

논문 2017-54-5-9

주파수 이동 필터링을 적용한 지면 투과 레이더 기반 휴대용 지뢰 탐지 시스템

(Ground Penetrating Radar based Hand-held Landmine
Detection System using Frequency Shifting Filtering)

함 종 현*, 김 민 주*, 허 은 두*, 김 성 대**, 김 동 현***, 최 순 호***

(Jong-Hun Hahm, Min Ju Kim, Eun Doo Heo, Seong-Dae Kim[Ⓢ],
Dong Hyun Kim, and Soon-Ho Choi)

요 약

휴대용 지뢰 탐지기의 특성상 병사가 직접 손에 들고 운용하기 때문에 빠르고 정확하게 표적 탐지를 수행하는 시스템을 개발해야 한다. 그러나 우리나라의 군에서 사용하고 있는 휴대용 지뢰 탐지기는 금속 성분의 지뢰만 탐지가 가능하다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하고, 우리나라 환경에 알맞은 휴대용 지뢰 탐지 시스템을 개발하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 지면 투과 레이더를 이용하여 지뢰를 탐지 하고, 우리나라 환경에 알맞은 휴대용 지뢰 탐지 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 전처리 단계로 깊이 보상, 정합 필터링, 주파수 이동 필터링을 이용하고, 탐지 단계에서 에지 비율을 통해 최종적으로 표적을 탐지한다. 제안하는 시스템의 성능을 검증하기 위하여 우리나라 토양의 대부분을 차지하는 사양토를 이용하였고, 탐지해야 하는 지뢰를 매설한 후 휴대용 지뢰 탐지기를 이용하여 데이터를 획득하였다. 획득한 데이터를 기반으로 패치의 크기 및 위치와 이동 주파수에 대한 실험을 진행하여 최적의 성능을 나타내는 값을 찾아내고, 해당 값을 이용하여 탐지 성능을 확인하였다. 실험 결과, 제안하는 전처리 알고리즘이 낮은 오경보율에서 모든 지뢰를 탐지하는 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였고, 기존 연구와의 비교를 통해 제안하는 시스템의 성능이 우수함을 확인하였다.

Abstract

Since a soldier manages a hand-held landmine detector by hands, it is necessary to develop a system that can detect the target quickly and accurately. However, the hand-held landmine detector used in Korea has a problem that it can only detect the metal mines. Therefore, it is important to solve the problem and to develop a hand-held landmine detection system suitable for the Korean environment. In this paper, we propose a hand-held landmine detection system suitable for the Korean environment using ground penetrating radar. The proposed system uses depth compensation, matched filtering, and frequency shifting filtering for preprocessing. Then, in the detection step, the system detects the target using the edge ratio. In order to evaluate the proposed system, we buried landmines in sandy loam which is most of the soil in Korea and obtained a set of ground penetrating radar data by using a hand-held landmine detector. By using the obtained data, we carried out some experiments on the size and position of the patch and the shifting frequency to find the optimal parameter values and measured the detection performance using the optimized values. Experimental results show that the proposed preprocessing algorithms are suitable for detecting all landmines at low false alarm rate and the performance of the proposed system is superior to that of previous works.

Keywords : Landmine, Hand-held, GPR(Ground Penetrating Radar), Frequency Shifting

* 학생회원, ** 정회원, 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (The School of Electrical Engineering, KAIST)

*** 정회원, 한화시스템 (Hanwha Systems)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : sdkim@kaist.ac.kr)

Received : December 13, 2016 Revised : March 15, 2017

Accepted : April 28, 2017

I. 서 론

전 세계적으로 수많은 지뢰가 매설되어 있으며, 대부분 전시 상황에 매설되어 제거되지 않은 것이다^[1]. 우리나라도 마찬가지로 한국 전쟁 당시 비무장 지대에 매설

된 지뢰가 제거되지 않은 채 남아있으며, 폭우 또는 홍수로 유실되어 민간인과 병사들이 피해를 입는 인명 사고가 끊이지 않는다. 지뢰 폭발로 인한 사회적 비용을 줄이기 위해 안전하고 정확한 지뢰 탐지의 중요성이 부각되고 있다.

현재 군에서는 전자기 유도의 원리로 동작하는 금속 탐지기(Metal Detector)를 이용하여 매설된 지뢰를 제거하는 작업을 지속적으로 수행하고 있다^[2]. 그러나 금속 탐지기는 금속 재질로 구성된 지뢰를 탐지할 수 있지만, 플라스틱과 나무와 같은 금속 성분이 없는 재질로 구성된 지뢰를 탐지할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지뢰의 재질에 관계없이 모든 종류의 지뢰를 탐지할 수 있는 지면 투과 레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)기반 휴대용 지뢰 탐지 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[3~4]. 그러나 우리나라는 우리나라 환경에 알맞게 동작하는 지면 투과 레이더 기반의 휴대용 지뢰 탐지 시스템에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 우리나라의 환경에 알맞고 재질에 관계없이 모든 종류의 지뢰를 탐지할 수 있는 휴대용 지뢰 탐지 시스템을 제안한다.

휴대용 지뢰 탐지 시스템의 특성상 장비를 운용할 때, 실시간으로 탐지 결과가 사용자에게 전달되어야 한다. 그러므로 일반적인 휴대용 지뢰 탐지 시스템은 연산량이 적은 알고리즘을 이용하고, 현재 또는 과거 데이터만을 이용하여 지뢰 탐지를 수행한다. 이러한 제약이 존재하기 때문에 moving average 필터링^[5], IIR 필터링^[6]과 같이 현재 또는 직전 신호들을 이용하여 배경 신호를 모델링한 후, 획득된 신호에 모델링된 배경 신호를 제거하는 단순한 전처리 알고리즘들을 이용한다. 전처리가 수행된 데이터를 기반으로 표적을 탐지하는 방법은 신호의 세기를 이용하는 방법^[7]과 선형 예측(LP)^[8]이 많이 이용되고 있다. 신호의 세기를 이용하는 방법은 표적이 매설되어 있는 위치에서 응답 신호의 세기가 강하게 나타난다는 특징을 이용하고, 선형 예측은 직전 신호들과 현재 신호와의 차이를 계산함으로써 표적이 매설되어 있는 위치를 찾는 방식으로 동작한다. 그러나 기존 연구에서 이용하는 모델 기반의 알고리즘들은 배경 또는 직전 신호들의 변화가 심하거나 잡음 신호가 포함될 경우, 시스템 성능 저하 문제가 발생한다. 또한, 신호의 세기만을 이용하여 표적을 탐지한다면 잡음 신호 및 강한 세기가 나타나는 배경 신호에서 오경보가 발생할 가능성이 높아지는 문제가 발생한다. 이러한

