

측면주사소나를 이용한 원통형 기뢰 최적탐색패턴 도출기법 연구

이동훈 · 이상일 · 황근철 · 윤원영[†]

On the Optimization of Side Scan Sonar Search Pattern for Underwater Cylindrical Objects

Donghoon Lee · Sangil Lee · Kun-Chul Hwang · Won Young Yun[†]

ABSTRACT

Our study utilized a global stochastic optimization algorithm to determine the optimal path for detecting cylindrical bottom mines using side scan sonar technology. We modeled the minefield as a square area with varying environmental conditions and utilized a detection model to determine the probability of detecting a mine based on the distance and aspect angle between the sonar and the cylindrical bottom mine. The path plan for mine search was described with horizontal and vertical paths.

We employed the particle swarm optimization algorithm among the global stochastic optimization algorithms. In the optimization algorithm, intervals between neighboring paths rather than paths are treated as decision variables to reduce the solution space and a stratified sampling-based Monte Carlo estimator is used as an estimator of average mine detection probability to minimize the error of estimator.

We tried number of optimization procedures for various environment conditions and numbers of paths. From the result of our experiments, we could determine the number of paths necessary to satisfy given mine detection probability and we could acquire path patterns almost identical to a well-known geometrically meaningful pattern.

Key words : Side Scan Sonar, Mine Search Pattern, Noisy optimization, Particle Swarm Optimization

요약

본 논문은 원통형 해저 기뢰를 탐지를 위한 최적의 측면주사소나의 경로 계획 도출을 위해 전역 확률적 최적화 알고리즘을 적용하였다. 이를 위하여 측면주사소나의 기뢰탐지 문제를 기뢰부설영역, 원통형 해저기뢰에 대한 측면주사소나의 해저원통형기뢰 탐지모델, 기뢰탐색을 위한 경로계획모델로 정식화하였다. 기뢰부설영역은 실제 상황을 구현하기 위해 이질적인 환경 조건을 가진 직사각형 영역으로 모델링하였다. 측면주사소나와 원통형 해저 기뢰간의 거리와 측면각에 따른 측면주사소나 탐지모델을 적용하였다. 기뢰탐색을 위한 경로계획은 수평과 수직방향의 기동들의 집합으로 정의하였다.

연구를 위해 여러 가지 전역 확률적 최적화 알고리즘 중에서 입자군집최적화를 적용하였다. 적용된 최적화 알고리즘에는 최적경로계획 도출을 위한 결정변수로 경로 자체가 아닌 인접 소통 경로 사이의 간격으로 정의하여 탐색공간의 크기를 줄였고, 적합도의 추정치인 평균기뢰탐지확률은 층화추출 몬테칼로 추정치를 이용하여 오차를 최소화하도록 하였다.

기뢰원의 다양한 환경조건과 경로의 횟수의 변화에 따라 최적화 절차를 수행하였다. 결과적으로 원하는 기뢰탐지 확률을 만족하는 적절한 횟수를 도출하고 분석된 패턴은 잘 알려진 기하학적인 패턴과 거의 일치하는 패턴을 도출할 수 있었다.

주요어 : 측면주사소나, 기뢰탐색패턴, 잡음 최적화, 입자군집 최적화

Received: 20 March 2023, Revised: 12 June 2023,
Accepted: 12 June 2023

[†] Corresponding Author: Won Young Yun
E-mail: wonyun@pusan.ac.kr
Department of Industrial Engineering,
Pusan National University

1. 서론

바다의 지뢰라고 불리는 기뢰는 함정을 침몰시킬 수 있는 위협적인 무기이다. 기뢰는 주로 전장초기에 적이나 야군에 의해 우리나라의 항구의 입구나 해상 교통로 상

에 부설될 수 있으며, 기뢰가 부설되었다는 사실만으로도 함정이 항만이나 해상 교통로 이용을 억제할 수 있는 전략적 목적의 달성이 가능하다. 또한 기뢰는 해상보급을 차단하여 전장에서 우세권을 행세할 수 있도록 하는 전통적인 비대칭무기이다.

기뢰는 감응방식에 따라서 접촉식 기뢰(contact mine), 감응식 기뢰(influence mine), 원격통제 기뢰(remote control mine) 등으로 구분되며, 부설 위치에 따라서 수면에 떠 있는 부류기뢰(floating mine), 계류기뢰(moored mine)와 해저기뢰(bottom mine)로 크게 분류된다. 기뢰의 형상은 구형(ball type), 만타형(manta type)과 원통형(cylindrical type)으로 구분되며, 항공기, 수상함, 잠수함으로 부설할 수 있다. 이중 가장 일반적인 기뢰의 유형은 해저 원통형 감응 기뢰(cylindrical bottom influence mine)로 수상함, 항공기, 잠수함에서 부설할 수 있다.

부설된 기뢰를 해상에서 제거하는 것을 기뢰소해라고 한다. 기뢰소해는 감응형 기뢰에 기만신호를 주사하여 기폭시키는 감응소해와 기뢰를 탐지하여 제거하는 탐색소해로 구분한다. 감응소해는 기뢰의 존재여부의 확인이 어려운 제한점이 있으나, 동시에 많은 수의 기뢰를 제거할 수 있는 이점이 있어 소해 방법으로 주로 이용한다. 하지만, 최근에는 기뢰가 지능화되고 있어, 향후 감응소해로 기뢰를 소해하는 것은 제한적일 것으로 예측된다. 탐색소해는 해저의 기뢰를 하나하나 탐색하여 하드킬로 제거하는 방법으로 자유로운 항만의 통행을 보장하기 위하여 가장 확실한 방법의 하나지만, 기뢰 제거에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

탐색소해를 원활하게 하기 위해서는 기뢰탐지에 최적화된 장비를 사용하여야 한다. 기뢰탐색을 위해 다양한 방법들이 활용되고 있지만, 상대적으로 탐지가 어려운 해저에 부설된 기뢰탐지를 위한 수단으로 측면주사소나(Side Scan Sonar: SSS)를 활용하고 있다. 측면주사소나는 해저면을 탐색하기 위한 효과적인 수단의 하나로 알려져 있다. 측면주사소나는 수중에서 고주파의 음파를 사용하고, 해저면으로부터 저고도로 운용되기 때문에 백미터 내외의 탐지폭을 가지며, 근접영역에서는 음파에 따른 그림자(shadow)가 잘 생기지 않아서 낮은 탐지확률을 보이는 특성을 가진다(Kye et al., 2013). 탐색소해의 효율성을 높이기 위해서 이러한 특성을 갖는 측면주사소나를 어떻게 기동시켜서 해저를 탐지하는 것이 좋은지에 대한 연구가 필요하다. 전통적으로는 측면주사소나의 탐지성을 향상시키기 위한 방안으로 탐색방법에 따른 장방형(‘ㄷ’) 패턴, 지그재그(‘Z’) 패턴 등의 다양한 방법이 연구

되고 있다(Yoo et al., 2020; Hong et al., 2014; Hwang et al., 2011, 2012).

