



Received: 2019/11/12
Revised: 2019/12/21
Accepted: 2020/02/06
Published: 2020/03/19

***Corresponding Author:**

Shin-Bae Park

Maritime Technology Research Institute, Agency for
Defence Development, Seoul, Republic of Korea

Tel: [REDACTED]

Fax: +82-55-540-3737

E-mail: psb7006@naver.com

다수 해양무인이동체의 자율운항을 위한 다중장애물 충돌회피 군집제어 알고리즘 연구

A Study on the Formation Control Algorithms of Multi-Obstacles Collision Avoidance for Autonomous Navigation of Swarm Marine Unmanned Moving Vehicles

박신배^{1*}, 박종호²

¹(재)국방과학기술연구소 해양기술연구원 책임연구원

²하버드대학교 MGH 센터 Post-doc. 특별연구원

Shin-Bae Park^{1*}, Jong-ho Park²

¹Researcher, Marine Technology Research Institute, Agency for Defense
Development

²Post-doctoral fellow, MGH center for Cancer Immunology Cutaneous Biology
Research, Harvard University

Abstract

본 논문에서는 다수의 무인기, 무인수상정, 무인지상차량, 무인로봇 같은 군집 무인이동체의 자율운항을 위한 여러 종류의 군집제어 알고리즘 적용을 기술한다. 행동기반 군집제어는 각각의 무인이동체들이 목표를 달성하기 위해 분산형 시스템에 적용된다. 가상구조 군집제어는 모든 무인이동체들이 중앙통제에 의해서 제어된 중앙집중형 시스템에 적용되며, 마지막으로 선도-추종 군집제어는 분산형과 중앙집중형의 혼합형이다. 다중장애물이 있는 경우와 없는 운영 환경에서 다수 무인이동체들의 자율운항에 대해 3종류의 행동기반, 가상구조, 선도-추종 군집제어 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

This paper presents three kinds of formation control algorithms for autonomous navigation of swarm shape unmanned moving vehicles(SUMVs) such as unmanned air vehicles(UAVs), unmanned surface vehicles(USVs), unmanned ground vehicles(UGVs) and robots,. The ability and efficiency of SUMVs systems depend on the functions of the single vehicles and the control structure. Behavior-based strategy is used for decentralized system to accomplish its individual goal. Virtual structure is an example of control strategy for a centralized system, where a central unit is controlling the motion of all SUSVs in the system. Leader-follower strategy is a hybrid of centralized and decentralized systems. The results of this study can be applied to the autonomous navigation system design for swarm maritime unmanned system of our project in near years. The simulation results of behavior based, virtual structure, and leader-follower formation control for autonomous navigation of swarm unmanned moving vehicles with and without multi-obstacles in dynamic environment are shown.

Keywords

Marine Unmanned Moving Vehicle(해양무인이동체), Behavior Based(행동기반), Virtual Structure(가상구조), Leader-Follower(선도-추종), Formation Control(군집제어), Collision Avoidance(충돌회피), Unmanned Surface Vehicle(무인수상정), Unmanned Ground Vehicle(무인지상차량), Multi-Obstacles(다중장애물)

본 논문은 해군과학기술학회 2019년 추계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

1. 서론

해양무인이동체는 무인수상정(USV), 무인잠수정(UUV), 웨이브글라이더(wave glider), 수중글라이더(sea glider), 원격조종체(ROV) 등이 있으며, 이들은 여러 가지 목적으로 다양하게 개발되고 있다.

군사용으로 활용하기 위한 해양무인이동체는 민수용이나 군수용이나 크게 다르지 않다. 다만, 수행하는 임무에 따라 다르게 분류된다. 최근에는 단일 해양무인이동체를 운용하는 개념에서 다수의 해양무인이동체를 군집으로 운용하여 단일 해양무인이동체로 수행할 수 없는 복잡한 임무를 가능하게 하는 군집 해양무인이동체에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

군집 해양무인이동체를 활용하기 위한 핵심은 자율운항기술이며 최근에는 인공지능 또는 기계학습을 통한 지능형 기술개발에 초점을 맞추고 있다. 다수의 무인수상정이나 무인잠수정 같은 군집 해양무인이동체는 안전하게 자율운항하기 위해 다중장애물과의 충돌회피, 자체충돌방지, 조류에 대한 극복, 높은 해상상태에서 운용가능성 등 복잡한 해양환경을 고려하여 최적 운항조건을 도출하는 것은 중요하며 이를 설계하고, 알고리즘을 구현하기 위해서는 고려해야 할 사항들이 많다.