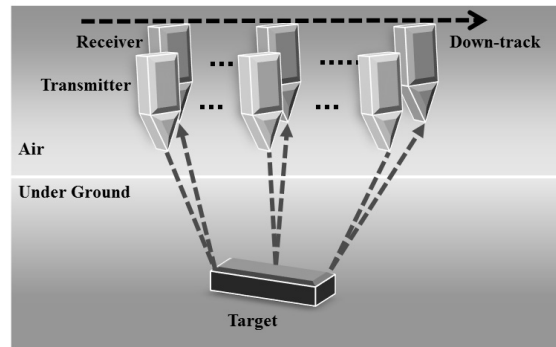


그림 1. 지면 투과 레이더의 데이터 획득 과정
Fig. 1. Data acquisition process of ground penetrating radar.

문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 배경 모델을 이용하여 배경 신호를 제거하는 것이 아닌 획득된 신호(A-scan)만을 이용하여 표적 신호를 강화하고 배경 신호를 약화시키는 알고리즘을 제안한다. 또한, 제한한 전처리 알고리즘을 적용함으로써 표적 신호의 에지 성분이 두드러지는 특징을 이용하는 표적 탐지 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 지면 투과 레이더의 동작 원리와 휴대용 지뢰 탐지 시스템의 구조에 대하여 설명하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 휴대용 지뢰 탐지 시스템에 대하여 설명한다. IV장에서는 제안하는 시스템의 변수들에 대한 실험 결과와 지뢰 종류별 탐지 결과에 대해서 분석한다. 그리고 기존 연구와의 성능 비교를 수행한다. 마지막으로 V장에서 결론과 향후 과제에 대하여 논의한다.

II. 휴대용 지뢰 탐지 시스템

본 장에서는 휴대용 지뢰 탐지 시스템에서 이용하는 지면 투과 레이더의 데이터 획득 원리와 특징에 대해서 설명하고, 지면 투과 레이더를 이용한 휴대용 지뢰 탐지 시스템의 구조에 대하여 설명한다.

1. 지면 투과 레이더의 데이터 획득 원리 및 특징

지면 투과 레이더는 송신 안테나와 수신 안테나로 구성되어 있다. 송신 안테나에서 펄스를 송신한 후, 매질의 유전율 차이로 인하여 반사된 신호를 수신 안테나에서 수신함으로써 데이터를 획득한다^[9]. 그림 1은 지면 투과 레이더를 이용하여 표적의 데이터를 획득하는 과정을 도식화한 것이다. 안테나가 진행 방향(down-track)에 따라 움직이며, 표적에 반사된 신호가 획득되는 과정을

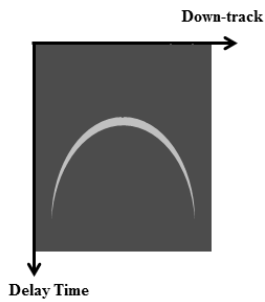


그림 2. 표적의 포물선 형태 예시

Fig. 2. Example of parabolic shape of a target.



그림 3. 휴대용 지뢰 탐지 시스템의 흐름도

Fig. 3. Flow chart of hand-held land-mine detection system.

나타낸다. 안테나의 위치에 따라 송신한 신호가 표적 신호로부터 반사되어 수신 안테나에 도달하는 시간이 모두 다르기 때문에 그림 2와 같이 표적 위치에서 포물선 형태가 나타난다.

진행 방향 중 한 위치에서 획득한 1-D 신호를 A-scan이라하며, 진행하면서 획득한 A-scan들을 누적하여 만든 2-D 신호를 B-scan이라한다. B-scan은 그림 4(a)와 같이 영상으로 나타낼 수 있다. 표적이 매설되어 있는 위치에서 그림 2와 같이 포물선 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2. 휴대용 지뢰 탐지 시스템의 구조

일반적인 휴대용 지뢰 탐지 시스템의 구조는 그림 3과 같다. 지면 투과 레이더 데이터가 시스템에 입력되면, 시스템 내부적으로 데이터 처리를 수행한 후 출력으로 탐지 결과를 도출하는 방식으로 동작한다. 시스템은 크게 전처리 단계(pre-processing)와 탐지/분류 단계(detection/classification)로 구성된다.

지면 투과 레이더를 이용하여 획득한 데이터에는 표적에 의한 신호, 배경 신호와 주변 환경에 의한 잡음 신호와 같은 다양한 신호가 존재한다. 이러한 신호들 중 탐지하고자하는 신호는 표적 신호이지만, 그 이외의 신호들과 환경적인 요인들로 인하여 표적 신호가 상대적으로 약하게 나타나 표적 탐지의 어려움이 발생한다. 따라서 표적 이외의 신호를 제거 또는 약화시키고, 표적 신호를 강하게 만들기 위해 전처리 단계를 수행한다.

다음 단계는 탐지/분류 단계로서 전처리가 수행된 데

이터를 기반으로 배경 신호와 표적 신호를 구분하는 작업을 수행한다. 두 신호를 탐지/분류하기 위해 이용하는 특징(feature)은 식별력(discriminability)이 높을수록 탐지/분류의 성능은 향상되므로 적절한 특징을 추출하는 것이 중요하다. 이와 같은 과정을 통해 입력된 지면 투과 레이더 데이터에 대한 탐지 결과를 사용자에게 알림으로써 휴대용 지뢰 탐지 시스템이 동작하게 된다.

본 논문에서 제안하는 시스템 또한 그림 3과 같이 구성되어있으며, 탐지 결과를 바탕으로 제안하는 시스템의 성능을 평가한다.

