DBpia

논문 17-42-10-25 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '17-10 Vol.42 No.10
https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.10.2036

연속적인 3축 자기장 신호 정렬 기반의 강자성 표적 탐지 기법

김 광 열◆, 신 요 안°, 김 선 호*, 임 성 빈*, 정 의 철**, 김 성 일**

Ferromagnetic Target Detection Scheme Using Continuous Angle Alignment of Three-Axis Magnetic Signals

Kwang-Yul Kim◆, Yoan Shin°, Sun-Ho Kim*, Sungbin Im*, Euicheol Jeong**, Seongil Kim**

요 약

강자성 표적 탐지 시스템은 강자성 물체로부터 미세하게 발생되는 자기 이상을 탐지하는 기법으로 표적의 탐지 거리를 확장시키기 위해 직교성이 있는 3축 자기벡터센서를 이용한다. 그러나 3축 자기벡터센서를 이용함에도 불구하고 기존의 강자성 표적 탐지 시스템은 3축 신호의 합성 크기만을 이용하여 표적을 탐지하기 때문에, 강자성 물체에 의해 가장 먼저 변하게 되는 3축 신호의 민감도를 경우에 따라 직접적으로 반영하지 못할 수 있게 된다. 또한, 자기벡터센서의 축이 환경적인 영향으로 인해 물리적으로 회전된 경우에는 3축 신호의 크기와 패턴이 회전된 각도에 따라 달라지기 때문에 3축 신호를 이용하는 표적 탐지 시스템의 성능이 저하된다. 따라서 본 논문은 탐지 거리를 확장시키고 오경보율을 낮추기 위해 연속적인 3축 자기장 신호 정렬 기반의 강자성 표적 탐지 기법을 제안한다. 성능 평가 결과를 통해 제안 기법이 기존 기법보다 탐지 거리를 확장시킬 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Ferromagnetic Target Detection, Magnetic Anomaly, Three-Axis Magnetometer, Continuous Angle Alignment, Multiple Thresholds

ABSTRACT

A ferromagnetic target detection system detects a magnetic anomaly generated from the ferromagnetic target in the geomagnetic field. The three-axis magnetic vector sensor is orthogonal and considered as a technique for extending the detection distance. However, in the conventional ferromagnetic target detection system, the target is detected using the magnitude value calculated from the three-axis signal only, and the sensitivity of the three-axis signal which has been changed by the ferromagnetic target can not be directly reflected. In addition, when the axis of the magnetic vector sensor was physically rotated due to environmental influences, the performance of the target detection system using the 3-axis signal is deteriorated because the magnitude and pattern of the 3-axis signal are changed by rotated angles. In this paper, we propose a continuous angle alignment scheme to extend the detection distance for the ferromagnetic target and to reduce the false alarm rate. Performance evaluation results show that the proposed scheme can extend the detection distance compared to the conventional scheme.

※ 본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었음 (UD160007DD).
◆ First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, kky1117@ssu.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원
* School of Electronic Engineering, Soongsil University, {serika; sbi}@ssu.ac.kr, 정회원
** The 6nd R&D, Agency for Defense Development, jec528@add.re.kr
논문번호 : KICS2017-07-191, Received July 4, 2017; Revised October 10, 2017; Accepted October 10, 2017

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

1860년에 영국이 전투함의 내구성을 높이기 위해 강철로 된 전투함을 최초로 건조한 이후 전세계의 해군은 전투함을 강철로 만들기 시작했다[1]. 강철은 지구 자기장에 의해 쉽게 자화 (Magnetization)되는 강자성 (Ferromagnetic) 물체이기 때문에 강철로 된 전투함 주변에는 자기 이상 (Magnetic Anomaly)이 발생되며, 제2차 세계대전에서는 함정을 격침시키기 위한 기뢰의 동작원과 항구로 잠입하는 잠수정을 탐지할 때 자기 이상을 이용하였다[1,2]. 자기장 신호는 멀리 전파되는 특성이 없기 때문에 수중 방사소음을 탐지하는 기법보다 탐지 거리는 상대적으로 감소하지만, 해상 상태나 해저 지형과 상관없이 자기 신호를 안정적으로 검출할 수 있어 근거리에 있는 표적을 탐지할 때에는 상대적으로 탐지율이 높다는 장점이 있다[3].

한편, 자기벡터센서를 통해 측정되는 자기장 신호는 크게 지구 자기장, 센서 자체의 잡음, 그리고 표적 신호로 구분할 수 있으며, 강자성 표적의 탐지 확률을 높이기 위해서는 실시간으로 측정되는 자기장 신호에서 미세한 자기 이상을 탐지해야 한다[4]. 지구 자기장은 대부분 지구 내부 전류의 흐름으로 인해 발생되는데, 그 외 계절의 변화와 태양풍의 영향에 의해서도 실시간으로 변하기 때문에 강자성 표적의 탐지 거리를 확장시키기 위해서는 제일 먼저 지구 자기장을 보상해야 한다[5].

지구 자기장을 보상하기 위한 방법에는 윈도우 필터를 이용하는 시간 영역에서의 신호처리 기법과 센서 네트워크를 구성하여 센서 간 상관성을 이용하는 공간 영역에서의 신호처리 기법으로 구분할 수 있다[6-8]. 시간 영역에서의 신호처리 기법에는 시스템 함수로 분석했을 때 저역통과 필터의 특성을 보이는 EMA (Exponential Moving Average) 기법[6]과 다이폴 (Dipole) 모델로부터 유도된 정합 필터 특성의 OBF (Orthonormal Basis Function)을 이용하는 기법[7] 등이 있다. EMA 기법은 강자성 물체의 출현이 잦은 곳에서 발생하는 지구 자기장의 급격한 변화에 강인한 특성을 가지고 있으며, 지구 자기장의 변화량에 따라 EMA 계수를 변경함으로써 손쉽게 다른 환경으로의 적용이 가능하다는 장점이 있다[6]. OBF 기법은 자기장 신호 모델로부터 3개의 OBF를 유도하여 상관기 (Correlator)를 구성하는 기법으로, 3개의 OBF 중 가장 우세한 하나의 OBF를 이용하게 된다[7]. 공간 영역에서의 대표적인 지구 자기장 보상 기법은 기준 (Reference) 센서를 이용하는 기법이다[7,8]. 이 기법은 표적의 영향을 받지 않는 위치에 기준 센서를 매설해 놓고, 표적을 탐지하고자 하는 곳에 탐지 센서를 위치시킨다. 그리고 탐지 센서에서 측정되는 자기장 신호와 기준 센서에서 측정되는 자기장 신호의 차이를 비교하여 표적을 탐지한다.

