



**국제해상충돌예방규칙을 고려한 확률적 속도 장애물 기반의 선박 충돌회피 알고리즘**  
Automatic Ship Collision Avoidance Algorithm based on Probabilistic Velocity Obstacle with  
Consideration of COLREGs

---

저자 (Authors)	조용훈, 한정욱, 김진환, 이필엽 Yonghoon Cho, Jungwook Han, Jinwhan Kim, Philyeob Lee
출처 (Source)	<a href="#">대한조선학회 논문집 56(1)</a> , 2019.2, 75-81(7 pages) <a href="#">Journal of the Society of Naval Architects of Korea 56(1)</a> , 2019.2, 75-81(7 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">대한조선학회</a> The Society of Naval Architects of Korea
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610885">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610885</a>
APA Style	조용훈, 한정욱, 김진환, 이필엽 (2019). 국제해상충돌예방규칙을 고려한 확률적 속도 장애물 기반의 선박 충돌회피 알고리즘. 대한조선학회 논문집, 56(1), 75-81
이용정보 (Accessed)	누리미디어 121.125.221.*** 2019/07/18 13:58 (KST)

---

**저작권 안내**

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

**Copyright Information**

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 국제해상충돌예방규칙을 고려한 확률적 속도 장애물 기반의 선박 충돌회피 알고리즘

조용훈<sup>1</sup>·한정욱<sup>1</sup>·김진환<sup>1,†</sup>·이필엽<sup>2</sup>  
카이스트 기계공학과<sup>1</sup>  
한화시스템 해양연구소<sup>2</sup>

## Automatic Ship Collision Avoidance Algorithm based on Probabilistic Velocity Obstacle with Consideration of COLREGs

Yonghoon Cho<sup>1</sup>·Jungwook Han<sup>1</sup>·Jinwhan Kim<sup>1,†</sup>·Philyeob Lee<sup>2</sup>  
Mechanical engineering, KAIST<sup>1</sup>  
Naval R&D Center, Hanwha Systems Co., Ltd.<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study presents an automatic collision avoidance algorithm for autonomous navigation of unmanned surface vessels. The performance of the collision avoidance algorithm is heavily dependent on the estimation quality of the course and speed of traffic ships because collision avoidance maneuvers should be determined based on the predicted motions of the traffic ships and their trajectory uncertainties. In this study, the collision avoidance algorithm is implemented based on the Probabilistic Velocity Obstacle (PVO) approach considering the maritime collision regulations (COLREGs). In order to demonstrate the performance of the proposed algorithm, an extensive set of simulations was conducted and the results are discussed.

**Keywords :** Automatic collision avoidance(자동 충돌회피), COLREGs(국제해상충돌예방규칙), Probabilistic velocity obstacle(확률적 속도 장애물)

## 1. 서론

최근 인공지능 기술의 발전과 함께 다양한 분야에서 무인화에 대한 개발 및 관심이 집중되고 있다. 특히, 감시·정찰 및 해양환경 모니터링과 같은 작업 피로도가 높고 위험한 해상 임무의 안전성과 작업 효율을 높이기 위하여 기존 유인 선박의 무인화를 위한 기술 개발의 필요성이 증대되고 있다. 선박의 무인화를 위해서는 원거리 통신기술 및 레이더(radar), AIS(Automatic Identification System)를 포함하는 운항보조장비의 하드웨어(hardware) 기술뿐만 아니라, 선박의 무인 운항 시 안전과 직결된 상황 인지/인식 기술과 인지/인식 기술을 바탕으로 한 경로 생성(path planning) 및 유도(guidance) 알고리즘과 같은 소프트웨어(software) 기술의 개발이 요구된다(Park et al., 2017).

특히, 해상에서의 선박 충돌사고는 사회적, 경제적 손실이 큰 주요 해양사고로서 그 위험을 미리 파악하고 회피하는 것이 중요한데

이를 위해 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서는 국제해상충돌예방규칙(COLREGs: international regulation for preventing collisions at sea)을 통해 해상에서 조우하는 두 선박이 충돌회피를 위해 따라야 하는 일련의 절차를 제시하고 있다(International Maritime Organization, 1972). 자율 충돌회피 알고리즘의 구현에 있어서도 COLREGs 준수를 제약조건으로 하는 경로생성 방법에 대한 다양한 연구가 이루어진 바 있는데 관련된 연구로, Lee et al. (2004)은 퍼지 이론(fuzzy logic) 기반의 개선된 가상 힘 장(MVFF: Modified Virtual Force Field)을 활용하여 COLREGs를 고려한 경로생성 방법을 제안하였으며, Campbell et al. (2012)은 그래프 탐색 기반의 A\*를 활용한 방법을 제안하였다. Naeem et al. (2012)은 방향 우선 순차적 선택(DPSS: Direction Priority Sequential Selection)을 활용한 경로생성 방법을 이용하였다. 하지만, 위의 연구에서 제안하는 방법들은 조우한 두 선박 간의 충돌회피를 목표로 하며 2척 이상의 타선을 동시에 조우하는 경우 적용이 쉽지 않다는 한계를 가진다.

