



Received: 2024/11/22
Revised: 2024/11/26
Accepted: 2024/12/26
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Dooyoung Kim

Dept. of Artificial Intelligence, Republic of Korea
Naval Academy

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-5624

E-mail: dykim07@navy.ac.kr

무인수상정 회수를 위한 자율 경로 생성: 포텐셜 필드 기반 접근법

Path Planning for Autonomous Unmanned Surface Vehicle Recovery: A Potential Field Approach

김두영*

해군 소령/해군사관학교 인공지능학과 부교수

Dooyoung Kim*

LCDR, ROK Navy/Associate Professor, Dept. of Artificial Intelligence,
Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 논문에서는 무인수상정의 자율 회수를 위한 모함 접근경로 생성 방법을 제안한다. 제안한 방법은 회수지점에서의 인력과 모함의 양 함미에 배치된 가상 장애물에서 발생하는 척력을 이용하여 경로를 계획한다. 시뮬레이션을 통해 무인수상정이 안전하게 회수지점에 도달하기 위한 신뢰할 수 있는 경로를 생성하는 것을 확인하였다.

This paper proposes a method for planning the approach path of a mothership to autonomously retrieve an unmanned surface vehicle (USV). The proposed approach uses attractive forces towards the recovery point and repulsive forces generated by virtual obstacles placed at both sterns of the mothership to plan the path. Simulations confirmed that the method generates a reliable path for the USV to safely reach the recovery point.

Keywords

무인수상정(Unmanned Surface Vehicle),
포텐셜 필드(Potential Field),
경로 계획(Path Planning),
자율 선박(Autonomous Ship),
유·무인 복합(Manned-Unmanned Teaming)

1. 서론

최근 들어 무인수상정(USV, unmanned surface vehicle)의 군사적 활용이 널리 연구되고 있으며, USV의 실전 적용 사례 또한 증가하는 추세이다. 특히 소형 USV는 개발 및 운영 비용, 피탐지율 등의 측면에서 대형 함정 대비 이점을 가지기 때문에 더욱 활발하게 개발되고 있다. 특히 단순한 무인화를 넘어서, USV가 스스로 임무를 수행하는 자율화에 관한 연구가 확산되고 있다[1,2].

이러한 장점에도 불구하고, 소형 USV는 크기 상의 제약으로 인해 작전 지속능력, 내파성 및 탐지성능이 부족하여 USV의 작전 반경 확대를 위해서는 모함의 지원이 필요하다. 이에 따라, 각국에서는 유·무인 복합(MUM-T, manned-unmanned teaming) 개념에 따라 함탐재형 USV를 전력화하기 위하여 노력하고 있다. 대형함 기반의 모함을 기반으로 작전을 수행하는 USV는 모함의 탐지 성능, 전투체계 연산능력의 지원으로 다양한 작전 수행이 가능하며, 특히 모함으로부터 보급을 통해 작전 지속능력이 향상되는 이점이 있다[1].

모함 기반의 자율 USV 운영을 위해서는 모함과 USV의 진수 및 회수 능력이 필수적이다. 특히 USV의 회수는 진수보다 어려운 과정으로 접근 침로, 속력 등 접근 절차를 준수하여야 한다. 반대로 안전을 위해 경로가 너무 길어지면 적의 위협에 노출되는 시간이 증가한다. 따라서, 무인수상정의 자율화를 위해서는 안전하고 빠른 접근경로를 생성하는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 모함을 기반으로 운용되는 자율형 USV의 회수를 위한 접근경로 생성 기법을 제안한다. 이를 위해 포텐셜 필드(potential field)[3-5]를 기반으로 하여 목표 회수지점에 접근하는 인력장을 생성하고, 회수지점에서의 모함과 USV의 접근 침로를 일치시키기 위해 가상의 장애물을 함미 좌우에 배치하여 척력장을 생성하는 방법을 고안하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 USV의 회수 문제를 정의한다. 다음으로 포텐셜 필드를 이용한 회수 경로 생성 방법을 제시한다. 이후 제안한 기법의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 통해 경로를 생성하여 도식화하였다. 끝으로 결론과 향후 연구 방향을 제시하였다.

