓨터의 수치적으로 정확하고 빠른 검색 능력을 같이 갖춘 형상 경로 계획 알고리듬을 이용한 다 단계 경로 계획기를 제시한다. 이 방법은 경로 계획에 소요되는 평균 계획 시간을 줄이기 위해 정교하게 계획된 방법으로 경로 계획을 시도하였는데 2장은 이전의 연구들, 3장은 자세한 알고리듬을, 그리고 4장에서는 여러 예제를 통해 본 알고리듬의 우수함을 보여주도록 본 논문은 구성된다.

## 2. 이전의 연구들

운동계획은 20여 년 동안 이동로봇, 머니플레이터, 유연로봇(flexible manipulator)등 여러가지 형태의 로봇에 대하여 정지된 장애물, 동적 장애물, 움직일 수 있는 장애물 등 다양한 환경에서 연구되어져 왔으며, 또한 비홀로노믹(non-honomomic), 동역학 등의 여러가지 제한조건에 대해서도 연구가 있었다. 짧은 시간에 해를 찾기 위한 발견적 방법에 의한 방법이 있었으며, 시간이 오래 걸리더라도 해가 있으면 해를 꼭 찾는 완전한 경로 계획 방법도 있었다.

정지된 환경에서의 경로 계획은 이동로봇의 주행에서 많이 이용되었으며, 많은 연구가 있었다.[1,13,14] 이러한 알고리즘은 가시성 그래프(visibility graph), 혹은 장애물 점유 그리드(obstacle occupancy grid)로 표현한 지도에 대해  $A^*$  검색 하거나 quadtree 혹은 octree를 사용하여 자유공간을 계층적으로 분해하는 방법도 제시되었다.

머니플레이터는 관절공간(joint space)에서 운동계획이 이루어졌으며, 일반적인 6관절 머니플레이터인 경우, 6차원 검색을 통해 경로 계획을 하였다. 초기에는 Lozano-Perez의 알고리즘이 주목을 받았고, 그 뒤 많은 좋은 알고리즘이 나왔다[2,4,5,9]

형상공간이 정의되어져 있고, 충돌 검증 알고리즘이 정착되어서 다양한 로봇에 대해 적용할 수 있는 경로 계획 알고리즘도 연구되어졌다. 고차원의 형상공간에서도 해를 찾을 수 있는 무작위 경로 계획기[2,9,10]도 있었으며, 정교한 계층적인 검색 알고리즘도 제시되었다.[4,8] 그러나 이러한 알고리즘들은 고 자유도 문제에서도 좋은 성능을 보이나, 실시간적인 경로 계획은 이루어지지 않는다. 본 연구는 3차원 다각형 평면 로봇에서 거의 실시간으로 해를 찾을 수 있는 경로 계획에 관한 것이다.

## 3. 다단계 경로 계획기

본 논문에서 제시하는 경로 계획기는 다단계 경로계획기(MSPP: Multi-Stage Path Planner)라 부르기로 하며 본 경로 계획기는 해가 없는지 혹은 쉽게 해를 찾을 수 있는지를 빠르게 판단하기 위하여 효율적인 경험적 접근방법을 이용한다. 그리고 판단이 안 될 경우에만, 계산이 많으면서도, 해가 존재하면 반드시 그 해를 찾는 완전검색 알고리듬을 사용한다. 제시하고자 하는 경험적 접근방법은 문제가 쉬울 때, 즉 자유공간이 많을 때는 해를 빨리 찾거나, 혹은 해의 존재를 증명하기 위해 원적 대칭 커널(circularly symmetric kernel)을 사용한 장애물 점유 격자 지도의 컨볼루션(convolution)

을 이용한다.

제시하고자 하는 경로 계획을 구체적으로 설명하기에 앞서 주어진 조건은

- G1 : 점유격자 지도 혹은 다각형들로 표현된 장애물들
- G2 : 로봇 기준점의 위치( $x,y$ )와 회전( $r$ )로 표현되는 3 자유도 다각형으로 표현된 이동 로봇
- G3 : 로봇의 시작과 목적 자세 ( $x,y,r$ )
- G4 : 빠른 2차원 컨볼루션 프로세서

이며, 문제는 3차원의 운동공간에서 충돌 회피 경로를 찾거나, 충돌 회피 경로가 없으면 해가 없음을 증명하는 것이다.

