
방향탐지장비의 삼차원 최적 배치

이호주* · 김창근** · 강성수***

3-D Optimal Disposition of Direction Finders

Ho-Joo Lee* · Chang-Geun Kim** · Sung-Su Kang***

이 논문은 2010년도 경남과학기술대학교 산학협력단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

요 약

본 논문은 삼차원 공간에서 방향정보를 이용하여 위치추정을 위한 방향탐지장비의 최적배치 방법을 제시한다. 방향탐지장비는 전파를 발신하는 적의 위치를 탐지하는 장비로써 현재 육군에서 전력화되어 운용 중에 있다. 위치추정을 위해서는 두 대 이상의 장비를 동시에 운용해야 한다. 만일 한 대 이상의 장비를 공중에서 운용할 경우, 보다 나은 장비배치 형상을 이룸으로써 위치추정 정확도를 향상시킬 수 있다. 제안된 방법에서는 이차원 위치추정 알고리즘을 비선형계획법을 활용하여 삼차원으로 확장하고 수리적으로 그 해를 구하였다. 삼차원 위치추정 알고리즘을 토대로 시뮬레이션 기법과 탐색 기법을 융합한 최적배치 알고리즘을 고안하였다. 실험을 통하여 제안된 최적배치 방법은 적이 존재하는 지역에 대한 위치추정 정확도를 향상시킴으로써 방향탐지장비의 운용효과를 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, a simulation-based method is presented to dispose direction finders in three dimensional space for locating targets using the directional data. A direction finder(DF) is a military weapon that is used to find locations of targets that emit radio frequencies by operating two or more DFs simultaneously. If one or more DFs are operated in the air, the accuracy of location estimation can be enhanced by disposing them in a better configuration. By extending the line method, which is a well-known algorithm for 2-D location estimation, into 3-D space, the problem of 3-D location estimation is defined as a nonlinear programming form and solved analytically. Then the optimal disposition of DFs is considered with the presented method in which methods of simulation and search technique are combined. With the suggested algorithm for 3-D disposition of DFs, regions in which targets exist can be effectively covered so that the operation effect of DF be increased.

키워드

군, 위치추정, 비선형계획법, 방향탐지장비, 방향정보, 최적배치

Key word

Military, Location estimation, Nonlinear programming, Direction finder, Directional data, Optimal Disposition

* 정회원 : 국방과학연구소

** 정회원 : 경남과학기술대학교 (교신저자, cgkim@jinju.ac.kr)

*** 종신회원 : 경남과학기술대학교

접수일자 : 2010. 12. 28

심사완료일자 : 2011. 03. 19

I. 서 론

적에 대한 위치정보는 군사작전 수행에 있어서 반드시 필요한 핵심 정보이다. 표적의 위치 정보를 획득하는 방법 중 하나는 방향정보(LOB : Line Of Bearing)를 이용하는 것인데, 표적이 발신한 신호(전자파)에 대한 도래 방향을 측정하여 결정할 수 있다. 이를 위한 대표적인 장비가 전자전장비의 일종인 방향탐지장비(DF: Direction Finder)이다.

표적의 위치를 얻기 위해서는 최소 2개 이상의 방향 정보가 필요하므로 2대 이상의 방향정보 획득 장비(이하 'DF')를 하나의 체계 내에서 동시에 운용하여야 한다. 지상에서 운용하는 DF는 방향정보 획득 간에 지형적인 영향으로 방향정보 측정의 정확도가 감소될 수 있고, 장비의 이동이 제한되므로 동시 운용되는 다수의 장비들을 최적으로 배치하여 운용하기가 쉽지 않다. 하지만, 방향정보 획득 기술의 발전으로 DF의 소형·경량화를 통한 항공기 등에 장착함으로써 공중에서 운용할 경우, 방향정보 측정의 정확도 향상 및 최적배치의 용이성으로 보다 효과적인 장비 운용이 가능하다.

