



상대속도를 고려한 포텐셜 필드 기반 군집 무인수상선의 대형 제어

백승대¹ · 김민승² · 우주현^{3,†}

HD한국조선해양 디지털플랫폼연구소¹

한국해양대학교 조선해양시스템공학과²

한국해양대학교 조선해양시스템공학부³

A Formation Control of Swarm Unmanned Surface Vehicles Using Potential Field Considering Relative Velocity

Seungdae Baek¹ · Minseung Kim² · Joohyun Woo^{3,†}

Digital Technology Research Institute, HD Korea Shipbuilding and Offshore Engineering¹

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University²

Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University³

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.

With the advancement of autonomous navigation technology in maritime domain, there is an active research on swarming Unmanned Surface Vehicles (USVs) that can fulfill missions with low cost and high efficiency. In this study, we propose a formation control algorithm that maintains a certain shape when multiple unmanned surface vehicles operate in a swarm. In the case of swarming, individual USVs need to be able to accurately follow the target state and avoid collisions with obstacles or other vessels in the swarm. In order to generate guidance commands for swarm formation control, the potential field method has been a major focus of swarm control research, but the method using the potential field only uses the position information of obstacles or other ships, so it cannot effectively respond to moving targets and obstacles. In situations such as the formation change of a swarm of ships, the formation control is performed in a dense environment, so the position and velocity information of the target and nearby obstacles must be considered to effectively change the formation. In order to overcome these limitations, this paper applies a method that considers relative velocity to the potential field-based guidance law to improve target following and collision avoidance performance. Considering the relative velocity of the moving target, the potential field for nearby obstacles is newly defined by utilizing the concept of Velocity Obstacle (VO), and the effectiveness and efficiency of the proposed method is verified through swarm control simulation, and swarm control experiments using a small scaled unmanned surface vehicle platform.

Keywords : Unmanned surface vehicle(무인 수상선), Formation control(대형 제어), Swarm control(군집 제어), 포텐셜 필드(Potential field)

1. 서론

군집 행동은 자연계의 생명체들에게서 쉽게 찾아 볼 수 있다. 장거리를 이동하는 조류는 V자 형태의 비행을 통해 비행 효율을 극대화시키며 불필요한 에너지 손실을 막는다. 이외에도 먹이를 찾거나 포식자로부터 몸을 보호하기 위한 목적으로 자연계의 여러 개체들은 군집 형태로 생활하며 생존성을 높이기도 한다. 최근 다수의 자율 무인이동체는 이러한 생명체의 군집 행동을 모방하여 효율성과 생산성을 향상시키는 군집 무인이동체 형태로 개

발이 이루어지고 있는데, 다수의 무인이동체를 활용함으로써 단일 무인이동체를 활용하는 상황에 비해 임무수행영역이 확대되거나, 비용효율을 향상되는 효과를 기대할 수 있다. 이러한 이유로, 무인이동체의 군집제어 및 운용기술은 다양한 산업분야 및 군용 목적의 핵심기술로 활발히 연구되어지고 있다.

최근 들어 전세계 각국에서 무인수상선과 관련된 다수의 프로젝트들이 진행되고 있다. 미 해군 연구소(ONR, Office of Naval Research)는 미 항공 우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)과 협력하여 고가치 선박을 수상 군집선을



Fig. 1 Example of swarm formation in nature

활용하여 호송하는 유령함대(ghost fleet) 프로젝트를 진행하였고, 중국군에서는 Oceanalpha사의 제품을 활용하여 56대의 무인수상선의 군집 기술을 시연하는 일명 ‘Shark Swarm’을 공개하였다 (Kania et al., 2019). 또한 유럽의 북대서양조약기구(NATO)에서는 인명 구조용 군집 무인수상선을 개발하는 ICARUS 프로젝트를 진행하였고 추가적으로 이탈리아, 영국 등의 나라에서도 군집 선박 관련 연구를 진행중이다 (Bibuli et al., 2014). 국내에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 다목적 무인선 ‘아라곤’을 통한 군집 임무를 수행한 바 있다 (Son et al., 2020).

군집 형태의 무인 이동체가 임무를 수행하기 위해서 일정한 간격과 각도를 유지하며 기동하는 대형 제어 기술은 필수적으로 요구된다. 군집 무인이동체의 대형 제어를 위해 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. Cui et al., 2010; Ghommam and Saad 2017; Oh et al., 2011의 연구에서는 Lyapunov 안정도 이론과 Backstepping 제어 기법을 활용하여 무인이동체가 각각의 위치를 강건하게 추적할 수 있도록 제어기를 설계하였고, Sun et al., 2018의 연구에서는 슬라이딩 모드 제어기법이 활용되었다. 앞서 언급된 연구들은 무인이동체가 군집 대형을 형성할 때 각각의 개체가 목표점을 추종하기 위한 제어기 설계에 집중하고 있다. 하지만 실제 군집 대형을 운용하는 과정에서는 여러 수의 개체가 통합적으로 운용되기 때문에 특정한 이유로 대형이 흐트러지거나 대형의 형태를 변경할 필요성이 있는 경우에는 각각의 개체가 다른 개체를 피하며 목표점을 추종하기 위한 유도법칙이 요구된다. 이때 가장 많이 활용되어 지는 기법은 포텐셜 필드 기법이다. Barnes et al., 2007; Barnes et al., 2006; Tak et al., 2014; Park et al., 2015; Park et al., 2021의 연구와 같이 해양 분야에서 무인수상선의 군집 대형 제어에 포텐셜필드 기법이 가장 널리 활용되어져 왔다. 다만, 이러한 포텐셜 필드 기법은 자신과 인근 장애물의 위치정보만을 활용하여 포텐셜 필드가 정의되므로, 다수의 개체가 복잡하게 얽혀있으며 동시에 유기적으로 운동하는 대형제어 상황에서 효과적인 유도명령을 생성하기 어려운 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 군집 내 개별 무인수상선(장애물)과 이동하는 목표점의 위치 및 속도를 동시에 고려하는 방식을 통해 인력장과 척력장을 구성하고, 이를 통해 보다 효과적이고 안전한 유도명령을 도출하고자 한다.

본 논문의 2장에서는 군집 대형 제어에 대한 방법, 활용 기법에 대한 설명과 본 연구에서 제안하는 기법에 대한 설명이 묘사되어 있다. 3장에서는 제안 기법을 토대로 시뮬레이션과, 실증 검증에 대한 내용이 수록되어 있고 4장에서 결론 및 고찰에 대한 내용이 담겨있다.

2. 군집 대형 제어

여러 무인수상선들이 모여 하나의 군집을 형성할 때 중요한 요소로 고려되는 것은 각각의 개체가 각자의 목표 위치를 정확하게 추종할 수 있도록 유도하는 것이다. 이때 사전에 약속된 각도, 간격 등으로 개체간의 상대위치를 정렬하는 것을 대형 제어 (formation control)라 한다. 이러한 대형을 정의하는 방법은 i) unit - center reference 방법, ii) neighbor reference 방법, iii) leader - follower reference 방법 세 가지로 구분된다.

Unit - center reference 방법은 아래쪽의 Fig. 2(a)과 같이 군집 무인수상선의 평균좌표 또는 군집 전체의 형상에서 가상의 중심점을 기준으로 각 개체의 목표 위치를 계산하는 방법이다 (Lewis et al., 1997; Balch et al., 1998; Sadowska et al., 2011). Unit - center reference는 군집을 이루는 무인수상선을 하나의 개체로 가정하기 때문에 비교적 대형 관리에 용이하지만 각각의 개체가 가지는 제약이나 특징을 반영할 수 없다는 단점이 있다.

Neighbor reference 방법은 아래쪽의 Fig. 2(b)와 같이 각각의 무인수상선이 자신과 이웃한 무인수상선을 기준으로 하여 자신의 위치를 계산하는 방법이다. Neighbor reference는 상황에 따라 개별 행동에 용이하고 그로 인해 미션 수행 능력 또한 상승하지만 구현하기 위한 수학적 표현이 어렵다는 단점이 있다.

Leader - follower reference 방법은 아래쪽의 Fig. 2(c)와 같이 대형을 이루고 있는 하나의 무인수상선이 선도(leader)가 되고 나머지 무인수상선이 추종(follower)이 된다. 이때 선도를 기준으로 각 개체의 위치를 계산하는 방법이다. Leader - follower reference 방법은 그 구성이 간단하고 구현이 쉽다는 장점을 가지지만 Leader 상태에 따라 군집 전체가 영향을 받는다는 단점이 있다 (Leonard and Fiorelli, 2001).

