

# 경로 추종 적합성 고려 3D A\* 기반 접안 경로 계획 알고리즘 개발

신영하\*

\*씨드론릭스 연구원

## 3D A\*-based Berthing Path Planning Algorithm Considering Path Following Suitability

Yeong-Ha Shin\*

\*Researcher, Seadronix Corp, Seoul, Korea

**요 약** : 선박의 운항 경로를 생성하기 위해 사용되는 경로 계획 방법 중, 그래프 기반 탐색 방식은 간결하고 최적해를 보장한다는 장점이 있어 널리 사용되고 있다. 그래프 기반 탐색 방식을 접안 경로 계획에 적용하는 경우, 추종 적합성을 필수적으로 고려 해야 한다. 그 이유는 접안 시 경로 이탈은 접안 시설과의 충돌로 이어질 수 있으므로, 경로의 이탈이 최소화하는 결과를 생성하는 것이 필요하다. 하지만 그래프 탐색 기반 접안 경로 계획의 기존 연구는 접안 시설 직전의 변침이 많은 결과를 생성하기 때문에 실제 운항 환경에 적용하는데 위험이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 경로 추종에 적합한 비용 함수를 개발하고, 이를 적용한 3D A\* 알고리즘을 제안한다. 또, 실제 운항 환경에 대한 적합성을 평가하기 위해서 유인 운항으로 수집한 데이터의 항적과 알고리즘의 경로 생성 결과를 비교한다.

**핵심용어** : 경로 계획, 3D A\* 알고리즘, 경로 추종, 접안

**Abstract** : Among the path planning methods used to generate the ship's path, the graph search-based method is widely used because it has the advantage of its completeness, optimality. In order to apply the graph-based search method to the berthing path plan, the deviation from the path must be minimized. Path following suitability should be considered essential, since path deviation during berthing can lead to collisions with berthing facilities. However, existing studies of graph search-based berthing path planning are dangerous for application to real-world navigation environments because they produce results with a course change just before berthing. Therefore, in this paper, we develop a cost function suitable for path following, and propose a 3D A\* algorithm that applies it. In addition, in order to evaluate the suitability for the actual operating environment, the results of the path generation of the algorithm are compared with the trajectory of the data collected by manned operations.

**Key words** :Path Planning, 3D A\* Algorithm, Path Following, Berthing

### 1. 서 론

최근, 무인 자동차, 무인 항공체, 무인 잠수체와 같은 무인 이동체에 대해서 다양한 기술 개발이 이뤄지고 있다(Bi, 2021). 무인 수상정 역시 The International Maritime Organization(IMO)에서 MASS(Maritime Autonomous Surface vehicle Ship)이라는 개념을 통해서 무인 수상정을 제도적으로 소개하였다. (IMO, 2017) 무인 수상정의 운항 기술 관련 연구는 인식, 의사 결정, 그리고 경로 계획, 경로 추종 분야로 주로 분류되어 발전되었다. (Yang, 2007)

경로 계획 방법 중에서도 그래프 기반 경로 계획은 간결하고 최적해를 보장한다는 장점이 있으므로 널리 사용되는 방법이다.(Russell, 2018) 무인선의 경로 계획 관련한 논문에서는 A\* 알고리즘을 기반(Zhibo He, 2022) 및 Multi-Direction A\* 알고리즘 기반으로 충돌 회피를 하는 연구(Xie L, 2019) 등이 소개되었다.