MSPP는 완전 운동경로 계획 알고리즘을 적용하기 전에 쓰이는 것으로, 평균계획시간을 최소화하는 역할을 한다. 따라서 어느 완전 알고리즘과도 제약 없이 병행하여 사용할 수 있으나 본 논문에서는 해의 최적성(optimality)를 보장하는  $A^*$  검색 알고리듬과 병행하여 실험하였다. 현재의 일반적인 컴퓨터에서  $A^*$  검색 알고리듬으로 장애물이 10개 내외 있는 문제를 수십초 안에 충돌회피 경로를 찾으며, 큰 규모의 격자 지도에서는 시간이 더 소요 된다. MSPP는 이러한 문제를 하나의 1차원 추적 작업과 두번의 2차원 컨볼루션 그리고 한번의 2차원  $A^*$  검색으로 해를 찾거나, 해가 없음을 증명할 수 있다.

첫 번째 컨볼루션 지도에서의 1차원 추적과 두 번째 컨볼루션 지도에서의 2차원  $A^*$  검색 방법으로 해를 찾을 수 없고 해가 없음을 증명할 수도 없을 때에만 3차원 형상 공간에서  $A^*$  방법으로 해를 찾는다. 즉, 3차원공간 검색 문제에서 1차원씩 낮은 차원으로 검색 공간을 간소화함으로써 많은 계산 시간이 절약되도록 하였다. 특히 MSPP는 3차원 공간의 다면체 장애물이 놓여 있는 환경에 자유도가 6인 다면체 로봇 경로계획 문제에서는 훨씬 많은 검색시간이 줄어든다. MSPP는 6차원 형상공간에서의  $A^*$ 검색을 3차원 공간에서의 두 번의  $A^*$ 검색으로 줄이게 되는데, 이것은 로봇이 자주 직면하는 실제의 많은 문제에서 해를 찾거나 해가 없음을 보여준다. 이 알고리즘은 이동로봇의 실시간 응용과 자율 비행체에 매우 유용하게 사용된다.

첫 번째로 MSPP는 첫번째 컨볼루션 지도에서 울타리 검증 알고리즘(ECA: Enclosure Check Algorithm)이라 불리우는, 효율적인 1차원 곡선 추적방법을 사용한다. 이 방법은 로봇이 초기자세나 목적자세에서 장애물로 완전히 에워싸여 있어서 초기 자세에서 목적 자세로 갈 수 있는 해가 존재하지 않음을 쉽게 알 수 있도록 하며, 만약 이러한 경우가 존재하면 더 이상 해를 찾지 않고 프로그램은 종료한다. 실제 알고리즘 구현에서는 2차원  $A^*$ 검색에 의한 경로 계획의 소요 시간이 1초 정도 밖에 안 걸리므로, 1차원 울타리 곡선 추적 방법을 대체할 수 있다.

울타리 검증 알고리즘으로는 해가 존재하지 않음을 결정하지 못할 때는 두 번째 단계로 넘어간다. 이 단계에서는 로봇과 장애물의 컨볼루션 지도에서 2차원  $A^*$ 검색을 하게 되며, 이 두 번째 단계의 알고리즘을 볼 근사화 알고리듬(BAA: Ball Approximation Algorithm)이라 한다. 만약 BAA가 해를 찾지 못한다면, MSPP는 3차원 공간에서  $A^*$ 검색, 또는 다른 완전 경로 계획기를 호출하게 된다. ECA 와 BAA는 최소 로봇 두께와 최대 로봇 길이에 기초를 둔 정량적인 기하학적 추론 방법을 사용한다.

### 3.1 울타리 검증 알고리즘

ECA는 충돌회피 경로가 존재하기 위하여, 로봇의 최소 두께보다 자유공간의 넓이가 더 커야한다는 점을 이용한다. 여기서, 로봇의 최소 두께는 모든 방향에서 로봇의 기준점을 통과하는 라인 세그먼트들 중 최소 길이이다. Fig.4는 이를 설명해 준다. ECA는 로봇의 시작 자세와 목적 자세에서 로봇을 둘러싼 장애물을 대상으로, 각 장애물 사이의 모든 간격이 로봇의 최소 두께보다 작은지를 검색한다. 모두 최소 두께보다 작다면 해가 존재하지 않는다.

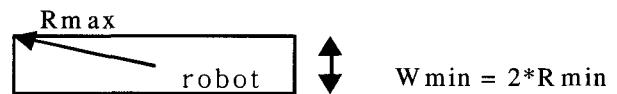


Figure 4. Minimum and maximum widths of a robot.

