

논문 2023-3-11 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2023.09.11>

2.5차원 템플릿 매칭 기법을 이용한 지하매설물 탐지 및 시각화에 대한 연구

이승환*, 오재곤**†

A study on the Detection and Visualization of Buried Objects Using 2.5D Template Matching Techniques

Seung Hwan Lee*, Chae Gon Oh**†

요 약

지표투과레이더 시스템은 전자기파를 방사하여 지하매설물로부터 반사되는 신호를 시각화하여 지하공동 및 지뢰 등과 같은 매설물을 탐지할 수 있으나 지하 매설물을 구분하기 위해서는 각 대상에 대한 신호패턴 파악이 필요하며 이를 실시간으로 탐지하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 적응형 신호처리 기법을 적용하여 영상화한 이미지에서 비균일성을 가진 클러터 신호의 영향을 줄여 표적신호의 가시성을 높일 수 있도록 하였으며, 에너지 프로파일 추출 기법을 통해 3차원 영상을 2차원 단면 영상으로 구성하여 표적신호의 판별을 단순화하고 2.5D 템플릿 매칭기법을 적용하여 실시간으로 탐지된 대상에 대한 일치율 산출이 가능하도록 하였다. 토양으로 채워진 시험장에 선별된 여러 물체를 다양한 위치에 매설하여 실시간 탐지 소프트웨어를 통해 그 성능을 확인하였으며, 추후에 실시간 자동탐사 기능을 활용하여 지뢰탐지 시스템에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

Abstract

Ground-Penetrating Radar(GPR) system can detect buried objects such as underground cavities and mines by emitting electromagnetic waves and visualizing signals reflected from underground facilities by emitting electromagnetic waves. But in order to distinguish buried objects, it is necessary to understand signal patterns for each target and it is difficult to detect signal patterns for each target in real time. In this study, adaptive signal processing technique is applied to reduce the effect of non-uniform clutter signals on images to increase the visibility of target signals, and energy profile extraction technique is used to simplify the identification of target signals. In addition, the 2.5D template matching technique is applied to calculate matching rate of the detected object. Several objects selected in soil-filled test sites were buried in various locations to confirm their performance through real-time detection software, and it is expected to be applied to mine detection systems using real-time automatic exploration in the future.

한글키워드 : 다채널 지표투과레이더, 매설물탐지, 적응형 신호처리, 템플릿 매칭, 시각화

keywords : multi-channel ground penetrating radar, buried object detection, adaptive signal processing, template matching, visualizing

* 이성 주식회사 GPR사업부/기술연구소

접수일자: 2023.08.28. 심사완료: 2023.09.11.

** 한국공학대학교 전자공학부

게재확정: 2023.09.20.

† 교신저자: 오재곤(email: cgoh@tukorea.ac.kr)

1. 서론

지표투과레이더(Ground Penetrating Radar, GPR)는 광대역 레이더 펄스를 지표면에 방사하여 수신된 신호를 이미지화하여 건축 및 토목 분야의 지반조사와 군사 목적의 땅굴 및 지뢰탐지 등의 얕은 지하표면 조사를 위한 비파괴 도구로 널리 사용되고 있다[1,2].

GPR을 이용한 지하 매설물 탐사방식은 안테나 채널 수에 따라 달라진다. 1~2채널의 단채널 GPR 시스템은 전진하면서 한번 탐사한 이후에 탐사하지 못한 영역을 다시 전진하면서 격자 간격으로 반복 측정하여 3차원 데이터를 획득하지만, 다채널 GPR 시스템은 탐사하고자 하는 영역의 폭을 한 번에 측정할 수 있는 채널 수를 구성하여 1회 전진하면서 반복 측정 없이 3차원 데이터를 획득할 수 있다. 다채널 GPR 시스템은 일정한 간격으로 데이터 획득이 가능하여 단채널 GPR 시스템보다 정확한 3차원 데이터 영상 획득이 가능하다.

