

샘플링 기반 탐색 알고리즘을 활용한 정박지 내 투묘 지점 선정 방법에 관한 연구

주혁범* · 장다운** · 김주성***

*, ** 국립목포해양대학교 승선실습과정부 교수, *** 국립목포해양대학교 항해학부 교수

Development of Method for Selecting Anchoring Point within an Anchorage Using a Sampling-Based Exploration Algorithm

Hyukboem Ju* · Daun Jang** · Joo-sung Kim***

*, ** Professor, Division of Cadet Training, Navigation Science, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Republic of Korea

*** Professor, Division of Navigation Science, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Republic of Korea

요약 : 이동 물체의 전역 경로 탐색에 있어 출발지점과 도착지점은 반드시 필요한 조건 중 하나이다. 선박의 경로 탐색에 있어 도착 가능 지점은 부두 이외 선박의 입출항 전 대기 장소 및 선박 수리 등 다양한 목적으로 이용되는 정박지(Anchorage)도 포함될 수 있다. 이러한 정박지는 연안 해역 환경에 따라 특정 형태로 설계된 공간으로 경로 탐색을 위한 도착지점은 선박이 정박을 위한 투묘 지점이라고 볼 수 있다. 이에, 본 연구에서는 샘플링 기반 탐색 알고리즘 중 PRM 및 계산 기하학 알고리즘을 통해 정박지라는 특정 공간에 대해 다른 선박이 점유하지 않는 공간 탐색을 통한 투묘 지점 산출 방법을 제시하였다. 또한, 개발된 알고리즘을 검증하기 위하여 국내 목포항 11번 정박지를 대상 해역으로 선정하고 시뮬레이션을 수행한 결과 다른 선박이 점유하지 않는 공간에 대해 투묘 지점을 탐색할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 선박의 의사 결정 및 VTS의 정박지 관리를 위한 지원 방안으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 경로 탐색, 투묘, 정박지, PRM 알고리즘, 계산 기하학

Abstract : In the global path finding of moving objects, the starting point and destination are essential prerequisites. In ship navigation, the potential destinations include not only docks but also anchorages used for various purposes such as waiting for ship entries and exits, and ship repairs. These anchorages are designed spaces customized to coastal environments, and to enable path finding, the destination can be considered the berthing location at which a ship anchors. Therefore, this study proposes a method for identifying berthing locations within these designated areas (anchorages) by exploring spaces not occupied by other ships, using sampling-based search algorithms such as PRM and computational geometry algorithms. Additionally, to validate the developed algorithms, simulations were conducted targeting No.11 anchorage in Mokpo Port, South Korea. The indicate that feasible berthing locations in unoccupied spaces can be identified. Additionally the results are expected to contribute to future ship decision-making and support anchorage management in vessel traffic services (VTS).

Key Words : Path finding, Anchoring, Anchorage, PRM algorithm, Computational geometry

1. 서론

최근 전 세계적으로 자율 운항 선박과 관련된 다양한 기술이 연구 및 개발되고 있다. 특히, 자율 운항 선박 기술 중 에서 선박의 경로 탐색 서비스는 해상 교통 안전 확보에 있

어 가장 핵심적인 기술 중 하나로, 다양한 기법을 적용한 선박 전역 경로 탐색 알고리즘이 개발되었다. 이동하는 물체의 전역 경로 계획은 주어진 공간에서 출발점과 도착점 사이를 연결하는 장애물과 교차하지 않는 최단 경로를 탐색하는 문제이다. 이 중 선박의 도착지점은 선박의 입출항을 위한 도선사 승하선 지점과 부두 외에도 선박의 입출항 전 대기 장소 및 선박 수리 등 다양한 목적으로 이용되는 정박지도 포함될 수 있다. 정박지는 연안 해역 내 항만의 특성에

* First Author : hyukboem@mmu.ac.kr, 061-240-7422

† Corresponding Author : dujang@mmu.ac.kr, 061-240-7452

맞추어 설계된 특정 형태의 공간이며, 일반적으로 선박은 정박지의 종류, 형태, 환경 및 기상을 고려하여 묘쇄 길이를 선정하고, 다른 선박이 점유하지 않는 영역을 탐색해 투묘 지점을 결정한다. 이처럼 선박의 전역 경로 탐색에서 정박지에서의 도착지점은 선박의 투묘 지점으로 볼 수 있을 것이다. 현재의 정박지 내 투묘 지점 선정은 지정된 정박지에 대하여 당시의 조건에 따라 인간이 직접적으로 결정한다. 그러나, 자율운항선박 및 의사결정 지원 시스템은 인간의 직접적인 개입 없이 또는 적절한 지원을 받으며 항로를 계획하고 장애물을 회피하며 안전하게 목적지에 도달해야 한다. 이 과정에서 정박지 내의 투묘 지점은 선박의 안전과 직결되며, 잘못된 투묘 지점 선정은 해양 사고로 이어질 수 있다. 따라서, 정박지 내에서 인간의 의사결정과 유사한 방법으로 선박의 투묘 위치 결정하기 위한 알고리즘과 지원 시스템의 개발이 필수적일 것이다.