본 연구에서는 실제 복잡한 해양 운용환경에서 다수의 해양무인이동체들이 자율운항할 때 다중장애물이 존재하는 경우 이를 안전하게 충돌을 회피하면서 이동하는 여러 종류의 군집제어 알고리즘을 설계하고, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 평가한다.

2. 다수 해양무인이동체의 군집제어 알고리즘

다수의 무인이동체들은 군집무인기, 군집무인차량, 군집로봇, 군집무인수상정, 군집무인잠수정 등 육·해·공 모든 분야에서 활용되고 있으며, 이들은 각각의 상호협력에 의하여 하나의 공통 임무를 달성하는데 효과적이다. 이들의 활용은 군집형상으로 복잡한 운용환경에서 안전하게 목표지점까지 자율적으로 운항하며, 스스로 주변 상황을 인지하고, 다중장애물을 회피하면서 이동하기 위해서는 많은 지능형 자율운항기술들이 필요하다. 특히, 다수의 무인체계가 무리를 지어 일정한 군집형상을 유지하고, 하나가 고장이 발생하여도 다른 대형을 유지하면서 이동하기 위한 군집제어 알고리즘이 중요하다.

일반적으로 군집제어 알고리즘은 크게 행동기반, 가상구조, 선도-추종 3가지로 분류할 수 있다. 다수 무인이동체가 목적지까지 자율운항할 때 다중장애물이 존재하는 경우 군집형상을 유지하고 최적의 경로계획에 따라 이동할 수 있는 군집제어 알고리즘을 구현하기 위해 시뮬레이션 아키텍처를 설계하였으며, 전체 시뮬레이션 아키텍처 유용도는 아래 그림과 같다.

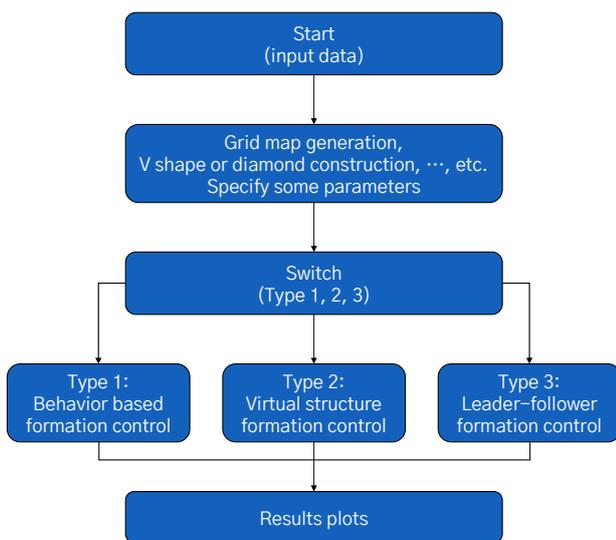


Fig. 1. The flowchart for simulation design architecture of formation control for swarm UMVs

Fig. 1에서 본 바와 같이 3가지 종류의 군집제어 알고리즘은 다수의 해양무인이동체가 자율운항할 때 필요한 핵심기술로서 컴퓨터 계산흐름도를 보여주고 있다. 우선, 시뮬레이션을 위한 초기입력 데이터를 정의하고, 이를 기반으로 격자좌표계를 생성한다. 이때 격자좌표계에 장애물을 추가할 수 있도록 하였다. 또한, 각각의 군집제어 계산에 필요한 인자들을 입력하고, 원하는 군집제어 알고리즘을 선택하도록 하였다. 행동기반, 가상구조, 선도-추종 3종류의 군집제어는 각각 Type 1, 2, 3으로 구분하여 선택적으로 시뮬레이션하도록 구현하였다.