침로와 속력을 동시에 제공하는 항로 계획(route planning) 기반의 방법의 경우 Mitrofanov (1968)은 운항자의 운항보조수단으로써 충돌방지 표시기(ACI: Anti-collision Indicator)를 개발하였으며, Degre and Lefevre (1981)은 운항 공간(room to maneuver)으로 정의된 기법을 설계하고 해당 기법을 활용한 속력 및 침로 유도기법을 소개하였다. 이는 이후 이동로봇에 속력과 침로 기반의 유도기법을 속도좌표계의 장애물로 변환한 속도 장애물(VO: Velocity Obstacle) 이론으로 정리되었으며(Fiorini & Shiller, 1998), Kuwata et al. (2014)은 속도 장애물 이론을 불확실 속도 장애물(WVO: velocity obstacle with the worst-case uncertainty)로 발전시키고 COLREGs를 적용한 알고리즘을 무인선 실험을 통하여 검증하였다.

속도 장애물 이론 기반 충돌회피의 경우 다수 선박이 존재하는 상황에서 정지하거나 움직이는 장애물을 동시에 회피할 수 있다는 장점과 함께 운동체의 속력과 침로를 함께 해로 제공한다는 장점이 있으나, 레이더와 카메라를 포함하는 항해보조장비에서 추정되는 타선 운동정보의 불확실성을 반영하기 어렵다는 단점을 갖고 있다. 이를 보완하기 위해 이동로봇에서 장애물의 위치 및 속도 불확실성을 반영하여 확장한 확률적 속도 장애물(PVO: Probabilistic Velocity Obstacle)이 소개된 바 있다(Kluger & Prassler, 2003). 확률적 속도 장애물은 기존의 속도 장애물 방법에 비하여 충돌확률을 계산하기 위한 계산시간이 추가적으로 소모되는 단점이 존재하나, 하드웨어 및 계산 소프트웨어의 발달로 인해 빠른 계산이 가능해지고 있다.

본 논문에서는 타선 속도의 불확실성을 직교좌표계에서의 정규 분포(Gaussian distribution)로 가정하였을 때, 충돌확률 기반의 확률적 속도 장애물을 소개한다. 관련 선행연구로서 특정 시점에서의 선박 간의 위치 정보에 기반한 순간 충돌확률(instantaneous collision probability)을 계산하고 이를 충돌 위험도 예측과 충돌회피에 활용하는 연구와(Park et al., 2016; Park & Kim, 2017), 이를 타선의 조선 의도(manuever intention)를 추정하는데 활용한 연구가 진행된 있다(Cho & Kim, 2017). 본 연구에서는 기존 논문의 내용을 확장하여 미래에 불특정 시간에 발생하는 충돌 확률 특성을 고려하고 속도 좌표계에서 충돌확률을 계산함으로써 보다 실제적이고 효율적으로 충돌 회피 경로를 계산하는 방법을 소개한다.

## 2. 충돌확률 계산 알고리즘

### 2.1 문제 정의

본 논문에서 선박간의 충돌이란, 조우하는 선박의 원형 충돌 구역(circular collision zone) 내에 타 선박이 존재하는 경우로 정의하며(Park & Kim, 2017), 조우하는 선박의 운동 상태가 지속되었을 때 현재 시점부터 충돌이 일어날 확률을 충돌확률로써 정의한다. 함수 PVO는 현재 운동 상태를 기점으로 자신이 목표한 속력 및 침로로 운동 시에 충돌이 발생할 확률을 의미하며, 자신을 아랫첨자 O로 타선을 아랫첨자 T로 표기 시 자신에 대한 타

선의 함수 PVO<sub>OT</sub>는 식 (1)과 같다(Kluger & Prassler, 2003).

$$PVO_{OT} : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

여기서  $\mathbb{R}^2$ 는 자신의 속도 좌표계를 기준으로 하는 정의역(domain)을 나타내며, PVO<sub>OT</sub>는 자신기준 타선에 대한 충돌확률을 의미한다. 일반적으로 타선의 위치 불확실성은 회피 반경을 통해 알고리즘에 쉽게 반영이 가능하나 타선의 속력 및 침로 불확실성은 충돌회피 알고리즘에 미치는 영향은 크나 반영이 어렵다. 또한, 레이더를 통해 얻어지는 타선의 위치는 센서로부터 직접적으로 계속이 가능하지만 속력 및 침로는 계속된 위치로부터 간접적으로 추정되는 정보이다. 타선의 속도 계속치는 위치 계속치에 비하여 불확실성이 크다는 가정하에, PVO<sub>OT</sub>는 속도 불확실성을 충돌구역으로 적분한 식 (2)와 같다.

$$PVO_{OT} = \int_{CC} f_{V_T}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \quad (2)$$

여기서 CC는 속도 좌표계에서의 충돌구역(collision cone)을 의미하며 속도 좌표계에서의 충돌구역은 속도 장애물 이론을 이용하여 계산 가능하다(Fiorini & Shiller, 1998).  $f_{V_T}(\mathbf{v})$ 는 타선 속도의 확률밀도함수(PDF: Probabilistic Density Function)를  $V_T$ 는 타선의 절대 속도 좌표계 기준 확률 변수를 의미한다. PVO<sub>O</sub>는 현재 운동 상태에서 이후 속력 및 침로로 운동 시에 자신의 충돌 확률을 의미하며, 다수의 조우 선박 존재 시 자신의 PVO<sub>O</sub>는 식 (3)과 같다(Kluger & Prassler, 2003).

$$PVO_O = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - PVO_{OT_i}) \quad (3)$$

여기서 PVO<sub>OT<sub>i</sub></sub>는 i번째 타선의 충돌확률을 의미하며, n은 조우하는 전체 타선의 수를 의미한다.