선박의 경로 계획을 수행하는 데 있어서 추종 적합성은 필

수적으로 고려되어야 한다. 특히 접안용 경로 계획을 수행하기 위해서는 추종 적합성의 중요성이 더욱 크다. 그 이유는 선박의 운동 모델 특성상 외력으로 인해 특정 위치에서 정지 상태를 유지하기 어렵고, 제자리 회두 역시 Dynamic Positioning에 기반한 선박이 아닌 경우 불가능하기 때문이다. 따라서 접안 시 경로 이탈은 접안 시설과의 충돌로 이어질 수 있으므로, 경로의 이탈이 발생할 가능성이 낮은 경로가 생성되어야 한다. 이를 위해서는 선박의 조종성능이 사전적으로 평가되어야 한다. 그 이유는 조종성능 기준을 만족시키지 못하는 경로는 추종이 불가능하기 때문이다. 기존 연구에서 선박의 조종성능을 반영하기 위해서 진행된 연구로는 선속에 기반한 최대 선회각을 고려한 경로 계획을 Theta\* 알고리즘 기반으로 제안하였다(Kim, 2014).

또한, 예인선 등의 도움 없이 자력으로 접안을 하는 선박은 더욱 엄격한 변침 제한이 필요하다. 그 이유는 선박의 선회 성능은 선속에 비례하는데, 접안 시 선박은 저속으로 운항하기 때문에 침로 변경에 대한 어려움이 크다. 이와 관련된 연

구로 A\*를 기반으로 한 접안 경로 생성 연구(Liu, Chenguang et al, 2019) 가 이뤄졌지만, 단순히 접안 각도와 차이를 최소화하는 경로를 생성하기 때문에, 실제 접안 상황에 적용하는 데 한계가 존재한다. 한편, 주차용 경로 생성을 위해서 4D A\* 알고리즘을 사용된 연구가 소개되었으나(Min, 2012), 이는 주차 시설에 가까워지더라도 변침 성능 감소의 고려 없이 최대 선회각을 기준으로 경로를 생성하기 때문에 실제 해양 환경에 적용하기에 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 경로 추종 적합성을 고려한 비용 함수를 설계하고, 이를 적용한 3D A\* 알고리즘을 제안한다. 이후 시뮬레이션을 통해 비교 알고리즘과 경로 생성 결과를 평가한다.

## 2. 접안 경로 계획

### 2.1 3D A\* 알고리즘

A\* 알고리즘은 지도 상의 장애물 위치를 피하는 최단 경로를 생성하는 알고리즘이다. 하지만 이 알고리즘은 진행 각도에 대한 요소가 없으므로 선박의 제한된 조종성능을 적합하게 반영하는 데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 3차원 (x, y,  $\theta$ )으로 확장된 A\* 알고리즘을 기반으로 하여, 조종성능이 반영될 수 있도록 하였다.

경로 계획에 기준이 되는 장애물 지도는 식 1에 따라서 계산된 선박의 최대 선회 각도를 기준으로 하여, 이 값 이상인 각도에 대해서는 경로를 생성할 수 없도록 설정했다. 선박의 최대 선회 각도인  $r$ 은 “Standards for Ship Maneuverability”를 기준으로 하여 계산되었으며, 선회 반경  $R$ 은 선박 길이의 5배로 설정하였다. (MSC. 137(76))

$$r = \frac{V}{R} \quad (1)$$

이때,  $r$ 은 최대 선회각,  $V$ 는 선박의 속도,  $R$ 은 선회 반경을 의미한다.

### 2.2 경로 추종 적합성을 고려한 비용 함수 설계

기존의 비용 함수는 식 2과 같이 출발 노드로부터 현재까지의 누적 비용  $g$  과 휴리스틱 추정값  $h$ 의 합으로 구성된  $f$ 를 기준으로 한다.(PE Har, 1968)

$$f = g + h \quad (2)$$

### Algorithm.1 3-D A\* algorithm considering Berth angle

---

**Input:** Start (position X, Y, heading), Goal (position X, Y, heading)  
**Output:** PathList (position X, Y, heading)  
**Require:** 3-D OPEN based on the priority queue, 3-D CLOSED