본 연구에서는 다수 무인이동체들이 출발점에서 목표점까지 자율운항할 때 이동 경로에 다중장애물이 있는 경우와 없는 경우를 시뮬레이션하여 3종류의 군집제어 알고리즘에 대해 설계를 하였다.

2.1 행동기반 군집제어 알고리즘 설계

일반적인 군집무인차량, 군집무인로봇이나 군집 무인수상정 등(이하 군집 무인이동체라 칭함)에 모두 적용 가능한 2차원 운용환경을 고려하여 다수 무인이동체들이 군집형상이나 편대를 이루면서 이동할 때 필요한 군집제어 알고리즘을 설계한다.

먼저, 행동기반 군집제어 방법은 각각의 무인이동체들 $UMV_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 에 의해서 수행된 전체행동이 여러 개 부분행동의 조합으로 구성된다. 행동기반 군집제어는 수식으로 표현하기 어렵기 때문에 실제 적용에서는 무인이동체들 각각 행동의 크기와 방향으로 구성된 벡터 형태로서 정해진다. 동일한 행동의 벡터 가중치는 군집제어 인자들을 조정함으로써 변경할 수 있다. 주변 환경으로부터 탐지된 정보를 기반으로 군집 무인이동체들은 적당한 행동을 선택하게 되며, 선택된 행동에 따라 이동명령(속도, 방향)이 생성된다, 따라서, 전체 군집제어 벡터는 부분 행동벡터의 총합으로 다음과 같이 정의된다.

$$V_{direction} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $[f_1, f_2, f_3, f_4, f_5]$ 은 무인이동체들의 각 행동벡터의 가중치로서 고려한 제어 인자들이고, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 는 각각 부분 행동 벡터들이다.

2.2. 가상구조 군집제어 알고리즘 설계

가상구조 군집제어 알고리즘을 구현하기 위해 무인이동체의 운동방정식을 간단히 나타내고, 수학적으로 표현하기 위해 (x, y, θ) 좌표계를 적용한다. 여기서 (x, y) 는 위치 좌표이고 θ 는 선수각이다. 무인이동체의 속도는 (v, ω) 이고, v 는 선속도, ω 는 각속도이다. n 개로 구성된 군집 무인이동체들을 $i = 1, 2, \dots, n$ 이라 하면 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos(\theta_i) \\ \dot{y}_i &= v_i \sin(\theta_i) \\ \dot{\theta}_i &= \omega_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, (x_i, y_i) 는 지구고정좌표계(X_E, Y_E)에 대한 물체고정 좌표계인 무인이동체의 무게중심 좌표이고, θ_i 는 지구고정좌표계 X_E -축에 대한 물체고정좌표계와 무인이동체 선수각 사이의 헤딩각이다. v_i 와 ω_i 는 각각 선속도와 각속도이다.

가상구조 군집제어 방법은 모든 무인이동체들 UMV_i ($i = 1, 2, \dots, n$)에 대한 지배방정식 (1)과 동일한 추가적인 가상의 무인이동체를 도입하여 $(n+1)$ 대의 군집 무인이동체로 이루어진다. 이러한 가상구조의 무인이동체는 군집형상의 중앙에 위치한다고 가정한다. 가상구조의 중심점은 실제 군집형상의 기하학적 중심일 필요는 없고, 특별한 적용을 위해 가상구조의 중심으로서 고려한 점이다. 가상구조의 중심 위치와 방향에 기반해서 군집형상에 있는 무인이동체의 원하는 위치는 국소 좌표계로 주어진 가능한 시간 변화 경계좌표에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$p_i(t) = (p_x(t), p_y(t))^T \quad (3)$$

방향이 일치하는 가상구조 무인이동체와 관련된 국소 좌표계 (x_{vc}, y_{vc}) 로 나타낸다.