### 2.2 PVO 계산 방법

식 (2)의 자신 목표 침로 및 속력에 따른 충돌확률을 계산하기 위해서, 자신 속도에 대한 타선의 속도좌표계에서의 collision cone기반 충돌구역을 구해야 한다. 속도좌표계에서의 충돌구역은 속도 장애물 이론을 이용하여 계산이 가능하며, 이를 Fig. 1에 도시하였다(Fiorini & Shiller, 1998). Fig.1에서 적색 collision cone은 자신의 속도가  $v_{O1}$  일 때의 속도좌표계에서의 충돌구역이며, 청색 collision cone은 자신의 속도가  $v_{O2}$  일 때의 속도좌표계에서의 충돌구역이다.

또한, 식 (2)의 속도분포  $f_{V_T}(\mathbf{v})$ 를 이변량 정규 분포(bivariate Gaussian distribution)  $V_T \sim \mathcal{M}(V_T, \Sigma_T)$ 로 가정한다면, 식 (2)의 속도 확률 분포  $f_{V_T}(\mathbf{v})$ 를 식 (4)로 작성할 수 있다.

$$f_{V_T}(\mathbf{v}) = \frac{\exp(-1/2(\mathbf{v} - \mathbf{v}_T)^T \Sigma_T^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_T))}{2\pi \sqrt{|\Sigma_T|}} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{v}_T = [v_{Tx}, v_{Ty}]^T$ 는 타선의 평균 속도를 의미하며,  $v_{Tx}$ 와  $v_{Ty}$ 는 각각 직교좌표계에서의 x와 y방향 속도이다.  $\Sigma_T$ 는 확률 변수  $\mathbf{v}_T$ 의 정규 분포에서의 공분산을 의미한다.

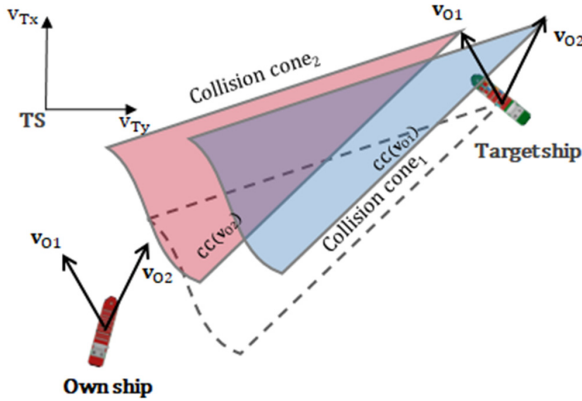


Fig. 1 Graphical representation of the classical velocity obstacle in the coordinates of the target ship

일반적인 이변량 정규 분포의 적분 계산의 경우, 적분구역 또는 공분산의 특이 경우를 제외 하고는 해석해(analytic solution)가 존재하지 않으므로, 이 경우에는 미소면적의 확률 합인 구분구적법을 활용한 계산이 필요하다. 그러나 구분구적법 기반의 적분은 미소면적의 크기에 따라 계산 성능이 크게 변하며 계산시간이 오래 걸린다는 단점이 존재한다.

위와 같은 단점을 극복하기 위하여, Genz and Bretz (2009)은삼변량과 이변량 정규 분포의 수치해석적(numerical) 근사방법을 활용한 다양한 형태의 적분구간에서의 적분 해를 제시하였다. 정규 분포 적분의 근사해 사용을 위해 Fig. 1와 같은 두 번의 어파인변환(affine transform)을 적용하였으며(Cho et al., 2018), 각 어파인변환은 선형변환(linear transformation)과 평행이동(linear translation)의 합성으로 구성되어 있다.

두 번의 어파인변환 중, 첫 번째 어파인변환은 삼각형의 적분구간을 사각형 형태의 근사가 가능한 형태로 변환하며, 정규 분포를 평균이 0인 정규 분포로 만들기 위하여 속도 분포의 평균을 0으로 이동시키는 평행이동을 실시한다. 첫 번째 적용된 어파인

변환을 나타내면 식 (5)와 같다.

$$A' = \frac{1}{\sin(\theta_r - \theta_l)} \begin{bmatrix} \sin\theta_l & -\cos\theta_l \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{b}' = \frac{1}{\sin(\theta_r - \theta_l)} \begin{bmatrix} -v_{Tx}\sin\theta_l + v_{Ty}\cos\theta_l \\ v_{Tx}\sin\theta_r - v_{Ty}\cos\theta_r \end{bmatrix}$$

여기서  $A'$ 는 선형변환을 의미하며,  $\mathbf{b}'$ 는 평행이동을 의미한다.  $\theta$ 와  $\theta_r$ 는 각각 삼각형 형태 적분구간의 꼭지점에서 선분의 방향을 의미한다. 첫 번째 어파인변환 후 확률 변수를  $\mathbf{v}'_T$ 이라고 할 때,  $\mathbf{v}'_T \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma')$ 를 따르며, 공분산  $\Sigma'$ 는  $A'\Sigma_T A'^T$ 이다. 어파인변환 후 사각형 형태의 적분구간의 꼭지점  $\mathbf{v}'_0$ 는  $A'\mathbf{v}_0 + \mathbf{b}'$ 와 같다.

