

해양 로봇의 회전 반경을 고려한 경로 계획 알고리즘

Any-angle Path Planning Algorithm considering Angular Constraint for Marine Robot

김한근, 명현*, 최현택
(Hanguen Kim¹, Hyun Myung¹, and Hyun-Taek Choi²)
¹KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology)
²KORDI (Korea Ocean Research&Development Institute)

Abstract: Most path planning algorithms for a marine robot in the ocean environment have been developed without considering the robot's heading angle. As a result, the robot has a difficulty in following the path correctly. In this paper, we propose a limit-cycle circle set that applies to the Theta* algorithm. The minimum turning radius of a marine robot is calculated using a limit-cycle circle set, and circles of this radius is used to generate a configuration space of an occupancy grid map. After applying Theta* to this configuration space, the limit-cycle circle set is also applied to the start and end nodes to find the appropriate path with specified heading angles. The benefit of this algorithm is its fast computation time compared to other 3-D (x, y, θ) path planning algorithms, along with the fact that it can be applied to the 3-D kinematic state of the robot. We simulate the proposed algorithm and compare it with 3-D A* and 3-D A* with post smoothing algorithms.

Keywords: Theta*, 3-D Path Planning, Vehicle guidance

1. 서론

모바일 로봇 항법 분야에서, 그리드 기반의 맵은 위치인식, 매핑, SLAM (Simultaneous Localization And Map-building), 경로 계획 등에 널리 사용되고 있다. 해양 로봇의 항법 문제도 로봇 항법 마찬가지로 그리드 기반의 맵 표현 방법으로 해결할 수 있고, 많은 연구자들이 적용하고 있다[1].

경로 계획 분야에서 많은 연구자들은 A*와 같은 그리드 맵 기반의 경로 계획 알고리즘을 연구하고 있다. Nash 등은 A*, A* 후 곡선 처리, Field D*, Theta* 등의 그리드 맵 기반의 경로 계획 알고리즘의 성능을 비교하였다[2]. 그 결과, 생성 경로 길이와 연산 시간에 있어서 Theta*가 가장 좋은 성능을 보였다. Theta*는 A*의 변형 알고리즘으로, 방향과 거리에 무관하게 노드를 탐색하고 연결할 수 있는 알고리즘이다. 따라서 Theta* 알고리즘은 실시간으로 경로를 생성해야 하는 해양 로봇의 항법 문제를 해결하는데 있어서 적합하다. 하지만 수중 로봇을 제외한 대부분의 해양 로봇은 언더 액츄에이티드(under-actuated) 시스템이므로 방향각을 고려하지 않은 경로를 생성하면 그림 1과 같이, 경로 추종

에 실패하거나, 장애물 회피시 위험한 상황에 처할 수 있다.

위의 문제점을 해결하기 위해 다양한 방법이 제시되었다. 그림 1(a)의 경우는, 그리드 맵의 생성 방법을 달리함으로써 해결이 가능하다. 몇몇 연구자들은 지형 환경을 대략적인 영역 분할(cell decomposition) 방법으로 가중 점유(weighted occupancy) 그리드 맵을 생성하여 해결하였다[3]. 가중 점유 그리드 맵은 자유롭게 이동이 가능한 노드, 이동이 불가능한 노드, 그 외의 비용을 가지는 노드로 구성되어있다. 하지만 가중 점유 그리드 맵 생성 방법으로는 로봇의 성능을 고려하지 않기 때문에 그림 1(b)의 문제를 해결할 수 없다.

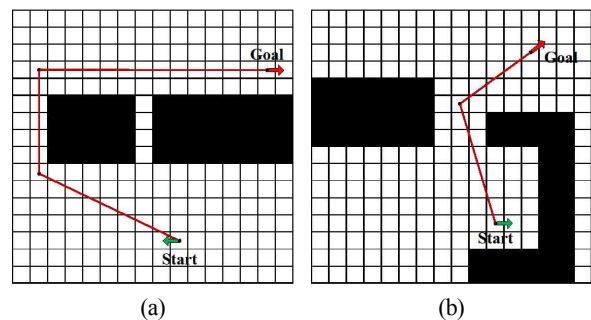


그림 1. (a) 잘못된 경로 생성의 예, 로봇이 장애물 근처에서 회전할 수 없다 (b) 로봇의 최대 조향 성능의 한계로 인해 경로를 추종할 수 없는 경우.

