

곡선좌표계 변환에 기반한 협수로에서 선박 자율 충돌회피

조용훈 · 김종휘 · 김진환[†]
카이스트 기계공학과

Automatic Ship Collision Avoidance in Narrow Channels through Curvilinear Coordinate Transformation

Yonghoon Cho · Jonghwi Kim · Jinwhan Kim[†]
Mechanical engineering, KAIST

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 addresses autonomous ship collision avoidance in narrow channels using curvilinear coordinates. Navigation in narrow channels or fairways is known to be much more difficult and challenging compared with navigation in the open sea. It is not straightforward to apply the existing collision avoidance framework designed for use in the open sea to collision avoidance in narrow channels due to the complexity of the problem. In this study, to generalize the autonomous navigation procedure for collision avoidance in narrow channels, we introduce a curvilinear coordinate system for collision-free path planning using a parametric curve, B-spline. To demonstrate the feasibility of the proposed algorithm, ship traffic simulations were performed and the results are presented.

Keywords : Automatic collision avoidance(자율 충돌회피), Narrow channel(협수로), Curvilinear coordinates(곡선좌표계), B-spline(비스플라인)

1. 서론

최근 자율무인선(autonomous surface ship)에 대한 관심이 증가하고 있으며 이와 관련된 기초 기술로써 인지/지각 기술 및 유도/충돌회피 등의 자율운항 기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 또한, 기술을 검증하기 위한 자율무인선 건조 및 이를 활용한 실험역 검증 시도가 늘어나고 있다 (Han et al., 2020; Kufalor et al., 2020). 충돌회피를 포함하는 자율운항 분야의 경우 출항 후 장시간 항해하는 과정에서 운용자의 피로를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대되는데 이를 위해 다양한 기법들이 제시되고 있다 (Huang et al., 2020). 특히, 기존 자율 충돌회피 연구 방향은 자율무인선이 해상에서 유인 선박과 동일 해역에서 운항해야 하는 점에 초점을 두고 유인 선박이 준수해야 하는 국제해상충돌예규칙(COLREGs: International regulations for preventing collisions at sea)을 고려한 대양에서의 자율운항 알고리즘 개발을 중심으로 이루어져 왔다 (Cho et al., 2020; International Maritime Organization

(IMO), 1972; Woerner et al., 2019).

하지만, 항만 근처에서는 상대적으로 제한된 가항 수로 주변으로 운항 가능한 물리적 영역이 제한되며 경우에 따라서는 협수로에서의 운항이 필요하므로 이를 고려한 충돌회피 알고리즘의 개발이 필요하다. 특히, 협수로(narrow channel) 운항은 수로 깊이로 인한 선박 운항 제한 및 수로 주변 지형으로 인한 좌초 위험이 항상 존재하기 때문에, 기존의 대양 항해를 전제로 개발된 침로 변경을 적극적으로 활용하는 알고리즘은 주변 지형으로 인한 좌초를 유발할 가능성이 높아, 협수로에서는 이에 대한 해법으로 선속 변경이나 경로 제한에 대한 고려가 추가적으로 요구된다. 이에 대해, Wang et al. (2019)은 협수로와 평행한 임의의 고정된 경로를 생성 후 비용함수에 따라 경로를 선택하는 알고리즘을 제안하였으며, 플랫폼 Roboat를 개발하여 실험 검증하였다. Thyri et al. (2020) 역시 협수로에서 임의의 고정된 경로를 생성 후 비용함수에 따라 경로를 선택하는 알고리즘을 활용하였으며, 여기에 경로에서의 속력 분포를 계획하기 위해 경로 길이와 속력 차원에서 장

애물을 나타내고, 해당 장애물을 회피하는 알고리즘을 제안하였다. 하지만, 이전 연구의 경우 미리 정해진 경로를 선택하는 알고리즘으로써, 도로의 차선과 달리 연속된 공간으로 표현되는 수로를 이산화된 공간으로 표현하여 연속된 공간을 활용하지 못하는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 수로의 연속된 공간을 활용하기 위하여 곡선좌표계(curvilinear coordinates)를 활용한 충돌회피 알고리즘을 제안한다. 곡선좌표계를 활용한 자율주행 기법은 자율주행차(autonomous car)의 자율주행을 위해 활용된 바 있으며, Frasch et al. (2013)은 비선형 모델 예측 제어(nonlinear model predictive control)를 활용하여 곡선좌표계 상의 곡선 도로를 추종하는 자율주행 알고리즘을 제안하였으며, Buyval et al. (2017) 역시 비선형 모델 예측 제어를 활용하여 곡선좌표계 상의 곡선 도로에서 주행하는 다른 자동차를 추월하는 알고리즘을 제안하였다. Jo et al. (2016)과 Jo et al. (2017)은 곡선좌표계에서 상호작용 다중 모델(interacting multiple model) 및 서포트 벡터 머신(support vector machine)을 활용하여 다른 차량의 행동을 추론하는 기법을 제안하였다. 하지만, 자율주행차와 달리 자율무인선은 선박의 동적 특성으로 인하여 조우하는 선박의 항적을 더 멀리, 더 오래 예측할 필요성이 존재하고, 따라서 곡선좌표계에서 발생하는 공간의 뒤틀림을 고려해서 각 수치들을 계산해야 할 필요성이 생긴다.