2. 포텐셜 필드 기반 접근경로 생성 기법

2.1 문제 정의

Fig. 1은 주어진 문제를 도식화한 그림이다. 모함 M 의 USV 회수지점을 G , USV C 의 최초 위치를 C_0 라 정의한다. h_M 과 h_C 는 각각 모선과 USV의 침로를 나타내며, θ 는 그 사잇각이다. O_f 는 USV의 충돌을 방지하고 침로를 유도하기 위한 가상의 장애물이다.

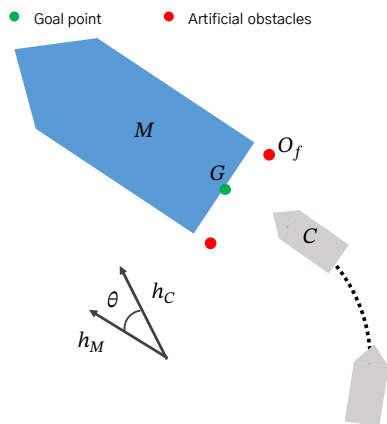


Fig. 1. Concept of USV approaching

문제의 가정은 다음과 같다. (1) 모함은 조류를 함수의 전방으로 받는 침로를 유지하며 속력은 0이다. (2) USV는 등속력으로 이동한다. (3) USV는 모함의 함미 인근 회수 구역까지 이동을 완료하였다고 가정한다.

이때, 문제의 목표는 출발점 C_0 에서 출발한 C 의 최

종 위치 C_T 가 G 에 근접함과 동시에 $\|\theta\|_2^2$ 가 최소화되는 경로를 생성하는 것이다. 이는 식 (1)과 같다.

$$\operatorname{argmin}_{\tau \in (t_0, T)} \|C_T - G\|_2^2 + \alpha \|\theta\|_2^2 \quad (1)$$

위 식을 만족하는 경로를 구하기 위해 본 논문에서는 포텐셜 필드[3-5]를 사용하였다. 포텐셜 필드는 장애물이 존재하는 환경에서 목표점에 도달하기 위한 경로를 생성하는 대표적인 알고리즘으로, 목표점으로 이끌려가는 인력장(attraction field)과 장애물에 반발하는 힘인 척력장(repulsion field)으로 구성된다.

2.2 인력장

위치 C_i 에서의 인력은 USV와 회수지점 사이의 유클리드 거리에 비례한 함수로 식 (2)와 같이 구한다.

$$F_a(C_i) = \frac{1}{2} K_a \|G - C_i\|_2^2 \quad (2)$$

여기서, K_a 는 인력의 세기를 표현하는 인력계수이다.

본 논문에서의 인력장은 영역 내 모든 위치에서의 인력을 구한 2차원의 행렬 형태로 표현한다. 식 (2)에 따라 USV와 회수지점 간 유클리드 거리가 멀수록 인력의 크기가 커지며, 두 거리가 동일한 상황에서는 K_a 값이 클수록 인력의 크기가 크다. 인력장의 각 지점에서 인력의 기울기 값이 가장 큰 방향이 USV가 회수지점에 도달하기 위한 이동 방향이 된다.

2.3 척력장

위치 C_i 에서 임의의 장애물 O 에 의해 발생하는 척력 F_r 은 식 (3)과 같다.

$$F_r(O, C_i) = \frac{1}{2} K_r \left(\frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_b} \right)^2 \quad (3a)$$

$$\text{where, } d_o = \begin{cases} d_s, & \|O - C_i\|_2 \leq d_c \\ \|O - C_i\|_2, & \|O - C_i\|_2 > d_c \end{cases} \quad (3b)$$

여기서, d_b 와 d_c 는 각각 척력장의 상한과 최소 반경이며, K_r 는 장애물의 척력계수이다.