군집제어 문제를 해결하기 위해서 가상구조가 미리 설정된 궤적 $(x_{vc}^d, y_{vc}^d, \theta_{vc}^d)$ 을 따라 이동하는 것이 필요하다. 여기서, (x_{vc}^d, y_{vc}^d) 는 원하는 군집형상의 직교좌표이고, θ_{vc}^d 는 원하는 가상구조 군집형상의 선수각이다. 모든 무인이동체들은 원하는 군집형상의 $p_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 에서 정의된 주어진 공간패턴을 유지한다. 이와 같은 각 무인이동체들의 행동은 다음과 같은 근사 등식이 성립하는 요구조건을 만족하게 된다.

$$\begin{pmatrix} x_i(t) \\ y_i(t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_i^d(t) \\ y_i^d(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기서, (x_i^d, y_i^d) 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} x_i^d &= x_{vc}^d + p_{xi} \cos(\theta_i^d) - p_{yi} \sin(\theta_{vc}^d) \\ y_i^d &= y_{vc}^d + p_{xi} \sin(\theta_i^d) + p_{yi} \cos(\theta_{vc}^d) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 다수 무인이동체들의 원하는 궤적은 지구고정좌표계로 나타내고 특별한 가상구조와 군집형상에 대해서 원하는 궤적을 결정할 수 있다.

2.3 선도-추종 군집제어 알고리즘 설계

여기서는 다수의 무인이동체들이 자율운항으로 안전하게 목적지까지 이동할 때 원하는 군집형상을 유지하기 위한 선도-추종 군집제어 2가지 방법을 다룬다. 첫 번째 $d - \phi$ 제어기는 선도와 추종 무인이동체 사이의 원하는 거리만큼 떨어지고 일정한 각도를 유지하는 제어방법이고, 두 번째 $d - d$ 제어기는 1대의 선도 무인이동체로부터 2대의 추종 무인이동체를 분리하는 제어방법이다.

각 무인이동체들은 선수와 선미 중심축으로부터 일정한 거리만큼 떨어져서 좌현과 우현에 설치된 2축 추진방식의 추진기에 의해 기동한다고 가정한다. 이때 각 무인이동체들 UMV_i 의 운동은 계산을 간단히 하기 위해 질점 운동방정식을 적용하면 식 (2)와 같다.

3. 다수 해양무인이동체의 군집제어 시뮬레이션

3.1 행동기반 군집제어 알고리즘 시뮬레이션

행동기반 군집제어 방법은 다수의 무인이동체를 통제하기 위해 적용되는 대표적인 분산형 군집제어 방법이다. 이 방법은 경로계획이나 응답을 생성하기 위한 이유가 없다. 가장 큰 장점은 무인이동체 간에 통신손실이 없다는 것이고 단점은 수학적 해석이 복잡하고 원하는 군집 대형을 유지할 수 없다.

Fig. 2는 장애물이 없는 경우 5대의 무인이동체가 목적지까지 자율운항하면서 이동하는 행동기반 군집제어 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림에서 본 바와 같이 5대의 무인이동체들은 이동 초기 군집형상이 최적경로를

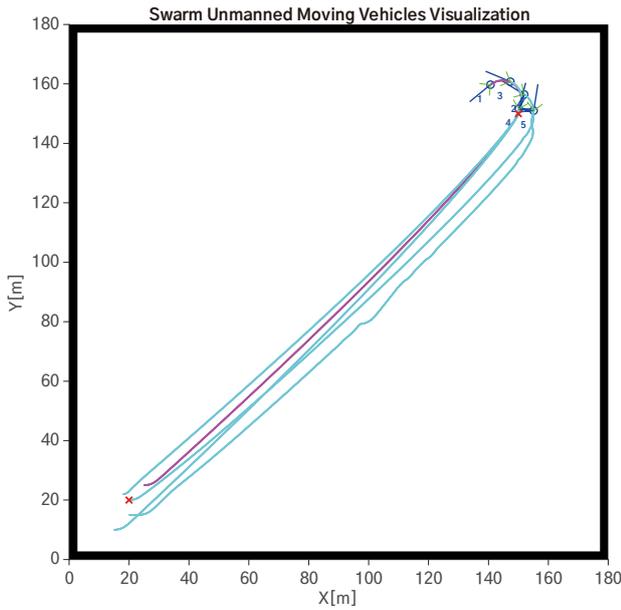


Fig. 2. The trajectory of behavior based formation control for autonomous navigation of 5 UMVs without obstacle

생성하면서 최종 목적지에 도달할 때까지 초기의 군집형상을 거의 그대로 유지한 것을 볼 수 있다.