본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 원통형 기뢰가 해저에 부설되어 있다고 가정하고, 이를 측면주사소나로 탐색한다고 할 때, 측면주사소나의 탐지모형을 정의하고, 기존 연구에서는 고려하지 않은, 탐색환경이 균일하지 않은 상태에서의 원통형 기뢰의 탐색 문제를 정의하여, 특정 영역에서 측면주사소나의 탐색패턴을 최적화하기 위해, 입자군집 최적화(partical swarm optimization)을 적용하였다. 이를 통해 해저면에 부설된 기뢰탐지를 위한 측면주사소나의 최소화된 소통 횟수를 산출토록 하였다.

2. 측면주사소나 탐지모형

2.1 개요

해저 면에 부설되는 탐지대상 표적(기뢰)은 구형 또는 원통형, 만타형으로 다양한 형태를 가질 수 있으나 본 연구에서는 원통형 물체(이하 표적)로 가정하였다.

측면주사소나는 Fig. 1과 같이 수상선박에 의해서 예인되거나 잠수체에 부착되어 이동하며, 측면으로 주사되는 음파가 반사되어 돌아오는 신호를 이용하여 표적을 탐지하는 장비이다. SSS는 해저 면을 완전한 평면으로 가정하여 해저 면에서 반사되어 돌아오는 신호의 수신 시간을 분석하여 탐지하고, 해저에 특이한 물체가 있으면 반사되어 돌아오는 특정 거리의 신호가 비정상적으로 나타나 표적을 탐지할 수 있다.

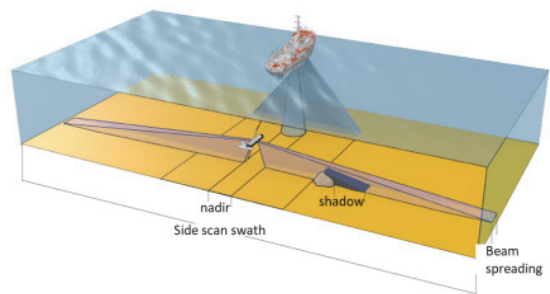


Fig. 1. Side scan sonar operational concept (from web: “Sonar”, Geoscience Australia, June 7, 2023, accessed June 12, 2023, <https://ga.gov.au/scientific-topics/marine/survey-thchniques/sonar>)

해저 면에 놓인 표적에 대한 탐지확률은 SSS와 표적 간 측면거리와 SSS에서 바라보는 표적의 측면 각(aspect angle)에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 음파는 SSS 진행 방향의 수직 방향으로 주사된다. SSS가 진행 방향으로 이동하다가 표적과의 최근접점을 통과하는 시점의 표적과 SSS의 거리를 측면거리(lateral distance)라고 하며, 진행 방향의 수직인 선과 기뢰가 놓여있는 방향과 이루는 각을 측면각(aspect angle)이라고 한다.

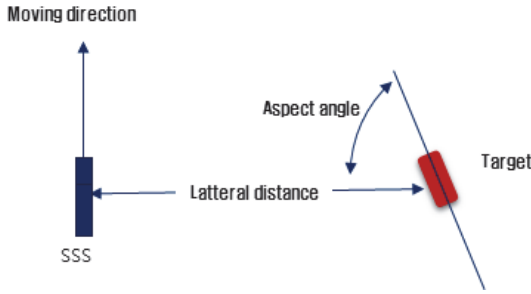


Fig. 2. Relationship side scan sonar and target for detection

Fig. 3은 같은 조건에서 측면각의 변화에 따른 SSS에 의한 탐지사례로 측면각에 따라서 탐지가 쉽거나 어렵게 됨을 설명해 준다.

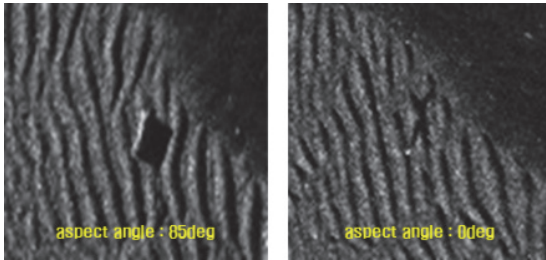


Fig. 3. Detection of target according to aspect angle(from Nguyen and Hopkin(2005))

2.2 원통형 기뢰 탐지확률

Nguyen과 Hopkin(2005)은 원통형 기뢰 탐지확률 $h(d, \theta)$ 을 거리에 따른 탐지확률 $h_1(d)$ 과 측면각에 따른 탐지확률 $h_2(\theta)$ 의 곱으로 구하고 각각은 다양한 형태의 함수를 유연하게 묘사할 수 있는 Johnson 함수를 이용하여 경험식으로 도출하였다. Johnson 함수는 $\frac{x_1 + x_2}{2}$ 에 대하여 대칭이며 $x = \frac{x_1 + x_2}{2}$ 에서 최댓값 1을 갖는다. Johnson 함수는 식(1)과 같다. 함수 입력값의 α_1, α_2 는 상수이며, x_1, x_2 는 위치이다.

$$J(x, \lambda, \alpha_1, \alpha_2, x_1, x_2) = \frac{\lambda \times \alpha_2 \times (x_2 - x)}{(x - x_1) \times (x_2 - x) \times \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{1}{2} \left(\alpha_1 + \alpha_2 \times \ln \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x} \right) \right)^2} \times I(x | x_1, x_2) \tag{1}$$

여기서, $I(x | x_1, x_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_1 < x < x_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$,
 $\lambda = 1/J \left(x, \frac{x_1 + x_2}{2}, \alpha_1, \alpha_2, x_1, x_2 \right)$ 이다.

SSS와 원통형 기뢰와의 위치관계에 따른 기본탐지확률은 식 (2)와 같이 거리에 의한 탐지확률 $h_1(d)$ 와 측면각에 따른 탐지확률 $h_2(\theta)$ 의 곱으로 표현된다.

$$h(d, \theta) = h_1(d)h_2(\theta) \tag{2}$$

$h_1(d)$ 와 $h_2(\theta)$ 는 식 (3), (4)와 같이 Johnson 함수에 적합 시킨 경험식을 구하여 적용한다. $h_1(d)$ 와 $h_2(\theta)$ 를 구하기 위해 사용한 파라미터는 Nguyen과 Hopkin(2005)이 실험을 통해 추정된 값을 사용하였다. 거리에 따른 탐지확률 $h_1(d)$ 은 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.75, x_1 = 11.5, x_2 = 75$ 가 사용하였으며, 측면각에 따른 탐지확률 $h_2(\theta)$ 은 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.25, x_1 = 0, x_2 = \pi$ 를 사용하였다. $h_1(d)$ 와 $h_2(\theta)$ 는 Fig. 4와 같은 형태를 보인다.