두 번째 어파인변환은 정규 분포를 표준 정규 분포로 변환하기 위해 수행되며, 선형변환만 이뤄진다. 두 번째 어파인변환을 식으로 나타내면, 아래의 식 (6)과 같다.

$$A'' = \sqrt{\{\text{diag}(\Sigma'_T)\}^{-1}} \quad (6)$$

여기서  $\text{diag}()$ 은 매트릭스의 대각 행렬을 의미하며,  $\Sigma''$ 는  $A''\Sigma'\{A''\}^T$ 이다. 두 번째 변환 후, 확률 변수는  $\mathbf{v}''_T \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma'')$ 를 따르며  $\Sigma''$ 의 대각성분은 1이 된다. 최종적으로 얻어지는  $PVO_{OT}$ 는 식 (7)과 같다.

$$PVO_{OT} = \int_{CC''} \frac{\exp(-1/2\mathbf{v}^T\{\Sigma''\}^{-1}\mathbf{v})}{2\pi\sqrt{\Sigma''}} d\mathbf{v} \quad (7)$$

단일  $PVO_0$  계산 알고리즘의 정확도 및 계산 속도는 저자의 선행 연구에서 소개된 바 있으며(Cho et al., 2018), 선행 연구를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 통해 얻어지는  $PVO_0$ 맵은 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

Fig. 3은 자선이 한 척의 타 선박과 조우하는 상황에서의 결과를 도시하며, Fig. 4는 자선이 두 척의 타 선박과 동시에 조우하는 상황에서의 결과를 도시한다. 각 그림에서 왼쪽은 각 선박의 위치를 나타내며, 청색은 자선을 적색은 타선을 의미한다. 각 그

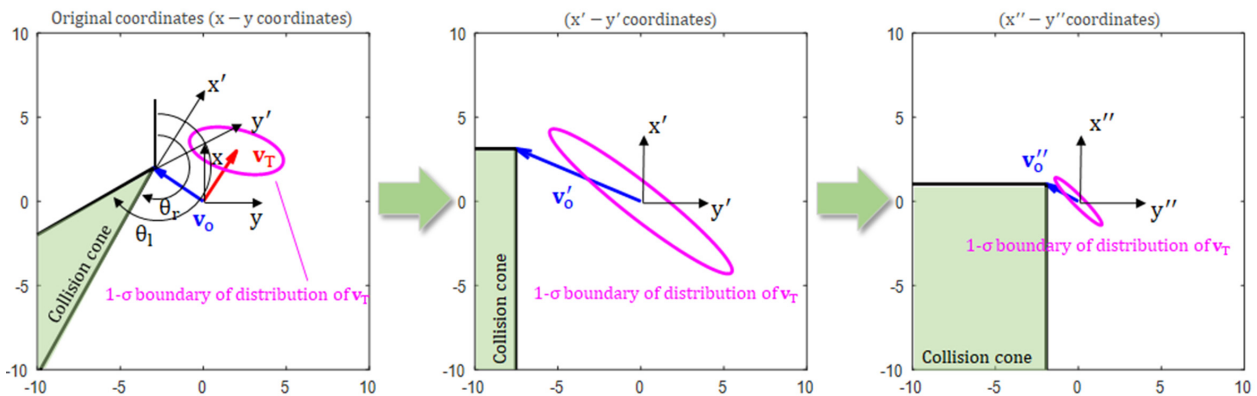


Fig. 2 Example of the coordinate transformation by using the affine transformation

림에서 우측 그림을 통하여 자선 기준 목표 침로 및 속도에 대한 PVO<sub>0</sub> 결과 값을 확인 가능하다.

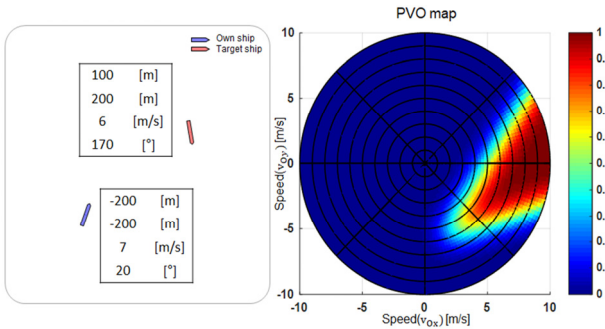


Fig. 3 Map of the probability velocity obstacle when single vessel approaches

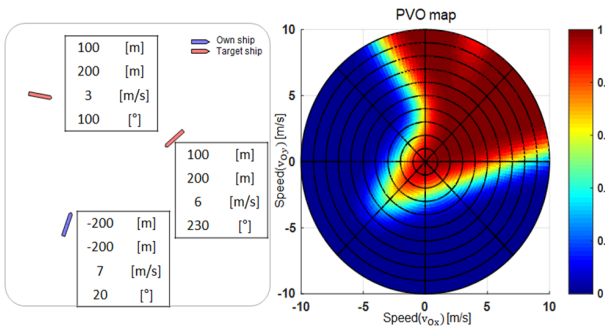


Fig. 4 Map of the probability velocity obstacle with multiple approaching vessels