따라서, 본 연구에서는 곡선좌표계를 사용하되 장시간 예측 시 오차가 커질 수 있는 공간의 뒤틀림을 고려하고, 다양한 협수로의 형태를 일반화하기 위하여 매개변수 곡선(parametric curve) B-spline을 활용한 곡선좌표계 기반 충돌회피 기법을 제안한다. 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 76m급 선박의 수치모델을 활용한 충돌회피 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 곡선좌표계 기반 문제 정의

2.1 곡선좌표계 정의

협수로의 형태를 일반화하기 위하여 협수로를 협수로 중앙을 지나는 곡선과 그 쪽으로 표현하면, 중앙을 지나는 진행 방향 축과 곡선에서 수직인 축을 기준으로 하는 곡선좌표계로 나타내는 것이 가능하다. 이 때, B-spline을 활용하여 협수로의 중앙을 지나는 축을 아래와 같이 나타내는 것이 가능하다.

$$C_x(t) = \sum_{i=0}^{n_c} N_i(t) P_{x,i}, \quad C_y(t) = \sum_{i=0}^{n_c} N_i(t) P_{y,i} \quad (1)$$

위의 수식에서 C_x 와 C_y 는 B-spline 위의 한 점을 나타내고, $N_i(t)$ 는 매개변수 t 에 따른 기저함수(B-spline basis function)를 나타내며, $P_{x,i}$ 와 $P_{y,i}$ 는 B-spline의 제어점(control point)을 나

타낸다. 하지만, 위의 표현을 활용 시 B-spline의 매개변수 t 변화량과 협수로 길이 방향 변화량이 선형적으로 비례하지 않아 직관적 활용이 어렵다는 단점이 존재한다. 따라서, 곡선 길이 매개변수화(arc-length parameterization)를 수행하여 매개변수를 길이 차원으로 매핑하였으며 (Wang et al., 2002), 식 (1)에서 곡선 길이 매개변수화 된 수식은 아래와 같다.

$$D_x(s) = \sum_{i=0}^{n_c} N_i(s) P_{x,i}, \quad D_y(s) = \sum_{i=0}^{n_c} N_i(s) P_{y,i} \quad (2)$$

여기서, D_x 와 D_y 는 곡선좌표계 원점부터 곡선 거리 s 에 따른 협수로 중앙 위의 점을 나타낸다. 해당 B-spline을 활용한 선박좌표계 시스템은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1과 같이 본 연구에서는 지면좌표계(North-East-Down coordinates)를 기준좌표계로 활용하였으며, 이 때, 곡선좌표계는 협수로의 중앙을 지나는 B-spline의 s 축과 이에 직교하는 n 축으로 표현하였다. 각 선박의 지면좌표계 기준 상태변수 x 는 위치벡터 $p = [x, y]^T$ 와 침로와 속도 ψ, V 로 구성되어 있으며, 각 요소의 단위는 미터, 라디안, 초속 미터를 사용하였다. 곡선좌표계 기준 위치는 s 와 n 으로 표현이 되고, 각 변수의 아래 첨자 O 는 자선(own ship)을 T 는 타선(traffic ship)을 나타낸다.

자선의 항법정보를 비롯한 타선의 상태변수 정보는 지면좌표계 기준으로 제공되는 것이 일반적이므로, 곡선좌표계를 기준으로 자율운항을 수행하기 위해서는 지면좌표계 기준 위치(x, y)를 곡선좌표계 기준 위치(s, n)로 매핑하는 과정이 필요하다. 해당 매핑 과정을 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$s = \arg \min_s \sqrt{(D_x(s) - x)^2 + (D_y(s) - y)^2} \quad (3a)$$