정박지 내 선박의 위치와 관련된 연구는 묘박 위치에서의 주요위험성 판단과 선박 간의 이격거리에 관한 연구가 있다. 먼저, 묘박 위치에서의 주요위험성 판단과 관련된 연구에는 선박의 제원, 정박 상태, 외력 환경 등을 기반으로 묘박 중인 선박의 이용자가 주요 위험성을 사전에 판단할 수 있는 프로그램을 개발하고, 실제 주요 사례를 통하여 개발된 프로그램을 검증한 연구(Kim et al., 2018)와 선박의 주요 상태를 추정하기 위하여 VTS에서 수집된 AIS 정보 중 정박 선박의 선수방위각과 위치 데이터를 활용하여 선회 중심을 추정하는 알고리즘을 제시한 연구(Kim et al., 2013)가 있다. 이러한 연구는 묘박 중인 선박에 대해 주요 위험으로부터 안전성을 확보하기 위한 방법을 연구하였다. 또한, 선박 간의 이격거리에 관한 연구로는 부산 남외항 정박지 내 선박 데이터 분석을 통해 VTS가 적정한 영역 감시(Domain Watch)를 산정하고, 이를 통해 정박지별 최대 수용 가능 척수와 선박 간 안전거리를 제시한 연구(Lee and Song, 2018)와 정박지의 규모 및 또한, 정박 중인 선박간의 안전 이격거리에 대해 국내외 정박지 설계기준을 비교·분석하여 제시한 연구(Kang et al., 2023)가 있다. 이러한 연구는 정박지 내 선박간의 적정한 안전거리를 선박 데이터 및 정박지 설계기준을 활용하여 분석하고 이를 통해 정박지 내 효율적인 관리 방안을 연구하였다. 이처럼 기존의 선행연구에서는 정박지 내 이미 묘박 중인 선박의 위치를 기반으로 주요 위험성 및 안전 이격거리 판단에 관한 연구는 진행되었지만, 묘박을 위한 정박지 내 선박의 위치결정 방법과 관련된 연구는 찾아볼 수 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 선박의 경로 탐색을 위한 도착지점을 정박지로 선정한 경우에 대하여 다른 선박이 점유하지 않는 영역을 대상으로 샘플링 기반 탐색 알고리즘과 계산 기하학

방법을 이용하여 투묘 위치를 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 본 연구의 결과를 통해 향후 자율 운항 선박의 경로 탐색 및 VTS의 정박지 관리에 대하여 실시간 정박지 정보를 기반으로 한 시스템 구축의 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 제2절에서 정박지 내 투묘 지점 탐색을 위한 고려 요소에 대해 분석하고, 제3절에서는 정박지 내 투묘 지점 탐색 방법, 제4절은 제안된 방법을 이용한 실제 국내 정박지 내 시뮬레이션 수행하였으며, 마지막으로 제5절에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구과제를 제시하였다.

2. 투묘 지점 탐색을 위한 고려 요소

2.1 정박지의 개요

정박지란 선박이 해상에서 닻을 바다 밑바닥에 내려놓고 운항을 멈출 수 있는 장소를 의미한다. 따라서 정박지는 정온하고 충분한 수 면적이 확보되어야 하고, 닻을 놓기에 양호한 저질이어야 하며, 바람, 조류 등의 양호한 기상·해상 등의 조건을 두루 갖추어야 안전한 정박지라고 할 수 있다.

이러한 정박지에 대하여 Lee et al.(2012)는 선박의 점유영역에 따라 지정하는 방식을 집단정박지 지정방식, 집단정박지 및 원 정박지 혼합방식, 집단정박지 내 정박지 위치를 포인트로 지정하는 방식, 원 정박지로 지정하는 방식 그리고 포인트 정박지로 지정하는 방식의 다섯 가지로 분류하였다.

또한, 선박의 정박지 내 선박의 투묘 방식에는 단묘박, 쌍묘박, 2묘박 그리고 선·수미묘박 등이 있으며, 이 중 선박의 이용도가 가장 높은 방법은 단묘박(Lying at single anchor)이다. 단묘박은 선박의 선수 양쪽 현 닻 중에서 어느 한쪽 현의 닻을 내려서 정박하는 방식으로 바람이나 조류 등에 의하여 선체가 닻을 중심으로 회전 때문에 넓은 수역을 필요로 하고, 닻을 투묘 및 양묘 작업이 간편하여 황천 등의 비상시에 응급조치가 쉽다. 따라서 넓은 정박지에서 가장 많이 사용하는 방법이며, 주의할 점은 묘박 중에 선박의 회전으로 인하여 닻이 해저에서 빠져나와 끌릴 수 있으므로 닻 끌림에 대비를 해야 한다.

2.2 정박지 설계기준

정박지에 관한 국외 기준에는 PIANC(Permanent International Association of Navigation Congresses, 2014)와 국내의 ‘항만 및 어항 설계 기준’(MOF, 2017)이 있으며, 모두 정박지 내 선박의 회전반경을 선박의 전장(L), 수심(D), 해저 저질, 풍속 그리고 묘박법에 따라 다르게 제시하고 있다.

먼저, PIANC에 따르면 정박지는 선박이 충분한 안전 여유를 가지고 자유롭게 움직일 수 있을 만큼 충분히 커야 하며,

또한, 선박이 투묘 시 단묘박을 사용하는 경우 회전반경은 Table 1과 같이 전장(LOA, L)에 수심(Depth, D)의 최소 5배 이상의 체인 길이와 풍속 및 저질에 따라 주묘(Dragging)가 될 경우를 대비한 여유시간 동안의 거리(0m, 30m, 60m, 90m, 120m, 150m, 180m, 210m) 그리고 닻이 해저에 고정되는 순간 까지 발생하는 시간 동안의 오차를 보완하기 위한 전장의 10% 또는 최소 20m의 추가적인 안전거리(Safety clearance)를 합산하여 계산한다.

다음으로 국내의 ‘항만 및 어항 설계기준(MOF)’에 따르면 선박이 투묘 시 단묘박을 사용하는 경우 정박지 내 회전반경은 선박의 회전의 중심이 되는 지점으로부터 선수까지의 수평거리에 전장(LOA)을 합한 값을 반지름으로 하는 원의 크기로 구할 것을 권고하고 있다. 또한, 체인의 길이 계산에 필요한 체원이 불분명할 경우에 회전반경은 Table 1과 같이 전장(LOA, L)에 수심(Depth, D)의 6배 이상의 체인 길이와 해저 저질 또는 풍속이 닻을 놓기에 불량한 경우 추가 길이 30m를 합산한 값을 반지름으로 하는 원의 크기로 구할 것을 권고하고 있다.