그런데 ECA는 내부적으로는 최소 두께와 장애물 사이의 간격을 비교하지는 않고, 다각형 로봇의 최소 두께의 반을 반경으로 하는 원을 로봇으로 간주하여 장애물 격자 지도에서 원과 장애물의 컨볼루션을 계산한다. 이것은 결과적으로는 장애물을 모든 방향으로 로봇의 최소 두께의 반만큼 확장 시킨 효과를 갖는 것이다. 로봇의 기준점이 초기 자세 혹은 목적 자세에서 확장된 장애물이 울타리가 된 모양으로 로봇을 완전히 에워싸고 있으면, 충돌 회피 경로가 없는 것이 된다. Fig.5(a)는 원래의 장애물을, Fig.5(b)는 ECA의 컨볼루션 알고리듬에 의해 확장된 장애물을 보여주며, 초기 자세는 바뀐 장애물에 의해 완전히 에워싸여 있음을 보여준다. 이러한 경우에, 로봇은 해가 없음을 빨리 판단하고 장애물을 치우는 등의 차선책을 취할 수 있다.

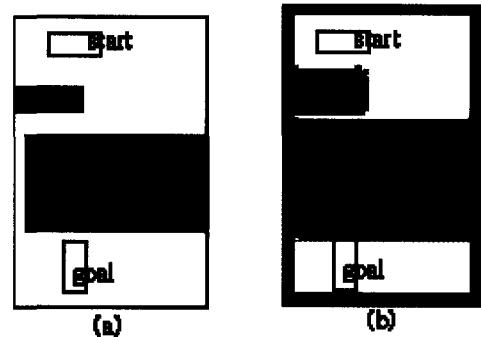


Figure 5. (a) The original obstacles and (b) the grown obstacles by  $R_{min}$ , which completely surround the robot.

### 3.2 볼 근사화 알고리즘

만약 장애물들 사이에 넓은 공간이 있을 때, 다각형 로봇의 최대 두께를 지름으로 하는 원(minimum enclosing circle)으로 근사화한다고 하더라도, 해는 존재할 경우가 많다. 만약 이러한 원에 대해서 해가 존재한다면, 원래의 문제에 대한 한가지 답을 찾은 것이다. 즉, 로봇의 기준점이 다각형 로봇의 최대 두께를 지름으로 하는 원의 중심점에 대해서 찾은 충돌 회피 경로를 따라가면서, 로봇의 자세(orientation)는 어떠한 값이 되어도 충돌은 일어나지 않는다.

BAA는 로봇 최대 두께의 반만큼 확장시킨 장애물을 격자지도에서 컨볼루션을 사용하여 계산하고, 2차원 A\* 검색으로 시작자세로부터 목적자세까지 로봇의 기준점에 대한 충돌회피 경로를 찾는다.

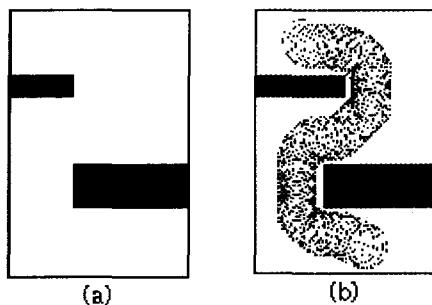


Figure 6. A path found by the Ball-Approximation Algorithm

이 때 BAA는 복잡한 공간을 통과하는 충돌회피 경로는, 비록 그 경로가 가장 짧은 경로라 하더라도, 해(solution)에서 제외시키고, 넓은 공간을 통과하는 충돌 회피경로를 선호하여 찾는다. 단 로봇이 둥근 형상에 가까우면, BAA는 거의 최적의 경로를 찾는다. Fig. 6은 로봇의 자세(orientation)를 고려하지 않고 찾은 충돌 회피 경로를 그림을 보여준다.

### 3.3 완전 검색 알고리즘

ECA가 해가 없음을 증명하지 못하고, BAA도 해를 찾지 못한다면, MSPP는 다각형의 장애물에 대한 다각형 로봇의 완전 경로 계획기를 이용하여 충돌 회피 경로를 찾는다. 여기서의 운동공간은 3 차원이며, A\*검색, 무작위 경로 계획기(RPP) 혹은 SANDROS 경로 계획기를 사용할 수 있다. RPP나 SANDROS 운동 경로 생성기는 고난도의 문제도 적은 양의 계산으로 풀기위해 정교한 검색 방법을 써서 최적 경로보다는 근사최적(suboptimal)해를 찾는다. 그러므로 문제에 따라 계산량의 변화가 심하여 MSPP의 효율성을 측정하기에 어려움이 있다. 이러한 이유로 본 논문에서는 완전 경로생성기로 A\*검색방법을 벤치마크 알고리즘으로 사용한다.