한편, 자기장 신호 처리에서 직교성이 있는 3축 자기장 신호는 지구 자기장 잡음을 줄이고, 탐지 거리를 확장시킬 수 있는 기술로 기대되고 있다[1]. 그러나 지구 자기장의 크기는 지리적인 위치에 따라 상이하며, 특히 자기벡터센서의 3축이 정렬되어 있지 않은 경우에는 각 축의 자기장 신호의 크기와 패턴이 크게 달라짐에 따라 오경보율 (False Alarm Rate)이 높아질 수 있다. 그리고 다수의 문헌에서 탐지 거리를 확장시키기 위해서는 자기벡터센서의 축을 정렬시켜야 한다고 강조하고 있지만[1,8], 이를 정렬하여 탐지하는 기법은 아직까지 개발되지 않고 있다.

이에 본 논문은 연속적인 3축 자기장 신호 정렬 기반의 강자성 표적 탐지 기법을 제안한다. 제안 기법의 핵심은 측정된 3축 자기장 신호를 이용하여 센서의 회전된 축 각도를 추정하고, 좌표변환행렬을 이용하여 회전된 각도를 정렬시키는 것이다. 여기서 좌표변환행렬은 자기벡터센서의 물리적인 축을 회전시키는 것이 아니라, 3축 자기장 신호만을 가상적으로 회전시키는 것을 의미한다. 그리고 오경보율은 낮추면서 탐지 거리를 확장시키기 위해, 제안된 기법에 적합한 다중 임계치와 확률적 임계치 설정 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 기존의 표적 탐지 시스템 모델을 소개하고, Ⅲ장에서는 본 논문에서 제안하는 연속된 축 정렬 기법과 이 기법에 적합한 임계치 설정 방법에 대해 설명한다. Ⅳ장에서는 제안된 기법과 기존의 표적 탐지 기법을 평가하고, 마지막으로 Ⅴ장에서는 결론을 내린다.

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 일반적인 표적 탐지 시스템 모델을 도시한 것이다. 강자성 표적은 다이폴을 고려하며 3축 다이폴 모멘트 (M_x, M_y, M_z)로 구성된다. 강자성 표적에서 생성된 자기장 신호는 3축 자기벡터센서로 측정되며 직교성을 지닌 3축 신호 성분 (B_x, B_y, B_z)으로 표현된다. 본 논문에서는 오른손 좌표계를 이용하여 남북 좌표를 x축, 동서 좌표를 y축, 그리고 수직 좌표를 z축으로 정의하였다. 표적 탐지 시스템은 3축 신호를 시간/공간 필터링 한 후 특정한 탐지 임계치와 비

www.dbpia.co.kr

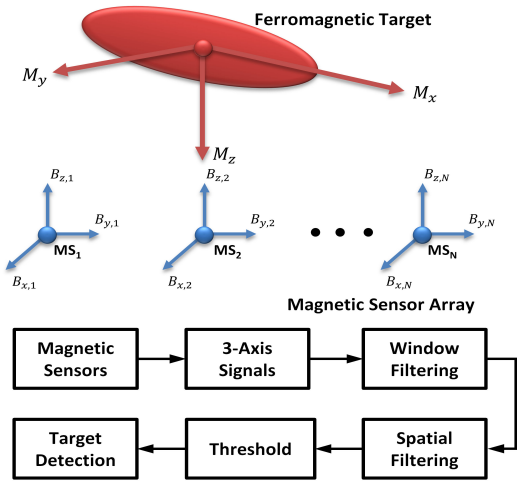


그림 1. 표적 탐지 시스템 모델
Fig. 1. System model of target detection

교하여 표적을 탐지한다. 다음은 기존의 표적 탐지 시스템 모델 중 자기장 입력 신호 부분과 시간/공간 필터링을 통한 탐지를 설명한 것이다.

2.1 자기장 신호 입력

각 축에서 측정되는 자기장 신호의 크기는 강자성 표적의 진행 방향과 센서의 축 회전의 관계에 따라 달라지기 때문에 안정된 값을 얻고 연산량을 줄이기 위해 일반적으로 3축 자기장 신호의 총 크기를 이용하는 방식이 사용되고 있다[4]. 다음 식은 자기벡터센서에서 측정되는 합성 신호의 크기 M를 표현한 것이다.