본 연구에서는 군집 제어 분야에서 널리 활용되며 구현이 비교적 쉬운 leader - follower reference 방법을 활용하였다. 군집 대형에서 가장 대표적인 대형은 Fig. 3과 같은 종(longitudinal) 대형, 횡(lateral)대형, Wedge 대형을 들 수 있다. Follower의 기준

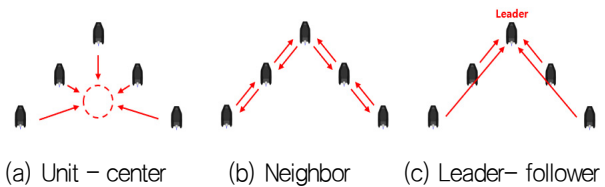


Fig. 2 Various method of swarm USV formation

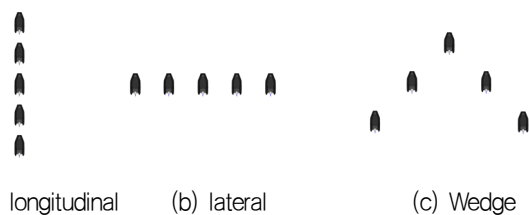


Fig. 3 Representative formation of swarm USV

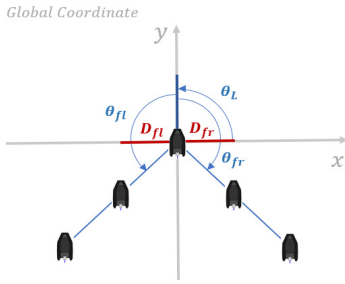


Fig. 4 Schematic representation of the follower USV position with respect to the leader USV position

위치는 leader의 위치로부터 계산이 되는데, 이때 각각의 대형에서 follower의 위치는 선도 기준 왼쪽에 위치하는 선박의 경우, 식 (1)로 표현되고, 오른쪽에 위치하는 선박의 경우는 식 (2)로 표현된다. 식 (1), (2)는 global coordinate를 기준으로 계산되고 i 는 선도로부터 임의의 방향으로 i 번째 떨어진 선박을 뜻하며 θ_L 은 선도의 Heading 각도를 의미한다. θ_{fl}, θ_{fr} 은 θ_L 을 기준으로 하여 추종 선박이 위치하는 각도를 의미하고 D_{fl}, D_{fr} 는 선도를 기준으로 하여 좌우로 떨어진 거리를 의미한다. 본 변수들의 기하학적 설명은 Fig. 4에 명시되어 있다.

$$p_{fl_i} = [x_1 + D_{fl_i} \cos(\theta_L + \theta_{fl_i}), y_1 + D_{fl_i} \sin(\theta_L + \theta_{fl_i})] \quad (1)$$

$$p_{fr_i} = [x_1 + D_{fr_i} \cos(\theta_L + \theta_{fr_i}), y_1 + D_{fr_i} \sin(\theta_L + \theta_{fr_i})] \quad (2)$$

2.1 포텐셜 필드 기법

포텐셜 필드(potential field)는 로봇공학분야의 충돌회피와 경로계획에 널리 활용되는 기법으로 수학적인 분석이 쉽고 간단한 구조를 가지고 있다는 장점을 가지고 있다. Borenstein et al, 1989에 의해 제안된 포텐셜 필드 기법은 여러 경로 계획과 충돌 회피 문제에서 활용되었지만 정적인 장애물에 대한 방법이라는 특징과 지역 최소점(local minimum)을 갖는다는 특징이 있다. (Khatib and Chatila, 1995; Rimon and Koditschek, 1992; Borenstein and Koren, 1991; Ulrich et al., 1998). Ko and Lee, 1996; Ge et al., 2002의 연구에서 포텐셜 필드를 활용한 장애물 회피를 동적 환경에 대하여 수행하였지만, 과도한 회피가 이루어진다는 한계가 존재하였다.

포텐셜 필드의 기본 개념은 무인수상선과 목표점 간의 끌어당기는 인력(attractive force, F_{att})에 대한 인력장(artificial attractive field)과, 무인수상선과 장애물 간에 밀어내는 척력(repulsive force, F_{rep})에 대한 척력장(repulsive field)을 합하여 가상의 포텐셜 장(artificial potential field)을 생성하는 식으로 목표점과 장애물을 고려한다. 이후, 포텐셜 장을 바탕으로 무인수상선이 추종해야하는 유도명령을 생성한다. 무인수상선이 특정 위치(p)에 존재할 때 인력과 척력의 합으로 표현되는 합력(F_{total})은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F}_{total}(p) = \vec{F}_{att}(p) + \vec{F}_{rep}(p) \quad (3)$$

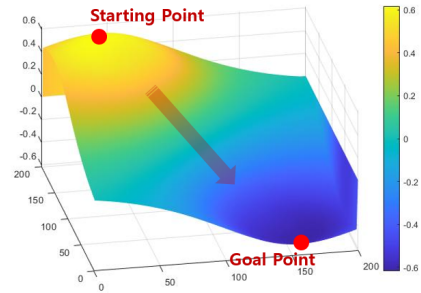


Fig. 5 Example of an attractive potential field, given a starting point and goal point

인력장은 무인수상선과 목표점(p_{goal}) 사이의 유클리드 거리 ($r_u(p)$)에 비례한 함수로 정의된다. 인력은 식 (5)로 표현할 수 있고 이때 K_{att} 는 인력에 대한(Attractive) 계수이다.

$$r_u(p) = \| p_{goal}(t) - p(t) \| \quad (4)$$

$$\vec{F}_{att}(p) = \frac{1}{2} K_{att} r_u(p) \quad (5)$$

무인수상선이 목표점에 도달하기 위해서는 Fig. 5와 같이 시작점이 가장 높은 포텐셜 값을 가지게 되고, 도착점이 가장 낮은 포텐셜 값을 가지게 된다.

척력장은 무인수상선과 장애물(p_{obs}) 사이의 유클리드 거리에 반비례한 함수로 정의되고 장애물은 속도를 가지지 않고 고정되어 있다. 척력은 식 (6)으로 표현할 수 있고 이때 K_{rep} 는 반발(Repulsive)에 대한 계수이다.

$$\vec{F}_{rep}(p) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\| p_{obs}(t) - p(t) \|} - \frac{1}{D_{rep}} \right)^2 & \text{if } \| p_{obs}(t) - p(t) \| \leq D_{rep} \\ 0 & \text{if } \| p_{obs}(t) - p(t) \| > D_{rep} \end{cases} \quad (6)$$

무인수상선이 장애물을 회피하는 유도명령을 생성하기 위해 Fig. 6과 같이 장애물이 존재하는 위치의 포텐셜 값이 높고, 나머지 부분은 낮은 포텐셜 값을 갖는 포텐셜 장의 구성이 필요하다. 이와같은 개념을 활용하여, 목표점과 장애물에 대한 고려를 각각 인력장과 척력장을 통해 구성한 포텐셜 장은 Fig. 7과 같이 인력장과 척력장의 합으로 표현된다.

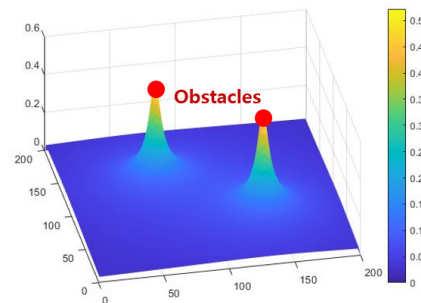


Fig. 6 Example of a repulsive potential field, given obstacles

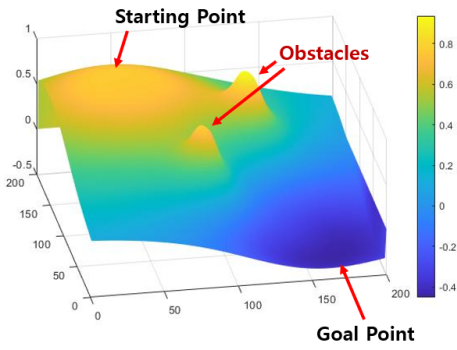


Fig. 7 Example of the total artificial potential field, given a starting point, goal point and obstacles

2.2 속도 장애물 기법

무인수상선의 군집 대형 제어에 널리 활용되는 포텐셜 필드 기법의 성능 향상을 위해 장애물과 목표점의 상대 속도에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서 상대 속도를 고려하기 위한 기법으로 로봇공학 분야에서 흔히 활용되는 Velocity Obstacle (VO) 기법을 활용한다. VO는 (Tychonievich et al., 1989)에 의해 조종판 (maneuvering board) 개념이 제안되었고 장애물의 크기와 속도를 기반으로 하여 충돌 가능성이 존재하는 영역인 collision cone 개념이 (Chakravarthy and Ghose, 1998)에 의해 제안되었다. 이러한 VO의 개념을 수학적 식으로 표현하면 다음과 같다 (Kuwata et al., 2013; Woo and Kim., 2020).

$$VO_B^A(\vec{v}_B) = \{ \vec{v}_A \mid \lambda(\vec{p}_A, \vec{v}_A - \vec{v}_B) \cap (\mathbf{B} \oplus -\mathbf{A}) \neq \emptyset \} \quad (7)$$

$$\lambda(p, v) = \{ p + tv \mid t \geq 0 \} \quad (8)$$

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \{ a + b \mid a \in \mathbf{A}, b \in \mathbf{B} \} \quad (9)$$

$$-\mathbf{A} = \{ -a \mid a \in \mathbf{A} \} \quad (10)$$

이때 \vec{v}_A 와 \vec{v}_B 는 Fig. 8과 같이 각각 A와 B의 속도 벡터를 나타내고 $\lambda(p, v)$ 는 p 위치에서 v 방향으로 향하는 직선이다. \oplus 은 식 (9)와 같이 Minkowski 연산을 표현하고 있고 식 (10)는 Reflection 연산을 나타낸다. 위 식들에 대한 기하학적 설명은 Fig. 8에 명시되어 있다.

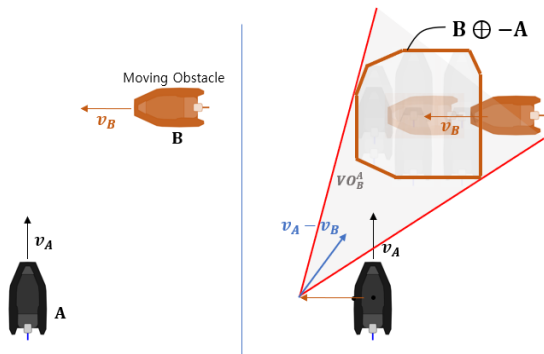


Fig. 8 Schematic representation of the concepts of VO and Minkowski sum

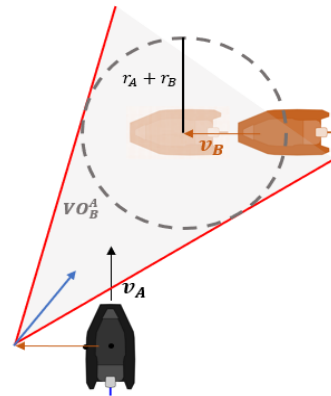


Fig. 9 Schematic for VOs with the assumption of circular objects

식 (7)의 A와 B를 원판으로 가정한다면 식 (7)은 다음의 식 (11)로 정의된다.

$$VO_B^A(\vec{v}_B) = \{ \vec{v}_A \mid \lambda(\vec{p}_A, \vec{v}_A - \vec{v}_B) \in D(\vec{p}_B - \vec{p}_A, r_{AB}) \} \quad (11)$$

이때 r_{AB} 는 A와 B의 반지름의 합이고, $D(\vec{p}_B - \vec{p}_A, r_{AB})$ 는 중심이 $\vec{p}_B - \vec{p}_A$ 이고 반지름이 r_{AB} 인 원이다. 식 (11)에 대한 기하학적 설명은 Fig. 9에서 확인할 수 있다.