척력은 장애물과 USV 간의 유클리드 거리와 반비

례하여 증가한다. 이때, 매우 가까운 거리에서 척력이 무한대로 증가하는 것을 방지하기 위하여 거리가 d_c 이하일 경우에는 상수값 d_s 를 사용한다.

본 논문에서는 USV의 접근 침로를 제한하기 위하여 Fig. 1과 같이 함미 좌우에 가상의 장애물 O_f 를 설치하였다. 식 (3)에 따라 두 개의 가상 장애물이 생성하는 척력의 합은 다음 식과 같다.

$$F_r(C_i) = F(O_{r1}, C_i) + F(O_{r2}, C_i) \quad (4)$$

여기서, O_{r1} 는 좌현 함미, O_{r2} 는 우현 함미에 위치한 가상 장애물이며, 각 장애물의 척력계수는 K_r 로 동일하다.

2.4 포텐셜 필드와 경로 생성

USV의 경로 생성을 위한 포텐셜 필드는 각 위치 C_i 에서 입력과 척력의 합이며 식 (5)와 같이 구한다.

$$F(C_i) = F_a(C_i) + F_r(C_i) \quad (5)$$

위 식에 따라 회수지점에 가까울수록, 장애물과 멀수록 F 의 값이 작아진다. 이러한 특성을 이용하여 포텐셜 필드 F 내 C_i 에 위치한 USV의 다음 위치는 C_i 주변부의 F 값이 가장 작은 위치로 결정된다. 즉 USV는 $F(C_i)$ 기울기가 가장 작은 곳으로 이동한다. Fig. 2는 위 과정을 정리한 경로생성 알고리즘이다.

Input: G, O_f, C_0
Output: τ
1: $\tau \ni C_0, t \leftarrow 0$
2: Until $\ G - C_t\ _2^2 \leq \epsilon$:
3: $N =$ next positions of C_t
4: $p_{\min} \leftarrow \text{Inf}, C_{\text{best}} \leftarrow C_t$
5: For n in N :
6: $p_{\min} \leftarrow F(n)$
7: If $p < p_{\min}$:
8: $p_{\min} \leftarrow p$
9: $C_{\text{best}} \leftarrow n$
10: Endif
11: Endfor
12: $\tau \ni \{C_{\text{best}}, \tau_t\}$
13: $t \leftarrow t + 1, C_t \leftarrow C_{\text{best}}$
14: Enduntil

Fig. 2. Potential field path planning

3. 시뮬레이션 및 결과

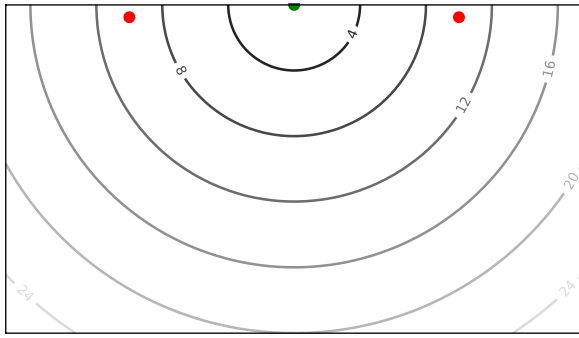
제안한 기법의 실현 가능성을 검증하기 위하여 다음과 같은 환경에서 시뮬레이션을 시행하였다. 가로축 (-7, 7), 세로축 (-8, 0)의 가상환경을 각 축 별로 200개로 분할하여 총 20,000개의 격자 공간을 생성하였다. 모함의 회수 위치는 (0, 0)에 설정하였으며, 가상 장애물은 각각 (-4, -0.3), (4, -0.3)에 배치하였다. 입력계수 K_a 는 5.0, 척력계수 K_r 는 100.0, 입력과 척력을 혼합하기 위한 α 는 0.5로 설정하였으며, 각 값은 실험을 통해 결정하였다.