Fig. 1. (a) Example of calculating a wrong path, in which the vehicle cannot turn at the edge of an obstacle and (b) cannot follow path because of constraint on vehicle's maneuverability and heading angle.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 12. 18., 수정: 2011. 12. 23., 채택확정: 2012. 1. 10.

김한근, 명현: 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

(sskhk05@kaist.ac.kr, hmyung@kaist.ac.kr)

최현택: 한국해양연구원(htchoiphd@gmail.com)

※ 본 논문은 한국해양연구원의 지원(과제명: 수중 영상 기반 3차원 경로 생성 및 추종 알고리즘 개발)으로 수행되었음. 또한 본 논문은 국토해양부의 U-City 석·박사과정 지원 사업으로 일부 지원되었음.

※ 본 논문은 2011년 ICROS 대전충청지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

그림 1(b)의 문제를 해결하기 위해, Laumond는 차량 형태의 모바일 로봇을 위한 연속적인 궤적 생성 알고리즘을 제안하였다[4]. 이 알고리즘은 로봇의 중심점으로부터 장애물의 경계선까지의 거리만큼 장애물을 확장한 뒤, 로봇의 기구학을 고려한 연속적인 궤적을 계산하여 경로를 출력하는 알고리즘이다. 하지만 제안된 알고리즘은 연산량이 많아 실시간으로 경로를 생성할 수 없다는 단점이 있다. 또한 Yong 등은 Dubin의 비홀로노믹 로봇을 위한 짧은 경로 생성 알고리즘을 제안하였다[5]. 제안된 알고리즘은 출발점과 도착점의 왼편과 오른편에 최소 회전 반경을 갖는 순응(accommodation) 원을 생성한 뒤, 포텐셜 필드(potential field) 방법으로 경로를 생성한다. 그 결과, 로봇의 기구학을 반영하는 경로를 생성하지만, 제안한 알고리즘은 포텐셜 필드 방법의 단점인 국소 최소점 문제를 피하기 위해, 출발점과 도착점 사이에 장애물이 없다는 가정을 하였다.

해양 공학 분야에서도 해양 로봇의 조종 성능을 고려한 항법 문제를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만, 대부분의 연구 주제가 경로 계획 보다는 장애물 회피에 초점을 두고 있다[6]. 최근에는 유전 알고리즘이나 퍼지 집합 이론을 바탕으로 한 경로 계획 알고리즘이 제안되었으나[7,8], 해양 로봇의 실제 회전 반경을 고려한 경로를 생성하지는 않았다. 또한 대부분의 수중 로봇들은 기동성의 제한을 받는다는 가정 하에 경로 계획 알고리즘이 제안되고 있지만[9-13], 대부분의 경우는 회전 반경을 고려하지 않았다. 따라서 해양 로봇의 조종 성능과 그림 1의 문제를 해결하는 것이 본 논문의 연구 주제이다.

본 논문에서는 해양 로봇의 회전 반경을 고려한 경로 계획 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안한 방법은 해양 로봇의 실제 회전 반경을 고려한 구성 공간을 생성하고, 리미트 사이클 원 집합(limit-cycle circle set)을 출발점과 도착점에 적용하여 3-D (x, y, θ) 경로를 생성한다. 또한 제안한 알고리즘을 시뮬레이션하고, 결과를 논할 것이다.