III. 제안 기법

본 장에서는 제안하는 휴대용 지뢰 탐지 시스템에 대하여 설명한다. 전처리 단계에서 깊이 보상, 정합 필터링, 주파수 이동 필터링에 대하여 설명하고, 탐지 단계에서 에지 비율을 활용한 탐지 방법에 대하여 설명한다.

1. 전처리 단계

기존 연구의 전처리 알고리즘은 배경 모델을 활용하여 획득된 데이터에서 배경 신호를 제거하였지만, 모델 기반의 알고리즘은 모델이 잘못 생성되었을 경우 전체적인 시스템 성능 저하의 문제가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 배경 모델을 이용하지 않고, 각 A-scan마다 데이터 처리를 수행하는 전처리 알고리즘을 제안한다. 표적 신호를 두드러지게 나타내기 위하여 깊이 보상과 정합 필터링을 이용하고, 배경 신호의 강한 AC성분을 약화하기 위하여 주파수 이동 필터링을 이용한다. 각 알고리즘에 대한 설명은 다음과 같다.

가. 깊이 보상

일반적으로 송신된 신호의 세기는 탐지 대상으로부터 거리가 멀어짐에 따라 지수 함수적으로 감쇠하는 특성을 갖고 있다. 지면 투과 레이더의 송신 펄스도 마찬가지로 유전율이 다른 물질에 반사되어 오는 시간이 길어질수록 수신 신호의 세기가 점차 약하게 나타난다. 즉, 땅속 깊게 매설된 표적 신호의 세기가 얇게 매설된 표적 신호의 세기보다 상대적으로 약하게 나타나는 현상이 나타난다. 표적 신호의 세기가 약하게 나타난다면, 해당 신호를 배경 신호로 오인하여 표적 탐지를 못하는 어려움이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 본 논문에서는 깊이 보상을 수행함으로써 땅속 깊이 매

설되어있는 표적의 신호를 강화하여 탐지에 용이하도록 한다. 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$x'[k] = x[k]e^{\frac{\alpha(k-1)}{n-1}}, k = 1, \dots, n \quad (1)$$

n 은 A-scan 샘플의 개수, α 는 깊이 보상 계수, x 는 A-scan 신호를 나타내며, x' 는 깊이 보상된 A-scan 신호를 나타낸다. 식 (1)에서 첫 샘플인 $x[1]$ 는 깊이 보상을 수행하지 않으며, 깊이가 깊어질수록 지수 함수를 곱하여 깊이 보상을 수행한다. 마지막 샘플인 n 번째 샘플의 데이터 $x[n]$ 은 e^α 를 곱해주어 깊이 보상을 수행한다. 즉, 획득된 데이터에 깊이 방향으로 1부터 e^α 의 보상치를 곱함으로써 깊이 보상을 수행한다.

$\alpha = 3$ 일 때, 깊이 보상을 수행한 결과는 그림 4(b)와 같다. 그림 4(a)와 비교해보면, 깊이 방향으로 신호가 강화된 모습을 확인할 수 있다. α 값이 일정 이상이 된다면, 땅속의 잡음 신호가 상대적으로 강하게 나타나기 때문에 적절한 α 값을 설정하는 것이 중요하다.

나. 정합 필터링

정합 필터링은 일반적으로 특정 신호를 검출하거나 신호 대 잡음비를 높이기 위하여 이용하는 기법이다. 본 논문에서도 표적에 의한 신호를 두드러지게 나타내기 위하여 정합 필터링을 수행한다. 정합 필터링을 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[n-k]x[k] \quad (2)$$

y 는 정합 필터링이 수행된 신호, x 는 입력 신호, h 는 선형 필터를 의미한다. 본 논문에서는 지면 투과 레이더의 송신부와 수신부를 연결하여 획득한 루프백(loopback) 데이터를 이용하여 선형 필터를 구현하였다. 정합 필터링을 수행함으로써 루프백 데이터와 유사한 형태의 신호 세기를 강하게 만들고, 그 이외의 신호 세기는 상대적으로 약하게 만드는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 신호 대 잡음비를 향상시키는 효과를 얻을 수 있다.

정합 필터링을 수행한 결과는 그림 4(c)와 같다. 깊이 보상을 수행한 결과인 그림 4(b)와 비교했을 때, 표적이 매설되어 있는 위치에서 나타나는 포물선 형태의 신호가 상대적으로 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

다. 주파수 이동 필터링

지면 투과 레이더의 송신 신호를 땅속으로 투과하기 위해서는 일정 주파수 대역을 갖는 AC 신호를 송신 신호로 이용해야한다. 지면 투과 레이더의 송신 신호로 DC 신호를 이용한다면, 대부분의 신호가 지표면에서 막히게 될 것이고, 더 큰 전력을 이용해야 한다는 문제가 발생한다. 따라서 펄스 신호를 땅속으로 투과하기 위해 일정 주파수 대역으로 변조(modulation)하는 작업을 수행한 후, 지면 투과 레이더의 송신 신호로 이용한다.

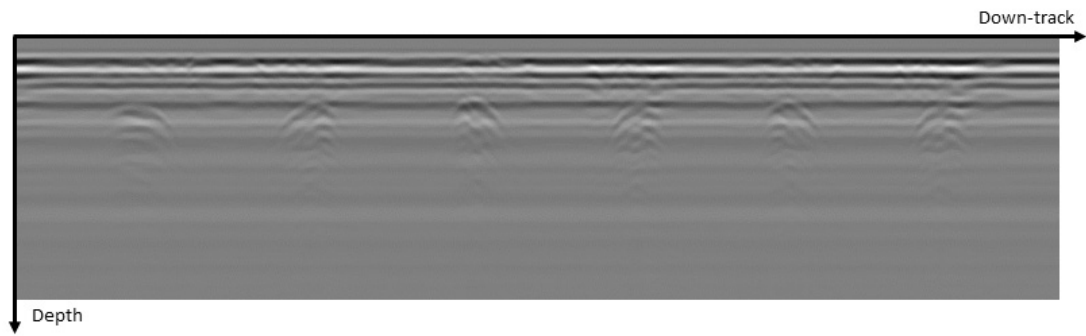
변조된 펄스를 송신 신호로 이용했기 때문에 수신된 신호를 누적한 데이터(그림 4(a)~그림 4(c))에서 깊이 방향으로 주기적인 줄무늬 신호가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연속적인 줄무늬 신호는 기울기, 예지 정보를 이용하는 탐지 단계에서 탐지 성능의 저하를 일으킬 수 있는 부분이므로 해당 신호의 세기를 약하게 하거나 제거해야한다. 본 논문에서는 변조된 신호를 다시 복조(demodulation)하여 주기적으로 나타나는 배경 신호를 약하게 만드는 주파수 이동 필터링을 수행한다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$X_s(f) = X(f + f_s) \quad (3)$$