Table 2. Anchorage radius criteria of MOF and PIANC

Criteria	Environmental conditions		Anchorage radius
	Sea bed	Wind	
MOF	Good		$L+6D$
	Bad		$L+6D+30m$
PIANC	Good	$\leq 10m/s$	$L+5D+0m+Safety\ Clearance^*$
		$= 20m/s$	$L+5D+60m+Safety\ Clearance$
		$= 30m/s$	$L+5D+120m+Safety\ Clearance$
		$\geq 30m/s$	$L+5D+180m+Safety\ Clearance$
	Bad	$\leq 10m/s$	$L+5D+30m+Safety\ Clearance$
		$= 20m/s$	$L+5D+90m+Safety\ Clearance$
		$= 30m/s$	$L+5D+150m+Safety\ Clearance$
		$\geq 30m/s$	$L+5D+210m+Safety\ Clearance$
* A safety clearance which may be 10 % of the LOA, with a minimum 20 m			

2.3 정박지 내 선회반경에 따른 선박의 점유영역 설정

본 연구에서는 정박지 내 다른 선박이 점유하고 있는 특정 영역을 제외한 본선이 투묘 가능한 공간을 탐색하여 전역 경로 탐색 시 정박지 대한 투묘 지점을 생성시키는 방법을 제안하고자 하였다.

앞서 조사한 바와 같이 묘박 중인 선박은 닻을 중심으로 체인 산출 길이, 선박의 길이 그리고 환경에 따른 추가 길이에 따라 회전반경이 생성되어 정박지 내에서 원의 형태로 생긴 점유영역 내에서 이동하게 된다. 따라서, 정박지에 투묘하기 위하여 접근하는 선박은 이미 묘박 중인 다른 선박의 회전반경, 즉 점유영역을 고려하여 투묘 지점을 탐색하게 된다. 그러나 묘박 중인 다른 선박의 점유영역 크기 계산에 필요한 선박의 체원 외 정확한 투묘 위치 및 체인의 길이에 대하여는 알기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 국내외 정박지 내 회전반경에 대한 기준 중 일반적으로 많이 이용되는 단묘박을 기준으로 투묘 지점 탐색을 위한 본선과 다른 선박의 점유영역 크기를 설정하였다.

3. 정박지 내 투묘 지점 탐색 방법

본 연구에서는 정박지라는 특정 공간에 대해 샘플링 기반 탐색 알고리즘을 활용하여 선박의 경로 탐색을 위한 투묘 지점을 선정하는 방법을 제안하고자 하였다. 본 연구의 투묘 지점 탐색 방법 구성 단계는 Fig. 1과 같으며, 투묘 지점 탐색을 위한 공간 구성 단계와 생성된 공간에서 투묘 지점을 추출하는 단계로 구성된다.

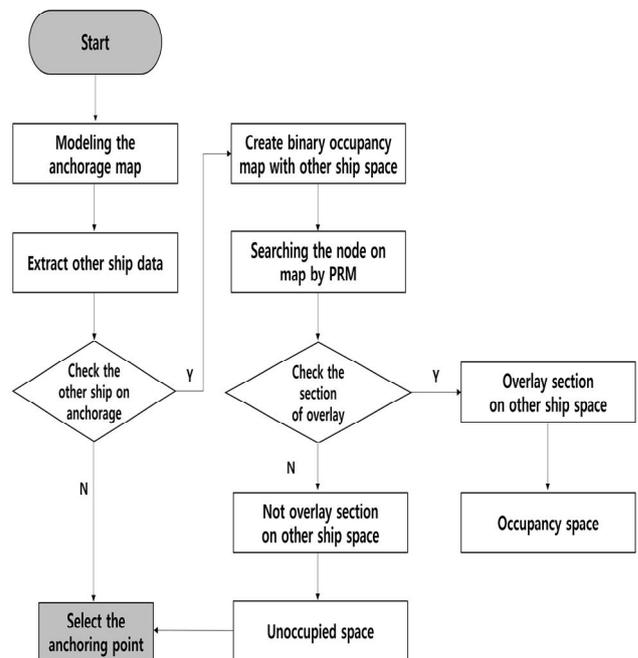


Fig. 1. Flow of the selecting goal point in anchorage.

3.1 투묘 지점 탐색을 위한 공간 구성

투묘 지점 탐색을 위한 공간 구성은 먼저, 정박지 위치 및 형태 정보와 정박지 내 다른 선박의 점유영역 유무를 확인한다. 만약, 정박지 공간 내 다른 선박이 점유하는 영역이 있는 경우에는 점유영역을 장애물로 구성하여 상태 공간을 구성한다. 여기서, 다른 선박의 점유영역의 크기는 정박지 내 선회반경 기준에 따라 1척의 선박이 안전하게 정박할 수 있는 최소 반경을 적용하였다. 또한, 본 연구에서는 투묘 지점 탐색을 위한 맵 공간 생성을 위해 전역 경로 탐색 알고리즘에서 주로 사용되는 이진 점유 격자지도(Binary Occupancy Grid Map)를 활용하였다.

1) 이진화 처리를 통한 Configuration space 생성

샘플링 기반 탐색 알고리즘은 이동 물체가 Configuration space(이하 C-space)에서 장애물과의 충돌이 없도록 두 지점 사이의 최단 경로를 찾는 것을 목적으로 한다. 여기서 C-space는 이동 물체가 움직일 수 있는 위치의 집합을 의미하며, C-space에서 움직이는 이동 물체는 점(Point)으로 표현된다. 이러한, C-space는 Fig. 2와 같이 이동 물체가 물리적 장애물과 충돌하거나 일부 지정된 링크가 서로 충돌하는 C-space obstacles로 구성된다(Latombe, 1991). 따라서, 이동 물체를 점으로 환산하여 표현하는 C-space에서 공간을 탐색하는 것은 Fig. 2와 같이 특정 공간에 대해 이동 물체와 장애물과의 기하학적인 관계를 명확하게 표현해 줄 수 있다.

