

데이터 기반 자율운항선박 충돌회피 기동범위 추정 모델

황태민¹, 김성철^{2*}

¹국립목포해양대학교 해상운송시스템학과 박사과정, ²국립목포해양대학교 승선실습과정부 교수

A Data-Driven Collision Avoidable Area Estimation Model for MASS

Taemin Hwang¹, Sung-Cheol Kim^{2*}

¹Graduate Student, Department of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime University

²Professor, Division of Cadet Training, Mokpo National Maritime University

요약 자율운항선박은 자율시스템 중심으로 항해를 수행하며 충돌 위험 등 위급상황에서 원격운항자가 원격으로 선박을 제어하는 방식의 운영개념에 따라 운항하게 된다. 위급상황 중 특히 충돌 위험 상황에서 대응하는 경우 원격 조타를 위한 선박의 기동 범위 파악은 필수적이다. 그러나 여러 척의 자율운항선박을 대상으로 하는 원격운항은 단일 선박의 기동 가능 범위 파악이 어렵다. 때문에, 선박의 기동 정보가 필요한 연구에서는 주로 선박 모델을 사용하지만, 원격지의 환경 요소들을 각각 수집하여 모델링에 반영해야 하거나 복잡한 연산을 해야 하는 문제가 있다. 본 연구에서는 선박의 최근 데이터를 기반으로 선박의 당시 기동범위를 간소화된 충돌회피 시스템에 적용하여 원격운항자에게 충돌회피 기동 범위를 제공하는 모델을 제안한다. 주요 방법론은 항행 중인 선박의 최근 일부 데이터를 기반으로 최소 선회권을 도출하여 선박 기동 파라미터를 추정하는 방법을 포함한다. 제안하는 모델은 자율운항선박의 원격운항 중 긴급한 충돌회피에서 필요한 기동범위를 제공하여 원격운항 중 충돌사고를 방지할 것으로 기대한다.

주제어 : 자율운항선박, 원격운항, 충돌회피, 최소선회권, 충돌회피 가능 영역

Abstract Autonomous ships primarily navigate via autonomous navigation systems, with remote operators intervening in critical situations. Such interventions typically occur in urgent collision avoidance situation, where understanding the ship's maneuvering capabilities is essential. However, in a remote operation involving multiple ships, ascertaining the precise maneuvering range of a single ship is challenging. Hence, research using maneuvering data employs ship models. However, the model-based approach is required to apply each environment factor separately and to process heavy computing. This study proposes a model to estimate the collision avoidable area based on the ship's recent operational data. The methodology involves deriving the minimum turning circle and estimating ship maneuvering parameters. The proposed model is expected to help prevent collisions during urgent remote operations by providing an accurate estimation of the feasible collision avoidable area.

Key Words : Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), Remote operation, Collision avoidance, Minimum turning circle, Collision avoidable area

*교신저자 : 김성철(sckim@mmu.ac.kr)

접수일 2025년 10월 08일

수정일 2025년 10월 17일

심사완료일 2025년 10월 21일

1. 서론

자율운항선박은 자율시스템 중심으로 항해한다[1,2,3]. 항해 중에 발생하는 충돌 위험은 주로 자율시스템이 대응하나, 그중 충돌회피 대응이 어려운 상황의 경우는 원격운항자가 원격조종으로 이를 대응한다[4,5,6].

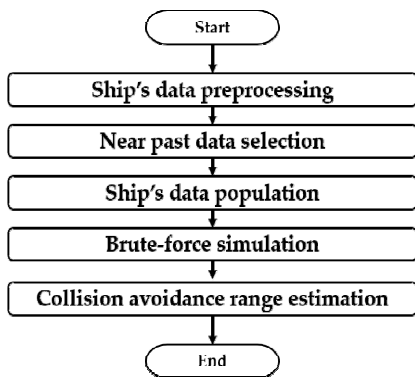
원격운항자가 투입되는 위급상황은 충돌회피를 위한 극단적인 기동 범위를 알아야 하는 상황을 포함한다. 이는 충돌의 위험이 매우 임박한 상황에서 최대 전타 등의 조치로만 해결되는 상황을 말한다[7,8].