표적의 위치는 방향정보를 이용한 위치측정 알고리즘을 통하여 계산된다. 대표적인 이차원 위치측정 알고리즘으로는 Line to Point transformation method, Point method, Line method, Angle method 등이 있다[1]. 이 중 Angle method(AM)가 가장 정확한 위치측정 결과를 주지만, 분석적(수리적)인 방법으로 그 해를 계산할 수가 없으므로 탐색 기법을 사용해야 하는 단점이 있다. 반면, Line method(LM)는 신속한 계산은 물론 그 정확도가 높은 편이므로 가장 널리 사용된다[2,3]. 삼차원 위치측정은 기존의 이차원 알고리즘을 삼차원으로 확장함으로써 가능하다. 이 때 방향정보는 적이 발신한 신호에 대하여 공간상에서 두 개의 각도로 정의되는데, 방위각(azimuth angle)과 고도각(elevation angle)이다.

본 논문에서는 비선형계획법(Nonlinear Programming)을 활용하여 이차원 위치측정 문제를 삼차원으로 확장하여 재정의한 후, 그것을 토대로 시뮬레이션 및 탐색기법을 융합한 방향탐지장비의 삼차원 최적배치 방법을 제안한다. 제안된 삼차원 위치측정 알고리즘과 최적배치 방법론은 실험을 통하여 평가하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이차원 위치

측정 알고리즘을 삼차원 공간으로 확장한 방법에 대하여 기술한다. 삼차원 위치측정 알고리즘 기반의 삼차원 최적배치 방법론은 3장에서 제시되고, 그에 대한 실험 결과는 4장에 기술된다. 마지막으로, 결론은 5장에 기술된다.

II. 삼차원 위치측정 알고리즘

표적에 대한 측정된 위치는 두 대 이상의 DF들을 어떻게 배치하는가와 어떤 위치측정 알고리즘을 사용하는가에 따라 달라진다. 표적에 대한 위치측정점은 방향정보(이하 'LOB')와의 거리 또는 LOB와 이루는 각도로 정의되는데, 이를 위하여 사용되는 부호는 아래와 같다.

- $t' \equiv (x^t, y^t, z^t)$ 표적(target)의 실제 위치
- $t' \equiv (x', y', z')$ 표적에 대해 측정된 위치(LOB를 이용하여 추정된 위치)
- $f_i \equiv (x_i, y_i, z_i)$ DF i 의 위치, $i=1, \dots, n$
- l_i DF i 에 의해 얻어진 LOB(즉, DF i 와 t' 를 잇는 직선)
- θ_i l_i 의 방위각(DF i 를 통과하는 수평선으로부터 반시계방향으로 측정)
- $\Delta \theta$ 두 점 f_i 와 t' 를 잇는 직선의 방위각과 θ_i 와의 각도 차
- 0 원점
- $d(a,b)$ 두 점 a 와 b 사이의 거리
- $d(l_i,b)$ 직선 l_i 와 점 b 와의 최단거리

DF i 의 LOB에 대한 방위각은 식 (1)과 같이 정의되는데, ε_i 은 LOB 측정 간에 지형, 환경 및 기계적 원인에 의해 발생하는 측정오차를 의미한다. 통상 ε_i 는 평균이 0이고 분산이 σ_i^2 인 정규분포를 따른다고 알려져 있으며 σ_i 는 통상 DF i 의 정확도로 간주된다[3].

$$\theta_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{(x^t - x_i)}{(y^t - y_i)} \right\} + \varepsilon_i \quad (1)$$

삼차원 공간에서 LOB를 정의하기 위해서는 θ_i 외에 고도각(ϕ_i)이 추가적으로 필요하며 식 (2)로 계산된다.

고도각 측정 간에 발생하는 오차 ε_i^z 는 ε_i 와는 상호 독립으로 발생되고 그 분포 특성이 σ_i 와 유사하게 평균이 0이고 분산이 $(\sigma_i^z)^2$ 인 정규분포를 따른다고 통상 가정한다.