II. 배경 이론

1. Theta*

Theta*는 기본적으로 A*와 유사한 알고리즘으로 유일한 차이점은 부모 노드를 선택하는 방법에 있다. Theta*는 부모 노드를 선택하는데 있어서 시야 선(line of sight) 함수를 이용하여 연결한다. Theta*의 기본 알고리즘은 그림 2에서 보여 주고 있다. Theta* 알고리즘은 현재 노드와 부모 노드의 방향과 거리에 상관없이 시야 선 함수를 이용하여 장애물의 유무만을 판단하고 장애물이 없으면 연결한다. Theta*에서는 비용 함수를 단순히 유클리디언 거리 값으로 하였다. 결과적으로 Theta* 알고리즘에 의해 생성된 경로는 A* 알고리즘에 의해 생성된 경로보다 더 최적이다.

2. 리미트 사이클

리미트 사이클 해석은 비선형 시스템에서 널리 사용되는 방법으로 본 논문에서는 리미트 사이클 수식을 이용하여 시계 방향 및 반 시계 방향의 원을 생성하여 로봇의 선수 각 및 최대 회전각을 고려하기 위해 시작점과 출발점에 적용하였다[14-19].

Algorithm 1 Basic Theta*(s_{start}, s_{goal})

```

1:  $s_{start}.Parent \leftarrow s_{start}$ 
2: while  $open \neq \emptyset$  do
3:    $s \leftarrow open.Pop()$ 
4:   if  $s = s_{goal}$  then
5:     return 'path found'
6:   end if
7:    $close.Push(s)$ 
8:   for each  $s_{neighbor}$  do
9:     if  $IsWalkable(s)$  and  $s_{neighbor} \notin close$  then
10:       $[cost, parent] \leftarrow LineOfSight(s_{neighbor}, s)$ 
11:       $s_{neighbor}.cost \leftarrow cost$ 
12:       $s_{neighbor}.parent \leftarrow parent$ 
13:       $open.Push(s_{neighbor}, s_{neighbor}.cost =$ 
14:         $h(s_{neighbor}))$ 
15:     end if
16:   end for
17: end while
18: return 'no path found'

```

그림 2. 기본 Theta* 알고리즘.

Fig. 2. Basic Theta* Algorithm.

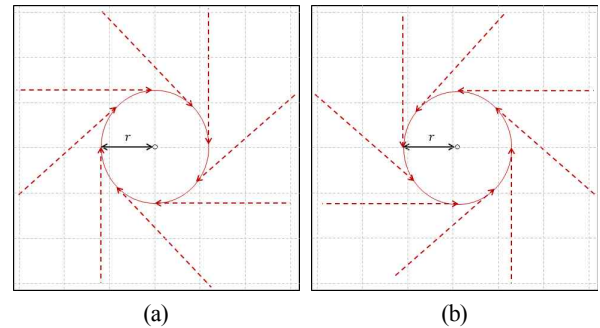


그림 3. (a) 시계 방향으로 수렴하는 리미트 사이클 원의 예 (b) 반 시계 방향으로 수렴하는 리미트 사이클 원의 예.

Fig. 3. An example of limit-cycle circles for turning (a) clockwise and (b) counter-clockwise. r is the turning radius for the marine robot.

다음의 로봇의 회전각 r 을 포함하는 2차 비선형 시스템을 고려하면,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2). \end{aligned} \quad (1)$$

위 시스템의 리아푸노프(Lyapunov) 함수는 다음과 같다.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2. \quad (2)$$

시스템의 경로를 추종하는 $V(x)$ 의 미분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_2\dot{x}_2 \\ &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_1^2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &\quad - 2x_1x_2 + 2x_2^2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &= 2V(x)(r^2 - V(x)). \end{aligned} \quad (3)$$

$V(x)$ 의 미분 값이 $V(x) < r^2$ 에서는 양의 값을, $V(x) > r^2$ 에서는 음의 값을 가지고, 그림 3(a)에서처럼 시계방향으로 원의 경계에 수렴하게 된다. 반시계 방향의 상태는 다음의 2차 비선형 시스템 방정식으로 도출될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2). \end{aligned} \tag{4}$$

시스템의 모든 경로는 그림 3(b)와 같이 반시계 방향으로 수렴하게 된다.