$$n = \text{sgn}(\alpha) \sqrt{(D_x(s) - x)^2 + (D_y(s) - y)^2} \quad (3b)$$

$$\alpha = D_x^{(1)}(s)(y - D_y(s)) - D_y^{(1)}(s)(x - D_x(s))$$

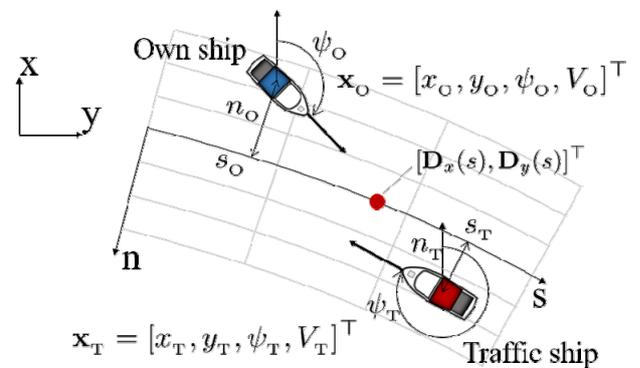


Fig. 1 Curvilinear coordinate system in the Cartesian coordinates. Red and blue ships represent the traffic ship and own ship, respectively. Red dot represents a point on the B-spline curve according to s .

여기서, $D_x^{(k)}$ 와 $D_y^{(k)}$ 는 B-spline의 k 차 미분 값을 나타내고, $\text{sgn}()$ 은 해당 값의 부호를 반환하는 함수이다. 반대로 곡선좌표계 기준 위치(s, n)에서 지면좌표계 기준 위치(x, y)로 매핑하는 수식은 아래와 같다.

$$x = D_x(s) - nD_y^{(1)}(s) \quad (4a)$$

$$y = D_y(s) + nD_x^{(1)}(s) \quad (4b)$$

2.2 곡선좌표계 기반 거리 계산

협수로에서 충돌회피를 수행하기 위해서는 두 선박 간 거리가 우선적으로 정의돼야 한다. Fig. 2는 임의의 선박들의 지면좌표계와 곡선좌표계 기준 위치를 나타낸다. 두 선박 i 와 j 의 사이 거리를 d_{ij} 로 정의했을 때, 지면좌표계 기준 거리를 사용하면 d_{15} 가 d_{14} 보다 멀다고 계산되어, 실 운항 시 협수로를 따라 운항하게 되는 선박의 제약조건을 고려하지 못한다. 이를 고려하기 위해 Fig. 2(b)의 곡선좌표계를 사용하면 d_{15} 가 d_{14} 보다 가깝다고 정의되어 협수로 운항 특징을 반영 가능하나, d_{14} 와 d_{23} 이 같다고 계산되어 같은 s 축 간 거리를 갖는 경우 거리적 직관을 제대로 반영하지 못한다.

위의 직관을 반영하기 위해 본 연구에서 제안하는 거리는 Fig. 3과 같이 곡선좌표계 기준 직선을 지면좌표계에서 적절한 값이며 아래 수식과 같다.

$$d = \int \sqrt{dx^2 + dy^2} = \int \sqrt{(dx/ds)^2 + (dy/ds)^2} ds \quad (5)$$

여기서, dx/ds 와 dy/ds 는 s 에 따른 지면좌표계 기준 미소 변위 값이며, 식 (4a)와 (4b)를 s 에 대해 미분하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

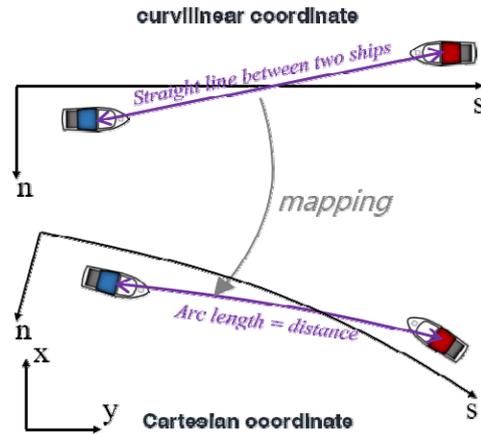


Fig. 3 Distance definition in narrow channel. Magenta line represents the straight line between two ships in curvilinear coordinates.

$$dx/ds = D_x^{(1)}(s) - nD_y^{(2)}(s) - (dn/ds)D_y^{(1)}(s) \quad (6a)$$

$$dy/ds = D_y^{(1)}(s) + nD_x^{(2)}(s) + (dn/ds)D_x^{(1)}(s) \quad (6b)$$

여기서, n 은 곡선좌표계에서 Fig. 3과 같이 s 와 선형관계를 가지므로 dn/ds 는 상수로 표현되며, d 는 식 (5)에 식 (6)을 대입 후 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$d = \int \sqrt{(1 - n\kappa(s))^2 + (dn/ds)^2} ds \quad (7)$$

여기서, κ 는 곡률(curvature)을 의미하고 다음과 같이 정의된다.