선박의 모델링을 사용하는 연구들은 대상 선박의 움직임을 구현하기 위해 다양한 환경요소를 각각 구현하고, 복잡한 연산을 토대로 작동한다[9, 10, 11, 12, 13, 14]. 이는 선박 모델링을 활용한 충돌회피 알고리즘 개발 연구 [15, 16] 등에서 충돌회피 의사결정 이후, 선박의 기동을 구현할 때 사용된다.

선박 모델링을 활용한 방법은 원격지 현장에서의 환경 요소 데이터를 수집해야 선박 기동에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 당시의 환경에 따른 외력, 선박의 기동 한계 데이터를 해당 선박의 특정 시점의 단기 과거 데이터를 바탕으로, 가벼운 연산을 통해 추출한다. 연구의 내용은 추출한 최소 선회권으로부터 충돌회피 알고리즘에 적용할 선박 기동 파라미터를 추정하는 내용을 포함한다.

2. 방법론

연구의 방법은 Fig. 1과 같이, 대상선박의 선정부터 최소선회권 추출, 선박 이동가능 상태 추정 및 충돌회피 모델 적용의 순서로 진행하였다.



[Fig. 1] Research workflow.

2.1 대상 선박의 단기과거 데이터 추출

데이터의 수집은 Fig. 2에 보여지는 목포해양대학교 실습선의 Voyage Data Recorder(VDR)에 기록되는 선박 운항데이터를 활용하였다. VDR 데이터는 선박의 조타각, 선수방위 등의 데이터를 선박에 설치된 장비에서 직접 수신하여 시계열로 저장한 데이터이다.

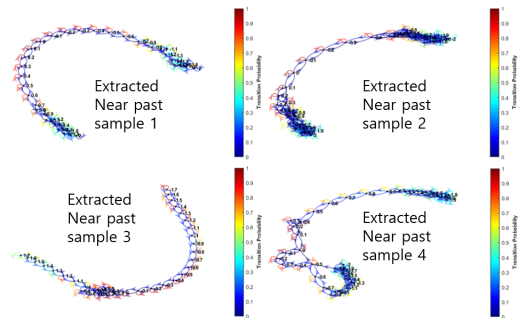


[Fig. 2] Picture of target model ship.

전처리 된 데이터의 특정 시점은 어느 시점이든 적용이 가능하므로 본 연구에서는 임의로 선정한 시점에서 외력의 변화가 크지 않은 과거 두 시간 이내 범위의 데이터를 단기 과거 데이터라고 표현하였다.

2.2 단기 과거 데이터 Markov chain

Markov Chain의 생성은 기수행된 연구[17]에서 활용한 초당 선회변화량을 0.1도씩 구분하여 상태변수로 설정하고, 직전 상태에서 다음 상태로의 전이 확률을 계산한다. 계산된 전이 확률 매트릭스는 Fig.3와 같이 시각화 되며, 단기 과거 데이터에 포함되지 않는 선회를 생성해 내는 랜덤 워크 시뮬레이션에 활용된다. Fig. 3은 동일한 선박의 다른 단기 데이터로 생성한 Markov chain을 예시로 보여준다.

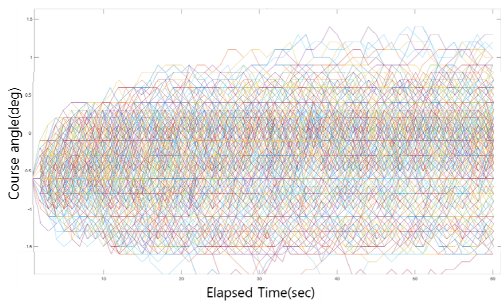


[Fig. 3] Markov Chains upon each near past data.