3. 해양 로봇의 회전 반경

해양 로봇의 회전 반경은 해양 로봇의 조향에 있어서 가장 중요한 요소이다. 해양 로봇의 회전각 r 은 해양 로봇의 속도 V 와 요(yaw) 각속도 R 에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$r = \frac{V}{R}. \tag{5}$$

비록 해상환경의 역학 및 불안정한 특성으로 인하여 수식 (5)를 이용하여 해양 로봇의 회전 반경을 정확하게 계산할 수는 없지만, IMO (International Maritime Organization) 산하의 Maritime Security Committee는 “Standards for Ship Maneuverability”라는 규칙(MSC. 137(76))을 제정하여 보편적으로 배 길이의 5배를 최소 회전 반경으로 정하고 있으므로 마찬가지로 해양 로봇에 적용하여 경로를 생성할 것이다[20].

III. 회전 반경을 고려한 Theta* 알고리즘

1. 점유 그리드 맵 표현

본 논문에서는 원 집합을 이용하여 해양 로봇의 회전 반경을 고려할 수 있는 점유 그리드 맵을 생성하였다. 그림 4의 예제처럼, 그리드 맵에 표현된 장애물의 경계를 따라 해양 로봇의 회전 반경 r 의 반지름을 갖는 원으로 확장하여 해양 로봇의 회전 반경을 고려할 수 있는 경로를 생성할 수 있게 하였다. 또한, 이를 통해 얻을 수 있는 장점은 실제 해역에서 회전 반경으로 인해 지나갈 수 없는 지형을

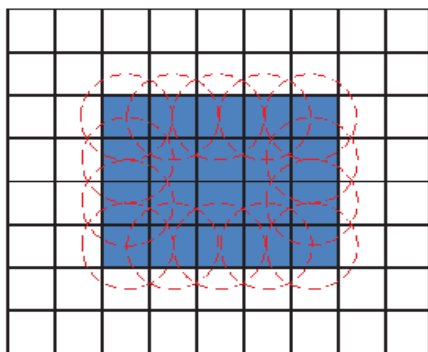


그림 4. 점유 그리드 맵 표현 예, 장애물의 경계 (파란색 그리드)를 따라 수상선의 회전 반경을 반지름으로 하는 원 집합을 생성하여 장애물을 확장한다.

Fig. 4. Example of occupancy grid map representation. A circle set (red) is placed around an obstacle (blue).

그리드 맵의 장애물 영역을 확장함으로써 좀 더 안전한 경로를 얻을 수 있다는 점이다. 하지만 제한한 점유 그리드 맵의 표현 방법으로는 출발점과 도착점의 선수각과 회전 반경을 고려할 수 없다는 단점이 있다.

2. 리미트 사이클 원 집합

출발점과 도착점의 선수각과 회전 반경을 고려하기 위해, 본 논문에서는 리미트 사이클 원 집합의 개념과 Theta* 알고리즘을 통합하였다. II 장에서 소개하였던 리미트 사이클 방정식을 이용하여 그림 5와 같이, 출발점과 도착점에 시계 방향 및 반시계 방향의 원을 생성하였다. 리미트 사이클 원 집합은 출발점에서 로봇의 방향각을 기준으로 왼쪽에는 시계방향 원을, 오른쪽에는 반시계 방향 원을 생성하고, 도착점에서는 반대로 로봇의 방향각을 기준으로 왼쪽편에는 반시계 방향 원을, 오른쪽에는 시계 방향 원을 생성한다. 이를 통해 출발점에서는 외부의 어떠한 점으로도 연결할 수 있고, 도착점에서는 외부의 어떠한 점에서 연결될 수 있다. 만약 장애물에 의해 리미트 사이클 원 집합 중 하나의 원이라도 생성이 되면 경로를 생성하는데 있어서 문제가 되지 않지만, 리미트 사이클 원 집합을 하나라도 생성할 수 없는 경우에는 출발 또는 도착 조건을 만족시킬 수 없으므로 경로를 생성할 수 없다는 것을 뜻한다.