2.3 상대속도를 고려한 포텐셜필드 기법

기존 포텐셜 필드 기법은 위치에 기반하여 유도 명령이 생성되기 때문에 무인수상선과 목표점이 이동하는 경우, 이들의 속도정보를 고려할 수 없다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 포텐셜 필드 기법에 상대 속도를 선제적으로 고려하는 유도 방법을 제안하였다. 무인수상선과 목표점 간의 상대속도는 인력, 척력 두 부분 모두에서 모두 고려되고 자세한 설명은 다음과 같다.

2.3.1 인력장에서 상대 속도를 고려한 목표점 생성

Leader - follower reference방식의 군집제어 기법에서 follower가 추종하는 목표점은 leader에 대한 상대좌표로 표현된다. 따라서, Follower의 목표점은 leader의 속도 및 각속도에 의해서 움직이는 목표점으로 정의되므로, 목표점의 속도에 대한 고려가 인력장의 생성에 필수적이다. 제안기법에서는 현재 leader의 상대좌표에 의해 계산된 목표점(p_{goal})이 아닌 목표점의 속도가 반영된 새로운 목표점(\hat{p}_{goal})을 추종하는 방식으로 Fig. 10과 같이 속도정보를 고려하고자 하였다. 이때 p_{goal} 는 식 (1), (2)로부터 정의된다. Leader의 위치 변화로 인해 p_{goal} 은 v_{goal} 이라는 속도가 발생하고 이 속도를 활용하여 식 (13)과 \hat{p}_{goal} 라는 가상의 위치를 계산할 수 있다. Leader의 현재위치에 의해 계산된 상대위치인 p_{goal} 대신, 현재 운동속도를 고려해 얻어진 \hat{p}_{goal} 를 추종함으로써, 무인수상선은 목표점의 속도가 반영된 선제적인 거

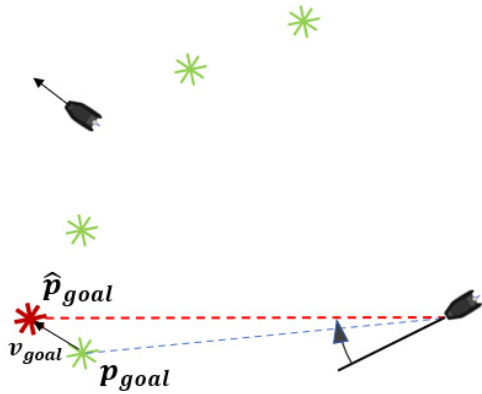


Fig. 10 Target point tracking method considering relative velocity

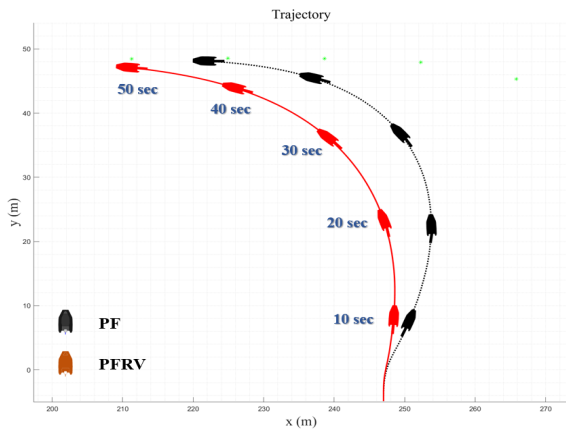


Fig. 11 Trajectory comparing the basic potential field (PF) and the potential field considering relative velocity (PFRV) in the attractive field

동을 취할 수 있게 되고 빠르게 변화하는 목표점에 대응할 수 있게 된다. 움직이는 목표점을 추종할 때 기존의 포텐셜 필드와 속도를 고려한 포텐셜 필드 기법을 비교하면 Fig. 11과 같이 제안 기법이 더 빠르게 목표점을 추종하는 것을 궤적을 통해 확인할 수 있다. 이는, 목표점의 속도성분을 선제적으로 반영하여 자신의 추종방향을 선정한 결과로 판단할 수 있다.

$$v_{goal} = [\tilde{p}_{x-goal} - p_{x-goal}, \tilde{p}_{y-goal} - p_{y-goal}] = [v_{x-goal}, v_{y-goal}] \quad (12)$$

$$\hat{p}_{goal} = \begin{cases} [x_1 + D_{f_l} \cos(\theta_L + \theta_{f_l}), y_1 + D_{f_l} \sin(\theta_L + \theta_{f_l})] & \text{if } p_{goal} = p_{f_l} \\ [x_1 + D_{f_r} \cos(\theta_L + \theta_{f_r}), y_1 + D_{f_r} \sin(\theta_L + \theta_{f_r})] & \text{if } p_{goal} = p_{f_r} \end{cases} \quad (13)$$

2.3.2 척력장에서 상대 속도를 고려한 장애물 생성

일반적인 포텐셜 필드기법을 활용할 때, 유도명령 생성 시 장애물의 현재 위치를 바탕으로 척력장을 생성하게 된다. 이러한 방법을 사용하게 되면 장애물이 움직이는 상황에서 장애물의 속도 성분을 고려할 수 없다는 한계가 존재한다. 단일 객체에 대한 장애물 회피를 수행할 경우에는, 척력계수를 높여 비교적 멀리 떨

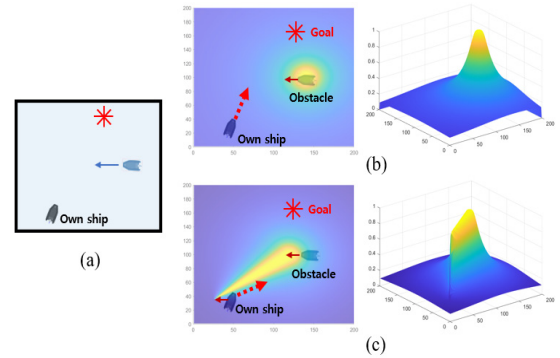


Fig. 12 Scenarios for validating the repulsive potential field and the corresponding potential field with respect to the methods. (a) Simulation a scenario where two ships cross (b) Repulsive field and desired course angle when using basic potential field (c) Repulsive field and desired course angle when using potential field considering relative velocity (proposed method)

어진 거리에서 장애물에 대해 인지하고 대비하도록 구성할 수 있지만, 다수의 무인수상선이 좁은영역에서 밀집되어 있는 군집운용 상황에서는 단순히 장애물의 척력계수를 높이는 방식으로 회피성능을 담보할 수 없다. 따라서 개별 장애물의 속도요소에 대한 고려를 수행하여 미래의 충돌 위험을 고려한 선제적 대응 방식이 필요하다.

본 연구에서 제안하는 기법인 속도를 고려한 포텐셜 필드를 척력장에서는 Fig. 12와 같이 정의한다. Fig. 12(a)와 같이 속도를 가지는 타선과 목표점이 존재한다고 하였을 때 기존의 포텐셜 필드는 Fig. 12(b)에서 위와 같은 포텐셜 필드와 유도 명령이 생성된다. 속도를 고려한 포텐셜 필드 기법은 Fig. 12(c)에서 아래와 같은 포텐셜 필드와 유도 명령이 생성된다. 타선의 속도를 고려했기 때문에 충돌 위험도를 고려하여 안전하게 피할 수 있는 유도 명령을 생성하게 된다. 앞서 2.3장에서 설명한 VO 기법에서 collision cone은 삼각형 모양의 형상으로 포텐셜필드가 형성되도록 포텐셜 장을 구성하였다. Collision cone을 표현하기 위해서는 효과적인 포텐셜 함수가 필요한데, 장애물로 인해 생성된 collision cone에 가까이 갈수록 높은 함수값을 가져야하고 멀리 떨어질수록 낮은 함수값을 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 Sigmoid 함수의 회전변환을 통한 방법으로 포텐셜 함수를 표현한다. 포텐셜 함수는 z축에 대한 함수값을 가져야하기 때문에 기본적인 sigmoid 함수에서 y축에는 독립적인 3차원 sigmoid 함수를 식 (14)와 같이 생성한다.

$$z(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (14)$$

이때 생성되는 collision cone의 각도에 따라 sigmoid 함수의 z축 기준 회전 각도가 달라질 수 있기 때문에 x-y 평면에서 회전변환이 필요하다. 회전변환에 대한 정의는 식 (15), (16)에서

확인할 수 있고 이때 X', Y', Z' 은 각각 회전변환 후의 좌표를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (16)$$

따라서 x, y 는 식 (17), (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \cos\theta \cdot X' + \sin\theta \cdot Y' \quad (17)$$

$$y = -\sin\theta \cdot X' + \cos\theta \cdot Y' \quad (18)$$

최종적으로 3차원 공간에서 삼각형 모양의 collision cone을 표현하기 위해 식 (19)과 같은 포텐셜 함수를 정의할 수 있다. (Kim, 2020) 이때 x_{vertex} 와 y_{vertex} 는 collision cone의 꼭지점의 x, y 좌표를 의미하고 a 와 b 는 각각 sigmoid 함수의 최대값과 기울기를 나타낸다. $a=1, b=1$ 이고 $x_{vertex}=0, y_{vertex}=0, \theta=30^\circ$ 일 때 포텐셜 필드는 Fig. 13과 같다.

$$PFRV(p_x, p_y) = \frac{a}{1 + e^{b[-(p_x - x_{vertex}) \cdot \cos\theta + (p_y - y_{vertex}) \cdot \sin\theta]}} \quad (19)$$

이와 같이 sigmoid 함수를 활용하였을 경우, $x-y$ 평면 기준으로는 직선의 형태가 생성되고 z 축 기준으로는 collision cone에 가까이 가는 경우에는 높은 값, 멀리 떨어진 경우에는 낮은 값의 포텐셜 함수가 정의된다. Collision cone의 삼각형 모양의 형상을 나타내기 위해 Fig. 14와 같이 장애물과 (x_{vertex}, y_{vertex}) 를 기준으로 하여 삼각형의 사이각(θ_{tan})을 도출하고 식 (20), (21)과 같이 Sigmoid함수의 회전변환 각도를 도출하여 두 개의 Sigmoid 함수를 중첩하여 삼각형 형태의 Collision cone을 생성할 수 있다. Collision cone 형태의 포텐셜 함수는 식 (22)와 같이 정의할 수 있고 포텐셜 필드에 대한 예시는 Fig. 15에서 확인할 수 있다.