$$M = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \tag{1}$$

여기서 B_x, B_y, B_z는 센서의 x, y, z축에서 측정되는 자기장 신호 성분의 크기를 의미하며, 단위는 테슬라 (Tesla)이다. 일반적으로 강자성 표적에서 발생되는 자기장 신호는 멀티폴 (Multipole)로 고려해야 하지만, 강자성 표적과 자기벡터센서의 거리가 강자성 표적 길이의 3배 정도 떨어져 있을 때에는 다이폴로 모델링할 수 있다[8]. 이에 강자성 표적에서 발생되는 유도 자기장 신호를 한 개의 자기벡터센서에서 측정한 값은 다음 식의 비오-사바르 (Biot-Savart) 법칙으로 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{B_{x,\ell}} \\ \widetilde{B_{y,\ell}} \\ \widetilde{B_{z,\ell}} \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi d_\ell^5} \begin{bmatrix} 3x_\ell^2 - d_\ell^2 & 3x_\ell y_\ell & 3x_\ell z_\ell \\ 3x_\ell y_\ell & 3y_\ell^2 - d_\ell^2 & 3y_\ell z_\ell \\ 3x_\ell z_\ell & 3y_\ell z_\ell & 3z^2 - d_\ell^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 $\ell \in \{1, \cdots, L\}$ 은 강자성 표적의 1초당 기동 거리를 샘플링 시간 f_s으로 나눈 각 위치로 L은 총 샘플 개수를 의미하며, $\widetilde{B_{x,\ell}}$, $\widetilde{B_{y,\ell}}$, $\widetilde{B_{z,\ell}}$는 ℓ번째 위치에서 발생된 자기장 신호이며, M_x, M_y, M_z는 강자성 표적의 3축 다이폴 모멘트를 의미하며, 단위는 Am^2이다. $d_\ell = \sqrt{x_\ell^2 + y_\ell^2 + z_\ell^2}$ 은 자기벡터센서와 강자성 표적 사이의 ℓ번째 위치에서의 직선거리이며, x_ℓ, y_ℓ, z_ℓ는 자기벡터센서와 강자성 표적 사이의 ℓ번째 위치에서의 거리 성분이고, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]은 자기장의 영향으로 물체가 자화될 때 생기는 자기력선속밀도와 진공 중에서 나타나는 자기장 세기의 비인 투자율 (Permeability)을 의미한다. 그리고 3축 자기벡터센서에서 샘플링된 신호는 1초 단위로 변환되어 표적 탐지 시스템으로 입력된다. 따라서 측정된 자기장 신호 B_x, B_y, B_z는 최종적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} B_x = \widetilde{B_x} + G_x + N_x \\ B_y = \widetilde{B_y} + G_y + N_y \\ B_z = \widetilde{B_z} + G_z + N_z \end{cases} \tag{3}$$

여기서 G_x, G_y, G_z는 3축 지구 자기장, N_x, N_y, N_z는 자기벡터센서 자체의 배경 열잡음으로 일반적인 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 의미한다. 따라서 표적 탐지 성능을 향상시키기 위해서는 지구 자기장을 보상해야 하며, 센서 자체의 잡음을 최소화하여 강자성 표적 고유의 자기장 신호 성분만을 탐지할 수 있어야 한다.

2.2 시간/공간 필터링

그림 1에서 도시한 표적 탐지 시스템은 다중 센서 간 신호의 차이를 특정 임계치와 비교하여 물체를 탐지하기 때문에 탐지 성능을 향상시키기 위해서는 센서 간 상관성을 유지시키는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 센서 간 상관성을 높이기 위한 방법으로 긴 주기의 지구 자기장을 규준화 할 수 있는 TPSW (Two-Pass Split Window)[9]를 적용한다. 또한 TPSW는 시스템 함수로 분석했을 때 대역통과 필터 (Bandpass Filter)의 특성을 보이기 때문에 측정된 자기장 신호 중 센서 자체의 잡음도 제거할 수 있다. TPSW를 통해 지구 자기장과 센서 자체의 잡음을 제거하면, 표적 탐지 시스템은 센서 간 변화량을 계산하고 특정 임계치와 비교함으로써 표적을 탐지한다. 이

www.dbpia.co.kr

때 모든 센서는 탐지 센서이며 역할에 따라 기준 센서가 된다. 다음 식은 표적 탐지 결과를 표현한 것이다.

$$\begin{cases} Temp_{i,j}=1, & M_{diff,i,j} > T_d \\ Temp_{i,j}=0 & M_{diff,i,j} < T_d \end{cases} \tag{4}$$

여기서 $i \in \{1,\cdots,N\}$ 은 탐지 센서 중 공간 필터링을 수행하고 있는 기준 센서를 의미하며, N은 센서의 총 개수를 의미한다. 그리고 $j \in \{1,\cdots,N-1\}$ 는 공간 필터링의 대상 센서를 의미하며, $i \neq j$의 관계를 가진다. 식 (4)에서 $M_{diff,i,j}$는 i번째 센서와 j번째 센서의 TPSW를 통과한 자기장 합성 신호의 차이를 의미하고, T_d는 표적 탐지 시스템에서 설정한 임계치를 의미한다. $Temp_{i,j}$는 i번째 기준 센서에서 j번째 대상 센서에 대한 공간 필터링 결과를 임시로 저장한 행렬을 의미하며, "1"은 센서 간 신호의 차이가 설정한 임계치보다 높은 경우로 표적이 있다고 판정한 경우이고, "0"은 표적이 없다고 판정한 경우를 의미한다.

한편, 강자성 표적에서 발생되는 자기장 신호에 대한 탐지 거리는 수백 미터 정도이다[6]. 만일 기준 센서와 대상 센서가 일정한 거리 간격으로 배치되어 수십 킬로미터 정도 떨어져 있는 경우, 특정 시간 내에 모든 센서에서 표적을 탐지했다는 결과가 발생하게 된다면 그것을 표적이라고 판정하기 어렵다. 따라서 강자성 표적에서 발생되는 자기장 신호의 탐지 거리를 바탕으로, i번째 기준 센서에서 공간 필터링 한 결과의 합산이 특정한 K개 이하일 때 표적이라고 판정할 수 있다. 다음 식은 공간 필터링을 통해 i번째 센서가 기준 센서일 때 얻게 되는 최종적인 표적 탐지 결과 D_i를 표현한 것이다.

$$\begin{cases} D_i=1, & \sum_{j=1}^{N-1} Temp_{i,j} < K \\ D_i=0, & \sum_{j=1}^{N-1} Temp_{i,j} > K \end{cases} \tag{5}$$

Ⅲ. 제안된 강자성 표적 탐지 기법

그림 2는 본 논문에서 제안한 강자성 표적 탐지 기법의 흐름도를 나타낸 것이다. 제안 기법은 그림 1의 기존 기법에 연속적인 축 정렬 단계, 다중 임계치 설정 단계, 그리고 확률적 임계치 설정 단계를 추가한 형식이다. 다음은 본 논문에서 제안한 기법을 단계별로 설명한 것이다.