다채널 GPR 시스템을 이용하여 지하매설물 탐사를 할 때는 주로 차량과 같은 이동운반체에 장착하여 탐사한다. 탐사할 때 지표면은 차량 자체 진동 및 여러 장애물과의 마찰 등으로 지표면으로부터 반사되는 지표면 반사파가 불규칙적으로 변화하여 지표면 근처에 표적이 매설되어 있으면 지표면 반사파만을 제거하고 표적 신호만 추출하는 것은 매우 어렵다[3,4]. 이뿐만 아니라 땅속의 작은 금속 조각 및 암석 등의 불균일한 매질 경계면에서 반사되는 신호로 인해 표적신호와 식별을 어렵게 한다. 따라서 표적신호 식별을 위해 신호처리 과정에서 클러스터 신호를 최대한 제거한 후 이를 영상화하여 운용자가 알고 있는 크기의 표적신호와 그 외의 신호와 구분할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다[5-9]. 사람의 육안으로 일일이 표적신호를 검출하는 것은 운용자의 분석 능력에 따라 결과가 달라지며 이를 실시간 탐사하는 상황

에서 판단하는 것은 탐지속도 관점에서 매우 비효율적이다. 따라서 탐지하고자 하는 대상들을 자동으로 탐지할 수 있는 객체인식 기술이 필요하다. GPR 데이터로부터 객체를 인식하는 기법은 딥러닝 기반의 CNN 및 YOLO가 사용되고 있으며 대부분 데이터 획득 후 후처리에서 사용된다[10-12]. 이는 탐사와 동시에 실시간 탐지 및 시스템의 소형화가 필요한 지뢰탐지 분야에서는 적용이 어렵다.

본 연구에서는 2.5D 템플릿 매칭기법을 이용하여 GPU 사용 없이 CPU 연산만을 통해 탐사시에 실시간으로 객체인식을 통해 탐지한 대상에 대한 종류 및 일치율을 확인할 수 있도록 구현하였으며, 탐사 중에 실시간 영상에서 육안으로 쉽게 표적신호를 판별할 수 있도록 에너지프로파일 기법을 통해 3차원 영상을 2차원 단면영상으로 표현하였다. 제안한 기법의 성능을 검증하기 위해 FRP 수조에 흙을 채우고 선별한 실험 대상들을 매설하여 다채널 GPR 시스템으로 탐사하여 템플릿을 추출하였으며 선별한 템플릿을 시스템에 적용하여 실험 대상의 위치를 바꿔가며 실시간 탐사를 통해 얻은 결과를 통해 그 효과를 검증하였다.

2. 템플릿 매칭을 이용한 객체 인식

템플릿 매칭은 입력 이미지보다 작은 크기의 템플릿 이미지를 입력 이미지의 각 위치에서 이미지 간의 유사도를 측정하는 기법이다. 템플릿 매칭 기법은 유사성의 척도인 Cross Correlation을 사용하며 그중 NCC(Normalized Cross Correlation Coefficient) 방식이 다른 템플릿 방식에서 가장 높은 강건성을 가져 주로 사용된다[13,14].

NCC는 완전히 일치하면 1, 대칭일 때 -1, 연관성이 없으면 0을 반환하며, 결과값은 명암비까지 포함되어, 더욱 또렷한 출력을 통해 더 나은

결과를 얻을 수 있다. 디지털 시스템에서 NCC 수식은 식 (1)과 같다.

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (T'(x',y') \cdot I'(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T'(x',y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I'(x+x',y+y')^2}} \quad (1)$$

입력 이미지 I 상에서 템플릿 이미지 I를 x축과 y축 방향에 따라 이동 시키며 연산을 수행한다. (x,y)는 입력 이미지의 좌표이며, (x',y')는 템플릿 이미지의 좌표이다. 수식 (1)의 분자는 템플릿 이미지와 입력 이미지에서 각각의 평균값을 보정한 Normalized Cross Correlation이지만 정규화된 상관계수는 영역내의 밝기가 높을 경우 템플릿 이미지와 관계없이 상대적으로 높은 결과가 나온다. 따라서 입력 이미지와 템플릿 이미지 각각의 표준편차를 Cross Correlation한 값을 나누어 상대적으로 강건한 유사도 결과를 얻을 수 있다[14].

2.1. GPR 신호의 2차원 이미지

GPR 시스템의 한 채널에서 특정 시간 간격 동안 고정된 위치에서 획득한 1차원 신호를 A-Scan이라고 하며, GPR 시스템을 고정된 위치가 아닌 선형스캔을 통해 획득한 데이터를 이미지화하여 단면으로 구성된 신호를 B-Scan이라고 한다. 다중배열 GPR 시스템은 다채널 GPR 시스템으로 고정된 위치에서 데이터를 획득하여도 B-Scan 데이터를 획득할 수 있다. 특정 위치에서 획득한 B-Scan은 XZ평면(채널-심도) 데이터로 횡단면이라고 한다. 고정된 위치가 아닌 Y축 방향으로 이동하며 획득한 선형 스캔 데이터에서 특정 깊이의 데이터를 표현하는 XY평면(채널-거리) 데이터는 평단면, 진행방향으로 특정채널을 표현하는 YZ평면(거리-채널) 데이터를 종단면이라고 한다. 이를 그림 1에 표현하였다.