- 1: **Begin**
- 2: OPEN:=CLOSE := $\emptyset$
- 3: Start. $f$ := $\infty$
- 4: Start $\in$ OPEN
- 5: **while** OPEN $\neq\emptyset$
- 6:   s:=OPEN.Pop()
- 7:   **if** s=Goal **then**
- 8:     **return** “path found”
- 9:   **end if**
- 10:  s $\in$ CLOSED
- 11:  **foreach** s' $\in$ neighbor(s) **do**
- 12:   **if** IsWalkable(s, s')  $\wedge$  (s' $\notin$ CLOSED) **then**
- 13:     Cost $_g$  := gCost(s')
- 14:     **if** (s' $\notin$ OPEN) **then**
- 15:       s'.g = s.g + Cost $_g$
- 16:       s'.h = hCost(s')
- 17:       s'.f = s'.g + s'.h
- 18:       s'.parent:= s
- 19:       **if** s' $\in$ OPEN **then**
- 20:         OPEN.Remove(s')
- 21:       **end if**
- 22:       s' $\in$ OPEN
- 23:     **end if**
- 24:   **end if**
- 25:  **end for**
- 26: **end while**
- 27: **return** “no path found”
- 28: **end**

---

본 논문에서는 알고리즘에서는 경로 추종 적합성을 비용 함수에 반영하기 위해서 식 2을 수정하여 다음과 같이 정의하였다.

$$g(n) = \omega_m * C_m(n) + \omega_c * C_c(n) \quad (3)$$

$$h(n) = \omega_d * C_d(n) + \omega_b * C_b(n) * A \quad (4)$$

$$A = \begin{cases} \infty, & C_d < D \\ 0, & C_d \geq D \end{cases} \quad (5)$$

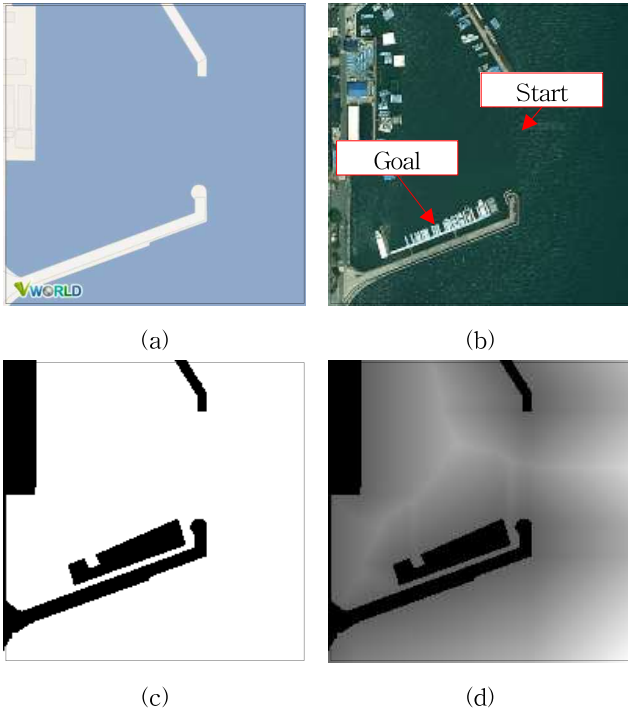


Fig. 1 시뮬레이션 기준 지도. (a)는 원본 지도이며, (b)는 해당 지역의 위성 사진, (c)는 (b)와 동일한 위치에 접안 시설 작도를 작도한 지도. (d)는 장애물과의 안전 거리를 두고 통과하는 경로를 생성하기 위해서 영상 처리 과정을 진행한 결과이고 흰색 색상에 가까울수록 장애물로부터 안전한 위치임.