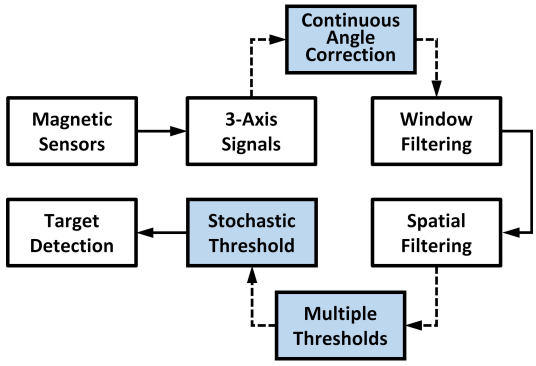


그림 2. 제안된 강자성 표적 탐지 기법의 흐름도
Fig. 2. Flowchart of the proposed ferromagnetic target detection scheme

3.1 연속적인 축 정렬 단계

자기벡터센서에서 측정된 신호에 지구 자기장 신호와 센서 잡음 신호만 있는 경우, TPSW를 이용하여 자기장 신호를 필터링 하고 축 정렬을 수행하면 동일한 축에서의 센서 간 공간 변화량은 상관성을 가지게 된다. 그러나 강자성 표적에 의해 유도 자기장 신호가 유입되면 맨 먼저 3축 신호 성분에서 차이가 발생하게 되며, 이를 통해 식 (1)의 합성 신호가 변하게 된다. 이로 인해 3축 신호 성분의 차이가 미세하게 발생했음에도 불구하고 합성 신호의 전체 변화량은 동일할 수 있다. 따라서 합성 신호만을 비교하는 것은 시스템의 복잡도를 다소 낮출 수 있으나, 시스템의 탐지 성능 측면에서 3축 신호의 민감도를 직접적으로 반영하지 못하게 된다.

한편, 모든 센서의 축이 정렬되지 못하면 센서 간 상관성이 낮아지게 되며, 3축 신호의 민감도를 이용하기 위해서는 모든 센서의 축이 반드시 정렬되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 3축 신호의 민감도를 향상시키고, 각도의 변화에 따라 미세하게 변하는 자기장 신호를 탐지하기 위해 좌표변환행렬을 이용한 연속적인 축 정렬 기법을 제안한다. 좌표변환행렬은 한쪽 좌표계의 기저벡터들의 좌표값을 다른 좌표계로 변환하는 방법으로, 효율적인 좌표변환을 위해서는 각 단계를 3단계로 구분하고 각 단계에서 한 개의 기저벡터를 회전축으로 선택한 2차원 단위 좌표변환을 개별적으로 고려해야 한다[10]. 다음은 본 논문에서 제안한 연속적인 축 정렬 단계를 정리한 것이다.

3.1.1 1단계: 축 회전 각도 추정

첫 번째 단계는 xy 평면에서의 요 (Yaw) 각도를 추정하는 단계로, B_x 신호와 B_y 신호의 비를 이용한

www.dbpia.co.kr

다. 이를 위해, 먼저 B_z 신호를 고정시키고 B_x 신호와 B_y 신호의 요 각도 θ를 추정한다. 이 때 i번째 센서에서 추정된 요 각도 $\hat{\theta}_i$는 다음 식을 통해 추정된다.

$$\hat{\theta}_i = \cos^{-1}\left(\frac{B_{x,i}}{B_{xy,i}}\right) \tag{6}$$

여기서 $B_{xy,i} = \sqrt{B_{x,i}^2 + B_{y,i}^2}$ 이다.

3.1.2 2단계: 연속적인 B_x, B_y 신호 정렬

본 논문에서는 탐지 성능을 향상시키기 위한 방법으로 연속적인 축 정렬 기법을 제안한다. 따라서 두 번째 단계에서는 식 (6)에서 추정된 회전 각도에 회전시키고자 하는 총 R개 각도 중 $r \in \{1, \cdots, R\}$ 번째 요 각도 θ_r 만큼 B_x, B_y 신호를 회전시켜 정렬한다. 다음 식은 연속적인 신호 정렬을 표현한 것이다.

$$\begin{bmatrix} \widehat{B_{x,i,r}} \\ \widehat{B_{y,i,r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\hat{\theta}_i + \theta_r\right) & -\sin\left(\hat{\theta}_i + \theta_r\right) \\ \sin\left(\hat{\theta}_i + \theta_r\right) & \cos\left(\hat{\theta}_i + \theta_r\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{x,i} \\ B_{y,i} \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기서 $\widehat{B_{x,i,r}}$, $\widehat{B_{y,i,r}}$는 i번째 센서의 r번째 회전 각도에서의 B_x, B_y 신호를 의미한다.

3.1.3 3단계: 연속적인 B_z 신호 정렬

세 번째 단계는 yz 평면에서의 롤링 (Rolling) 각도를 추정하는 단계로, B_y 신호와 B_z 신호의 비를 이용한다. 이를 위해 먼저 식 (7)에서 계산된 $\widehat{B_{x,i,r}}$ 신호를 고정시키고, $\widehat{B_{y,i,r}}$ 신호와 B_z 신호의 롤링 각도 ϕ를 추정한다. 이 때 i번째 센서에서 r번째 요 각도일 때 추정된 롤링 각도 $\widehat{\phi_{i,r}}$는 다음 식을 통해 계산된다.

$$\widehat{\phi_{i,r}} = -\sin^{-1}\left(\frac{B_{z,i}}{B_{yz,i,r}}\right) \tag{8}$$

여기서 $B_{yz,i,r} = \sqrt{\widehat{B_{y,i,r}}^2 + B_{z,i}^2}$ 이다. 이 때 모든 센서의 롤링 각도를 정렬시키기 위해 모든 센서의 롤링 각도는 다음 식과 같이 1번 센서의 롤링 각도로 정렬시켜야 한다.

$$\widehat{\phi_{i,r}} = \widehat{\phi_{1,r}} - \widehat{\phi_{i,r}} \tag{9}$$

따라서 i번째 센서의 r번째 회전 각도에서 정렬된 $\widetilde{B_{y,i,r}}$, $\widetilde{B_{z,i,r}}$ 신호는 다음 식의 좌표변환행렬을 통해 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{B_{y,i,r}} \\ \widetilde{B_{z,i,r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_{i,r} & -\sin\phi_{i,r} \\ \sin\phi_{i,r} & \cos\phi_{i,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{B_{y,i,r}} \\ B_{z,i} \end{bmatrix} \tag{10}$$

그리고 정렬된 $\widehat{B_{x,i,j}}$ 신호는 고정되었기 때문에 $\widetilde{B_{x,i,r}} = \widehat{B_{x,i,r}}$이다. 이 모든 단계는 신호처리 시간인 1초 동안에 수행하게 된다.