$$h_1(d) = J(d, \lambda, 0, 0.75, 11.5, 75) \tag{3}$$

$$h_2(\theta) = J(\theta, \lambda, 0, 1.25, 0, \pi) \tag{4}$$

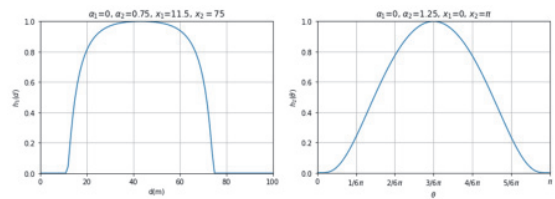


Fig. 4. detection probability according to distance and aspect angle

3. 기뢰탐색 문제

3.1 탐지영역

탐지영역은 표적이 존재하는 영역으로 영역 크기와

위치에 따른 환경탐지지수로 정의할 수 있다. 예를 들어 Fig. 5와 같이 임의의 길이와 폭($x = 600, y = 300$)을 가진 정방형으로 정의할 수 있고 다양한 환경탐지지수 (environmental detection factor: EDF)를 부여할 수 있다. 예를 들어 세 가지 조건을 갖는 환경탐지지수 EDF는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. Fig. 5는 위치에 따라 3가지 색(Black, White, Gray)으로 구분되는 환경탐지지수 $e(x, y)$ 값을 EDF 맵으로 나타낼 수 있다.

$$e(x, y) = \begin{cases} a & \text{if } (x, y) \in \text{Black Area} \\ b & \text{if } (x, y) \in \text{White Area} \\ c & \text{if } (x, y) \in \text{Gray Area} \end{cases} \quad (5)$$

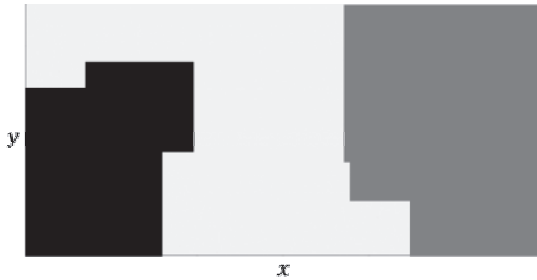


Fig. 5. EDF map of search area

3.2 표적 탐색계획

표적 탐색계획은 Fig. 6과 같이 x 축 기동위치 $[x_i^p, i = 0, 1, \dots, n_x - 1]$ 로 정의되는 x 축 계획 $plan_x$ 과 y 축 기동위치 $[y_j^p, j = 0, 1, \dots, n_y - 1]$ 로 정의되는 y 축 계획 $plan_y$ 로 구분한다. 전체 탐색계획은 식 (6)과 같이 표현하고 이는 식 (7)의 x 축 계획 $plan_x$ 와 식 (8)의 y 축 계획 $plan_y$ 의 합이다. 각 축별 기동계획은 식 (9), (10)에서 정의된 선분으로 정의되는 축별 기동의 집합이다.

$$PLAN = plan_x \cup plan_y \quad (6)$$

$$plan_x = [plan_x^i, i = 0, 1, \dots, n_x - 1] \quad (7)$$

$$plan_y = [plan_y^j, j = 0, 1, \dots, n_y - 1] \quad (8)$$

$$plan_x^i \stackrel{\text{def}}{=} \overline{A_i B_i} \quad (9)$$

$$plan_y^j \stackrel{\text{def}}{=} \overline{C_j D_j} \quad (10)$$

Fig. 6은 각 축별 기동을 설명하기 위한 것으로서 x 축 기동은 식 (11), y 축 기동은 식 (12)와 같다.

$$\overline{A_i B_i} \text{ for } i = 0, 1, 2, \dots, n_x - 1 \quad (11)$$

$$\overline{C_j D_j} \text{ for } j = 0, 1, 2, \dots, n_y - 1 \quad (12)$$

여기서, 각 축별 기동을 설명하기 위한 기동 참조점은 식 (13)에서 (16)과 같다.

$$A_i = (x_i^p, r_y[0]) \text{ for } i = 0, 1, 2, \dots, n_x - 1 \quad (13)$$

$$B_i = (x_i^p, r_y[1]) \text{ for } i = 0, 1, 2, \dots, n_x - 1 \quad (14)$$

$$C_j = (r_x[0], y_j^p) \text{ for } j = 0, 1, 2, \dots, n_y - 1 \quad (15)$$

$$D_j = (r_x[1], y_j^p) \text{ for } j = 0, 1, 2, \dots, n_y - 1 \quad (16)$$

여기서 $r_x[0], r_x[1], r_y[0], r_y[1]$ 는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 x 축 범위의 최소 및 최대값과 y 축 범위의 최소 및 최대값을 의미한다.

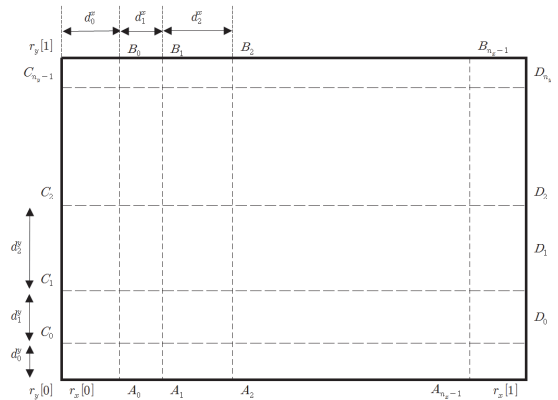


Fig. 6. Mine Search Plan

이때 총 기동거리와 총 기동시간은 기동 간의 이동을 무시할 때 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$L_{run} = n_x(r_y[1] - r_y[0]) + n_y(r_x[1] - r_x[0]) \quad (17)$$

$$T_{run} = L_{run}/v \quad (18)$$

여기서, v 는 센서의 기동 속도이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 최적 탐색계획을 구하는 문제는 최적의 $PLAN$, 즉 $plan_x$ 와 $plan_y$ 를 구하는 문제로 식 (19)와 식 (20)의 각 기동 간의 간격(interval)을 결정하는 문제로 전환해서 최적화를 위한 결정변수로 이용된다. 결정변수는 각 축의 기동간격 집합으로 식 (19), (20)과 같다.

$$\Delta_x = [d_i^x, i = 0, 1, \dots, n_x - 1] \quad (19)$$

$$\Delta_y = [d_j^y, j = 0, 1, \dots, n_y - 1] \quad (20)$$

여기서 d_i^x 와 d_j^y 는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 인접 궤적 간의 간격을 의미한다.