Fig. 3는 5대 군집 무인이동체들의 이동 경로에 다중장애물이 있는 경우 각각의 무인이동체가 목적지까지 자율운항한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 자율운항 중 다중장애물을 충돌회피하면서 이동한 것을 볼 수 있으며, 이는 각 무인이동체들 사이의 자체 충돌을 방지하면서, 목적지까지 도달하는 행동기반 군집제어 알고리즘을 적용한 결과이다. 이 알고리즘은 각자의 모든 무인이동체들이 동일한 센서와 무장을 탑재하였다고 가정하고, 각 무인이동체들은 질점운동방정식을 적용하였다. 해양환경 같은 다양한 조건을 반영하기 위해 이동 경로 여러 지점에 섬과 같은 다중장애물이 존재한다고 가정하였으며, 시뮬레이션의 편의를 위해 랜덤하게 주어진다.

3.2 가상구조 군집제어 알고리즘 시뮬레이션

가상구조 군집제어 알고리즘은 각 무인이동체가 하나의 강체(rigid body)로서 원하는 군집 대형을 이루는 1세트의 제어기를 고려한다. 이 방법의 주요 장점은 다중 규칙이나 거동이 필요하지 않기 때문에 하나의 수학적 규칙을 전체 센서 입력으로 고려할 수 있다. 또한, 가상구조로 구현한 군집형상은 벡터 연산을 적용하여 혼합할 수 있다. 이러한 가상구조 군집제어의 강건성이나 해의 안정성 같은 특성들은 물리적으로 이론적 도구나, 제어이론, 그래프이론 등을 이

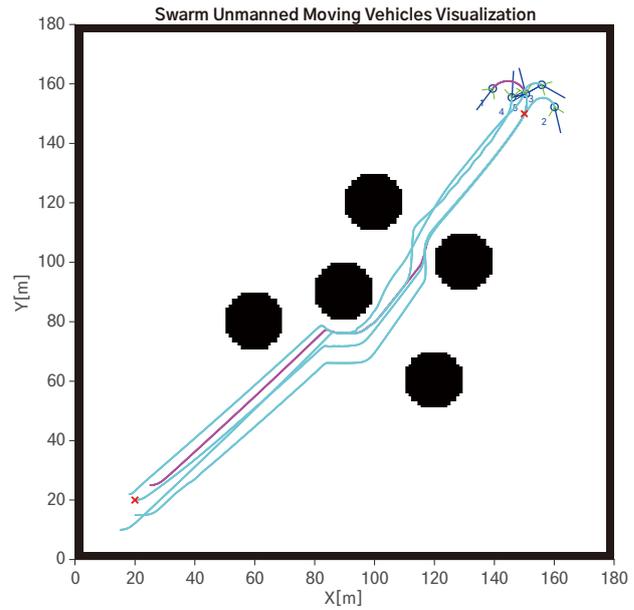


Fig. 3. The trajectory of behavior based formation control for autonomous navigation of 5 UMVs with 5 obstacles

용하여 증명할 수 있는 장점이 있다. 또한, 가상구조 기반 군집제어 알고리즘은 다수 무인이동체에 필요한 협력 임무를 설계하는데 종종 적용된다.

Fig. 4는 이 방법의 주요 장점은 다중 규칙이나 거동이 필요하지 않기 때문에 하나의 수학적 규칙을 전체 센서 입력으로 고려할 수 있다. 또한, 가상구조로 구현한 군집형상은 벡터 연산을 적용하여 혼합할 수 있다. 이러한 가상구조 군집제어의 강건성이나 해의 안정성 같은 특성들은 물리적으로 이론적 도구나, 제어이론, 그래프이론 등을 이용하여 증명할 수 있는 장점이 있다. 또한, 가상구조 기반 군집제어 알고리즘은 다수 무인이동체에 필요한 협력 임무를 설계하는데 종종 적용된다.

