

A Study on Dynamic Safety Navigation Envelopes Considering a Ship's Position Uncertainty

Pyo-Woong Son, Youngki Kim, Tae Hyun Fang, Kiyeol Seo[†]



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A Study on Dynamic Safety Navigation Envelopes Considering a Ship's Position Uncertainty

Pyo-Woong Son^{1,2}, Youngki Kim¹, Tae Hyun Fang¹, Kiyeol Seo^{1†}

¹Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Ship and Ocean Engineering Major, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

As technologies such as cameras, Laser Imaging, Detection, and Ranging (LiDAR), and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) become more sophisticated and common, their use in autonomous driving technologies is being explored in various fields. In the maritime area, technologies related to collision avoidance between ships are being developed to evaluate and avoid the risk of collision between ships by setting various scenarios. However, the position of each vessel used in the process of developing collision avoidance technology between vessels uses data obtained through GNSS, and may include a position error of 10 m or more depending on the situation. In this paper, a study on the dynamic safety navigation range including the positional inaccuracy of the ship is conducted. By combining the concept of the protection level obtained using GNSS raw data with a conventional safe navigation range, a safer navigation range can be calculated for dynamic navigation. The calculated range is verified using data obtained while sailing in an actual sea environment.

Keywords: autonomous navigation, collision-avoidance, safety navigation envelope, GNSS, horizontal protection level

1. INTRODUCTION

최근에는 Laser imaging, Detection and Ranging (LiDAR), 카메라, radar 등과 같은 센서와 신호처리 기술의 발전으로 인해 자율주행 기술이 급격히 발전하고 다양한 분야에서 활용되고 있다 (Rhee & Seo 2019). 이러한 기술들은 자동차 산업, 로봇 기술, 농업 및 산업용 드론 등에서 활발히 활용되고 있으며 해양 분야에서도 자율운항기술에 대한 연구를 촉진하고 있다. 특히, 선박 간의 충돌을 예방하기 위한 충돌 회피 알고리즘과 관련된 연구는 선박 운항의 안전성을 향상시키는 데에 매우 중요한 주제로 인식되고 있다 (Li & Zhang 2022).

선박은 동적인 환경에서 바람, 조류, 파도 등의 영향을 받기 때

문에 충돌을 피하기 위해서는 주의 깊은 운항이 필요하다. 1972년 국제해사기구 (IMO: International Maritime Organization)에서 발표된 Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs)은 선박 조우 상황에서 충돌을 예방하기 위한 규정으로, 이를 준수하기 위해 그동안 항해사들은 주의 깊은 운항과 충돌 회피를 위한 의사결정을 수행해왔다 (IMO 1972). 이러한 관례는 자율운항 기술에서도 활용되고 있으며, COLREGs를 모델로 삼아 충돌 회피 알고리즘이 개발되고 있다.

선박 간 충돌 회피와 관련된 선행 연구로는 대표적으로 Fiorini & Shiller (1998)이 제안한 회피해야 하는 장애물의 속도 정보를 기반으로 회피 영역을 형성하는 Velocity Obstacle (VO) 방법이 있다. Kuwata et al. (2014)는 VO 방법을 COLREGs에 적용하여 무인수상선박 (USV: Unmanned Surface Vehicle)을 이용한 실험을 수행했다. 또한 Kim et al. (2021)은 Distance to Closest Point of Approach (DCPA)와 Time to Closest Point of Approach (TCPA)를 활용하여 USV의 충돌 회피 방법을 제안하였고, Heiberg et al. (2022)은 심층 강화학습을 사용하여 위험 기반의 COLREGs 협약을 구현한 연구를 수행하였다.

그러나 위와 같은 연구들은 수집된 정보들에 대한 불확실성

Received May 19, 2023 Revised Jun 07, 2023 Accepted Jun 21, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: kyseo@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3684 Fax: +82-42-866-3609

Pyo-Woong Son <https://orcid.org/0000-0002-6834-9247>

Youngki Kim <https://orcid.org/0000-0003-1365-1147>

Tae Hyun Fang <https://orcid.org/0000-0001-7680-9875>

Kiyeol Seo <https://orcid.org/0000-0002-1462-6720>

을 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 Kluge & Prassler (2006)는 VO 기법에 장애물 속도 정보의 불확실성을 추가로 고려하는 Probabilistic Velocity Obstacles (PVO) 기법을 제안하였고, Park & Kim (2017)은 시간에 따라 변하는 선박 궤적의 불확실성을 고려하여 충돌 확률을 계산하는 방법을 제안했다. 또한 Cho & Kim (2017)은 타선의 기동 의도 불확실성을 고려한 확장 칼만필터를 사용하여 타선의 궤적을 예측하고 충돌 위험을 평가하는 방법을 연구했다.