3. 리미트 사이클 원 집합과 Theta*

해양 로봇의 회전 반경을 고려한 경로를 생성하기 위해, 리미트 사이클 원 집합과 Theta* 알고리즘을 통합하였다. 그림 6의 알고리즘과 같이, 경로를 생성하기 전에 점유 그리드 맵에서 장애물을 로봇의 회전 반경 r 만큼 확장하고, Theta* 알고리즘을 통해 출발점과 도착점의 방향각을 고려하지 않은 경로를 생성한다. 이후, 출발점과 도착점에 각각 리미트 사이클 원 집합을 생성한 뒤, 이전에 생성했던 경로의 노드 중에서 각각 출발점과 도착점의 바로 전 노드와 연결해 준다. 리미트 사이클 원 집합에서 각 원은 장애물이 없는 경우에만 생성되므로 전 노드와 연결하는데 있어서 시야선이 보장된다고 할 수 있다.

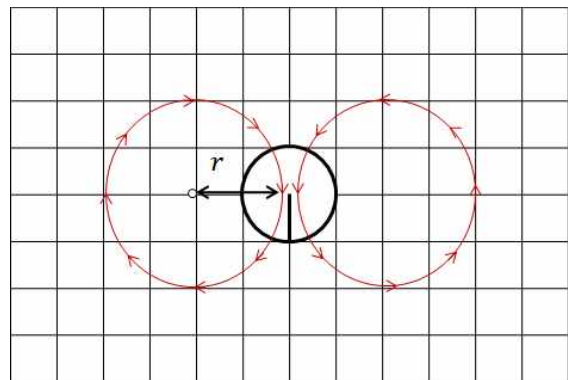


그림 5. 출발점에 리미트 사이클 원 집합을 적용한 예. 리미트 사이클 원 집합을 적용함으로써, 로봇의 회전 반경을 고려하여 출발할 수 있다.

Fig. 5. Example of limit-cycle circle set at start node. When applying the limit-cycle circle set, a vehicle can move anywhere taking the radius of curvature into account.

Algorithm 2 Theta* with Limit-cycle circle set(s_{start}, s_{goal})

```

1:  $mapdata \leftarrow LoadGridMap()$ 
2:  $s \leftarrow FindContours(mapdata)$ 
3: if  $p \neq 'null'$  then
4:    $DrawCircle(mapdata, p, r)$ 
5: end if
6: // Here is same as Basic Theta*
7:  $P \leftarrow TraceParentsFrom(s_{goal})$ 
8:  $CreateLimitCycleCircle(s_{start}, s_{goal})$ 
9:  $p_t \leftarrow CalcTangentOfCircle(P, s_{start}, r)$ 
10:  $P.ps.parent \leftarrow p_t$ 
11:  $p_t \leftarrow CalcTangentOfCircle(P, s_{goal}, r)$ 
12:  $p_t.parent \leftarrow P.pg$ 
13: return 'path found'
    
```

그림 6. 리미트 사이클 원 집합과 Theta* 알고리즘.
 Fig. 6. Theta* with limit-cycle circle set algorithm.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 실제 지형 지도를 이용하여 제안한 알고리즘을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 기존에 제안되었던 3-D A*, 3-D A* 후 곡선 처리 알고리즘과 비교하였고, 시뮬레이션 조건은 아래의 표 1에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 조건.

Table 1. Simulation conditions.

파라미터 (단위)	값
실제 맵 크기 (m)	25250x27130
그리드 맵 크기 (pixel)	282x303
배 길이 (m)	67
배의 최소 회전 반경 (m)	160
배의 최대 회전 각 (degree)	60
출발점의 방향각 (degree)	180
도착점의 방향각 (degree)	90