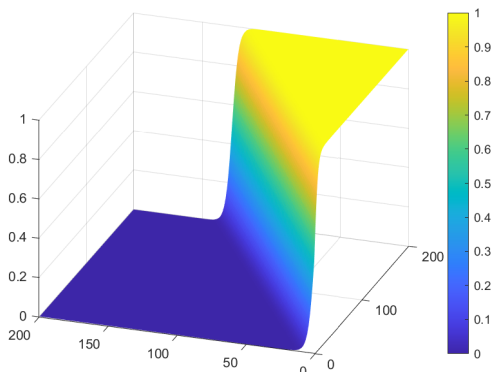


Fig. 13 Example of potential field using a sigmoid function

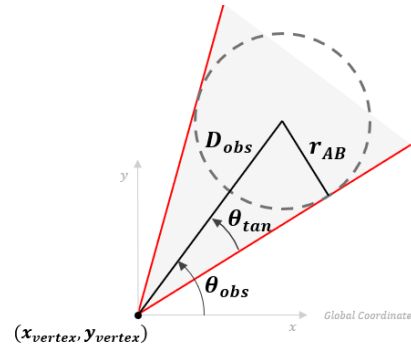


Fig. 14 Schematic diagram for the tangent angle of a collision cone

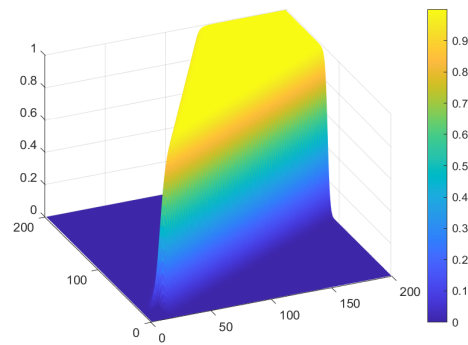


Fig. 15 Collision cone shaped potential field generated by using sigmoid function

$$\theta_{tan.min} = \theta_{tan} - \arcsin\left(\frac{r_{AB}}{D_{obs}}\right) \quad (20)$$

$$\theta_{tan.max} = \theta_{tan} + \arcsin\left(\frac{r_{AB}}{D_{obs}}\right) \quad (21)$$

$$PFRV'(p_x, p_y) = \quad (22)$$

$$\frac{a}{1 + e^{b[-(p_x - x_{vertex}) \cdot \cos\theta_{tan.min} + (p_y - y_{vertex}) \cdot \sin\theta_{tan.min}]}} - \frac{a}{1 + e^{b[-(p_x - x_{vertex}) \cdot \cos\theta_{tan.max} + (p_y - y_{vertex}) \cdot \sin\theta_{tan.max}]}}$$

3. 제언기법의 검증

제언기법에 대한 성능검증을 수행하기 위해, 본 연구에서는 군집 무인선의 대형제어에 대한 MATLAB기반 시뮬레이션을 수행하였다. 본 장의 3.1절, 3.2절에서는 시뮬레이션에 사용된 환경과 제어방법에 대하여 기술을 하고 있으며, 3.3과 3.4절에서는 각각 1:1 조우상황과 군집 대형제어 상황에서 제언기법의 성능검증을 수행하는 시뮬레이션 결과를 담고 있다. 3.5절에서는 실패역 검증실험에 대한 내용을 다루고 있다.

3.1 시뮬레이션 환경

군집 무인선박의 조종운동 제어를 위해 선박의 타(Rudder)와 선회각속도와의 관계를 간략하게 표현한 Nomoto의 K-T 모델에

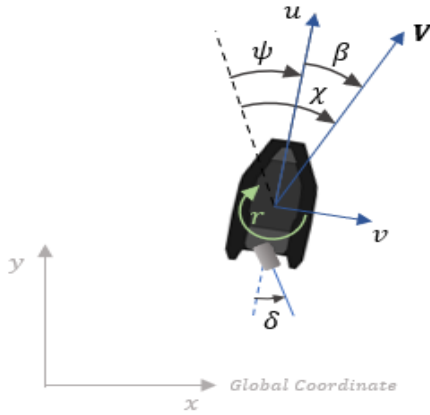


Fig. 16 Schematic depiction of a USV and definitions of sideslip and course angles.

선박이 선회할 때 발생하는 사이드슬립(sideslip)을 표현할 수 있는 Nomoto's Steering Model with Sideslip (Yu et al., 2008; Sonnenburg and Woolsey, 2013)을 동역학 모델로 활용하였다. Nomoto's Steering Model with Sideslip 모델은 다음의 식 (23)과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \dot{\chi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_\beta - a_\beta 1 + b_\beta \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi \\ \psi \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_r \end{pmatrix} \tilde{T} \delta + \begin{pmatrix} b_{\beta bias} \\ 0 \\ b_{r bias} \end{pmatrix} \quad (23)$$

이때 χ, ψ, r 은 각각 침로각, 선수각, 선수각속도를 의미하며, (Fig. 16) α_β 와 b_β 는 Sideslip angle β 에 대한 동역학 계수이고 $b_{\beta bias}$ 는 β 로 인해 발생하는 편향을 나타낸다. α_r 과 b_r 은 Nomoto 모델의 계수를 의미하고 $b_{r bias}$ 는 편향을 나타낸다. 이때 본 계수들의 수치는 (Sonnenburg and Woolsey, 2013)에서 제안된 계수를 활용하였다.

\tilde{T} 는 추력 T 에 대한 무차원화 값을 나타내는데, T 는 식 (24)와 같이 선박의 속도 v 와 프로펠러 회전수 δ_n 에 대한 함수로 정의된다. 이를 활용하여 무차원화된 추력 \tilde{T} 를 정리하면, \tilde{c} 와 \tilde{d} 로 정리할 수 있는데, 이때 Thruster 모델에 사용한 계수 \tilde{c} 와 \tilde{d} 는 각각 $\tilde{c} = -1.42 \times 10^{-4} (S^{-1} RPM^{-1})$, $\tilde{d} = 8.96 \times 10^{-7} (ms^{-2} RPM^{-2})$ 로, (Sonnenburg and Woolsey, 2013)의 논문을 참조하여 설정하였다. 식 (26), (27)은 각각 무인선박의 종방향 동역학을 나타내는 Speed model과 추진기 회전각 δ 에 대한 구동기 동역학 모델을 나타낸다.

$$T = c v \delta_n + d |\delta_n| \delta_n \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T} &= \frac{T}{m - X_u} \\ &= \frac{c}{(m - X_u)} u \delta_n + \frac{d}{(m - X_u)} |\delta_n| \delta_n \\ \text{where } \frac{c}{(m - X_u)} &= \tilde{c}, \quad \frac{d}{(m - X_u)} = \tilde{d} \end{aligned} \quad (25)$$

Table. 1 Main specifications of the USV used in simulation environment (Sonnenburg and Woolsey, 2013)

	Parameter [Unit]	Value
USV spec	Length [m]	4.8
	Breadth [m]	1.9
Thruster	Type	Azimuth
	Max angle [°]	±30
	Max horsepower [HP]	50
	Max Speed [knot]	20
Hull	Type	Mono Hull

$$\dot{u} = a_u u + \tilde{T} + b_{u bias} \quad (26)$$

$$\delta_t = \delta_{t-1} + H_r (\delta_{cmd} - \delta_{t-1}) \quad (27)$$

식 (27)의 H_r 은 구동기의 회전속도에 대한 매개변수로, 본 연구에서는 0.07로 정의하였다. 본 연구에서 활용한 대상선박의 제원은 Table. 1과 같으며, 파랑, 조류, 바람과 같은 환경외란은 고려하지 않았다.

3.2 제어기 설계

군집 선박의 대형 제어에서 움직이는 목표점에 대한 추종을 위해서는 속도와 선수각에 대한 제어가 요구된다. 속도 제어기는 움직이는 leader를 기준으로 생성되는 움직이는 목표점을 추종하기 위해 필요하다. Leader가 일정한 속도로 기동한다고 하더라도 선회하거나 대형이 변경되는 경우에 목표점의 속도나 자선과 떨어진 거리에 따라 선박이 추종해야 하는 속도가 달라진다. 마찬가지로 선박이 목표점에 근접했을 경우에도 선박이 목표점을 지나쳐 지나가지 않도록 제어가 필요하다. 본 연구에서 속도제어기는 leader를 기준으로 생성되는 움직이는 목표점을 기반으로 한 목표 속도(V_d)를 추종하는 것이다. V_d 는 각각의 목표점의 속도벡터와 떨어진 거리를 나타내며 leader의 거동에 따라 각기 다른 특성을 보인다. 예를 들어 leader가 선회를 하는 경우에 선회반경으로 가상의 원을 가정하였을 때 원의 중심에 가까운 목표점은 상대적으로 속도가 느려질 것이고 원의 중심에서 멀어지는 목표점일수록 속도가 빨라질 것이다. 이와 마찬가지로 군집선박이 대형을 변경하여 목표점의 위치가 갑자기 이동했을 경우 자선의 현재 위치와 목표점의 진행방향오차(Along Track Error, ATE)가 커지기 때문에 V_d 또한 커지게 된다. 이러한 목표 속도를 도출하였을 때 목표 속도와 자선의 속도의 오차를 활용하여 자선의 프로펠러 RPM 제어 명령을 계산한다. 목표 속도 V_d 의 계산은 다음 식 (30)과 같다.