Fig. 3는 가상환경에서의 시뮬레이션 결과이다. 각 차트는 입력장(Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)), 척력장(Fig. 3(c)와 Fig. 3(d))과 포텐셜 필드(Fig. 3(e)와 Fig. 3(f))를 도식화하였다. Fig. 3(a), Fig. 3(c), Fig. 3(e)는 필드의 값을 등고선으로 표현하였으며, Fig. 3(b), Fig. 3(d), Fig. 3(f)는 각 지점에서의 기울기가 최소화되는 방향을 화살표로 표현하였다.

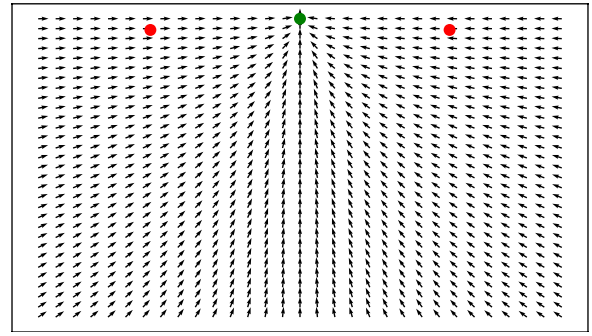
먼저 Fig. 3(a) 입력장의 경우 G 와의 유클리드 거리에 비례하여 포텐셜 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 값이 작아지는 방향으로 이동 방향이 결정된다.

Fig. 3(c)는 가상 장애물로 인해 생성된 척력장이다. 장애물에 가까울수록 척력의 크기가 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이, 장애물의 바깥쪽으로 형성된 척력장에 의해 외부에서 접근하는 USV는 장애물에서 멀어지는 방향으로 이동하게 된다.

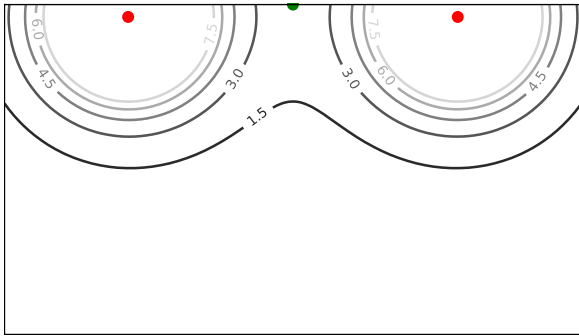
Fig. 3(e)는 입력장과 척력장의 합으로 만들어진 포텐셜 필드이다. G 에서 멀어질수록 값이 커짐과 동시에 가상 장애물 부근에서는 값이 증가함을 확인할 수 있다. 이에 따라 장애물을 우회하여 G 로 접근하는 경로가 생성된다. USV가 영역의 외부에서 내부로 접근한다고 할 때, 모든 출발점에서 함미의 가상 장애물을 우회하여 G 에 접근하는 것을 Fig. 3(f)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 3(f)의 적색선을 기준으로, 최초 접근 지점이 적색선 아래에 위치할 경우 장애물에 가까이 근접하지 않고 크게 회전하여 G 에 도달한다. 접근지점이 적색선 위에 위치할 경우 가상 장애물을 크게 회두하여 적색선 아래로 이동한 후 다시 G 로 접근하는 경로가 생성된다. 따라서 G 부근에서의 USV의 접근 침로가 모함의 침로와 큰 차이 없이 회수지