추가적으로, 충돌 회피 알고리즘에 사용되는 정보 중 선박의 절대 위치정보의 불확실성도 고려해야 할 필요가 있다. 일반적으로 선박의 절대 위치정보는 Global Navigation Satellite System (GNSS)에 의존하고 있으며, GNSS는 수십 센티미터에서 수십 미터까지의 위치 오차를 포함한 불확실성을 가지고 있다. GNSS를 이용한 절대 위치정보의 불확실성은 실시간으로 Horizontal Protection Level (HPL)이라는 개념을 활용해 나타낼 수 있다. 좁은 구역에서 항해해야 하는 선박이나 소형 선박의 경우에는 절대 위치정보의 불확실성이 충돌 가능성 판단에 특히 큰 영향을 미칠 수 있다.

본 연구는 절대 위치정보의 불확실성을 고려한 선박의 동적 안전항해 범위 (DSNE: Dynamic Safety Navigation Envelope) 도출 방안을 제안한다. 이를 위해 선박의 고유 제원인 길이, 너비와 함께 동적 정보인 선속, 유속, 선수 방향 등을 고려하여 충돌 위험성이 있는 범위를 확률적으로 표현한다. 또한, 제안한 방안의 유효성을 확인하기 위해 실제 선박을 활용하여 항해 실험을 수행하고, 해당 결과를 해상 지도에 표현한다. 이 과정에서 GNSS 수신기의 사양에 따라 절대 위치정보의 불확실성의 크기가 변동될 수 있음을 확인한다. 2장에서는 절대 위치정보의 불확실성을 고려한 선박의 동적 안전항해 범위 도출 방법에 대해 상세히 설명하며, 3장에서는 실제 해상 실험을 통해 얻은 결과를 소개한다. 마지막으로 4장에서는 연구의 결론을 도출한다.

2. DYNAMIC SAFETY NAVIGATION ENVELOPE WITH POSITION UNCERTAINTY

2.1 Related Works

2017년 IMO의 Navigation, Communication, Search and Rescue Subcommittee에서 발표된 정보 문서에서 Maritime Vessel Protection Area (MVPA) 개념이 소개되었다 (IMO 2017). 이 정보 문서는 Positioning, Navigation, and Timing (PNT) 데이터와 무결성 정보의 조화로운 제공을 위한 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 하며, 전자해도 상에서 선박의 위치 및 방향 오차에 대한 불확실성을 표현하여 항해자가 보다 안전한 항해를 할 수 있도록 돕는 내용이 포함되어 있다. MVPA는 위치정보의 불확실성은 GNSS로부터 획득한 정보를 이용해 선박의 방향오차가 고려된 HPL을 도출하며, 선체의 외관 경계에 HPL 만큼의 범위를 더한 형태로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

Kijima & Furukawa (2003)과 Wang (2010)의 연구는 선박의 동적 환경을 고려한 안전항해 범위에 관한 대표적인 선행연구로,

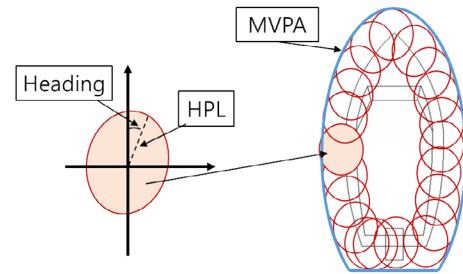


Fig. 1. Proposed MVPA in the IMO NCSR 4/INF.16/Rev.1. The black line on the right figure represents the contour of the vessel. The red circles indicate the positions generated by the Horizontal Protection Level (HPL) from the GNSS receiver. The MVPA (blue) is formed by connecting the outermost dots of all the red circles.