기동간격과 각 축의 기동 위치와의 관계는 다음과 같다.

$$d_i^x = \begin{cases} x_i^p - r_x[0] & \text{if } i = 0 \\ x_i^p - x_{i-1}^p & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

$$d_j^y = \begin{cases} y_j^p - r_y[0] & \text{if } j = 0 \\ y_j^p - y_{j-1}^p & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

3.3 탐색계획에 따른 기뢰 탐색확률

표적은 놓여있는 해저의 특성에 따라서 영향을 받는다. $plan_x^i$ 또는 $plan_y^i$ 에 의하여 (x, y) 위치에 θ 방위로 놓여있는 표적에 대한 탐지확률은 식 (5)에서 예를 들어 정의한 (x, y) 위치의 환경지수 $e(x, y)$ 가 곱해져서 구할 수 있다. 특정 위치와 방위에 놓인 기뢰에 대하여 개별 기동에 의한 탐지확률은 다음 식 (23), (24)와 같이 정의한다.

$$f_{plan_x^i}(x, y, \theta) = h(|x - x_i^p|, \theta) \times e(x, y) \quad (23)$$

$$f_{plan_y^j}(x, y, \theta) = h(|y - y_j^p|, \theta) \times e(x, y) \quad (24)$$

전체 탐색계획 $PLAN$ 에 의하여 (x, y) 위치에 θ 방위로 놓여있는 표적에 대한 탐지확률은 다음과 같이 구한다.

$$1 - f_{PLAN}(x, y, \theta) = \prod_{i=0}^{n_x-1} (1 - f_{plan_x^i}(x, y, \theta)) \times \prod_{j=0}^{n_y-1} (1 - f_{plan_y^j}(x, y, \theta)) \quad (25)$$

전체 탐색계획 $PLAN$ 에 의하여 임의의 위치와 방위로 놓여있는 기뢰에 대한 평균 탐지확률인 평균 기뢰탐지확률(average mine detection probability: AMDP)은 표적에 영역 내에 균일하게 분포한다는 가정하에 다음과 같이 구해진다.

$$p(PLAN) = \frac{\int_{r_x[0]}^{r_x[1]} \int_{r_y[0]}^{r_y[1]} \int_{-\pi}^{\pi} f_{PLAN}(x, y, \theta) d\theta dy dx}{2\pi(r_x[1] - r_x[0])(r_y[1] - r_y[0])} \quad (26)$$

Fig. 7은 $\Delta_x = [200, 300]$, $\Delta_y = [175]$ 일 경우, 즉 $plan_x = [200, 500]$, $plan_y = [175]$ 인 전체탐색계획을 적용했을 때의 위치별 탐지확률을 구하여 등고선(contour) 그래프로 나타낸 것이고 붉은 선은 탐색궤적을 나타낸 것으로 평균 기뢰탐지확률 $p(PLAN)$ 은 0.3391로 계산되었다.

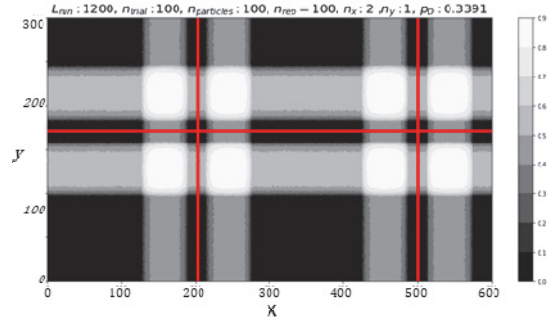


Fig. 7. Example of SSMCE contour for specific PLAN

3.4 최적 기뢰탐색 문제의 정의

최적 기뢰탐색 문제는 식 (27)과와 같이 최적의 기동계획을 구하는 문제이며 이는 기동간격을 최적화하는 문제로 동등하게 정의할 수 있다.

$$\operatorname{argmax}_{PLAN} (p(PLAN)) \equiv \operatorname{argmax}_{\Delta} (p(PLAN)) \quad (27)$$

여기서,

$$\text{기동간격 Set} : \Delta = \Delta_x \cup \Delta_y$$

$$x \text{ 축 개별 기동간격 Set} : \Delta_x = \{d_i^x, i = 1, 2, \dots, n_x\}$$

$$y \text{ 축 개별 기동간격 Set} : \Delta_y = \{d_j^y, j = 1, 2, \dots, n_y\}$$

$$x \text{ 축 개별 기동간격} : 0 \leq d_i^x \leq L, \text{ for } i = 1, 2, \dots, n_x$$

$$y \text{ 축 개별 기동간격} : 0 \leq d_j^y \leq L, \text{ for } j = 1, 2, \dots, n_y$$

편의상 개별기동간격을 다음과 같이 설정하면

$$d_i^x = \delta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_x$$

$$d_j^y = \delta_{n_x+j}, \quad j = 1, 2, \dots, n_y$$

기동간격 Set은 식 (28)과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta &= \{d_1^x, d_2^x, \dots, d_{n_x}^x, d_1^y, d_2^y, \dots, d_{n_y}^y\} \\ &= \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{n_x}, \delta_{n_x+1}, \delta_{n_x+2}, \dots, \delta_{n_x+n_y}\} \\ &= \{\delta_i, i = 1, 2, \dots, n_x + n_y\} \end{aligned} \quad (28)$$

3.5 탐색계획에 따른 기뢰 탐색확률의 몬테카를로 추정

목적함수 $p(PLAN)$ 은 수치적분에 의하여 구할 수 있다. 적분 간격을 조밀하게 할 경우, 계산 횟수가 커서 최적화 적용이 어렵게 된다. 이에 대한 대안으로 몬테카를로 적분에 의하여 $p(PLAN)$ 를 추정할 수 있는데 최적화 적용과정에서 해상도를 조절하여 수행하면 계산 속도와 오차를 통제하여 효율적인 적용이 가능하다. 목적함수 $p(PLAN)$ 에 대해, 균일 추출 몬테카를로 추정(Uniform Sampling based Monte Carlo Estimator: USMCE)은 식 (29)와 같다.

$$\hat{p}_{MC}(PLAN) = \frac{\sum_{i=1}^n f_{PLAN}(x_i^{rand}, y_i^{rand}, \theta_i^{rand})}{n} \quad (29)$$

여기서, $x_i^{rand} \sim U(r_x[0], r_x[1])$
 $y_i^{rand} \sim U(r_y[0], r_y[1])$
 $\theta_i^{rand} \sim U(-\pi, \pi)$
 n : total number of simulation
 $U(a,b)$: uniform distribution from a to b

이때 추정치의 분산은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{\hat{p}_{MC}}^2 = \sigma^2/n \quad (30)$$

구획을 나누어 전체 탐색공간에 고르게 표본을 뽑을 수 있는 층화추출에 의한 몬테카를로 적분 방법으로 목적함수를 추정하는 방법은 다음과 같으며 본 논문에서는 이 방법을 적용하여 추정한다. 층화추출 몬테카를로 추정(Stratified Sampling based Monte Carlo Estimator: SSMCE)은 식 (31)과 같다.