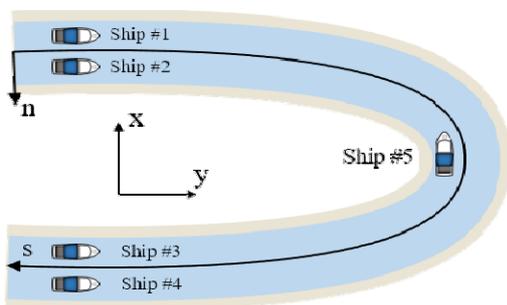
$$\kappa(s) = D_x^{(1)}(s)D_y^{(2)}(s) - D_y^{(1)}(s)D_x^{(2)}(s) \quad (8)$$

2.3 곡선좌표계 기반 항적 예측

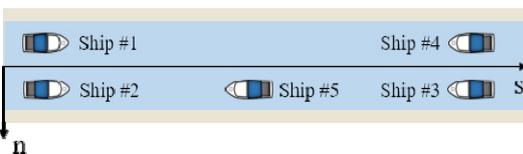
선박자율충돌회피는 타선의 미래 항적 예측 절차가 요구되며, 일반적으로 대양에서는 타선 침로와 속력이 유지된다고 가정하여 타선의 미래 항적을 예측한다. 하지만, 대양에서와 달리 협수로에서는 타선이 협수로 진행 방향을 따라 운항하는 가정이 더욱 합리적이다. 따라서, 본 연구에서 타선은 협수로의 진행 방향을 따라 일정한 속력으로 운항한다고 가정하며, 시간 t 에 따른 곡선좌표계 기준 협수로 진행 방향 속력을 $v_s(t)$, 수직 방향의 속력을 $v_n(t)$ 로 정의 시, 해당 가정에 따른 곡선좌표계 기준 시간 t 에 위치는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \int_{t_0}^t v_s(\tau) d\tau + s(t_0) \quad (9a)$$

$$n(t) = \int_{t_0}^t v_n(\tau) d\tau + n(t_0) \quad (9b)$$



(a) Cartesian coordinates



(b) Curvilinear coordinates

Fig. 2 Positions of ships in Cartesian and curvilinear coordinates

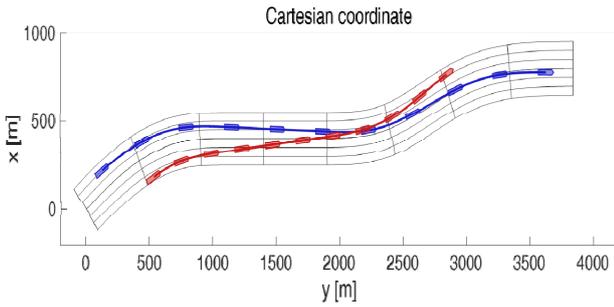


Fig. 4 Example of ship trajectory prediction during 20 minutes in which the along-track and cross-track speeds are assumed to keep constant. The initial state of red ship is $x = [220.0, 129.8, 1.0, 3.0]^T$ and that of blue ship is $x = [184.1, 563.4, 1.1, 2.0]^T$, respectively. The ship-shaped pentagons represent the position of the ship during every two minutes.

곡선좌표계는 지면좌표계와 달리 공간이 왜곡되어 위치에 따라 미소 변화량에 따른 축 변화량이 일정하지 않으며, 따라서 지면좌표계에서의 미소변화량을 각 좌표계간의 비례상수인 척도 인자(scale factor)를 곱하여 좌표계 간 미소변화량의 공간 왜곡을 보정한다. 진행 방향의 수직 방향 n 에 따른 척도 인자 $|\partial p / \partial n|$ 은 항상 1로 v_n 은 위치에 따라 변화하지 않지만, 진행 방향 s 에 따른 척도 인자 $|\partial p / \partial s|$ 는 $|1 - n\kappa|$ 로써 위치에 따라 변화하기 때문에, 척도 인자의 변화를 반영한 시간에 따른 진행 방향 속력 v_s 는 아래와 같이 계산된다.

$$v_s(t) = v_n(t_0) / |\partial p / \partial s| = v_n(t_0) / |1 - n\kappa| \quad (10)$$

여기서, t_0 는 초기 시각을 의미하며 $v_n(t_0)$ 는 일정하게 유지되는 진행 방향의 초기 속력을 의미한다. 식 (9)에 척도 인자를 반영한 곡선좌표계 기준 시간 t 에서 선박 위치는 아래 수식과 같다.