3-D A*와 3-D A* 후 곡선 처리 알고리즘은 해양 로봇의 회전 반경 구속 조건을 각도 단위로 사용하였고, 제안한 알고리즘은 미터 단위를 사용하여 경로 계획을 하였다. 시뮬레이션에서 로봇은 자북을 기준으로 180도 방향으로 출발하였고, 90도 방향으로 도착하도록 하였다. 그림 7은 같은 조건에서 각각 3-D A*와 3-D A* 후 곡선 처리, 리미트 사이클 원 집합과 Theta* 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 결과적으로 제안한 알고리즘이 해양 로봇의 회전 반경을 만족하면서도 좀 더 최적 경로를 생성하는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 그림 8은 제안한 알고리즘이 같은 조건에서 회전 반경을 달리했을 때의 시뮬레이션 결과 이다. 결론적으로 제안한 경로 계획 알고리즘이 다른 3-D 경로 계획 알고리즘보다 성능적으로 우수한 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는, Theta* 알고리즘을 확장하여 해양 로봇의 3-D 기구학 특성을 반영하는 경로 계획 알고리즘을 제안하였다. 해양 로봇의 회전 반경을 고려한 경로 계획을 하기 위해 우선 그리드 맵을 구성하는데 있어서 장애물 경계에 회전 반경의 반지름 크기를 갖는 원으로 확장하였고, 리미트 사이클 원 집합을 생성하여 이를 출발점과 도착점에 적용하였다. 결과적으로 다른 3-D 경로 계획 알고리즘에 비해 연산 속도가 매우 향상되었고, 현실적으로 추종이 가능한 경로를 생성할 수 있었다. 또한 제안한 알고리즘은 타 기종의 로봇에도 쉽게 적용이 가능하다. 추후에는 제안한 알고리즘을 수중 로봇의 3차원 경로 계획에 적용하여 회전 반경뿐만 아니라, 3차원적인 움직임을 고려한 경로 계획 알고리즘을 연구할 것이다.

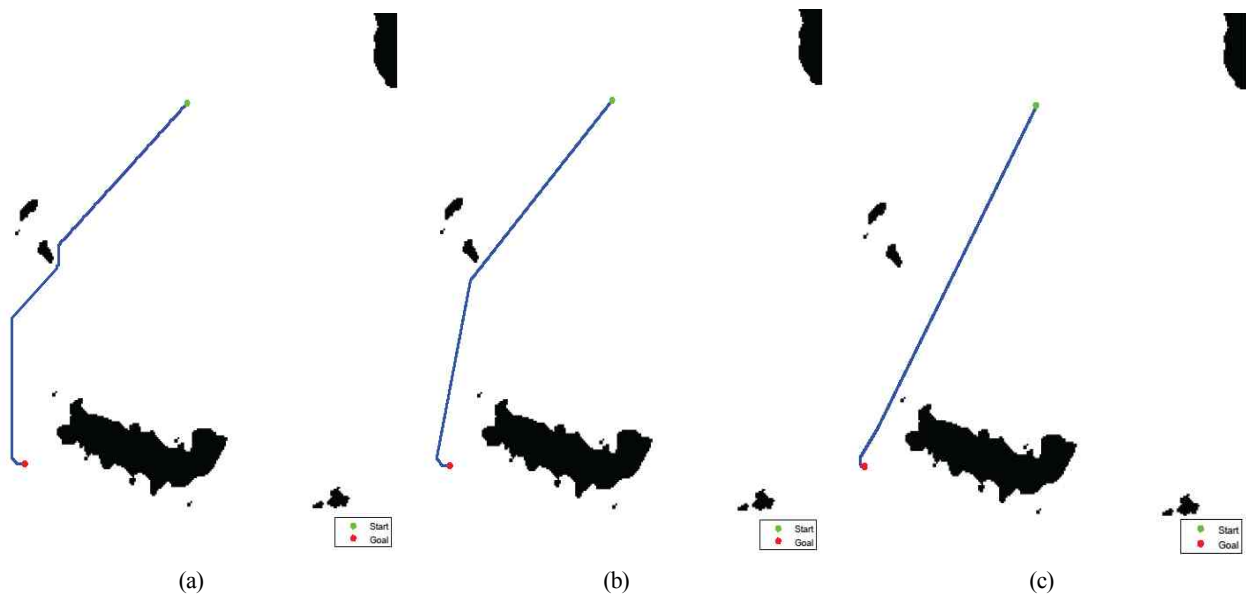


그림 7. (a) 3-D A* (b) 3-D A* 후 곡선 처리 (c) 리미트 사이클 원 집합과 Theta* 알고리즘 시뮬레이션 결과.