3.2 임계치 설정 단계

제안된 표적 탐지 기법의 성능은 오프라인 단계에서 설정하는 다중 임계치와 확률적 임계치에 의해 결정된다. 본 논문에서 고려한 표적 탐지 시스템은 센서 간 공간 변화량을 탐지 임계치와 비교하여 표적을 탐지하기 때문에 표적 탐지 거리를 확장시키기 위해서는 각도의 회전에 따른 3축 자기장 변화량의 표준편차를 고려하여 다중 임계치를 설정해야 한다. 그리고 확률적 임계치는 다중 임계치로 탐지된 결과에 대해 지구 자기장 잡음과 표적 신호를 확률적으로 분리하기 위한 기법으로, 확률적 임계치에 따라 탐지 거리와 오경보율을 조절할 수 있다. 다음은 본 논문에서 제안한 다중 임계치와 확률적 임계치 설정 방법을 설명한 것이다.

3.2.1 다중 임계치 설정 단계

신호 탐지 이론에 의하면 탐지 임계치가 낮은 경우에는 탐지 거리가 확장될 수 있지만 오경보율이 높아지게 되며, 반대로 탐지 임계치가 높은 경우에는 오경보율이 낮아질 수 있지만 탐지 거리가 감소하게 된다 [11]. 지구 자기장의 변화는 주변 자기장 잡음의 영향을 다소 쉽게 받기 때문에 탐지하고자 하는 위치에서 측정된 데이터의 지구 자기장을 분석하여 탐지 임계치를 설정해야 한다. 이 때 각 축에서의 지구 자기장 변화량이 다르기 때문에 동일한 탐지 임계치를 모든 축에 설정하여 탐지하는 것은 표적 탐지 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 본 논문은 지구 자기장 신호만 있을 때, 각 축의 센서 간 공간 변화량을 분석하여 각 축별로 임계치를 설정하는 다중 임계치 설정 기법을 제안한다. 다음 식은 각 축에서 각도 r에 따른 공간 변화량의 표준편차를 표현한 것이다.

www.dbpia.co.kr

$$\begin{cases} \sigma_{B_x,r} = \sqrt{\dfrac{(B_{x,1,r}-m_{x,r})^2+\cdots+(B_{x,N,r}-m_{x,r})^2}{N}} \\ \sigma_{B_y,r} = \sqrt{\dfrac{(B_{y,1,r}-m_{y,r})^2+\cdots+(B_{y,N,r}-m_{y,r})^2}{N}} \\ \sigma_{B_z,r} = \sqrt{\dfrac{(B_{z,1,r}-m_{z,r})^2+\cdots+(B_{z,N,r}-m_{z,r})^2}{N}} \end{cases} \tag{11}$$

여기서 $\sigma_{B_x,r}$, $\sigma_{B_y,r}$, $\sigma_{B_z,r}$은 r번째 각도마다 3축의 센서 간 공간 변화량의 표준편차를 의미하며, $B_{x,i,r}$, $B_{y,i,r}$, $B_{z,i,r}$은 i번째 센서의 r번째 회전 각도로 정렬된 3축 신호의 TPSW 통과 신호를 의미하고, $m_{x,r}$, $m_{y,r}$, $m_{z,r}$은 r번째 각도에서 N개의 3축 센서값에 대한 평균을 의미한다. 그리고 표적 탐지 시스템은 주어진 각도에 대한 센서 간 시간/공간 상관도에 따라 표적을 탐지하기 때문에 오경보율을 낮추기 위해 임계치는 각도별 표준편차의 최대값으로 설정한다. 다음 식은 다중 임계치를 표현한 것이다.

$$\begin{cases} T_{B_x} = \max \sigma_{B_x,r} \\ T_{B_y} = \max \sigma_{B_y,r} \\ T_{B_z} = \max \sigma_{B_z,r} \end{cases} \tag{12}$$

여기서 T_{B_x}는 B_x 신호의 임계치, T_{B_y}는 B_y 신호의 임계치, T_{B_z}는 B_z 신호의 임계치를 의미한다.

3.2.2 확률적 임계치 설정 단계

표적이 원거리에 있는 경우에는 표적 자기장 신호가 지구 자기장 신호에 묻혀 있는 형태이기 때문에 다중 임계치를 이용한 탐지 결과에서 탐지와 오경보를 분리하기 위해 탐지 확률을 계산하고, 확률적 임계치를 설정하여 최종적으로 표적의 존재 유무를 결정하는 단계를 제안한다. 모든 센서는 1초 간격으로 각 각도에 따른 3축의 표적 탐지 유무 결과를 테이블로 저장하게 되며, 특정한 시간 내에 탐지 유무 결과를 확률적으로 표현한다. 다음 식은 탐지 확률을 계산하는 수식이다.

$$\begin{cases} P_{B_x,i} = \left(\sum_{r=1}^{R} D_{B_x,i,r}\right)/R \\ P_{B_y,i} = \left(\sum_{r=1}^{R} D_{B_y,i,r}\right)/R \\ P_{B_z,i} = \left(\sum_{r=1}^{R} D_{B_z,i,r}\right)/R \end{cases} \tag{13}$$

여기서 $P_{B_x,i}$, $P_{B_y,i}$, $P_{B_z,i}$은 i번째 센서에서의 탐지 확률이며, $D_{B_x,i,r}$, $D_{B_y,i,r}$, $D_{B_z,i,r}$은 i번째 센서의 r번째 각도에서의 탐지 결과로 다중 임계치에 의해 표적이 있는 경우로 판별될 때에는 "1", 표적이 없다고 판별될 때에는 "0"으로 표현된다. 결과적으로 측정 시간에 따른 각 센서별 탐지 확률이 계산되며, 계산된 탐지 확률을 기반으로 표적의 실제 이동 결과와 비교하면서 확률적 임계치를 조정할 수 있다.

