

대잠전 의사결정지원 시스템에서 표적 탐색 논리 연구

A Study on the Target Search Logic in the ASW Decision Support System

조성진* 최봉완** 전재효**
Sung-Jin Cho Bong-WanChoi Jae-Hyo Jeon

Abstract

It is not easy job to find a underwater target using sonar system in the ASW operations. Many researchers have tried to solve anti-submarine search problem aiming to maximize the probability of detection under limited searching conditions. The classical 'Search Theory' deals with search allocation problem and search path problem. In both problems, the main issue is to prioritize the searching cells in a searching area. The number of possible searching path that is combination of the consecutive searching cells increases rapidly by exponential function in the case that the number of searching cells or searchers increases. The more searching path we consider, the longer time we calculate. In this study, an effective algorithm that can maximize the probability of detection in shorter computation time is presented. We show the presented algorithm is quicker method than previous algorithms to solve search problem through the comparison of the CPU computation time.

Keywords : Search Theory, Optimization, Decision Support System, ASW, Military O.R.

1. 서론

대잠전 수행시 가장 중요한 것은 표적을 찾는 것이다. 대잠전시 사용하는 센서는 소나(SONAR)이며 탐지 거리는 짧다. 이러한 환경 즉 제한된 탐색 능력으로 표적에 대한 탐지확률을 최대화 하고자 하는 것이 탐색문제의 목적이다. 탐색문제에서 표적의 형태로는 고정된 표적과 이동표적이 있다. 고정된 표적은 침몰선

과 같이 시간이 흐르더라도 위치 이동이 크지 않는 경우에 해당되며 이동표적은 잠수함과 풍랑속의 조난선과 같이 시간의 흐름에 따라 표적의 위치가 변하는 경우이다.

탐색자(searcher)의 탐색형태는 Fig. 1과 같이 탐색할당(search allocation)과 탐색경로(search path)로 구분할 수 있다. 탐색할당은 항공기와 같이 빠른 이동 속도를 가지면서 지정된 위치에서만 탐색이 가능한 경우이며 탐색경로는 수상함정과 같이 저속으로 이동하면서 계속 탐색을 수행할 수 있는 경우에 해당된다.

이러한 탐색 문제를 수학적 방법으로 접근한 것이 '탐색이론'이다. 이러한 이론을 대잠 의사결정지원 시스템 중 탐색분야에 응용한다면 보다 효과적인 작전 수행이 가능할 것이다. 일반적인 탐색문제는 Fig. 2와

† 2010년 7월 8일 접수~2010년 9월 10일 게재승인

* 국방대학교 군사운영분석(KNDU)

** 해군 전력분석시험평가단 체계분석처(Naval Forces

Analysis, Test & Evaluation Group)

책임저자 : 조성진(pkm366@snu.ac.kr)

같이 셀(cell)이라는 탐색구역으로 나누어 모델링한다. 탐색구역을 나누어 탐색하는 문제는 탐색면적이 넓고 다수의 탐색자산들을 운용하여 표적의 탐지 가능성을 최대화하고자 할 때 적절한 문제이다.