선박의 길이, 너비 등의 제원 정보와 선회전거, 선회전각과 같은 동적 환경 변수를 기반으로 충돌 위험 확률을 특정 범위로 표현하는 것을 목표로 한다. 또한 Zhou et al. (2020)은 Quaternion Ship Domain (QSD)를 기반으로 COLREGs 규정을 충족하는 동적 항해 안전 영역인 Dynamic Navigation Safety Domain (DNSD)를 제안하였다. 이 연구에서는 순간 속도, 선적 무게, 장애물 수, DCPA, 바람, 파도, 시계정도 등 동적 환경에서 선박이 안전한 영역의 크기에 영향을 미치는 변수를 설정하고, Pawlak (1982)의 rough set theory를 활용하여 5개의 주요한 파라미터를 추출하여 DNSD를 구성하였다.

2.2 Proposed Method

GNSS는 상공 20,000 km의 일정한 궤도를 따라 공전하는 인공위성에서 송출하는 항법신호를 이용한 항법시스템이다. 최소 4개 이상의 인공위성으로부터 신호를 수신할 수 있으면, 범 지구적인 관점에서 사용자는 자신의 위치와 시각을 계산할 수 있다. 만약 i 번째 위성($i=1,2,\dots,n$)과 사용자 간의 고도각과 방위각을 E_i 와 A_i 라고 한다면, 사용자와 위성 간의 기하학적 배치에 관한 행렬 G 는 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$G = \begin{pmatrix} -\cos E_1 \sin A_1 & -\cos E_1 \cos A_1 & -\sin E_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\cos E_n \sin A_n & -\cos E_n \cos A_n & -\sin E_n & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

위성으로부터 수신한 항법신호를 처리하면 각 위성 and 사용자 간의 의사거리를 추정할 수 있는데, 의사거리 추정값은 위성항법 신호의 전파과정에서 발생하는 다양한 오차를 포함하고 있다. i 번째 위성의 항법신호에서 추정된 의사거리의 모든 오차 요소들의 분산 합을 σ_i^2 라고 하면, 의사거리의 가중치 행렬 W 는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$W = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_n^2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

그러면, G 와 W 를 이용하여 식 (3)과 같이 공분산 행렬 C 를 생성할 수 있고, 식 (4)와 같이 HPL을 계산할 수 있다.

$$C = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \quad (3)$$

$$HPL = k \sqrt{\frac{C(1,1) + C(2,2)}{2} + \sqrt{\frac{C(1,1) - C(2,2)}{2} + C(2,1)^2}} \quad (4)$$

여기서 k 는 수평보호수준이 보장하고자 하는 범위를 정하는데 사용되는 계수로, 사용자 요구조건의 무결성 관련 지표에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 IMO A.915(22)의 요구조건에 따른 6.121를 사용하였다.

HPL은 매 순간 위성의 위치와 시선 벡터, 그리고 의사거리의 분산을 통해 계산할 수 있으며, 항해 과정에서 충돌 가능 범위와 연관이 있을 수 있는 동적 환경변수인 선속 (SOG: speed over ground), 선수방향 (heading), 유속 (current speed) 또한 실시간으로 주어진다고 가정하면, 식 (5), (6)과 같이 동적 안전항해 범위를 표현하는 데 필요한 파라미터 R_{long} 과 R_{trans} 를 정의할 수 있다.

$$R_{long} = L + (1 + s(t)) \sqrt{AD(t)^2 + \left(\frac{TD(t)}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$$R_{trans} = B + (1 + c(t))TD(t) \quad (6)$$

여기서 L 은 선박의 가로 길이, B 는 선박의 세로 길이, AD 는 선 회중거 (advanced diameter), 그리고 TD 는 선회경 (tactical diameter)를 의미한다. 또한 $s(t)$, $c(t)$ 는 임의의 시간 t 에 대한 동적 환경변수의 불확실성을 각각 장축, 단축 방향으로 나타낸 함수이며 식 (7), (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$s(t) = \sin \theta \times (HPL + \sigma_{Heading} + \sigma_{Current}) \quad (7)$$

$$c(t) = \cos \theta \times (HPL + \sigma_{Heading} + \sigma_{Current}) \quad (8)$$

여기서 θ 는 진북방향과 선수방향 사이의 각도를 의미하며 $\sigma_{Heading}$, $\sigma_{Current}$ 는 각각 θ 와 유속 정보의 불확실성을 의미한다.