$$s(t) = \int_{t_0}^t v_s(\tau) / |1 - n(\tau)\kappa(s(\tau))| d\tau + s(t_0) \quad (11a)$$

$$n(t) = v_n(t_0)(t - t_0) + n(t_0) \quad (11b)$$

여기서, $v_n(t_0)$ 는 일정하게 유지되는 진행 방향의 수직 방향의 초기 속력을 의미한다. Fig. 4는 협수로에서 진행 방향 속력과 진행 방향의 수직 속력이 일정하다고 가정 시, 식 (11)을 활용한 항적 결과의 예시이다.

3. 충돌회피 알고리즘

3.1 경로추종 알고리즘

협수로에서 자율운항을 위해서는 협수로의 진행 방향을 따라

운항하는 알고리즘이 우선적으로 요구된다. Fig. 5는 협수로 중앙을 기준으로 일정 폭 떨어진 목표 추종경로(reference path)가 존재할 때 경로추종을 위한 곡선좌표계를 나타낸다.

목표 추종선을 따라 운항하기 위해선 협수로를 따라 운항해야 하는 오차와 목표 추종선에 근접해야 하는 오차를 동시에 줄이는 제어를 수행해야 한다. 이를 위해, 지면좌표계에서 직선경로를 추종하기 위해 널리 사용되는 시선각 유도 법칙(line-of-sight) 기법을 곡선좌표계에 적용하였으며 (Cho et al., 2019), 이 때, 협수로에서 경로추종을 위한 목표 침로 ψ_{wp} 를 구하기 위한 수식을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_{wp} = \theta_{sn} + \psi_e \quad (12)$$

여기서, θ_{sn} 은 곡선경로를 추종하기 위한 목표 침로로 곡선의 기울기 $\text{atan}(D_y^{(1)}(s)/D_x^{(1)}(s))$ 으로 계산되며, ψ_e 는 목표 추종선에 접근하기 위한 보정 침로로 $-w_{wp}(n_0 - n_{wp})$ 이고, w_{wp} 는 제어이득으로 커질수록 경로에 접근하는 목표 침로를 생성한다.

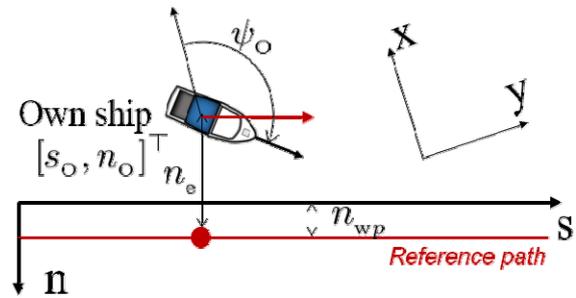


Fig. 5 Curvilinear coordinate systems for tracking the along-track path in narrow channel. Red line represents the reference path to be followed, and red dot is the perpendicular foot on the reference path.

3.2 충돌회피 알고리즘

충돌회피 알고리즘은 곡선좌표계에서 자선 초기 침로 및 속력이 ψ_i, V_i 일 때, 충돌 및 좌초하지 않는 항로 후보군(path candidates)을 식 (11)을 활용하여 시간 t_f 까지 형성 후, 해당 후보군 중 가장 비용이 적은 경로를 선택한다. 이 때, 항적 후보군의 비용함수는 아래와 같이 구성된다.

$$J_i = w_v |V_{wp} - V_i| + w_\psi |\psi_{wp} - \psi_i| + w_{ca} J_{ca} + w_{gd} J_{gd} \quad (13)$$

여기서, i 는 항적 후보군의 색인을 나타내고, V_{wp} 는 목표 속력을 의미하며, $w_v, w_\psi, w_{ca}, w_{gd}$ 는 각각 목표 속력, 경로추종을 위한 목표 침로, 충돌, 좌초에 대한 비용함수 가중치이다. J_{ca} 는 충돌에 대한 비용함수를 의미하며, 항로 후보군이 타선의 예측 항적과 가장 가까워지는 거리를 이용하여 아래와 같이 정의된다.

$$J_{ca} = \begin{cases} 1 & \text{if } D_w < 1 \\ (\gamma_D - D_w) / (\gamma_D - 1), & \text{if } 1 \leq D_w < \gamma_D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서, γ_D 는 근접 상황(near-miss)을 판단하는 문턱 값(threshold)을 의미한다. D_w 는 두 항적 간 가장 가까워지는 거리를 의미하나, 협수로 운항의 특징 상 진행 방향 여유 거리에 비하여 진행 방향 수직 방향 여유 거리가 짧은 경우가 많아 선박 길이 및 폭에 비례하는 가중치 w_s , w_n 을 사용한 거리를 활용하였으며, 이 때, D_w 는 예측 시간 t 에 따라 아래와 같이 정의된다.