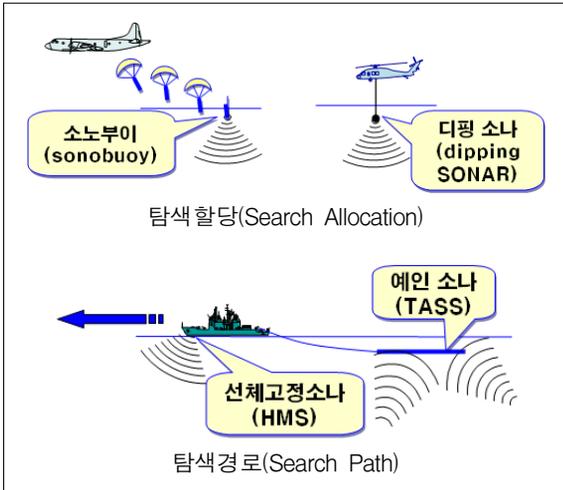


Fig. 1. 탐색형태에 의한 구분

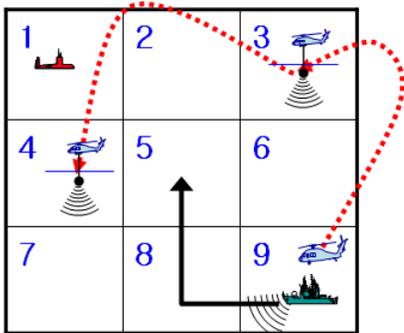


Fig. 2. 탐색구역(cell)과 탐색순서 예

탐색할당과 탐색경로는 각 탐색구역에 대한 탐색순서를 결정하는 것이다. 가능한 탐색순서의 개수는 탐색구역이 9개, 탐색횟수가 6회일 때는 2,200개이며, 탐색횟수가 12회일 때는 722만개이다. 특히 탐색자가 증가하는 경우 가능한 탐색순서 개수는 지수 함수적으로 증가하는 매우 어려운 문제가 된다.

본 연구는 빠른 시간 내에 탐지확률을 최대화하는 탐색순서를 구하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 실험 결과를 통하여 기존 연구보다 우수하면서 의사결정지원 시스템에 유용하게 적용할 수 있는 표적 탐색 논

리를 보이고자 한다.

2. 탐색 이론

가. 이론적 배경

탐색문제 연구의 시작은 제2차세계대전시 독일 잠수함에 대항하기 위한 영국의 ORS(Operational Research Section) 연구이다. 독일 잠수함의 공격으로부터 안전하게 선단을 호송하는 문제와 항공기와 수상함에 의한 대잠수함 공격 문제 등이 연구의 중심이었다^[4]. 이러한 연구가 성과를 나타내자 미국은 이를 받아들여 다양한 OR 그룹들을 창설하였다. 그중 ASWORG(Anti-Submarine Warfare Operations Research Group)로서 탐색문제를 이론적으로 발전시키면서 다양한 방안들을 연구하였다^[3]. 연구자 중 Koopman의 연구는 현재 탐색문제 연구의 시발점이 되는 중요한 업적을 남겼다^[2]. 전후 탐색이론을 응용한 사례로는 1968년에 실종된 미 핵잠수함 ‘스콜피온’ 탐색 작전^[7]과 CASP(Computer Assisted Search Planning) 체계를 이용한 구소련 잠수함 탐색 등의 사례가 있다^[9].

나. 기존 연구

탐색순서를 찾는 기존 연구들은 탐색 공간을 4각형 셀의 형태로 표현하였다. Trummel과 Weisinger의 연구에서는 탐색자의 최적 탐색경로를 구하는 문제가 Hamiltonian Path를 이용하여 NP-complete임을 증명하였다^[8]. Dell et al.의 연구에서는 다수 탐색자에 의한 이동표적 탐색 문제에 대하여 표적의 이동 확률은 Markov process 형태로 가정하였고 탐색경로를 구하는 방법으로 7가지 알고리즘을 제시하였다^[5]. 제시한 알고리즘 중 유전자 알고리즘만이 크기가 가장 큰 문제에서 사용가능하였으며, 탐색자가 3개인 실험에서는 셀 크기가 25개까지 수행이 가능하였으며 CPU 시간도 100분 이상 소요되었다(1996년 PC 성능 기준). 그러나 실제 탐색 문제에서는 빠른 시간 내에 탐색경로를 찾아야 하므로 더 빠른 계산을 가지는 알고리즘이 필요하다. Hong et al.의 연구는 단독 탐색자 문제를 다루었으며 휴리스틱 알고리즘의 단점인 해의 품질 문제를 보완하여 최적해보다 $\left(1 + \frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)$ 배 크지 않으면서 계산이 빠른 근사 알고리즘을 제시하였다(‘ ϵ ’은 정확한 확률에 대한 근사확률의 상관오차)^[6,12].

3. 표적 탐색 모형 및 알고리즘

가. 현실적인 탐색 모형

기존 연구 모형들은 Fig. 3 (a)와 같이 4각형 셀에서 탐색자가 매 단위시간 동안 1개의 셀을 탐색하는 것으로 가정한다. 이 연구 모형의 단점은 탐색자가 표적에서 멀리 있는 경우 현실성이 낮다는 것이다. 실제로 탐색자는 Fig. 3 (b)와 같이 FOC(Farthest On Circle)를 고려하여 탐색을 시작함으로써 탐지확률을 높이고자 할 것이다. 또한 본 연구에서는 6각형 셀로 탐색구역을 구분하여 보다 현실적인 모형이 되도록 하였다.