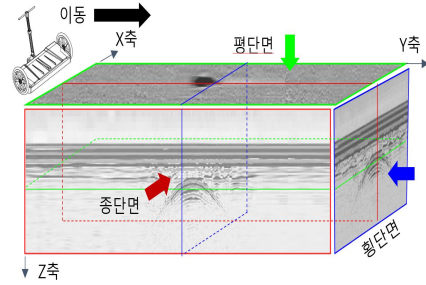


그림 1. 다중채널 GPR 시스템의 B-Scan 단면 정의
Fig 1. Definition of B-Scan plane for multi-channel GPR

B-Scan 이미지는 XY, YZ, XZ 평면 3가지로 템플릿 매칭 적용을 3개의 평면에 대해 적용할 수 있다.

2.2. 2.5D 템플릿 매칭

본 논문에서 사용하는 2.5D 템플릿 매칭은 XY 평면과 YZ 평면 각각에 대한 NCC 결과들의 평균이다. XY, YZ 평면은 이동방향에 따라 획득한 데이터를 이미지화한 평면으로 고정된 위치에서 획득한 XZ 평면보다 탐사 대상에 대한 특징을 상대적으로 많이 담을 수 있다. 따라서, XY, YZ 단면에 대해 NCC의 평균을 계산하여 3개의 차원을 계산하는 것보다 연산량을 줄일 수 있으며 더욱 강건한 유사도를 얻을 수 있다.

3. 지하 매설물 탐지 시스템 구현

본 연구에서는 그림 2과 같은 신호처리 절차를 그림 3과 같은 분석 소프트웨어로 구현 및 검증하였으며, 각 신호처리 절차에 따른 효용성을 검증하였다. GUI는 .NET Framework 기반의 WPF (Windows Presentation Foundation)를 이용하여 구현하였으며, 로직은 C#으로 구현하였다. 템플릿 이미지 추출은 분석 SW에서 GPR 탐사 데이터를 불러와 표본별로 템플릿 이미지를 템플릿 파일

로 저장하여 저장된 파일들을 이용하여 2.5D 템플릿 매칭을 수행한다.

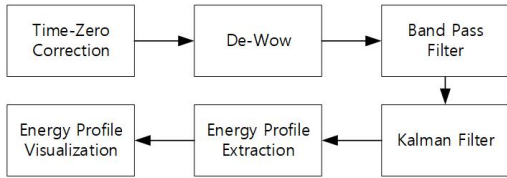
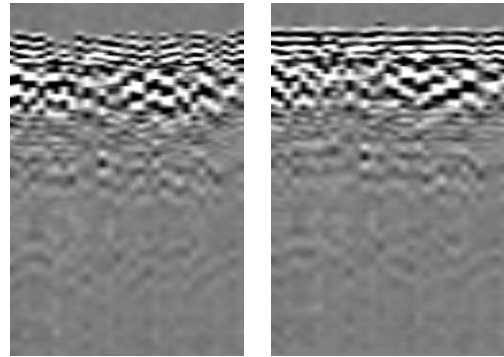


그림 2. GPR 신호처리 절차
Fig 2. GPR signal processing flow



(A) 초동 보정 적용 전 (B) 초동 보정 적용 후

그림 4. 초동 보정 적용 결과
Fig 4. Time-Zero correction result

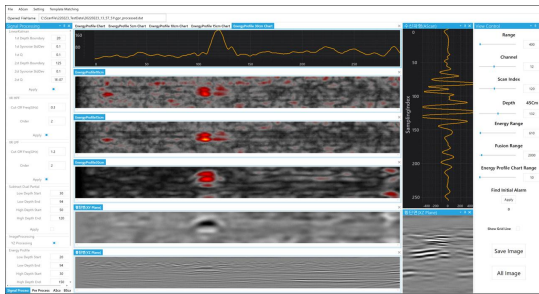
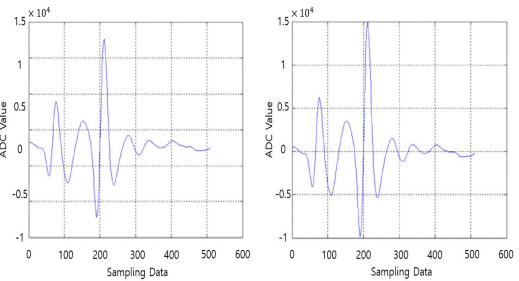