Ⅳ. 실측 데이터 기반의 성능 평가

4.1 데이터 실측 환경

그림 3은 강자성 표적 탐지 기법의 성능을 분석하기 위한 데이터 실측 환경을 도시한 것이다. 자기벡터 센서는 총 2개를 고려했으며, 50 [m] 간격으로 배치하였다. 이 때 센서 A를 탐지 센서, 센서 B를 기준 센서로 지정하였으며, 모든 센서의 샘플링 주파수는 50 [Hz]로 설정하였다. 실험 데이터는 측정 지역의 환경 잡음을 분석하기 위한 시간 (새벽 5시)과 강자성 표적을 탐지하기 위한 시간 (오전 9시)으로 구분하여 수행하였다. 임계치 설정을 위한 데이터는 새벽 5시 데이터를 이용했으며, 강자성 표적 탐지는 오전 9시에 측정된 데이터 중 약 10분 정도의 데이터를 이용하였다.

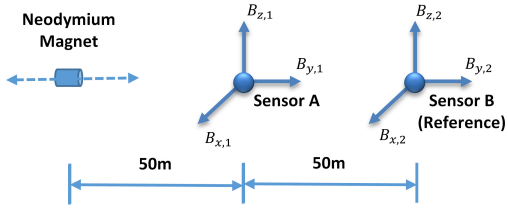


그림 3. 데이터 실측 환경
Fig. 3. Environment for real-data acquisition

표 1. 강자성 표적의 이동 경로
Table 1. The route of the ferromagnetic target

No.	Target	Moving route	Event time (min)
0	-	-	00:00
1	Neodymium magnet	A → B	01:00~03:00
2		B → A	04:00~05:00
3	Unknown vehicle	Measurement area	06:00
4			07:00
5			07:00
6	Neodymium magnet	A → B	07:00~08:00
7		B → A	09:00~09:59

www.dbpia.co.kr

강자성 표적은 네오디뮴 자석 (Neodymium Magnet)을 이용하였으며, 강자성 표적은 센서 A로부터 약 50 [m] 떨어진 거리에서 접근하였다. 그리고 연속적인 축 정렬을 위한 각도 r는 1°~89°까지 1° 단위로 수행되었다. 표 1은 강자성 표적의 이동 경로를 정리한 것이다.

4.2 다중 임계치 분석

그림 4는 다중 임계치 설정을 위해 센서 간 3축 신호의 표준편차를 계산한 것이다. 이를 위해, 강자성 표적이 없는 시간대를 고려하였으며, 통계적인 분석을 위해 2분 정도의 데이터를 사용하였다. 그림의 결과를 통해 각도에 따라 3축 신호의 차이가 상이한 것을 볼 수 있는데, 식 (12)에 따라 B_x 신호에 대한 임계치 T_{B_x}는 0.0272 [nT], B_y 신호에 대한 임계치 T_{B_y}는 0.1395 [nT], B_z 신호에 대한 임계치 T_{B_z}는 0.0769 [nT]로 설정한다. 합성 신호에 대한 임계치는 0.0566 [nT]로 기존 기법에서 단일 임계치 값으로 사용된다. 더불어, 시간대별로 환경잡음의 변화량에 차이가 발생되기 때문에 임계치를 시간대에 따라 적용시키거나 각 각도별로 임계치를 적용하는 방법도 추후에 고려될 수 있다.

그림 5는 센서 간 상관성이 다소 높은 새벽 시간대의 자기장 신호와 탐지 결과를 도시한 것이다. 그림 5의 상단은 TPSW 통과한 합성 신호의 결과를 도시한 것으로, 강자성 물체가 탐지 센서 부근으로 접근하지 않은 경우에는 두 센서 간 상관성이 다소 높은 것을 볼 수 있다. 그림 5의 하단은 탐지 결과를 도시한 것으로, 130~190초 부근에서 두 센서 간 신호의 차이가 임계치보다 크기 때문에 제안 기법과 기존 기법에서

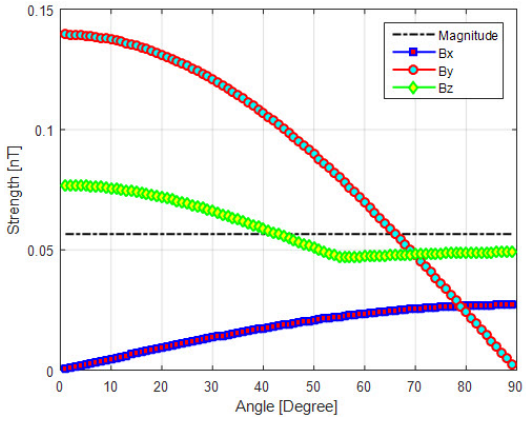


그림 4. 각도별 자기장 신호 변화에 대한 표준편차
Fig. 4. Standard deviation of magnetic signals according to angle variation

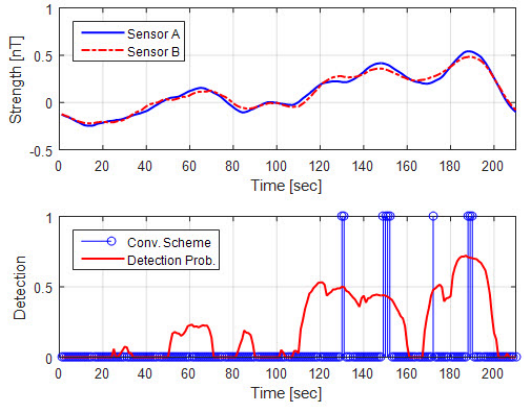


그림 5. 확률적 임계치 설정을 위한 센서 간 상관성 및 표적 탐지 결과
Fig. 5. Correlation and target detection result for setting the stochastic threshold