$$\hat{p}_{SMC}(PLAN) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_r} f_{PLAN}(x_i^{rand}, y_j^{rand}, \theta_k^{rand})}{n_x \times n_y \times n_r} \quad (31)$$

여기서 구획의 위치는 (x_i^{rand}, y_j^{rand}) 는 식 (32)와 식(33)에 의해서 기뢰의 방향 θ^{rand} 는 식 (34)와 같이 무작위로 생성된다.

$$x_i^{rand} \sim U(r_x[0] + i \times \delta_x, r_x[0] + (i+1) \times \delta_x) \quad (32)$$

$$y_j^{rand} \sim U(r_y[0] + j \times \delta_y, r_y[0] + (j+1) \times \delta_y) \quad (33)$$

$$\theta^{rand} \sim U(-\pi, \pi) \quad (34)$$

여기서,

$$\delta_x = \frac{r_x[1] - r_x[0]}{n_x}, \delta_y = \frac{r_y[1] - r_y[0]}{n_y} : \text{구간의 간격}$$

n : 총 시뮬레이션 횟수

n_x : x 축 구간의 개수

n_y : y 축 구간의 개수

$n_r = n / (n_x \times n_y)$: 구획 별 시뮬레이션 횟수

층화추출에 의한 몬테카를로 추정의 오차는 식 (35)와 같이 주어진다.

$$\sigma_{p_{SMC}}^2 = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{n_r}{n} \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{n_r}{n} (p(PLAN) - f_{PLAN}(x, y, \theta))^2 \quad (35)$$

4. 기뢰탐색 계획 최적화

4.1 최적화 절차

탐색계획의 목표는 목표 평균 기뢰 탐색확률 P 을 만족하는 최소소요 시간(또는 최소 기동 거리)의 기동 패턴을 도출하는 것으로 Fig. 8은 이 과정을 보여준다. 첫 단계는 기뢰원의 길이, 폭, 위치별 환경 탐색지수 및 목표기뢰 탐지확률을 설정하는 것이다. 축별 초기 기동횟수 n_x, n_y 를 설정하고 최적 평균 기뢰탐지확률 $p(PLAN_{opt}(n_x, n_y))$ 을 최적화하기 위한 알고리즘(본 논문에서는 PSO)을 적용하여 구한다. 구해진 최적해가 목표를 만족하면 최적화 과정을 종료하고 아니면 축별 기동횟수 n_x, n_y 를 증가시키고 다시 PSO 최적화 과정을 수행한다. 최적 평균 탐지확률을 구하고 비교하는 과정을 반복한다.

4.2 입자군집 최적화(Particle Swarm Optimization)

PSO는 조류의 무리 또는 어류의 무리와 같은 생물학적 사회 시스템의 행태를 모의하는 군집지능(swarm intelligence)의 한 형태로서 1955년 Eberhart and Kennedy (1995a, 1995b)가 개발하였고 Venter and Sobieszczanski-Sobieski(2002), Cai et al.(2004), Gao and Duan(2007)

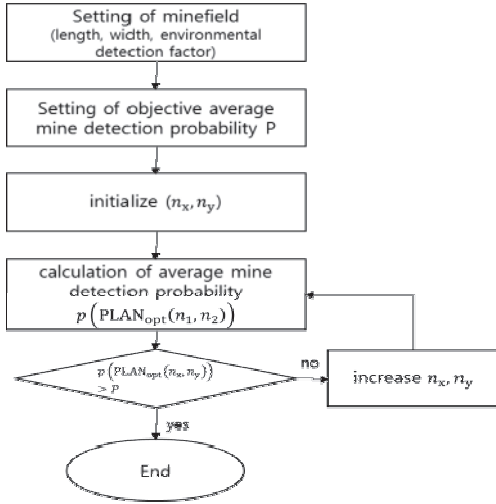


Fig. 8. Flow of finding optimal plan under given resource

과 Gao and Ren(2007) 등에 의해서 논의되고 개선되고 정제됐다. 이 연구들에 적용된 일반적인 PSO 알고리즘의 흐름은 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

Table 1. Particle Swarm Optimization Algorithm for optimal path planning

Algorithm $(x^*, p^*) \leftarrow Particle Swarm Optimizer(f)$
$\hat{p}(\Delta) = \hat{p}_{SMC}(PLAN)$
v_i : new particle velocity of i^{th} member
v_i^* : current particle velocity of i^{th} member
Δ_g^* : global best swarm position
w : constant inertia weight
c_1, c_2 : cognitive and social parameters respectively
r_1, r_2 : random numbers between 0 and 1
n_{pop} : number of particles
for i in range(n_{pop}): # p_initial fitness update
$\Delta_i^* \leftarrow generateRandomParticle()$
$p_i^* = p(\Delta_i^*)$
while termination-criterion() do
for i in range(n_{pop}): # position & fitness update
$p_i = p(\Delta_i)$ # calculate fitness
if $p_i < p_i^*$: $p_i^* = p(\Delta_i)$, $\Delta_i^* = \Delta_i$
if $p_i < p^g$: $p^g = p(\Delta_i)$, $\Delta_g^* = \Delta_i$
for i in range(n_{pop}): # velocity & position update
$v_i \leftarrow wv_i^* + c_1r_1(\Delta_i - \Delta_i^*) + c_2r_2(\Delta_g^* - \Delta_i^*)$
$\Delta_i = \Delta_i^* + v_i$
return (x_g^*, p^g)

군집이 먹이를 찾을 때 각 개체는 퍼져서 독립적으로 먹이를 찾아 돌아다닌다. 각 개체는 운동에 일정 자유도를 가지거나 불확실성을 갖는다. 조만간 이들 중 바람직한 것(먹이)을 찾게 되고 사회성으로 인해 정보가 다른 개체에 통보되어 먹이로 향하게 된다. 입자들의 갱신은 입자들의 방향 v_i 에 의하여 결정된다. 입자들의 방향은 관성(inertia) w , 인지력(cognitive force) c_1 , 사회력(social force) c_2 에 따라서 계산된다. 개체들의 최적점 Δ_i^* 는 등반 알고리즘에서와 같이 탐욕적인 방법으로 갱신된다. 전역 최적점 Δ_g^* 는 모든 입자 중에서 선택된다.

5. 최적 원통형 기뢰탐색 알고리즘

5.1 최적 기뢰탐색 절차 적용 사례

5.1.1 기뢰원의 특성

기뢰원은 길이 600m, 폭 300m인 직사각형 영역으로 설정하였으며, 환경탐지 인자는 식 (36) 및 식 (37)과 같이 미리 알고 있는 두 가지 경우로 가정하였고 이때의 탐색영역의 형태는 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. 목표 평균 기뢰탐지확률 $P = 0.75$ 로 설정하였다.

$$e_1(x, y) = 1 \text{ for all } (x, y) \in A \quad (36)$$

$$e_2(x, y) = \begin{cases} a & \text{if } d_1 < 120 \\ b & \text{if } d_2 < 120 \\ c & \text{if } (d_1 \geq 120) \text{ and } (d_2 \geq 120) \end{cases} \quad (37)$$

여기서, $a=0.4$, $b=0.7$, $c=1$ 을 적용하였으며, $d_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}$, $(x_1, y_1) = (150, 150)$ 이며, $d_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}$, $(x_2, y_2) = (450, 150)$ 로 주어진다.