### 3. 충돌회피 알고리즘

#### 3.1 충돌회피 비용함수 선정

선박 충돌회피를 위해서는 2장에서 제시한 PVO<sub>0</sub>를 포함하여 충돌 회피 시 고려되어야 할 요인들을 비용함수로 설계하여 최적 해를 찾아야 한다. 선박 조우상황에서 타선 회피 시 고려되어야 하는 우선적 요인으로는 다음 경유점(waypoint) 및 COLREGs가 있다. 해당 사항을 고려한 비용함수(cost function)는 식 (8)과 같다.

$$J = PVO_0 + p + \alpha |v_0 - v_{WP}| + \beta |\psi_0 - \psi_{WP}| \quad (8)$$

여기서  $J$ 는 각 침로 및 선속에 대한 비용(cost)을 의미하며, PVO<sub>0</sub>는 식 (3)과 식 (7)을 통해 계산되는 값을,  $p$ 는 COLREGs 미준수 침로 및 속력에 대한 비용을 의미한다. 또한,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 경유점 추종 시 침로 및 선속에 대한 가중치(weighting)를 의미한다. 선박의 운동특성상 선속보다는 침로를 변경하는 것이 용이하기 때문에, 선속에 비하여 침로 변경의 가중치를 낮게 설정한다.  $v_0$ 는 자선의 속력을,  $\psi_0$ 는 자선의 선수방향을 의미하며,  $v_{WP}$ 는 자선의 경유점 추종을 위한 목표 선속을,  $\psi_{WP}$ 는 자선의 경유점 추종을 위한 목표 선수 방향을 의미한다. 식 (8)의 비용함수를 만족시

키는 침로 및 선속은 식 (9)로 표현가능하다.

$$v_0, \psi_0 = \operatorname{argmin}_{v_0, \psi_0} J \quad (9)$$

Fig. 5는 식 (8)의 비용함수를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 자색 실선은 PVO<sub>0</sub>를 나타내며, 청색 일점 쇄선은 COLREGs를 준수하지 않을 때 부과되는 비용을 나타낸다. 적색 파선은  $p$ 와 PVO<sub>0</sub>의 합이며, 흑색 실선은 경유점 추종을 위한 비용의 최댓값이다. 경유점 추종을 위한 비용은 0과 0.1사이로 정규화(normalization)하여 사용하며, COLREGs 미준수에 대한 비용은 Fig. 5의 COLREGs penalty parameter를 활용하여, PVO<sub>0</sub>에 반비례하게 모델링한다. PVO<sub>0</sub>값이 커질수록 COLREGs를 위반하면서라도 충돌을 회피해야하는 의무가 커지기 때문에, COLREGs 미준수에 대한 비용을 PVO<sub>0</sub>에 대해 반비례하게 설계하였다.

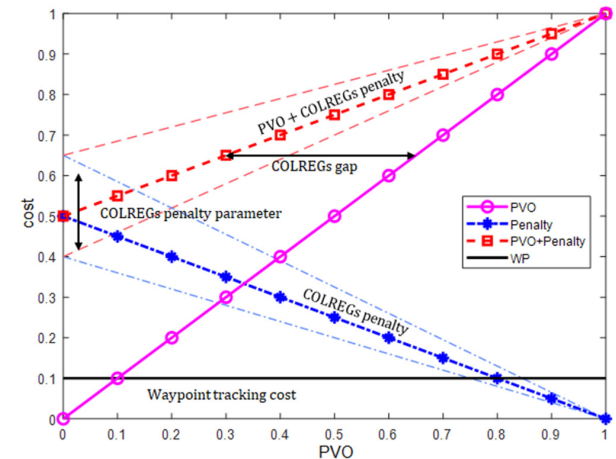


Fig. 5 Graphical representation of the cost function

Fig. 6은 COLREGs gap 설명을 위한 정면 조우 상황의 예시이다. 예를 들어, COLREGs penalty parameter는 0.5이고, 정면조우 상황에서 규정 준수 시 충돌확률이 90%라면 80% 이하의 충돌확률을 갖는 규정 미준수 침로와 선속을 목표 선수방향 및 목표 선속으로 설정할 수 있으며, COLREGs gap은 10%이다. 위와 같은 조건에서 규정 준수 시 충돌확률이 70%라면, 40% 이하의 충돌확률을 갖는 규정 미준수 침로와 선속은 목표 선수방향 및 목표 선속으로 설정되며, COLREGs gap은 30%이다. 마지막으로 같은 조건에서, 규정 준수 시 충돌확률이 50% 미만이라면, 규정을 지키는 침로와 선속을 목표 선수방향 및 목표 선속으로 설정한다. 따라서 COLREGs penalty parameter에 따라 COLREGs gap이 바뀌며,