$$D_w = \min_{t \leq t_f} \left(\int_{s_0(t)}^{s_T(t)} \sqrt{(1 - n\kappa(s))^2 / w_s^2 + (dn/ds)^2 / w_n^2} ds \right) \quad (15)$$

J_{gd} 는 좌초에 대한 비용함수를 의미한다. 운항 시 좌초가 발생하는 것뿐만 아니라, 좌초 발생 가능성이 적은 협수로의 중앙에서 벗어나는 것을 주의해야 하므로, 아래와 같이 비용함수를 정의하였다.

$$J_{gd} = \begin{cases} |n - \gamma_n|, & \text{if } |n| > \gamma_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

여기서, γ_n 는 협수로의 폭에 비례하는 문턱 값으로써, 협수로의 진행 방향에 따라 협수로의 폭이 달라지는 경우 진행 방향 위치에 따라 변경되게 된다.

4. 충돌회피 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 세팅

제안하는 알고리즘의 성능검증을 위하여, 가상의 협수로에서 길이 76m의 해양작업지원선(supply vessel) 수치모델을 활용하여 (Fossen, 2011) 두 차례의 선박통행 시뮬레이션을 수행하였다. 가상의 협수로는 무작위 제어점으로 형성하였으며, 자율무인선은 제안하는 알고리즘을 활용하여 협수로의 처음에서 끝까지 자율운항하는 것을 목표로 하였다. 협수로의 폭은 대상으로 하는 선박의 크기를 고려하여 폭 200m의 일정한 폭을 갖도록 하였으며, 협수로 길이는 약 6000m로 설정하였다. 타선은 자율무인선 진행 방향 반대편에서 지수분포(exponential distribution)에 따라 평균 3분에 한 척씩 접근하고 제안하는 경로추종 알고리즘만 사용해 반대 방향으로 운항하도록 설정하였다. Table 1은 두 시뮬레이션에서 충돌회피를 위해 사용한 매개변수들의 설정값을 의미한다.

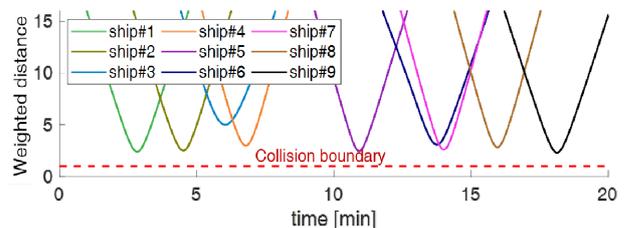
Table 1 Parameters for collision avoidance

parameter	value	unit
w_{ca}	10.0	
w_{gd}	0.2	
γ_D	3.0	
γ_n	90.0	[m]
w_s	150.0	[m]
w_n	20.0	[m]
t_f	160.0	[sec]
The number of ψ_i	61	
The number of V_i	3	
The range of ψ_i	$[\psi_0 - 20.0, \psi_0 + 20.0]$	[deg]
The range of V_i	[4, 6]	[m/s]
Calculation frequency	0.5	[Hz]

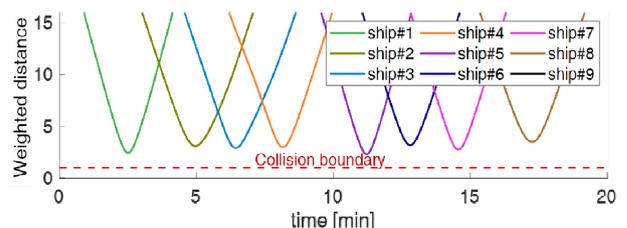
4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 두 차례의 시뮬레이션에 대한 결과 항적을 나타낸다. Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 조우하는 선박으로 인해 경로를 변경하는 순간을 곡선좌표계에서 나타내며, Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)는 누적항적을 지면좌표계에서 나타낸다. 항적 결과에서 적색은 조우하는 선박을 청색은 자율무인선을 나타내며, 녹색은 항로 후보군 중 선택된 목표 항로를 나타낸다. 결과 항적을 통하여, 각 선박이 좌초와 충돌 없이 협수로의 마지막까지 안전하게 항해하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 두 차례의 시뮬레이션에서 충돌회피 성능을 자세히 확인하기 위한 가중치가 적용된 이격 거리 결과를 나타낸다. 길이가 1보다 작아지는 경우 충돌이 발생한 것으로 판단할 수 있으며, 이격 거리 확인 결과 안전하게 회피한 것을 확인할 수 있다.