이 때,  $\omega_m, \omega_c, \omega_d, \omega_b$  는 각각 비용 지도, 각도 변화, 휴리스틱 값, 접안 각도와와의 차이에 대한 가중치이며,  $C_m$ 는 0~1의 범위를 갖는 비용 지도 색상 값,  $C_c$ 는 라디안 단위의 현재 침로를 기준으로 한 다음 노드까지의 각도 변화량,  $C_d$ 는 현재 노드부터 도착 노드까지의 거리,  $C_b$ 는 라디안 단위의 현재 침로와 접안 침로와의 차이이다.  $A$ 는 접안 침로 차이에 대한 가중치를 높이기 위해 설정된 패널티 값이며, 접안 시설 길이와 선박 길이로 구성된 기준 거리  $D$ 이내에 진입하게 되면  $A$ 는 최대 비용 값이 되며, 그렇지 않은 경우는 0이 되어 값은 반영되지 않는다. 기준 거리  $D$ 는 “Standards for Ship Manoeuvrability”(MSC. 137(76))에서 선박 길이의 5배로 정의하는 전술 선회 직경 값과 접안 시설 길이 2배만큼의 값으로 합으로 정의했다. 이처럼 설정한 이유는 선박이 계획된 경로를 추종하지 못한 경우, 360도 회두하여 재진입할 수 있을 만큼의 여유 거리를 두기 위함이다. 이 비용 함수를 통해서 기준 거리 내에는 접안 각도와와의 요소를 최대로 반영하여 각도 변화를 최소화한 경로를 생성하도록 하였다. 이에 대한 의사 코드는 Algorithm. 1과 같다.



Fig 2. 유인 운항 시 항적

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 시뮬레이션 설계

본 논문에서는 제안 알고리즘의 실제 운항 환경에서의 적합성을 평가하기 위해서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 대상 지역은 부산에 있는 마리나 항만으로 선정했다. 선박 제원은 Table 1, 시뮬레이션 기준은 Table 2와 같이 정하였다. 시뮬레이션의 장애물 지도는 전자 지도(Vworld)를 기준으로 하여 Fig.1와 같이 설정하였다. 시뮬레이션을 위해서 접안 시설을 위성 사진 Fig.1(b)과 같은 위치에 Fig.1(c)와 같이 작도하였으며, 비용 지도 Fig.1(d)에서 밝을수록 장애물과의 안전 거리를 두고 항해할 수 있는 지역으로 판단하도록 처리하였다.

Table 1 기준 선박 제원

정보	단위	값
선박 길이	Meter	5
선박 폭	Meter	2
최대 선회각	Degree	20
최대 속도	Knots	20

Table 2 시뮬레이션 기준

정보	단위	값
지도 크기	Pixel	400 x 400
각도 해상도	Degree	5
지도 해상도	Meter/Pixel	0.474
접안 시설 길이	Meter	7
접안 시설 폭	Meter	3
패널티 적용 시점	Meter	39