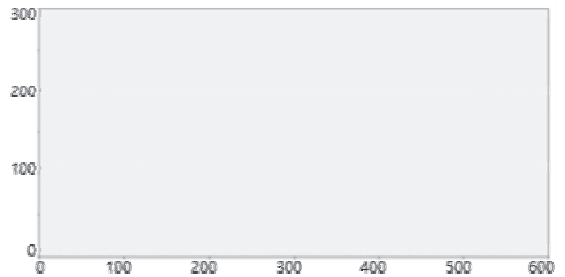


Fig. 9. Search area with EDF $e_1(x, y)$

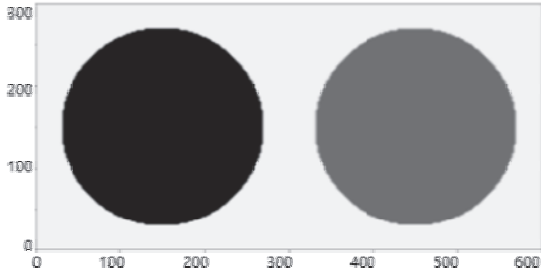


Fig. 10. Search area with EDF $e_2(x,y)$

5.1.2 최적화 알고리즘 파라미터 설정

기뢰탐색을 위한 최적화 알고리즘으로 입자군집 최적화 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘의 설정 파라미터는 통상적으로 사용하는 $c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.3$, $w = 0.9$ 를 적용하였고, 군집의 크기 n_{pop} 는 100, 세대수가 100에 도달하면 최적값을 출력하도록 설정하였다.

Table 2. PSO parameter setting for plan optimization

PSO parameters	values	contents
c_1	0.5	cognitive parameter
c_2	0.3	social parameter
w	0.9	weight factor
n_{pop}	100	# of particles
n_{repeat}	100	# of repetitions

각 개체의 적합도는 식 (31)의 평균 탐지확률의 증화 추출에 의한 몬테카를로 추정치를 사용하며 같은 세대의 개체는 기본적으로 $n = 400$ 을 이용한다. 세대 내의 최적 개체는 현재까지의 최적 개체와 비교하여 더 우수할 때는 추가로 9,600회(=10,000-400)의 시뮬레이션을 수행하여 총 10,000번의 시뮬레이션을 이용한 정교한 추정치를 도출하고 다시 이전 최적지와 비교하여 더 우수할 경우 이전 최적 평균 기뢰탐지확률을 갱신한다.

5.2 균일 환경탐지수일 경우의 탐색계획 도출 결과

Fig. 11은 균일한 환경탐지수 e_1 이 적용된 기뢰원에서의 기동시간(n_1, n_2 의 함수)에 따른 최적 평균 기뢰탐지확률을 도출한 결과이다. 목표 평균 기뢰탐지확률 $P = 0.75$ 를 초과하는 기뢰 탐색계획은 $n_x = 8$, $n_y = 4$ 일 경우로 $plan_x$ 는 [60,95,215,405,445,502,540]로 $plan_y$ 는 [30, 80,175,225]로 주어진다.

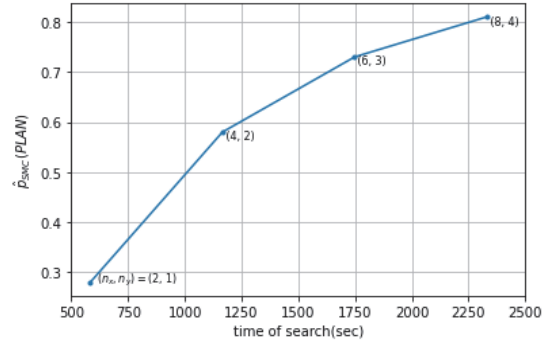


Fig. 11. SSMCE vs. length of run for minefield of EDF e_1

Fig. 12는 $n_x = 2$, $n_y = 1$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. 두 개의 x축 계획이 선정되었으나 두 개 궤적의 탐지영역이 겹치지 않는 조합에서 같은 효과도를 보일 것으로 보인다.

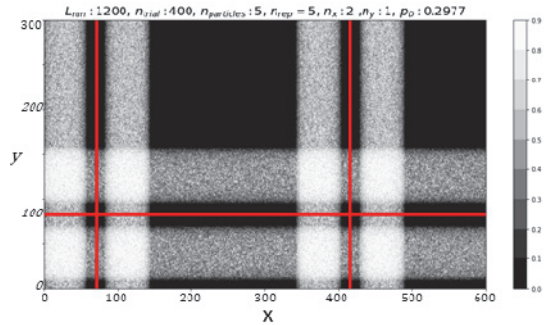


Fig. 12. Detection probability contour for $n_x = 2$ and $n_y = 1$ for minefield with EDF e_1

Fig. 13은 $n_x = 4$, $n_y = 2$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. 축별 탐색영역이 고루 탐색 될 수 있도록 모든 궤적이 같은 간격으로 배치됨을 알 수 있으나 궤적을 중심으로 띠 모양의 미탐지 영역이 나타난다.

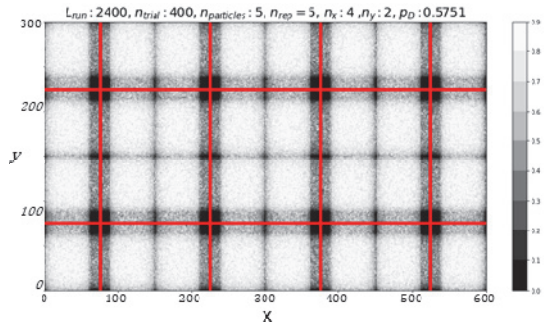


Fig. 13. Detection probability contour for $n_x = 4$ and $n_y = 2$ for minefield with EDF e_1

Fig. 14는 $n_x = 8, n_y = 4$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. 두 개의 좁은 간격의 쌍을 이룬 궤적(이하 쌍 궤적)들로 구성되며 쌍 궤적 간의 간격은 고르게 유지되는 패턴이 도출되었다. 이 조합을 통해서 띠 모양의 미탐지 영역은 대부분 사라진 모습을 보인다. 이 계획은 목표 기뢰탐지확률 $P = 0.75$ 를 초과하여 최종 기뢰 탐색계획으로 선정된다.