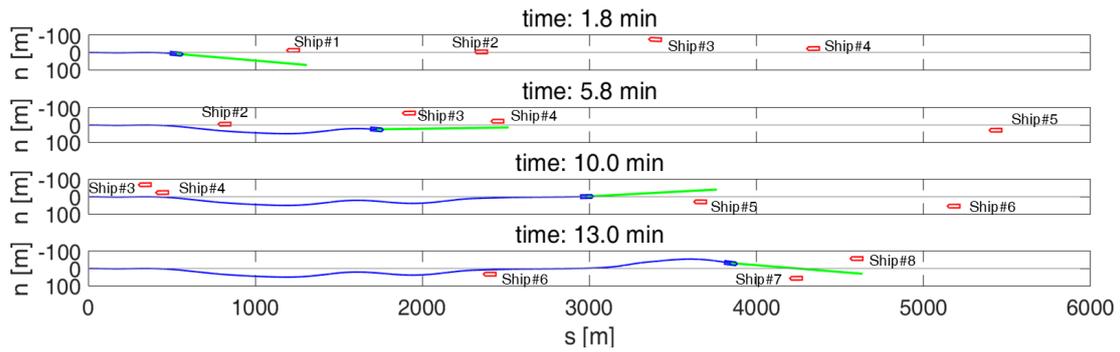


(a) Weighted distances of first result

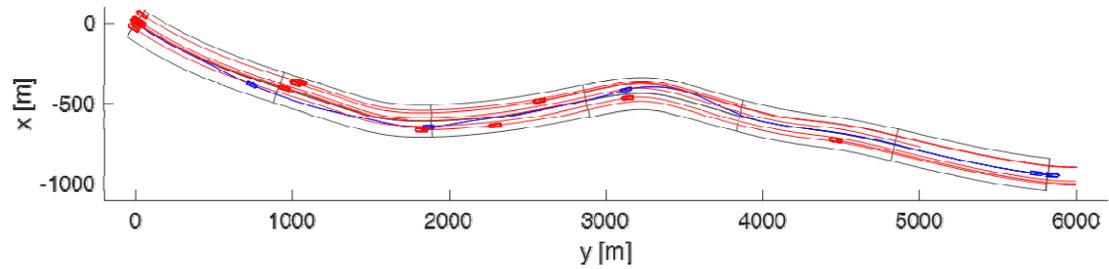


(b) Weighted distances of second result

Fig. 6 Weighted distances of two results. Red dotted line represents the boundary of collision.