Fig. 5는 가상구조 군집제어 방법으로 다수 무인이동체의 이동 경로에 다중장애물이 있는 경우 목적지까지 안전하게 자율적으로 이동한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 다중장애물이 있는 경우 충돌회피하면서 이동하는 시뮬레이션은 Fig. 4의 시뮬레이션 입력조건과 동일하며, 단지 5개의 다중장애물을 랜덤하게 배치한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 다수 무인이동체들 사이에는 가상구조로서 일정한 거리와 각도를 유지한 군집형상을 구성하고, 가상구조의 군집 중심은 5각형의 중심점이며 군집형상을 유지하면서 이동한 결과이다. 이는 다중장애물과 자체 내부충돌을 방지하면서, 목적지까지 도달하는 가상구조 군집제어 알고리즘을 적용한 결과이다. 이 알고리즘은 각자의 모든 무인이동체에 서로 다른 센서와 무장을 탑재하였

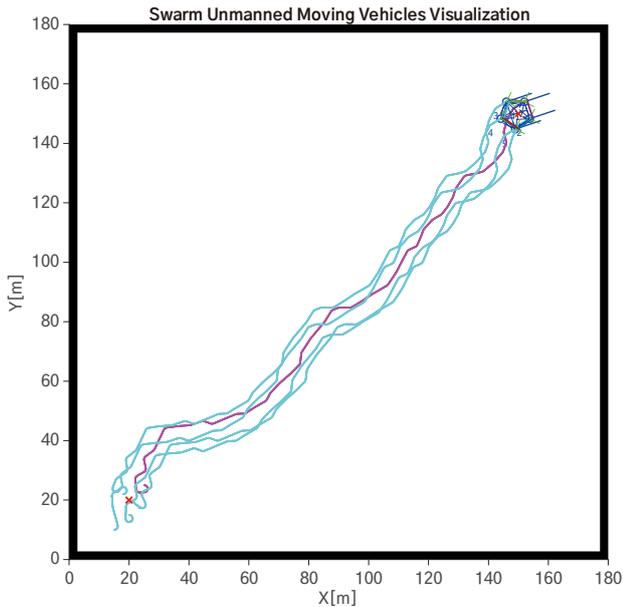


Fig. 4. The trajectory of virtual structure formation control for autonomous navigation of 5 UMVs without obstacle

다고 가정하고, 서로 다른 정보를 교환하면서 이동하며, 가상구조의 중심점은 장애물의 충돌회피와 관련이 없으며, 단지 군집형상을 유지하기 위한 구심점이다. 그림에서 본 바와 같이 5각형으로 구성된 가상구조는 초기 운항상태의 군집형상이 이동하면서 그 형상유지가 가능하기 때문에 각각의 무인이동체가 서로 협력 운용하는 가장 큰 장점이 있다. 그러나 가상경로를 생성하는 데 컴퓨터 계산시간이 많이 소요된다.

3.3 선도-추종 군집제어 알고리즘 시뮬레이션

선도-추종 군집제어 방법은 선도 무인이동체가 미리 설정된 이동궤적을 따라 이동하면, 추종 무인이동체들이 선도과 일정한 상대 거리와 선수각을 유지하면서 이동한 것이다. 이 방법의 장점은 이해하고 구현하기가 쉬운 반면에 선도 무인이동체가 고장이 발생하면 군집형상 전체가 통제되지 않기 때문에 가장 큰 약점이 될 수 있다. 또한, 무인이동체의 운용 대수가 증가하면, 군집형상의 유지가 어렵고 추종 무인이동체에서 선도 무인이동체로의 피드백이 안 된다. 즉, 선도 무인이동체가 너무 빨리 이동하면, 추종 무인이동체가 따라가면서 장애물 충돌회피가 어려워 군집형상을 유지할 수 없다. 또 다른 단점은 선도 무인이동체가 고장이 발생하여 이동하지 못하면 모든 추종 무인이동체도 이동할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 선도-추종 무인이동체가 다중장애물을 충돌회피할 수 있