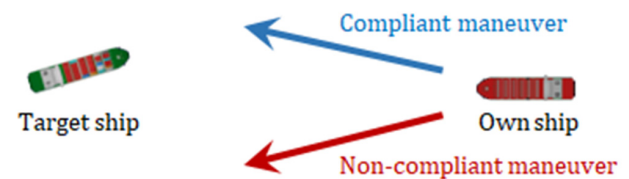


Fig. 6 Example of how the COLREGs gap works in the head-on situation

COLREGs 준수도는 COLREGs penalty parameter가 커지면, COLREGs를 준수하려는 경향이 커지며, parameter가 작아지면, COLREGs를 준수하려는 경향이 작아지나, 위험을 회피하려는 경향이 커진다.

## 4. 충돌회피 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 세팅

제안하는 알고리즘의 성능 검증을 위한 시뮬레이션을 위하여 ROS(Robot Operating System) gazebo 기반의 시뮬레이터 상에서(Koenig & Howard, 2004), Clearpath사의 Kingfisher무인선 모델을 활용한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 무인선은 미리 할당된 두 개의 경유점을 왕복하도록 시뮬레이션을 진행하였으며 두 대의 무인선은 남북으로, 한 대의 무인선은 동서로 왕복하게끔 설정하였다. 남북으로 왕복하는 두 대의 무인선 중 한 대는 제안하는 알고리즘인 확률적 속도 장애물 기반의 알고리즘을 사용하며, 나머지 두 대의 무인선은 불확실 속도 장애물 기반의 알고리즘을 사용한다. 제안하는 알고리즘을 사용하는 무인선은 다른 남북 왕복 선박과 추월 및 전방 조우하며, 동서 왕복 선박과 교차한다. 각 선박에서 다른 선박의 위치는 칼만필터 기반의 추적필터를

사용하여 추정하며, 추적필터에서 추정되는 위치 및 불확실성을 활용하여, 확률적 속도 장애물 및 불확실 속도 장애물 기반 충돌회피를 수행한다. 시뮬레이션 설정 및 그림은 Fig. 7과 Table 1과 같다.

### 4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 8은 시뮬레이션 동안 자선과 타선과의 상대거리를 도시한다. 청색 실선은 남북 왕복 선박과의 상대거리이며, 적색 파선은 동서 왕복 선박과의 상대거리이다. 시뮬레이션 간 남북 왕복 선박과의 조우는 46회 발생하였으며, 동서 왕복 선박과의 조우는 28회 발생하였다. 결과에서 충돌회피 시 설정된 회피 변경보다 가까워지는 경우는 1회 발생하였으며, 13.5 m의 상대거리를 나타냈다.

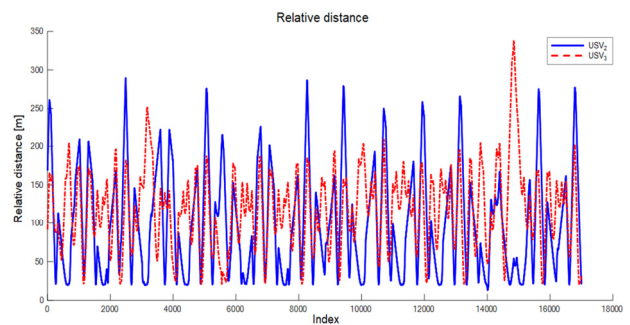


Fig. 8 Relative distance between ships

Table 1 Parameters for collision avoidance

Parameter	Value
Radius of avoidance	20 [m]
$\alpha/\beta$	20.0
Normalization of waypoint cost	0.1
COLREGs penalty parameter	0.9