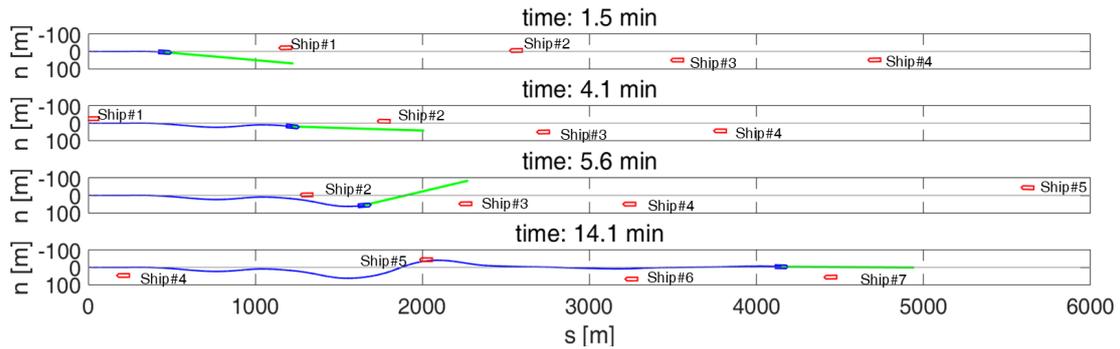


(a) Time instants to avoid the collisions in curvilinear coordinate systems

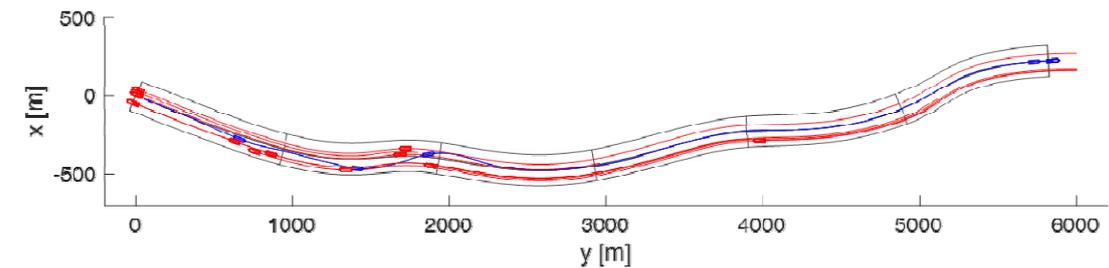


(b) Accumulated trajectories in Cartesian coordinate systems

Fig. 7 First result of the ship traffic simulation. Blue and red ship-shaped pentagons are the own ship and the traffic ships.



(a) Time instants to avoid the collisions in curvilinear coordinate systems



(b) Accumulated trajectories in Cartesian coordinate systems

Fig. 8 Second result of the ship traffic simulation. Blue and red ship-shaped pentagons are the own ship and the traffic ships.

5. 결론

본 연구에서는 자율무인선의 협수로 자율운항을 위한 선박 충돌회피 알고리즘을 제안하였다. 협수로의 다양한 형태로 인한 어려움을 해결하기 위하여, 협수로 형태를 매개변수 곡선 중 하나인 B-spline으로 표현하고 이를 곡선좌표계로 활용하

였다. 곡선좌표계 기반의 기법은 데카르트 좌표계에서 공간이 왜곡되기 때문에, 이를 보정하는 척도인자를 계산하는 것과 이를 활용하여 거리 및 선박의 항적을 예측하는 방법을 제안하였고, 협수로에서 충돌회피를 위한 비용함수를 정의하였다. 제안하는 방법은 선박통행 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며, 항적 및 이격 거리 결과를 통해 안전한 회피가 가능함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2021년도 KAIST 연구원 자체연구사업의 지원에 의한 연구이며(N10210011), 2021년도 해양수산부 및 해양수산과학기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 '자율운항선박 기술개발사업(20200615)'의 연구결과입니다.

References

- Buyval, A., Gabdulin, A., Mustafin, R., & Shimchik, I., 2017. Deriving overtaking strategy from nonlinear model predictive control for a race car. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, 24–28 September 2017.
- Cho, Y. et al., 2019. Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles. *12th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS)*, Daejeon, Korea, 18–20 September 2019.
- Cho, Y., Han, J., & Kim, J., 2020. Efficient COLREG-compliant collision avoidance in multi-ship encounter situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. early access, 20 October 2020, doi: 10.1109/TITS.2020.3029279.
- Frasch, J. V. et al., 2013, An auto-generated nonlinear MPC algorithm for real-time obstacle avoidance of ground vehicles. *2013 European Control Conference (ECC)*, Zurich, Switzerland, 17–19 July 2013.
- Fossen, T.I., 2011. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons: New York.
- Han, J. et al., 2020. Autonomous collision detection and avoidance for ARAGON USV: Development and field tests. *Journal of Field Robotics*, 37(6), pp.987–1002.
- Huang, Y. et al., 2020. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, pp.451–473.
- International Maritime Organization (IMO), 1972. COLREGS—Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, London: IMO.
- Jo, K., Lee, M., Kim, J., & Sunwoo, M., 2016. Tracking and behavior reasoning of moving vehicles based on roadway geometry constraints. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 18(2), pp.460–476.
- Jo, K., Lee, M., & Sunwoo, M., 2017. Track fusion and behavioral reasoning for moving vehicles based on curvilinear coordinates of roadway geometries. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(9), pp.3068–3075.
- Kufoalor, D.K.M, et al., 2020. Autonomous maritime collision avoidance: Field verification of autonomous surface vehicle behavior in challenging scenarios. *Journal of Field Robotics*, 37(3), pp.387–403.
- Thyri, E.H., Breivik, M., & Lekkas, A.M., 2020. A path-velocity decomposition approach to collision avoidance for autonomous passenger ferries: concepts and full-scale experiments, *1st Virtual IFAC World Congress*, Berlin, Germany, 11–17 July 2020.
- Wang, H., Kearney, J., & Atkinson, K. 2002, Arc-length parameterized spline curves for real-time simulation. *5th International Conference on Curves and Surfaces*, France, 27 June–3 July 2002.
- Wang, W. et al., 2019. Roboat: An autonomous surface vehicle for urban waterways. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, China, 4–8 November 2019.
- Woerner, K. et al., 2019. Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance. *Autonomous Robots*, 43(4), pp.967–991.



조용훈

김종휘

김진환