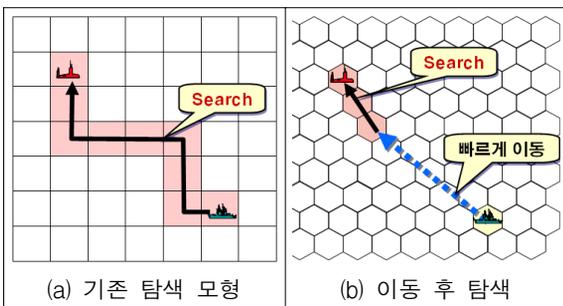


Fig. 3. 탐색구역 및 탐색 시작 방법

탐색자가 빠르게 고속으로 이동할 때는 표적을 탐지할 수 없으며 탐색시작 위치부터는 저속으로 이동하면서 탐색하는 모형이다.

이와 같은 탐색문제 해결을 위해 탐색자의 행동을 다음과 같이 구분하였다:

- ① 탐색자는 표적이 있을 확률이 가장 큰 셀(탐색시작 셀)을 찾아 고속으로 이동한다.
- ② 탐색시작 셀부터는 근사확률과 네트워크 이론을 응용하여 탐색 경로를 구한다.

나. 근사 확률(approximation probability)

본 연구의 표적 탐색 모형은 다음과 같다:

- ① 탐색자와 표적은 셀 크기 C 내에 위치하며 유한 시간 T 동안 이동한다.
- ② 표적은 인접 셀로만 이동하며 Markov process로 가정한다.
- ③ 탐색자와 표적이 같은 셀에 있을 때 탐지확률은 Koopman 공식인 $1 - e^{-\alpha_j}$ 를 사용한다. (α_j : 셀 j 에

서 search effort)

탐색시간 T 까지의 탐색경로에 대한 탐지확률은 다음과 같이 계산된다:

PND : 비탐지 확률(nondetection probability)

T : 탐색 제한 시간

t : 시간 $t=0,1,2,\dots,T$

I_t : 시간 t 에서 표적이 탐지 되지 않을 사건

$\Pr(I_t \cdot \dots)$: t 에서 표적이 탐지되지 않을 확률

$$PND = \Pr(I_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \dots \cdot I_T) \\ = \Pr(I_0) \frac{\Pr(I_0 \cdot I_1)}{\Pr(I_0)} \dots \frac{\Pr(I_0 \cdot I_1 \cdot \dots \cdot I_T)}{\Pr(I_0 \cdot \dots \cdot I_{T-1})} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 최대 탐지확률을 구하기 위해서는 모든 탐색경로들을 구하여야만 한다. T 시간 크기의 탐색경로를 적용한다면 NP-hard 문제가 되기 때문에 본 연구에서는 작은 시간 간격만 고려한 근사 확률을 이용하고자 한다. 시간 간격을 '5(steps)'로 정의할 때 근사 비탐지확률 계산은 다음과 같다:

$$PND_{AP} = \Pr(I_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4) \frac{\Pr(I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4 \cdot I_5)}{\Pr(I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4)} \\ \frac{\Pr(I_2 \cdot I_3 \cdot I_4 \cdot I_5 \cdot I_6)}{\Pr(I_2 \cdot I_3 \cdot I_4 \cdot I_5)} \frac{\Pr(I_3 \cdot I_4 \cdot I_5 \cdot I_6 \cdot I_7)}{\Pr(I_3 \cdot I_4 \cdot I_5 \cdot I_6)} \\ \dots \frac{\Pr(I_{T-4} \cdot I_{T-3} \cdot I_{T-2} \cdot I_{T-1} \cdot I_T)}{\Pr(I_{T-4} \cdot I_{T-3} \cdot I_{T-2} \cdot I_{T-1})} \quad (2)$$

식 (2)의 PND_{AP} 는 매 시간 시점에서 시간 간격이 5인 탐색경로만 고려한 근사 비탐지확률로 정의된다.