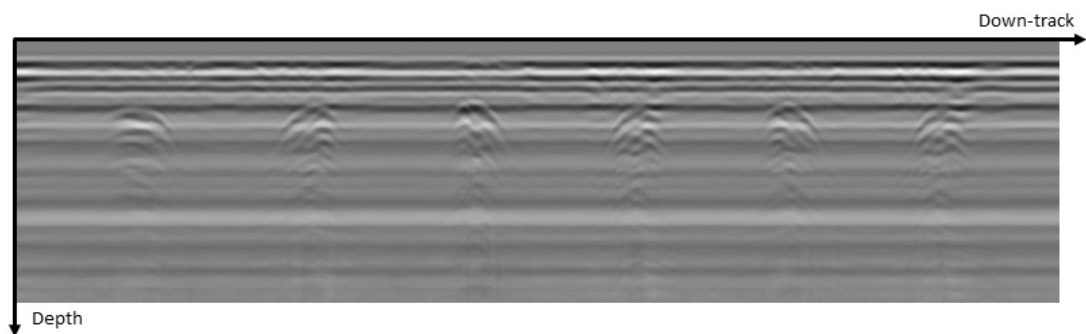
$X(f)$ 는 지면 투과 레이더 데이터의 주파수 도메인 신호이며, $X_s(f)$ 는 주파수 이동 필터링을 수행한 결과이다. f_s 는 복조를 수행하기 위한 이동 주파수를 의미한다. 주파수 이동 필터링을 수행한 후, 시간 도메인의 실수 부분을 나타낸 결과는 그림 4(d)와 같다. 그림 4(c)와 비교했을 때, 깊이 방향으로 반복적으로 나타나는 신호의 주기가 길어진 것을 확인할 수 있다. 즉, 반복적으로 나타나는 신호의 세기가 약화된 것을 알 수 있다.

2. 탐지 단계

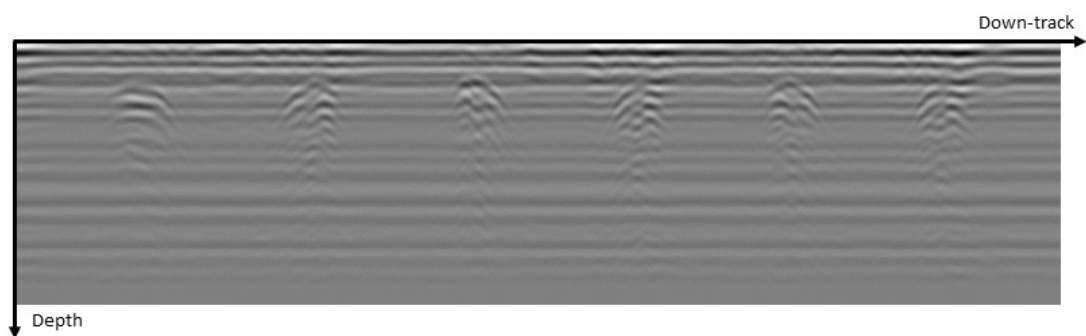
탐지 단계는 전처리 알고리즘을 수행한 데이터를 기반으로 표적 신호와 배경 신호를 구분하는 것을 수행하는 단계이다. 기존 연구의 탐지 방법인 A-scan 신호의 에너지로 탐지하는 방법과 선형 예측을 이용하는 방법 모두 현재 또는 직전 신호들의 변화가 심하거나 잡음 신호가 나타날 경우, 오경보가 발생할 가능성이 높다는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 A-scan 신호의 응답 세기와 직전 신호들 이용하는 것이 아닌 표적 위치에서 나타나는 기울기 성분을 이용한 탐지 알고리즘을 제안한다.



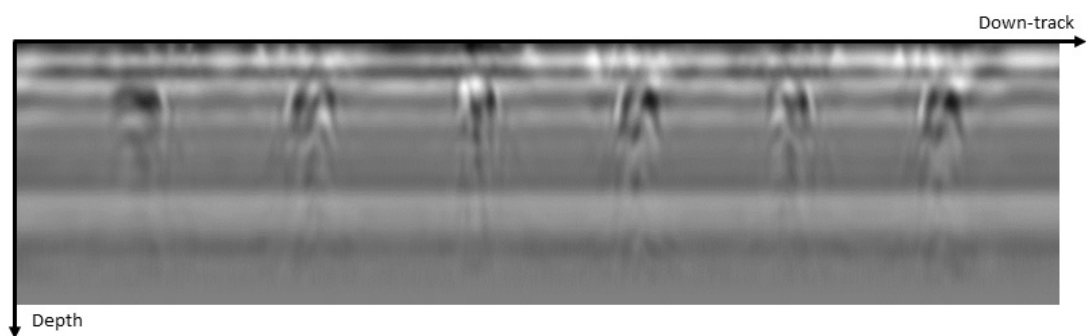
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. 전처리 단계 수행 결과 (a) 지면 투과 레이더의 획득 B-scan, (b) 깊이 보상 ($\alpha=3$), (c) 정합 필터링, (d) 주파수 이동 필터링 ($f_s = 2\text{GHz}$)

Fig. 4. Result of preprocessing (a) GPR B-scan, (b) Depth compensation result ($\alpha=3$), (c) Matched filtering, (d) Frequency shifting filtering. ($f_s = 2\text{GHz}$)

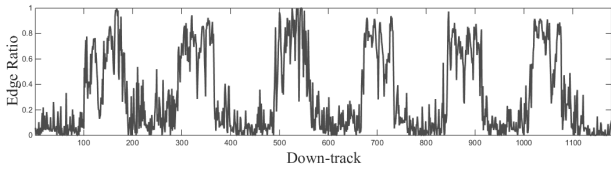


그림 5. 에지 비율
Fig. 5. Edge ratio.