AD 와 TD 에 대해서는 식 (9)와 (10) 같이 유속과 선속의 수직방향 성분 합을 m/s 단위로 변환한 값에 10을 곱한 것을 AD 로, 유속과 선속의 수평방향 성분 합을 m/s 단위로 변환한 값에 10을 곱한 것을 TD 로 설정하였다. IMO MSC/Circ.1053의 규제에 따라 선박의 길이에 따른 AD 와 TD 의 상한이 설정되어 있기 때문에 본 연구에서의 AD 와 TD 또한 이에 맞추어 상한을 설정하였다 (IMO 2002).

$$AD(t) = \min(10 \times (v(t)_{h,vessel} + v(t)_{h,current}), 4.5L) \quad (9)$$

$$TD(t) = \min(10 \times (v(t)_{v,vessel} + v(t)_{v,current}), 5L) \quad (10)$$

여기서 $v(t)_{h,vessel}$, $v(t)_{h,current}$ 는 각각 선속과 유속의 수평방향 크기를 의미하고, $v(t)_{v,vessel}$, $v(t)_{v,current}$ 는 각각 선속과 유속의 수직방향 크기를 의미한다.

최종적으로 동적 안전항해 범위는 식 (5), (6)을 이용하여 선수

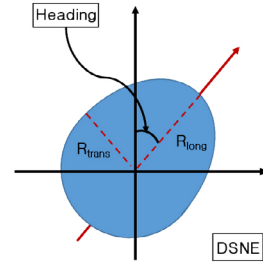


Fig. 2. Concept of DSNE based on the R_{long} , R_{trans} , and heading.

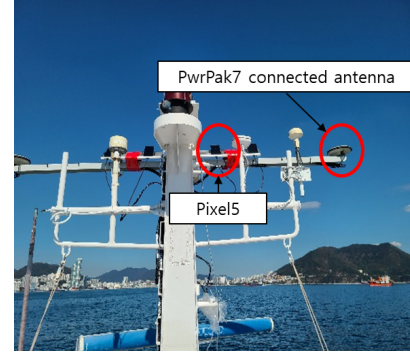


Fig. 3. Antenna installation at the bridge of Jangmok 2-ho for the experiment.

방향을 장축으로 하고 길이가 R_{long} , 선수방향과 수직이 되는 방향을 단축으로 하고 길이가 R_{trans} 인 반타원과 반지름이 R_{trans} 인 반원의 결합으로 이루어지며 이를 개념도로 나타내면 Fig. 2와 같다. 일반적으로 선박이 선수방향으로 움직임을 갖기 때문에 선수 방향 쪽의 동적 안전항해 범위가 보다 넓게 형성된다.

3. FIELD EXPERIMENT AND RESULTS

2022년 10월 27일 오전 9시부터 오후 2시 30분까지, 한국해양과학기술원에서 운항하는 장목2호를 활용하여 동적 안전항해 범위 생성을 위한 실험을 수행하였다. 실험은 거제시의 장목항에서 출발하여 부산광역시 남항대교 인근을 왕복하는 구간에서 이루어졌고, 장목2호는 길이가 24 m이고 선평이 4.8 m인 선박으로, 최대 16노트의 속도를 낼 수 있다. 실험에서는 GNSS 수신기인 Novatel 사의 PwrPak7과 Google 사의 Pixel5를 사용하여 절대 위치정보의 불확실성을 도출하기 위해 Fig. 3과 같이 선교의 안테나나 파크에 설치하였다. PwrPak7은 TerraStar 서비스를 이용하여 센티미터 수준의 정확도로 절대위치를 제공하며, Pixel5는 약 10 m 수준의 정확도로 절대위치를 제공하는 것으로 알려져 있다. 대형 선박에 사용되는 고가의 GNSS 수신장비 (PwrPak7 수신기 및 안테나)와 소형 선박에 사용되는 상대적으로 저렴한 GNSS 수신기인 Pixel5의 절대 위치정보의 불확실성이 다를 수 있음을 확인하고자 하였다.

두 수신기에서 제공하는 측정치의 불확실성에 관한 정보가 다르기 때문에 수신기마다 식 (2)의 입력변수인 σ_i 를 다르

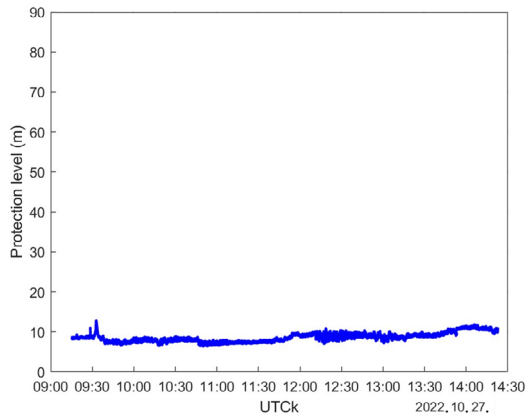


Fig. 4. HPL results using the measurement from PwrPak7 during the experiment time.