다. 근사확률을 이용한 비순환 네트워크 구성

근사확률을 이용하여 구하여진 각 시간별 비탐지확률 값들을 네트워크 이론의 호(arc)로 나타내면 비순환 네트워크(acyclic network)를 구성할 수 있다. 비순환 네트워크는 호의 흐름이 순환하지 않고 한 쪽 방향으로만 구성되어 있다. 비순환 네트워크의 큰 특징은 호의 개수가 m 일 때 최단경로를 구하는 복잡도가 $O(m)$ 이라는 점이다^[1]. 시간 t 에서 탐색 셀을 j_t 라 할 때 호의 비용(cost) 계산식은 다음과 같다:

$$\text{cost}(j_t, j_{t+1}, j_{t+2}, j_{t+3}, j_{t+4}) = \log(PND_{AP}) \quad (3)$$

Fig. 4는 9개 셀에서 PND_{AP} 의 비용(cost)을 비순환 네트워크로 나타낸 것이다. ‘s’는 탐색 시작 셀이다.

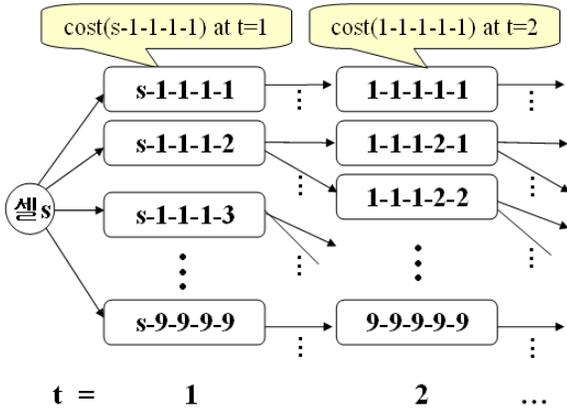


Fig. 4. 9개 셀에서 Acyclic Network 구성 예

탐색경로의 비순환 네트워크가 T 시간까지 구성되면 전체 네트워크의 구성이 완료된다. 최단경로를 구하는 방법으로 마지막 T 에서 비용이 가장 작은 호를 택하면 최소 비탐지확률이 되며 그 호와 연결된 호를 역순서로 연결하면 탐지확률을 최대화하는 탐색경로가 된다.

라. 알고리즘 및 계산 복잡도

근사확률과 비순환 네트워크를 이용하여 탐지확률을 최대화하는 탐색경로 찾기 알고리즘은 다음과 같다:

- tg : 표적의 최초 위치
- j : 셀 번호, $j \in \{1, 2, \dots, C\}$
- t : 탐색시 단위시간
- $\pi_{j,t}$: 시간 t , 셀 j 에서 표적이 있을 확률
- P : 각 셀간 표적의 이동행렬(transition matrix)
- z : 전체 탐색자 수
- b : 탐색자 번호
- s_b : 탐색자 b 의 최초 셀 위치
- v_{max} : 탐색자의 최고 이동 속도
- C : 탐색구역 내 셀 개수(셀 크기)
- s'_b : 탐색자 b 의 탐색시작 셀 위치
- t'_b : s_b 에서 s'_b 까지 소요시간
- T : 탐색 제한 시간
- $path(t)$: 시간 t 에서 탐색자가 위치한 셀

< Algorithm-I >

- 1: $\pi_{t_g,0} = 1, \pi_{j,t} \leftarrow \pi_{j,t-1}P$
- 2: For $b = 1$ to z do
- 3: For $d = 1$ to C do
- 4: $t_b = \frac{|s_b - d|_2}{v_{max}}$; 셀 d 까지 탐색자 b 의 이동시간
- 5: end-do
- 6: $s'_b, t'_b \leftarrow \text{find } d \text{ maximizing } \pi_{d,t_b} \text{ for } d \in C$
- 7: $path(t'_b) \leftarrow s'_b$ (각 탐색자의 시작 셀)
- 8: For $t = t'_b + 1$ to T do
- 9: $path(t) \leftarrow t$ 에서 탐색자가 위치한 셀
cost($path(t), \dots, path(t+4)$)의 비탐지확률을 구하여 비순환 네트워크(Fig. 4 참조)를 구성한다.
- 10: end-do
- 11: 구성된 비순환 네트워크에서 최단경로를 구하면 비탐지확률을 최소화하는 탐색경로가 구하여 진다.
- 12: 탐색자 b 의 경로를 반영하여 $\pi_{j,t} \leftarrow \pi_{j,t-1}P$ 를 다시 계산한다.
- 13: end-do
- 14: 하여진 z 개의 탐색경로를 종합하여 전체 탐지확률을 계산한다.