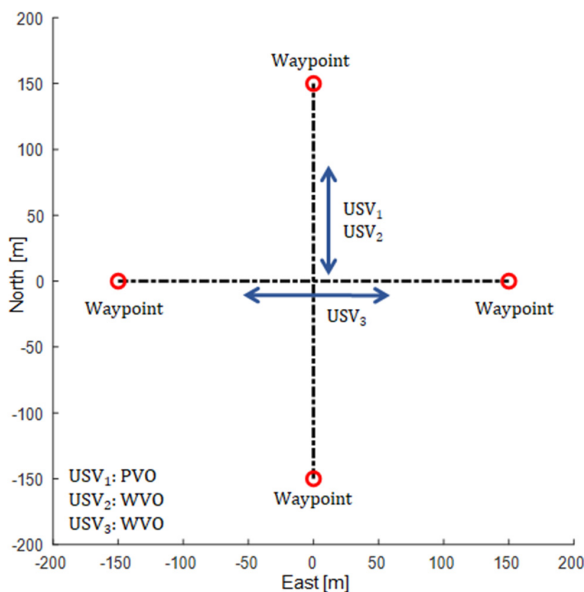


Fig. 7 Ship traffic simulation for the automatic collision avoidance

Fig. 9는 시뮬레이션 결과를 도시한다. 각 결과에서 청색 실선은 자선의 항적을 적색 파선은 타선의 항적을 나타낸다. 선박 주위의 원은 선박의 회피 반경을 의미하며, 흑색 파선은 경유점 및 경로를 의미한다. Fig. 9(a)는 단일 선박과 추월 조우 상황이며, 규정 상 추월상황에서 추월선은 우선권이 없기 때문에, 침로를 양보해야 하며 앞서가는 선박은 침로 유지선이기 때문에 규정에 의하여 침로를 유지해야 한다. 해당 조우 상황에서 자선이 앞서가는 선박의 침로를 회피하여 앞서가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 정면 조우 상황이며, 정면 조우 상황에서 두 선박은 규정에 의하여 침로를 우선으로 변경해야 한다. 해당 조우 상황에서 정면 조우하는 선박에 대하여 자선이 침로를 우선으로 변경하여 회피 하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)는 다수의 선박이 조우하는 상황이다. 해당 상황에서 자선은 우선과 정면에서 조우하는 선박에 대하여 규정에 의하여 우선으로 침로를 변경해야 한다. 자선은 두 대의 선박을 동시에 회피하기 위하여, 우선으로 침로를 변경하여 회피하는 것을 확인 가능하다.

## 5. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 선박의 자율운항을 위한 선박 충돌회피 알고리즘을 제안하였다. 선박의 충돌회피 시 타선의 속력과 침로의 불확실성을 반영하는 충돌확률 계산 알고리즘을 제시하고 해당 알고리즘을 사용한 확률적 속도 장애물을 활용하였다. 확률적 속도 장애물 알고리즘 및 COLREGs를 기반으로 하는 비용함수를 설