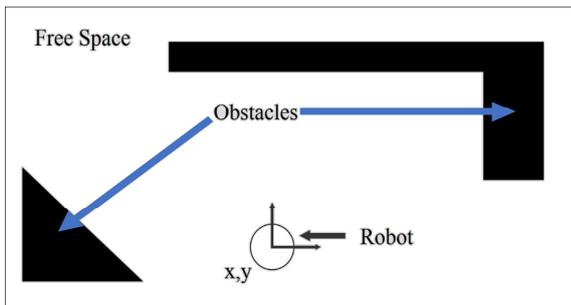


Fig. 2. Configuration space.

또한, 본 연구에서는 영상처리방법 중 이미지 임계처리(Thresholding)를 통한 이진화 처리(Image binary method) 방법을 활용하여 선박의 투묘 예정 지점을 탐색할 수 있는 C-space를 구성하였다. 영상처리에서 이진화는 어떤 주어진 임계값 보다 밝은 픽셀들은 모두 흰색으로, 그렇지 않은 픽셀들은 모두 검은색으로 바꾸는 것을 지칭한다. 여기서, 임계처리를 통한 이진화 처리는 픽셀값이 고정 임계값 보다 작으면 0, 크면 255로 픽셀값을 변경하는 전역 고정 이진화(Global Fixed Threshold) 처리 방법 중 가장 대표적인 Otsu 알

고리즘(Otsu, 1979)을 활용하였다. 이처럼 정박지 내 투묘 지점을 탐색하기 위해 정박지를 좌표 및 반경 크기 정보를 활용하여 C-space로 구성하였으며, 다른 선박의 점유영역은 C-space obstacles로 구현하였다.

2) Binary occupancy grid map 생성

본 연구에서는 이진화 처리된 공간에 대하여 샘플링 기반 탐색 알고리즘을 적용하기 위하여 Binary occupancy grid map을 생성하였다. Binary occupancy grid map은 장애물을 포함하는 상태 공간을 표현하고 시각화하는 데 사용할 수 있는 2차원 Occupancy grid map을 기반으로 만든다. Occupancy grid map은 이동하는 물체의 경로 탐색에 사용되는 2차원 공간 지도 구성 방법으로 경로 계획을 위한 이동 공간과 장애물 영역을 표시하는 일종의 합성 지도이다. 즉, Occupancy grid map은 독립적인 각각의 셀로 구성되는 공간으로, 셀 공간을 임의의 해상도를 가지는 정사각형으로 이산화시키고 각 정사각형에 이진 또는 확률값을 할당한다. 또한, Fig. 3과 같이 각각의 셀은 장애물의 존재 여부에 따라 Free(=흰색, 1) 또는 Occupied(=검은색, 0)와 같은 표기법을 통해서 격자 셀이 점유된 확률을 보여준다.

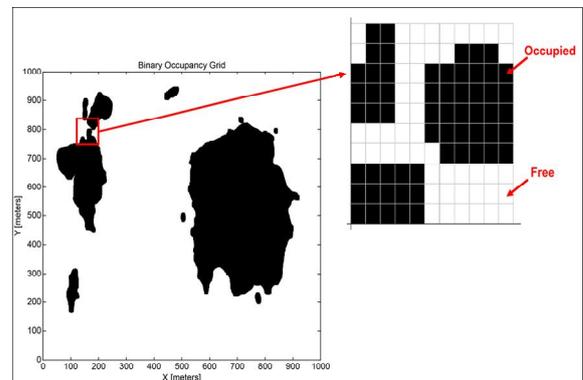


Fig. 3. Binary occupancy grid map.

3.2 투묘 지점 탐색 방법

투묘 지점 탐색 단계에서는 주어진 Binary occupancy map에서 샘플링 기반 탐색 알고리즘 중 PRM(Probabilistic Roadmap, 이하 PRM) 알고리즘을 이용하여 장애물(다른 선박이 점유하고 있는 영역)과의 충돌이 없는 Node를 생성한다. 생성된 충돌이 없는 Node를 기반으로 기하 계산 알고리즘을 활용하여 본선이 점유할 수 있는 영역과 다른 선박이 점유하고 있는 영역 중 겹치는 영역은 제외함으로써, 겹치지 않는 탐색 공간은 비점유영역으로 구별하여 도착 가능 영역을 추출한다. 마지막으로 추출된 도착 가능 영역 중 다른 선박과 가장 먼 거리에 있는 영역을 계산하여 최종 투묘 지점을 선정한다.

1) 샘플링 기반 탐색 알고리즘

샘플링 기반 탐색 알고리즘은 기하학적 상태 공간인 C-space에 노드를 랜덤하게 생성하며, 이러한 노드는 주어진 기하학적 공간상에서 이동 물체가 장애물들과 충돌하지 않는 노드의 집합(V)로, 이들을 잇는 간선의 집합(E)를 갖는 그래프 또는 로드맵($G=(V,E)$)을 나타낼 수 있다. 이러한 샘플링 기반 탐색 알고리즘은 복잡하고 많은 변수가 있는 고차원 환경에서 효율적으로 경로를 생성할 수 있어 로봇공학, 자율주행 등 다양한 분야에서 이용 되어지고 있다(Kim et al., 2022).

PRM 알고리즘은 기존의 경로 탐색 알고리즘에 비해 계산 속도가 빨라, 복잡한 환경에서도 다양한 경로를 탐색할 수 있으며, 장애물이 많은 환경에서도 충돌 없는 경로를 효과적으로 찾을 수 있다. 또한, Multiple-query 방식으로 샘플링을 생성 및 탐색하여 한번 생성된 노드에 대하여 시작점과 도착점을 변경하여 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 이처럼 복잡한 연안해역에 존재하는 정박지에 대하여 향후 효율적인 경로탐색을 위하여 본 연구에서는 주어진 정박지 공간에서 선박의 투묘 지점을 탐색하기 위해 샘플링 탐색 기반의 PRM 알고리즘을 활용하였다. PRM은 Fig. 4와 같이 Multiple-query 방식의 샘플링 탐색 방법으로 크게 로드맵 구성 단계와 쿼리 단계로 이루어진다.