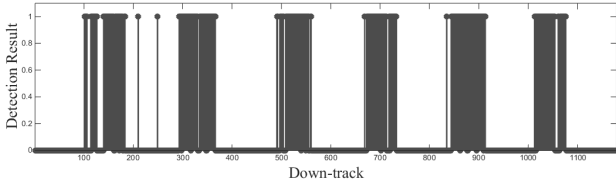


그림 6. 탐지 결과 (문턱치 = 0.5)
Fig. 6. Detection result. (threshold = 0.5)

전처리 알고리즘을 수행한 결과인 그림 4(d)를 살펴 보면, 표적이 매설된 위치에서 에지가 두드러지게 나타나며, 에지의 방향이 배경 신호에서의 에지 방향과 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 에지의 수직/수평 방향에 따른 빈도수 비율을 에지 비율 (edge ratio)로 정의하고, 에지 비율에 따라 표적 신호를 탐지하는 방법을 제안한다. 에지 정보를 얻기 위해서는 현재 위치와 직전 위치의 A-scan 신호를 이용하여 식 (4)와 같이 gradient를 구한 후, gradient를 이용하여 식 (5)와 같이 각도 정보를 계산한다.

$$\begin{aligned} g_x(i) &= X_{current}(i) - X_{past}(i) \\ g_y(i) &= X_{current}(i+1) - X_{current}(i), \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

$$\theta(i) = \tan^{-1} \left(\frac{g_y(i)}{g_x(i)} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$X_{current}$ 는 현재 A-scan 신호를 의미하고, X_{past} 는 직전의 A-scan 신호를 의미한다. g_x 와 g_y 는 수평 방향과 수직 방향의 gradient 성분을 의미하고, θ 는 gradient의 각도를 의미한다. N 은 A-scan 신호의 샘플 수를 의미한다. 이와 같이 계산한 각도의 빈도수를 이용하여 표적 신호 탐지를 위한 에지 비율을 식 (6)과 같이 정의한다.

$$Edge\ Ratio = \frac{\text{수평 각도 빈도수}}{\text{수직 각도 빈도수} + \text{수평 각도 빈도수}} \quad (6)$$

수직 각도 빈도수는 수직 gradient 방향으로 나타나는 샘플의 수를 의미하고, 수평 각도 빈도수는 수평 gradient 방향으로 나타나는 샘플의 수를 의미한다. 에지 비율은 0에서 1사이의 값을 갖게 되며, 1에 가까울수록 표적이 존재할 가능성이 높다는 의미이다. 에지의 방향과

표 1. 실험에서 사용한 지뢰 종류^[10]

Table1. Type of landmines used in the experiment.

이름	종류	재질
KM19	대전차	플라스틱
TM46	대전차	금속
PMD57	대인	나무
KM14	대인	플라스틱
KM16	대인	금속

gradient의 방향은 서로 직각이므로 수직 방향으로의 에지 정보가 많을수록 표적이 존재할 가능성이 높다는 의미와 같다.

전처리 알고리즘을 수행한 결과인 그림 4(d)의 데이터에서 에지 비율을 계산하여 나타낸 결과는 그림 5와 같다. 표적이 매설되어 있는 위치에서는 에지 비율이 높게 나타나고, 배경 위치에서는 에지 비율이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 에지 비율에 일정 문턱치를 설정함으로써 그림 6과 같이 최종적인 탐지 결과를 얻을 수 있다.

IV. 실험 결과

본 장에서는 III장에서 제안한 휴대용 지뢰 탐지 시스템을 활용하여 각종 변수에 대한 실험 결과와 표적 탐지 결과 및 성능 비교에 대하여 설명한다.

(주)화시스템의 실내 시험장에서 휴대용 지뢰 탐지기를 이용하여 획득한 데이터를 실험에 이용하였다. 토양은 사양토를 이용하였으며, 표적을 0, 10, 20, 30cm에 매설한 후 데이터를 획득하였다. 실험에 이용한 표적의 종류는 표 1과 같고, 표적 하나를 매설한 후 해당 위치를 반복적으로 스캔하여 그림 4(a)와 같은 데이터를 획득하였다.

시스템의 성능을 평가하기 위한 평가 지표로 탐지율 (Probability of Detection, PD)과 오경보율(False Alarm Rate, FAR)을 식 (7)과 식 (8)과 같이 정의한다.

$$PD = \frac{\text{탐지한 표적의 수}}{\text{매설된 표적의 수}} \quad (7)$$

$$FAR = \frac{\text{오경보가 발생한 A-scan의 수}}{\text{표적이 존재하지 않는 A-scan의 수}} \quad (8)$$

매설된 표적의 수는 실험에 이용한 데이터에 존재하는 모든 표적의 개수를 의미하고, 탐지한 표적의 수는 시스템에서 탐지한 표적의 개수를 의미한다. 표적이 존재

하지 않는 A-scan의 수는 표적이 없는 영역에 대한 전체 A-scan의 수를 의미하고, 오경보가 발생한 A-scan의 수는 시스템에서 오경보로 나타낸 전체 오경보의 횟수를 의미한다.

PD는 0에서 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 시스템의 성능이 우수하다고 할 수 있다. FAR도 0에서 1사이의 값을 가지며, PD와 반대로 0에 가까울수록 시스템의 성능이 우수하다고 할 수 있다. 성능 평가 지표인 PD와 FAR를 이용하여 수신자 판단 특성 곡선 (Receiver operating characteristic curve, ROC curve)을 나타낼 수 있으며, 곡선을 통해 시스템의 성능을 평가한다. 수신자 판단 특성 곡선이 좌상단에 가까울수록 낮은 오경보율과 높은 탐지율을 나타낸다. 즉, 좌상단에 가깝게 위치한 곡선을 나타내는 시스템이 다른 시스템보다 우수하다고 할 수 있다.

지뢰 탐지 분야에서는 지뢰 탐지를 수행할 때, 안전한 탐지를 위해 실제 지뢰의 크기보다 지뢰 매설 지역을 넓게 정의하는 halo^[11]의 개념을 이용한다. 본 논문에서는 halo를 10개의 A-scan으로 정의한 후, 실험을 수행하였다.