그림 3. GPR 신호처리 소프트웨어 구현 결과
Fig 3. GPR signal processing S/W GUI

3.1. 초동 보정(Time-Zero Correction)

송신기에서 수신기로 직접 수신되는 직접 전달파는 송신기와 수신기의 거리가 변화하지 않기 때문에 도달시간은 변화하지 않아야 하지만 온도로 인한 전자파 속도 변화와 진동으로 인한 미세한 거리 변화로 도달시간 변화가 발생한다[15-17]. 도달시간 변화를 동일한 시간지점으로 보정하기 위해서는 GPR 신호에서 첫 번째 양의 피크 및 음의 피크 검출을 통해 해당 지점을 기준으로 동일한 시간 지점으로 시간 지연을 하는 방법이 주로 사용된다[16,18]. 다채널 GPR 시스템의 경우 각 채널별 물리적인 경로 차이로 도달시간이 서로 다르며, 모든 채널의 직접 전달파 초동 보정을 동일하게 적용하며 이를 그림 4에 나타내었다.



(A) De-Wow 적용 전 (B) De-Wow 적용 후

그림 5. De-Wow 필터 적용 결과
Fig 5. De-Wow filter applying result

3.3. 대역통과 필터(Band-Pass Filter)

GPR 수신신호에는 방사한 전자파가 반사되어 수신된 신호 이외의 잡음 신호가 존재한다. 신호 대잡음비(SNR)를 높이기 위해 GPR 송신 펄스의 대역폭 이외의 신호를 제거한다[6]. 대역통과 필터

는 저주파통과필터와 고주파통과필터를 이용하여 구현할 수 있다. 주로 저주파통과필터를 통해 고주파 잡음신호를 제거하고, 비교적 먼 전파경로를 통해 수신된 신호는 고주파 신호의 감쇠가 심하여 상대적으로 큰 저주파 신호를 제거하여 고주파 표적 신호가 잘 보이도록 고주파통과필터를 적용한다. 대역통과 필터는 도로지반탐사 시에 매우 효과적이다[19,20].

3.4. 적응형 신호 추정기법

초동 보정, DC-Bias 제거, 대역통과 필터를 통해 원신호의 품질을 개선하였다면 마지막으로 원신호에서 직접 전달파와 지표면 반사파를 분리하여 표적 반사파를 추출하는 과정이 필요하다. 직접 전달파와 지표면 반사파는 표적 반사파에 비해서 신호 변화가 적으며 전자파는 투과할수록 신호 세기가 약해져 신호 세기도 상대적으로 크기 때문에 그림 6과 같이 적응형 신호추정기법을 적용하여 표적 반사파를 추출한다[21].

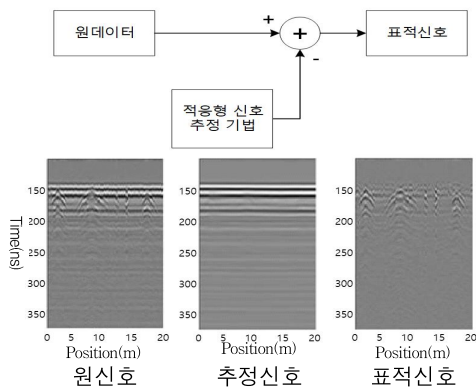


그림 6. 적응형 필터 적용 결과
Fig 6. Adaptive filter applying result

3.5. 에너지 프로파일 추출 및 시각화

실제 다중배열 GPR 시스템을 이동하면서 데이터를 획득하면 3차원 데이터를 얻게 되며, 이를 시각화할 때 주로 B-Scan 영상으로 표현한다.