< Algorithm-II >

‘Algorithm-II’는 ‘Algorithm-I’을 변형한 것으로 최초 $t=0$ 인 시점에서만 전체 네트워크를 구성한다. 이후 부터는 매 시간별 최소값을 가지는 PND 마디만 선택하여 부분 네트워크를 구성해 나간다. ‘Algorithm-II’는 초반의 탐색경로가 전체 탐지확률에 큰 영향을 주기 때문에 후반의 탐색경로는 큰 의미가 없다는 개념 하에 제시한 알고리즘이다.

< 계산 복잡도 >

Algorithm-I : 이동 가능한 인접 셀의 개수가 ‘ ν ’일 때 각 호의 비용에 대한 계산 복잡도는 $O((\nu+1)^3)$ 이고, 비순환 네트워크의 호의 크기는 $\nu^3 CT$ 이다. 여기에 전체 탐색자 수와 탐색시작 위치를 구하는 것까지 고려하면 알고리즘의 복잡도 크기는 다음과 같다:

$$O(z \times [C + (\nu + 1)^8 CT]).$$

Algorithm-II : 각 호의 비용은 $O((\nu + 1)^3)$ 이고, 비순환 네트워크 호의 크기는 ' $\nu^5 C + \nu T$ '이며 ' $\nu^5 C > \nu T$ '이 되므로 복잡도 크기는 다음과 같다:

$$O(z \times [C + (\nu + 1)^8 C]).$$

4. 수치 실험

가. 기존 실험과 비교

기존 연구인 Dell et al.^[5]의 실험결과에 대해 본 연구와의 해의 오차를 보이고자 한다. Table 1은 실험예제를 나타낸 것이며, $\alpha = 1.0$ (search effort)에서 실험한 결과와 비교하였다.

Table 1. Dell et al. 실험예제

탐색자 수 z	셀 크기 C	탐색 제한시간 T
1	25	12
2	49	20
3		

본 연구에 사용된 PC 사양은 'Intel(R) Core Duo 2.13GHz CPU(6400), 1GB RAM'이며 Xpress -IVE S/W를 사용하였다.

Table 2는 Dell et al.의 7가지 알고리즘을 이용한 실험 결과 중 최적해(optimum) 또는 최고해(best)에 대하여 본 연구 실험과의 상관오차를 나타낸 것이다. Dell et al.의 알고리즘은 3개 탐색자에서 25셀 크기까지만 가능하였다.

Table 2에서 '-'값은 Dell et al.의 결과보다 더 좋은 값을 보인 경우이다. 상관오차가 최대 4.2%까지 보이는 경우도 있지만 평균 0.9%로써 오차율이 크지 않음을 알 수 있다.

Table 3은 실험 크기 및 알고리즘에 따른 CPU 시간을 나타낸 것이다. Dell et al.의 7개 알고리즘 중 유전자 알고리즘만이 탐색자 3개, 25셀까지 사용 가능하였다.

CPU 시간을 비교하면 본 연구의 알고리즘은 PC 성능을 고려하더라도 Dell et al.의 연구보다 매우 빠름을 알 수 있다.

Tale 2. Dell et al. 결과와의 상관오차(%)

z	C	T	Algo.-I	Algo.-II
1	25	12	0.2	0
		20	-0.8	-0.4
	49	12	0	0
		20	-2.2	-1.6
2	25	12	3.3	1.9
		20	1.9	0.9
	49	12	1.5	4.2
		20	0.8	2.2
3	25	12	2.6	1.8
		20	1.4	0.3
	49	12	×	×
		20	×	×