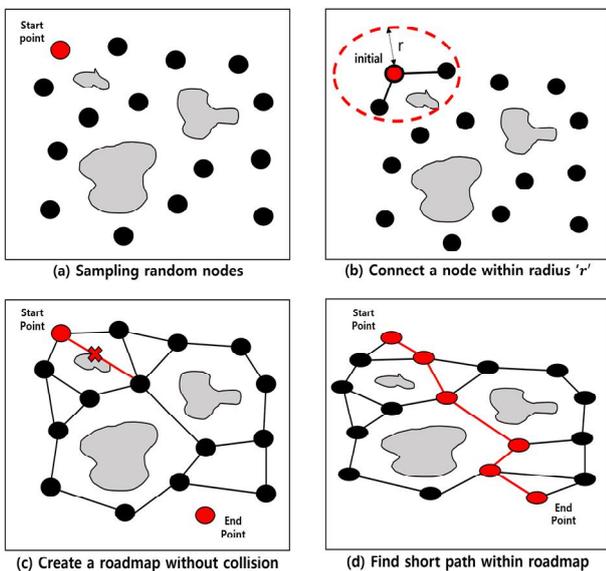


Fig. 4. Flow of PRM algorithm.

먼저, 로드맵 구성 단계에서는 주어진 상태 공간을 장애물 영역과 비장애물 영역으로 구분한다(Kavraki et al., 1998). 다음으로 C-space 내에서 정해진 수만큼 임의의 샘플링을 진

행하고 샘플링된 노드 중 장애물 영역에 포함된 노드를 제거한다. 또한, 제거작업 이후 남은 노드들 각각을 이웃 노드 선택 조건(지정된 거리 이내에 포함되는 노드들 혹은 k 개의 가까운 노드들을 선택)에 따라 노드 간에 장애물이 없다면 연결한다. 이러한 방식을 통해 C-space를 채우는 로드맵을 생성한다. 다음으로 쿼리 단계에서는 생성된 로드맵 그래프에 시작점과 목표점을 포함하여 Dijkstra, A* 등 경로 탐색 알고리즘을 활용하여 상태 공간 내 최단 경로를 탐색한다(Geraerts and Overmars, 2002).

본 연구에서는 이러한 샘플링 기반의 탐색 방법인 PRM 알고리즘의 로드맵 구성 단계를 활용하여 주어진 Binary occupancy grid map 공간에 대해 C-space에서 무작위 샘플링을 통해 노드를 생성하고, 생성된 노드들 중에 장애물이 존재하지 않는 영역의 노드만을 추출하여 다른 선박의 점유영역과 충돌이 없는 노드를 식(1)과 같이 생성 및 추출한다.

$$V = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$$

$$V_{free} = \{q_i \in V \mid q_i \in C_{free} \text{ and } \forall o_j \in O, \|q_i - o_j\| \geq r_j\} \quad (1)$$

여기서,

V : C-space에서 무작위로 샘플링된 노드들의 집합

V_{free} : V 에서 장애물과 충돌하지 않는 노드들의 집합

C_{free} : C-space에서 장애물과 충돌하지 않는 영역

q_i : C_{free} 내에서 샘플링된 노드

O : 장애물들의 집합

o_j : 장애물 j 의 중심

r_j : 장애물 j 의 반지름

$\|q_i - o_j\|$: 노드 q_i 와 장애물 o_j 의 중심 사이의 거리

2) 계산 기하학 알고리즘

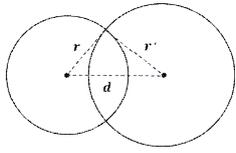
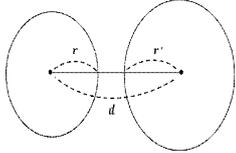
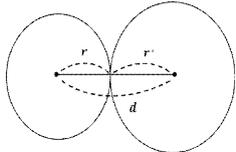
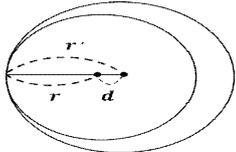
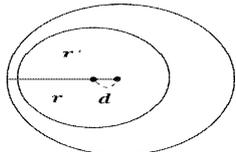
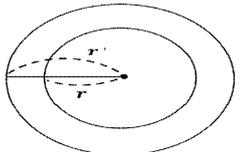
본 연구에서는 샘플링 기반 탐색 알고리즘을 통해 생성된 충돌이 없는 노드를 대상으로 다른 선박의 점유영역과 겹치는 영역을 구분하기 위하여 계산 기하학 알고리즘을 활용하였다.

계산 기하 알고리즘(Computational Geometry Algorithm)은 점, 선, 다각형과 원 등 각종 기하학적 도형을 다루는 알고리즘이다. 계산 기하는 2차원의 평면지도나, 3차원의 그래픽 카드, 로봇틱스 등 다양한 분야에서 사용되며, 특히, 물체의 이동 경로를 고려하는 최단 거리, 데이터 클러스터링(Data clustering), 매칭(Matching) 등 데이터 및 물체 분석과 분류 및 계산에서 핵심이 된다. 계산 기하의 기본 요소는 1차원 형태의 점, 2차원 형태의 선분 및 다각형, 3차원 형태의 다면체가 있으며, 기하학의 문제를 해결하기 위해서는 방향과 크기의