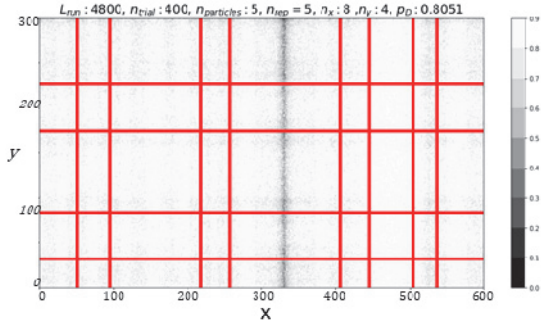


Fig. 14. Detection probability contour for $n_x = 8$ and $n_y = 4$ for minefield with EDF e_1

5.2.2 비 균일 환경탐지지수일 경우의 탐색계획 도출 결과

Fig. 15는 비 균일한 환경탐지지수 e_2 이 적용된 기뢰 원에서의 기동시간(n_1, n_2 의 함수)에 따른 최적 평균 기뢰 탐지확률을 도출한 결과이다. 목표 평균 기뢰탐지확률 $P = 0.75$ 를 초과하는 기뢰 탐색계획은 $n_x = 12, n_y = 6$ 일 경우로 경로 계획은 Fig. 19에서 보는 바와 같다.

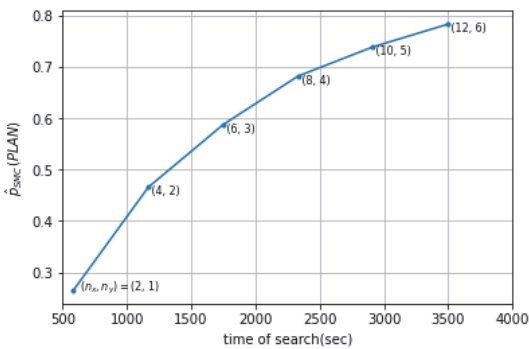


Fig. 15. SSMCE vs. length of run for minefield of EDF e_2

Fig. 16은 $n_x = 2, n_y = 1$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. 두 개의 x 축 계획은 탐지영역이 겹치지 않게 탐지가 가장 어려운 영역을 피해서 배치되고 있으며 y 축

계획은 탐지영역이 경계선과 겹치지 않으면서 최대한 바깥쪽으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

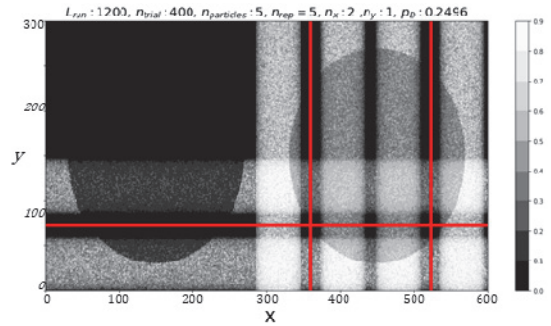


Fig. 16. Detection probability contour for $n_x = 2$ and $n_y = 1$ for minefield with EDF e_2

Fig. 17은 보듯이 $n_x = 4, n_y = 2$ 일 경우의 기뢰 탐색 계획은 축별 탐색영역이 고루 탐색 될 수 있도록 대부분 궤적이 같은 간격으로 배치됨을 알 수 있으나 궤적을 중심으로 띠 모양의 미탐지 영역이 나타난다.

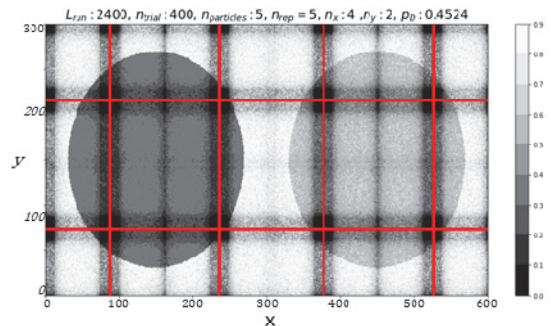


Fig. 17. Detection probability contour for $n_x = 4$ and $n_y = 2$ for minefield with EDF e_2

Fig. 18은 $n_x = 6, n_y = 3$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. x 축 계획의 일부는 두 개의 쌍을 이룬 궤적과 쌍이 없는 궤적 두 개로 구성되며 각 궤적은 등 간격으로 배치되었다. y 축 궤적도 한 개의 쌍을 이룬 궤적과 하나의 쌍이 없는 궤적으로 구성되고 있다. 이 조합을 통해서 띠 모양의 미탐지 영역은 홀 궤적에서 나타나고 있다.

Fig. 19는 $n_x = 12, n_y = 6$ 일 경우의 기뢰 탐색계획을 보여준다. 이 계획에서 목표 탐색확률 0.75를 만족한다. 축별 계획의 궤적의 수가 어느 수준 이상일 경우 적은 수의 궤적에서와 같이 패턴은 구하기 어렵다. 띠 모양의 미

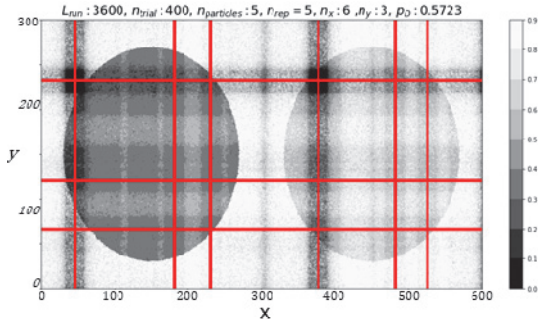


Fig. 18. Detection probability contour for $n_x = 6$ and $n_y = 3$ for minefield with EDF e_2

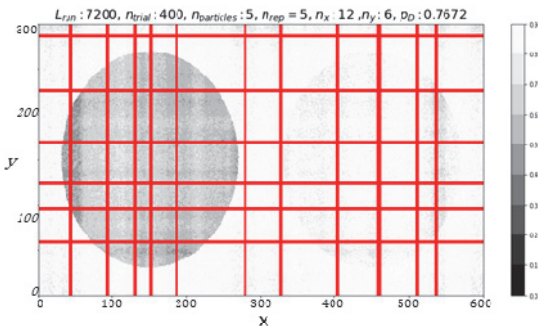


Fig. 19. Detection probability contour for $n_x = 12$ and $n_y = 6$ for minefield with EDF e_2

탐지 영역은 보이지 않고 가장 낮은 탐지환경지수를 같은 좌측 원형영역에 미탐지 확률이 낮게 나와 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 측면 주사소나의 기뢰탐지 문제를 정형화하기 위하여 환경탐색지수(EDF)로 정의되는 기뢰원과 측면주사소나의 원통형 기뢰탐지모델을 기술하고, 효과도 측도인 평균 탐색확률을 최적화시키는 측면주사소나의 기동간격의 조합을 찾는 문제로 정의하였다. 평균 탐색확률의 추정은 계산시간이 많이 소요되어서 층화추출에 의한 몬테카를로 시뮬레이션 추정치(SSMCE)를 대신 사용하였다. 또한 최적화 과정에 반복 횟수를 조절하여 효율적인 최적화가 가능하게 하였다. 확률적 전역최적화 알고리즘으로는 입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘을 채택하였으며 확률적 적합도의 층화추출 기반의 몬테카를로 추정치를 적용한 최적화 알고리즘의 적용 가능성을 사례를 들

어 살펴보는 데에 중점을 두었다.