Table 3. CPU 시간 비교

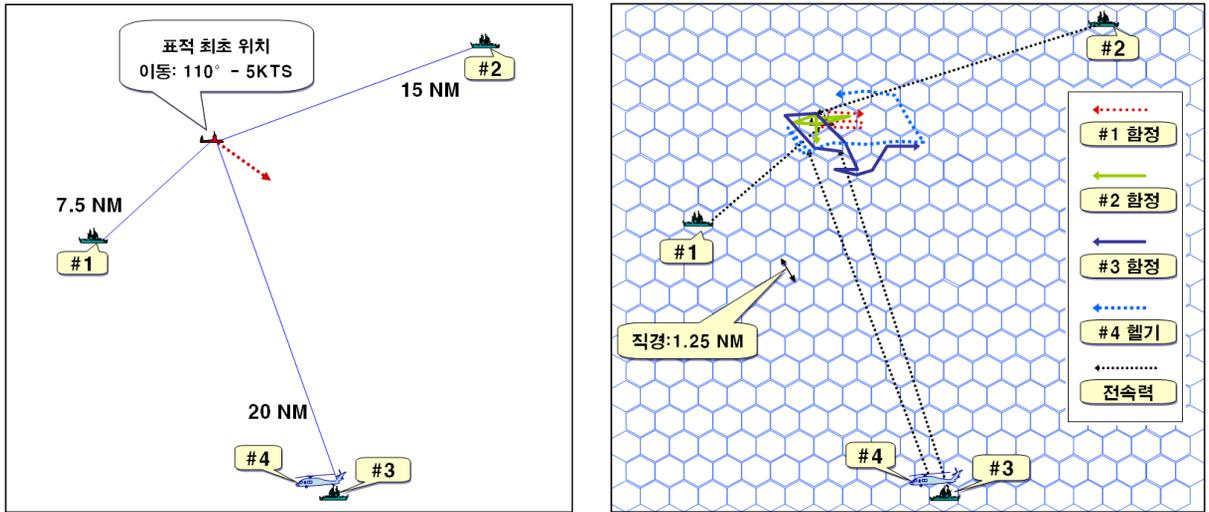
실험 크기	알고리즘	CPU 시간
$z = 3, T = 20$ $C = 25$	Dell et al.의 유전자 알고리즘	100min. (Dell et al.논문)
$z = 3, T = 20$ $C = 49$	Algorithm-I	3.34sec.
	Algorithm-II	0.32sec.

본 연구가 제시하는 알고리즘의 특징은 탐색자 수, 셀 크기, 탐색시간이 증가하여도 빠른 시간 내에 탐색 경로를 구할 수 있다는 점이다.

나. 응용 실험 시나리오

본 연구의 탐색 논리의 실제 응용성을 보이기 위해 다음과 같은 시나리오를 구성하였다:

- ① 탐색 세력은 3척의 수상함정과 1대의 대잠헬기로 구성되었다.
- ② 제 3의 정보에 의해 표적의 최초 위치와 침로-속력은 탐색자가 알고 있다.
- ③ 수상함정의 최대 이동속도는 탐색속도보다 3배 빠르게 수중 탐지가 불가능하다.
- ④ 탐색구역(셀)의 크기는 직경이 1.25NM로서 탐지확



(a) 4개 탐색 세력들의 최초 위치 (b) 400개 셀에서 구한 탐색 세력들의 탐색경로

Fig. 5. 탐색문제 응용 시나리오

률은 40%로 가정한다.

⑤ 탐색 제한시간은 5시간이다.

Fig. 5 (a)는 4개 탐색 세력에 의한 탐색문제 시나리오를 나타낸 그림이다. 3척의 수상함정과 1대의 대잠 헬기를 탐색 세력으로 구성하였다. 표적 위치와 침로-속력은 제3의 정보에 의해 확인된 것이며 최초 정보를 기준으로 표적의 이동 위치를 Markov process로 가정하여 탐색경로를 구한다.

Fig. 5 (b)는 셀의 직경을 1.25NM으로 구분하여 400개의 셀로 구성된 탐색공간이다. ‘Algorithm-II’를 사용하여 탐색경로들을 구하였으며 실험결과 탐지확률은 63%이고 CPU 시간은 7.8sec.가 소요되었다. 각 탐색 세력들의 탐색경로는 중복되지 않게 산출되었다.

5. 결론

기존 연구는 탐색자가 단독인 경우에 대하여 주로 다루었고, 다수 탐색자에 대해서 Dell et al.^[5]의 연구는 최대 3개까지 가능하였으며 셀의 규모도 25개로 제한되었다. 그리고 CPU 시간도 당시 PC 사양(1996년)을 고려하더라도 100분 이상 소요되어 실제 문제에 사용하기에는 곤란한 점이 있다. 이는 탐색자가 증가하면 탐색자의 수가 자승으로 증가하는 복잡도이기

때문이다. 최적화 이론 관점에서는 최적해가 중요하지만 탐색이라는 현실 문제에서는 약간의 오차가 있더라도 빠른 시간 내에 탐색경로를 구하는 것이 중요할 것이다. 하나의 탐색자에 대한 복잡도를 $O(K)$ 라 정의하면, 기존 다수 탐색자의 연구는 복잡도가 $O(K^2)$ 이 되지만 본 연구에서는 $O(zK)$ 의 복잡도를 가진다. 실험결과 또한 빠른 CPU 시간을 보이면서도 오차는 4% 이내를 보임으로써 응용성이 높은 알고리즘임을 보였다.

연구발전 분야로 첫 번째는 이동-표적의 묘사에 대한 연구가 필요하다. 기존에는 Markov process로 가정하였지만 이동-표적 묘사에 한계가 있기 때문이다. 신내호 등^[10]의 탐지확률지도와 장인갑 등^[11]의 예측위치 전략 연구 등을 활용하여 보완한다면 더욱 현실적인 모형 구현이 가능할 것이다.

두 번째로는 선택한 셀에서 어떠한 방법으로 탐색할 것인지에 대한 연구이다. 이 부분은 탐색 패턴에 해당되며 가장 효과적인 탐색패턴을 찾아 본 연구의 탐색경로와 융합하여 활용한다면 의사결정지원 시스템에서 효과적인 탐색 논리로 활용될 수 있다.

Reference

[1] Ahuja, R. K., Magnanti, T. and Orlin, J. B., “Network

- Flows(Theory, Algorithms, and Applications)", Prentice Hall, INC., 1993.
- [2] Koopman, B. O., "Search and Screening : General Principles with Historical Applications", Military Operations Research Society, Alexandria, Virginia, USA, 1999.
- [3] Morse, P. M. and Kimball, G. E., "Methods of Operations Research", The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1970.
- [4] Waddington, C. H., "O.R. in World War 2 : Operational Research Against the U-boat", Paul Elek (Scientific Books) Ltd., London, England, 1973.
- [5] Dell, R. F., Eagle, J. N., Martins, G. H. A. and Santos, A. G., "Using Multiple Searchers in Constrained-Path, Moving-Target Search Problem", Naval Research Logistics, Vol. 43, pp. 463~480, 1996.
- [6] Hong, S. P., Cho, S. J. and Park, M. J., "A Pseudo-Polynomial Heuristic for Path-Constrained Discrete-Time Markovian- Target Search", European Journal of Operational Research, Vol. 193, pp. 351~364, 2009.
- [7] Richardson, H. R. and Stone, L. D., "Operations Analysis During the Underwater Search for Scorpion", Naval Research Logistics, Vol. 18, pp. 141~157, 1971.
- [8] Trummel, K. E. and Weisinger, J. R., "The Complexity of the Optimal Search Path Problem", Operations Research, Vol. 34, pp. 324~327, 1986.
- [9] Frost, J. R. and Stone, L. D., "Review of Search Theory : Advances and Applications to Search and Rescue Decision Support", Technical Report, (CG-D-15-01), U.S. Coast Guard Research and Development Center, 2001.
- [10] 신내호, 오명호, 최호립, 정동윤, 이용웅, "지형공간정보 기반의 침투위험도 예측 모델을 이용한 최적 침투지역 분석", 한국군사과학기술학회지, 제12권 제2호, pp. 199~205, 2009년 4월.
- [11] 장인갑, 홍정식, 김지표, 이창훈, "이동 통신망에서 방향성을 지닌 2개의 연속적 위치 영역을 이용한 예측 위치 관리 전략", 한국경영과학회지, 제33권 제3호, pp. 43~58, 2008년 9월.
- [12] 조성진, "제한된 경로를 가지는 이동-표적 탐색 문제에 대한 휴리스틱 알고리즘 연구", 박사학위 논문, 서울대학교 대학원, 2008년.