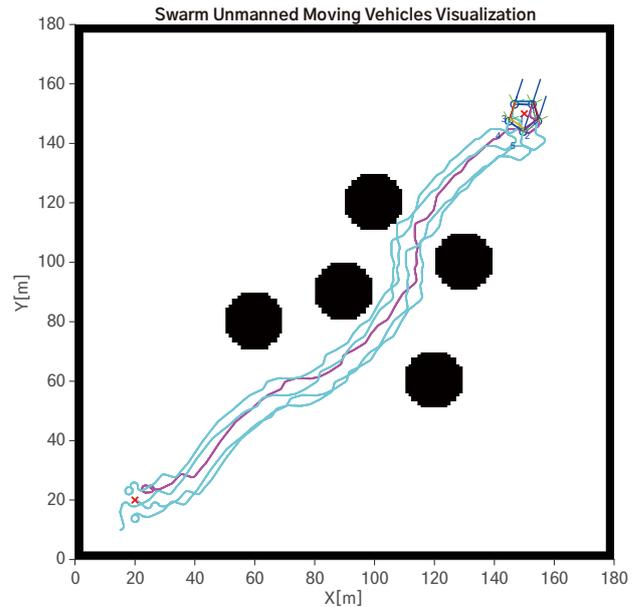


Fig. 5. The trajectory of virtual structure formation control for autonomous navigation of 5 UMVs with obstacle

는 알고리즘을 설계하고 구현하였다.

Fig. 6는 5대의 무인이동체가 목적지까지 자율적으로 안전하게 이동하는데 중간에 장애물이 없는 경우의 선도-추종 군집제어 방법으로 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 그림에서 본 바와 같이 군집형상은 V-자형으로 1대는 선도 무인이동체이고 4대는 추종 무인이동체들로 구성되며, 선도 무인이동체는 보라색으로 표현하고, 추종 무인이동체들은 하늘색으로 표현하였다. 5대의 무인이동체가 이동하면서 거의 V-자형의 군집형상을 유지한 것을 볼 수 있다. 이는 선도와 추종 무인이동체 사이의 상대 거리와 방위각을 거의 일정하게 하고, 속도를 제어함으로써 가능하게 된다.

선도 무인이동체는 센서와 무장 탑재하고, 추종 무인이동체들은 선도 무인이동체와 달리 센서 일부만 탑재하고 다른 무장을 탑재할 수 있으며, 이동하는데 필요한 모든 정보는 선도 무인이동체에서 제공하고 서로 공유하면서 이동한다.

Fig. 7은 5대의 무인이동체가 목적지까지 자율적으로 안전하게 이동하는데 중간에 장애물이 있는 경우의 선도-추종 군집제어 방법으로 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 본 바와 같이 이동 경로 중간에 다중장애물이 5개가 있는 경우에도 V-자형의 군집형상을 유지하면서 이동한 궤적을 보여주고 있으며, 중앙의 다중장애물을 회피하면서 군집형상을 유지하고 있다. 이는 Fig. 6에서 장애물이 없는 경우의 시뮬레이션 조건과 모두 동일하며 다중장애물

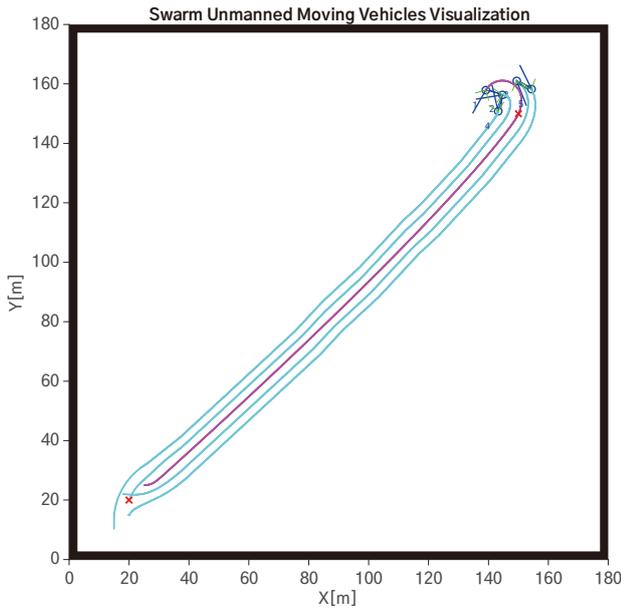


Fig. 6. The trajectory of leader-follower formation control for autonomous navigation of swarm UMVs without obstacle

애물이 존재하여도 군집형상을 유지하면서 장애물을 잘 회피하는 결과를 보여주고 있다. V-자형의 초기 입력조건은 임의로 랜덤하게 주어지며, 이동하면서 V-자형의 군집형상을 유지하도록 하였다.