$$e_{ate} = \frac{v_{goal} \cdot V_s}{r_u} \quad (28)$$

$$V_s = [p_x - p_{x,goal}, p_y - p_{y,goal}] \quad (29)$$

$$V_d = v_{goal} + K_D \tanh(K_c e_{ate}) \quad (30)$$

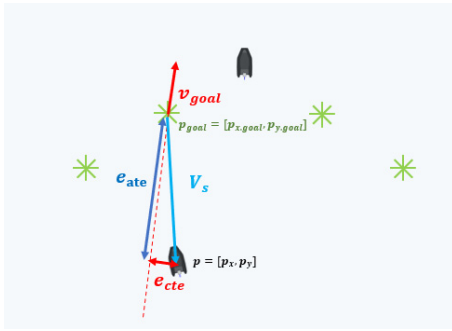


Fig. 17 Schematic of variables used in speed controller design

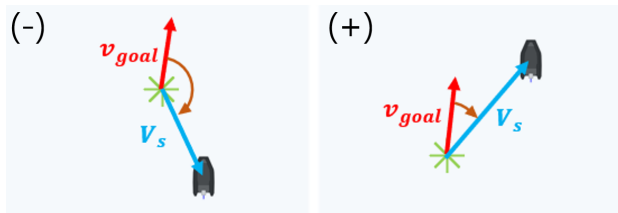


Fig. 18 Schematic explanation of the along track error sign in speed controller

e_{ate} 는 Fig. 17과 같이 목표점에 대한 follower의 진행방향오차 (along track error)를 의미한다. V_s 는 목표점에서 follower를 향하는 가상의 벡터로 follower가 목표점의 진행방향보다 앞서있는지 혹은 뒤쳐져 있는지 여부를 확인하기 위한 수학적 도구로 활용된다. Fig. 18에서 (a)와 같은 follower의 위치라면 v_{goal} 과 V_s 의 내적(dot product)은 두 벡터가 이루는 각이 90° 이상이기 때문에 음수를 가지게 되고 (b)와 같은 follower의 위치라면 두 벡터가 이루는 각이 90° 이하이기 때문에 양수를 가지게 된다. 이처럼 v_{goal} 과 V_s 의 내적을 통해 follower의 방향을 판단하고 e_{ate} 를 계산한다. K_D 와 K_c 는 상수로 이루어진 이득 값이다.

이렇게 생성된 목표 속도를 활용하여 속도제어에 대한 제어 명령을 생성한다. 식 (31)은 목표 속도와 follower의 속도 오차에 대한 정의이다. 생성된 e_v 를 활용하여 식 (32)와 같이 PD 제어기를 활용하여 속도에 대한 제어 명령을 생성한다. 이때 N_{Leader} 는 leader의 thrust propeller RPM으로 follower의 속도 오차가 적을 때 목표점을 추종할 수 있는 RPM을 유지해야하기 때문에 존재하고 K_n 와 D_n 는 상수로 이루어진 이득 값이다.

$$e_v = V_d - u \tag{31}$$

$$n_{cmd} = N_{Leader} + K_n e_v + D_n \dot{e}_v \tag{32}$$

다음으로 목표점을 향하기 위한 선수각(heading angle, ψ) 제어기는, 앞서 2.3 절에서 설명한 상대 속도를 고려한 포텐셜 필드 기법으로 목표 선수각을 도출할 수 있다. 이때 현재 선수각이 목표 선수각을 추종할 수 있도록 하기 위해 PD제어기를 활용한다. 따라서 선박의 선회 운동을 위한 제어 입력으로 δ_{cmd} 를 도출할 수 있고 식은 다음과 같다.

$$e_\delta = \psi_d - \psi \tag{33}$$

$$\delta_{cmd} = K_\delta e_\delta + D_\delta \dot{e}_\delta \tag{34}$$

3.3 단일 선박에 대한 시뮬레이션

무인수상선의 군집제어에 대한 시뮬레이션에 앞서, 제안기법의 성능확인을 위해 단일선박에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 검증용 시나리오는 두 척의 무인수상선이 교차하는 시나리오를 가정하였으며, 타선은 별도의 회피기동을 수행하지 않고 침로와 속도를 유지하며 자선을 횡단(crossing)하는 상황을 조우상황으로 설정하였다. 이때, 기존 포텐셜 필드 기법과 제안방식인 상대속도를 고려한 포텐셜 필드 기법을 바탕으로 해당 시나리오에 대한 충돌회피 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 19는 기존의 포텐셜 필드 기법으로 충돌 회피하며 이동하는 선박의 궤적을 나타내며 Fig. 20은 각 시간대 별 포텐셜 필드의 형상을 나타낸다. 이와 유사하게, Fig. 21과 Fig. 22는 동일 시나리오에 대하여 상대속도를 고려한 포텐셜 필드 기법을 적용한 결과를 나타내고 있다.

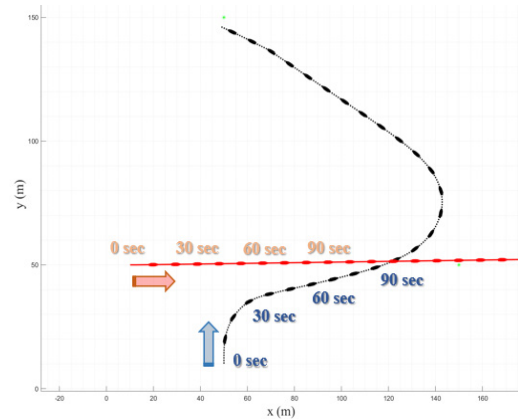


Fig. 19 Trajectory of cross over simulation using the conventional potential field

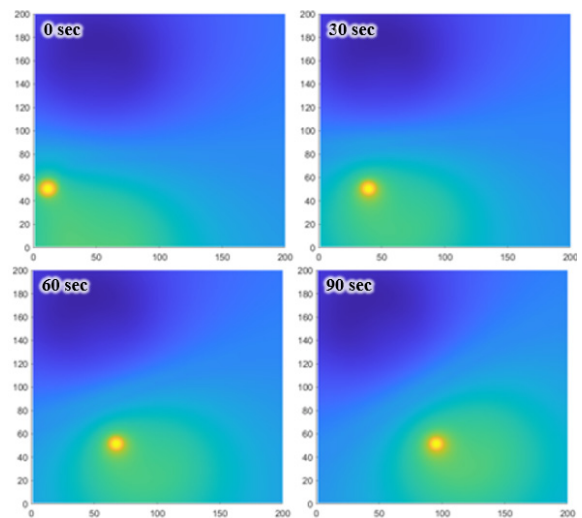


Fig. 20 Potential field of cross over simulation using the conventional potential field

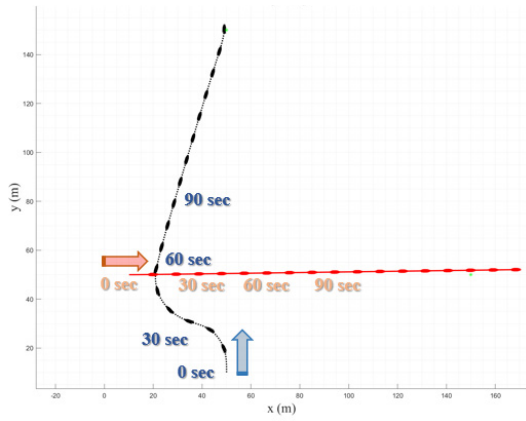


Fig. 21 Trajectory of cross over simulation using the relative velocity based potential field (proposed method)

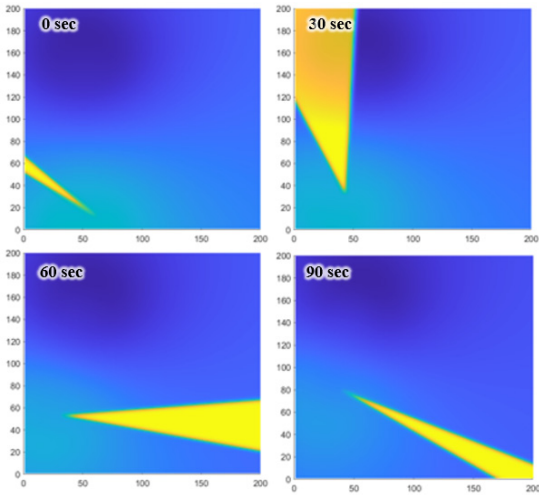


Fig. 22 Potential field of cross over simulation using the relative velocity based potential field (proposed method)

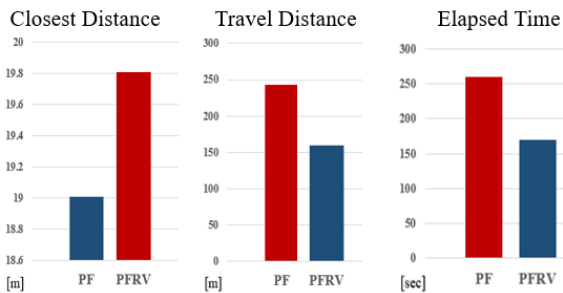


Fig. 23 Comparison of performance with conventional potential field and relative velocity based potential field (proposed method)

Fig. 19와 Fig. 21을 비교해 보았을 때 궤적의 차이로부터 알 수 있듯 속도를 고려한 포텐셜 필드의 경우, 타선의 미래 운동 방향을 고려하여 유도 명령을 생성하기 때문에 선박의 진행 방향의 반대방향으로 회피기동이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 타선의 운동속도정보를 활용하여 구성된 속도장애물 형상의 포텐셜