강자성 물체가 있다고 판정하였다. 그러나 이 표적은 표 1에서 고려한 강자성 물체가 아니며, 새벽에 관측 지점 주변을 지나가는 강자성 물체를 탐지한 것으로 추측된다. 그림 5의 결과를 토대로 제안된 기법의 결과를 분석하면, 20초~100초 부근에서 낮은 확률이지만 탐지가 발생되었는데, 이것은 130~190초 부근에서 발생한 표적의 초기 탐지 신호일수도 있고, 또 다른 표적일 수 있으며, 지구 자기장 혹은 센서 자체의 잡음으로 인해 발생된 것일 수도 있다. 이 때 탐지 센서는 관측 지점으로 접근하는 강자성 물체를 탐지하는 것이 목적이기 때문에 확률적 임계치를 설정하여 특정 탐지 확률보다 낮은 탐지 확률에 대해서는 고려하지 않게 해야 한다. 따라서, 확률적 임계치를 0부터 0.4까지 0.01씩 증가시키면서 초기 탐지 시간 및 총 탐지 시간을 측정할 필요가 있다.

4.3 확률적 임계치 분석

그림 6은 기존의 합성 신호를 이용한 기법과 제안된 기법의 초기 탐지 시간과 총 탐지 시간을 측정한 것이다. 여기서 초기 탐지 시간은 그림 5의 모든 시간에서 초기 탐지 시간을 측정한 것이며, 총 탐지 시간은 130~190초 동안에 탐지된 표적에 대한 탐지 시간을 측정한 것이다. 먼저, 기존 기법의 초기 탐지 시간은 130초이며, 표적만 탐지한 것을 볼 수 있다. 반면, 제안된 기법은 확률적 임계치에 따라 초기 탐지 시간이 변화되었는데, 확률적 임계치가 0~0.07일 때의 초기 탐지 시간은 25초 정도이지만 탐지 확률이 낮기 때문에 오경보일 가능성이 높다. 그리고 확률적 임계치가 0.08~0.17일 때의 50초 정도에 발생된 자기 이상

www.dbpia.co.kr

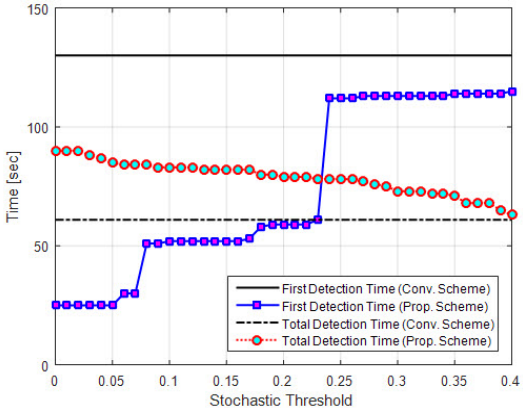


그림 6. 확률적 임계치에 따른 초기 탐지 시간 및 총 탐지 시간
Fig. 6. First detection time and total detection time according to the stochastic threshold

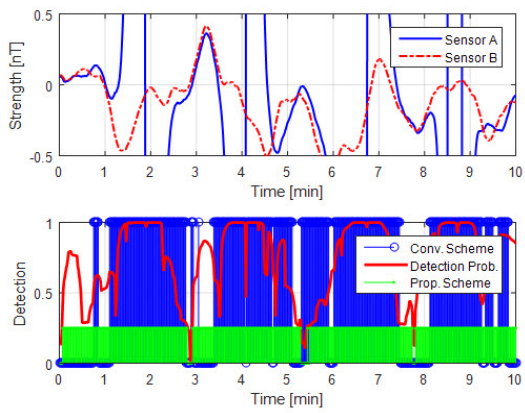


그림 7. 센서 간 상관성 및 탐지 거리 비교
Fig. 7. Correlation between sensors and comparison of detection distance between the conventional scheme and the proposed scheme

을 탐지할 수 있었는데, 이것은 그림 5에서 보는 것처럼 탐지 시간을 20초 정도 유지했기 때문에 표적에 대한 초기 탐지 시간을 단축시킬 수 있는 임계치라고 할 수 있다. 마지막으로, 확률적 임계치가 0.24일 때에는 초기 탐지 시간이 112초로 기존 기법의 초기 탐지 시간에 근접한 것을 볼 수 있다. 따라서 이 경우의 확률적 임계치는 0.08~0.23이 최적인 것을 알 수 있다.

한편, 기존의 기법은 탐지 시간이 일정하게 유지되지 않았기 때문에 초기 탐지부터 탐지 종료까지의 시간인 60초를 총 탐지 시간으로 지정하였다. 제안된 기법의 경우에는 확률적 임계치가 커질수록 총 탐지 시간이 줄어든 것을 볼 수 있으며, 모든 확률적 임계치를 사용할 수 있음을 볼 수 있다. 본 논문은 탐지 거리를 확장시키고 오경보율을 낮추는 것이 목적이기 때문에 그림 5를 바탕으로 표적만 탐지할 수 있는 수치인 “0.25”를 확률적 임계치로 설정하여 표적 탐지를 수행하였다. 단, 확률적 임계치는 관측 지점 주변의 환경잡음을 고려하여 적응적으로 설정하는 방법도 추후에 고려될 수 있다.