## 4. 실험

MSPP 알고리즘의 주요 기여는 ECA와 BAA를 사용할 때 기준의 완전 경로 계획기만을 사용할 경우에 비해 소요되는 시간에 비해서 얼마나 시간이 단축되는가에 달려있다. 이것을 확인하기 위해서 다각형 장애물 사이에서의 다각형로봇을 대상으로 고전적인 이동자 문제(classical mover's problem)를 대상으로 실험을 하였다. 첫 번째는 같은 로봇과 같은 환경에서 주요 경로에서의 자유공간의 폭을 변화하면서 MSPP 알고리즘과 A\* 검색 알고리즘이 계산하는 데 소요되는 시간을 비교하였다. 두번째는 상기 두개의 알고리즘을 인간 거주 환경 같은 현실적인 환경을 대상으로 경로계획을 하였다.

TABLE I. Running Time Comparison

Problem difficulty	Time (sec)	Collision checks	Solved/ Disproved by	Time (sec)	Collision checks
easy Fig . 6	0.6	6657	BAA	445	25865
medium Fig. 7(a)	0.6+0.7 +253	7556+ 8116+ 24646	full A*	253	24646
hard Fig. 7(b)	0.6+0.7 +191	7086+ 7964+ 27732	full A*	191	27732
impossible Fig. 5	0.7	7134	ECA	133	20824

운동공간의 총 노드가  $60 \times 40 \times 31 = 74400$  인 환경에서 계산시간, 생성된 노드의 수, 그리고 충돌 검사의 횟수를 테이블 1에서 보여준다. 이 통계는 ECA의 2차원 A\* 검색 알고리즘, 2차원 A\* 알고리즘에 의거한 BAA 알고리즘, 그리고 마지막으로 x,y,r의 3차원 운동공간에서 전역 A\* 검색을 수행해서 얻었다. 표에서 알 수 있듯이, 낮은 차원의 공간(이 경우 2차원)에서 A\* 검색알고리즘을 수행하면, 무시할 정도의 계산시간(1초이하)으로 극적으로 줄어든다. 그러므로 원래의 운동공간에서 완전 경로 계획기를 사용하기 이전에 2, 3초 소요되는 ECP알고리즘과 BAA알고리즘을 사용하여 경로계획을 할 가치가 있다. 충돌 검증 사용횟수도 3분의 1도 떨어졌으며, A\* 검색알고리즘은 충돌 검증을 하는데 소요되는 시간보다 그리드 노드에서 메모리를 관리하는 데 많은 시간이 소요됨을 보여준다. 일반적으로 쉬운 문제일 경우, 탐색해야 할 공간이 더 많기 때문에 전역 3차원 A\* 검색 알고리즘은 소요시간이 더 길어진다. 또한 전역 3차원 A\* 검색 알고리즘은 형상공간의 약 1/3의 공간을 탐색함을 실험을 통해 알 수 있었다.

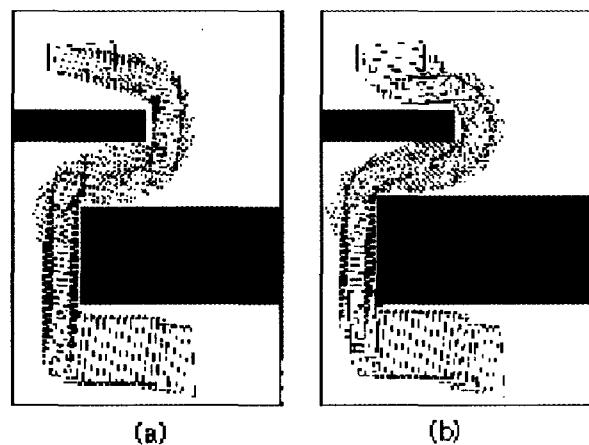


Fig.7 The paths founded by the 3D A\* algorithm for the problems with medium and extreme difficulties.