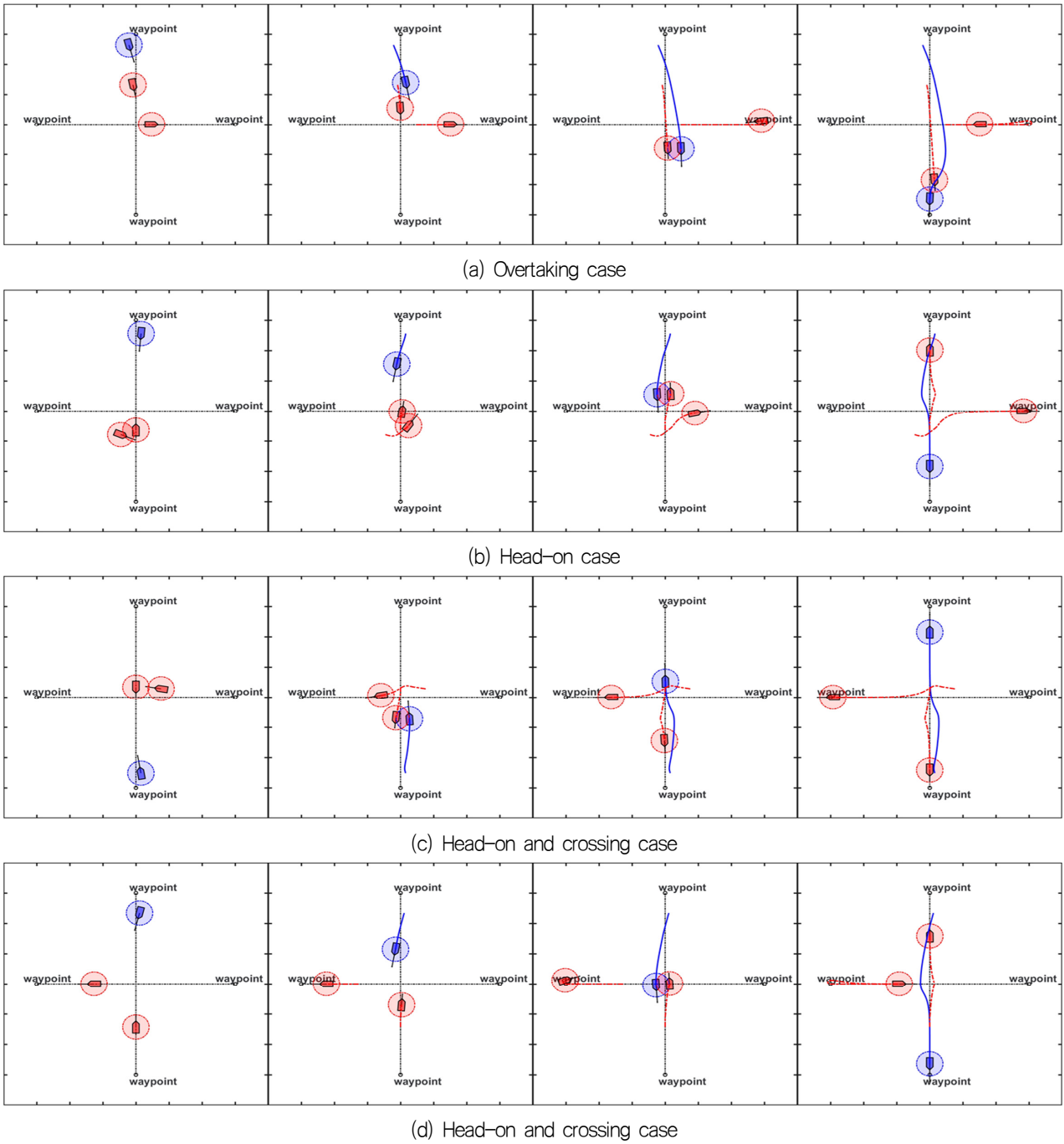


Fig. 9 Results of the collision avoidance algorithm

계하고, 설계된 비용함수 및 확률적 속도 장애물의 유효성 검증을 위하여, 수치 시뮬레이션을 통한 검증을 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 대부분의 경우 만족스런 회피 성능을 보임을 확인하였으나 자신이 안전하게 회피가 가능한 회피공간이 부족한 경우에 충돌반경보다 가까워지는 상태가 발생하였다. 해당 경우에 충돌확률이 가장 작아지는 침로로 회피를 하였으나 추후 회피가 불가능한 상황에서의 대응과 관련된 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 각 경유점을 지나는 경우를 포함하여 자신의 근처에서 타선이 급하게 침로 및 속도 변경 등을 하거나 혹은 미준수 운항을 하는 경우 해당 회피에 어려움을 겪음을 확인하였

다. 따라서 타선의 미준수 운항에 대하여 지속적으로 감시하는 절차가 필요할 것으로 생각되며, 향후 연구로써 타선의 규정 미준수 시 자동 충돌회피 기법 연구와 각 자동 충돌회피 기법간의 성능 비교가 바람직할 것으로 판단된다.

## Nomenclature

- $PVO_{0Ti}$  :  $i$  번째 타선과의 충돌확률
- $PVO_0$  : 전체 타선과의 충돌확률

- $V_T$  : 타선 절대 속도의 확률 변수
- $v_O$  : 자선 속도 벡터
- $v_T$  : 타선 속도 확률 변수의 평균 벡터
- $\Sigma_T$  : 타선 속도 확률 변수의 공분산
- $v_{Tx}$  : 타선 x방향 평균 속력
- $v_{Ty}$  : 타선 y방향 평균 속력
- $v_{Ox}$  : 자선 x방향 속력
- $v_{Oy}$  : 자선 y방향 속력
- $A'$  : 1차 선형변환
- $b'$  : 1차 평행이동
- $V_T'$  : 1차 변환 후 타선 속도의 확률 변수
- $v_{O'}$  : 1차 변환 후 자선 속도
- $\Sigma_T'$  : 1차 변환 후 타선 속도 확률 변수의 공분산
- $A''$  : 2차 선형변환
- $\Sigma_T''$  : 2차 변환 후 타선 속도 확률 변수의 공분산
- $V_T''$  : 2차 변환 후 타선 속도의 확률 변수
- $v_O$  : 자선 속력
- $\psi_O$  : 자선 침로
- $v_{WP}$  : 경유점 추종을 위한 자선 목표 속력
- $\psi_{WP}$  : 경유점 추종을 위한 자선 목표 침로

## 후 기

이 논문은 (주)한화시스템의 “COLREG기반 자율운항기술 개발 (UC150007D)”에 의하여 지원되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

Campbell, S., Naeem, W., & Irwin, G. W., 2012. A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 267–283.

Cho, Y., & Kim, J., 2017. Collision probability assessment between surface ships considering maneuver intentions. *In OCEANS 2017–Aberdeen*, (pp. 1–5).

Cho, Y., Han, J., Kim, J., & Lee, P., 2018. Collision probability assessment between surface ships in velocity coordinates. *The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Jeju, Republic of Korea, 24–25 May 2018.

Degre, T., & Lefevre, X., 1981. A collision avoidance system. *The Journal of Navigation*, 34(2), 294–302.

Fiorini, P., & Shiller, Z., 1998. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The International Journal of Robotics Research*, 17(7), 760–772.

Genz, A., & Bretz, F., 2009. *Computation of multivariate normal*

*and t probabilities* (Vol. 195). Springer Science & Business Media.

International Maritime Organization (IMO), 1972. *COLREGs—Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*, London, U.K.

Kluge, B., & Prassler, E., 2003. Recursive probabilistic velocity obstacles for reflective navigation. *In Field and Service Robotics*, (pp. 71–79). Springer, Berlin, Heidelberg.

Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zargitsky, D., & Huntsberger, T. L., 2014. Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119.

Koenig, N., & Howard, A., 2004. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. *In: International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3. IEEE, pp. 2149–2154.

Lee, S. M., Kwon, K. Y., & Joh, J., 2004. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicles satisfying COLREG guidelines. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2(2), 171–181.

Mitrofanov, O., 1968. An anti-collision indicator. *The Journal of Navigation*, 21(2), 163–170.

Naeem, W., Irwin, G. W., & Yang, A., 2012. COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles. *Mechatronics*, 22(6), 669–678.

Park, J., & Kim, J., 2017. Predictive evaluation of ship collision risk using the concept of probability flow. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(4), 836–845.

Park, J., Han, J., Kim, J., & Son, N. S., 2016. Probabilistic quantification of ship collision risk considering trajectory uncertainties. *10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS)*, 49(23), 109–114.

Park, J. et al., 2017. Development of an Unmanned Surface Vehicle System for the 2014 Maritime RobotX Challenge. *Journal of Field Robotics*, 34(4), 644–665.