이와 같이 획득된 데이터와 평가 기준을 기반으로 수행한 실험에 대한 설명은 다음과 같다.

1. 시스템 변수에 대한 실험

최적의 시스템 성능을 얻기 위하여 패치 크기 및 위치와 이동 주파수에 대한 실험을 수행하여 최적의 값을 선정하는 실험을 수행하였다.

가. 패치 크기 및 위치에 대한 실험

지면 투과 레이더 데이터는 표적 신호뿐만 아니라 배경 및 잡음 신호도 포함되어 있으므로 모든 A-scan 신호를 이용하지 않고, 표적 신호가 두드러지게 나타나는 부분만을 이용할 필요가 있다. 또한, 데이터를 살펴보면, 표적이 매설되어 있는 위치에서 깊이 방향으로 포물선 형태의 신호가 반복적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 정보를 이용하기 위하여 표적 탐지를 위한 패치를 설정해야한다.

얕은 깊이의 신호를 포함한 패치는 지표면 신호가 포함되는 문제가 발생할 것이고, 깊은 깊이의 신호를 포함한 패치는 잡음 신호를 포함하는 문제가 발생할 것이다. 따라서 적절한 패치의 크기와 위치를 설정하는 방법이 매우 중요하다.

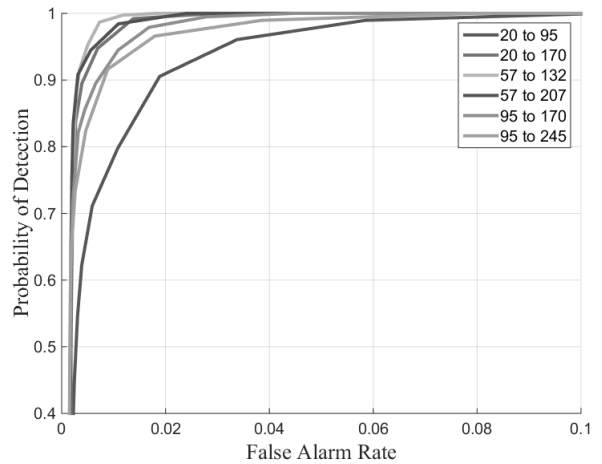


그림 7. 패치 위치 및 크기의 변화에 따른 탐지 결과
Fig. 7. Detection result according to change of patch position and size.

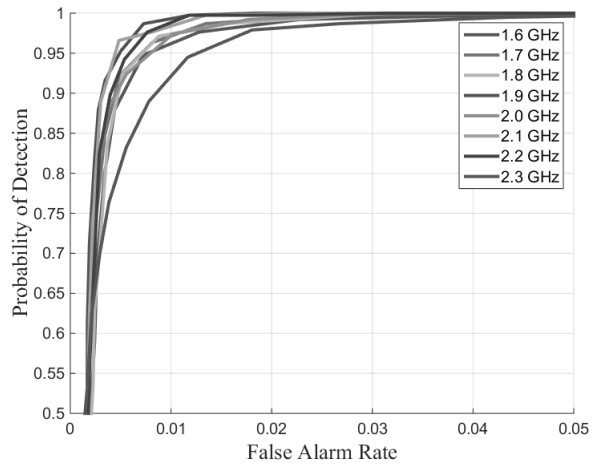


그림 8. 이동 주파수의 변화에 따른 탐지 결과
Fig. 8. Detection result according to change of shifting frequency.

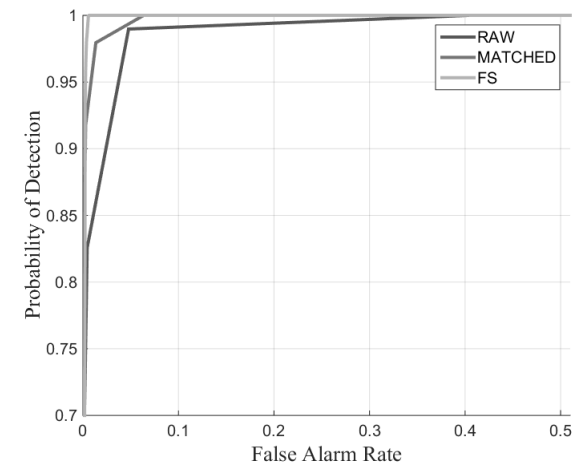


그림 9. 대전차 지뢰의 탐지 결과
Fig. 9. Detection result of anti-tank landmines.

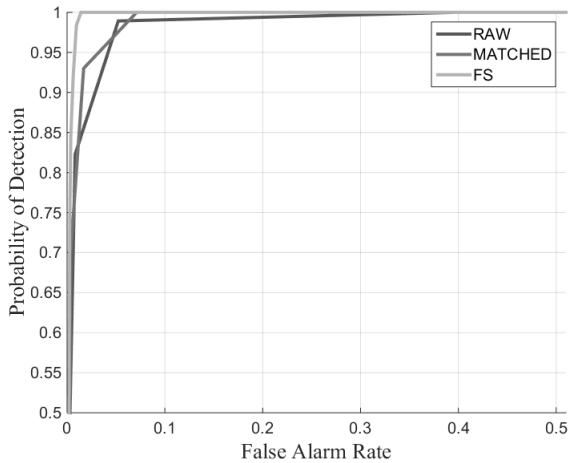


그림 10. 대인 지뢰의 탐지 결과
Fig. 10. Detection result of anti-personnel landmines.

다양한 패치의 크기와 위치에 대하여 실험한 결과는 그림 7과 같다. 깊이 방향으로 57번째 샘플에서 132번째 샘플 사이의 패치를 설정했을 때 ROC curve가 좌상단에 위치하여 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 탐지 성능이 가장 우수한 패치의 크기와 위치를 이용하여 다음 실험을 진행하였다.

나. 이동 주파수에 대한 실험

주파수 이동 필터링은 깊이 방향으로 반복적으로 나타나는 배경 신호를 약화하기 위해 이용한다. 반복적으로 나타나는 신호의 주기가 지면 투과 레이더의 변조된 송신 펄스의 주파수 대역과 연관이 있을 것이라 추측할 수 있다. 이러한 예상을 기반으로 이동 주파수를 변화하여 시스템의 성능을 평가한 결과는 그림 8과 같다.