B-Scan 영상은 2차원 영상으로 평단면 B-Scan일 때는 특정 심도의 영상을 확인하며, 종단면은 특정 채널, 횡단면은 특정 거리의 영상만을 확인할 수 있다. 이를 3차원 형태로 구성하면서 사용자가 식별하기 용이하도록 하기 위해 본 연구에서는 에너지 프로파일 추출 기법을 적용하였다. 3차원 데이터를 2차원 단면영상으로 만들기 위해 평단면 데이터를 모든 심도별 에너지를 누적하여 이를 영상화하였다. 이때, 누적 시에 표적신호 이외의 신호를 최소화하기 위해 평균필터 및 적응형 필터를 적용하였다. 마지막으로 가우시안 필터를 적용하여 이미지의 잡음을 제거하였으며 이를 GUI 소프트웨어로 구현하여 신호처리 전후 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 표적은 직사각형의 나무 재질 물체로, 매설 깊이는 토양의 지표면으로부터 깊이 10cm 지점이다.

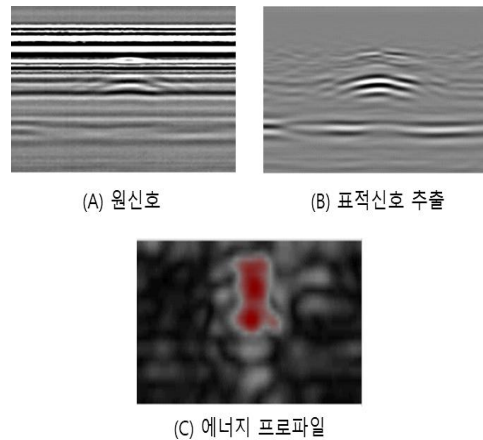


그림 7. 표적 신호 추출 결과
Fig 7. Target signal detection result

그림 7의 (A) 원신호에서 표적 신호는 직접 전달파와 지표면반사파에 가려져 있지만, 신호처리를 적용한 결과 그림 7의 (B)와 같이 직접전달파와 지표면반사파가 대부분 제거되고 쌍곡선 (Parabolic) 형태의 표적신호 식별이 가능함을 확

인할 수 있다. 그림 7의 (C) 에너지 프로파일 영상은 단위 면적당 신호세기로 운용자가 1차적으로 에너지 프로파일을 통해 표적의 유무 판단을 하고 그림 7의 (B)와 같은 B-Scan 영상을 통해 세부적인 분석 후에 최종 판단을 하도록 하였다.

4. 시험 및 평가

구현한 GPR 신호의 에너지프로파일 시각화 및 2.5D 템플릿 매칭의 효과를 입증하기 위해 FPR 수조에 흙을 채운 후 표1과 같은 시험대상들을 매설하여 다채널 GPR 시스템을 이용하여 3차원 GPR 데이터를 획득하여 이를 신호처리 검증용 SW에서 불러와 시험대상에 대한 템플릿 이미지를 추출하였다.

표 1. 시험대상 물체

Table 1. target object characteristics

구분	크기(mm)	재질
A	∅,h: 101 × 198	금속
B	∅,h: 336 × h 124	금속
C	w,l,h: 332 × 332 x 94	플라스틱
D	w,l,h: 90 x 200 x 70	나무

추출한 템플릿 이미지를 이용하여 그림 8과 같은 실시간 탐사 SW에서 실시간 2.5D 템플릿 매칭을 수행하여 일치율이 70%이상일 경우 일치율이 가장 높은 지점에서 이동방향의 전후방 40cm 영역에 대한 탐지결과 화면을 자동으로 전환되도록 구현하였으며 결과화면을 그림 9에 나타내었다. 2.5D 템플릿 매칭과 XY, YZ, XZ 3가지 단면에 대해 모두 NCC를 적용하여 평균값을 구한 3D 템플릿 매칭 결과를 실험을 통해 그 결과를 비교하였다.

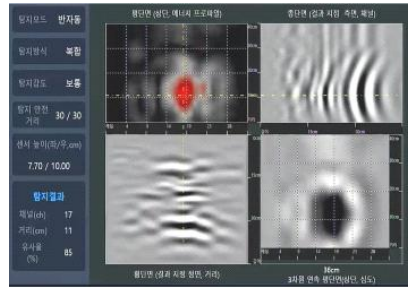


그림 8. 자동탐지 결과 화면

Fig 8. Detection result of automatic detection



그림 9. 실시간 탐지 SW의 탐사화면

Fig 9. Exploration screen of detection S/W

그림 10은 표1의 시험대상 D를 같은 위치에서 매설 깊이별로 실시간 탐사를 각각 5회 진행하여 얻은 일치율에 대한 평균값이다. 3D 템플릿 매칭이 2.5D 템플릿 매칭에 비해 일치율이 매우 낮았으며, 2.5D 템플릿 매칭은 전반적으로 일치율이 높게 나왔으나 지표면 부근인 5cm 지점에서는 다른 심도에 비해 상대적으로 낮은 결과를 보인다.