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{(x^t - x_i)^2 + (y^t - y_i)^2} / (z^t - z_i) \right\} + \varepsilon_i^z \quad (2)$$

Θ_i 와 φ_i 를 이용하여 l_i 의 방향벡터를 식 (3)~(6)과 같이 정의한 후, 식(7)과 같이 삼차원 공간 상의 직선으로 정의할 수 있다.

$$\vec{u}_i \equiv (a_i, b_i, c_i) \quad (3)$$

$$a_i = \cos\theta_i \sin\varphi_i \quad (4)$$

$$b_i = \sin\theta_i \sin\varphi_i \quad (5)$$

$$c_i = \cos\varphi_i \quad (6)$$

$$\frac{x - x_i}{a_i} = \frac{y - y_i}{b_i} = \frac{z - z_i}{c_i} \quad (7)$$

이차원 평면 상에서의 대표적인 위치측정 알고리즘인 LM(Line Method)에 의한 위치측정점(t')은 LOB들과의 거리의 제곱합을 최소화하는 점으로 정의되는데, 식 (8)을 풀어 구할 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^n \{d(l_i, t')\}^2 \quad (8)$$

삼차원 공간으로 확장된 LM(이하 '3-D LM')을 정의하기 위하여 비선형계획법(NLP: nonlinear programming)에 기반한 방법을 제안한다. 미지의 점 t' 에서 l_i 위로 내린 수선점을 h_i 라고 하고 식 (7)에 변수 k_i 를 도입하여 l_i 를 식 (9)와 같이 두면,

$$\frac{x - x_i}{a_i} = \frac{y - y_i}{b_i} = \frac{z - z_i}{c_i} = k_i \quad (9)$$

수선점 h_i 의 좌표는 $(a_i k_i + x_i, b_i k_i + y_i, c_i k_i + z_i)$ 로 표현되며, t' 에서 h_i 로의 벡터($\vec{t'h}_i$)는 $\vec{0h}_i - \vec{0t'}$ 이므로 식 (10)으로 표현된다.

$$\vec{t'h}_i = (a_i k_i + x_i - x', b_i k_i + y_i - y', c_i k_i + z_i - z') \quad (10)$$

이 때 $\vec{t'h}_i \perp l_i$ 이므로 그 내적(inner product)이 0이라는 사실을 제약식으로 사용하면, 3-D LM은 식 (11)~(12)의 NLP로 정의 가능하다.

3-D LM

$$\min F(X) = \sum_{i=1}^n [(a_i k_i + x_i - x)^2 + (b_i k_i + y_i - y)^2 + (c_i k_i + z_i - z)^2] \quad (11)$$

s.t.

$$g_i(X) = (a_i k_i + x_i - x)a_i + (b_i k_i + y_i - y)b_i + (c_i k_i + z_i - z)c_i = 0 \quad \forall i \quad (12)$$

3D-LM은 목적함수가 볼록함수(convex programming)이고 제약식이 선형이므로 라그랑지 변수(Lagrangian multiplier: $\lambda_1, \dots, \lambda_n$)를 도입하여 식 (14)의 쿤-터커(Kuhn-Tucker) 최적조건(optimality condition)을 적용하여 얻어진 선형시스템(linear system)의 해가 바로 구하고자 하는 위치측정점(t')이다.

$$\nabla F(X) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \nabla g_i(X) = 0 \quad (14)$$

식 (14)에서 결정변수 X 는 $(x, y, z, k_1, k_2, \dots, k_n)$ 이며, $\nabla F(X)$ 와 $\nabla g_i(X)$ 는 각각 $F(X)$ 및 $g_i(X)$ 에 대한 기울기 벡터(gradient vector)로써 식 (15)~(16)과 같다.

$$\nabla F(X) = \left\{ \frac{\partial F(X)}{\partial x}, \frac{\partial F(X)}{\partial y}, \frac{\partial F(X)}{\partial z}, \frac{\partial F(X)}{\partial k_1}, \dots, \frac{\partial F(X)}{\partial k_n} \right\} \quad (15)$$

$$\nabla g_i(X) = \left\{ \frac{\partial g_i(X)}{\partial x}, \frac{\partial g_i(X)}{\partial y}, \frac{\partial g_i(X)}{\partial z}, \frac{\partial g_i(X)}{\partial k_1}, \dots, \frac{\partial g_i(X)}{\partial k_n} \right\} \quad (16)$$

이차원 상에서의 AM에 의한 위치측정점(t')은 $\Delta \Theta (= \sin - \{d(l_i, t')/d(f_i, t')\})$ 의 제곱합을 최소화하는 점으로

정의되므로 삼차원 공간으로 확장한 AM(이하 '3D-AM')은 식 (17)과 같이 정의할 수 있다. 하지만, 그 해는 식에서도 쉽게 확인되듯이 분석적으로 구할 수 없기 때문에 탐색기법 또는 근사적인 해법의 적용이 요구된다.