두 가지 탐지환경지수로 정의된 기뢰원에 대하여 최적 탐색패턴을 도출하는 문제에 알고리즘을 적용하였으며, 균일환경을 갖는 기뢰원에 대하여는 총 주행거리 2,300M ($n_x = 8, n_y = 4$)에서 0.75의 목표탐지율을 만족하는 최적계획을 찾았으며, 비 균일하고 탐지환경지수가 열악한 기뢰원에 대해서는 총 주행거리 7,200M($n_x = 12, n_y = 6$)에서 목표탐지율을 만족하는 조합을 구했다.

탐색패턴은 대체로 $n_x = 4, n_y = 2$ 이하의 적은 기동 횟수에서는 탐지영역이 서로 겹치지 않는 궤적이 최적으로 선택되었고, 궤적을 중심으로 띠 모양의 미탐지 영역이 발생하는 경향을 보인다. $n_x = 6, 8$ 와 $n_y = 3, 4$ 와 같이 주행 횟수가 좀 더 많아지면 좁은 간격을 갖는 쌍 궤적의 비중이 높아지며 쌍 궤적에는 띠 모양의 미탐지 영역이 사라진다. 이러한 쌍 궤적 패턴은 주행 횟수가 더 커지면 사라지고 있다.

본 논문에서는 측면주사소나의 탐지 특성을 고려하여 탐색적인 최적화를 수행하여 주어진 탐지환경에서 최적 탐색패턴을 도출하는 과정을 기술하였다. 또한 주행 횟수에 따른 직교형 탐색패턴의 특성을 살펴보았다.

향후 연구사항으로는 먼저 실제 문제에 적용성을 높이기 위하여 직교형이 아닌 다른 패턴에 대한 정식화가 필요하며, 운용 부대의 실제 환경 데이터를 적용하는 다양한 환경에 대한 적용과 분석이 추가로 필요할 것으로 보인다. 또한 본 연구에서는 확률적 최적화 문제에서의 효과적인 적합도의 추정 방법에 대한 기법에 중점을 두었는데 PSO 알고리즘 자체의 하이퍼 파라미터의 최적화를 적용하는 연구가 필요하며 PSO 알고리즘 외에 유전 알고리즘이나 담금질 기법 등 다양한 최적화 알고리즘을 적용하는 연구도 수반되어야 할 것으로 판단된다.

References

Kye, J. E., Cho, J. I., Yoo, W. P., Choi, S. L., & Park, J. H. (2013). Trends and applications on multi-beam side scan sonar sensor technology. *Electronics and Telecommunications Trends*, 28(6), 167-179.

Yoo, T. S., Park, S. J., Yoon, S. I., & Park, H. G. (2020). Analysis of the Effectiveness of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Mine Search Operation by Side Scan Sonar Characteristics. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication*

- Engineering, 24(8), 1077-1085.
- Hong, S., Yoon, S., Choi, B., & Oh, H. (2014). A study for Optimization Methodology of Unmanned System Architecture for Mine Countermeasure Based on Effectiveness. *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 37(2), 62-69.
- Hwang, A., Kim, M. H., & Lee, S. Y. (2012). A Study of Simulation Model for Effectiveness Analysis Simulation of Unmanned Underwater Vehicle for Mine Searching. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 15(4), 410-416.
- Hwang, A., Kim, M. H., Lee, S. Y., Yoon, J. M., & Kim, C. K. (2011). A Study on Unmanned Underwater Vehicle Operational Performance Analysis for Mine Search Operation. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 14(5), 781-787.
- Nguyen, B., & Hopkin, D. (2005). Concepts of operations for the side scan sonar Autonomous Underwater Vehicles developed at DRDC Atlantic. DRDC Atlantic TM, 213.
- Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995a, October). A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science* (pp. 39-43). IEEE.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- Venter, G., & Sobieszczanski-Sobieski, J. (2002, September). Multidisciplinary optimization of a transport aircraft wing using particle swarm optimization. In *9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization* (p. 5644).
- Venter, G., & Sobieszczanski-Sobieski, J. (2003). Particle swarm optimization. *AIAA journal*, 41(8), 1583-1589.
- Cai, T., Pan, F., & Chen, J. (2004, June). Adaptive particle swarm optimization algorithm. In *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation* (IEEE Cat. No. 04EX788) (Vol. 3, pp. 2245-2247). IEEE.
- Gao, Y., & Duan, Y. (2007). An adaptive particle swarm optimization algorithm with new random inertia weight. In *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Contemporary Intelligent Computing Techniques: Third International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2007, Qingdao, China, August 21-24, 2007. Proceedings 3* (pp. 342-350). Springer Berlin Heidelberg.
- Gao, Y., & Ren, Z. (2007, August). Adaptive particle swarm optimization algorithm with genetic mutation operation. In *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)* (Vol. 2, pp. 211-215). IEEE.



이 동 훈 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0000-7591-4956> / ldh2214@paran.com)

1986 고려대학교 통계학과 경제학사
1988 고려대학교 통계학과 이학석사
1990~ 현재 국방과학연구소 해양기술연구원 수석연구원

관심분야 : 시뮬레이션, 국방 M&S, 최적화모델링



이 상 일 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1881-9041> / peterlee2231@gmail.com)

2001 해군사관학교 기계조선공학과 공학사
2006 서울대학교 기계항공공학부 기계공학석사
2013 Texas A&M Univ. 재료공학과 박사수료
2013~ 2019 해군사관학교 기계조선공학과/무기체계공학과 조교수
2019~ 현재 국방과학연구소 해양기술연구원 현역연구원

관심분야 : 국방 M&S, 최적화모델링, 소성재료전산해석, CFD



황 근 철 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-8594-629X> / hkchul@chol.com)

2001 경북대학교 전자전기공학부 학사
2003 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2023 한국과학기술원 로봇공학학제 박사과정
2003~ 현재 국방과학연구소 해양기술연구원 책임연구원

관심분야 : 무기체계 모델링&시뮬레이션, 체계운용효과도 분석
모델기반 시뮬레이션, 로보틱스



윤 원 영 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-1096-8651> / wonyun@pusan.ac.kr)

1982 서울대학교 산업공학과 학사
1984 KAIST 산업공학과 석사
1988 KAIST 산업공학과 박사
1989~ 현재 부산대학교 교수

관심분야 : RAM 및 예방정비 최적화, 검사정책, 보증정책, 시뮬레이션