의미를 모두 포함하는 벡터(Vector)를 자주 사용한다. 벡터를 사용하였을 때 더 많은 계산을 빠르고 간편하게 할 수 있으며, 벡터 간의 연산인 내적과 외적을 활용하여 더 효율적으로 문제에 접근할 수 있기 때문이다. 내적을 이용하여 두 벡터의 사이 각, 두 벡터의 직각 여부, 벡터의 사영을 쉽게 구현할 수 있으며, 외적을 이용하여 삼각형 또는 사각형의 면적, 두 벡터의 방향을 판별할 수 있다. 또한, 임의의 점이 다각형의 내부 또는 외부에 있는지 검증하기 위해 임의의 점에서 다각형의 변을 통과하도록 작도하였을 때 교점의 개수가 홀수면 다각형 내부에, 짝수일 경우에는 외부에 있는 점이 있는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 계산 기하학 알고리즘 중 2차원 형태의 다각형 또는 원으로 구성되는 정박지 공간에서 점과 도형간의 상대 위치 검사 및 도형 간의 겹침 영역을 판별하는 기하학적 계산을 수행하였다. 먼저, 2차원 평면에서 두 원 O, O' 의 위치 관계는 원 O 의 반지름을 r , 원 O' 의 반지름을 r' , 두 원의 중심 사이의 거리를 d 라고 했을 때 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

Table 3. Geometric positional relationship between two circles

 <p>Two circles intersecting each other at two points ($r' - r < d < r' + r$)</p>	 <p>Two circles lying outside each other ($r + r' < d$)</p>
 <p>Two circles touching each other externally ($r + r' = d$)</p>	 <p>Two circles touching each other internally ($r' - r = d$)</p>
 <p>One circle lying inside another ($d < r' - r$)</p>	 <p>Two circles same size ($d = 0$)</p>

이러한 두 원의 위치 관계의 정리에 따라 정박지 내에서 겹치지 않는 영역을 구분하기 위해 두 원에 대하여 1개 또는 2개의 접점이 생기는 경우와 내부에 있는 경우는 제외하고 두 원이 서로 만나지 않는 경우만을 탐색할 수 있도록 정의하였다. 다시 말해, 특정 형태의 정박지 내에서 다른 선박이 원의 형태로 점유하고 있는 영역에 본선이 점유 가능한 영역이 겹치지 않도록 식(2)의 조건에 따라 분류하였다.

$$\sqrt{(x_i - x_{TS})^2 + (y_i - y_{TS})^2} \geq R_{TS} + R_{OS} \quad (2)$$

여기서,

x_i, y_i : PRM 알고리즘으로 추출된 노드 집합의 좌표

R_{TS} : 정박지 내 다른 선박이 점유하는 영역의 반지름

R_{OS} : 정박지 내 본선이 점유할 영역의 반지름

4. 투묘 가능 공간 탐색 알고리즘의 적용

4.1 시뮬레이션 조건 설정

본 연구에서 제안한 투묘 가능 공간 탐색 알고리즘의 실효성을 확인하기 위하여 국내의 목포항 정박지를 대상으로 제안된 알고리즘을 적용하였다. 목포항 정박지가 포함된 주변 해역은 주변의 섬, 암초 및 저수심 구역 등이 다수 존재하며, 어선, 여객선 및 화물선 등 다양한 선종들이는 운항하는 해역으로 향후 정박지를 도착지점으로하는 항내 전역 경로탐색 알고리즘 적용에 적합할 것으로 판단되어 본 연구의 시뮬레이션 해역으로 선정하였다. 먼저, 목포항 항만시설 운영세칙 따르면 목포항 정박지는 항계 내 6개, 항계 밖 5개로 설계되어있으며 항계 밖 정박지에는 최대 200,000ton 크기의 선박이 정박지의 사용이 가능하고 위험물 운반선은 10번 정박지 이외에는 정박할 수 없는 것으로 조사되었다.

먼저, 본 연구를 위한 대상 정박지 선정을 위하여 해양수산부에서 제공하는 항만운영정보시스템(Port Management Information System, Port MIS)의 선박 입·출항 현황에서 최근 5년 동안의 목포항 정박지 입항 선박을 조사 및 분석하였다. 최근 5년(2018~2023년) 동안 목포항 정박지를 이용한 선박은 총 86척이었으며, 목포항 정박지 전체 입항 선박 중 91.9%가 모두 항계 밖의 정박지를 사용한 것으로 확인되었다. 목포항 항계 밖 정박지의 구성은 Fig. 5와 같이 총 5개로 구성되어 있다. 또한, Table 3과 같이 목포항 항계 밖 정박지 중 이용 횟수가 가장 높은 곳은 11번 정박지이며, 길이가 260.6m (총톤수 74,843ton)인 벌크선이 최대 크기의 선박인 것으로 확인되었다. 이에 따라, 본 연구를 위한 시뮬레이션 대상 정박지는 이용 횟수가 가장 높은 목포항 항계 밖의 11번 정박

지로 선정하였으며, 시뮬레이션 대상 선박은 입항 선박 중 최대 크기의 선박으로 선정하였다.

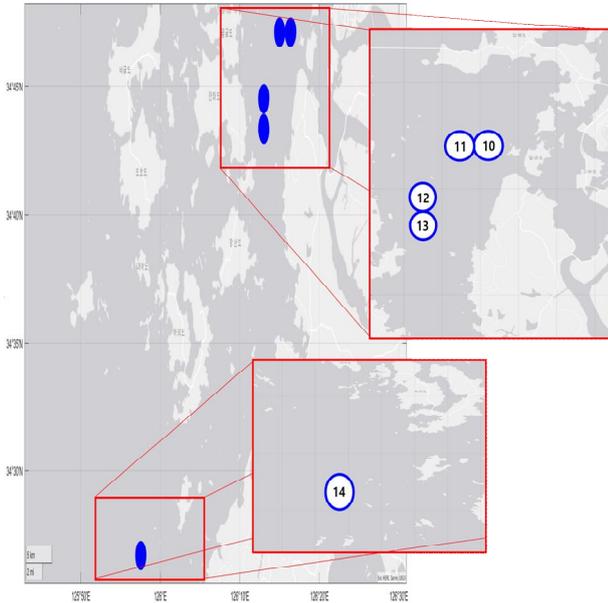


Fig. 5. Anchorage area in Mokpo outer port.