Fig. 7. Simulation results for (a) 3-D A* path planning, (b) 3-D A* path planning with post smoothing, and (c) Theta* with Limit-cycle circle set.

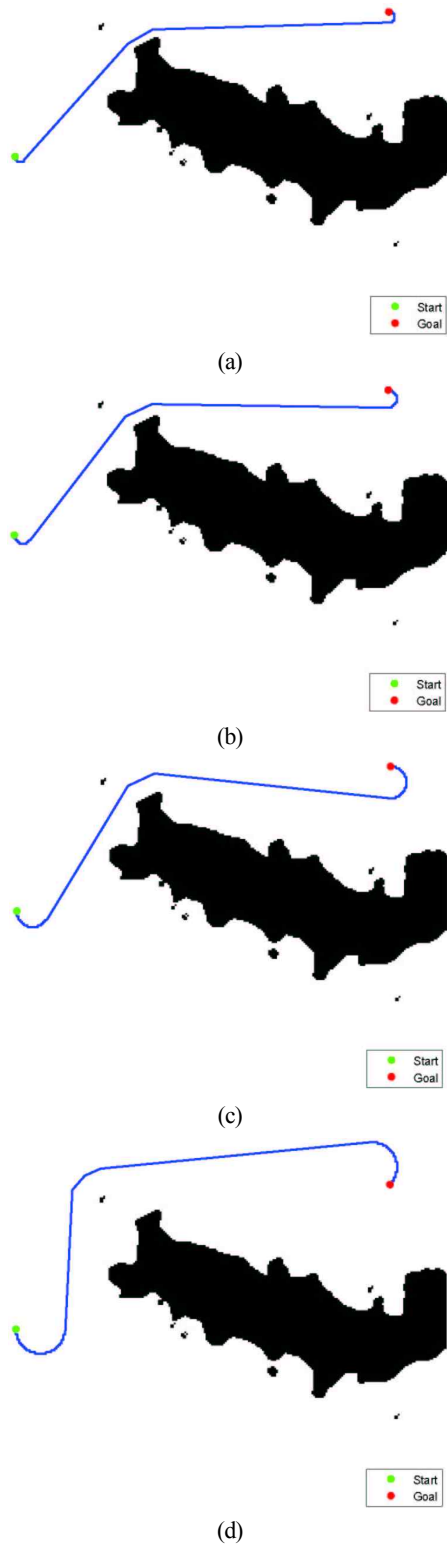


그림 8. 해양 로봇의 회전 반경에 따른 시뮬레이션 결과, (a) 80 m, (b) 160 m, (c) 320 m, and (d) 640 m. 모든 결과는 같은 출발점, 도착점이고, 출발점의 선수각은 180도, 도착점의 선수각은 270도 이다.

Fig. 8. Simulation results for various turning radius, (a) 80 m, (b) 160 m, (c) 320 m, and (d) 640 m. All of simulation results have the same start and goal point, The start heading angle is 180° and the goal heading angle is 270°.