3-D AM

$$\min \sum_{i=1}^n [\sin^{-1}\{d(l_i, t')/d(f_i, t')\}]^2 \quad (17)$$

3-D AM의 해를 3-DLM과 유사하게 분석적으로 구하기 위하여 근사적인 해법을 제안한다. 먼저 작은 각 (angle)에 대해서 $\sin(\Delta q_i)$ 의 값은 Δq_i 으로 대치될 수 있다는 사실을 적용하고, 식 (17)의 분모에 있는 미지점 t' 를 없애는 방법으로 $d(f_i, t')$ 대신 상수 δ_i 를 대입하면 3D-AM는 식 (18)~(19)와 같이 3D-AM'로 재정의할 수 있으며, 그 해를 분석적으로 구할 수 있다. 이 때 δ_i 는 어떤 위치측정 알고리즘을 적용하여 구해진 t' 를 $d(f_i, t')$ 에 대입한 값이다.

3-D AM'

$$\min \sum_{i=1}^n \left[\frac{(a_i k_i + x_i - x)^2}{\delta_i^2} + \frac{(b_i k_i + y_i - y)^2}{\delta_i^2} + \frac{(c_i k_i + z_i - z)^2}{\delta_i^2} \right] \quad (18)$$

s.t.

$$\begin{aligned} &(a_i k_i + x_i - x)a_i + (b_i k_i + y_i - y)b_i + \\ &(c_i k_i + z_i - z)c_i = 0 \quad \forall i \end{aligned} \quad (19)$$

식 (18)의 목적함수는 식 (17)에 삼각함수의 근사화를 적용한 후 수선점 $h_i(= (a_i k_i + x_i, b_i k_i + y_i, c_i k_i + z_i))$ 와 구하고자 하는 위치측정점과의 거리의 제곱합을 상세히 표현한 것이다.

III. 삼차원 최적 배치

방향탐지장비를 운용하여 표적의 위치를 획득하고자 할 때, 운용자가 표적이 있음직한 특정 지역을 선정하

여 그것을 대상으로 장비를 운용함은 통상적인 방법이다. 과거 DF에 대한 이차원 배치 문제가 일부 고려된 바는 있으나, 개념적이고 경험적 관점에서 표적과 장비의 배치관계를 정리한 것으로써 분석적이고 수리적인 연구 성과라고 볼 수는 없다[4]. 또한, 삼차원 최적 배치 문제는 새로운 문제 영역으로써 문헌상에서 연구 결과를 확인할 수 없다.

하나 이상의 DF를 공중 운용함으로써 보다 나은 배치 형상을 구성함으로써 위치측정 정확도가 향상될 수 있다. 이 때 최적배치를 결정함에 있어서 공간 상의 미세한 위치까지 고려할 필요는 없다. 이는 DF의 위치를 수십 내지 수백 m 변동시키더라도 위치측정 정확도에 미치는 결과가 미미할 수 있기 때문이다. 따라서, 삼차원 DF 배치 문제를 해결함에 있어서 삼차원 공간을 단순화하기 위하여 적정 크기의 셀들로 재구성, 격자화함으로써 탐색기법의 효과적인 적용이 가능한 방법을 제안한다. 적용된 탐색기법은 시물레이션 기법과 결합된 **Cyclic coordinate descent method**으로 비선형 문제에서 흔히 사용된다[5]. 이 때 공간의 탐색 간격은 초기값(예, 격자 또는 셀 크기의 특정 배수)으로부터 점진적으로 줄여가는 방법이 효과적일 수 있다.

어떤 장비배치 대하여 표적에 대한 위치측정 정확도는 시물레이션을 이용하여 평가되는데, 보다 나은 DF의 최적 위치(좌표)를 탐색함에 있어서 LOB 측정 간에 발생하는 오차의 영향을 배제하기 위하여 '에러-시나리오(error-scenario)'의 개념을 도입하였다. 에러-시나리오는 어떤 장비배치 형상에 대하여 위치측정 시물레이션 수행 전에 LOB에 발생하는 다수(수백~수천)의 에러셋(error set, ϵ_i 및 ϵ_i^c)를 사전에 생성한 것으로, 위치측정 시물레이션에 적용하여 최적배치를 결정하기 위함이다.