MSPP 알고리즘의 평균 계산시간을 계산하고 A\* 알고리즘을 난이도가 실제 상황에서 쉬운 문제, 중간 문제, 어려운 문제, 그리고 경로가 존재하지 않는 경우에 대해서도 테이블 1에서 제시된 통계와 비슷하다고 가정하였다.

$A_2$ 와  $A_3$ 은 각각 2차원, 3차원 형상공간에서의 A\* 검색

에 소요되는 시간을 나타내며, ECA와 BAA 각각은 2차원  $A^*$  검색을 한번만 수행한다고 가정하면, MSPP의 평균 소요시간( $T_{mspp}$ )는

$$T_{mspp} = \frac{A_2}{4} + \frac{(2A_2 + A_3)}{4} + \frac{(2A_2 + A_3)}{4} + \frac{A_2}{4} \\ = 1.5A_2 + 0.5A_3$$

이 되며, 여기서 간단한 3차원  $A^*$  알고리즘의 계산 소요시간을  $Ta^*$  라 한다면  $Ta^* = A_3$  이다.

테이블 1에서  $A_2$ 는 0으로 근사화되므로,

$$T_{mspp} = 0.5A_3 = 0.5Ta^*$$

가 된다.

결론적으로  $T_{mspp}$ 는 보통 난이도와 고난이도의 경로 계획 문제가 주어질 확률에  $Ta^*$ 을 곱한 만큼의 시간이 소요된다.

Fig.8은 Fig. 2의 거실을 모델로 2차원 그림으로 간략화한 가정집 환경의 실제 경로 계획 예를 보여 준다. 이 예의 경우 3차원 전역  $A^*$  검색으로 충돌 회피경로를 검색했을 경우 55초가 소요되었는데, 이 시간은 사람이 기다리기에 다소 긴 시간이다. MSPP 알고리즘에 의한 결과는 소파와 파티션 벽 사이의 좁은 간격 때문에 3단계 경로 계획인 전역  $A^*$  검색까지 모두 호출되었다. 만약 MSPP로 소파와 파티션 벽 사이의 좁은 간격까지는 MSPP 알고리즘으로 그리고 이 위치에서 목표 위치인 침대까지는 전역  $A^*$  검색으로 경로를 찾을 경우, 전체의 경로 계획 소요시간은 10초로 줄어들었다. 따라서 경로를 세분화하는 연구가 필요하다.

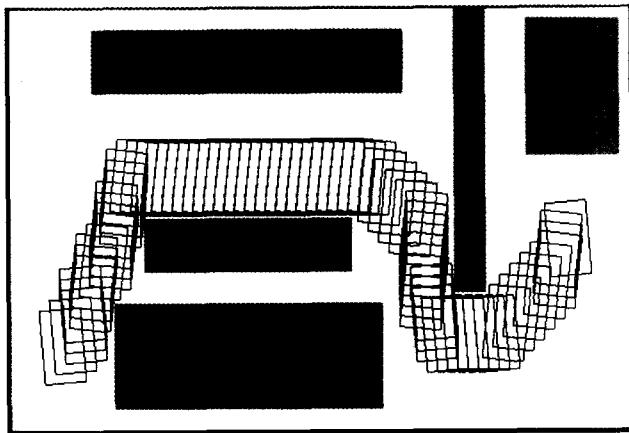


Figure 9. The path founded by 3D  $A^*$  algorithm in a realistic household environment.

## 5. 결 론

본 논문에서 평면에서 다각형 이동로봇에 대한 실시간에 준하는 속도로 경로 계획을 할 수 있는 다단계 경로 계획기를 제시하였다. 가정용 로봇은 인간과 생활을 같이 하는 용도로 제작되어, 거실에서 주로 움직이며 인간과 비슷한 속력으로 움직이며 반응을 해야 한다. 인간은 거의 순간적으로 그리고 별 의식하지 않고도 충돌을 하지 않는 경로로 움직이는 것을 고려하면, 로봇도 현실적으로 사용할 수 있으려면