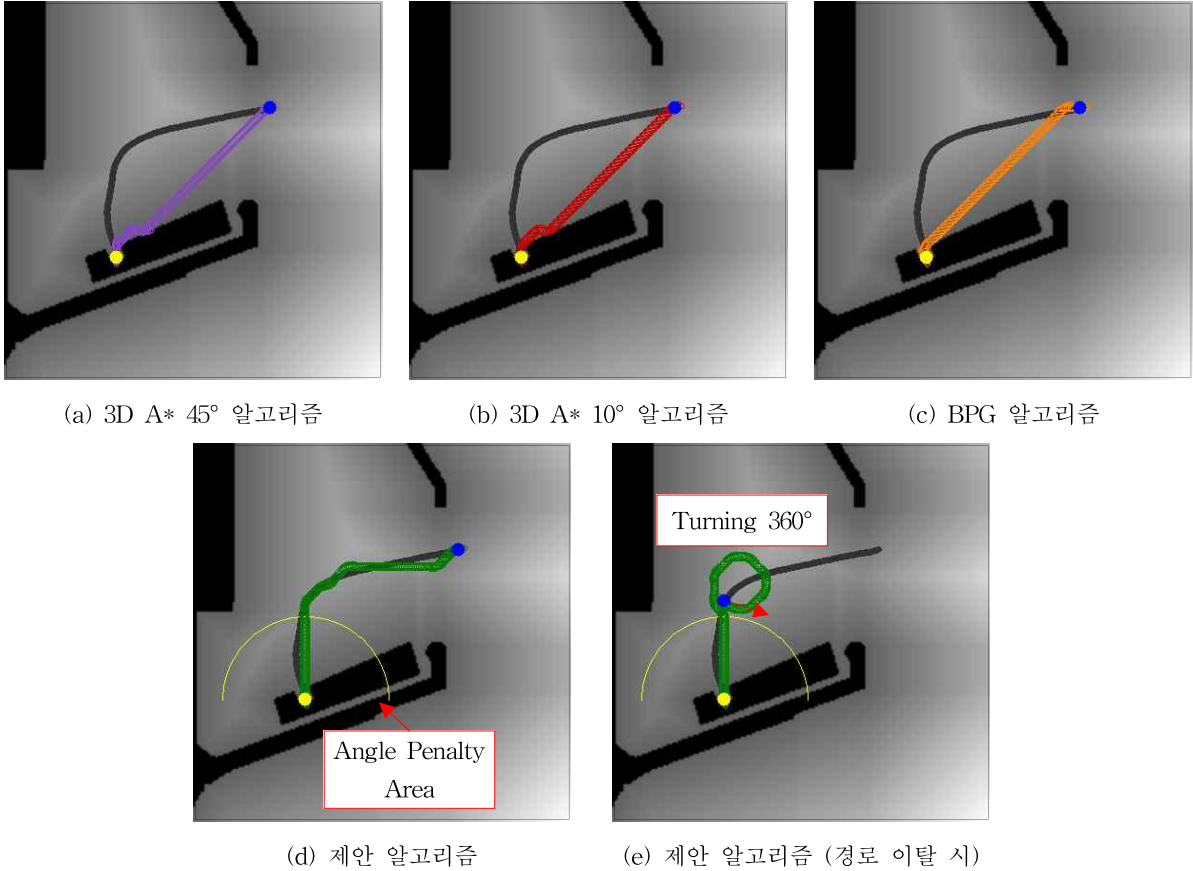


Fig 3. 알고리즘 별 경로 생성 결과. (a), (b)은 단순 최단 경로를 생성하므로 집안 시설과의 충돌은 고려되지 않음. (c)에서는 집안 각도와와의 차이를 고려하나, 침로 변화 구간이 짧아 집안 시설과의 위험성이 존재함. 한편, 제안 알고리즘 (d)는 유인 운항 상황과 가장 유사한 결과를 생성해 실제 운항 시 적합한 경로로 평가됨. 제안 알고리즘의 경로를 이탈하는 경우 (e)와 같이 360도 회두 경로를 생성하여 재진입하도록 함.

제안 알고리즘의 비교 알고리즘으로는 경로 탐색 방법이 유사한 3D 45° A\* 알고리즘, 3D 10° A\* 알고리즘, 집안 각도를 고려한 Berth Path Generation(BPG) A\* 알고리즘(Liu, Chenguang et al, 2019) 으로 선정했다. 경로 생성 결과의 추종 유용성을 평가하기 위해서 유인 운항 상황에서 수집한 데이터를 기준으로 하여 알고리즘을 평가하였다. 수집 데이터의 항적은 Fig 2과 같다. 각 알고리즘의 생성 경로 경유점 위치와 침로 값을 유인 운항 시 데이터와 차이를 확인했다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 3D A\* 45°, 10° 알고리즘은 Fig 3(a), (b)와 같이 단순 최단 경로만을 생성하기 때문에 선박의 조종 성능 및 집안 시설과의 충돌에 대해서는 고려하지 않는 결과