특정 에러-시나리오를 사용하여 위치측정 시물레이션을 수행한 결과로 얻어진 위치측정점들에 대한 정확도를 평가하기 위한 척도로서 식 (20)의 값을 사용하였으며, 이는 어떤 장비배치에 대한 평가기준을 제공해준다.

$$P(r) = \frac{n(r)}{n_T} \quad (20)$$

위 식에서 $n(r)$ 은 위치측정 시물레이션 수행 결과 중

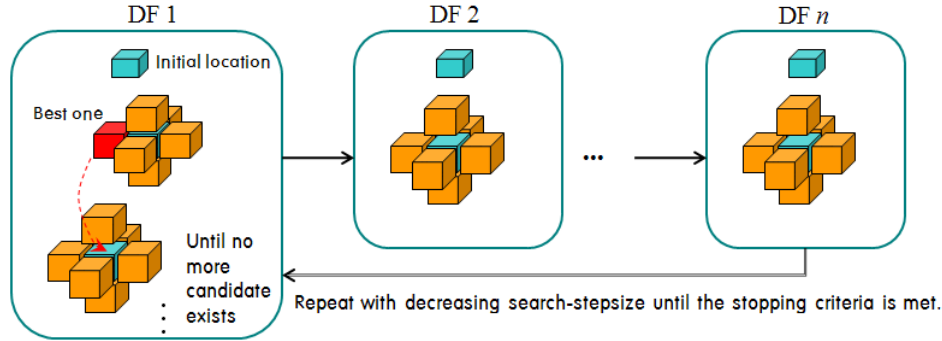


그림 1. 공간에서의 주변셀(후보 위치점) 탐색 개념
Fig. 1 Neighborhood cells(candidate locations of DF) in space

에서 위치측정점과 실제 표적과의 거리가 r 이하인 위치 측정점들의 개수이고, n_T 는 위치측정 수행(시뮬레이션) 횟수, 즉 에러-시나리오에 포함된 에러(쌍)의 개수이다 (하나의 에러는 사용되는 모든 DF에 대한 LOB 오차를 의미. 즉, ϵ_i 및 ϵ_i^2 for all i). $P(r)$ 값은 반경이 r 인 특정 크기의 원형 지역(중심은 위치측정점, t') 안에 실제 표적이 존재할 확률을 의미한다. 실제 상황에서 r 의 크기는 가용 자원/시간 및 운용 환경을 고려하여 운용자가 적절히 결정하여야 한다.

표적은 하나 이상의 지역에서 출현할 수 있으므로 다수의 지역을 효과적으로 대응할 수 있는 장비배치를 구상할 필요가 있다. 위치측정의 대상이 되는 지역(표적의 출현이 예상되는 지역)을 $A_j(j=1, \dots, J)$ 라고 하고 그 지역에 대한 $P(r)$ 값을 $P_j(r)$ 라고 하면, $P_j(r)$ 는 A_j 를 대표하는 점(point)들을 구성하는 방법에 따라서 다양하게 측정될 수 있다. 또한, A_j 는 그 중요도($w_j, 0 \leq w_j \leq 1$)가 상이하게 부여될 수도 있으므로 특정 에러-시나리오에 대한 최적 배치문제는 식 (21)로 정의할 수 있으며, 목적함수 Q 를 최대화하는 DF들의 좌표를 결정하는 것이다.

$$\max Q = \sum_{j=1}^J w_j P_j(r) \quad (21)$$

알고리즘의 효과적인 구현을 위하여 $P_j(r)$ 와 관련된 r, n_T , 탐색 간격 등을 파라미터로 설정함으로써 알고리즘

성능을 높일 수 있다. 초기 배치가 주어졌을 때 보다 나은 배치를 찾기 위한 알고리즘의 기본적인 작동 개념은 다음과 같다. 그 배치에서 하나의 DF만을 선택하고, 다른 DF들은 현 위치에 고정한다. 만일 그 DF를 주변 셀(cell 또는 격자, 공간 상의 위치 후보점)로 이동시켜 보았을 때, 더 큰 값의 Q 를 주는 경우에 해당 DF를 그 셀에 위치시킨다.