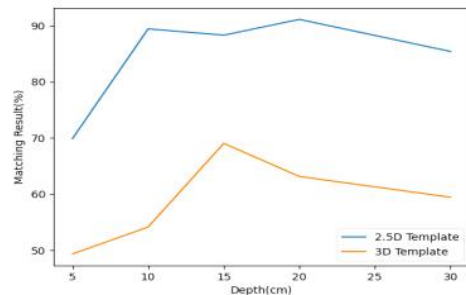


그림 10. 매설 깊이별 일치율 비교

Fig. 10. Comparison of matching results by depth

그림 11은 시험대상 A를 여러 위치에서 15cm 심도에 매설하여 앞서 진행할 실험과 동일하게 진행하였다. 그 결과 위와 동일하게 3D 템플릿 매칭보다 2.5D 템플릿 매칭이 더 높은 결과를 보였다.

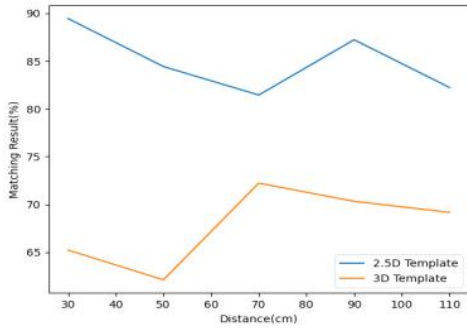


그림 11. 매설 거리별 일치율 비교
Fig. 11. Comparison of matching results by distance

5. 결론

본 논문에서는 다채널 GPR 시스템을 이용하여 실시간으로 탐지하고자 하는 대상을 2.5D 템플릿 매칭을 통해 자동으로 인식하여 그에 대한 GPR 신호 영상 및 일치율을 분석 결과화면에 나타내었으며, 그 결과를 실험을 통해 효과를 확인하였다. 실험 결과에 따르면 2.5D 템플릿 매칭이 3D 템플릿 매칭보다 높은 일치율을 보였으며 실시간 탐지가 가능함을 확인하였다. 실험 결과에서 지표면 부근에서 다른 심도에 비해서 매우 낮은 일치율을 보였다. 이는 지표면 반사파에 대한 신호처리 과정에서 탐지대상에 대한 신호 일부가 제거된 것으로 분석된다. 향후 연구에서 GPR 신호에 대한 신호처리 기법을 보완하여 낮은 심도에서도 탐지대상에 대한 일치율이 다른 심도에서의 일치율과 일관된 결과를 보일 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 금속, 플라스틱, 목재 등의 다양한 물질에 대

하여 실시간으로 자동탐지를 하고 탐지결과 화면을 통해 운용자가 최종 판단하여 반자동탐사가 가능한 장점을 활용하여 무인 지뢰탐지기에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음“
(IITP-2023-2018-0-01426)

참고 문헌

- [1] Saarenketo, Timo, and Tom Scullion. "Road evaluation with ground penetrating radar." *Journal of applied geophysics*, pp.119-138, June. 10, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
- [2] Adrian Neal, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Reviews*, pp261-330, Jan. 19, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- [3] D. Campo, "Multiple reflection signal polarity in GPR surveys," 2021 11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Valletta, Malta, 2021, pp. 1-5, DOI: 10.1109/IWAGPR50767.2021.9843141.
- [4] M. Solla, X. Núñez-Nieto, M. Varela-González, J. Martínez-Sánchez and P. Arias, "GPR for road inspection: Georeferencing and efficient approach to data processing and visualization," *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Brussels, Belgium, 2014, pp. 913-918, DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970559.
- [5] Ji-Hoon Kwon, No-Jun Kwak, Seung-Jae Ha, Seung-Hoon Han, Yeo-Sun Yoon, &