가 생성되었다. 또한, 비교 알고리즘인 BPG 알고리즘은 집안 각도와와의 차이를 최소화하기 위한 요소가 비용 함수에 포함되어 있으나, 시작 지점과 도착 지점을 잇는 대각선에 가까운 형태로 생성되었으며 침로 변화 구간이 집안 시설 직전에 짧은 길이로 존재한다. 따라서 작은 경로 이탈에도 집안 시설과의 충돌 위험성이 높아지게 된다. 반면 제안 알고리즘은 집안 시설을 기점으로 반원 형태로 표시한 기준 거리 이내로 진입하게 되면, 침로 변화를 최소화하는 경로를 생성한다. 이는 유인 운항 항적과 가장 유사한 경로이므로 추종 단계에 적합한 알고리즘으로 판단된다. 제안 알고리즘의 기준 거리 이내에 진입 당시 집안 각도와와의 차이가 과도해 경로 이탈의 우려가 있는 경우, Fig 3(e)와 같이 360도 회전하는 구간을 형성해 경로에 재진입하도록 하여 집안 시설과의 충돌을 방지한다.

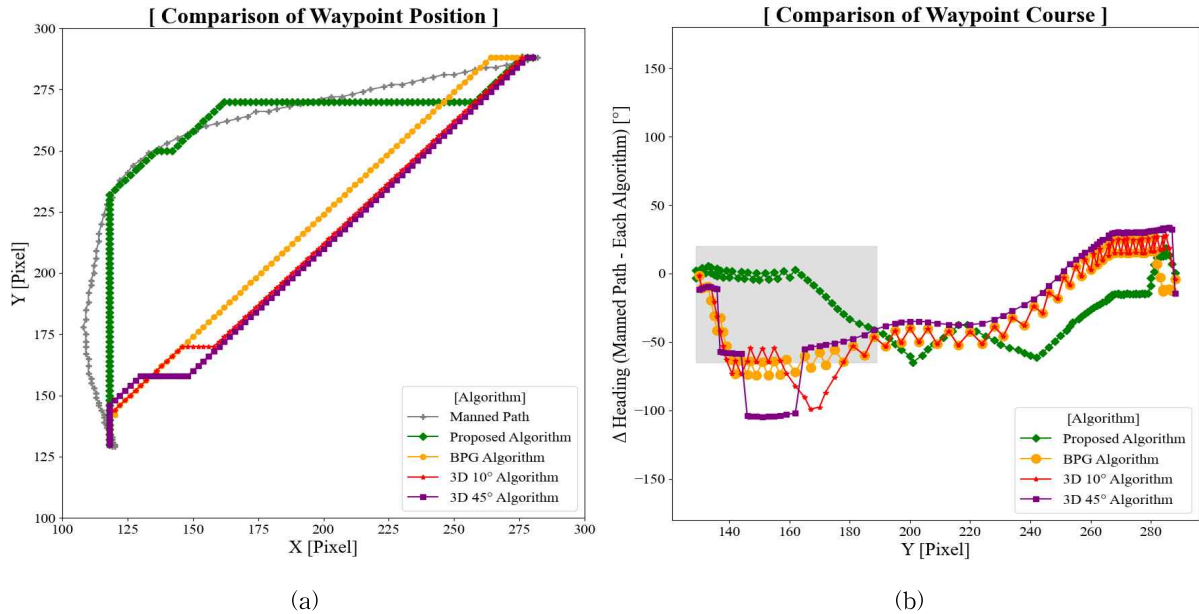


Fig 4. 유인 운항 데이터와 각 알고리즘 비교 결과. (a)는 유인 운항 데이터와 각 알고리즘의 경로를 함께 작도한 것이다. 제안 알고리즘의 경로가 유인 데이터와 가장 유사함을 알 수 있다. (b)는 유인 데이터의 침로와 경로 계획의 침로의 차이를 지도 Y값에 따라 표시한 것이다. 집안 시설과 가까워지는 그래프의 좌측 구간에서 제안 알고리즘의 차이가 최소치를 보인다.