주변 셀을 정의함에 있어서는 다양한 방법이 있을 수 있다. 일례로, 그림 1과 같이 동, 서, 남, 북 및 상, 하의 6개 방향으로 탐색 간격만큼 이격된 셀들을 정의함으로써 탐색기법(Cyclic coordinate descent method)을 적용할 수 있다. 더 이상 나은 주변 셀을 더 이상 찾을 수 없으면, 그 DF를 고정하고 또 다른 DF를 대상으로 같은 과정을 반복한다. 모든 DF가 한번씩 고려되면 하나의 탐색루프(iteration)가 종료되고, 이후에는 탐색 간격(search stepsize)을 줄여서 종료 기준(시간, 최대 반복루프 수, 최소 증가율 등)이 만족될 때까지 탐색을 반복 시행함으로써 종국에는 최적의 장비배치를 결정할 수 있다.

k 번째 탐색 루프에 대하여 DF i 의 좌표 (x_i^k, y_i^k, z_i^k) 를 최종 결정하는 과정에서 매번 새로이 정의되는 후보점들의 집합을 C 라고 하면, C 내의 각 후보점에 DF i 를 위치시킴으로써 이루어지는 장비배치에 대하여 Q 를 계산하고 그 중에서 최대값을 Q^* 라고 한다면, 제안되는 삼차원 최적배치 알고리즘은 다음과 같이 기술된다.

3D 최적배치 알고리즘

Step 1. $k=0$. 초기 배치 $\{(x_1^0, y_1^0, z_1^0), \dots, (x_n^0, y_n^0, z_n^0)\}$ 에

$$\text{대한 } Q_0 = \sum_{j=1}^J w_j P_j(r) \text{ 계산.}$$

Step 2. $k = k + 1, Q' = Q_k - 1$, 그리고 $i = 0$.

Step 3. $i = i + 1$.

Step 4. 다른 $(n-1)$ 개의 DF들의 위치를 고정된 상태에서 DF i 의 위치를 C안의 각 후보점에 대한 배치안에

$$\text{대해서 } Q_k = \sum_{j=1}^J w_j P_j(r) \text{ 계산하여 } Q^* \text{ 결정.}$$

Step 5. 만일 $Q^* \geq Q'$ 이면 $(x_i^{k-1}, y_i^{k-1}, z_i^{k-1})$ 을 Q^* 을 주는 후보점으로 갱신하고, $Q' = Q^*$. $(x_i^{k-1}, y_i^{k-1}, z_i^{k-1})$ 의 주변에 더 이상 $Q^* \geq Q'$ 인 후보점이 없으면 중단. 만일 $i < n$ 이면 Step 3으로 이동하고, 그렇지 않으면 Step 6으로 이동.

Step 6. 모든 i 에 대해서 $(x_i^k, y_i^k, z_i^k) = (x_i^{k-1}, y_i^{k-1}, z_i^{k-1})$. 만일 종료 조건이 충족되면 종료하고, 그렇지 않으면 Step 2로 이동.

IV. 실험

제안된 삼차원 위치측정 알고리즘 및 최적배치 방법은 예제를 통하여 비교 평가되었다. 실제 야전에 배치되어 운용되고 전자전장비는 3대의 DF들로 구성되어 있음을 감안하여, 예제에서도 지상에서 운용되는 2대의 장비와 1대의 공중에서 운용되는 장비를 고려하였다. 각 장비의 기계적 정확도(σ_i 및 σ_i^2)는 일률적으로 1°로 가정하고 각 장비에 대한 에러-시나리오를 생성하였다. 문제의 단순화 차원에서 표적의 출현이 예상되는 위치측정 대상지역($A_j, j=1, \dots, J$)은 1개($J=1$)로 가정하였으며, 점 (30, 30, 0.3)으로 A_j 를 대신하였다. 이 때 $P(r)$ 은 $r = 0.5\text{km}$ 또는 0.3km , $n_r = 1,000$ 으로 설정하여 계산되었다.

장비의 초기배치는 표 1과 같다. A_j 에 대하여 초기 배치에 의해서 측정되는 Q 값(즉, $P_1(r)$)도 삼차원 위치측정 알고리즘별로 표에 함께 제시하였다. 3D-LM과 3D-AM'는 그 해를 분석적으로 구할 수 있으므로 Intel

Core Quad CPU 2.5GHz PC에서 3D-LM의 경우, 1,000회의 위치측정 시뮬레이션 수행에 요구되는 계산시간은 수초 이내이다. 3D-AM'은 $d(f_i, r')$ 를 상수 δ 로 바꾸기 위하여 사전에 3D-LM으로 위치측정 실시할 것이 요구되므로 3D-LM 대비 약 2배의 계산시간이 소요된다. 반면, 3D-AM은 탐색기법의 적용으로 해를 구해야함에 따라 많은 계산시간이 요구된다. Microsoft EXCEL의 SOLVER를 이용할 경우, 1,000회의 위치측정에 소요되는 계산시간은 약 150초이다.

표 1. 초기배치($A_j, j=1$) 및 $Q(r=0.5\text{km})$
Table. 1 Initial disposition of DFs for $A_j(j=1)$ and $Q(r=0.5\text{km})$

구분	좌표(km)	3D-LM	3D-AM	3D-AM'	비고
DF1	(10.0, 0.0, 0.5)				지상
DF2	(50.0, 10.0, 0.5)	43.3%	43.7%	44.1%	지상
DF3	(40.0, 0.0, 1.0)				공중

설정된 A_j 를 대신하는 점 (30, 30, 0.3)에 대하여 공중 운용 장비(DF3)의 최적배치를 결정하기 위하여 3D-AM' 알고리즘을 적용하고, 탐색 간격은 모든 탐색루프에 대하여 일괄적으로 5km를 적용하였다. 지상 운용 장비(DF1, DF2)는 실제 상황과 유사하도록 초기배치 지점에 고정하였다. 제안된 알고리즘을 통하여 결정된 공중 운용 장비의 최적배치 및 그에 대한 위치측정 알고리즘 별로 계산된 Q 는 표 2와 같다.

표 2. 최적배치($A_j, j=1$) 및 $Q(r=0.3\text{km})$
Table. 2 Optimal disposition of DFs for $A_j(j=1)$ and $Q(r=0.3\text{km})$

구분	좌표(km)	3D-LM	3D-AM	3D-AM'	비고
DF1	(10.0, 0.0, 0.5)				지상
DF2	(50.0, 10.0, 0.5)	41.3%	100%	99.5%	지상
DF3	(30.0, 30.0, 6.0)				공중

표 2는 공중 운용 장비(DF3)를 최적 배치함으로써 초기배치에 비하여 위치측정 정확도가 월등히 향상되는 것을 보여준다. 또한, A_j 가 하나의 지역(또는 지점)일 경우, 공중 운용 장비를 그 직상공에서 운용할 때 바람직한 배치형상이 구성됨을 추정할 수 있다. 추가적으로, DF가 초기배치 고도(=1km)에 비해서 높은 고도(=6km)에

서 운용될 때 위치측정 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있는데, DF3가 (30.0, 30.0, 1.0)에 위치할 경우(고도 1km), Q값은 3D-LM, 3D-AM 및 3D-AM'에 대하여 각각 41.2%, 98.7%, 96.3%로 측정되었고, 만일 고도를 11km로 높이면 오히려 39.8%, 97.7%, 95.8%로 정확도가 감소된다. 이는 위치측정 알고리즘의 수리적 특성에 기인하는 것으로 추정된다.

표 3. 초기배치(A_j, j=1, 2, 3) 및 Q(r=0.5km)
Table. 3 Initial disposition of DFs for A_j(j=1, 2, 3) and Q(r=0.5km)

구분	좌표(km)	3D-LM	3D-AM	3D-AM'	비고
DF1	(10.0, 0.0, 0.5)	37.6%	40.9%	36.7%	지상
DF2	(50.0, 10.0, 0.5)				지상
DF3	(40.0, 0.0, 1.0)				공중

만일 다수의 A_j(j > 1)를 고려할 경우, 공중 운용 장비가 모든 A_j에 대하여 직상공에 위치하기가 제한됨에 따라 제안된 알고리즘을 이용한 장비배치 최적화가 더욱 요구된다. 일례로, A1, A2, A3를 각각 (30, 30, 0.3), (60, 40, 0.3), (40, 20, 0.5)으로 설정하고 그 중요도를 동일하게 부여하였을 때(ω_j = 1/3 for j = 1, 2, 3), 초기배치에 의한 각 위치측정 알고리즘별로 계산된 A_j(j=1, 2, 3)에 대한 $Q(= \sum_{j=1}^3 w_j P_j(r))$ 는 표 3과 같다.

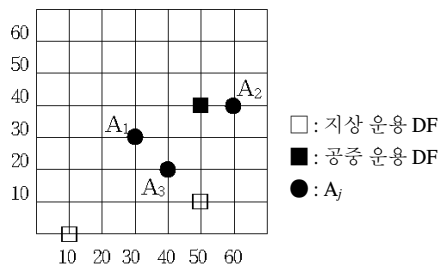


그림 2. A_j(j=1, 2, 3)에 대한 최적배치(DF3)
Fig. 2 Optimal disposition of DF3 for A_j(j=1, 2, 3)

지상 운용 장비를 초기배치에 고정시키고 앞서 동일한 방법으로 알고리즘을 통하여 결정된 DF3의 최적배치는 그림 2와 같다. 최적배치 결과, 얻어진 Q값은 표 4에 제시되었다. 다수의 A_j에 대하여 동시적으로 위치측정 정확도를 증대시키기 위한 공중 운용 장비의 최적위

치는 그림 2에서 확인되었듯이 특정 A_j의 직상공이 아닌 다른 위치가 될 수 있음을 시사한다.

표 4. 최적배치(A_j, j=1, 2, 3) 및 Q(r=0.5km)
Table. 4 Optimal disposition of DFs for A_j(j=1, 2, 3) and Q(r=0.5km)

구분	좌표(km)	3D-LM	3D-AM	3D-AM'	비고
DF1	(10.0, 0.0, 0.5)	61.5%	70.2%	71.3%	지상
DF2	(50.0, 10.0, 0.5)				지상
DF3	(50.0, 40.0, 6.0)				공중

V. 결론

본 논문에서는 한 대 이상의 방향탐지장비를 공중 운용하기 위하여 삼차원 위치측정 알고리즘을 기반으로 삼차원 최적배치 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 고안을 위하여 방향정보의 분포 특성을 고려한 에리-시나리오를 활용한 시뮬레이션 방법과 탐색기법을 융합하였다. 방향탐지장비의 최적배치 문제는 그 복잡도가 높고 분석적으로 해결할 수 없음을 감안할 때, 본 논문에서 제안되는 방법론은 다수의 표적(또는 지역)에 대한 위치측정의 정확도를 최대화하는 삼차원 장비배치를 결정해 줌으로써 방향탐지장비의 운용효과 증대에 획기적으로 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] J.Li, and S.A.Quek, "Locating a target from directional data," Naval Research Logistics, vol. 45, no.4, pp. 354 - 364, 1998.
- [2] M.G.Sklar and S.P.Ladany, "Properties of a source location estimator in the plane," Naval Research Logistics, Vol. 40, no.2, pp. 211 - 228, 1993.
- [3] A.R.Washburn, Search and Detection 4thedition, INFORMS: Arlington, VA, 2002.
- [4] R.Poisel, Introduction to Communication Electronic Warfare Systems Artech House: Norwood, 2002.
- [5] D.P.Bertsekas, Nonlinear programming, MA: Athena Scientific, 1995.

저자소개



이호주(Ho-Joo Lee)

현 육군 중령, 국방과학연구소
한국과학기술원 산업시스템공학과
박사
미 Auburn주립대 산업시스템
공학과 석사

※ 관심분야 : 위치추정, 최적화/스케줄링, 인공지능,
인간-로봇 인터페이스, 경제성공학



김창근(Chang-Geun Kim)

현 경남과학기술대학교
컴퓨터융합공학과 교수
경상대학교 컴퓨터공학과 학사
경남대학교 컴퓨터공학과
공학석사

경남대학교 컴퓨터공학과 공학박사

※ 관심분야 : 데이터통신 및 이동통신, 홈네트워킹,
유비쿼터스 네트워킹



강성수(Sung-Su, Kang)

현 경남과학기술대학교
컴퓨터융합공학과 교수
부산대학교 공학석사
경상대학교 공학박사

※ 관심분야 : 인공지능, 퍼지, 전문가시스템, ERP