다음으로 정박지 내 다른 선박 1척 영역을 점유하고 있는 것으로 가정하여 시뮬레이션 조건을 설정하였으며, 이때, 다른 선박이 차지하고 있는 정박지 내 점유 위치는 정박지 경계 내에 무작위로 설정되게 하였다. 또한, 본선 및 다른 선박의 정박지 내 점유영역 크기는 시뮬레이션 대상 해역이 국내의 목포항 정박지임을 고려하여 ‘항만 및 어항 설계기준’에 따라 체인의 길이 계산에 필요한 재원이 불분명한 경우에 적용하는 회전반경 크기를 기준 하여 점유영역을 계산하였으며, 시뮬레이션은 해저 저질이 좋은 경우 나쁜 경우에 모두 수행하였다.본 연구의 시뮬레이션은 MATLAB을 활용하였으며, 시나리오는 Table 4와 같다.

Table 4. Anchored at Mokpo port outer anchorage (2018~2023)

Anchorage Name	Capacity (G/T)	Anchored Vessel	Ratio(%)	Max. L.O.A(m)
#10	20,000	13	15.1	175.3
#11	50,000	42	48.8	260.6
#12	100,000	12	13.9	229.0
#13	100,000	9	10.5	292.0
#14	200,000	3	3.5	294.1

Table 5. Scenario for simulation at No.11 anchorage

Item		Specification
Anchorage	Position	N34°47'06", E126°15'00"
	Radius	1,000m
	Depth(Max)	20.0m
Environment condition		Good
Ship radius	LOA(Max)	260.6m
	Radius	380.6m

4.2 시뮬레이션 수행 및 결과

먼저, 목포항 항만시설 운영세척 중 목포항 항계 밖 11번 정박지에 대한 위치 정보를 기반으로 Fig. 6(a)와 같이 정박지 공간을 생성하였다. 또한, 11번 정박지 공간 내 다른 선박 1척의 위치를 랜덤하게 발생시켜 점유영역을 반영한 C-space로 이진 점유 격자지도를 Fig. 6(b)와 같이 생성하였다.

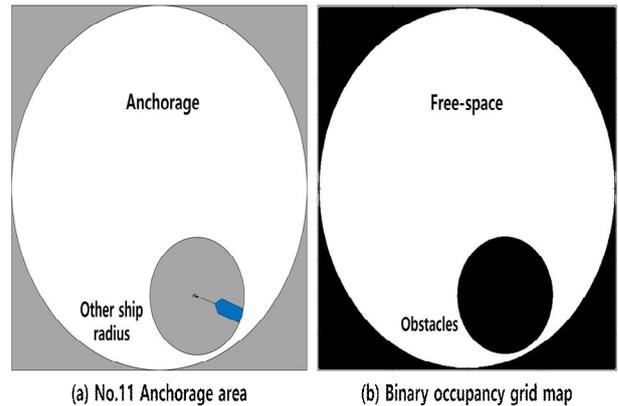


Fig. 6. Generate the binary occupancy grid map.

다음으로 Fig. 7(a)와 같이 생성된 이진 점유 격자지도 공간에서 PRM 알고리즘을 활용하여 정박지 경계 내에서 다른 선박의 점유영역과 충돌하지 않는 노드(V)가 무작위로 생성되었다. 무작위로 생성된 노드(V) 그룹 $G = (V)$ 에 대하여 Fig. 7(b)와 같이 두 원의 위치 관계 계산을 통해 본선의 점유영역(Ship radius)과 다른 선박의 점유영역(Ship radius)이 겹치는 노드와 겹치지 않는 노드를 탐색하고 겹치지 않는 그룹 $G = (V_{free})$ 을 추출하였다.

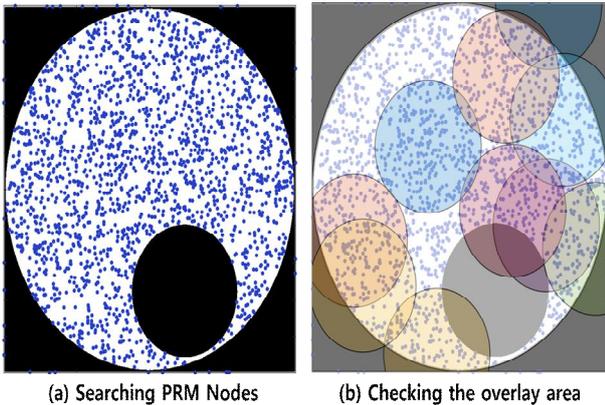


Fig. 7. Searching anchoring point by PRM.

마지막으로, 추출된 $G = (V_{free})$ 중, 다른 선박 점유영역의 중심점으로부터 가장 거리가 멀리 있는 노드를 본선의 투묘 지점으로 선정하였다. 그 결과 시뮬레이션 대상 선박이 목포항 11번 정박지에 대하여 투묘 가능 지점은 Fig. 8과 같이 N34°47'58.54", E126°15'43.20"로 산출되었다.

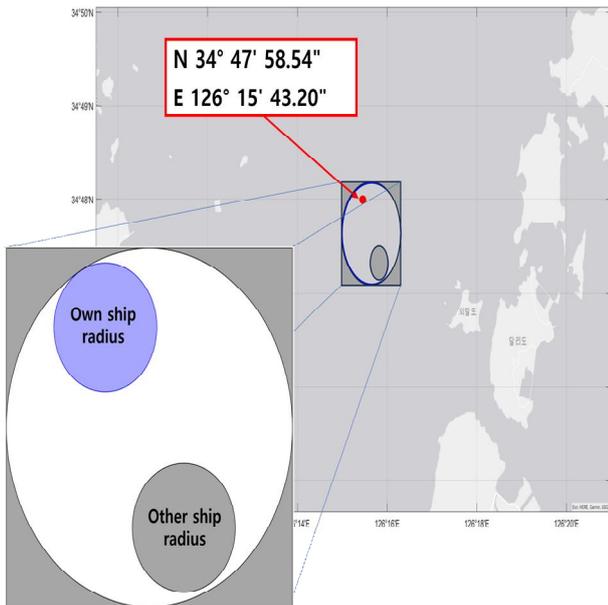


Fig. 8. Anchoring point in No.11 Mokpo anchorage.

5. 결론

전역 경로 탐색 알고리즘은 이동 물체가 특정 공간에서 출발지점과 도착지점 사이를 연결하는 장애물과 교차하지 않는 최단 경로를 탐색하는 문제이다. 따라서, 전역 경로 탐색은 출발 및 도착지점의 위치에 따라 경로의 길이, 탐색시

간 및 효율성이 달라질 수 있다. 선박의 출발 및 도착지점은 도선사 승하선 지점, 부두 외에도 입출항 전 대기 장소 및 선박 수리 등 다양한 목적으로 이용되는 정박지도 포함될 수 있다. 이 중 정박지는 연안 해역 내 항만의 특성에 맞추어 설계된 특정 형태의 공간으로 선박의 크기에 기반한 점유공간에 따라 도착지점을 지정해야 한다.

본 연구에서는 선박의 전역 경로 탐색에 있어 도착지점을 정박지라는 공간 내에서 선정할 수 있도록 다른 선박의 점유공간을 고려한 정박지 내 본선의 투묘 가능한 지점을 탐색하는 방법을 개발하고 실제 해역에 적용하였다. 먼저, 투묘 가능 공간 탐색을 위한 정박지 내 선박의 점유공간을 국내의 항만 및 어항설계기준과 PIANC 보고서를 기반으로 선정하였다. 시뮬레이션은 정박지 내 공간 탐색을 위하여 목포항 11번 정박지 공간 정보를 기반으로 Binary Occupancy Grid Map을 구성하였으며, 다른 선박의 점유 위치는 시뮬레이션 수행 시 정박지 공간 내에서 랜덤하게 생성되도록 하였다. 생성된 상태 공간에서 샘플링 기반 탐색 알고리즘인 PRM 알고리즘을 통하여 정박지의 경계와 다른 선박의 점유공간을 제외한 공간에 무작위 Node를 생성시키고, 시뮬레이션 대상 선박의 점유공간을 적용한 결과 목포항 11번 정박지 내 투묘 가능 공간이 탐색 되었으며, 이 중 다른 선박의 점유공간으로부터 가장 멀리 떨어진 공간을 투묘 가능 위치로 선정하고 좌표 정보를 추출할 수 있었다.

이처럼, 본 연구에서 개발된 알고리즘을 통한 시뮬레이션 결과 정박지 공간정보 및 선박 정보를 활용하여 다른 선박이 점유하지 않는 본선의 투묘 가능 지점을 탐색할 수 있었다. 이는 향후 자율 운항 선박의 전역 경로 탐색 시스템 지원 및 정박지에 입항하는 선박에 대해 VTS에서 투묘 가능 위치 정보를 사전에 식별할 수 있는 항로 지원 서비스와 정박지 관리 방안에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나, 일반적으로 투묘 지점의 결정은 인간의 판단에 따라 주관적으로 결정되므로 시뮬레이션에서 다른 선박의 실제 묘쇄 길이를 기반으로 점유공간 크기를 선정하지 못하였다는 점과 시뮬레이션 결과에 따라 추출된 위치에 대한 검증할 수 없었던 점은 본 연구의 한계로 남는다. 또한, 풍속, 조류 등의 외력 요소를 고려한 투묘 지점 및 정박지 내 다른 선박이 점유하지 않는 경우에 대한 최적 투묘 지점 결정을 위한 알고리즘은 향후 연구과제로 남는다.

Reference

- [1] Geraerts, R. and M. H. Overmars(2002), A Comparative Study of Probabilistic Roadmap Planners, Algorithmic Foundations of Robotics V. Springer Tracts in Advanced Robotics, 7.

- [2] Kang, W. S., J. Y. Kim, and D. W. Kim(2023), Study on the Establishment of the Separation Distance between Anchored Ships in Jinhae Bay Typhoon Refuge, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 29, No. 4, pp. 338-347.
- [3] Kavradi, L. E., M. N. Kolountzakis, and J. -C. Latombe(1998), Analysis of Probabilistic Roadmaps for Path Planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 14(1), pp. 166-171.
- [4] Kim, J. S., J. M. Park, and C. H. Jung(2018), The Development of the Anchor Dragging Risk Assessment Program, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 6, pp. 646-653.
- [5] Kim, K. I., J. S. Jung, and G. K. Park(2013), A Study on the Estimation of Center of Turning Circle of Anchoring Vessel using Automatic Identification System Data in VTS, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 37, No. 4, pp. 337-343.
- [6] Kim, S. Y., S. H. Nam, and H. C. Lee(2022), Directionally-Exploring Random Trees for Efficient Robot Path Planning in Corridor Environments. Journal of KIIT, 20(4), pp. 57-68.
- [7] Latombe, J. -C.(1991), Robot Motion Planning. Kluwer Academic Publisher.
- [8] Lee, J. S. and J. W. Song(2018), The Efficient Anchorage Management of VTS through Analysis of Domain Watch, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 42, No. 3, pp. 201-206.
- [9] Lee, Y. S., J. S. Kim, J. M. Park, and G. H. Yun(2012), A Study on the Designation of MIPO Emergency Anchorage, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 18, No. 4, pp. 316-322.
- [10] MOF(2017), Ministry of Oceans and Fisheries, Port and fishing port design standards and commentary 2017, Ch.4.2, pp. 12-14.
- [11] Otsu, N.(1979), A Threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), pp. 62-66.
- [12] PIANC Report No. 121(2014), Harbour Approach Channels Design Guidelines, Chapter 3, pp. 99-103.
- [13] Port MIS(2024), Port Management Information System.

Received : 2024. 07. 01.

Revised : 2024. 07. 24.

Accepted : 2024. 08. 29.