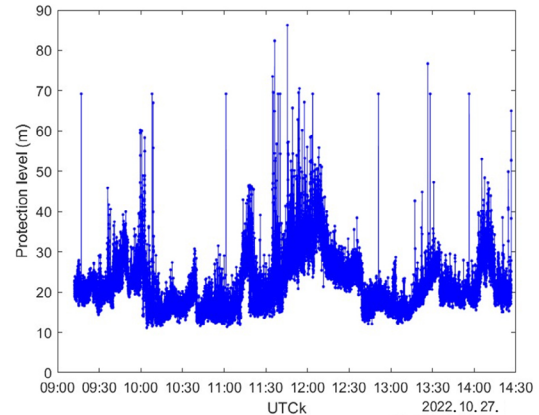


Fig. 5. HPL results using the measurement from Pixel5 during the experiment time.

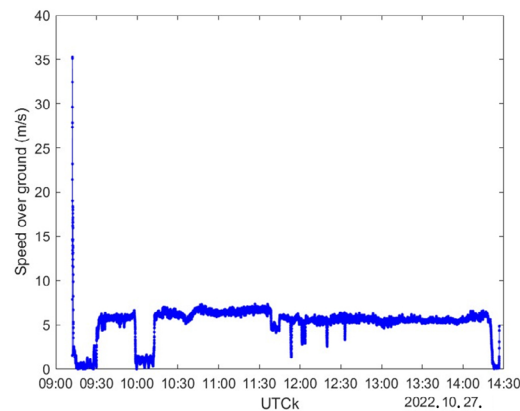


Fig. 6. Speed over ground results during the experiment time.

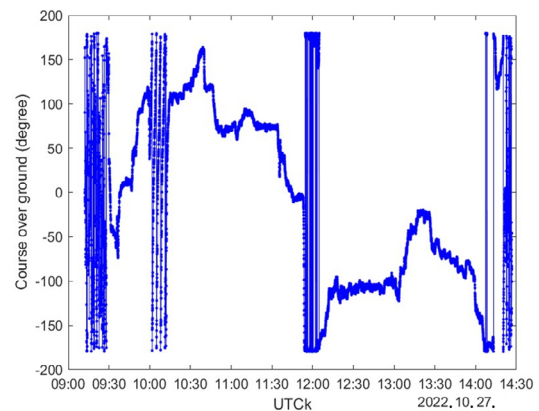


Fig. 7. Heading results during the experiment time.

게 정의해야 한다. 일반적으로 σ_i 를 정의할 때 외부 보강시스템으로부터의 정보를 활용하기도 하지만, 모든 스마트기기에서 해당 정보를 수신할 수 있는 것은 아니기 때문에 제외하였다. Pixel5의 측정치 잡음의 경우 Android development에서 제공하는 TimeUncertaintyNanos, BiasUncertaintyNanos, ReceivedSvTimeUncertaintyNanos 정보를 m 단위로 환산한 값과 다중경로 및 열잡음의 분산을 더해 식 (11)과 같이 정의하였다. 다중경로 및 열잡음 분산의 크기는 경험적으로 1m로 설정하였다.

$$\sigma_{i, \text{Pixel5}}^2 = \text{TimeUncertaintyNanos (m)}^2 + \text{BiasUncertaintyNanos (m)}^2 + \text{ReceivedSvTimeUncertaintyNanos (m)}^2 + 1^2 \quad (11)$$

PwrPak7에서는 반송파 신호를 활용한 매우 정밀한 측정치 잡음값이 제공된다. 하지만 본 연구에서는 Pixel5와의 공정한 비교를 위해 정밀한 사용자 위치를 기반으로 코드측정치의 의사거리 잔차인 User Equivalent Range Error (UERE)를 계산하고, 이를 기반으로 식 (12)와 같이 정의하였다.

$$\sigma_{i, \text{PwrPak7}}^2 = \sigma_{\text{UERE}}^2 \quad (12)$$

식 (11)과 (12)를 활용해서 각 수신기 데이터로부터 HPL을 도

출한 결과, Figs. 4, 5와 같이 모든 시간대에서 PwrPak7을 사용한 HPL이 Pixel5를 사용한 HPL보다 작음을 확인할 수 있다. 위치 계산에 사용한 위성 군의 종류와 위성 수가 거의 비슷함에도 불구하고 수신장비의 성능과 측정치 잡음 모델링에 따라 HPL 결과가 상이할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 정확한 GNSS 위치정보를 사용할수록 동적 안전항해 범위의 경계선이 좁아질 수 있다는 것을 의미한다.