4. 결론

미래 해양무인체계는 4차 산업혁명 기반 군집제어기법의 신기술을 접목한 새로운 개념의 군집 무인체계로서 이를 이용한 다양한 종류의 작전개념을 도입한 네트워크 중심전이 미래 전쟁의 중요한 핵심요소가 될 것이다. 미래 해양전투에서 군집 무인체계의 필요성과 역할이 꾸준히 늘어날 것으로 예측되며 관련 소요기술이 개발되는 정도에 따라 무기체계 개발에 적극적으로 반영될 것이다.

본 논문에서는 다수의 무인이동체를 대상으로 자율화 수준을 높이고 운용의 효율성을 증대하기 위해 운용환경과 유사한 시뮬레이션 계산영역을 설정하고, 행동기반, 가상구조, 선도-추종 군집제어 알고리즘을 설계하였다. 또한, 이러한 알고리즘들의 성능을 평가하기 위해 5대로 구성된 군집 해양무인이동체들이 출발점에서 목적지까지 안전하

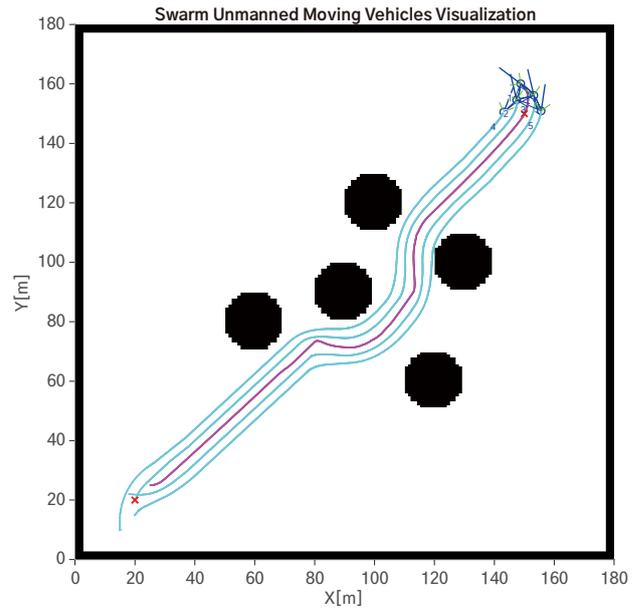


Fig. 7. The trajectory of leader-follower formation control for autonomous navigation of swarm UMVs without obstacle

게 자율운항할 때 이동 경로에 장애물이 존재하는 경우와 존재하지 않는 다양한 경우를 시뮬레이션하여서 하였다. 이동 경로에 다중장애물의 존재 여부와 관계없이 본 연구에서 제안한 선도-추종 군집제어 알고리즘이 가장 효과적인 방법이다.

참고문헌

[1] Park Shin Bae, Kim Won Jae and Kim In Hack, "A Study on the Concepts of Integrated Operation and the Military Applications for Swarm Unmanned Maritime System", Proceedings of the Annual Autumn Conference, SNAK, Gyeongju, 24-25 October, 2019. pp.204-207.
 [2] 박신배, "군집 무인수상정의 지능형 자율운항시스템 충돌회피 알고리즘 연구", 2019 한국군사과학기술학회 추계학술대회 : 해양무기체계부분, pp.300-301.
 [3] 박신배 외, 2019. 군집 해양 무인로봇의 자율운항을 위한 3차원 장애물 충돌회피 알고리즘 연구, 한국해군과학기술학회 2019 추계학술대회 논문집, Navy Hotel (Seoul), 4-6 December, pp.1-4.
 [4] 박신배, 2019. 무인수상정 기술개발현황 및 향후 발전계획, 제5회 한국해군-국방과학연구소 해양기술연구원 기술교류회 세미나, 해양기술연구원(Jinhae), 16 December, pp.1-57.