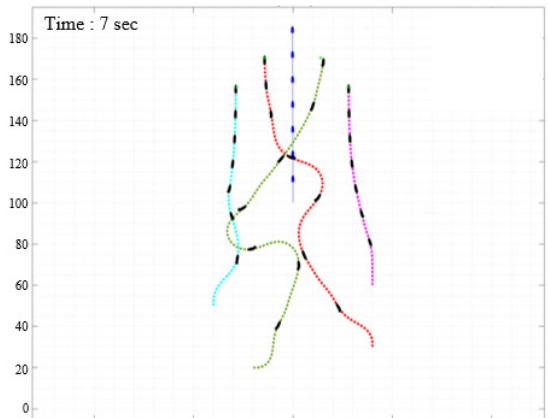
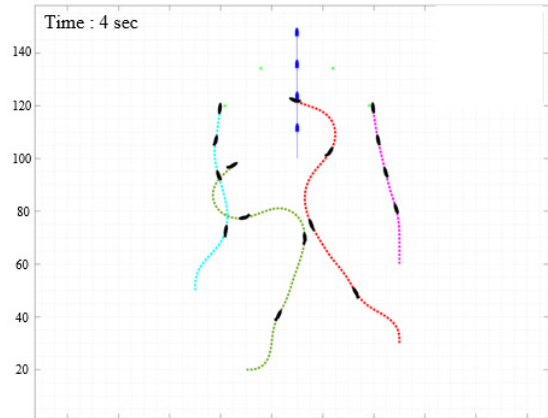
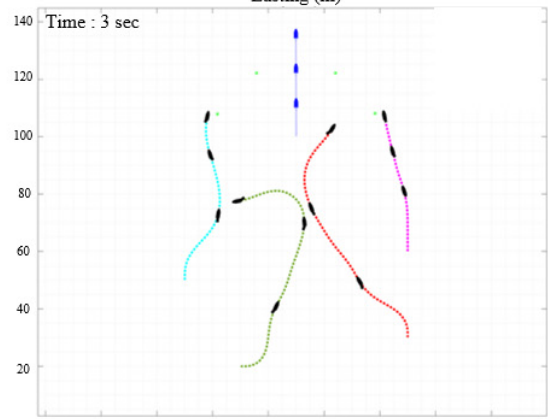
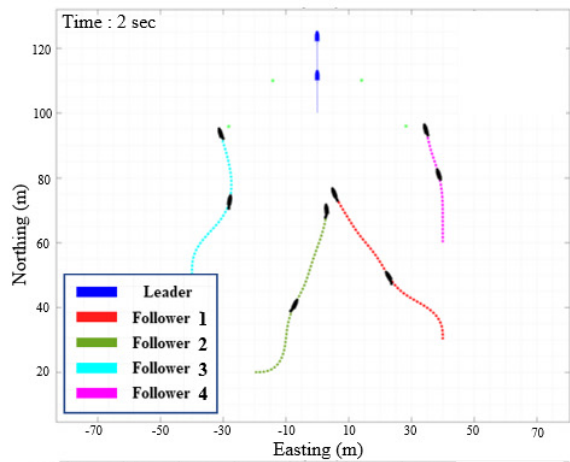


Fig. 24 Trajectory results of swarm control simulation using conventional potential field

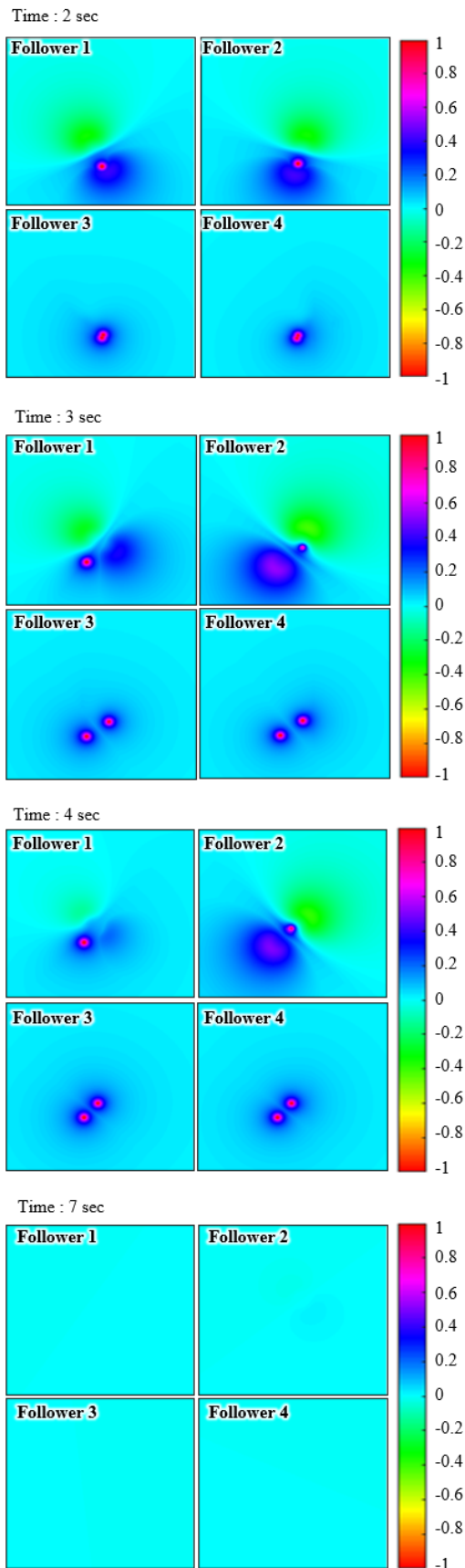


Fig. 25 Potential field of each follower USV during swarm control simulation using conventional potential field

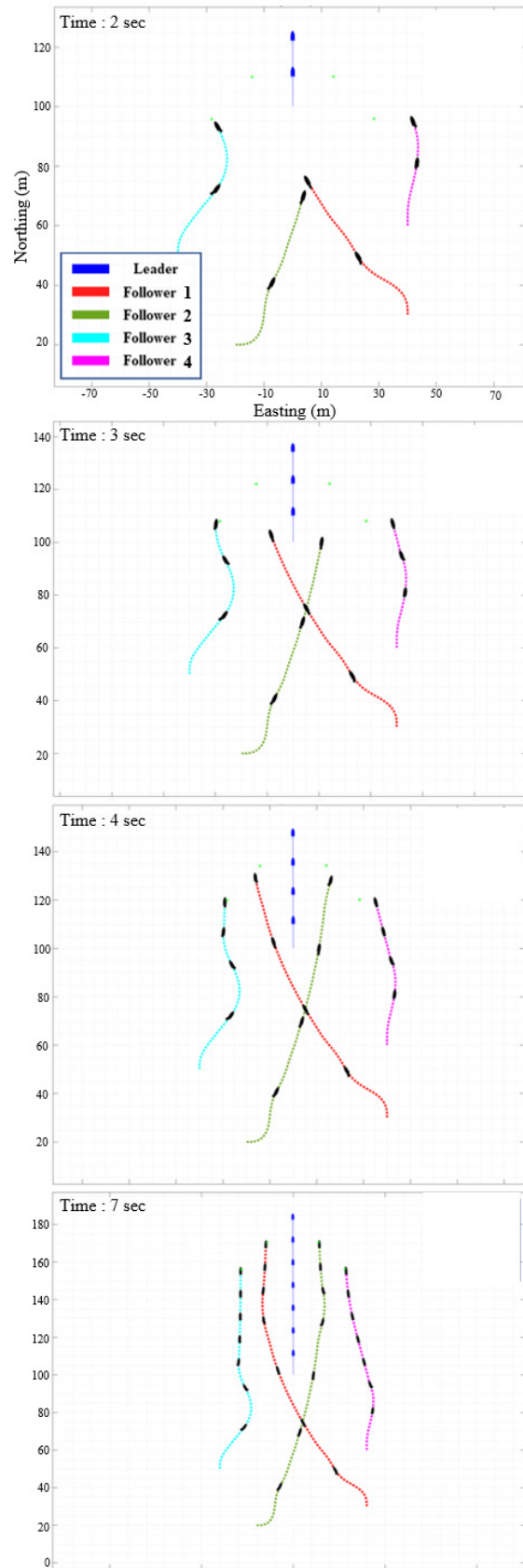


Fig. 26 Trajectory results of swarm control simulation using relative velocity based potential field (proposed method)

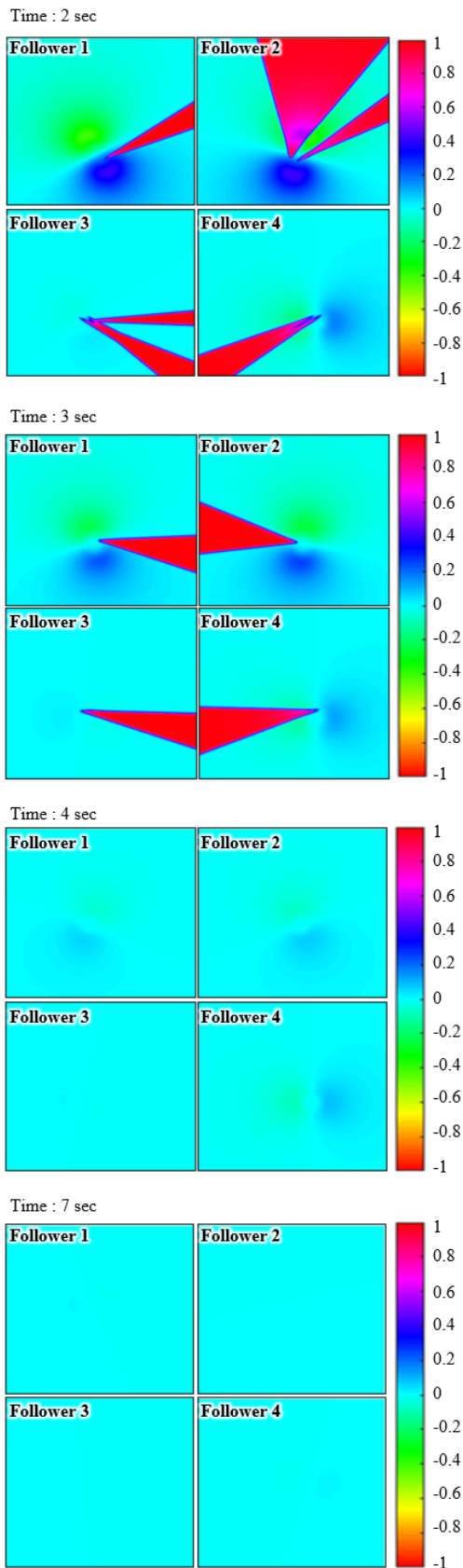


Fig. 27 Potential field of each follower USV during swarm control simulation using relative velocity based potential field (proposed method)