4.4 표적 탐지 결과 분석

그림 7은 표 1의 강자성 표적에 대한 기존 기법과 제안된 기법의 탐지 거리를 비교한 것이다. 그림 7의 상단은 TPSW를 통과한 신호를 도시한 것이며 하단은 강자성 표적 탐지 거리를 도시한 것이다. 상단의 그림을 통해 표적이 발생되었을 때 센서 A의 신호가 뚜렷하게 변화되는 것을 볼 수 있으며, 하단의 그림을 통해 강자성 표적의 이동에 따라 탐지 확률이 변하는 것을 볼 수 있다. 여기서 기존 기법의 탐지 결과는 “1”, 제안된 기법의 탐지 결과는 확률적 임계치인 “0.25”로 표현되었다. 성능 평가 결과를 통해 제안된 기법이 기존 기법보다 초기 탐지 시간을 단축시킬 수 있음을 보였으며, 탐지 거리를 확장시킬 수 있음을 보였다. 또한, 제안된 기법은 탐지 확률의 높고 낮음의 변화를 이용하여 관측 지점으로 접근하는 표적에 대한 출입여부와 표적 분리가 가능하였다. 이처럼 특정한 축의 임계치가 합성 신호의 임계치보다 높음에도 불구하고 제안된 기법이 탐지 거리를 향상시킬 수 있다는 것은 단순히 합성 신호의 크기보다는 3축의 민감도를 이용해야 한다는 것으로 분석할 수 있다. 따라서 제안된 기법은 3축 신호의 각도에 따른 민감도를 향상시킴으로써 합성 신호를 사용하는 기존 기법보다 탐지 거리를 확장시킬 수 있었다고 분석할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 강자성 표적 탐지 시스템의 탐지 거리를 확장시키고 오경보율을 낮추기 위한 방법으로 연속적인 3축 자기장 신호 정렬 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 연속적인 3축 정렬을 통해 센서 간 자기장 신호 변화의 상관성을 유지시켰으며, 축 회전을 통해 표적 탐지를 위한 3축 신호 성분의 민감도를 향상시켰다. 또한, 표적 탐지 시스템의 성능을 결정하는 다중 임계치와 확률적 임계치 설정 기법을 제안하였으며, 오탐지 저하와 탐지 거리 확장을 위해 실제 관측 지역의 지구 자기장 환경을 반영하여 설정하였다. 실측 데이터 기반의 성능 평가를 통해 제안된 기법이 기존의

www.dbpia.co.kr

기법보다 탐지 거리를 확장시킬 수 있음을 보였으며, 표적 탐지 시스템의 안정성과 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 보였다. 따라서 본 논문에서 제안된 기법은 자기벡터센서를 이용한 탐지 기법에 고려될 수 있을 것으로 생각된다.

References

[1] J. J. Holmes, *Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures*, Morgan & Claypool Publishers, 2006.

[2] G.-W. Jeung, D.-W. Kim, D.-H. Kim, C.-S. Yang, and H.-J. Chung, "Magnetic field analysis due to the remanent magnetization distributed on a ferromagnetic thin plate by using equivalent magnetic models and material sensitivity," *J. KMS*, vol. 20, no. 3, pp. 100-105, Jun. 2010.

[3] C. H. Kwak, M. J. Jung, and S. I. Kim, "Analysis of axis signal processing using magnetic sensor," in *Proc. KIMST 2015*, Nov. 2015.

[4] K. Kim, C. Kwak, S. Hong, S. Park, and K. Kim, "Light-weight signal processing method for detection of moving object based on magneto-meter applications," *J. IEEK*, vol. 46, no. 6, pp. 153-162, Nov. 2009.

[5] S. H. Lee, S. W. Rhee, B. S. Suk, and K. L. Yong, "Measurement data analysis of three-axis-magnetometer in KOMPSAT-1," *J. KSAS*, vol. 29, no. 3, pp. 97-103, Apr. 2001.

[6] M. Kim, U. Joo, C. Lim, S. Yoon, and S. Moon, "A study on detection of underwater ferro- magnetic target for harbor surveillance," *J. KIMST*, vol. 18, no. 4. pp. 350-357, Aug. 2015.

[7] B. Ginzburg, L. Frumkis, and B.-Z. Kaplan, "Processing of magnetic scalar gradiometric signals using orthonormalized functions," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 102, no. 1-2, pp. 67-75, Dec. 2002.

[8] A. Sheinker, L. Frumkis, B. Ginzburg, N. Salomonski, and B.-Z. Kaplan, "Magnetic anomaly detection using a three-axis magnetometer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 1, pp. 160-167, Jan. 2009.

[9] P. A. Esquef, L. W. P. Biscainho, V. Vdlimdki, and M. Karjalainenl, "Removal of long pulses from audio signals using two-pass split-window filtering," *112th Convention J. AES*, pp. 1-9, Munich, Germany, May 2002.

[10] C. E. Lucas and T. C. Richards, "A novel technique for modelling ship magnetic signatures," in *Proc. MARELEC 2015*, Philadelphia, USA, Jun. 2015.

[11] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*, Prentice Hall, 1998.

김 광 열 (Kwang-Yul Kim)
한국통신학회논문지 Vol. 36, No. 6 참조

신 요 안 (Yoan Shin)
한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

김 선 호 (Sun-Ho Kim)

2007년 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2009년 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사
2009년~현재 : 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정
<관심분야> 수중신호처리, 통신신호처리, 생체신호처리, 선형·비선형 모델링

www.dbpia.co.kr

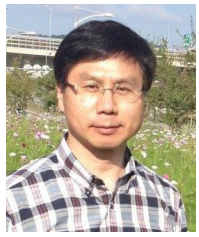
임 성 빈 (Sungbin Im)

1986년 : 서울대학교 전자공학과 학사
1988년 : 서울대학교 전자공학과 석사
1994년 : Univ. of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 박사
1995년~현재 : 숭실대학교 전자정보공학부 정교수
<관심분야> 수중신호처리, 비선형 신호처리, 통신 시스템, 저장장치시스템

정 의 철 (Euicheol Jeong)

2011년 : 숭실대학교 전자공학과 학사
2013년 : 숭실대학교 전자공학과 석사
2013년~현재 : 국방과학연구소 연구원
<관심분야> 수중음향 신호처리

김 성 일 (Seongil Kim)



1986년 : 서울대학교 해양학과 학사
1988년 : 서울대학교 대학원 해양학과 석사
2002년 : Univ. of California, San Diego 해양학과 박사
1990년~현재 : 국방과학연구소 수석연구원
<관심분야> 수중음향 신호처리

www.dbpia.co.kr