- DongWon Yang (2016). Ground Penetrating Radar System for Landmine Detection Using 48 Channel UWB Impulse Radar. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 53(12), 3-12.
- [6] W. Sun, Q. Xu, H. Zhang and Z. Yao, "Research on Detection and Visualization of Underground Pipelines," 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, Nanjing, China, 2012, pp. 1-4, DOI: 10.1109/RSETE.2012.6260692.
- [7] R. Roberts, R., D. Cist, D. and A. Kathage, "Full-resolution GPR imaging applied to utility surveying: Insights from multi-polarization data obtained over a test pit", *Proceedings of the IWAGPR 2009*, Granada, Spain, pp. 126 - 131, 2009
- [8] M. Grasmueck and A. Novo, "3D GPR imaging of shallow plastic pipes, tree roots, and small objects," 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, China, 2016, pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572671.
- [9] Seung-Yeup Hyun, & Se-Yun Kim (2012). Eigenimage-Based Signal Processing for Subsurface Inhomogeneous Clutter Reduction in Ground-Penetrating Radar Images. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 23(11), 1307-1314.
- [10] Zong, Z., Chen, C., Mi, X., Sun, W., Song, Y., Li, J., Dong, Z., Huang, R., & Yang, B. (2019). A DEEP LEARNING APPROACH FOR URBAN UNDERGROUND OBJECTS DETECTION FROM VEHICLE-BORNE GROUND PENETRATING RADAR DATA IN REAL-TIME. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W16, 293 - 299. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-293-2019>
- [11] Kim, N., Kim, S., An, Y.-K., & Lee, J.-J. (2019). Triplanar Imaging of 3-D GPR Data for Deep-Learning-Based Underground Object Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(11), 4446 - 4456. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2953505>
- [12] Liu, Z., Gu, X., Wu, W., Zou, X., Dong, Q., & Wang, L. (2022). GPR-based detection of internal cracks in asphalt pavement: A combination method of DeepAugment data and object detection. *Measurement*, 197, 111281. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.111281>
- [13] M. V. Thomas, C. Kanagasabapathi, S. S. Yellampalli, "VHDL implementation of pattern based template matching in satellite images", 2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon), IEEE, Bangalore, India, pp. 820-824, August 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358487>
- [14] Hisham, M. B., Yaakob, S. N., Raof, R. A. A., Nazren, A. A., & Wafi, N. M. (2015, December). Template matching using sum of squared difference and normalized cross correlation. In 2015 IEEE student conference on research and development (SCORED), pp. 100-104. December 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCORED.2015.7449303>
- [15] Sun, Meng, et al. "Advanced signal processing methods for ground-penetrating radar: Applications to civil engineering." *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.74-84. Jun. 26, 2019. DOI: 10.1109/MSP.2019.2900454
- [16] Bianchini Ciampoli, Luca, et al. "Signal processing of GPR data for road surveys." *Geosciences*, pp.96, Feb. 19, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9020096>
- [17] Olhoeft, G.R. Maximizing the information return from ground penetrating radar. *J. Appl. Geophys.*, pp.175-187, Feb. 28, 2000.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00057-9)

- [18] Yelf, Richard. "Where is true time zero?." Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar, pp.21-24, May, 2004. ISBN:90-9017959-3
- [19] Bano, M.; Pivot, F.; Methelot, J.M. Modelling and Filtering of Surface Scattering in Ground-penetrating Radar Waves. pp.215 - 222, Jun. 6, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2397.1999.00703.x>
- [20] Nuzzo, L. "Coherent noise attenuation in GPR data linear and parabolic radon transform techniques." Annals of Geophysics, pp.533 - 547, 2003. DOI: <http://hdl.handle.net/2122/967>
- [21] A. M. Zoubir, I. J. Chant, C. L. Brown, B. Barkat and C. Abeynayake, "Signal processing techniques for landmine detection using impulse ground penetrating radar," in IEEE Sensors Journal, vol. 2, no. 1, pp. 41-51, Feb. 2002, DOI: 10.1109/7361.987060.

저 자 소 개



이승환(Seung Hwan Lee)

2018.2 한국산업기술대학교 전자공학부 학사
2020.2 한국산업기술대학교 전자공학과 석사
2021.3-현재 : 이성주식회사 GPR사업부/
기술연구소 주임 연구원
<주관심분야> 지하탐사레이다, 레이더 신호처리



오재곤(Chae-Gon Oh)

1989.2 금오공과대학교 전자공학과 학사
1995.2 경희대학교 전자공학과 석사
1999.8 경희대학교 전자공학과 박사
1989.12-1997.9 삼성전자(주) 영상사업부
선임연구원
1997.10-현재 : 한국공학대학교 전자공학부
교수
<주관심분야> 지하탐사레이다, ASIC & SoC Design