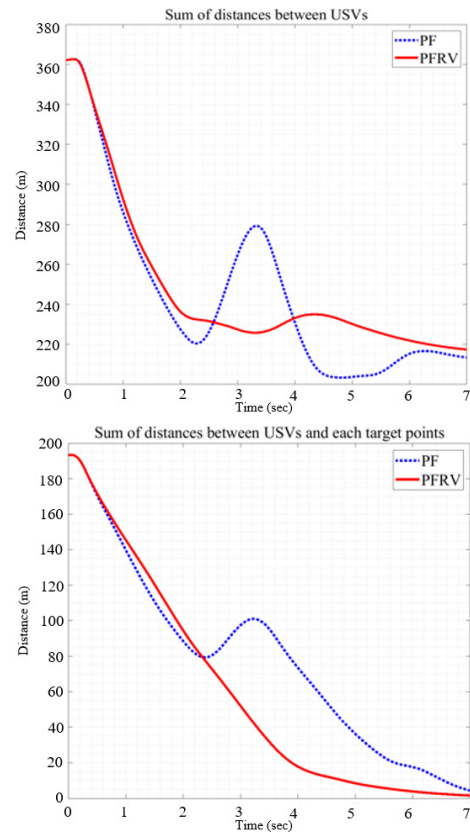


Fig. 28 Comparison result of the swarm control simulation results using the performance index i) sum of distances between USVs, ii) target distance error

필드가, 미래의 위험영역으로 무인수상선이 유도되는 것을 방지하기 때문에 발생한 결과로 볼 수 있다. 두 기법에 대한 시뮬레이션을 진행하였을 때 자선과 장애물인 타선이 가장 가까워지는 최근접 거리, 자선이 목표점에 도달하기 위한 이동거리와 도달시간이 Fig. 23에 표현되어 있다. 최근접 거리는 포텐셜 필드를 사용한 경우보다 제안방법을 사용한 경우가 더 크기 때문에 충돌 위험이 비교적 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 목표점에 도달하기 위한 시간과 이동거리가 기본적인 포텐셜 필드를 사용한 경우보다 상대 속도를 고려한 포텐셜 필드를 사용한 경우가 짧은 거리와 짧은 시간에 도착하기 때문에 보다 효율적인 경로를 생성하는 것을 확인할 수 있다.

3.4 다중 무인선에 대한 군집제어 시뮬레이션

다중 무인선간의 군집제어 성능에 대한 검증을 위해, 임의의 초기위치에서 wedge 대형으로 대형을 변경하는 시나리오에 대하여 시뮬레이션 검증을 수행하였다. 각각의 선박이 얽혀있는 초기위치에서 wedge 대형으로 위치를 변경하기 위해서는 주변의 타선들과의 충돌을 회피하며 개별 선박의 목표점을 추종해야 한다.

Fig. 24와 Fig. 26은 각각 기존 포텐셜필드 방법과 상대속도를 고려한 포텐셜필드를 적용한 군집제어 시뮬레이션 결과를 꺾은 형태로 나타내고 있다. 한 대의 leader USV와 이를 추종하는 4

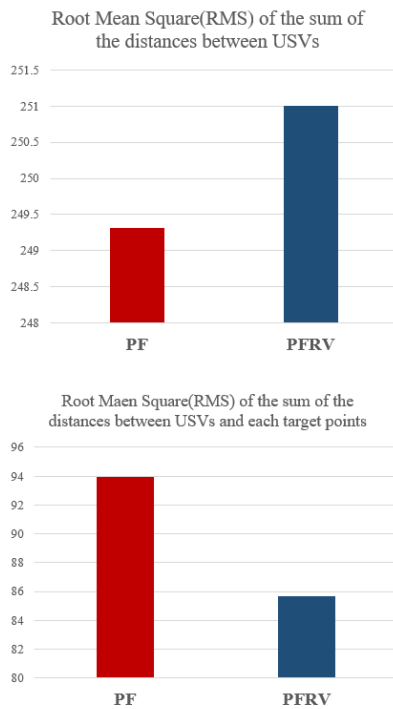


Fig. 29 RMS value of the performance index i) sum of distances between USVs, ii) target distance error during the swarm control simulation

대의 follower USV의 군집제어 상황을 시간별로 확인할 수 있다. USV의 속도는 20노트의 항주상황으로 정의하였고, 총 7초의 시간 동안 군집의 대형제어가 이루어지는 결과를 확인할 수 있다. 궤적에 대한 비교 결과, 기존 포텐셜 필드를 활용한 경우, 1번과 2번 follower USV간의 충돌이 예상됨에 따라, 이를 고려한 회피 기동이 반사적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 상대속도를 고려한 포텐셜 필드를 활용한 경우(Fig. 26), 사전에 인근 무인선의 속도정보가 고려되어, 예상되는 충돌경로를 초기부터 회피 함에 따라 Fig. 24에서 확인되는 급격한 회피기동이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 25와 Fig. 27은 각각 기존 포텐셜필드와 상대속도를 고려한 포텐셜필드 기법을 활용하였을 때, follower USV 각각의 포텐셜필드 상태를 나타내고 있다. Fig. 27의 경우 충돌원뿔(collision cone)형태의 포텐셜필드가 정의되어 상대속도가 고려되는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 25의 경우 단순 원형 형태의 포텐셜 필드가 정의되는 것을 확인할 수 있다.

각 기법을 활용한 군집제어 시뮬레이션에 대하여 성능분석을 수행하기 위해 i)무인선간 거리합과 ii)무인선-목표점과의 거리합 정보를 정량적 성능지표로 활용하여 분석해보았다. Fig. 28과 Fig. 29는 성능지표에 대한 시계열 데이터와 RMS값을 각각 나타내고 있다. Fig. 28의 위쪽 그림을 보면, 기존 포텐셜필드 기법을 활용하였을 때 상대속도를 고려한 경우에 비해 2초에서 4초 구간을 제외한 나머지 경우에서 모두 더 적은 거리를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 2초에서 4초 구간의 영역에서 무인선이 과도한 충돌회피를 수행하며 거리가 멀어진 결과로 볼 수 있으며, 나머지 영역에서는 기본적인 포텐셜 필드기법을 활용한 경우, 제안방

법을 활용하는 경우에 비해 무인선 군집의 밀집도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 28의 아래쪽 그림은 무인선과 목표점에 대한 거리오차를 나타내고 있는데, 2초~4초 구간에서 포텐셜필드를 활용하는 경우, 과도한 회피행위에 의해 추종오차가 오히려 커지는 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Root Mean Square(RMS)로 선박 사이의 거리를 비교해 보았을 때 상대 속도를 고려한 포텐셜 필드 기법이 251.0m로 기존의 포텐셜 필드 기법의 249.3m와 유사한 수준임을 있었다. 다만, 각 선박과 목표점 사이의 거리를 비교해보았을 때는, 기존의 포텐셜 필드가 93.9m이고 상대 속도를 고려한 포텐셜 필드가 85.7m로 제안기법을 사용한 경우 목표점과의 거리오차가 약 9% 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 복잡한 군집간 밀집상황에서, 기존 포텐셜필드에 비해 제안기법이 목표점을 보다 빠르게 추종하도록 유도할 수 있는 것을 보여준다.

3.5 실험역 검증

본 연구에서는 소형 무인수상선 플랫폼을 활용하여 제안 기법에 대한 실험역 검증 또한 수행하였다. 대상선박은 3척의 무인선박으로 leader 선박 1척, follower 선박 2척으로 구성되어 있다. 실험을 위해 제안 기법을 무인선의 자율제어 시스템에 탑재하였다. 실험역 실험은 한국해양대학교 내의 선착장인 아치나루터(Fig. 30)에서 수행하였으며, 실험에 활용한 leader 선박과 follower 선박의 제원은 아래와 같다. (Fig. 31, Table 2)

무인수상선의 위치와 자세를 계측하기 위해 각 선박에 GPS 및 자세센서를 탑재하였고 임무수행을 위한 계산과 제어명령을 계산하기 위한 연산장치를 탑재하였다. 각 무인수상선 간의 통신은 Wifi모듈을 활용하여 무선네트워크 망을 구성하였고, 각각의 정보 교환은 ROS 미들웨어를 활용하였다. Fig. 32는 군집선 시스템의 정보 흐름도를 표현하고 있다.