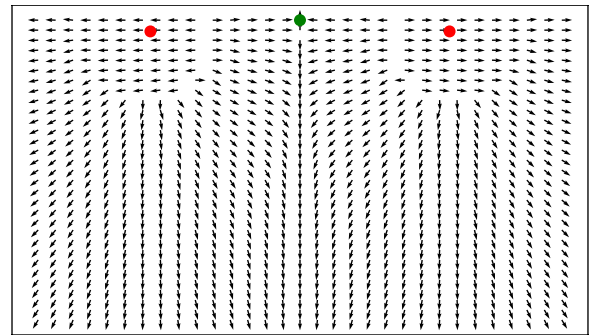
(a) Attraction field



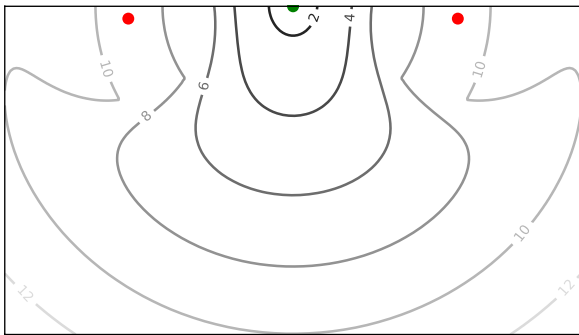
(b) Gradient of attraction field



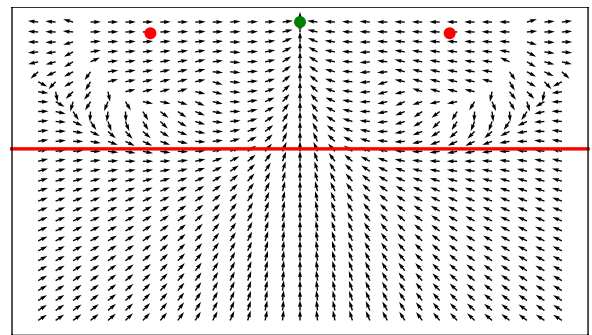
(c) Repulsion field



(d) Gradient of repulsion field



(e) Potential field



(f) Gradient of potential field

Fig. 3. Generated potential field

점에 도달한다. 장애물 인근에서는 G 에 수직으로 접근하는 경로가 생성되나, 이는 출발지점이 장애물 인근에서 시작되는 경우에만 해당하는 것으로 필드 외부에서 접근하는 경우 해당 구역 안으로 접근할 수 없음을 그림에서 확인할 수 있다.

실험에서 볼 수 있듯이, 생성된 USV의 경로는 회수지점 인근에서 대각도 변침 없이도 모함에 안전하게 접근 가능한 침로를 생성하였다. 따라서 제안한 기법은 USV의 모함 접근경로 생성 문제에 적합한 방법임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 포텐셜 필드를 이용하여 USV의 회수를 위한 접근경로를 계획하는 방법을 제시하였다. 회수지점 인근에서의 대각도 변침을 억제하기 위하여 양함미에 가상 장애물을 배치, 척력을 인위적으로 생성하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 타당성을 확인하였다.

본 연구는 안전한 접근경로를 계획하는 문제에 집중하였다. 연구의 결과를 바탕으로 추후 USV의 기동

경로 추종 문제로 확장하고 실제 환경에서의 회수 방안을 연구할 예정이다.

참고문헌

- [1] Hong Jeong Lee, Pil Hyun Kim and Kyung Han Lim, "Development of the Unmanned Maritime System(UMVs) in Neighboring Countries and Its Implications for the Republic of Korea Navy," *Journal of the KNST*, Vol. 6, No. 3, pp. 314-319. 2023.
- [2] Donghoon Seo, Jongho Shin, and Hyeon Kyu Yoon, "Linear System and Integral Error-based LQR Controller Design for Path Following of an Unmanned Surface Vessel,"

Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 28, No. 6, pp. 551-557, 2022, (doi: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0036)

[3] Rimon, Elon, "Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions," Yale University, 1990.

[4] Borenstein, Johann, and Yoram Koren, "The Vector Field Histogram-fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," *IEEE transactions on robotics and automation* 7.3, pp. 278-288, 1991.

[5] Ulrich, Iwan, and Johann Borenstein, "VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," *Proceedings 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146)*. Vol. 2. IEEE, 1998.