참고문헌

- [1] T. Lee, H. Chung, and H. Myung, "Multi-resolution path planning for marine surface vehicle considering environmental effects," in *Proc. of IEEE OCEANS Conference*, Spain, pp. 1-9, 2011.
- [2] A. Nash, K. Daniel, S. Koenig, and A. Felner, "Theta*: Any-angle path planning on grids," in *Proceedings of AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, pp. 1-7, 2007.
- [3] J. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1991.
- [4] J.-P. Laumond, "Finding collision-free smooth trajectories for a non-holonomic mobile robot," *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 2, pp. 1120-1123, 1987.
- [5] C. Yong and E. J. Barth, "Real-time dynamic path planning for dubins' nonholonomic robot," *Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*, San Diego, USA, pp. 2418-2423, 2006.
- [6] C.-K. Tam, R. Bucknall, and A. Greig, "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters," *The Journal of Navigation*, vol. 62, pp. 455-476, 2009.
- [7] R. Szlapczynski, "A new method of ship routing on raster grids, with turn penalties and collision avoidance," *The Journal of Navigation*, vol. 59, pp. 27-42, 2006.
- [8] R. Smierzchalski and Z. Michalewicz, *Innovations in Robot Mobility and Control*, Springer, Berlin, pp. 135-153, 2005.
- [9] D. Kruger, R. Stolkin, A. Blum, and J. Briganti, "Optimal AUV path planning for extended missions in complex, fast-flowing estuarine environments," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Rome, Italy, pp. 4265-4270, 2007.
- [10] B. Garau, A. Alvarez, and G. Oliver, "Path planning of autonomous underwater vehicles in current field with complex spatial variability: an A* approach," in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Barcelona, Spain, pp. 194-198, 2005.
- [11] J. Witt and M. Dunbabin, "Go with the flow: Optimal AUV path planning in coastal environments," in *Proc. of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Canberra, Australia, pp. 1-9, 2008.
- [12] M. Soulignac, "Feasible and optimal path planning in strong current fields," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 89-98, 2011.
- [13] J. I. Gonzalez, D. H. Sosa, E. F. Perdomo, J. C. Gamez, A. C. D. Brito, and V. P. Maranon, "Path planning for underwater gliders using iterative opti-

- mization,” in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, pp. 2374-2379, 2011.
- [14] K.-H. Rew and D.-H. Kim, “Limit-cycle navigation method for fast mobile robots,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 11, pp. 1130-1138, 2008.
- [15] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1990.
- [16] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture*, 2nd revision, vol. 3, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [17] H.-G. Kim, H. Myung, and H.-T. Choi, “Any-angle path planning algorithm considering angular constraint for marine surface vehicle,” *Proc. of 2011 ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) Daejeon Chungcheong Branch Conference (in Korean)*, pp. 15-20, Dec. 2011.
- [18] S.-M. Han and K. W. Lee, “Mobile robot navigation using circular path planning algorithm,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 1, pp. 105-110, Jan. 2009.
- [19] Y.-W. Lim, J.-S. Jeong, J.-U. An, and D.-H. Kim, “Path planning algorithm for UGVs based on the edge detecting and limit-cycle navigation method,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 5, pp. 429-435, May 2011.
- [20] *Society of Naval Architects and Marine Engineers: Technical Committees - Ship Technical Operations: Panel O-44 : IMO Activities Archive - Standards for Ship Maneuverability.*



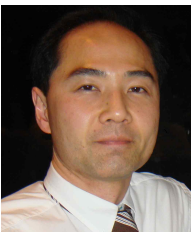
김한근

2009년 경희대학교 전자 전파공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전자 전파공학과 석사. 2011년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 이동 로봇 네비게이션, AI.



명현

1992년 KAIST 전기 및 전자 공학과 학부 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~2002년 ETRI 선임연구원. 2002년~2003년 (주)이머시스 CTO, 연구소장 겸임. 2003년~2008년 삼성중합기술원 전문연구원. 2008년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 교수, 로봇 학제공학 전공 겸임. 관심분야는 로봇 네비게이션, 위치인식, 구조물 건전도 진단, 수상 로봇, 군집 로봇.



최현택

한양대학교 및 동대학원 전자공학과 졸업(1991년 학사, 1993년 석사, 2000년 박사). 1993년~1995년 KT 연구개발원 소프트웨어 연구소 전임연구원. 1996년~2000년 한양대학교 컴퓨터 교육위원회 강사. 2000년~2003년 하와이 주립대학교 Autonomous System Lab. 후기 박사. 2003년~현재 한국해양연구원 책임연구원. 관심분야는 수중 로봇, 해양 시스템 및 강인 제어.