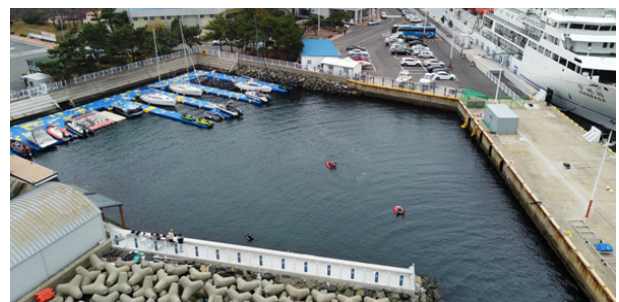


Fig. 30 Experimental environment - Korea Maritime and Ocean University Arch marina



Fig. 31 Leader and follower USV used in experiment

Table 2 Main specifications of the USV for the test

	Parameter [Unit]	Leader USV	Follower USV
USV Spec	Length [m]	1.2	1.45
	Breadth [m]	0.59	1.2
	Height [m]	0.4	1
	Weight [kg]	21	55
	Thruster [EA]	5	2
Hull	Type	Catamaran	Monohull
Speed	Max speed [knot]	4	4

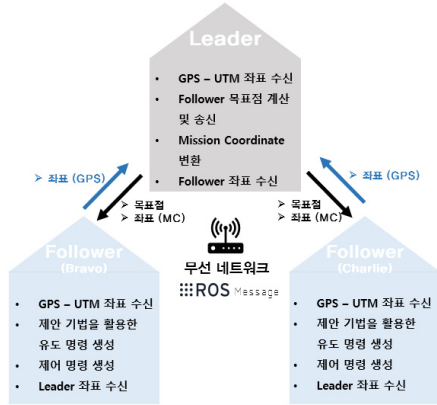


Fig. 32 Schematic diagram of system flow of swarm USVs

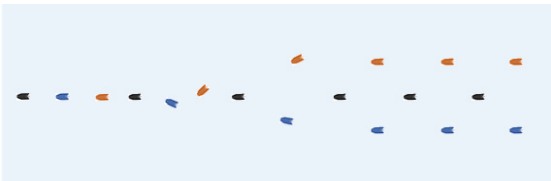


Fig. 33 Schematic diagram of the Scenario for changing from Wedge formation to Row formation

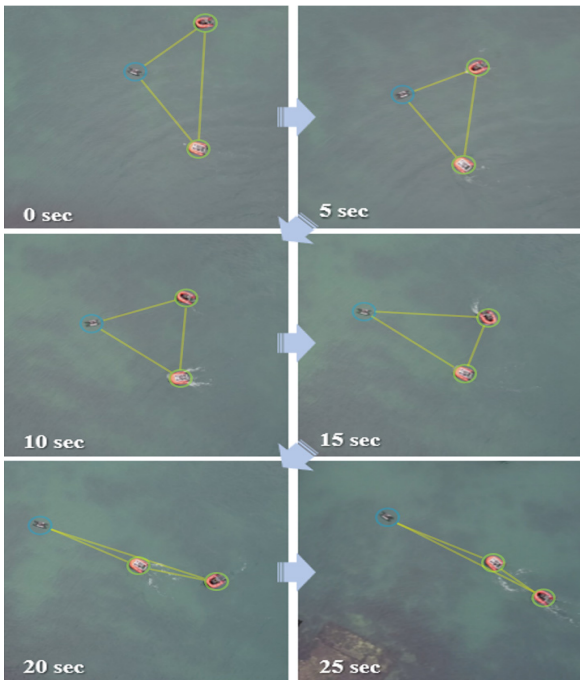


Fig. 34 Experimental results of the USVs swarm control test

실해역 검증은 leader선박이 2노트의 속도로 전진할 때, 제안 기법을 활용하여 Fig. 33과 같은 wedge 대형에서 종대형으로 대형을 변경하는 시나리오에 대해서 이루어졌다. Fig. 34는 실해역 검증의 결과를 나타내고 있는데, 군집제어 실험이 진행됨에 따라 wedge 대형에서 종대형으로 무인수상선의 대형이 변경되고 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 군집 무인수상선의 자율운항을 위한 대형 제어 기법을 제안하고 시뮬레이션과 실선 실험을 통해 성능을 검증하였다. 최근 군집 무인선의 대형 제어 연구에 널리 활용되는 포텐셜 필드 기법은 목표점이나 장애물의 위치정보만을 활용하는 기법이기에 움직이는 개별 군집 무인수상선의 속도정보를 고려할 수 없다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 목표점과 장애물의 속도정보를 위치정보와 함께 고려하여 보다 효율적이고 안정적인 대형 제어 기법을 제안하였다.

제안 기법을 통하여 포텐셜 필드에서 인력장으로 표현되는 목표점의 속도를 고려함으로써 역동적으로 기동하는 leader 선박에 대해 효과적으로 대응이 가능함을 확인하였다. 목표점의 속도를 고려한 인력장을 생성하여 leader 선박의 기동에 선제적으로 대응함으로써 목표점에 대한 추종을 기존의 포텐셜 필드 기법보다 추종시간을 단축하며 효율적인 기동을 수행하는 것을 확인하였다. 이와 더불어, 장애물의 속도를 고려한 척력장을 생성함으로써 미래의 장애물의 거동이 고려된 유도 명령을 생성할 수 있게 하였다.

이러한 장점들을 통해 기존의 포텐셜 필드 기법과 제안기법을 비교해 보았을 때, 제안기법이 목표점에 도달하는 시간과 경로의 거리에서 이득을 취할 수 있었고 마찬가지로 장애물을 회피하는 경우에도 장애물과 자신의 최소거리가 멀어지게 되고 충돌회피 경로 또한 단축되는 효과를 갖는 것을 확인하는 등 제안기법이 포텐셜 필드 기법에 비해 높은 효율성과 안전성을 갖는 현상을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 시뮬레이션과 더불어 수행한 실선실험을 통해서도 실제 환경에서도 제안기법을 통한 군집 대형제어가 안정적으로 이루어지는 결과를 확인할 수 있었다.

현재 수행된 연구는 다소 단순한 경로에 대한 무인수상선의 군집제어에 대한 검증이 이루어졌다. 군집제어에 대한 보다 현실적인 검증을 위해서는 향후 보다 복잡하고 역동적인 상황에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보여진다.

후 기

이 논문은 i) 2020학년도 한국해양대학교 신진교수 정착연구 지원사업 연구비와, ii) 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0017006, 2024년, 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구임

References

- Balch, T. and Arkin, R.C., 1998. Behavior-based formation control for multirobot teams, *IEEE transactions on robotics and automation*, 14(6), pp.926–939.
- Barnes, L., Field, M. and Valavanis, K., 2007. Unmanned ground vehicle swarm formation control using potential fields, *2007 Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, 2007*.
- Barnes, L., Alvis, W., Fields, M., Valavanis, K., and Moreno, W., 2006. Swarm formation control with potential fields formed by bivariate normal functions, *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation. IEEE, 2006*.
- Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Gasparri, A., Priolo, A., and Zereik, E., 2014. Swarm-based path-following for cooperative unmanned surface vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 228(2) pp.192–207.
- Borenstein, J. and Koren, Y., 1989. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots, *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics* 19(5) pp.1179–1187.
- Borenstein, J., and Koren, Y., 1991. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots, *IEEE transactions on robotics and automation*, 7(3), pp.278–288.
- Chakravarthy, A. and Ghose, D., 1998. Obstacle avoidance in a dynamic environment: A collision cone approach, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 28(5), pp.562–574.
- Cui, R., Ge, S.S., How, B.V.E. and Choo, Y.S., 2010. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, 37(17–18), pp.1491–1502.
- Ge, S.S. and Cui, Y.J., 2002. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method, *Autonomous robots* 13.3 (2002), pp.207–222.
- Ghommam, J. and Saad, M., 2017. Adaptive leader-follower formation control of underactuated surface vessels under asymmetric range and bearing constraints, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), pp. 852–865
- Kania, E.B., 2019. *Chinese military innovation in artificial intelligence*. Testimony to the US-China Economic and Security Review Commission.
- Khatib, M., and Chatila, R., 1995. An extended potential field approach for mobile robot sensor-based motions, *Proc. International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS'4)*, 1995
- Kim, J.W., 2020, *Local path planning for autonomous vehicles based model predictive control using velocity obstacles potential field in emergency situation*, M.S. Korea Institute of Science and Technology.
- Ko, N.Y. and Lee, H.B., 1996. Avoidability measure in moving obstacle avoidance problem and its use for robot motion planning, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'96*, Vol. 3
- Kuwata, Y., Wolf, M.T., Zarchitsky, D and Huntsberger, T.L., 2013. Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), pp.110–119.
- Leonard, N.E. and Fiorelli, E., 2001. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)*, IEEE, pp.2968–2973.
- Lewis, M.A. and Tan, K.H., 1997. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous robots*, 4(4), pp.387–403.
- Oh, Y.S., Park, J.H., Kim, J.H. and Huh, U.Y., 2011. Formation control and obstacle avoidance of mobile robot for moving object tracking, *Journal of Electrical Engineering and Technology(JEET)*, 6(4) pp.856–861.
- Park, J.H. and Huh, U.Y., 2015. Obstacle avoidance of leader-follower robots based on potential field and flexible formation. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. pp.1389–1390.
- Park, J.H., Lee, Y.J., Jung, J.D., Kang, M.J. Choi, H.T. and Choi J.W., 2021, Preliminary study of potential field based formation control for cooperative navigation of multiple autonomous surface vehicles, *Institute of Control Robotics and Systems*, pp.290–291.
- Rimon, E. and Koditschek, D.E., 1992. Exact robot navigation using artificial potential functions, *IEEE Transactions on Robotics And Automation*, 8(5), pp.501–518.
- Sadowska, A., den Broek, T. V., Huijberts, H., van de Wouw, N., Kostić, D., and Nijmeijer, H., 2011. A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling. *International Journal of Control*, 84(11), pp.1886–1902.
- Son, N.S., Han, J.W., Pyo, C.S. and Park, K.R., 2020. On the sea surveillance and illegal ship control by using unmanned surface vehicle swarm. *Society of Naval Architects of Korea*, 2020.
- Sonnenburg, C.R. and Woolsey, C.A., 2013, Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(3), pp. 371–398.

Sun, Z., Zhang, G., Lu, Y. and Zhang, W., 2018. Leader-follower formation control of underactuated surface vehicles based on sliding mode control and parameter estimation. *ISA transactions*, 72, pp.15–24.

Tak, M.H., Joo, Y.H., 2014. Formation control algorithm for swarm robots using virtual force. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(10), pp. 1428–1433.

Tychonievich, L., Zaret, D., Mantegna, J., Evans, R., Muehle, E., and Martin, S., 1989. A maneuvering-board approach to path planning with moving obstacles, *Proceedings of the 11th international joint conference on Artificial intelligence*, Vol.2, pp.1017–1021.

Ulrich, I. and Borenstein, J., 1998. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 98CH36146). Vol. 2.

Woo, J.H. and Kim, N.K., 2020. Collision avoidance for an unmanned surface vehicle using deep reinforcement learning, *Ocean Engineering*, 199 (2020): 107001.

Yu, Z., Bao, X. and Nonami, K., 2008. Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors. *Journal of System Design and Dynamics*, 2(1), pp.389–400.