같은 속력과 지능을 가져야 하는데 MSPP는 이러한 현실적인 요구조건에 좀더 가까운 경로 생성방법이라 할 수 있겠다. 앞으로 경로계획 시간을 더욱 줄이는 연구가 계속되어야 할 것이다. 바로 앞장에서도 언급하였듯이, 제시된 경로 계획기에 전체 경로를 쉬운 경로와 어려운 경로로 자동으로 좀 더 세분적으로 나누어 검색하는 방법이 필요하며 현재 계속 연구가 진행 중이다. 전방향(omni-directional) 이동로봇이 아닐 경우, 바퀴 미케니즘의 비 훌로노믹 제한조건을 결합한  $A^*$  검색알고리즘이 필요하다. 3차원 공간으로 확장하여 비행물체나 수중기구의 주행 알고리즘에도 적용할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Takao Asano, Tetsuo Asano, L. Guibas, J. Hershberger, and H. Imai, "Visibility-Polygon Search and Euclidean Shortest Path," 26th Symposium on Foundations of Computer Science, pp.155-164. 1985.
- [2] J. Barraquand and J. C. Latombe, "A Monte-Carlo Algorithm for Path Planning with Many Degrees of Freedom," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1712-1717, Cincinnati, OH, 1990.
- [3] J. F. Canny, The complexity of motion planning, THE MIT Press, Cambridge, MA, 1988.
- [4] P. C. Chen and Y. K. Hwang, "SANDROS: a Dynamic Graph Search Algorithm for Motion Planning," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 14, No. 3, pp. 390-403, Feb 1998.
- [5] K. K. Gupta, "A 7-dof practical motion planner based on sequential framework: theory and experiments," IEEE Int. Symp. on Assembly and Task Planning, pp. 213-218, Pittsburgh, PA, 1995.
- [6] Kamal Gupta and Angel P. Del Pobil, "Practical Motion Planning in Robotics Current Approaches and Future Directions," John Wiley & Sons, Chichester New York, 1998.
- [7] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "Gross Motion Planning - A Survey," ACM Computing Surveys, vol. 24, no. 3, pp. 219-292, September 1992.
- [8] Y. K. Hwang and P. C. Chen, "A Heuristic and Complete Planner for the Classical Mover's Problem," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 729-736, Nagoya, Japan, 1995
- [9] L. Kavraki and J. C. Latombe, "Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2138-2145, San Diego, CA, May 1994.
- [10] J. C. Latombe, "Robot motion planning," New York: Kluwer Academic Publishers. 1991.
- [11] J. Lengyel, M. Reichert, B. R. Donald, and D. P. Greenberg, "Real-Time Robot Motion Planning

- Using Rasterizing Computer Graphics Hardware," Computer Graphics, vol. 24, no. 4, pp. 327-335, August 1990.
- [12] T. Lozano-Prez, J. L. Jones, E. Mazer, P. A. O'Donnell, E. L. Grimson, P. Tournassoud, and A. Lanusse, "Handey: A Robot System that Recognizes, Plans, and Manipulates," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 843-849, Raleigh, NC, 1987.
- [13] H. Noborio, T. Naniwa, and S. Arimoto, "A Feasible Motion Planning Algorithm for a Mobile Robot on a Quadtree Representation," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 327-332, Scottsdale, AZ, 1989.
- [14] C. Urmson and R. Simmons, "Approaches fro heuristically biasing RPT growth," Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1178-1183, Las Vegas, Nevada, 2003.
- [15] J. T. Schwartz and M. Sharir, "On the Piano Movers' Problem: II. Techniques for Computing Topological Properties of Real Algebraic Manifolds," Courant Institute of Mathematical Sciences, Report No. 39, 1981. (also in Advances in Applied Mathematics, no. 4, pp. 298-351, 1983)
- [16] L. Yang and S.M. LaValle, "An improved random neighborhood graph approach," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 254-259, Washington DC, 2002.

## 저자소개



황용구(Yong Koo Hwang)

1988년 미국 일리노이 주립대학 전기컴  
퓨터공학과 졸업.  
1989년~1997년 미국 샌디아 국립 연구소  
로보틱스 센터  
2003~현재 한국 정보통신대학교

관심분야 : 로보틱스, 인공지능, 비전

Phone : 02 3498 7531  
Fax : 02 3498 7560  
E-mail : ykhwang@icu.ac.kr



조경래(Kyoung Rae Cho)

1990년 인하대학교 기계공학과 석사  
2000년 고려대학교 기계공학과 박사  
1990년~2001년 한국과학기술연구원  
휴먼로봇센타  
2001년~현재 동서울대학 기계공학부

관심분야 : 로보틱스, 제어구조, 가상 캐릭터

Phone : 031 720 2042  
Fax : 031 720 2261  
E-mail : chokr@dsc.ac.kr