지뢰 탐지의 특성상 오경보율보다 탐지율이 우선시 되어야하므로 이동 주파수가 1.9 GHz일 때 가장 우수한 성능이 나타났다고 할 수 있다. 따라서 지면 투과 레이더의 변조된 송신 펄스의 주파수 대역과 이동 주파수의 대역이 유사할수록 시스템의 성능이 우수하게 나타나는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다. 본 논문에서는 1.9GHz를 이동 주파수로 이용하여 실험을 수행하였다.

2. 표적 종류에 대한 실험

앞서 시스템 변수에 대한 실험을 통해 제안하는 시스템에 알맞은 최적의 값을 설정하였다. 설정된 값을 기반으로 표적의 종류에 따른 탐지 결과를 살펴보기 위해 표 1에 명시된 표적을 대전차 지뢰와 대인 지뢰로 분류하여 실험을 수행하였고, 전처리 알고리즘의 수행 여부에 따른 탐지 성능을 동시에 평가하였다.

그림 9는 대전차 지뢰인 TM46과 KM19에 대하여 원본 데이터, 정합 필터링까지 전처리를 수행한 데이터와 주파수 이동 필터링까지 전처리를 수행한 데이터의 탐지 결과를 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 그림 10은 대인 지뢰인 KM16, PDM57과 KM14에 대하여 원본 데이터, 정합 필터링까지 전처리를 수행한 데이터와 주파수 이동 필터링까지 전처리를 수행한 데이터의 탐지 결과를 나타낸 그래프이다. 실험 결과, 주파수 이동 필터링까지 전처리를 수행했을 때의 결과가 가장 우수하게 나타났으며, 낮은 오경보율에서 모든 지뢰를 탐지하는 성능을 나타냈다. 원본 데이터와 정합 필터링의 결과에서도 표적 신호의 에지 성분이 나타나지만, 주파수 이동 필터링을 적용함으로써 에지 성분이 더 두드러지게 나타나 우수한 탐지 성능을 나타낸 결과라 할 수 있다.

그림 9와 그림 10을 비교해보면, 대전차 지뢰인 경우 대인 지뢰보다 약 0.08% 낮은 오경보율에서 모든 지뢰를 탐지하는 성능을 나타냈다. 이는 대전차 지뢰의 물리적인 크기가 대인 지뢰의 물리적인 크기보다 크기 때문에 나타나는 현상이다. 표적의 크기가 클수록 응답 신호의 세기 또한 크게 나타나기 때문에 표적을 탐지하기 용이하게 된다.

3. 알고리즘에 대한 실험

본 논문에서 제안하는 시스템과 기존 연구와의 성능 비교를 위해 표 1에 명시된 표적을 대전차 지뢰와 대인 지뢰로 나누어 실험을 수행하였다. 기존 연구의 전처리 알고리즘은 IIR 필터링을 이용하였고, 탐지 알고리즘은 에너지 검출기(Energy)와 선형 예측 방법(LP)을 이용하였다. 실험은 오경보율을 고정했을 때의 탐지율 비교와 탐지율을 고정했을 때의 오경보율 비교를 수행하였다.

먼저, 매설된 지뢰를 제거하기 위해 소요되는 인력 및 비용이 동일하다는 조건을 설정하기 위해 오경보율을 고정한 후, 탐지율을 측정하였다. 표 2와 표 3은 오경보율을 5%로 고정했을 때의 대전차 지뢰와 대인 지뢰의 탐지율을 나타낸 것이다. 대전차 지뢰의 경우에는 제안 기법이 IIR+Energy보다 약 22%, IIR+LP보다 약 0.3% 탐지율이 높은 결과가 나타났으며, 대인 지뢰의 경우에는 제안 기법이 IIR+Energy보다 약 46%, IIR+LP보다 약 2.3% 탐지율이 높은 결과가 나타났다. 즉, 지뢰 탐지를 위한 자원이 동일할 경우, 제안하는 시스템의 탐지 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

표 2. 대전차 지뢰의 탐지 결과 비교 (FAR=0.05)

Table2. Comparison of detection results of anti-tank landmines. (FAR=0.05)

	IIR + Energy	IIR + LP	Proposed
PD	0.7719	0.9968	1.0

표 3. 대인 지뢰의 탐지 결과 비교 (FAR=0.05)

Table3. Comparison of detection results of anti-personnel landmines. (FAR=0.05)

	IIR + Energy	IIR + LP	Proposed
PD	0.5331	0.9766	1.0

표 4. 대전차 지뢰의 탐지 결과 비교 (PD=1)

Table4. Comparison of detection results of anti-tank landmines. (PD=1)

	IIR + Energy	IIR + LP	Proposed
FAR	0.269	0.07835	0.005802

표 5. 대인 지뢰의 탐지 결과 비교 (PD=1)

Table5. Comparison of detection results of anti-personnel landmines. (PD=1)

	IIR + Energy	IIR + LP	Proposed
FAR	0.6804	0.1372	0.01425

지뢰 탐지의 경우, 인명 피해의 위험이 발생할 수 있으므로 매설된 모든 지뢰를 탐지해야한다. 이러한 상황을 설정하기 위해 모든 지뢰를 탐지했을 때의 오경보율을 측정하는 실험을 수행하였다. 표 4와 표 5는 탐지율을 100%로 고정했을 때의 대전차 지뢰와 대인 지뢰의 오경보율을 나타낸 것이다. 대전차 지뢰의 경우 제안 기법이 IIR+Energy보다 약 26%, IIR+LP보다 약 7.2% 오경보율이 낮은 결과가 나타났으며, 대인 지뢰의 경우 제안 기법이 IIR+Energy보다 약 66%, IIR+LP보다 약 12% 오경보율이 낮은 결과가 나타났다. 모든 지뢰를 탐지할 경우, 소요되는 비용이 적을수록 해당 시스템의 성능이 우수하다고 할 수 있으므로 제안하는 시스템이 기존 연구보다 우수한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