대상 선박의 단기 과거 데이터는 동일한 선박에서 추 출했음에도 시점별로 다양한 기동 차이를 보인다. 이는 선박의 기동이 당시 선박이 받는 외력, 선박 자체의 무게 로 인한 저항 등에 영향을 받기 때문이다.

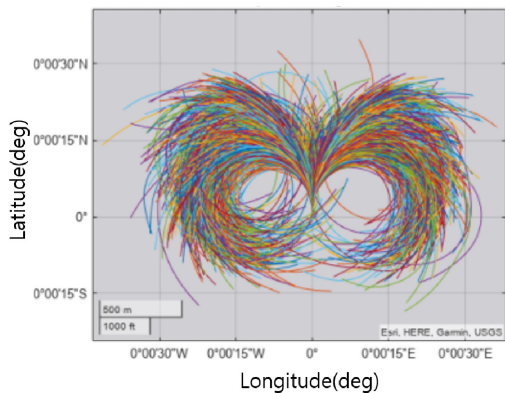
2.3 단기 과거 데이터 기반 최소선회권 추출

단기 과거 데이터의 최소 선회권 추출은 Markov chain의 랜덤 워크 시뮬레이션을 통해 극단적인 선회를 추출하였다. Fig. 4는 초기 선회 변화량 0 에서 시작하여 무작위로 생성한 다양한 선회결과를 보여준다.



[Fig. 4] Altering random walk simulation.

Fig. 4의 랜덤 워크 시뮬레이션은 이전 상태 값에 영 향을 받아 현재 나타날 수 있는 상태를 확률적으로 생성 한다. 각 시뮬레이션의 길이와 수행 횟수는 300초 길이 의 선회를 1,000,000번 수행하여 나온 선회결과 중 가장 선회권이 작은 경우를 활용하였다. Fig. 5는 Random walk로 생성된 선회 데이터를 항적으로 나타낸 것이다.



[Fig. 5] Generated near past turning circles.

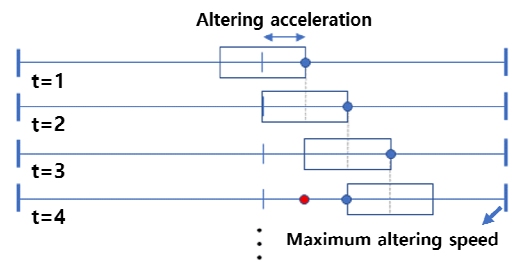
전체 추출된 선회권 항적에서, 360도 선회를 가장 짧

은 시간 동안 수행한 최소선회권은 90도를 선회하는데 58초, 180도를 선회하는데 120초, 270도를 선회하는데 194초, 360도 선회하는데 277초가 소요되는 선회로 확 인되었다. 이는 단기 시간 데이터의 최소선회권이다.

2.4 선박 기동 파라미터 추정

본 연구에서 활용한 충돌회피 알고리즘은 Velocity Obstacle (VO)이다. VO의 모델은 Hybrid Reciprocal Velocity Obstacle(HRVO)[18] 연구를 기반으로 한 GitHub에서 제공되는 Python 환경의 모델[19]을 바탕 으로, MATLAB R2024a (The MathWorks, Inc.) 환경 으로 재구현 하였다. 파라미터 추정을 위한 모든 시뮬레 이션 실험은 Windows 11 Pro (64-bit) 운영체제에서 수행되었으며, 사용된 하드웨어 사양은 Intel® Core(™) Ultra 9 285(2.5 GHz) CPU, 64GB RAM, 그리고 NVIDIA GeForce RTX 5090 (31GB VRAM) GPU이다.

시뮬레이션 파라미터는 충돌회피 알고리즘의 충돌위 험 영역 계산을 위한 본선과 상대 선박의 “x, y, u, v, r” 값, 여기서 “x, y”는 선박의 위치를 해리 단위로, “u, v” 는 속도를 노트 단위로, 그리고 “r” 값은 원형 도메인의 반지름을 해리 단위로 나타낸다. 여기에 Fig. 6의 본 연 구에서 추가한 선박 기동 파라미터는 ‘선회가속도 (Altering Acceleration, ALT_acc)’와 ‘최대초당선회각 도(Maximum Altering Speed, ALT_max)’이며, 이는 실제 선박과 유사하게 선회를 제한하는 역할을 한다.



[Fig. 6] Parameters for Brute-force simulation.

Fig. 6의 세로축은 임의의 시점 t=1 부터 초 단위로 증가하는 이산 시간을 나타내며, 가로축은 해당 시간 에 서 증감할 수 있는 선회량을 0을 중심으로 보여준다.

선회가속도 파라미터는, 선회 중이던 선박의 선회 변 화가 제한되는 범위를 설정한 값이며, 최대초당선회각도 파라미터는, 선박의 초당 선회 속도의 최대값을 설정한 값이다. 결과적으로 VO 모델에는 x, y, u, v, r, 선회가

속도, 최대초당선회각도 값이 입력된다.

Brute-force 시뮬레이션은 충돌회피 모델에 기동 파라미터 조합을 다르게 적용하면서, 모든 경우의 수에 대해 선회권을 생성하고, 단기 과거 데이터 기반 최소선회권과 가장 작은 오차를 보인 기동 파라미터 조합을 찾는다. Brute-force 시뮬레이션은 Algorithm 1의 의사코드로 표현된다.

```

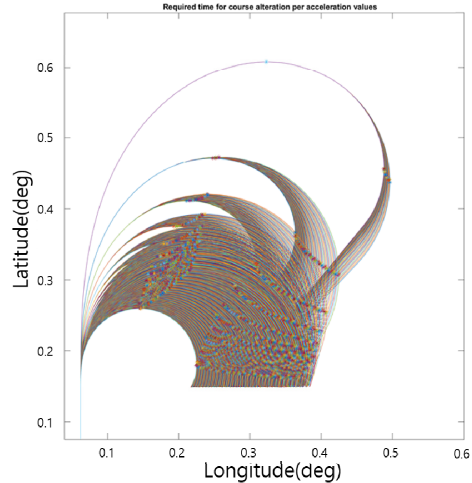
Algorithm 1 : Altering Brute-force simulation
simulation_result ← [ ]
FOR (ALT_acc, ALT_max) IN (all_combination) DO
  sim_time ← 300
  start_course ← 0
  speed ← ship's_current_speed_per_second
  u ← sin(deg2rad(start_course))*speed
  v ← course(deg2rad(start_course))*speed
  r ← 0.5, x ← 0, y ← 0
  start_state ← [x, y, u, v, r]
  ship_state_history ← [start_state]
  state ← start_state
  FOR time TO sim_time DO
    x_goal ← x+u*sin(deg2rad(45))*speed
    y_goal ← y+v*sin(deg2rad(45))*speed
    goal_state ← [x_goal, y_goal, u, v, r]
    ideal_vel ← get_ideal(state, obstacles)
    candidate_vels ← get_candidate(ideal_vel, state, goal_state)
    altering_vels ← get_alter(candidate_vels, ALT_acc, ALT_max)
    final_vel ← get_closest(altering_vels, ideal_safe_velocity)
    state ← update_State(final_control_velocity)
    APPEND state TO ship_state_history
  END FOR
  APPEND ship_state_history TO simulation_result
END FOR
    
```

Algorithm 1의 Brute-force 시뮬레이션은 기본 'VO'로 표기된 VO 모델의 목적지 'goal_state'를 매 순간 위치의 우현 45도 전방의 위치로 정하여 선박의 최대 선회를 유도하면서 제한 시간 300초 동안의 시뮬레이션 기록을 수집하였다.