Figs. 6과 7에서는 각각 실험하는 동안 선박의 속도와 선수방향 측정치를 나타낸다. 이는 PwrPak7가 제공하는 절대 위치 정보와 Pixel5가 제공하는 관성 센서의 정보를 약결합 기반의 칼만 필터를 사용하여 추정하였다.

마지막으로 유속 정보는 국립해양조사원에서 제공하는 바다누리 해양정보서비스를 활용하였다. 바다누리 해양정보서비스는 우리나라의 해양관측소, 해양관측부이, 해양과학기지 등 다양한 관측시설을 통해 얻어진 정보를 국민에게 공개하고 있고, 본 실험에서는 부산항에 설치된 해양관측부이로부터 측정된 1시간 간격의 유속정보를 활용하였다.

최종적으로 Pixel5를 이용해 동적 안전항해 범위를 도출하고 스마트기기 상의 전자해도에 적용한 결과는 Fig. 8과 같다. 본 연구에서의 결과물을 일반 사용자가 활용할 수 있는 가능성을 모색해보고자 안드로이드 스마트기기 상에서 실시간으로 데이터

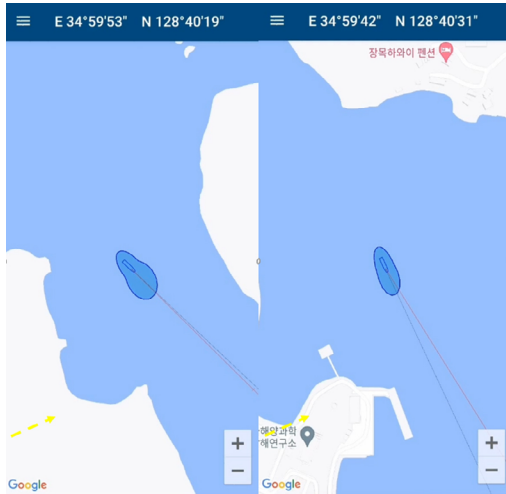


Fig. 8. Visualization of DSNE in electronic nautical chart.

를 수집하고 처리하여 표출하는 프로그램을 개발하였고 이를 활용하여 나타낸 것이다. 얇고 긴 모양의 검정색 심볼이 선박을 나타내고 파란색 경계와 면으로 이루어진 것이 동적 안전항해 범위이다. 동적 환경변수의 불확성이 변하면서 동적 안전항해 범위가 다양하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 선박의 전장, 선폭, 선속, 선수방향, HPL, 유속 등과 같은 선박의 동적 환경변수를 고려한 동적 안전항해 범위를 도출할 수 있는 방안을 제시하고 실제 해상실험을 통해 얻어진 데이터를 이용해 동적 안전항해 범위를 구현하였다. 한국해양과학기술원의 장목2호에 두 가지 GNSS 수신기를 설치하여 수신한 데이터를 이용해 HPL, 선속, 선수방향 정보를 계산하였고, 국립해양조사원에서 제공하는 서비스를 이용해 유속 정보를 사용할 수 있었다. 최종적으로 제한한 동적 안전항해 범위를 실제 전자해도 상에 구현함으로써 항해자가 안전하게 항해하는데 활용할 수 있도록 시각화 하였고, 본 연구 결과물이 실제 현장에서 적용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 국가연구개발사업인 “지상과 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발”에 의해 수행되었습니다 (1525012261).

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “스마트기기 기반 해상교통 안전용 측위·항법 핵심기술 개발”에 의해 수행되었습니다 (PES4440).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, P.-W. Son; methodology, P.-W.