모든 실험을 수행한 결과, 대전차 지뢰가 대인 지뢰보다 탐지율과 오경보율이 모두 우수한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 표적의 크기에 따른 신호의 세기 차이가 발생하기 때문에 나타나는 현상이다. 또한, 기존 연구와의 비교를 위해 오경보율이 고정되어 있을 때의 탐지율 비교와 탐지율이 고정되어 있을 때의 오경보율 비교를 통해 제안하는 시스템이 기존 연구보다 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 우리나라 환경에 알맞은 지면 투과 레이더 기반의 휴대용 지뢰 탐지 시스템을 제안하였다. 제안하는 시스템의 전처리 단계에서 깊이 방향으로 신호의 세기가 감쇠되는 특성을 보상하기 위한 깊이 보상, 표적 신호 강화를 위한 정합 필터링 그리고 배경 신호를 약하게 만들기 위한 주파수 이동 필터링을 제안하였다. 탐지 단계에서는 표적 위치에서 나타나는 기울기 정보를 이용하는 에지 비율을 정의하여 표적을 탐지하는 알고리즘을 제안하였다. 시스템 변수에 대한 실험을 통해 최적의 성능을 나타내는 값을 찾은 후, 표적의 종류에 따른 탐지 성능 비교, 전처리 알고리즘 적용 여부에 따른 탐지 성능 비교와 기존 연구와의 탐지 성능 비교를 수행하였다. 실험 결과, 제안하는 모든 전처리 알고리즘을 수행하는 것이 가장 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였고, 제안하는 시스템이 기존 연구보다 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

향후 과제로는 다양한 변수에 대한 최적화 작업을 수행해야한다. 앞서 실험을 통해 중요 변수에 대하여 최적화 작업을 수행하였지만, 깊이 보상 계수, 에지 비율 계산을 위한 수평/수직 각도 범위와 같은 변수에 대해서도 유사한 작업을 통해 최적화된 값을 설정해야한다. 또한, 제안하는 시스템의 탐지 성능 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다. 높은 탐지율을 유지하면서 오경보율을 낮출 수 있는 연구가 수행된다면, 지뢰 제거 작업을 위한 불필요한 비용 소모를 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 관리하에 (주)한화시스템 주관 지뢰탐지기II 탐색 개발 사업으로 수행되었음.

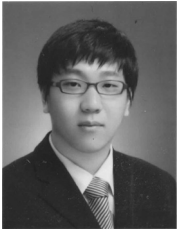
REFERENCES

- [1] ICBL-CMC, International Campaign to Ban Landmines, Landmine Monitor 2016.
- [2] Chi-Wook Kim, "A Study on Analysis and Improvement of Current Korean Army's Mine Detector," The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.13 No.5, pp. 229-233, 2013.
- [3] Julie L. White, Derek T. Anderson, John E. Ball and Brian Parker, "Curvelet filter based prescreener

for explosive hazard detection in hand-held ground penetrating radar.” SPIE Defense+ Security. International Society for Optics and Photonics, 2016.

- [4] K. C. Ho, Lawrence Carin, Paul D. Gader, and Joseph N. Wilson, “An investigation of using the spectral characteristics from ground penetrating radar for landmine/clutter discrimination.” IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing 46.4, 1177-1191, 2008.
- [5] Mary Knox, Peter Torrione, Leslie Collins and Kenneth Morton, “Buried threat detection using a handheld ground penetrating radar system.” SPIE Defense+ Security. International Society for Optics and Photonics, pp. 94540F-94540F, May, 2015.
- [6] D. H. Chambers, D. W. Paglieroni, J. E. Mast and N. R. Beer, “Real-time vehicle-mounted multi static ground penetrating radar imaging system for buried object detection.” The Journal of the Acoustical Society of America, 113, 2003
- [7] Dmitry Kalika, Mary T. Knox, Leslie M. Collins, Peter A. Torrione and Kenneth D. Morton, “Leveraging robust principal component analysis to detect buried explosive threats in handheld ground-penetrating radar data.” SPIE Defense+ Security. International Society for Optics and Photonics, pp. 94541D-94541D, May, 2015.
- [8] K.C. Ho and Paul D. Gader. “A linear prediction land mine detection algorithm for hand held ground penetrating radar.” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40.6, 1374-1384, 2002.
- [9] Min Ju Kim, Seong-Dae Kim, Kyunghyun Paeng, Jong-Hun Hahm, Seung-hoon Han, Seung-Eui Lee. “Landmine Detection System using a Target-adaptive Window Selection Method.” Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, 51.7, 201-208, July, 2014.
- [10] Koryo Pyrotechnics Co., LTD. Available at: <http://kpyro.com/>, Accessed February 20, 2017.
- [11] Geneva International Centre for Humanitarian Demining, Metal Detectors and PPE Catalogue 2007, February, 2007

저 자 소 개



함 중 현(학생회원)
 2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 학사 졸업
 2015년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업
 2015년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정
 <주관심분야: 영상처리, 패턴인식>



김 민 주(학생회원)
 2012년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 학사 졸업
 2014년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업
 2014년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정
 <주관심분야: 패턴인식, 기계학습, 컴퓨터비전>



허 은 두(학생회원)
 2015년 인하대학교 전자공학과 학사 졸업.
 2017년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업.
 2017년~현재 삼성전자 S.LSI 연구원
 <주관심분야: 영상처리, 패턴인식>



김 성 대(정회원)
 1977년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
 1979년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업
 1983년 프랑스 ENSEEIHT 전자공학과 박사 졸업
 2011년 대한전자공학회 회장
 2012년~현재 한국공학한림원 회원
 1984년~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수
 <주관심분야: 영상처리, 컴퓨터비전>



김 동 현(정회원)
 2006년 영남대학교 전자공학과 학사 졸업
 2005년~2007년 엘지디스플레이 연구원
 2011년 영남대학교 전자공학과 석사 졸업
 2010년 12월~현재 한화시스템 선임연구원
 <주관심분야: 영상 레이다, 레이다 시스템 및 신호처리>



최 순 호(정회원)
 1998년 목포대학교 전자공학과 학사 졸업
 2016년 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 졸업
 2002년~현재 한화시스템 전문연구원
 <주관심분야: 투과 레이다, 레이다 시스템>