Fig. 7은 기동 파라미터를 각각 0.01도 간격으로 나누어 전체 경우의 수 2869개의 조합을 모두 시뮬레이션하였을 때 생성된 항적을 표현한 것이다.

Fig. 7의 항적을 보면, Y축 방향으로는 선회가속도 값에 따라 90도 선회하기까지 진행해야 하는 전진 거리가 선회가속도 파라미터의 설정값이 커짐에 따라 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다. X축 방향으로는 최대초당선회각도 값이 작을 때는 선회 속도가 느린 상태에서 더 이상 증가하지 않아, 큰 선회권을 그리다가, 최대초당선회각도 값이 증가할수록 선회권이 작아지는 형태를 보인다.

VO 모델이 수행한 선회권은 모두 설정된 선회가속도와 최대초당선회각도 파라미터가 허용하는 최대속도의 선회를 보여준다. 이는 소각도 선회보다 대각도 선회에 영향을 주어 선박 기동 범위를 제한한다.



[Fig. 7] Turning circle Brute-force simulation.

전체 Brute-force 시뮬레이션에서 추출한 선회각도 90°, 180°, 270°, 360°의 달성 시점들이 단기 과거 데이터 기반 최소선회권과 최소 절대 차이를 보인 경우는 Table 1과 같다.

<Table 1> Brute-force simulation result

	Generated Turning circle (sec)	Estimated Turning circle (sec)
90 degrees	58	61
180 degrees	120	116
270 degrees	194	194
360 degrees	270	277

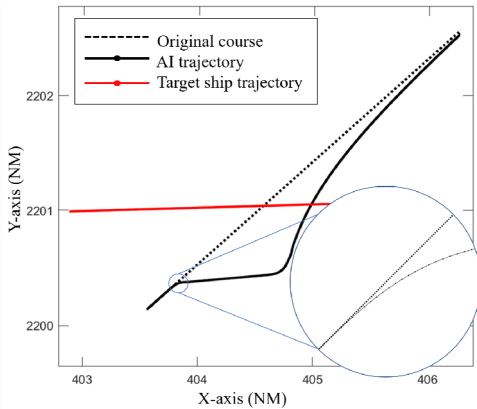
선택된 단기 과거 데이터를 활용한 최소선회권과 가장 유사한 기동을 보이는 기동 파라미터는 선회가속도 0.1, 최대초당선회각도 1.54로 나타났다.

3. 연구결과

3.1 충돌회피 모델의 활용

긴급 상황에서의 충돌 회피 가능 영역은 추정된 파라미터를 충돌회피 모델에 적용하여 추출하였다. 대상 선박의 당시 시점의 단기 과거 데이터를 활용하여 추정된 기동 파라미터는 이를 적용한 충돌회피 모델로 하여금 기존과 같은 방법으로 목표 충돌회피 침로를 계산하나, 선박의 실제 기동은 선회제한으로 인해 해당 침로

로의 선회를 바로 수행하지 못하고 대상 선박이 당시의 환경에서 선회할 수 있는 범위 까지만 기동한다. Fig. 8은 대상 선박의 충돌 위험을 회피할 때의 기동을 예시로 보여준다.



[Fig. 8] Movement of Applied CAS.

Fig. 8의 선박 기동은 설정된 선회속도와 최대초당 선회각도가 허용하는 만큼의 곡선으로 기동하는 모습을 보인다. 이는 Algorithm 1의 최적 목표 속도벡터 $ideal_vel$ 을 바탕으로 선택할 수 있는 후보 속도벡터 $candidate_vels$ 중, ALT_acc 와 ALT_max 가 허용하는 범위 내의 속도벡터인 $altering_vels$ 중에서만 매 순간의 속도벡터를 선택할 수 있게 한 결과이다. 본 연구에서 제안하는 기동 파라미터가 제한하는 VO 모델의 선회는 당시 환경이 반영된 단기 과거 데이터의 움직임에 따라 충돌회피 기동을 수행하도록 유도한다.

3.2 긴급한 원격조종에서의 활용

원격운항 중에 사람이 개입하게 되는 순간은 기존의 단일선박을 운항하는 방식과 다르다. 기존의 운항방식은 긴급한 상황이 발생하기 전, 이를 대비할 수 있으며, 조기에 대응하여 상황을 완화하는 것도 가능하다. 하지만, 원격운항의 경우는 그렇지 않다. Fig. 9는 본교 국립목포해양대학교의 원격운항시물레이션 센터에서 원격운항 교육 장면을 보여준다.

원격운항의 경우 기존 대비 소수의 인원이 다수의 선박을 감시하던 중, 동시 다발적으로 발생하는 상황에 대한 대응을 필요로 하여, 각각의 대응 시간이 상대적으로 짧을 수 밖에 없다.



[Fig. 9] Remote Operation Simulation training.

제안하는 모델은 자율시스템이 충돌회피를 수행하지 못하거나 예측하지 못한 상대 선박의 움직임으로 인해 충돌이 매우 임박해진 상황을 대상으로 한다. Fig. 10은 본교 국립목포해양대학교에서 수행한 원격운항시물레이션 교육 중 임박한 충돌을 회피하는 장면이다.



[Fig. 10] Collision avoidance simulation scene.

해당 시물레이션은 이러한 충돌이 임박한 선박이 한 척이 아닌 다수의 선박을 대상으로 하는데, 이때는 모든 충돌위험을 가장 시간 효율적으로 회피를 하는 것이 매우 중요하다. 충돌회피의 기동범위 추정은 선박 모델링보다 가벼운 연산으로 원격운항자에게 회피 가능 영역을 제공한다.

4. 결론

자율운항선박은 현존하는 단일선박에서 현장운항방식과 달리 다수선박에 대한 원격운항방식이다. 다수의 대상선박은 각기 다른 위치에서, 다른 시점마다 충돌 회피가 필요할 수 있다. 긴박한 원격운항 환경에서 원격운항자가 개입하는 상황에서는 충분한 시간을 두고 충돌회피 조치를 취하기 어려운 점에 대해 지원하기 위한 모델을

제안했다. 이는 관리 선박 전체가 언제 위험에 처할지 알 수 없는 원격운항 환경에 대한 지원을 목적으로 하였다.

본 연구는 원격운항 특정 시점에서의 선박 기동범위를 추정하기 위해 당시 데이터에서 가까운 과거의 데이터를 활용하였다. 이는 당시 환경의 선박 기동을 모델링 하는 대신, 데이터만으로 구현하였으며, 부족한 선회 데이터를 증폭시키기 위해, Markov chain 모델로 생성하였다. 추출한 최소선회권을 바탕으로 추정된 기동 파라미터가 적용된 충돌회피 모델은 긴급한 원격운항에서 충돌회피에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 연구에서는 단일 선박과 일부 시점이 아닌, 다수 선박의 다양한 환경에서의 선박 기동을 검증하여 모델을 보완하고자 한다.

REFERENCES

- [1] D.Rostek and M.Baldauf, "Technologies for Situational Awareness in Autonomous Shipping and their Impact on Maritime Training and Education," in *INTED2024 Proceedings*, pp.5105-5114, 2024.
- [2] S.Thombre, Z.Zhao, H.Ramm-Schmidt, J.M.V.Garcia, T.Malkamäki, S.Nikolskiy, S.Thombre, and V.V.Lehtola, "Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.23, No.1, pp.64-83, 2022.
- [3] B.Soyer, A.Tettenborn, and G.Leloudas, "Remote Controlled and Autonomous Shipping: UK Based Case Study," *Assuring Autonomy International Programme*, pp.1-47, 2022.
- [4] A.S.Madsen, A.Brandsæter, and M.V.Aarset, "Decision Transparency for Enhanced Human-machine Collaboration for Autonomous Ships," in *Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems*, pp.149-163, 2023.
- [5] M.Wahlström, J.Hakulinen, H.Karvonen, and I.Lindborg, "Human Factors Challenges in Unmanned Ship Operations—Insights from Other Domains," *Procedia Manufacturing*, Vol.3, pp.1038-1045, 2015.
- [6] R.Kari and M.Steinert, "Human Factor Issues in Remote Ship Operations: Lesson Learned by Studying Different Domains," *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.9, No.4, pp.1-17, 2021.
- [7] X.Li and K.F.Yuen, "A Human Factor Analysis of Remote-control Failure for Maritime Autonomous Surface Ships," *Journal of Risk Research*, pp.1-33, 2024.
- [8] Y.Zhou, Z.Liu, X.Wang, H.Xie, J.Tao, J.Wang, and Z.Yang, "Human Errors Analysis for Remotely Controlled Ships During Collision Avoidance," *Frontiers in Marine Science*, Vol.11, p.1473367, 2024.
- [9] H.-C.Burmeister, A.-R.Lee, J.Oeffner, S.Shetty, and L.Walther, *Mass Technology Development by Means of Ship Handling Simulation*, SINTEF Academic Press, 2019.
- [10] R.Bell and B.Kirtman, "Extreme Environmental Forcing on the Container Ship SS El Faro," *Journal of Operational Oceanography*, Vol.14, No.2, pp.1-16, 2019.
- [11] A.L.Zheleznyakova, "Physically-based Method for Real-time Modelling of Ship Motion in Irregular Waves," *Ocean Engineering*, vol.195, p.106686, 2020.
- [12] L.-F.Lu, K.Sasa, W.Sasaki, D.Terada, T.Kano, and T.Mizojiri, "Rough Wave Simulation and Validation Using Onboard Ship Motion Data in the Southern Hemisphere to Enhance Ship Weather Routing," *Ocean Engineering*, vol.144, pp.61-77, 2017.
- [13] T.I.Fossen, "A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol.15, no.09, pp.2717-2746, 2005.
- [14] Q.Jing, H.Shen, and Y.Yin, "A Stereolithographic Model-Based Dense Body Plan Generation Method to Construct a Ship Hydrodynamic Coefficients Database," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol.8, no.3, p.222, 2020.
- [15] G.Budak, "A Collision Avoidance System Based on COLREGs Rules for Autonomous Surface Vessels," *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, No.221, pp.75-85, 2022.
- [16] I.P.S.Asmara, E.Kobayashi, and T.Pitana, "Simulation of Collision Avoidance by Considering Potential Area of Water for Maneuvering based on MMG Model and AIS Data," in *International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, Vol.2, pp.243-250, 2013.
- [17] T.M.Hwang and I.H.Youn, "The Development of a Steering Angle Estimation Model for Evaluation of Simulated Ship Handling Training for Remote Operators of Autonomous Ships," *Applied Sciences*, Vol.13, No.21, p.11774, 2023.
- [18] J.Snape, J.Van Den Berg, S.J.Guy, and D.Manocha, "The Hybrid Reciprocal Velocity Obstacle," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.27, No.4, pp.696-706, 2011.
- [19] GitHub, "multi_agent_path_planning," [Online]. Available: https://github.com/atb033/multi_agent_path_planning, (Accessed: Jul. 4, 2024).

황 태 민(Taemin Hwang)

[정회원]



- 2023년 2월 : 목포해양대학교
해상운송시스템학과 (공학석사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 목포해양대
학교 해상운송시스템학과 박사과정

<관심분야>

자율운항선박, 원격운항자, 선박 조종

김 성 철(Sung-Cheol Kim)

[정회원]



- 2018년 2월 : 목포해양대학교
해상운송시스템학과 (공학박사)
- 2020년 3월 : 국립목포해양대학
교 승선교육과정부 교수

<관심분야>

해양안전, 항해, 선박 조종