Son, Y. Kim; writing-original draft preparation, P.-W. Son, visualization, P.-W. Son and Y. Kim, writing-review and editing, K. Seo and T. H. Fang, project administration, K. Seo and T. H. Fang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cho, Y. & Kim, J. 2017, Collision probability assessment between surface ships considering maneuver intentions, in OCEANS 2017 – Aberdeen, UK, 19-22 June 2017. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084791>
- Fiorini, P. & Shiller, Z. 1998, Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles, *The International Journal of Robotics Research*, 17, 760-772. <https://doi.org/10.1177/027836499801700706>
- Heiberg, A., Larsen, T. N., Meyer, E., Rasheed, A., San, O., et al. 2022, Risk-based implementation of COLREGs for autonomous surface vehicles using deep reinforcement learning, *Neural Networks*, 152, 17-33. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.04.008>
- International Maritime Organization 1972, Convention on the international regulations for preventing collisions at sea (COLREGs), [Internet], cited 2023 May 15, available from: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/COLREG.aspx>
- International Maritime Organization 2017, Report on EGNOS application as effective augmentation system for marine positioning in inland and pilot navigation, NCSR 4/INF.16/Rev.2. [Internet], cited 2023 May 15, available from: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=101810>
- International Maritime Organization 2002, Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability, MSC/Circ. 1053. [Internet], cited 2023 May 15, available from: <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1053.pdf>
- Kijima, K. & Furukawa, Y. 2003, Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area, *IFAC Proceedings Volumes*, 36, 223-228, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37811-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37811-4)
- Kim, H. G., Yun, S. J., Choi, Y. H., Ryu, J. K., & Suh, J. H. 2021, Collision avoidance algorithm based on COLREGs for unmanned surface vehicle, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 863. <https://doi.org/10.3390/>

jmse9080863

- Kluge, B. & Prassler, E. 2006, Recursive probabilistic velocity obstacles for reflective navigation, vol.24, Field and Service Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics, eds. Yuta, S., Asama, H., Prassler, E., Tsubouchi, T., & Thrun, S. (Berlin: Springer), pp.71-79. https://doi.org/10.1007/10991459_8
- Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. 2014, Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 39, 110-119, <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2254214>
- Li, Y. & Zhang, H. 2022, Collision avoidance decision method for unmanned surface vehicle based on an improved velocity obstacle algorithm, Journal of Marine Science and Engineering, 10, 1047. <https://doi.org/10.3390/jmse10081047>
- Park, J. & Kim, J. 2017, Predictive evaluation of ship collision risk using the concept of probability flow, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 42, 836-845. <http://doi.org/10.1109/JOE.2016.2614870>
- Pawlak, Z. 1982, Rough sets, International Journal of Computer and Information Sciences, 11, 341-356. <https://doi.org/10.1007/BF01001956>
- Rhee, J. H. & Seo, J. 2019, Low-cost curb detection and localization system using multiple ultrasonic sensors, Sensors, 19, 1389. <https://doi.org/10.3390/s19061389>
- Wang, N. 2010, An intelligent spatial collision risk based on the quaternion ship domain, The Journal of Navigation, 63, 733-749. <https://doi.org/10.1017/S0373463310000202>
- Zhou, J., Wang, C., & Zhang, A. 2020, A COLREGs-based dynamic navigation safety domain for unmanned surface vehicles: A case study of Dolphin-I, Journal of Marine Science and Engineering, 8, 264. <https://doi.org/10.3390/jmse8040264>



Pyo-Woong Son received his B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2012, and his Ph.D. in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea. He is currently a senior researcher with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO) and an assistant professor with University of Science and Technology (UST), Daejeon, South Korea. His research interests include complementary positioning, navigation, and timing systems, including eLoran. Dr. Son was a recipient of the Graduate Fellowship

from the Information and Communications Technology (ICT) Consilience Creative Program supported by the Ministry of Science and ICT, South Korea.



Youngki Kim received his B.S. and M.S. degrees from Mokpo National Maritime University, Republic of Korea. He is a research engineer at Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). His research interests include PNT Integrity Technology and resilient PNT systems for safety navigation.



Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States. Since 2005, he has been with Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.



Kiyeol Seo is currently a principal researcher with the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received his Ph.D. degree in maritime information measurement engineering from the Mokpo National Maritime University, Republic of Korea, in 2003. He has been involved in the development of integrated R-Mode navigation system. His research interests include resilient PNT system and integrity monitoring, GNSS reflectometry (GNSS-R), and precise positioning technology for maritime applications.