또한, Fig 4는 유인 운항 데이터의 침로와 각 알고리즘의 침로 차이를 나타낸 그래프이다. Fig.4(a)를 통해 제안 알고리즘의 경로가 유인 데이터와 가장 흡사한 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(b)에서는 집안 시설로부터 먼 구간인 그래프의 오른쪽 구간에서는 4가지 알고리즘 모두 유사한 추이를 보이지만, 집안 시설에 가까워지는 회색 음영 구간내에 진입하게 되면 제안 알고리즘은 유인 운항 데이터와의 차이가 줄어들어 0의 값에 수렴하는 데 반해, 그 외 알고리즘은 차이의 정도가 커지는 결과를 보인다. 이를 통해 실제 운항 데이터와 유사한 침로 결과를 생성하는 제안 알고리즘이 경로 추종 단계에서도 다른 알고리즘보다 경로 이탈 가능성이 낮다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 경로 추종 적합성을 고려한 집안 경로 계획 알고리즘을 제안하였다. 이는 집안 시설에 근접한 구간에서 변침을 최소화하는 경로를 생성함으로써, 경로 이탈 가능성을 최소화한다. 실제 운항 환경에 대한 추종 적합성을 평가하기 위해서 유인 운항으로 수집한 데이터의 항적과 각 알고리즘의 경로 생성 결과를 비교하였다. 그 결과 제안 알고리즘의 경로가 유인 운항 항적과 가장 유사하였으며, 침로 역시 차이가 작았다. 따라서 생성 경로를 추종하는 데 있어 비교 알고리즘보다 경로 이탈 가능성이 작고, 집안 시설과의 충돌 위험성이 적음을 확인했다.

차후 연구에서는 실제 선박에 제안 알고리즘을 적용한 실험을 통해 집안 상황 시 이용 가능성을 평가할 것이며, 또한, 이안 경로를 생성할 수 있도록 알고리즘을 확장할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Bi, X. (2021). Overview of autonomous unmanned systems. In *Environmental Perception Technology for Unmanned Systems* Springer, Singapore. pp 1-15.
- [2] IMO, (2002), RESOLUTION MSC.137(76) "STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY".
- [3] Yang, S., Li, L., Suo, Y., Chen, G., (2007). Study on construction of simulation platform for vessel automatic anti-collision and its test method. In: 2007 IEEE International Conference on Autonomous logistics IEEE pp. 2414-2419.
- [4] Russell, Stuart J. (2018). *Artificial intelligence a modern approach*. Norvig, Peter (4th ed.). Boston: Pearson. ISBN 978-0134610993. OCLC 1021874142.
- [5] Zhibo He, Chenguang Liu, Xiumin Chu, Rudy R. Negenborn, Qing Wu, (2022), Dynamic anti-collision A-star algorithm for multi-ship encounter situations, *Applied Ocean Research*, Volume 118, 102995.
- [6] Xie, L., Xue, S., Zhang, J., Zhang, M., Tian, W., Haugen, S. (2019), A path planning approach based on multi-direction A\* algorithm for ships navigating within wind farm waters. *Ocean Engineering* .184, pp. 311-322.
- [7] Kim H, Kim D, Shin J, Kim H, Myung H, (2014), Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles, *Ocean Engineering*,

Volume84, pp. 37-44

- [8] Liu, Chenguang, Mao, Qingzhou, Chu, Xiumin, Xie, Shuo. (2019). An Improved A-Star Algorithm Considering Water Current, Traffic Separation and Berthing for Vessel Path Planning. *Applied Sciences*. 9. 1057. 10.3390/app9061057.
- [9] Min. K, Choi. J, Kim. H, Myung. H , (2012). Design and implementation of path generation algorithm for controlling autonomous driving and parking, 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 956-959.
- [10] P. E. Hart, N. J. Nilsson and B. Raphael, (1968), A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Cybernetics, vol. 4, no. 2, pp. 100-107.
- [11] Vworld website, [https://www.vworld.kr/v4po\\_main.do](https://www.vworld.kr/v4po_main.do), Oct 14th, 2022
- [12] RESOLUTION MSC.137(76) (2002), STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY.