

중견연구 최종보고서

① 부처사업명(대)	기초연구사업			보안등급(보안, 일반)		일반		
② 사 업 명(중)	중견연구			공개가능여부(공개, 비공개)		공개		
③ 세부사업명(소)	중견연구							
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초		④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)			비실용화		
⑤ 연구개발과제명	국 문	전파신호식별 및 초분광이미징에 특화된 지능형 신호 복원 및 분류 시스템 연구						
	영 문	Intelligent Signal Recovery and Classification Systems for Radiowave Fingerprinting and Hyper Spectral Imaging						
⑥ 주관연구개발기관	광주과학기술원							
⑦ 연구책임자	성 명	이흥노		직급(직위)	교수			
	소속부서	전기전자컴퓨터공학부		전 공	전자공학			
⑧ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y)								
연 도	정부지원 연구개발비 (A)	기업체부담금			정부외 출연금 (B)	상대국 부담금 (F)	합계 G=(A+B+E)	참여 연구원수
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)				
1년차	295,957			0			295,957	18
2년차	295,957			0			295,957	16
3년차	295,957			0			295,957	9
4년차				0			0	
5년차				0			0	
합계	887,871	0	0	0	0	0	887,871	43
⑨ 총연구개발기간	2021. 03. 01 ~ 2024. 02. 29 (36개월)							

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2024 년 03 월 29 일

연구책임자 : 이 흥 노

주관연구개발기관의 장 : 임 기 철

과학기술정보통신부장관 귀하

※ 전자접수이므로 연구책임자 및 주관연구개발기관의 장 서명(인, 직인)은 생략

〈 연구결과 요약문 〉

연구개요	<p>본 연구는 선행연구인 H/W 압축 및 S/W 복원이 결합된 프레임워크 (압축이미징) 성과를 미래 스마트 네트워크 환경에 적용하고, 개인 신원 인증 등 미래 기술 수요를 만족할 수 있도록 연구방향을 설정함. 비대면 디지털 경제 시대의 도래에 따른 전파신호식별기 및 초분광 압축이미징 시스템은 개인인증 과정에서의 필수적 요소임. 초소형/저가형 압축이미징장치를 개발 목표로 할 때 발생하는 문제(부족한 데이터로 학습, 다양하게 변화하는 환경에 적응)에 대한 극복하는 기술을 개발하는데 집중함. 문제 극복을 위한 기술요소는 Few-Shot Learning(FSL), Distributed Learning(DisL), Out of distribution Detection(OoD) 등이 있음. 새롭게 게재되고 있는 정보이론수학 기반의 신호검출 및 분류 이론들을 파악하고 활용하여 연구팀의 전파식별기, 초분광이미징 장치의 수월성(분류정확도)과 신뢰성(다양한환경에서 작동)을 제고하고자 함.</p>					
연구 목표대비 연구결과	<p>정성적 연구 내용</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 스마트 인증 네트워크 개발을 위한 분산형 전파 송출원 식별 모델 및 비정상 데이터 검출 알고리즘 개발. 분산 네트워크 환경에서의 동작을 위한 공개 키 기반 식별 프레임워크 개발 및 실증 완료. 2. 랜덤 초분광 이미징 장치 제작. 구현 장치 기반 초분광 이미지 복원 알고리즘 개발. 사용자 기반 시도 검출을 통한 랜덤 압축 초분광 이미징 장치 실증 완료. 3. 스마트 네트워크 환경에서의 시스템 적용을 위한 지능형 시스템 학습 방법론에 대해 연구; 1) 개별 학습기 모델링을 위한 TL 및 FSL 연구, 2) 비 정상 데이터 추출을 위한 OoD 및 IL연구, 3) 신호 복원 및 시스템 신뢰성 향상을 위한 FL 및 DistL 연구. <p>정량적 연구 목표/결과</p> <ul style="list-style-type: none"> • SCI 논문게재 11건 목표, 34건 달성 • 특허출원/등록 각 3건 목표, 기술이전실시계약 1건 달성 <p>(24.03 기준) SCI 논문 관련하여 309% 초과 달성하였음. 또한 성과를 Scientific Report 등 우수 SCI에 게재함으로써 질적 우수성 역시 검증받음. 특허 목표에서 미흡한 내용이 있으나, 과제 목표 중 하나인 ‘지능형 압축 초분광 이미징 장치’ 사업화를 위한 기반 기술이전 1건을 달성함. 이는 연구 결과물 사업화를 위한 핵심적인 노력이며, 향후 지속적 후속 연구를 통한 결과물 추가 특허화를 예정 중임.</p>					
연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과 (연구개발결과의 중요성)	<p>본 연구는 분산형 전파 송출원 식별 및 지능형 랜덤 압축 초분광 이미징 장치 개발을 통해 시스템의 수월성과 신뢰성을 향상시켰음. 데이터 부족, 활용 효율성 개선, 비정상 데이터 처리 문제 등을 해결하며 스마트 인증 네트워크와 이미징 시스템의 신뢰성을 높이는데 기여함.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 분산형 전파 송출원 식별 시스템 - 스마트 인증 네트워크 <ul style="list-style-type: none"> • 고도로 보안된 FH 신호에 대해 97% 이상의 높은 식별 정확도 및 AUROC 0.99를 달성함. • 상용 RF 신호에 대해 분산 시스템 보정을 위한 공개키 기반 전파 식별 시스템을 개발함. • 스마트 네트워크 환경에서의 인증 시스템 기술에서의 수월성 강화. 2. 지능형 랜덤 압축 초분광 이미징 장치 <ul style="list-style-type: none"> • 랜덤 필터 및 렌즈 제작, CMOS 센서와의 패키징을 통한 초소형 초분광 이미징 장치 개발. • 학습 기반 신호 복원 알고리즘 개발 및 사용자 기반에의 적용을 통한 기술 실증 완료. • 소형 분광기 수요에 따른 성분 분석, 피부 진단 등 신산업 창출 기대 3. 지능형 시스템 수월성/신뢰성 제고 연구 <ul style="list-style-type: none"> • TL, OoD, FSL 등 학습 방법론에의 원천기술 확보를 통해 지능형 신호 복원 시스템의 수월성과 신뢰성 향상. <p>본 연구는 데이터 부족 및 분산 네트워크 환경을 극복하기 위한 지능형 솔루션임. 보안 시스템 고도화, 물질 분석 등 다양한 분야에의 확장 연구를 계획하고, 나아가 생성형 AI 모델과 연계를 통한 지속적인 개선을 목표하는, 시스템 개선 연구도 추진할 예정임.</p>					
중심어	국문	신호 복원	기계 학습	모델 일반화	분산 인공지능	편향된 데이터세트
	영문	Signal Reconstruction	Machine Learning	Model Generalization	Distributed AI	Biased Database

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	05
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	12
4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도	13
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	14
6. 자체점검표	15
7. 참고문헌	16
<붙임1 세부 정량적 연구개발성과>	20
<붙임2 연구책임자 대표적 연구실적 및 증빙(요약문 및 사본)>	35

1. 연구개발과제의 개요

연구 제목 - 전파식별 및 압축이미징 시스템 수월성 및 신뢰성 제고 연구 수행

(선행연구 성과요약) 본 연구팀은 다년간의 압축센싱 연구를 통해, 전파 및 분광 신호에 대한 압축 수신기기를 포함한 여러 장비를 자체 개발했다. 본 연구는 Science를 비롯한 저명한 학술지에 지속적으로 인용되고 있으며, 자체 제작한 압축센싱 수신기 H/W를 기반으로 Sparse Recovery 및 Deep Neural Network (DNN) 신호 복원 알고리즘을 이용해 Diffraction Limit을 뛰어넘는 고해상도 복원이 가능함을 보였다. 이러한 HW 압축 및 SW복원이 결합된 프레임워크(이후 **압축이미징** 이라고 명함)은 연구팀이 개척해가는 매우 독특한 연구방식 중 하나이며, Deep Learning(DL), Sparse Representation Learning(SRL), Dictionary Learning 등 새롭게 개발되고 있는 학습 기반 신호 복원 기법들을 토대로 다양한 연구성과를 발표하였다.

(연구 목표) 본 연구는 상기 압축이미징 연구성과를 미래 스마트 네트워크 환경에 적용하고, 개인 신원 인증 등 미래 기술 수요를 만족할 수 있도록 연구방향을 설정한다. 코로나19로 인한 비대면 디지털 경제 시대의 도래와 함께, 전파 신호 식별과 초분광 압축이미징 시스템은 개인인증 및 비대면 금융거래의 필수 요소가 되었다. 이에 본 연구팀은 스마트폰 폼팩터 안에 안착 가능한 초소형 및 저가형 압축이미징 장치 개발에 주력하며, 부족한 데이터로의 학습과 다양한 환경 적응 문제를 Few-Shot Learning (FSL), Distributed Learning (DistL), Out of Distribution Detection (OoD) 기술을 사용하여 극복하는 데 집중한다. 또한, 정보이론에 기반한 신호처리 이론을 활용해 전파식별기와 초분광이미징 장치의 수월성(분류정확도)과 신뢰성(다양한환경에서 작동)을 향상시키는 것을 목표로한다. 본 연구팀은 전파 신호와 초분광 신호를 개별 센서를 통해 수집하는 데 있어 어려움을 인지하고 있다. 데이터 대량 확보의 어려움과 수집 환경에 따른 신호 특성 변화로 인해 압축이미징 장치의 학습과 분류, 복원 성능이 낮아질 수 있다. 제안하는 연구는 이러한 불안정성을 극복하고, 압축이미징 기술의 신뢰성을 제고하고자 한다. 이를 위해 적은 수의 데이터에서도 모델을 일반화할 수 있는 Transfer Learning(TL)과 FSL, 비정상 데이터를 검출하는 OoD와 Incremental Learning(IL), 그리고 분산 네트워크에서의 데이터 활용 방법인 Federated Learning(FL)과 DistL과 같은 핵심 기술에 대해 연구한다.

지능형 신호 복원 분류 시스템 신뢰성 향상 연구의 주요 목표는 다음과 같다.

(개별 학습기 모델링 연구) 데이터 세트의 크기 및 클래스의 개수 등 학습 파라미터에 따른 학습기 모델링 기법 연구, 모델링 된 학습기의 분류 및 복원 수월성 연구

(비정상 데이터 추출 연구) 테스트 데이터에서 비정상 데이터의 출현을 인지하고 추출하는 방법, 추출된 데이터에 클래스 라벨을 붙이는 재학습 및 훈련 방법 연구

(신호 복원 분류 시스템 신뢰성 향상 연구) 스마트 네트워크 환경에서 Data Shuffling과 Index Coding 등 신기술 적용하여 분산된 데이터를 신속하게 공유 학습하여 복원 및 분류 신뢰성을 제고하는 연구

연구목표 도출 근거

(개별 학습기 모델링 연구) 학습기 데이터의 크기, 층의 개수, 클래스의 개수 등 파라미터에 따른 학습기의 분류 정확도 및 복원 성능에 관한 이론적 연구가 수행되었다. 학습기가 나타낼 수 있는 선형 영역의 숫자가 작으면 특정 신호의 분류/복원을 정확히 할 수 없는 이론적 근거가 제시되었다[Hinz19]. 학습기의 각 층이 내포할 수 있는 에너지의 양은 각 층을 지날 때마다 지수적으로 감소한다. [Wiat18]에서는 이러한 감소량에 따라 입력 신호의 에너지의 총량을 유지하는 이론적 층의 개수를 연구하였다. 신호 분류 및 복원 학습기를 디자인할 때, 위와 같은 새로운 수학적 이론을 활용하여 효율적인 학습기 개발이 가능하다.

(비정상 데이터 추출 연구) OoD는 In-distribution 데이터 세트를 활용하여 분류기를 학습시킨 뒤, 학습기를 활용하여 Out-distribution을 찾아내는 기법이다[Hend16]. IL은 새로 추가된 데이터로부터 새로운 정보를 학습하여 이미 습득된 기존의 지식을 갱신하는 학습법이다[Kemk17]. 위 기법들을 통해, 연구실에서 자체 제작한 전파식별기와 초분광기를 통해 비정상 데이터를 추출하고, 훈련학습모델을 보강하여 갱신할 수 있다.

(신호 복원 분류 신뢰성 향상 연구) 기존의 머신러닝방법은 데이터를 한곳에 모아 학습기가 모든 데이터를 학습하게 했다. 그러나, FL과 DistL 등은 기존의 마스터 학습모델을 각 센서 데이터가 있는 곳으로 보내, 그곳의 개별 데이터를 학습하는 개별학습 모델들을 만들고 학습된 개별 모델들을 기반으로 새로운 마스터 학습모델을 업데이트하는 새로운 분산형 훈련학습방법이다[Yang19-1], [Gupta18]. 위 방법을 통해, 전파식별기와 초분광이미징 장치 학습모델의 편향성을 줄여 줄 수 있고, 학습모델의 신뢰성을 향상할 수 있다.

기존성과 활용 전략

(성과 요약) 본 연구팀은 지난 3년간의 연구성과로 전파식별기와 랜덤압축분광기를 수학적으로 모델링 하였다. 특히 랜덤압축분광기의 경우, 실리콘웨이퍼 증착 공정을 개발(국제특허 확보)하고, 개발한 공정을 적용하여 랜덤압축분광필터를 제작(개요도참조)하였다. 랜덤압축분광필터를 CMOS 이미지센서와 결합하여 랜덤압축분광기를 개발하였다. 또한, 각 신호에 특화된 Convolutional neural network 기반 지능형 분류 및 복원 학습기를 개발하였다.

(활용 전략) 본 연구에서는 먼저, 학습기 모델링에 관한 이론적 배경을 확립할 예정이다. 구체적으로 TL, FSL 등 데이터가 적은 상황의 학습모델 일반화 방법, OoD, IL 등 비정상 데이터 인지/추출/분류에 관련한 연구, FL, DistL 등 네트워크상에서 학습모델 일반화 방법에 관해 연구를 수행할 예정이다. 이를 통해, 전파식별기와 압축이미징 장치에서 데이터가 부족할 때 발생하는 학습기 일반화 문제, 비정상 데이터 인지/추출/분류 문제, FL/DistL 등 요소기술을 활용하여 신호 복원 분류 신뢰성 향상 문제 등을 해결하고자 한다. 기 확보 완료된 전파식별기, 초분광필터 등을 통해 학습에 필요한 실측데이터를 수집할 수 있다. 수집된 데이터로 전파식별기와 초분광이미징 장치의 성능을 실시간 테스트할 수 있다.

연구의 필요성

(지능형 시스템 수월성/신뢰성 제고 연구) 스마트 네트워크에 알맞은 지능형 신호 복원 및 분류 시스템 연구가 필요하다. 이를 위해서는 기존 시스템과 달리 다음과 같은 문제의 연구가 필요하다.

- 첫째, 데이터 부족 문제에 대한 해결법 필요
- 둘째, 네트워크 환경에서의 데이터 활용 효율성 제고 필요
- 셋째, 비정상 데이터 인지/추출/분류 기법 개발 필요

(데이터 부족 문제) 스마트 디바이스에는 다양한 센서가 탑재되어 있어 여러 종류의 센서 데이터를 수집할 수 있다. 기존 신호 학습 시스템들은 주로 카메라 이미지 데이터를 이용하여 연구되어 왔다. 하지만, 최근에는 다양한 센서 데이터를 사용한 새로운 학습 시스템들이 개발되고 있다. 대표적인 예시로는 전파 신호[Merch18], 초분광신호[Geda19], 자이로 센서 신호[Angr20]에 대한 학습 시스템이 있다. 하지만 이러한 시스템들은 이미지 데이터에 비해 축적된 데이터 세트의 양과 질이 부족한 문제가 있다. 데이터 세트가 부족하면 학습을 기반으로 하는 지능형 신호 복원 및 분류 시스템의 신뢰성을 담보하기 어렵다. 따라서 TL, FSL 등의 적은 수의 데이터로 학습 신뢰성을 담보할 수 있는 연구가 필요하다.

(네트워크 환경에서의 데이터 활용 효율성 제고) 개별 디바이스의 로컬 데이터는 편중 혹은 편향되어 있을 가능성이 높다. 한정된 데이터로 모델을 반복하여 학습시킬 때 Overfitting의 문제가 쉽게

발생한다. 스마트 네트워크의 특성을 이용한 Data Shuffling 기법을 사용하여 디바이스 간 로컬 데이터를 교환함으로써 Overfitting 문제를 방지하는 것이 가능하다. 하지만 Data Shuffling을 활용하려면 통신 및 스토리지 비용이 발생한다[Lee18]. 따라서 스마트 네트워크에서 데이터 활용성을 제고하려면 효율적 Data Shuffling 방법 연구가 필요하다.

(비정상 데이터 인지/추출/분류 연구) 스마트 네트워크에서는 다른 디바이스로부터 생성된 데이터를 네트워크를 통해 전달받아 처리할 수 있는 장점이 있다. 하지만 네트워크 상의 다른 디바이스로부터 받은 데이터를 신뢰할 수 없는 문제가 발생한다. 이러한 경우에, 데이터의 비정상 여부를 인지할 수 있는 OoD 기술, 행렬 완성 기술[Chat20][Ding20]을 적용하여 유실된 데이터를 복원하는 기술, 비정상 데이터를 제외한 새로운 데이터로 학습모델을 재학습 시키는 방법에 관한 연구가 필요하다.

(연구내용 및 범위) 본 연구에서는 위와 같은 세 문제점을 해결하기 위한 요소 기술들에 대해 연구함으로써 지능형 시스템 학습 방법론에 대해 연구한다. 이를 바탕으로 전파 식별 및 초분광 이미징 시스템에서의 신호 복원/분류 수월성 및 신뢰성을 제고한다.

(분산형 전파 송출원 식별 시스템 - 스마트 인증 네트워크) 분산형 학습기반 전파 송출원 식별을 위한 디바이스 인증 기술 개발이 필요하다.

(스마트 네트워크에서의 인증 시스템이란?) 다수의 개별 디바이스들이 서로 간에 연결되어 데이터를 주고받는 스마트 네트워크에서는, 개별 노드로부터 전송되는 데이터가 인증된 디바이스로부터 송신되는지 확인하는 작업이 반드시 필요하다. 최근, 임의의 해킹 방법이 존재할 수 있는 디지털 암호 키 방식에서 나아가, 복제가 불가능한 아날로그 암호 키를 이용한 전파 송출원 식별 기술(Radio Frequency Fingerprinting, RFF)이 제안된 바 있음. 해당 기술은 Line of Sight(LoS) 환경에서 충분한 수의 데이터가 확보되었을 때 신뢰할만한 전파 송출원 식별 정확도를 보여주었다[Merch18].

(보유 연구성과) 전파 송출원 식별 기술에는 신호 식별을 위한 강건한(Robust) 특성인자를 추출하는 것이 중요하다. 본 연구팀은 선행 연구를 통해, 기존에 잘 알려진 Rising Transient(RT) 및 Steady State(SS) Signal뿐만 아닌 Falling Transient(FT) Signal 역시 충분히 강건한 특성인자로 사용될 수 있음을 세계 최초로 보여준 바 있다. 또한, 다수의 특성인자를 이용한 Multi-Modal Sparse Representation Classifier를 통해, 99% 이상의 분류 정확도를 보여준 바 있다[Yang19-2].

(문제 제기) 전파 송출원 식별 기술 관련 선행 연구[Patel15], [Ali19], [You18]에서는 집중형 전파 송출원 식별 환경, 즉 다수의 전파 송출원(Multi-Transmitters)에 대한 하나의 전파 수신기(Single-Receiver) 환경만을 다루고 있다. 이는 이상적인 환경에서의 성능 평가라 할 수 있다. 이러한 방식은 다수의 전파 송출원(Multi-Transmitters) 및 다수의 전파 수신기(Multi-Receivers)가 존재하는 스마트 네트워크 환경 아래에서는 적용이 어렵다. 이는 개별 노드에서의 전파 수신기에 해당하는 디바이스의 전파 수신 특성이 달라지기 때문이다. 이러한 수신 데이터 변화로 인해 식별기의 학습 성능을 보장할 수 없는 문제가 있다[Merch19].

(해결방안) 스마트 네트워크 모델 하에서 동작 가능한 새로운 분산형 전파 송출원 식별 기술에 관해 연구하고자 한다. 먼저 로컬 모델 및 글로벌 모델을 이용한 스마트 인증 네트워크를 설계한다. FSL 및 TL을 통해 적은 수의 전파 데이터만으로도 학습 가능한 식별기 기본 성능 향상 기법을 개발한다. 다음으로 스마트 네트워크 내 수신 데이터 내의 변화를 추적하기 위해, DistL 기반 분산형 전파 송출원 학습 기술에 관해 연구한다. 나아가 네트워크 관점에서의 OoD 및 IL 기반 비정상 데이터 모니터링 기법에 관해 연구한다. 개별 연구결과를 종합하여, 스마트 네트워크 환경 아래서도 신뢰성 있게 잘 동작하는 스마트 인증 시스템 개발을 완료한다.

(도출근거)

- 외부 LoS 환경 아래서 전파 송출원 식별 기술 92.3% 달성함[Merch18].
- 전파 수신기 특성이 변함에 따라, 식별 성능 열화가 보고됨[Merch19].
- 수신기 특성에 따른 성능 열화를, 학습 과정에서의 TL을 통해 개선할 수 있음이 보고됨[Merch19].

- TL 및 FSL을 통해, 적은 수의 데이터 세트만으로도, 신뢰할만한 성능을 확보할 수 있음[Chen19].
- DistL을 통해 개별 노드의 Bias를 제거하고 훈련 성능을 개선할 수 있음을 보임[Lee18].
- 데이터 Distribution Likelihood Estimation을 통해 OoD 성능이 제고됨이 보고된 바 있음[Serr20].

(연구내용 및 범위) 스마트 네트워크 환경 하에서 동작 가능한 인증 시스템 개발을 위해, 분산형 전파 송출원 식별 모델을 개발한다. 나아가 비정상 데이터 검출 및 후처리를 통한 모니터링 방법에 대해 연구하고, 인증 프레임워크 개발을 통한 실제 분산 네트워크 환경에서의 동작을 실증한다.

(지능형 랜덤압축 초분광이미징 장치) 학습 데이터 편중 문제를 해결할 수 있는 초분광이미징 복원 및 분류 시스템 개발이 필요하다.

(초분광 이미징 시스템 이란?) 초분광이미징 장치는 2차원의 공간 정보와 1차원의 분광 정보를 3차원으로 제공해주는 기구로 Remote Sensing, Medical Imaging, Fault Detection 등 산업 및 연구 전반에 걸쳐 다양하게 사용된다. 하지만 크기, 무게, 가격 등의 문제로 특정 전문가 집단만이 활용하고 있다. 또한, 주로 Scanning 방식이 신호 획득에 사용되어 작동 시간이 긴 단점이 있다. 최근, 분광이미징 장치의 소형화와 작동 시간을 줄이는 방법에 관한 연구와 개발이 진행되어 왔다. 하지만 소형화와 작동 시간 최소화에 따른 크기 및 무게 등 물리적 제약이 있어 높은 해상도를 제공하지 못하는 문제가 있다. 또한, 의료분야, 지질측정 등 특정 전문가 집단만의 사용으로 공개된 데이터가 적으며 데이터 종류가 특정 분야에 편중되어 있다.

(보유 연구 성과) 본 연구팀은 해상도와 크기 문제를 해결하기 위해 압축센싱 이론을 분광기에 적용하여 작고 해상도가 높은 랜덤압축 분광기를 제안하였다[Lee13]. 분광 정보를 랜덤압축을 통해 정보 손실 없이 적은 수의 광학 필터로 압축하고, 이를 신호처리 기술을 사용하여 복원하는 분광기이다. [Lee19]에서는 이차원 필터 배열을 실리콘웨이퍼 증착 방법을 이용하여 제작하고 CMOS 이미지센서와 결합하여 분광장치를 만들고 분광기의 성능과 기존의 분광기의 성능을 비교하는 실험을 수행하였다. 또한, DL 기반 알고리즘을 개발하여 분광 신호에 대한 사전정보 없이 신호를 복원할 수 있는 지능형 랜덤압축 분광 시스템을 개발하였다[Lee20]. 본 연구에서는 기수행한 연구를 바탕으로 분광정보 뿐만 아니라 공간 정보도 제공할 수 있는 초분광이미징 장치를 개발하고자 한다. 초분광이미징 장치를 통해 획득한 데이터를 활용하여, 초분광이미지 복원/분류 학습기를 개발하려 한다.

(문제제기) 기존의 지능형 랜덤압축 복구 알고리즘의 신뢰성을 확보하기 위해서는 많은 수의 학습 데이터가 필요하다. 또한, 학습기반 분광 신호 복원 문제를 푸는 연구에서는 입력 분광 신호와 랜덤압축 측정 신호가 쌍으로 존재해야 한다. 그러나 초분광이미징 데이터 세트 확보에는 많은 시간과 비용이 드는 어려움이 있다. 또한, 제한된 환경에서 비슷한 데이터 세트만 획득할 수 있으므로 특정 환경에 편중된 데이터가 생길 수 있다. 데이터 부족과 편중된 데이터 활용은 학습기반 복원 알고리즘의 성능을 떨어트리는 주요인이 된다. 따라서 정상 데이터를 구별해주며 적은 수의 데이터 세트와 편중된 데이터 세트가 주어진 상황에서도 안정적으로 동작하는 알고리즘 연구가 필요하다.

(해결방안) 실제 시스템 운용 네트워크 환경에서 데이터 부족 및 데이터 편중에 따른 분광 이미지 정확히 복원 수 없는 문제를 TL, FSL 등 데이터 전이 학습 기술을 통해 해결하고자 한다. 가령, OoD 등을 활용하여 비정상 데이터를 색출하고 제거하고자 한다. FL 등 분산 학습 방법을 개발하고 압축이미징장치의 신호 복원 및 분류 성능의 수월성 및 신뢰성을 제고하고자 한다.

(도출근거)

- 초분광 이미지 데이터에서 TL을 활용하여 효과적으로 분광 신호를 분류하는 것을 보임[Lin18].
- DL기반 분광 신호 복원 학습기를 제안하고, 그 복원 성능이 희소화 신호 기반 복원 등 기존 복원기 성능과 비교 할 때 우수함을 보고함[Geda19].

(연구내용 및 범위) 실제 랜덤 초분광 이미징 장치를 제작한다. 구현된 장치를 기반으로 데이터 부족 및 편중 현상을 극복할 수 있는 이미지 복원 알고리즘에 대해 연구한다. 나아가 실제 장치를 활용한 사용자 식별 등을 통해 실증을 완료함으로써, 개발된 장치의 수월성 및 신뢰성을 제고한다.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

지난 3년간의 연구기간 동안 분산형 전파 송출원 식별 시스템, 지능형 랜덤 압축 초분광 이미징 장치에 대한 응용 연구를 수행하고, 이를 기반으로 지능형 시스템의 수월성 및 신뢰성 개선을 위한 이론 연구를 수행하였다. 지능형 신호 복원 및 분류 시스템의 신뢰성을 제고하기 위해, 다음과 같은 문제점에 대한 답을 찾고자 하였다.

- 첫째, 데이터 부족 문제에 대한 해결법 필요
- 둘째, 네트워크 환경에서의 데이터 활용 효율성 제고 필요
- 셋째, 비정상 데이터 인지/추출/분류 기법 개발 필요

3년간의 연구를 통해 위와 같은 문제점에 대한 답을 찾으면서, 본 연구의 두가지 응용 분야에서의 복원 및 분류 성능을 개선하였다.

2.1. 분산형 전파 송출원 식별 시스템 - 스마트 인증 네트워크

1) 3개년 연구 내용 요약

스마트 인증 네트워크를 위한 분산형 전파 송출원 식별 모델을 개발하였다. 개발된 모델에 기반하여 비정상 데이터 검출 알고리즘에 대해 연구하였다. 나아가 스마트 인증 프레임워크 연구를 통해 제안하는 시스템이 분산 네트워크 환경에서 동작 가능함을 실증하였다.

2) 1차 년도 연구 수행 내용

현존하는 가장 고도화된 물리 계층 보안 시스템인 Frequency Hopping (FH) 프로토콜에 대해 신호 송출원 식별 시스템 (Emitter Identification, EI)을 제안하였다. 나아가 해당 시스템을 기반으로 하는 비정상 데이터 검출(Outlier Detection OD)을 수행하는 전파 송출원 식별 시스템 연구를 수행하였다. 나아가 비 학습 데이터 검출을 위한 OoD 기초 이론 및 스마트 인증 시스템 구조를 설계하였다.

구체적인 FH 신호 송출원 식별을 위한 로컬 스마트 인증 모델 구조를 그림 1을 통해 나타내었다. FH 신호 특징 분석을 위해 자체 설계된 Deep Inception Network (DIN) 기반 Ensemble 기법을 사용하였다. 추가로 비정상 데이터가 입력됐을 때, 모델 output vector의 likelihood 가 높지 않다는 Neural network Theory에 기반하여 비 학습 데이터 검출 구조를 설계하였다.

모든 FH 신호 송출원에 대해 1초, 10회 미만의 FSL 습득 환경을 가정하였다. 총 7대의 FH 신호 송출원을 준비하여 실험하였으며, 그 결과 97.0(± 0.6)%의 식별 정확도를 확인하였다. 제안하는 방법은 비교군 기술 대비 3% 이상의 성능 향상을 보여주었으며, AUROC 결과 0.99로 우수한 분류 결과를 확인할 수 있었다 (그림2 참조). 마지막으로, Imagenet 기반 TL을 고려하였으나, FH 신호의 미세 특징 차이로 인해 Scratch Learning(SL)이 더 나은 성능을 보여주는 것을 확인하였다. 이러한 모델 설계 및 성능 평가를 통해, 제안하는 방법이 전파 식별기 시스템의 수월성을 제고하였음을 확인할 수 있었다.

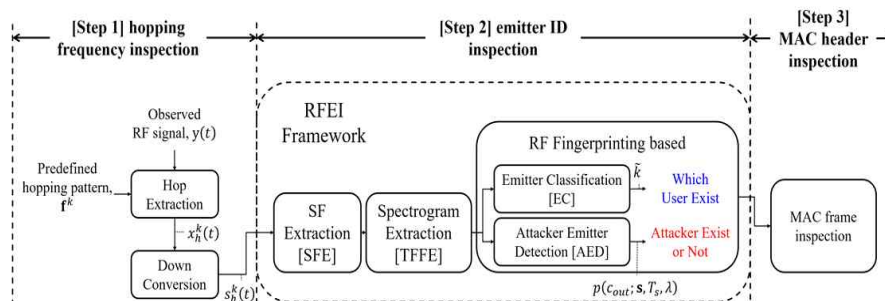


그림 1 RFEI 기반 전파 송출원 식별 시스템

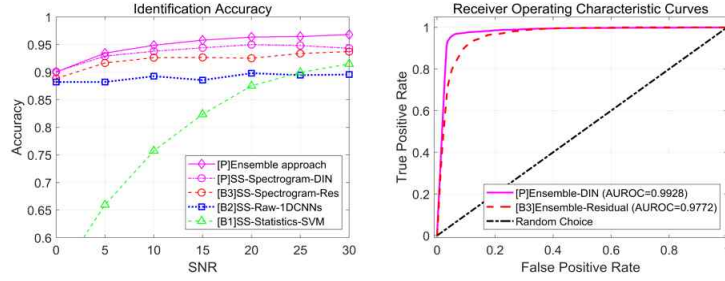


그림 2 전파 송출원 식별 시스템 학습 결과 [Lee21-4];
a) 신호 송출원 식별 성능, b) 비 학습 데이터 검출 성능.

3) 2차 년도 연구 수행 내용

1차년도 연구를 통해 제안된 로컬 스마트 인증 모델의 신뢰성을 제고하기 위해, 기 제안된 OoD 기초 이론의 고도화를 수행하였다. 나아가 비 정상 데이터의 IL 처리를 위한, FH 학습 데이터의 Outlier 분포도에 대한 모니터링 과정을 수행하였다.

그림 3을 통해 OoD 기초 이론 고도화를 위한 Distance Score 재 정립 및 IL 후처리를 위한 Class labelling 방법에 대해 나타내었다. 이는 더 높은 차원의 자유도에서 특징 표현 능력이 더 좋다는 Degree of Freedom 이론에 기반한 방법이다. 이를 적용하여 Average Pooling Layer vector를 활용해 새로운 Outlier Vector를 정의하였다. 이에 이어서 Detection rule 고도화를 위해 샘플의 통계적 분포도를 판단하는 Mahalanobis Distance (MD) 기반 분석을 수행하였다. 이를 통해 새로운 Outlier Score 계산 방법을 제안할 수 있었다.

$$\begin{aligned}
 \text{MD Cal.} \quad & MD_{i \in C_N} = \sqrt{(\bar{x} - \bar{\mu}_{MD_{C_N}})^T S_{C_N}^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu}_{MD_{C_N}})} \\
 \text{Det. Rule (ClassN)} \quad & MD_{i \in C_N} \leq Thr_{MD_{C_N}} \\
 \text{where} \quad & Thr_{MD_{C_N}} = 10 * \mu_{MD_{C_N}}
 \end{aligned}$$

그림 3. MD 계산법 및 새로운 Detection Rule 정의

새롭게 제안된 OoD 이론에 따라, 비정상 데이터 검출 및 IL 처리를 위한 Outlier 분포도에 대해 모니터링을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4를 통해 나타내었다. 1차년도 연구에서 사용되던 총 7대의 FH 신호 송출원 데이터세트에 이어, 추가로 2개의 FH 신호 송출원에 대한 비 학습 데이터세트를 준비하였다. 그 결과, 비 학습 데이터 2개에 대한 Class 검출 정확도, 즉 Outlier Detection probability 97.4%를 확인할 수 있었다. 나아가 잘못 검출된 비율, 즉 False Negative Ratio 3.4%의 결과를 확인할 수 있었다.

추가로 MD score에 대한 Clustering 결과를 나타내었다. 모니터링 결과, 비 학습 데이터세트 내 Class 8 및 9간의 차이에 의한 학습되지 않은 분포도 간의 이격을 확인할 수 있었다. 이에 근거하여, 제안하는 방법이 IL 처리를 위한 Class labelling 근거로 사용될 수 있음을 확인하였다.

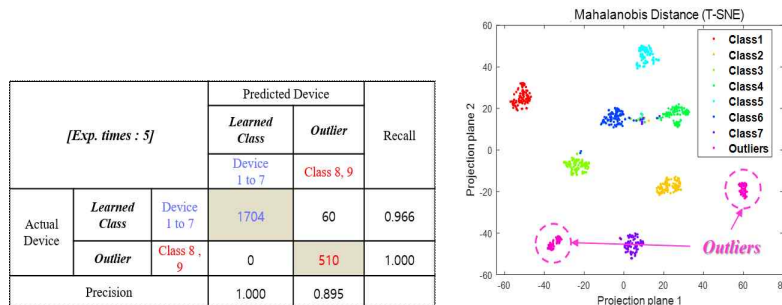


그림 4. Outlier Detection probability 실험 결과 (w. No SNR)

4) 3차 년도 연구 수행 내용

3차년도에는 기 제안된 로컬 스마트 인증 네트워크에서 나아가, 서로 다른 분산 컴퓨팅 네트워크 자원 하에서의 동작이 가능한 분산 스마트 인증 시스템에 대해 연구하였다. 기존 전파신호 식별 시스템은 아날로그 RF 신호에 대한 물리계층에서의 센싱 결과를 그대로 인공지능 모델을 통해 처리한다. 이는 동일 RF 신호라도 다른 컴퓨팅 자원으로 인해 센싱 스펙이(e.g. N sps) 달라질 경우, 학습 모델이 신호를 Outlier로 잘못 판별할 수 있다는 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해, 서로 다른 분산 컴퓨팅 자원을 보정하기 위한 암호화 기반의 시스템 동작에 대해 연구하였으며, 물리계층이 아닌 MAC계층 및 IP계층에서 공개키 기반으로 작동하는 전파 신호 식별 시스템을 개발하였다 (그림 5 참조).

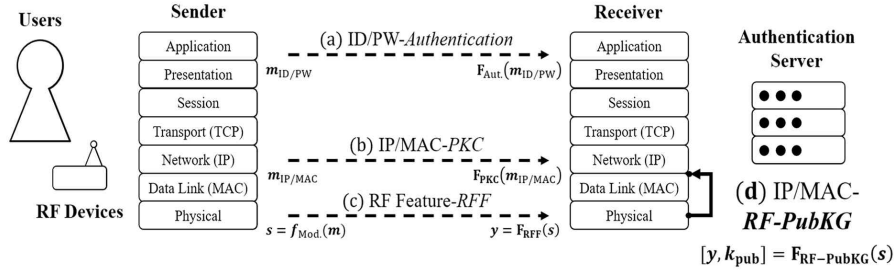


그림 5 공개 키 기반 스마트 인증 네트워크 개요도

제안하는 방법의 핵심 이론을 그림 6 및 그림 7을 통해 나타내었다. 먼저 최종단으로 수렴하는 계층에는 송출원을 나타내는 핵심 특징만 존재한다는 Neural Net Design theory에 기반하여 공개 키 활용 방안을 제안하였다. 구체적으로 식별 정보를 간직하고 있는 Feature map에 기반한 Key Generation Layer를 정의하였으며[수식(1)], 정의된 Raw vector에 대해, round 함수를 이용해 암호 Sequence로 변환하였다[수식 (2)]. 학습 데이터 셋에 대한 sample mean을 통해 송출기별 공개키를 정의할 수 있었으며[수식 (3)], 마지막으로, 공개 키 및 유추된 estimation key 간의 distance를 비교함으로써, 최종 송출원을 식별하는 시스템을 제안하였다[수식 (4)](그림 6, 그림 7). 이 때 제안하는 방법의 핵심은 서로 다른 센싱 스펙을 갖는 로컬 네트워크라도, 동일 키 사이즈를 갖는 시스템을 구성함으로써 이를 보정할 수 있다는 점이다.

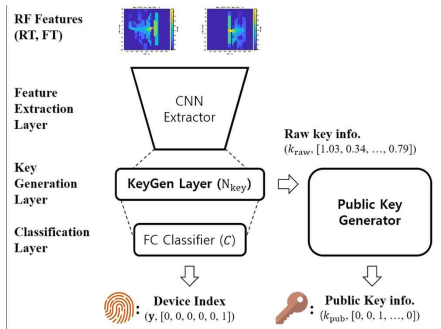


그림 6 Public Key Generator 구조

$$\begin{aligned}
 [y, k_{\text{raw}}] &= f_{\text{Classify, KeyGen}}(s_{\text{Trans}}) & (1) \\
 k_{\text{estimate}} &= \text{round} \left((q-1) \times \frac{k_{\text{raw}} - \min(k_{\text{raw}})}{\max(k_{\text{raw}} - \min(k_{\text{raw}}))} \right) & (2) \\
 k_{\text{pub}, c_i} &= \text{round} \left(\frac{\sum k_{\text{estimate}, \text{Train}, c_i}}{n_{\text{Train}, c_i}} \right) & (3) \\
 \hat{k}_{\text{pub}} &= \underset{k_{\text{pub}, c_i}}{\text{Argmin}} H(k_{\text{pub}, c_i}, k_{\text{estimate}, \text{Test}}) & (4)
 \end{aligned}$$

그림 7 Public Key Generation algorithm

본 연구팀은 상용 Walkie-Talkie 기반 RF 신호에 대해 제안하는 분산 스마트 인증 프레임워크의 평가 및 현용 RSA 암호화 기반 디지털 서명 체계와의 비교를 통한 기술 실증을 진행하였다. 총 2종류의 모델에 대한 개별 통신기 6대를 확보하여 실증용 상용 DB를 다시 구축하였으며, 제안 시스템에 대한 공개 키 식별 성능 및 송출원 간 공개키 상관도 결과를 확인하였다 (그림8, 그림 9). 그 결과 키 크기 8192에 대한 99.4%의 식별 정확도를 확인하였으며, 송출원 별 공개 키 사이의 상관도가 최대 0.24 미만의 낮은 값을 보이는 것을 확인하였다. 나아가 제안하는 시스템이 현용 RSA 기반 디지털 서명 인증 시스템 대비 Certificate 별도 관리 없이 직접 활요이 가능함을 검증하였다 (그림10). 이를 통해 분산 스마트 인증 시스템의 실제 활용에 대한 기술 실증을 완료할 수 있었다.

RF-PubKG models		Key Size			
		1024	2048	4096	8192
[P] Incep.	RT	98.3±0.2	98.2±0.4	98.2±0.4	97.9±0.8
	FT	96.0±0.7	95.1±1.0	94.9±0.8	93.7±1.7
	Ensem.	99.7±1.0	99.5±0.2	99.6±0.3	99.4±0.4
[B1] VGG	RT	92.0±4.1	95.7±1.1	96.7±1.2	97.0±0.5
	FT	84.5±1.8	84.4±1.8	85.8±1.3	85.8±1.0
	Ensem.	97.2±0.7	97.6±1.1	97.6±1.0	97.9±0.8
[B2] Res.	RT	97.1±0.9	97.2±0.3	96.5±0.8	96.0±0.6
	FT	91.2±0.8	91.5±1.1	90.6±1.2	90.8±1.2
	Ensem.	99.1±0.4	99.0±0.4	98.4±1.0	99.1±0.4
[B3] CNN	RT	65.6±11.7	73.2±7.7	79.2±4.4	81.9±5.4
	FT	78.3±2.1	76.6±6.4	78.6±3.3	78.5±3.6
	Ensem.	82.3±5.8	86.4±5.1	90.1±3.0	91.4±2.4

* Mean Accuracy (%) ± Standard Deviation, as derived from (14)

그림 8 공개키 크기 별 인증 시스템
식별 성능

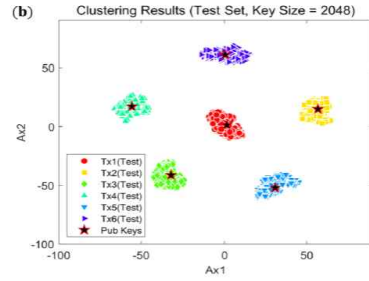


그림 9 생성된 공개키의
독립성 테스트 결과

TABLE VI. QUANTIFICATION ANALYSIS OF RF-PUBKG BASED DIGITAL SIGNATURE SCHEME ⁺
IMPLEMENTED BY HASHED RSA ALGORITHM ⁺

Model ⁺	Key Size ⁺	Cert. File Size ⁺ (Bytes) ⁺		Cert. Gen. time ⁺ (ms) ⁺		Digital Signature processing time ⁺ (ms) ⁺				
		CA ⁺	Sender ⁺	CA ⁺	Sender ⁺	Gen ⁺	Sign ⁺	KeyGen ⁺	CA ⁺ Cert. Vrfy ⁺	Sender Cert. Vrfy ⁺
Incep - RSA ⁺	1024 ⁺	Not Required** ⁺				157.1 ⁺	20.1 ⁺	21.9 ⁺	Not Required ⁺	1.3 ⁺
	2048 ⁺					1188.9 ⁺	64.5 ⁺	21.4 ⁺		7.7 ⁺
	4096 ⁺					11990.4 ⁺	314.9 ⁺	22.3 ⁺		56.7 ⁺
	8192 ⁺					195872.1 ⁺	1970.7 ⁺	22.9 ⁺		437.2 ⁺
RSA* ⁺	1024 ⁺	1159 ⁺	969 ⁺	9.6 ⁺	1.7 ⁺	129.8 ⁺	18.1 ⁺	Not Required ⁺	1.3 ⁺	0.3 ⁺
	2048 ⁺	1513 ⁺	1322 ⁺	48.5 ⁺	2.4 ⁺	970.4 ⁺	50.2 ⁺		1.2 ⁺	0.7 ⁺
	4096 ⁺	2566 ⁺	2348 ⁺	495.0 ⁺	6.4 ⁺	13335.4 ⁺	239.0 ⁺		1.2 ⁺	2.4 ⁺
	8192 ⁺	4182 ⁺	3960 ⁺	5974.7 ⁺	32.9 ⁺	194467.5 ⁺	1289.5 ⁺		1.6 ⁺	8.3 ⁺

⁺ Conventional hashed RSA algorithm (i.e., k_{pub} is 65537) ⁺

⁺ Public keys are directly estimated from the RF-PubKG; certificate management is NOT required. ⁺

그림 10 공개 키 기반 스마트 인증 시스템 실증 결과 [Lee23-9]

2.2. 지능형 랜덤압축 초분광이미징 장치

1) 3개년 연구 내용 요약

랜덤압축 초분광 이미징 장치의 실제 제작을 진행하였다. 이렇게 구현된 장치 기반으로 초분광 이미지 복원 알고리즘을 개발하였으며, 여러 응용 연구로의 실험을 통한 제작 장치의 실증을 완료하였다.

2) 1차 년도 연구 수행 내용

랜덤 초분광 이미징 장치의 실제 구현을 위한 기초연구를 진행하였다. 이를 위해 분광 필터 배열과 마이크로 렌즈 배열에 대한 실제 제작을 완료하였으며, 제작된 필터 및 렌즈를 CMOS 센서와 패키징하여 분광 장치를 구현하는 작업을 진행하였다.

구체적인 내용은 다음과 같다. 먼저 마이크로 렌즈의 설계 사항을 그림 11을 통해 나타내었다. 렌즈의 지름은 500 μm 이며 렌즈 피치는 700 μm 로 설계 되었다. 또한 배열의 크기는 5 mm × 5 mm, 렌즈의 초점 거리는 2 mm로 설계하였다. 이렇게 제작된 배열 및 렌즈를 이용하여 광학 현미경 측정 실험을 수행한 내용을 그림 12에 나타내었다. 그 결과 같은 물체에 대한 복제 이미지가 한번에 측정됨을 확인하였으며, 각 필터의 투과 특성에 따른 측정 색이 다른 것을 확인하였다. 본 연구팀은 실험 시스템에 대한 카메라 패키징 작업을 수행 중에 있다. 마지막으로 제작된 분광 필터 및 상용 분광기를 활용하여, TL 및 FSL 목적의 분광 데이터셋을 확보하였다.

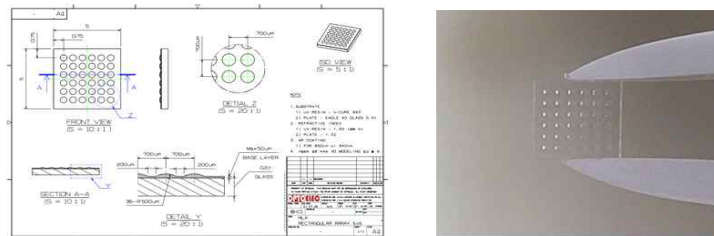


그림 11. 마이크로 렌즈 배열 및 제작된 이미지

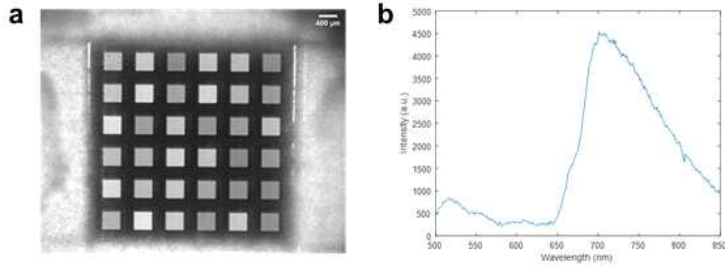


그림 12. 초분광 신호 데이터셋 [Lee22-10];
(a) 분광 필터를 통과한 광원 신호를 CMOS 센서로 측정;
(b) 분광 신호 스펙트럼.



그림 13. 현미경 측정 실험 결과

3) 2차 년도 연구 수행 내용

앞서 1차년도 연구를 통해 제작된 분광 필터 및 시스템에 대한 검증을 위해, 핀홀 카메라 모델 기반 초분광 이미지 복원 실험을 수행하였다(그림14 참조). 그 결과, 측정된 분광 정보를 쌓아 개별 point에 대한 수치 최적화 기반의 복원 알고리즘을 적용해, 초분광 이미지를 복원할 수 있었다. 다음으로, 검증된 분광 필터, 마이크로 렌즈, CMOS 센서 카메라 패키징을 통한 랜덤 초분광 장치에 대한 구현을 완료하였다. 랜덤 필터 구현에 따른 3.5cm * 6.0cm 크기로의 소형화 할 수 있었다 (그림 15 참조). 마지막으로, 제작된 장치를 기반으로 실측 및 초분광 이미지 복원 알고리즘을 개발하였다. 길이 5cm 정도의 인형 및 원형 백색 광원에 대해 제작된 장치의 실측을 수행하였으며, 이로부터 압축 센싱 기반 신호 복원 알고리즘을 적용하여 신호를 복원할 수 있었다 (그림 16, 17참조).

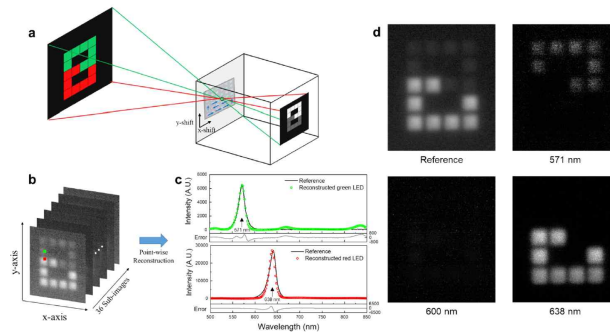


그림 14 핀홀 카메라 모델 및
랜덤 분광 필터 검증실험 [Lee22-10]

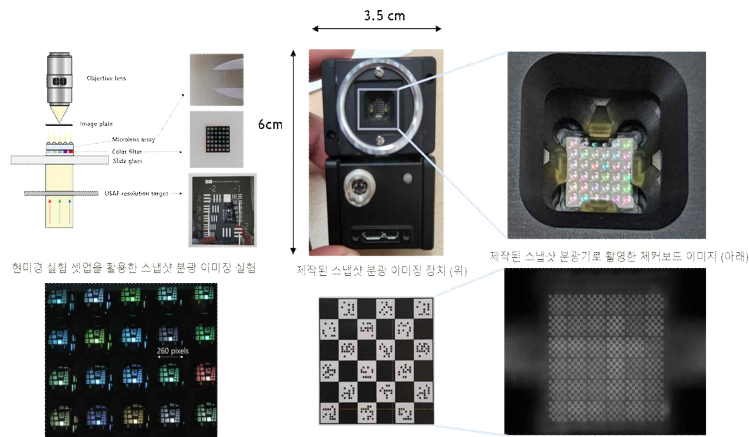
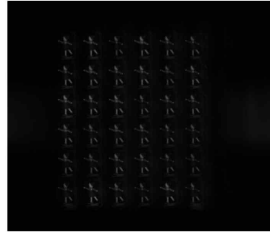
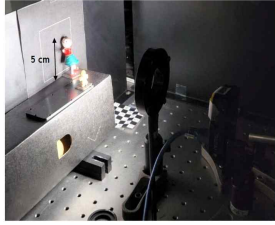


그림 15. 실제 제작된 랜덤 초분광 이미징 장치



축정된 인형 이미지

그림 16. 제작된 이미징 장치 기반 실측 실험 및 촬영된 이미지

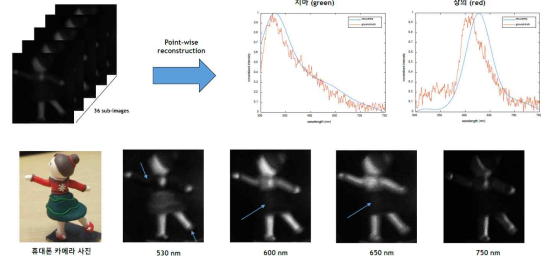


그림 17. 촬영된 이미지를 이용한 초분광 이미지 복원 결과

4) 3차 년도 연구 수행 내용

전년도 연구를 통해 제작된 랜덤 초분광 이미징 장치에 대해, 딥러닝 기반 신호 복원 알고리즘을 개발하고, 사용자 기반 시도에 적용함으로써 개발 장치의 실증을 진행하였다.

먼저, 앞서 구축된 분광 신호 데이터셋을 이용한 딥러닝 학습 기반 신호 복원 알고리즘을 개발하였다. 모델은 복원 성능에서 좋은 효과를 보인다고 알려진 U-NET 기반 모델을 사용하였다. 또한, 복원 신호 및 실측 GT 신호의 평균 제곱 오차를 최소화하도록 학습하였다. 그 결과, 제안하는 방법이 전년도 수행한 수치 최적화 방식 대비 우수한 복원 결과가 나옴을 확인 하였다 (그림 18, 그림 19).

다음으로 제작된 랜덤 압축 초분광이미징 장치에 대한 실증을 위해, 초분광 이미징 기반 사용자 기반 시도 검출 실험을 진행하였다. 여기서 사용자 기반이란, 카메라 기반 얼굴 인식 시스템에서 사진 및 동영상상을 통한 불법 사용자 인증 시도를 의미한다. 본 연구팀은 랜덤 압축 초분광 이미징 장치 및 RGB 웹캠을 이용하여 Live, Replay, Print 기반 사용자 인식 실험을 수행하였다. 그 결과, Live 이미지 대비 Replay 및 Print에서의 파장 특징 차이가 두드러짐을 확인하였으며, 이 차이에 대한 분석을 통해 사용자 기반 시도 검출이 가능함을 검증하였다 (그림20, 그림 21).

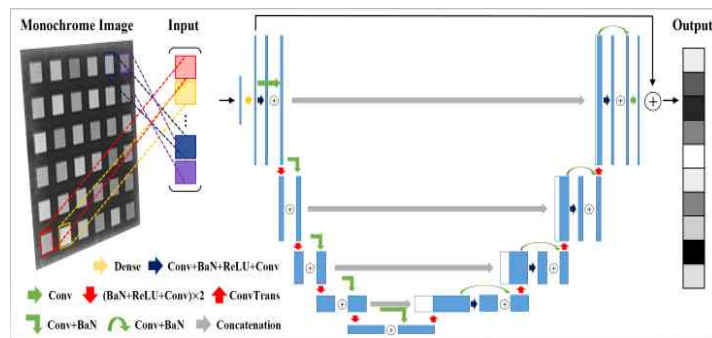


그림 18 딥 러닝 기반 초분광 이미징 신호 복원 모델 [Lee23-10]

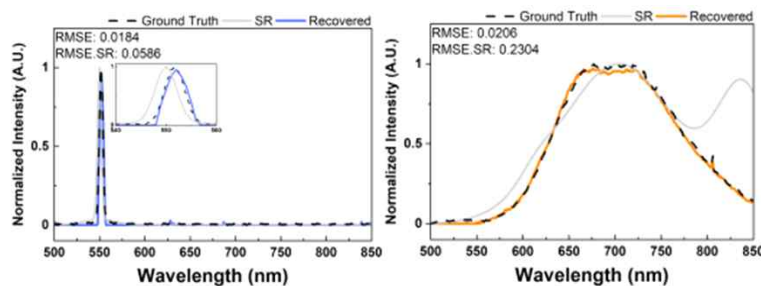


그림 19 분광 신호 복원 결과; GT (검은색), 수치 최적화 기반 복원(회색), 딥 러닝 기반 복원 (컬러)



그림 20 랜덤압축 초분광 이미징 장치 기반 사용자 기만 검출 실험

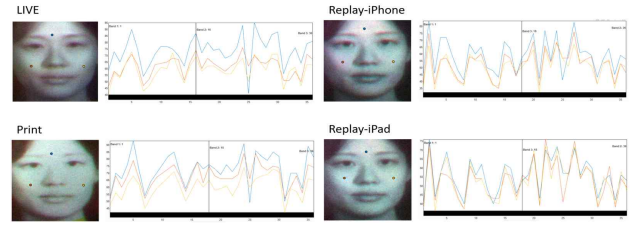


그림 21. 기준 좌표로부터의 측정된 랜덤 초분광 신호

2.3. 지능형 시스템 수월성/신뢰성 제고 연구

1) 3개년 연구 내용 요약 및 수행 내용

본 연구팀은 미래 스마트 환경에서의 지능형 신호 복원 시스템에 대해 연구하였으며, 전파 식별기 및 초분광 이미징 시스템 외 다양한 기타 응용분야에서의 지능형 신호 복원을 고려하였다. 구체적으로는 다음과 같은 지능형 시스템 학습 방법론에 대해 연구하였다; 1) 개별 학습기 모델링을 위한 TL 및 FSL 연구, 2) 비 정상 데이터 추출을 위한 OoD 및 IL 연구, 3) 신호 복원 및 시스템 신뢰성 향상을 위한 FL 및 DistL 연구.

먼저 미래 스마트 네트워크 환경에서의 시스템 동작을 위해서는, 스마트폰 폼 팩터 안에서의 지능형 신호 처리 시스템이 필요하다. 이는 적은 수의 데이터 환경하에서 개별 학습기에 대한 모델링 기술이 필요한데, 이를 위해 TL 및 FSL 기술에 대해 연구하였다;

[Lee21-3, Lee22-5,9,11,12,21, Lee23-2,5,6,7].

다음으로, 충분치 못한 데이터 환경의 경우, 갑작스런 비정상 데이터가 입력되었을 때, 시스템 오작동의 위험성이 존재한다. 이에 대처하기 위한 OoD 및 IL 기술에 대해 연구하였다;

[Lee22-8,13,15,16,17,19, Lee23-3]

마지막으로 미래 스마트 네트워크 환경은 분산된 스마트폰 폼팩터로 인한 다양한 컴퓨팅 자원 시스템 내 동작이 필요하다. 이를 고려하기 위한 FL 및 DistL 기술에 대해 연구하였다;

[Lee21-1,2, Lee22-1,2,4,6,7,14,18,20,22,23,24, Lee23-1,4,8].

본 연구팀은 상기 다수의 연구 결과에 대한 저널 게재를 통해 연구 내용에 대한 질적 우수성을 주장하며, 본 보고서에는 이 중 핵심이 되는 주요 결과물에 대한 요약만을 기재하였다.

핵심 논문 (IF)	요약	연구 Keywords
[Lee22-9] (IF: 8.125)	복원된 이미지의 품질을 높이고, 유용한 정보의 손실을 최소화하는 방안 제시, FL 환경 속에서 효과적인 학습 모델 구축이 가능, DistL 환경 속에서 데이터 활용에 용이	FL, DistL
[Lee23-7] (IF: 7.7)	MLNet 모델 내 과적합 문제 및 최적화 문제를 해결하기 위한 PSO 및 DHDE방법 활용. TL 및 IL을 적용 시 모델 내 최적화를 위한 방법. DistL 환경에서의 파라미터 간 최적화 문제 고려.	TL, IL, DistL
[Lee23-3] (IF: 7.7)	개별 모델 별 특징 추출 및 Ensemble 통합을 통한 영상 설명 생성 모델. OoD 및 IL에 활용 가능. Enselble 모델로부터의 DistL 환경에의 기술 응용 가능	OoD, IL, DistL
[Lee23-1] (IF: 8.7)	Cross Domain 간 TL 기법 활용, 복합적 특징 추출 모델. OoD 및 IL 기술 활용. 개별 모델 기반 DistL 응용 가능.	OoD, IL, DistL
[비고] 상기 대표 연구 성과 논문 요약 외 지능형 시스템 연구 주제 관련 SCI 논문을 29편 게재함.		

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 수준

1) 정성적 연구개발성과(연구개발결과)

본 연구에서는 전파 송출원 식별 시스템 및 지능형 랜덤 압축 초분광 이미징 장치에 특화된 지능형 신호 복원 및 분류 시스템에 대해 연구하였다. 이 과정에서 미래 스마트 네트워크 환경에서 발생할 수 있는 데이터 부족 및 비정상 데이터 인식 문제에 대응하기 위한 여러 방법들에 대해 연구하였으며, 이 과정에서 TL, OoD 및 FL 등 지능형 시스템 학습 방법론에 대한 기술들을 개발하였다.

전파 송출원 식별 시스템 연구에서는, 스마트 인증 네트워크 개발을 위한 분산형 전파 식별 모델 및 비정상 데이터 검출 알고리즘에 대해 연구하였다. 실증을 위한 RF 신호로서, FH 프로토콜 및 상용 Walkie-Talkie 신호를 준비하였으며, Neural Net Design theory에 기반한 전파 송출원 식별 모델을 설계하였다. 나아가 분산 네트워크 환경 하에서의 서로 다른 컴퓨팅 자원을 이용한 동작을 목적으로 하는 공개 키 기반 식별 프레임워크를 개발하고, 제안하는 방법이 기존 디지털 서명 체계 대비 효과적임을 실증하였다. 제안하는 시스템을 통해, 99% 이상의 전파 송출원 식별 결과를 확인할 수 있었으며, 관련 성과들을 Applied Science, IEEE Access 등 우수 SCI 저널에 게재하였다.

랜덤 압축 초분광 이미징 장치 연구에서는, 실제 초분광 이미징 장치의 제작과 이미지 복원 알고리즘에 대한 개발, 그리고 사용자 기만 시도예외의 적용을 통한 실증에 초점을 맞췄다. 이를 위해 렌즈 및 필터를 설계 및 제작하였으며, CMOS센서와의 패키징을 통한 초분광 이미징 장치를 실제 제작하였다. 제작된 장치를 기반으로 상용 분광기와 함께 초분광 이미지 데이터셋을 마련하였으며, 학습 기반 초분광 이미징 신호 복원 알고리즘을 개발하였다. 마지막으로 개발 기술을 이용한 사용자 기만 시도 검출 연구를 수행함으로써 장치의 실용성을 입증할 수 있었다. 이러한 연구 결과물은 Scientific reports 등 우수 SCI 저널에 게재함으로써 우수성을 검증받았다.

앞서 기술한 두 개의 응용 분야와 함께, 기타 분야로의 지능형 시스템 학습 방법론에 대해 연구하였다. 이는 개별 학습기 모델링을 위한 TL 및 FSL, 비정상 데이터 처리를 위한 OoD 및 IL, 그리고 분산 시스템 신뢰성 향상을 위한 FL 및 DistL 연구를 수행하였다. 해당 기술은 미래 스마트 환경에서의 스마트폰 폼 팩터 내 동작을 목적으로 하였으며, 연구 결과물이 다수의 저널에 게재됨으로써 결과의 질적 우수성을 입증하였다.

본 연구 과제는 스마트 네트워크 환경하에서 동작하는 지능형 신호 복원 시스템 개발에 중점을 두었다. 분산형 전파 송출원 식별과 랜덤 압축 초분광 이미징 기술에의 이해를 바탕으로 설계된 이 시스템은, 데이터 부족 및 변화하는 네트워크 환경에서의 수월성 및 신뢰성 문제 제고에 중요한 진전을 이뤘다. 본 과제를 통해 개발된 기술들은 다양한 응용 분야에서의 신호 처리 시스템 신뢰성을 제고할 뿐만 아니라, 미래 기술 산업의 발전에 중대한 영향을 미칠 것으로 기대되며, 나아가, 새로운 신산업 창출 및 기술 혁신의 가능성을 확인할 수 있었다.

2) 세부 정량적 연구개발성과: [붙임1] 참조

3) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용		달성도 (%)
SCI 논문 11건	SCI 논문 34건		309%
특허 3건 출원	특허 0건 출원	기술실시계약 1건*	16.7%
특허 3건 등록	특허 0건 등록		
합계 17건	35건		206%

[*] : ‘지능형 압축 초분광 이미징 장치’ 연구의 기반 특허중 하나인 ‘분광 장치 및 분광방법’ 특허에 대한 기술실시계약 1건을 달성함.

4) 목표 미달 시 원인 분석(해당 시)

4-1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

본 연구 과제 수행에 있어, 특허의 경우 출원 및 등록 0건으로 목표 대비 미흡한 부분이 존재한다. 하지만 과제의 핵심 연구 목표 중 하나인 '지능형 압축 초분광 이미징 장치' 연구의 기반 특허 중 하나인 '분광 장치 및 분광방법' 특허에 대한 기술실시계약 1건을 달성하였다. 이는 연구 결과물 실증을 위한 기술이전 성과로서 개발 기술의 사업화를 위한 중요한 결과물이라 생각하며, 나아가 도약 중견 연구 후속 지원 및 추가 연구 결과물 특허화를 통한 장기적 목표 달성을 지향하고자 한다.

4-2) 자체 보완활동

본 연구팀은 연구실 개발 기술에 대한 사업화를 통해 사회적 가치를 실현하는 것을 목표로하는, 광주 과학기술원 내 교원창업기업 리버벤스(주)를 운영하고 있다. 때문에, 본 연구 결과물에 대한 후속 연구 및 특허화, 그리고 기술 사업화를 지속적으로 진행하여 목표 미달에 대한 보완 활동을 진행하고자 한다.

4-3) 연구개발 과정의 성실성

본 연구팀은, SCI 논문 관련하여 11편 목표 대비 34편을 게재 완료하여 309%로 초과 달성하였다 (24년 03월 기준). 또한, 1건의 SCI 논문에 대해 추가 심사 중에 있다(게재 예상일, 24년 中). 전 파식별시스템 및 초분광 이미징 시스템에 대한 연구 성과를 Scientific Reports 등 국제 우수 학술지에 게재함으로써 연구 결과의 우수성을 인정받았으며, TL, OoD 및 DistL 등 지능형 시스템 학습 방법론에 대한 연구 성과 역시 IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing 등 IF 8 이상의 우수 학술지에 제출함으로써 연구 성과물의 우수성을 검증받았다. 이는, 기술 특허화에 대한 목표가 일부 미달일 뿐 전체 과제 목표는 초과 달성하였으며, 본 연구팀의 연구 능력 및 과정에 대한 성실성을 충분히 보여준다고 생각한다.

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도 (연구개발결과의 중요성)

본 연구는 분산형 전파 송출원 식별 및 지능형 랜덤 압축 초분광 이미징 장치의 개발과 함께, 이를 통한 지능형 시스템의 수월성과 신뢰성 향상에 초점을 맞췄다. 3년간의 연구를 통해 데이터 부족, 네트워크 환경에서의 데이터 활용 효율성, 그리고 비정상 데이터 처리의 중요한 문제들을 해결함으로써 신호 복원 및 분류 성능을 크게 개선하였다. 위와 같은 H/W 압축 및 S/W 복원/분류가 결합한 체계는 연구팀이 개척해가는 매우 독특한 연구방식 중 하나이다. 이러한 연구 개발 성과는 스마트 인증 네트워크, 이미징 시스템, 그리고 분산 스마트 네트워크 환경에서의 신호 분류 및 복원 시스템 신뢰성 향상에 중대한 기여를 할 것으로 보이며, 연구 결과는 해당 분야에서의 우수 SCI 저널들에 게재됨으로써 기술 진보를 위한 중요성을 인정받았다.

4.1. 분산형 전파 송출원 식별 시스템 - 스마트 인증 네트워크

비대면 디지털 경제 시대 속 전파 신호 식별 시스템 운용을 위해서는, 복잡한 전파 신호에 대한 신호 식별 및 분산 네트워크 환경 하에서의 신뢰성있는 동작이 필요하다. 본 연구팀은 고도로 보안된 물리 시스템인 FH 프로토콜 및 상용 RF송출원을 의미하는 Walkie-Talkie 신호를 활용한 송출원 식별 및 이상 데이터 감지 시스템 개발에 주력하였다.

구체적으로, DIN 기반 로컬 스마트 인증 네트워크 모델을 성공적으로 개발하였다. 이는 FH 신호에 대해서도 97% 이상의 높은 식별 정확도 및 AUROC 0.99를 달성하며 기본 기술 대비 3% 이상의 성능 향상을 이룰 수 있었다. 나아가 분산 네트워크 환경 하에서의 서로 다른 컴퓨팅 자원을 보안하기 위한 공개 키 기반 전파 신호 식별 프레임워크에 개발 성공하여, 99% 이상의 Walkie-Talkie 송출원 식별이 가능함을 보였다. 이러한 성과는 미래 네트워크 환경에서의 시스템 보안 및 신호처리 효율성을 크게 향상시킬 수 있었으며, 기술 실증 과정을 통해 그 효율성을 확인할 수 있었다. 이는 스마트 인증 시스템의 수월성 및 신뢰성이 확보될 수 있음을 방증하며, 미래 인증 시스템 기술의 중요한 진전을 의미한다.

4.2. 지능형 랜덤압축 초분광이미징 장치

전파 신호에 이어, 초분광 이미징 장치 역시 비대면 디지털 경제 시대 속 사용자 식별을 위한 핵심 기술이다. 현 시점에서의 초분광 이미징 장치의 가장 큰 문제점은 크기, 무게, 가격 등의 문제로 특정 전문가 집단만이 활용하고 있다는 점이다. 본 연구팀은 이전 연구 성과에서 나아가, 압축센싱 이론 기반 분광 장치 및 신호 복원 시스템을 직접 개발하는데 집중하였다.

구체적으로, 마이크로 렌즈 배열의 정밀 제작부터 랜덤 필터 개발 및 CMOS 센서와의 패키징을 통한 랜덤 초분광 이미징 장치의 제작에 성공하였다. 핀홀 카메라 모델을 활용해 제작된 렌즈 및 필터의 성능을 검증하였으며, 제작된 장치를 이용해 획득한 신호에 대한 평가를 통해 실용성을 입증할 수 있었다. 나아가 제작된 장치를 활용한 딥러닝 기반 초분광 이미지 복원 알고리즘을 개발하고, 이를 사용자 기반 시도 탐지 연구에 적용함으로써 초분광 이미징 장치를 통해 비대면 경제 시스템 내 효과적인 방어 수단 확보가 가능함을 확인하였다. 이러한 연구 결과는, 비대면 시대 속 보안 및 인증 분야에의 진전 뿐만 아니라 소형 분광기에 대한 수요 개발, 즉 음식물 성분 분석, 피부 진단 기기, 혈액 검사 기기 등 다양한 분야에의 새로운 신산업 창출의 원동력이 될 것으로 기대한다.

4.3. 지능형 시스템 수월성/신뢰성 제고 연구

앞서 기술한 두 목표 응용 분야에서 나아가, 미래 스마트 네트워크 환경에서의 범용적 지능형 신호 복원 시스템 운용을 위해서는, 학습 방법론에의 원천기술 확보가 필요하였다. 이를 위해, 개별 학습기 모델링을 위한 TL과 FSL, 갑작스러운 비정상 데이터 대응에 필요한 OoD 및 IL, 그리고 분산 시스템 내에서의 신호 복원 신뢰성 향상을 위한 FL 및 DistL을 중심으로 연구를 집중하였다.

지능형 신호 복원 시스템에 대한 원천기술 확보를 통해, 미래 스마트 환경에서 발생할 수 있는 데이터 부족, 비정상 데이터 발생, 그리고 신호 처리의 신뢰성 문제에 대응하는 핵심 기술을 확보하였다. 연구 결과는 다양한 환경에서 지능형 신호 복원 시스템의 수월성과 신뢰성을 대폭 향상 시켰음을 확인하였다. 이는 미래 스마트 기기들 간의 효율적인 정보 교환 및 처리, 고도화된 데이터 분석 및 의사 결정 지원 등 다양한 응용 분야에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

5.1. 연구개발성과의 활용 분야

본 연구 성과로 개발된 분산형 전파 식별 시스템, 랜덤 압축 초분광 이미징 장치 및 신호 복원 알고리즘은 미래 네트워크 환경 하에서의 신호처리 효율을 극대화 할 핵심 기술이다. 전파 송출원 식별 시스템은 물리적 계층의 보안을 강화하는 동시에 비대면 경제 시스템에서의 IoT 기기 인증 과정을 획기적으로 간소화하고 강화할 수 있는 잠재력을 지니며, 공개 키 기반 시스템과의 결합을 통해 분산 환경에서의 인증 과정의 안전성을 한층 더 높일 것으로 기대한다. 지능형 랜덤 압축 초분광이미징 장치는 의료 이미징, 원격 감지, 공정 모니터링 등 다양한 분야에서 고해상도 이미지 캡처와 정밀한 분석을 효율적으로 가능하게 해, 복잡한 데이터 분석과 사용자 인증 시도에 대한 보다 신뢰할 수 있는 방안을 제공한다. 나아가 지능형 신호 복원 시스템 원천기술의 경우, 미래 스마트 환경에서의 다양한 신호 복원 시스템에 활용됨으로써 신산업 도출의 가능성을 제공한다.

5.2. 연구개발성과의 활용 계획 및 방안

본 연구 결과는, 데이터 부족과 서로간에 상이한 네트워크 환경을 극복하고 신호 센싱을 통한 지능형 솔루션을 제공하는 기술이다. 따라서 스마트 인증 네트워크는 자동화된 식별 프로세스를 구축하여 보안 시스템에의 기술 사업화를 목표하고, 초분광 압축 이미징 장치는 음식물 성분 분석, 피부 진단기기 등 다양한 분야에의 응용 기술 확장을 목표하고자 한다.

나아가 최근 각광받고 있는 텍스트 기반의 인간과 상호작용을 수행하는 생성형 AI모델과의 연계를 계획한다. 도약 연구의 지속성을 살려 실측되는 전파 및 초분광 데이터에 대한 생성형 AI모델을 적용함으로써, 연구 결과물에 대한 지속적인 개선이 가능할 것으로 판단한다. AI 모델이 처한 환경을 전파 및 초분광 이미징 장치를 통해 신호를 수집하여 상황을 감지하고, 처한 상황에 대한 인지를 수행하며, 이를 기반으로 인간과 상호작용하여 최적의 교류를 할 수 있는 생성형 AI 모델 개발이 가능할 것으로 판단한다. 이러한 후속 활용 연구를 통해 인간과 상호작용을 추구하는 미래 AI 기술의 전파 및 초분광 이미징 분야에서의 수요를 만족할 수 있을 것으로 기대한다. 이러한 활용 계획을 바탕으로 국가 R&D 과제 수주, 석/박사급 전문가 양성, 연구 인프라구축에 활용함으로써 도약 중견연구 결과물에 대한 연구 확장성을 키워 나가하고자 한다.

5.3. 추가연구의 필요성

본 연구 성과는 실증적이고 실용적이지만, 실제 환경에서의 복잡성 및 동적 변화에 대응하기 위해서는 지속적인 개선과 추가 연구가 필요하다. 최근 주어진 텍스트 데이터에 대한 정밀 분석을 통해 인간과 상호작용을 하는 생성형 AI 모델이 제안된 바 있다. 이로부터 야기된 생성형 AI 모델의 기술 수요는 근래에 여러 종류의 입력신호에 대한 연계 상황 인지가 가능한 Multimodal 생성형 AI 모델 기술로 나아가고 있다. 이는 인간이 모두 커버하기 어려운 환경 속 일부 내용을 시스템 모델과의 상호 교류를 통해 보완함으로써 보다 일반적인 상황에서의 신뢰성있는 학습이 가능하다는 점에서, 데이터 부족 문제를 극복하고, 비정상 데이터를 보다 정확하게 분석할 수 있는 가능성을 보인다.

본 연구팀은 연구 성과 중 초분광 압축 이미징 시스템에 집중하여 이를 생성형 AI 모델에의 적용으로 확장하고자 한다. 초분광 이미지 역시 학습 가능한 modality 중 하나이며, 이를 위해서는 신호 도메인에 맞는 생성형 AI 모델의 미세조정을 포함한 연속 학습 기술 개발이 필수이다. 후속 연구를 통해 초분광 데이터로 생성형 AI 모델을 미세조정 하였을 때 생길 수 있는 문제(새로운 modality에 대한 의미 추론, 잘못된 추론 결과의 인지 등)가 무엇인지 파악하고 이를 극복하는 기술 개발에 집중하고자 하며, 이를 초분광 Foundation AI 이미징 시스템 연구라 정의하고자 한다.

6. 자체점검표

구분	아주 우수	우수	보통	미흡	불량	비고
연구성과의 우수성/창의성	√					
연구성과의 파급 효과	√					
연구성과에 대한 활용 가능성	√					
연구수행의 성실도	√					
연구성과에 대한 종합의견 기술	<p>본 연구는 분산형 전파 신호 식별과 초분광 이미징 기술의 혁신을 통해 지능형 신호 복원 시스템 수월성과 신뢰성을 획기적으로 향상시켰으며, 이는 정성적, 정량적 지표로 검증된다.</p> <p>이러한 연구 결과는 다양한 산업 분야에서의 응용 가능성을 열어, 미래 기술 발전에 기여를 할 것으로 기대한다.</p>					

7. 참고문헌

- [Hin19] P. Hinz and S. van de Geer, "A Framework for the Construction of Upper Bounds on the Number of Affine Linear Regions of ReLU Feed-Forward Neural Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 65, no. 11, pp. 7304–7324, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIT.2019.2927252.
- [Wiat18] T. Wiatowski, P. Grohs, and H. Bölcskei, "Energy Propagation in Deep Convolutional Neural Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 64, no. 7, pp. 4819–4842, Jul. 2018, doi: 10.1109/TIT.2017.2756880.
- [Hend16] Hendrycks, Dan, and Kevin Gimpel. "A baseline for detecting misclassified and out-of-distribution examples in neural networks." *arXiv preprint arXiv:1610.02136* (2016).
- [Kem17] Kemker, Ronald, and Christopher Kanan. "Fearnert: Brain-inspired model for incremental learning." *arXiv preprint arXiv:1711.10563* (2017).
- [Yang19-1] Yang, Qiang, et al. "Federated machine learning: Concept and applications." *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)* 10.2 (2019): 1–19.
- [Gupta18] Gupta, Otkrist, and Ramesh Raskar. "Distributed learning of deep neural network over multiple agents." *Journal of Network and Computer Applications* 116 (2018): 1–8.
- [Merch18] K. Merchant, S. Revay, G. Stantchev, and B. Nousain, "Deep learning for RF device fingerprinting in cognitive communication networks," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 12, no. 1, pp. 160–167, Feb. 2018.
- [Geda19] Gedalin, Daniel, Yaniv Oiknine, and Adrian Stern. "DeepCubeNet: reconstruction of spectrally compressive sensed hyperspectral images with deep neural networks." *Optics Express* 27.24 (2019): 35811–35822.
- [Angr20] A. Angrisano, M. L. Bernardi, M. Cimitile, S. Gaglione, and M. Vultaggio, "Identification of Walker Identity Using Smartphone Sensors: An Experiment Using Ensemble Learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 27435–27447, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971693.
- [Lee18] K. Lee, M. Lam, R. Pedarsani, D. Papailiopoulos, and K. Ramchandran, "Speeding Up Distributed Machine Learning Using Codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 64, no. 3, pp. 1514–1529, Mar. 2018, doi: 10.1109/TIT.2017.2736066.
- [Chat20] S. Chatterjee, "A Deterministic Theory of Low Rank Matrix Completion," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/TIT.2020.3019569.
- [Ding20] L. Ding and Y. Chen, "Leave-One-Out Approach for Matrix Completion: Primal and Dual Analysis," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 66, no. 11, pp. 7274–7301, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIT.2020.2992769.
- [Yang19-2] K. Yang, J. Kang, J. Jang, and H.-N. Lee, "Multimodal sparse representation-based classification scheme for RF fingerprinting," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 5, pp. 867–870, May 2019.
- [Patel15] H. J. Patel, M. A. Temple, and R. O. Baldwin, "Improving ZigBee device network authentication using ensemble decision tree classifiers with radio frequency distinct native attribute fingerprinting," *IEEE Trans. Rel.*, vol. 64, no. 1, pp. 221–233, Mar. 2015.
- [Ali19] A. M. Ali, E. Uzundurukan, and A. Kara, "Assessment of features and classifiers for Bluetooth RF fingerprinting," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50524–50535, Apr. 2019.
- [You18] K. Youssef, et al., "Machine learning approach to RF transmitter identification," *IEEE J. Radio Freq. Identif.*, vol. 2, no. 4, pp. 197–205, Dec. 2018.
- [Chen19] Wei-Yu Chen, et. al., "A closer look at few-shot classification," In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2019.
- [Serr20] J. Serr, D. et. al., "Input complexity and out-of-distribution detection with likelihood-based generative model," In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2020.

- [Lee13] Oliver, J., Woong-Bi Lee, and Heung-No Lee. "Filters with random transmittance for improving resolution in filter-array-based spectrometers." *Optics Express* 21.4 (2013): 3969–3989.
- [Lee19] Kim, C., Lee, W. B., Lee, S. K., Lee, Y. T., & Lee, H. N. (2019). Fabrication of 2D thin-film filter-array for compressive sensing spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, 115, 53–58.
- [Lee20] Kim, Cheolsun, Dongju Park, and Heung-No Lee. "Compressive Sensing Spectroscopy Using a Residual Convolutional Neural Network." *Sensors* 20.3 (2020): 594.
- [Lin18] LIN, Jianzhe; WARD, Rabab; WANG, Z. Jane. Deep transfer learning for hyperspectral image classification. In: 2018 IEEE 20th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP). IEEE, 2018. p. 1–5.
- [Lee21–1] Jabarulla, Mohamed Yaseen, and Heung-No Lee. "A blockchain and artificial intelligence-based, patient-centric healthcare system for combating the COVID-19 pandemic: Opportunities and applications." *Healthcare*. Vol. 9. No. 8. Mdpi, 2021.
- [Lee21–2] Kim, Hyongsung, et al. "Error-correction code proof-of-work on Ethereum." *IEEE Access* 9 (2021): 135942–135952.
- [Lee21–3] Singh, D., Kumar, V., Kaur, M., Jabarulla, M. Y., & Lee, H. N. (2021). Screening of COVID-19 suspected subjects using multi-crossover genetic algorithm based dense convolutional neural network. *IEEE Access*, 9, 142566–142580.
- [Lee22–1] Mishra, B., Agarwal, A., Goel, A., Ansari, A. A., Gaur, P., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Privacy protection framework for android. *IEEE Access*, 10, 7973–7988.
- [Lee22–2] Singh, G. D., Prateek, M., Kumar, S., Verma, M., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Hybrid genetic firefly algorithm-based routing protocol for VANETs. *IEEE Access*, 10, 9142–9151.
- [Lee22–3] Kumar, A., Saini, M., Gupta, N., Sinwar, D., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Efficient stochastic model for operational availability optimization of cooling tower using metaheuristic algorithms. *IEEE Access*, 10, 24659–24677.
- [Lee22–4] Kushwaha, S. S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Systematic review of security vulnerabilities in ethereum blockchain smart contract. *IEEE Access*, 10, 6605–6621.
- [Lee22–5] Dixit, M., Chaurasia, K., Mishra, V. K., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). 6+: A novel approach for building extraction from a medium resolution multi-spectral satellite. *Sustainability*, 14(3), 1615.
- [Lee22–6] Singh, D., Biswal, A. K., Samanta, D., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Juice jacking: Security issues and improvements in USB technology. *Sustainability*, 14(2), 939.
- [Lee22–7] Bondada, P., Samanta, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Data security-based routing in MANETs using key management mechanism. *Applied Sciences*, 12(3), 1041.
- [Lee22–8] Piri, J., Mohapatra, P., Singh, D., Samanta, D., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Mining and Interpretation of Critical Aspects of Infant Health Status Using Multi-Objective Evolutionary Feature Selection Approaches. *IEEE Access*, 10, 32622–32638.
- [Lee22–9] Singh, D., Kaur, M., Jabarulla, M. Y., Kumar, V., & Lee, H. N. (2022). Evolving fusion-based visibility restoration model for hazy remote sensing images using dynamic differential evolution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–14.
- [Lee22–10] Kim, C., Ni, P., Lee, K. R., & Lee, H. N. (2022). Mass production-enabled computational spectrometers based on multilayer thin films. *Scientific reports*, 12(1), 4053.
- [Lee22–11] Aggarwal, A., Srivastava, A., Agarwal, A., Chahal, N., Singh, D., Alnuaim, A. A., ... & Lee, H. N. (2022). Two-way feature extraction for speech emotion recognition using deep learning. *Sensors*, 22(6), 2378.
- [Lee22–12] Mishra, A., Dharahas, G., Gite, S., Kotecha, K., Koundal, D., Zaguia, A., ... & Lee, H. N. (2022). ECG data analysis with denoising approach and customized CNNs. *Sensors*, 22(5), 1928.
- [Lee22–13] Kaur, M., Raj, M., & Lee, H. N. (2022). Cross channel scripting and code injection attacks

on web and cloud-based applications: a comprehensive review. *Sensors*, 22(5), 1959.

[Lee22-14] Malhotra, P., Gupta, S., Koundal, D., Zaguia, A., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Deep learning-based computer-aided pneumothorax detection using chest X-ray images. *Sensors*, 22(6), 2278.

[Lee22-15] Tanwar, S., Vijayalakshmi, S., Sabharwal, M., Kaur, M., AlZubi, A. A., & Lee, H. N. (2022). Detection and classification of colorectal polyp using deep learning. *BioMed Research International*, 2022.

[Lee22-16] Singh, D., Taspinar, Y. S., Kursun, R., Cinar, I., Koklu, M., Ozkan, I. A., & Lee, H. N. (2022). Classification and analysis of pistachio species with pre-trained deep learning models. *Electronics*, 11(7), 981.

[Lee22-17] Singh, D., Kaur, M., Kumar, V., Jabarulla, M. Y., & Lee, H. N. (2022). Artificial intelligence-based cyber-physical system for severity classification of chikungunya disease. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 10, 1–9.

[Lee22-18] Kshirsagar, P. R., Manoharan, H., Shitharth, S., Alshareef, A. M., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Probabilistic framework allocation on underwater vehicular systems using hydrophone sensor networks. *Water*, 14(8), 1292.

[Lee22-19] Subramanian, R., Taterh, S., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Efficient Fine Tuned Trapezoidal Fuzzy-Based Model for Failure Mode Effect Analysis Risk Prioritization. *IEEE Access*, 10, 50037–50046.

[Lee22-20] Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Juneja, S., Kaur, M., Alharbi, A. H., & Lee, H. N. (2022). Controlling agronomic variables of saffron crop using IoT for sustainable agriculture. *Sustainability*, 14(9), 5607.

[Lee22-21] Singh, H., Sharma, S., Khurana, M., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Binary Drone Squadron Optimization Approaches for Feature Selection. *IEEE Access*, 10, 87099–87114.

[Lee22-22] Himthani, V., Dhaka, V. S., Kaur, M., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Systematic survey on visually meaningful image encryption techniques. *IEEE Access*, 10, 98360–98373.

[Lee22-23] Kumar, N., Sinwar, D., Saini, M., Saini, D. K., Kumar, A., Kaur, M., ... & Lee, H. N. (2022). Efficient computational stochastic framework for performance optimization of E-waste management plant. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(8), 4712–4728.

[Lee22-24] Pallavi, Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Comprehensive review of orthogonal regression and its applications in different domains. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6), 4027–4047.

[Lee23-1] Kaushik, H., Khanna, A., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2023). TomFusioNet: A tomato crop analysis framework for mobile applications using the multi-objective optimization based late fusion of deep models and background elimination. *Applied Soft Computing*, 133, 109898.

[Lee23-2] Raina, R., Gondhi, N. K., Chaahat, Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2023). A systematic review on acute leukemia detection using deep learning techniques. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(1), 251–270.

[Lee23-3] Singh, D., Kaur, M., Alanazi, J. M., AlZubi, A. A., & Lee, H. N. (2022). Efficient evolving deep ensemble medical image captioning network. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 27(2), 1016–1025.

[Lee23-4] Kaur, M., AlZubi, A. A., Singh, D., Kumar, V., & Lee, H. N. (2023). Lightweight biomedical image encryption approach. *IEEE Access*.

[Lee23-5] Kaur, M., Singh, D., Jabarulla, M. Y., Kumar, V., Kang, J., & Lee, H. N. (2023). Computational deep air quality prediction techniques: a systematic review. *Artificial Intelligence Review*, 56(Suppl 2), 2053–2098.

- [Lee23-6]** Su, J., Liao, Z., Sheng, Z., Liu, A. X., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). Human activity recognition using self-powered sensors based on multilayer bi-directional long short-term memory networks. *IEEE Sensors Journal*.
- [Lee23-7]** Kaur, M., Singh, D., Kumar, V., & Lee, H. N. (2022). MLNet: metaheuristics-based lightweight deep learning network for cervical cancer diagnosis. *IEEE journal of biomedical and health informatics*.
- [Lee23-8]** Lee, H. N., Kim, Y. S., Singh, D., & Kaur, M. (2022). Green Bitcoin: Global Sound Money. *arXiv preprint arXiv:2212.13986*.
- [Lee21-4]** Kang, J., Shin, Y., Lee, H., Park, J., & Lee, H. (2021). Radio frequency fingerprinting for frequency hopping emitter identification. *Applied Sciences*, 11(22), 10812.
- [Lee23-9]** Kang, J., Kim, Y. S., & Lee, H. N. (2023). Radio Frequency Public Key Generator for Digital Cryptographic Application. *IEEE Access*.
- [Lee23-10]** Lee, J., Kim, C., Choi, Y., & Lee, H. N. (2023, March). Image reconstruction for the artificial compound eye based on deep learning. In *AI and Optical Data Sciences IV* (Vol. 12438, pp. 308-315). SPIE.

[붙임1] 세부 정량적 연구개발성과

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A2B5B03002118	202108	A Blockchain and Artificial Intelligence-Based, Patient-Centric Healthcare System for Combating the COVID-19 Pandemic: Opportunities and Applications	Jabarulla, Mohamed Yaseen; Lee, Heung-N o;	SCI	HEALTHCARE	9(8)	국외	SCI등재	2.645	아니오	100
2021R1A2B5B03002118	202109	Error-Correction Code Proof-of-Work on Ethereum	Kim, Hyongsung; Jang, Jehyuk; Park, Sangjun; Lee, Heung-N o;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.367	아니오	33
2021R1A2B5B03002118	202110	Screening of COVID-19 Suspected Subjects Using Multi-Crossover Genetic Algorithm Based Dense Convolutional Neural Network	Singh, Dilbag; Kumar, Vijay; Kaur, Manjit; Jabarulla, Mohamed Yaseen; Lee, Heung-N o;	SCI	IEEE ACCESS	9(0)	국외	SCI등재	3.367	예	100
2021R1A2B5B03002118	202201	Privacy Protection Framework for Android	Mishra, Bharavi; Agarwal, Aastha; Goel, Ayush; Ansari, Aman Ahmad; Gaur, Pramod; Singh, Dilbag; Lee, Heung-N o;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A2B5B03002118	202201	Hybrid Genetic Firefly Algorithm-Based Routing Protocol for VANETs	Singh, Gagan Deep; Prateek, Manish; Kumar, Sunil; Verma, Madhushi; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1A2B5B03002118	202201	Efficient Stochastic Model for Operational Availability Optimization of Cooling Tower Using Metaheuristic Algorithms	Kumar, Ashish; Saini, Monika; Gupta, Nivedita; Sinwar, Deepak; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1A2B5B03002118	202201	Systematic Review of Security Vulnerabilities in Ethereum Blockchain Smart Contract	Kushwaha, Satpal Singh; Joshi, Sandeep; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1A2B5B03002118	202201	6: Novel Approach for Building Extraction from Medium Resolution Multi-Spectral Satellite	Mayank Dixit; Kuldeep Chaurasia; Vipul Kumar Mishra; Dilbag Singh; and Heung-No Lee	직접입력	MDPI sustainability	14(3)	국외	SCI등재	3.251	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1 A2B5B 030021 18	202201	Juice Jacking: Security Issues and Improvements in USB Technology	Singh, Debabra ta; Biswal, Anil Kumar; Samanta , Debabra ta; Singh, Dilbag; Lee, Heung- No;	SCI	SUSTAINA BILITY	(0)	국외	SCI등 재	3.889	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202202	Data Security-Based Routing in MANETs Using Key Management Mechanism	Bondad a, Praveen; Samanta , Debabra ta; Kaur, Manjit; Lee, Heung- No;	SCI	APPLIED SCIENCES -BASEL	(0)	국외	SCI등 재	2.838	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202203	Mining and Interpretation of Critical Aspects of Infant Health Status Using Multi-Objective Evolutionary Feature Selection Approaches	Pri, Jayashre e; Mohapat ra, Puspanj ali; Singh, Debabra ta; Samanta , Debabra ta; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung- No;	SCI	IEEE ACCESS	10(0)	국외	SCI등 재	3.476	예	50

전문화술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A2B5B03002118	202203	Evolving Fusion-Based Visibility Restoration Model for Hazy Remote Sensing Images Using Dynamic Differential Evolution	Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Jabarulla, Mohamed Yaseen; Kumar, Vijay; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	60(0)	국외	SCI등재	8.125	예	50
2021R1A2B5B03002118	202203	Mass production-enabled computational spectrometers based on multilayer thin films	Kim, Cheolsun; Ni, Pavel; Lee, Kang Ryeol; Lee, Heung-No;	SCI	SCIENTIFIC REPORTS	(0)	국외	SCI등재	4.997	아니오	100
2021R1A2B5B03002118	202203	Two-Way Feature Extraction for Speech Emotion Recognition Using Deep Learning	Aggarwal, Apeksha; Srivastava, Akshat; Agarwal, Ajay; Chahal, Nidhi; Singh, Dilbag; Alnuaim, Abeer Ali; Alhadlaq, Aseel; Lee, Heung-No;	SCI	SENSORS	22(0)	국외	SCI등재	3.847	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A2B5B03002118	202203	ECG Data Analysis with Denoising Approach and Customized CNNs	Mishra, Abhinav; Dharahas, Ganapathiraju; Gite, Shilpa; Kotecha, Ketan; Koundal, Deepika; Zaguia, Atef; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	SENSORS	22(0)	국외	SCI등재	3.847	예	50
2021R1A2B5B03002118	202203	Deep Learning-Based Computer-Aided Pneumothorax Detection Using Chest X-ray Images	Malhotra, Priyanka; Gupta, Sheifali; Koundal, Deepika; Zaguia, Atef; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	SENSORS	22(0)	국외	SCI등재	3.847	예	50
2021R1A2B5B03002118	202203	Cross Channel Scripting and Code Injection Attacks on Web and Cloud-Based Applications: A Comprehensive Review	Indushree, M.; Kaur, Manjit; Raj, Manish; Shashidhar, R.; Lee, Heung-No;	SCI	SENSORS	(0)	국외	SCI등재	3.847	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1A2B5B03002118	202204	Detection and Classification of Colorectal Polyp Using Deep Learning	Tanwar, Sushama; Vijayalakshmi, S.; Sabharwal, Munish; Kaur, Manjit; AlZubi, Ahmad Ali; Lee, Heung-No;	SCI	BIOMED RESEARCH INTERNATIONAL	(0)	국외	SCI등재	3.246	예	50
2021R1A2B5B03002118	202204	Classification and Analysis of Pistachio Species with Pre-Trained Deep Learning Models	Singh, Dilbag; Taspinar, Yavuz Selim; Kursun, Ramazan; Cinar, Ilkay; Koklu, Murat; Ozkan, Ilker Ali; Lee, Heung-No;	SCI	ELECTRONICS	11(0)	국외	SCI등재	2.690	예	50
2021R1A2B5B03002118	202204	Artificial Intelligence-Based Cyber-Physical System for Severity Classification of Chikungunya Disease	Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Kumar, Vijay; Jabarulla, Mohamed Yaseen; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE JOURNAL OF TRANSLATIONAL ENGINEERING IN HEALTH AND MEDICINE	(0)	국외	SCI등재	2.890	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1 A2B5B 030021 18	202204	Probabilistic Framework Allocation on Underwater Vehicular Systems Using Hydrophone Sensor Networks	Kshirsagar, Pravin R.; Manoharan, Hariprasath; Shitharth, S.; Alshareef, Abdulrhman M.; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	WATER	14(0)	국외	SCI등재	3.530	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202205	Efficient Fine Tuned Trapezoidal Fuzzy-Based Model for Failure Mode Effect Analysis Risk Prioritization	Subramanian, Rajesh; Taterh, Swapnes h; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202205	Controlling Agronomic Variables of Saffron Crop Using IoT for Sustainable Agriculture	Kour, Kanwalpreet; Gupta, Deepali; Gupta, Kamali; Juneja, Sapna; Kaur, Manjit; Alharbi, Amal H.; Lee, Heung-No;	SCI	SUSTAINABILITY	(0)	국외	SCI등재	3.889	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1 A2B5B 030021 18	202207	Binary Drone Squadron Optimization Approaches for Feature Selection	Singh, Harpreet; Sharma, Suchita; Khurana, Manju; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202208	Systematic Survey on Visually Meaningful Image Encryption Techniques	Himthani, Varsha; Dhaka, Vijaypal Singh; Kaur, Manjit; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	(0)	국외	SCI등재	3.476	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202209	Efficient computational stochastic framework for performance optimization of E-waste management plant	Kumar, Naveen; Sinwar, Deepak; Saini, Monika; Saini, Dinesh Kumar; Kumar, Ashish; Kaur, Manjit; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	JOURNAL OF KING SAUD UNIVERSITY-COMPUTER AND INFORMATION SCIENCES	(0)	국외	SCI등재	6.9	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202210	Comprehensive Review of Orthogonal Regression and Its Applications in Different Domains	Pallavi; Joshi, Sandeep; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	ARCHIVES OF COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING	(0)	국외	SCI등재	8.171	예	50

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1 A2B5B 030021 18	202301	TomFusioNet: A tomato crop analysis framework for mobile applications using the multi-objective optimization based late fusion of deep models and background elimination	Kaushik, Harshit; Khanna, Anvi; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	APPLIED SOFT COMPUTING	133(0)	국외	SCI등재	8.7	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202301	A Systematic Review on Acute Leukemia Detection Using Deep Learning Techniques	Raina, Rohini; Gondhi, Naveen Kumar; Chaahat ; Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Lee, Heung-No;	SCI	ARCHIVES OF COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING	(0)	국외	SCI등재	9.7	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202302	Efficient Evolving Deep Ensemble Medical Image Captioning Network	Singh, Dilbag; Kaur, Manjit; Alanazi, Jazem Mutared; AlZubi, Ahmad Ali; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS	27(2)	국외	SCI등재	7.7	예	33
2021R1 A2B5B 030021 18	202307	Lightweight Biomedical Image Encryption Approach	Kaur, Manjit; AlZubi, Ahmad Ali; Singh, Dilbag; Kumar, Vijay; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE ACCESS	11(0)	국외	SCI등재	3.9	예	33

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	Impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021R1 A2B5B 030021 18	202308	Computational deep air quality prediction techniques: a systematic review	Kaur, Manjit; Singh, Dilbag; Jabarulla, Mohamed Yaseen; Kumar, Vijay; Kang, Jusung; Lee, Heung-No;	SCI	ARTIFICIAL INTELLIGENCE REVIEW	56(SUP PL 2)	국외	SCI등재	12	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202309	Human Activity Recognition Using Self-Powered Sensors Based on Multilayer Bidirectional Long Short-Term Memory Networks	Su, Jian; Liao, Zhenlong; Sheng, Zhengguo; Liu, Alex X.; Singh, Dilbag; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE SENSORS JOURNAL	23(18)	국외	SCI등재	4.3	예	20
2021R1 A2B5B 030021 18	202310	MLNet: Metaheuristics-Based Lightweight Deep Learning Network for Cervical Cancer Diagnosis	Kaur, Manjit; Singh, Dilbag; Kumar, Vijay; Lee, Heung-No;	SCI	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS	27(10)	국외	SCI등재	7.7	예	50
2021R1 A2B5B 030021 18	202210	Green Bitcoin: Global Sound Money	Heung-No Lee; Young-Sik Kim; Dilbag Singh; and Manjit Kaur	직접입력	The Journal of Digital Assets	1(1)	국내	SCI미등재		예	33

국제학술대회 초청강연실적 성과정보						
과제번호	발표연월	학술대회명	발표자	강연주제	개최국	온라인개최
2021R1A2B5 B03002118	202111	Global AI Summit	이흥노	Humans in Metavers, AI and Blockchain	대한민국	Y

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표연월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021R1A2B5 B03002118	202306	대한전자공학회 학술대회, 2023	Cheolsun Kim, Jio Lee and Heung-No Le	계산 분광기 기반 약물 분류 시뮬레이션 연구	국내학술대회	대한민국	
2021R1A2B5 B03002118	202303	SPIE Photonics West 2023,	Jioh Lee, Cheolsun Kim, Young-in Choi, and Heung-No Lee	Image reconstruction for the artificial compound eye based on deep learning	국제학술대회	미국	

수상실적 성과정보							
과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2021R1A2B5 B03002118	202111	교육 혁신상	이흥노	광주과학기술원	광주과학기술원	대한민국	교육 혁신상
2021R1A2B5 B03002118	202204	제55회 과학의날 국무총리 표창	이흥노	광주과학기술원	한국과학기술 단체총연합회	대한민국	센서지능화와 머신러닝 등 신분야 개척에 선도적 역할 을 하는데 기여했으며, 부호 이론적 압축센싱으로 간단하 고 빠른 고해상도 정보 획득 기술개발에 기여함

학위배출인력 성과정보							
과제번호	학위취득연월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2021R1A2B5 B03002118	202108	박사	장재혁	남성	광주과학기술원	전기전자컴퓨터공학부	취업(박사후연구원 포함)
2021R1A2B5 B03002118	202202	박사	김철순	남성	광주과학기술원	전기전자컴퓨터공학부	취업(박사후연구원 포함)
2021R1A2B5 B03002118	202208	석사	박하영	여성	광주과학기술원	전기전자컴퓨터공학	취업준비중
2021R1A2B5 B03002118	202402	석사	김형주	남성	광주과학기술원	전기전자컴퓨터공학부	취업준비중

관련강좌 프로그램 개설 성과정보						
과제번호	개설기간	프로그램명	프로그램 내용	교육대상	교육시간	인원
2021R1A2B5B03002118	20210301~20210630	블록체인과 미래사회	This course aims to give an introduction to blockchain technology and its applications. Blockchain applications of interest include cryptocurrencies, governance and vote systems, transfer of rights and patents, and prosuming of energy/data and other valuable commodities. A detailed coverage of Bitcoin and Ethereum system will be given. At the end of the course, the students will be able to program and run their own version of blockchain system for an application of their own interest.	대학원생	48	10
2021R1A2B5B03002118	20210901~20211231	전기전자컴퓨터개론	Today, humans are said to live in an information technology (IT) revolution wherein people join social networks in cyberspace and meet each other with the same interests—anywhere, anytime in the world. These big changes in our live style have been made by the advances in electrical and computer engineering. This lecture aims to provide the introduction to electrical and computer engineering technologies focusing on what are the basic principles on which the technologies are built, how and in what directions they will evolve, and what can be done to make them more useful in enriching our lives.	학부생	48	35

관련강좌 프로그램 개설 성과정보						
과제번호	개설기간	프로그램명	프로그램 내용	교육대상	교육시간	인원
2021R1A2B5B03002118	20220901~20221231	정보이론	"Introduction to information theory; topics covered include entropy, mutual information, asymptotic equipartition theory, entropy rate, data compression, capacity of noisy channels, channel coding theorem. Application of the fundamental information theoretic ideas to multiple antenna communication systems, signal processing and acquisition	대학원생	48	16
2021R1A2B5B03002118	20230301~20230630	블록체인과 미래 사회	This course aims to give an introduction to blockchain technology and its applications. Blockchain applications of interest include cryptocurrencies, governance and vote systems, transfer of rights and patents, and prosuming of energy/data and other valuable commodities. A detailed coverage of Bitcoin and Ethereum system will be given. At the end of the course, the students will be able to program and run their own version of blockchain system for an application of their own interest.	대학원생	48	12
2021R1A2B5B03002118	20230301~20230630	통신공학	This course presents the fundamentals of information and communication technology by introducing the basic principles of communications engineering. Successful students will be able to understand the fundamental principles of Fourier spectra, frequency translation, sampling and quantization, analog and digital modulations, optimum detection, and basic error correction coding techniques.	학부생	48	9

관련강좌 프로그램 개설 성과정보						
과제번호	개설기간	프로그램명	프로그램 내용	교육대상	교육시간	인원
2021R1A2B5B03002118	20230901~20231231	정보이론	Introduction to information theory; topics covered include entropy, mutual information, asymptotic equipartition theory, entropy rate, data compression, capacity of noisy channels, channel coding theorem. Application of the fundamental information theoretic ideas to blockchains, machine learning and classification, channel codes and cryptography.	대학원생	48	19

국내외 과학자교류 성과정보									
과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021R1A2B5B03002118	20211001~20230123	국내유치	Dilbag Singh	Bennett University	연구조교수	박사	Computer Science and Engineering	인도	정보교환
2021R1A2B5B03002118	20211201~20230123	국내유치	Manjit, Kaur	Bennett University	Post-doc	박사	Computer Science and Engineering	인도	정보교환
2021R1A2B5B03002118	20230301~20230430	국내유치	R. SHASHIDHARA	National Institute of Technology Karnataka Surathkal	PostDoc.	박사	Cyber Security with Blockchain	인도	공동연구

MOU 체결 성과정보				
과제번호	체결연월	체결명	대상국	대상기관
2021R1A2B5B03002118	202105	Memorandum of Understanding	스위스	Swiss Asia Crypto Alliance

기술실시계약(기술이전 등) 성과정보						
과제번호	기술실시 계약체결일	기술실시 계약명	실시권유형	기술실시 기관명	기술실시 업체유형	기술실시 계약금액
2021R1A2B5 B03002118	20231127	분광장치 및 분광방법	특허권양도	리버밴스 주식회사	중소기업부설 연구소	10,000,000

언론보도성과			
과제번호	2021R1A2B5B03002118		
보도게재일자	20220317	보도및게재처	AI 타임즈
기사제목	AI·블록체인 분야 발전 기여...이흥노 지스트 교수, 세계 톱저널 'IEEE TC' 편집위원 맡아		
관련연구업적	이흥노 교수는 AI를 비롯한 연합학습, 블록체인, 스마트 컨트랙트 (블록체인 기반으로 체결하는 계약), 탈중앙 금융, AI 금융 분야 등 의 편집위원으로서 논문 게재 여부에서 가장 중요한 심사자 선정 과 평가 업무를 수행하게 된다.		

과제번호	2021R1A2B5B03002118		
보도게재일자	20220330	보도및게재처	전자신문
기사제목	이흥노 GIST 교수팀, 대량 생산 가능한 소형 분광기 개발		
관련연구업적	적은 수의 필터로 고해상도 실현...필터 배열 대량 생산으로 비용 절감, 이번 연구 성과 후속으로 기술사업화를 위해 투자를 유치하고 전 세계 수출을 목표로 휴대폰에 카메라처럼 탑재 가능한 모듈을 만들 계획		

과제번호	2021R1A2B5B03002118		
보도게재일자	20220425	보도및게재처	전자신문
기사제목	이선규 명예교수 등 GIST 교직원 9명 과학기술 진흥 공로 수상		
관련연구업적	센서지능화 및 머신러닝 등 신분야 개척에 선도적인 역할을 하는 데 기여한 이흥노 전기전자컴퓨터공학부 교수가 국무총리상을 받았다.		

[붙임2-1] 연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 연구실적

○ 논문 및 특허 실적(최대 5개 작성)

번호	구분 (논문/특허)	논문명/특허명	소속기관명	역할	논문게재지 /특허등록 국가	논문게재일 /특허등록일	특기사항
1	논문	Mass production-enabled computational spectrometers based on multilayer thin films	광주과학기술원	교신저자	SCIENTIFIC REPORTS	2022.03	(IF: 4.997)
2	논문	Evolving Fusion-Based Visibility Restoration Model for Hazy Remote Sensing Images Using Dynamic Differential Evolution	광주과학기술원	교신저자	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	2022.03	(IF: 8.125)
3	논문	MLNet: Metaheuristics-Based Lightweight Deep Learning Network for Cervical Cancer Diagnosis	광주과학기술원	교신저자	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS	2023.10	(IF: 7.7)
4	논문	Efficient Evolving Deep Ensemble Medical Image Captioning Network	광주과학기술원	교신저자	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS	2023.02	(IF: 7.7)
5	논문	TomFusioNet: A tomato crop analysis framework for mobile applications using the multi-objective optimization based late fusion of deep models and background elimination	광주과학기술원	교신저자	APPLIED SOFTWARE COMPUTING	2023.01	(IF: 8.7)

○ 기타 실적(논문 및 특허 외 기타 실적 입력)

[붙임2-2] 주관연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 논문·특허실적 요약문

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		연구책임자 (이흥노)		
논문/특허명		Mass production-enabled computational spectrometers based on multilayer thin films		
논문실적정보 □	게재지(저널명)	SCIENTIFIC REPORTS		
	SCI 등재 여부	등재	인용횟수(SCI)	4.997 (2회)
	SCOPUS 등재 여부	등재	인용횟수(SCOPUS)	3회
	ISSN	2045-2322	게재년월	2022.03
역할(제1, 교신, 참여)		교신저자	참여자수	4명

요 약 문

본 논문은 다층 박막(Multilayer Thin Films, MTF) 필터 어레이를 이용한 계산용 분광기에 관한 것이다. 이 분광기는 스텐실 리소그래피를 사용했다. MTF 필터 어레이는 6×6 정사각형 격자로 구성되어 있고, 단일 웨이퍼에 동일한 어레이가 169개 제작되었다. 이 분광기는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 이미지 센서에 MTF 필터 어레이를 부착하여 구성된다. 단일 노출로, 36개의 독특한 광선 강도가 수집된다. 이렇게 수집된 강도와 수치 최적화 기술을 사용하여 입사 광선의 스펙트럼을 복원한다. 500nm에서 849nm 범위의 다양한 광원은 1nm 간격으로 복원되며, 복원된 스펙트럼은 격자 기반 분광기로 측정된 기준 스펙트럼과 잘 일치한다. MTF 필터 어레이를 사용한 계산용 편광 분광 이미징도 시연되었다. 스펙트럼 스캐닝 방법을 적용하여 36개의 단색 필터 이미지를 수집하고, 500nm에서 849nm 범위에서 1nm 간격으로 350개의 단색 이미지를 복원했다. 이러한 계산용 분광기는 소형 크기, 고해상도, 넓은 작동 범위가 필요한 다양한 응용 분야에 유용할 수 있다. 이 연구로 크기가 작고, 높은 해상도를 요구하며, 넓은 작동 범위가 필요한 다양한 응용 분야에 적용 가능한 분광기를 제작할 수 있으며 부착할 수 있다. 이 기술은 다양한 광원의 스펙트럼을 정밀하게 복원할 수 있으며, 특히 단일 웨이퍼에서 대량으로 생산할 수 있는 장점이 있다.

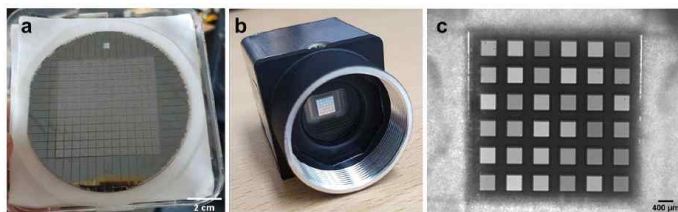


Figure 2. Fabricated MTF filter array. (a) 169 identical MTF filter arrays fabricated in a single wafer. (b) Photograph of the CMOS image camera with the fabricated MTF filter array. (c) Monochrome image of the fabricated MTF filter array illuminated by a halogen light source.

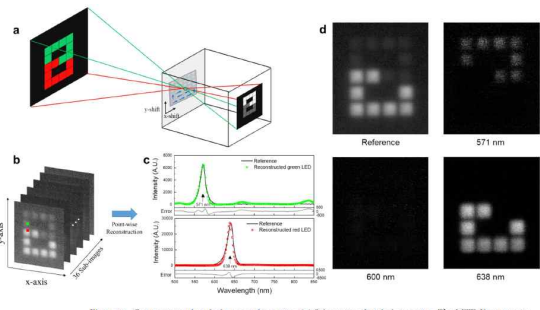


Figure 6. Computational pinhole spectral imaging. (a) Schematic of pinhole imaging: The MTF filter array is placed in front of the pinhole camera. A single filter is adjusted to the pinhole and the filtered image is acquired. By changing filters, 36 filtered images are obtained. (b) 36 filtered images of 8×8 LED matrix showing the number "8". The upper part consists of green LEDs and the lower part consists of red LEDs. (c) Point-wise spectral reconstruction: a pixel of a green LED block and a red LED block which are denoted in (b). Solid light gray lines represent error between reconstructed and reference. (d) Monochrome image of reference and reconstructed monochrome images at 571, 600 and 638 nm, respectively.

연구 목표 및 연구내용과의 연관성	기대성과 및 파급 효과
본 논문에서의 연구 결과를 바탕으로, 광학 및 초분광 이미징 분야에서의 복잡한 광학계를 간소화하고, 스펙트럼 이미징의 대중화를 위한 가능성을 확인하였다. 제안하는 시스템에 기반한 초분광 스펙트로미터는 초소형 저비용으로 대량생산이 가능하며, 실제 이를 지난 연구기간동안 제작함으로써 검증하였다.	해당 연구 성과는 HSI 시스템을 활용하여 의료 진단, 환경 모니터링, 산업 검사 등 광범위한 초분광 응용 분야에 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		연구책임자 (이흥노)		
논문/특허명		Evolving Fusion-Based Visibility Restoration Model for Hazy Remote Sensing Images Using Dynamic Differential Evolution		
논문실적정보 □	게재지(저널명)	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING		
	SCI 등재 여부	등재	인용횟수(SCI)	8.125 (34회)
	SCOPUS 등재 여부	등재	인용횟수(SCOPUS)	39회
	ISSN	1588-0644	게재년월	2022.03
역할(제1, 교신, 참여)		교신저자	참여자수	5명

요 약 문

원격 감지를 하고 있을 때 대기의 영향으로 비디오 영상 또는 이미지에서 연기 같은 모습을 관찰할 수 있다. 이때 중요한 정보의 손실이 발생하며, 이를 해결하기 위한 가시성 복원 기술이 필요하다. 본 논문에서 제시된 기술을 기반으로 하여, 가시성을 향상시키는 방법론을 제안한다. 제안된 모델은 다양한 단계를 통해 입력된 원격 감지 이미지에서 탁함 정도를 제거한다.

초기 단계에서는 입력 이미지에 대한 luminance-based transmission map을 생성하여, 대기 중의 미세 입자로 인한 빛의 산란과 흡수를 추정한다. 이후 oblique gradient prior를 적용하여 더욱 정밀한 transmission map을 얻는다. 다음으로, 이 전달 맵을 사용하여 대기적 veil을 제거하고, variational refinement와 융합 모델을 적용하여 최종적으로 복원된 이미지를 얻는다. 이 과정은 dynamic differential evolution 알고리즘을 활용하여 최적화되며, 이는 모델이 다양한 환경과 조건에서도 탁월한 복원 능력을 발휘할 수 있도록 한다.

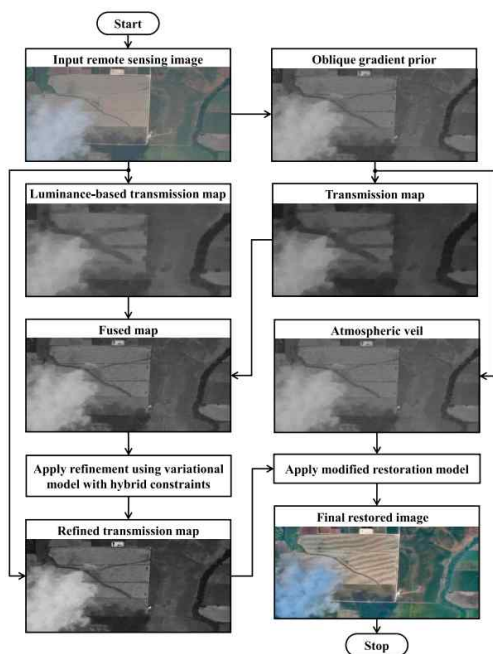


Fig. 1. Proposed haze restoration model for remote sensing images.

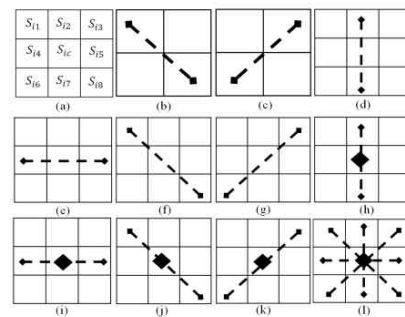


Fig. 2. Oblique gradient-based mask and 11 oblique edges with different mask sizes. (a) 3×3 mask. (b) Primary diagonal oblique edge with 2×2 mask. (c) Secondary diagonal oblique edge with 2×2 mask. (d) Vertical orthogonal edge for 3×3 mask without center. (e) Horizontal orthogonal edge for 3×3 mask without center. (f) Primary diagonal oblique edge with 3×3 mask without center. (g) Secondary diagonal oblique edge with 3×3 mask without center. (h) Vertical orthogonal edge for 3×3 mask with center. (i) Horizontal orthogonal edge for 3×3 mask with center. (j) Primary diagonal oblique edge with 3×3 mask and center. (k) Secondary diagonal oblique edge with 3×3 mask and center. (l) Oblique gradient channel prior with center.

연구 목표 및 연구내용과의 연관성	기대성과 및 파급 효과
이 모델은 실측 데이터를 기반으로 한 학습을 통해, 복원된 이미지의 품질을 높이고, 유용한 정보의 손실을 최소화하는 방안을 제시한다. 제안하는 방법의 가변성 및 확장성은 FL 환경 속에서 효과적인 학습 모델 구축이 가능하며, DistL 환경 속에서 데이터 활용에 용이함을 검증하였다.	본 연구 성과는 HSI 이미징 영상에 대한 응용 분야, 즉, 지형 탐사, 재난 감시 및 기후 변화 연구에 적용 가능한 모델로써, 비 가시적 환경으로 인한 이미지 정보 손실을 줄이고, 선명하고 정밀한 이미지 분석이 가능할 것으로 기대한다.

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		연구책임자 (이흥노)		
논문/특허명		MLNet: Metaheuristics-Based Lightweight Deep Learning Network for Cervical Cancer Diagnosis		
논문실적정보 □	게재지(저널명)	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS		
	SCI 등재 여부	등재	인용횟수(SCI)	7.7 (7회)
	SCOPUS 등재 여부	등재	인용횟수(SCOPUS)	8회
	ISSN	2168-2194	게재년월	2023.10
	역할(제1, 교신, 참여)	교신저자	참여자수	4명

요 약 문

본 논문은 자궁경부암 진단을 위한 경량 딥러닝 네트워크인 MLNet을 제안한다. 이 연구는 특히 자궁경부암, 여성 건강에 중대한 영향을 미치는 질병에 초점을 맞추고 있다. MLNet은 과적합, 파라미터 튜닝, 그래디언트 소실 문제들을 극복하기 위해 개발되었으며, 복잡한 자궁경부암 데이터셋에 대한 자동화된 분류를 달성하기 위해 메타휴리스틱 기반 접근 방식을 사용한다. 주요 기여로는 CNN의 하이퍼파라미터 튜닝 문제를 다목적 문제로 정의하고, 입자 군집 최적화(PSO) 및 동적 하이브리드 니칭 차별화 진화(DHDE)를 사용하여 하이퍼파라미터를 최적화하는 새로운 접근 방식을 제시한다. 실험 결과는 MLNet이 Herlev, SIPaKMeD, Mendeley LBC 데이터셋에서 뛰어난 성능을 보이며, 특히 정확도, F-측정, 민감도, 특이성 및 정밀도 측면에서 기존 모델을 상회한다는 것을 보여준다.

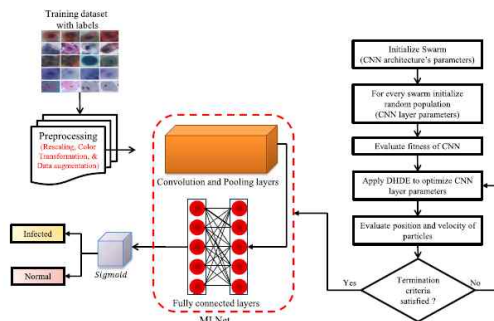


Fig. 1. MLNet: Metaheuristics-based lightweight deep learning network for cervical cancer diagnosis.

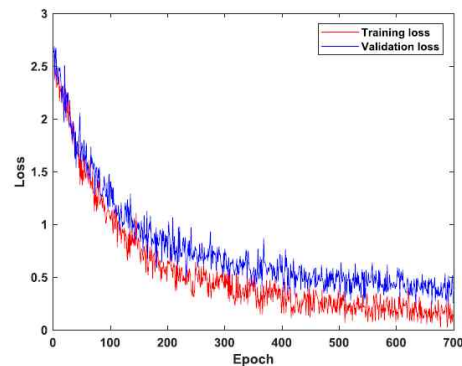


Fig. 2. Training and validation loss analyses of MLNet on Herlev dataset.

TABLE VI
COMPARATIVE ANALYSIS BASED ON SIPAKMED DATASET

Models	Acc	Spec.	Sens./Rec	Pre	F1
GCNN [15]	98.3	98.6	98.8	-	99.3
ResNet50 [16]	98.8	98.7	99.1	-	98.7
EPDFE [22]	98.26	-	98.28	98.27	98.28
CNN-F [23]	98.55	-	98.52	98.57	98.54
VGG [24]	97.80	99.50	98.10	99.26	98.43
ResNet152 [25]	94.89	-	96.0	96.0	96.0
CNN [26]	97.87	-	99.12	98.56	98.89
MLNet	99.31	99.37	99.26	99.29	99.24

TABLE VII
COMPARATIVE ANALYSIS BASED ON MENDELEY LBC

Models	Acc	Spec.	Sens./ Rec	Pre	F1
EPDFE [22]	99.27	-	98.21	99.26	98.73
CNN-F [23]	99.23	-	99.23	99.13	99.18
CNN [26]	99.27	-	99.27	99.14	99.20
c-CNN [27]	96.89	-	93.75	93.38	94.15
MLNet	99.36	99.47	99.32	99.35	99.32

연구 목표 및 연구내용과의 연관성

해당 논문에서 MLNet 학습을 위해 사용된 PSO 및 DHDE는 딥러닝 모델 내 과적합 문제 및 Hyper-parameter 최적화 문제를 해결하기 위한 방법이다. 이는 TL 및 IL을 적용 시 모델 내 최적화를 위해 적합한 방법이며, 분산 네트워크 환경에서의 서로다른 파라미터 간 최적화 문제, 즉 DistL 내 모델 학습에 사용될 수 있다.

기대성과 및 파급 효과

본 연구 성과는, 분산 네트워크 환경에서의 최적화 문제를 푸는 방법에 대해 다룬다. 이는 미래 스마트 네트워크 환경에서의 다양한 어플리케이션에 사용될 수 있으며, 분산 스마트 인증 네트워크 내 최적화 문제에도 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		연구책임자 (이흥노)		
논문/특허명		Efficient Evolving Deep Ensemble Medical Image Captioning Network		
<div> <div>논문실적정보</div> <div>□</div> </div>	게재지(저널명)	IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS		
	SCI 등재 여부	등재	인용횟수(SCI)	7.7 (3회)
	SCOPUS 등재 여부	등재	인용횟수(SCOPUS)	4회
	ISSN	2168-2194	게재년월	2023.02
	역할(제1, 교신, 참여)	교신저자	참여자수	5명

요 약 문

본 논문에서는 의사와 환자에게 설명 정보를 제공하기 위해 효율적인 딥 앙상블 의료 영상 캡션 네트워크(DCNet)를 제안한다. DCNet은 VGG16, ResNet152V2, DenseNet201과 같이 잘 알려진 세 가지 사전 학습된 모델을 조합해 하나의 모델과 같은 구조로 만듭니다(Ensemble). 이로 인해 제안하는 모델은 과적합 문제를 방지하여 더 나은 결과를 얻을 수 있게 했다. 또한, DCNet의 제어 파라미터(control parameter)를 조정하기 위해 자기 적응 파라미터 제어 기반 차별화 진화(SAPCDE)를 사용하는 진화형 DCNet(EDC-Net)을 제안했다. 모델 구조적으로, VGG16, ResNet152, DenseNet201과 같은 여러 깊은 신경망 모델들을 통합하여 이미지의 특징을 추출하고, 이를 Gated Recurrent Unit(GRU)에 통합하여 정확한 캡션을 생성하는 프로세스를 제안한다.

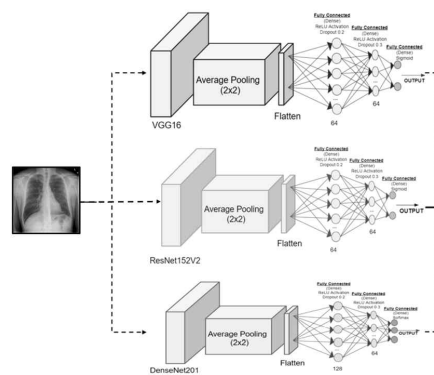


Fig. 1. Proposed ensemble deep transfer network with gated recurrent unit.

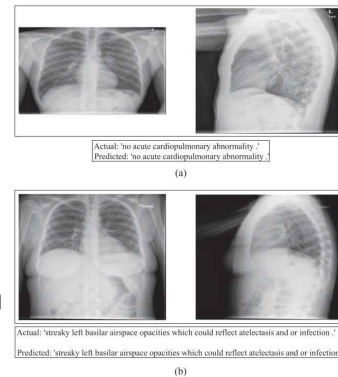


Fig. 6. Correctly classified captions.

TABLE I
BLUE SCORE AND KAPPA STATISTICS (KS) ANALYSIS OF THE EDC-NET

Model	BLUE-1	BLUE-2	BLUE-3	BLUE-4	KS
RMN	0.563	0.342	0.229	0.125	0.919
VGG16	0.568	0.364	0.249	0.126	0.923
CNN-RNN	0.511	0.351	0.253	0.123	0.912
DMSFF	0.539	0.353	0.244	0.126	0.924
DGGAN	0.563	0.365	0.238	0.127	0.932
ResNet152V2	0.571	0.309	0.256	0.119	0.896
DenseNet201	0.574	0.327	0.227	0.128	0.938
MVE_1	0.573	0.363	0.252	0.127	0.934
Min_1	0.571	0.361	0.250	0.124	0.915
Max_1	0.569	0.359	0.249	0.121	0.908
EDC-Net	0.577	0.367	0.258	0.129	0.952

TABLE II
COMPARATIVE ANALYSIS OF EDC-NET WITH THE STATE-OF-THE-ART MODELS

Model	BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4
mDiAP-LSTM [27]	0.373	0.226	0.147	0.101
Full-ARL [29]	-	-	-	0.125
R-paraNet (VGG-19)[30]	0.505	0.329	0.230	0.168
R-paraNet (DenseNet-19)[30]	0.503	0.333	0.236	0.175
HRGR-Agent [31]	0.438	0.298	0.208	0.151
HLSTM [32]	0.455	0.288	0.205	0.154
KERP [28]	0.216	0.214	0.087	0.066
EDC-Net	0.516	0.348	0.238	0.178

연구 목표 및 연구내용과의 연관성

해당 논문은 Average Pooling 및 Flatten 작업을 통해 모델 별로 핵심적인 특징을 추출하고, 최종적으로 Ensemble 통합하여 입력 영상에 대한 설명을 생성한다. 이는 주어진 영상에 대한 정밀한 분석을 가능케 하며, 추출된 특징을 활용한 OoD 및 IL에 사용될 수 있다. 나아가 Ensemble 모델로부터의 DistL 환경에의 기술 응용이 가능한 방법이다.

기대성과 및 파급 효과

본 연구 결과를 통해 초분광 이미지, 전파 습득 이미지 처리 기술의 향상을 기대할 수 있습니다. 기본적으로 딥러닝 기반 신호 분류 및 복원 알고리즘은 영상 기반 심층 의미 분석 기술이 자주 쓰인다. 이 과정에서의 고해상도 영상 분석 기술은 후속 연구에서의 전파 및 초분광 이미지 해석 기술에 큰 도움을 줄 수 있다.

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		연구책임자 (이흥노)		
논문/특허명		TomFusioNet: A tomato crop analysis framework for mobile applications using the multi-objective optimization based late fusion of deep models and background elimination		
논문실적정보 □	게재지(저널명)	APPLIED SOFT COMPUTING		
	SCI 등재 여부	등재	인용횟수(SCI)	8.7 (0회)
	SCOPUS 등재 여부	등재	인용횟수(SCOPUS)	0회
	ISSN	1568-4946	게재년월	2023.01
역할(제1, 교신, 참여)		교신저자	참여자수	5명

요 약 문

본 논문은 토마토 작물을 대상으로 하는 질병을 신속하게 인식하기 위한 TomFusioNet 이라는 프레임워크를 제안한다. 이 프레임워크는 모바일 어플리케이션 환경에서 작동할 수 있게 설계했다. 기존 모델들은 오버피팅과 그래디언트 소실과 같은 성능 문제로 실적용이 어려웠다. 이 문제를 해결방법으로 제안하는 TomFusionNet은 late-fusion 기술을 사용하여 Maximum Likelihood 예측 전략으로 수정된 교차 도메인 Transfer learning 모델의 결과를 종합하여 feature extraction을 하는 meta-learner로 다층 퍼셉트론 모델을 사용한다. TomFusioNet은 DeepRec 및 DeepPred 두 모듈로 구성되어 있으며, DeepRec은 초기 질병 인식 결과를 제공하고 DeepPred는 작물의 질병 유형을 식별한다. 신속한 모바일 환경을 제공하고자 불필요한 계산을 줄이기 위해 로직 게이트 매핑(logic gate mapping)을 사용했다. DeepPred의 하이퍼파라미터는 성능 향상을 위해 다목적 최적화 기반의 비종속 분류 유전 알고리즘 II(non-dominated sorting genetic algorithm II)를 사용해 조정되게 한다. 특징(feature)의 중요성을 강조하기 위해 HSV(색상, 채도, 명도) 색상 모델 기반의 배경 제거 기술도 제안한다. 제안한 앱 프레임워크의 작동은 알고리즘 기반으로 자동 실행되고 프레임워크의 대기 시간은 2초 미만으로 신속한 토마토 작물 분석에 효과적이다.

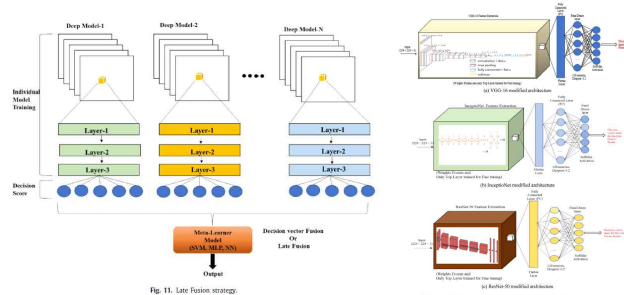


Fig. 11. Late Fusion strategy.

Fig. 12. Distribution of multiple feature extraction and selection applying the late fusion strategy.

Table 8
Performance evaluation with SOTA Deep Learning methodologies of the past.

State-of-art study	Accuracy rate (%)
Hlaing et al. [38]	84%
Durmus et al. [61]	94.3%
Karthik et al. [15]	98%
Khan et al. [91]	93%
Widiyanto et al. [92]	96.60%
DeepRec (Proposed)	99.93%
NSGA-II based DeepPred (Proposed)	98.32%

Table 9
Performance evaluation with SOTA ensemble and evolutionary Deep Learning methodologies of the past.

State-of-art study	Methodology	Accuracy rate (%)
Kim et al. [93]	Ensemble	97.19%
Hassanien [94]	Evolutionary	91.50%
Moussafir [95]	Evolutionary	98.10%
Astani [96]	Ensemble	95.98%
Chen [97]	Ensemble	99.61%
Sutaji [98]	Ensemble	99.10%
DeepRec (Proposed)	Ensemble	99.93%
NSGA-II based DeepPred (Proposed)	Evolutionary	98.32%

연구 목표 및 연구내용과의 연관성

해당 논문에서 제안된 모델은 Cross Domain으로부터의 TL을 사용하여 복합적 특징 추출을 이용한다. 이는 추출된 특징을 이용한 OoD 검출 및 IL에 유용한 방법이며, 개별 Feature Extractor 모델의 활용을 통한 분산 학습 환경, 즉 DistL에서의 응용 가능성을 확인할 수 있다.

기대성과 및 파급 효과

본 연구 결과는, 분산 모델 간의 최적화 문제를 다루는 내용이다. 이는 분산 전파 식별 시스템 및 초분광 이미지 시스템에서의 분산 데이터 처리 기술을 향상시키는데 활용될 수 있다.

OPEN **Mass production-enabled computational spectrometers based on multilayer thin films**

Cheolsun Kim¹, Pavel Ni¹, Kang Ryeol Lee² & Heung-No Lee^{1,2}

Multilayer thin film (MTF) filter arrays for computational spectroscopy are fabricated using stencil lithography. The MTF filter array is a 6 × 6 square grid, and 169 identical arrays are fabricated on a single wafer. A computational spectrometer is formed by attaching the MTF filter array on a complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) image sensor. With a single exposure, 36 unique intensities of incident light are collected. The spectrum of the incident light is recovered using collected intensities and numerical optimization techniques. Varied light sources in the wavelength range of 500 to 849 nm are recovered with a spacing of 1 nm. The reconstructed spectra are a good match with the reference spectra, measured by a grating-based spectrometer. We also demonstrate computational pinhole spectral imaging using the MTF filter array. Adapting a spectral scanning method, we collect 36 monochromatic filtered images and reconstructed 350 monochromatic images in the wavelength range of 500 to 849 nm, with a spacing of 1 nm. These computational spectrometers could be useful for various applications that require compact size, high resolution, and wide working range.

Spectrometers are powerful tools for remote sensing and medical applications^{1–3}. However, these uses are restricted to research and development due to limitations based on the spectrometers' bulky size, high cost, and long measuring time. There have been tremendous efforts to overcome spectrometer limitations and go beyond restricted applications^{4–21}. One promising candidate to achieve this is optical filter array-based spectrometers: complementary metal–oxide–semiconductor (CMOS) image sensors with a filter array used as a spectrometer. These spectrometers are smaller and have faster measuring times, so they are useful in portable applications, such as on-site detection and small unmanned aerial vehicle (UAV)-based remote sensing. However, the number of filters that can be attached to a CMOS image sensor is limited due to its small sensing area. Thus, these spectrometers offer a low spectral resolution.

Over the past decade, computational approaches^{22,23} have been adapted for filter-based spectrometers. The spectral resolution in conventional filter array-based spectrometers has been improved using computational approaches. New optical filter types have been proposed that work well in computational approaches and achieve further improvements^{6–8,10,11,13,14,16,21}. Unlike conventional optical filters, which selectively transmit incident light in specific wavelengths and reflect the remaining wavelengths, these filters, called random spectral filters, modulate and transmit incident light with unique spectral features in the entire wavelength ranges of interest. Various types of random spectral filters have been proposed, such as etalon filters^{10,11,20}, quantum dot filters^{8,21}, photonic crystal slabs^{7,9,14,16}, and multilayer thin films (MTF) filters^{6,13}. The spectral resolvability of computational spectroscopy has been successfully demonstrated using random spectral filters with low correlation among filters.

In contrast to transmission functions of an etalon filter, which consists of repetitive narrow peaks, and a quantum dot filter, which consists of a broadband peak, the fabricated random spectral filter has a transmission function of multiple peaks with various full widths at half maximums (FWHMs) and has a large difference between maximal and minimal transmission in the transmission function. By utilizing the computational approaches, a wide wavelength range can be covered with a small number of MTF filters. In this work, a small number of MTF-based random spectral filters were fabricated in the form of an array. 169 identical filter arrays, consisting of 36 MTF filters, were fabricated on a single wafer. We realized MTF filters by stacking multiple layers of two alternating materials with high and low refractive indices. Using stencil lithography based on shadow masks, we could fabricate MTF filters with different spectral features simultaneously as a filter array form. This idea of random spectral filters can be applied to various wavelength ranges by changing the MTFs' design properties.

¹School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, South Korea. ²SNi Co., Ltd., Seongnam, Gyeonggi 13509, South Korea. [✉]email: heungno@gist.ac.kr

29. Wang, S.-W. et al. 128 channels of integrated filter array rapidly fabricated by using the combinatorial deposition technique. *Appl. Phys. B* **88**, 281–284 (2007).
30. Candes, E. & Romberg, J. *l1-magic: Recovery of Sparse Signals Via Convex Programming*, Vol. 4, 14 (2005) www.acm.caltech.edu/l1magic/downloads/l1magic.pdf.
31. Koh, K., Kim, S. & Boyd, S. *l1-ls: A Matlab Solver for Large-Scale l1-Regularized Least Squares Problems* (2008).
32. Tanida, I. et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): Concept and experimental verification. *Appl. Opt.* **40**, 1806–1813 (2001).
33. Gupta, N., Ashe, P. R. & Tan, S. Miniature snapshot multispectral imager. *Opt. Eng.* **50**, 033203 (2011).
34. Geelen, B., Tack, N. & Lambrechts, A. A snapshot multispectral imager with integrated tiled filters and optical duplication. In *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VI*, Vol. 8613, 861314 (International Society for Optics and Photonics, 2013).

Acknowledgements

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean government (MSIP) (NRF-2021R1A2B5B03002118).

Author contributions

C.K. and H.-N.L. conceptualized the idea. C.K., P.N. and K.R.L. performed the design and fabrication of the MTF filter arrays. C.K. and P.N. conducted optical experiments and reconstructions. C.K. visualized the experiments results. All authors wrote the manuscript.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08037-y>.

Correspondence and requests for materials should be addressed to H.-N.L.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022

Evolving Fusion-Based Visibility Restoration Model for Hazy Remote Sensing Images Using Dynamic Differential Evolution

Dilbag Singh[✉], Senior Member, IEEE, Manjit Kaur[✉], Member, IEEE,

Mohamed Yaseen Jabarulla[✉], Member, IEEE,

Vijay Kumar, and Heung-No Lee[✉], Senior Member, IEEE

Abstract—Remote sensing images taken during poor environmental conditions are degraded by the scattering of atmospheric particles, which affects the performance of many imaging systems. Hence, an efficient visibility restoration model is required to remove haze from distorted images. However, the design of visibility restoration models is an ill-posed problem as the physical information, such as depth information and attenuation model, is usually unknown. The physical parameters computed using existing models, such as dark channel prior and gradient channel prior, are not accurate, especially for images with large haze gradients. Therefore, in this article, an evolving visibility restoration model is proposed for remote sensing images. Initially, the fusion-based transmission map is computed from the foreground and sky regions. The transmission map is further improved by designing a hybrid constraint-based variational model. Finally, a dynamic differential evolution is utilized to optimize the control parameters of the proposed model. The proposed model is validated on 50 synthetic benchmarks and 50 real-life remote sensing images. For comparative analysis, ten well-known restoration models are also considered. The comparative analysis demonstrates that the proposed model outperforms the existing restoration models.

Index Terms—Attenuation model, dark channel prior (DCP), depth information, dynamic differential evolution, evolving model, fusion-based transmission map, gradient channel prior, haze, large haze gradient, remote sensing images, variational model, visibility restoration.

1. INTRODUCTION

IN RECENT years, remote sensing images are extensively utilized in various applications. Since optical remote sensors are far from the surface of the Earth through the

atmosphere layer, therefore, these images suffer from poor spatial and spectral information issues [1], [2]. Even images captured during the sunny environment also contain some amount of haze due to the higher distance between satellite camera and Earth [3], [4]. The haze, fog, or smog attenuates the actual object's radiance as the distance between the Earth surface and satellite camera increases [5], [6]. An optical imaging model can be represented as [7], [8]

$$S_i(i, j) = A_r(i, j)t(i, j) + (1-t(i, j))a_v \quad (1)$$

where S_i represents a hazy image, A_r shows the actual scene radiance of the image, and t and a_v denote transmission map and global atmospheric veil, respectively. The primary objective of the single-image haze restoration model is to estimate A_r from S_i . However, t and a_v are unknown [9], [10]. Therefore, the efficient estimation of t and a_v is required to obtain the haze-free images [5]. The coordinates of pixel values in the image are represented by using (i, j) .

Multiple-image-based dehazing models can efficiently restore the hazy images [11]. These models need physical features of actual images in a prior [12]–[14]. However, in real-time applications, multiple images and physical features of the same scene are not available [15], [16]. Therefore, researchers have designed and implemented various single-image dehazing models. The depth information was utilized to estimate the physical feature of hazy images [17], [18]. However, depth information models suffer from halo artifacts, gradient reversal artifacts, texture distortion, edge, and pixel degradation. Dark channel prior (DCP) was proposed to overcome these problems [7]. DCP assumes that the intensity value of at least one color channel is near to zero in clear days. However, DCP was effective only for images that have a low density of haze [19]. Therefore, depth map-based restoration models, such as bounded DCP [20], sparse DCP [21], adaptive bichannel priors [22], boosting dark channel [23], gradient channel prior [24], and DCP based variational model [25], were proposed. However, these models suffer from gradient and texture distortion problems.

To obtain more efficient results, a fusion-based defogging model (FDM) was implemented [26]. Gaussian-based DCP was used to estimate atmospheric light. To prevent overenhancement in the sky region, contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) was used to improve the fine

Manuscript received November 11, 2021; revised February 17, 2022; accepted February 26, 2022. Date of publication March 2, 2022; date of current version April 5, 2022. This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIP) under Grant NRF-2021R1A2B5B03002118; and in part by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, through the Information Technology Research Center (ITRC) Support Program supervised by the Institute of Information and Communications Technology Planning and Evaluation (IITP) under Grant IITP-2021-0-01835. (Corresponding author: Heung-No Lee.)

Dilbag Singh, Manjit Kaur, Mohamed Yaseen Jabarulla, and Heung-No Lee are with the School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, South Korea (e-mail: dylg12@gmail.com; manjit.kr@yahoo.com; yaseen@gm.gist.ac.kr; heungno@gist.ac.kr).





Vijay Kumar is with the Computer Science and Engineering Department, National Institute of Technology, Hamirpur, Himachal Pradesh 177005, India (e-mail: vijaykumarchahar@gmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2022.3155765

1558-0644 © 2022 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

Authorized licensed use limited to: Kwangju Institute of Science and Technology. Downloaded on January 25, 2024 at 14:00:47 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

MLNet: Metaheuristics-Based Lightweight Deep Learning Network for Cervical Cancer Diagnosis

Manjit Kaur , Senior Member, IEEE, Dilbag Singh , Senior Member, IEEE, Vijay Kumar , and Heung-No Lee , Senior Member, IEEE

Abstract—One of the leading causes of cancer-related deaths among women is cervical cancer. Early diagnosis and treatment can minimize the complications of this cancer. Recently, researchers have designed and implemented many deep learning-based automated cervical cancer diagnosis models. However, the majority of these models suffer from over-fitting, parameter tuning, and gradient vanishing problems. To overcome these problems, in this paper a metaheuristics-based lightweight deep learning network (MLNet) is proposed. Initially, the hyper-parameters tuning problem of convolutional neural network (CNN) is defined as a multi-objective problem. Particle swarm optimization (PSO) is used to optimally define the CNN architecture. Thereafter, Dynamically hybrid niching differential evolution (DHDE) is utilized to optimize the hyper-parameters of CNN layers. Each particle of PSO and solution of DHDE together represent the possible CNN configuration. F-score is used as a fitness function. The proposed MLNet is trained and validated on three benchmark cervical cancer datasets. On the Herlev dataset, MLNet outperforms the existing models in terms of accuracy, f-measure, sensitivity, specificity, and precision by 1.6254%, 1.5178%, 1.5780%, 1.7145%, and 1.4890%, respectively. Also, on the SiPaKMeD dataset, MLNet achieves better performance than the existing models in terms of accuracy, f-measure, sensitivity, specificity, and precision by 2.1250%, 2.2455%, 1.9074%, 1.9258%, and 1.8975%, respectively. Finally, on the Mendeley LBC dataset, MLNet achieves better performance than the competitive models in terms of accuracy, f-measure, sensitivity, specificity, and precision by 1.4680%, 1.5845%, 1.3582%, 1.3926%, and 1.4125%, respectively.

Index Terms—Cervical cancer, deep learning, diagnosis, dynamically hybrid niching differential evolution.

Manuscript received 14 June 2022; revised 29 September 2022; accepted 31 October 2022. Date of publication 18 November 2022; date of current version 5 October 2023. This work was supported in part by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, through the ITRC (Information Technology Research Center) Support Program IITP-2021-2021-0-01835, supervised by the IITP (Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation), and in part by the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Korean government (MSIT) under Grant NRF-2021R1A2B5B03002118. (Corresponding author: Heung-No Lee.)

Manjit Kaur, Dilbag Singh, and Heung-No Lee are with the School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, South Korea (e-mail: manjit.kr@yahoo.com; dgil2@gmail.com; heungno@gist.ac.kr).

Vijay Kumar is with the Computer Science and Engineering Department, NIT Hamirpur, Hamirpur, Himachal Pradesh 177005, India (e-mail: vijaykumarchahar@gmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/JBHI.2022.3223127

lightweight deep learning network, metaheuristics, particle swarm optimization.

I. INTRODUCTION

CERVICAL cancer is found in the lower part of the uterus. The cell of cervix progressively grows in pre-cancerous cells and cultivates cancer. Cervical cancer is the fourth most life-threatening disease in females [1]. It is responsible for a 90% mortality rate in developing countries due to its unawareness of the disease and its impact on life [2]. The early detection of cervical cancer is done by using Pap testing [3]. In this test, the samples are taken from the cervix and examined by the pathologist for any abnormalities present in cervix [4]. Manual testing requires expert pathologists for abnormalities analysis. However, this process is time-consuming and error-prone. To handle these issues, automatic cell classification techniques are required.

The well-known automated analysis systems are BD Focal Point slide profiler [5] and ThinPrep [6]. These automated systems were approved by the Food and Drug Administration (FDA) of the US. These systems not only reduce the analysis time but also improve the classification performance. In recent years, artificial intelligence techniques are widely used for automatic cervical cell classification [7]. Most of the existing techniques utilize the concept of feature extraction to enhance the performance of the classifier and reduce the computational run time. Some of these techniques are support vector machine (SVM), K-nearest neighbor (KNN), and artificial neural networks (ANN). Machine learning techniques provide better results for small datasets. However, the medical dataset is large in size and complex in nature. Sometimes, the accurate classification through machine learning techniques is a little bit difficult due to the variations in shape and size of cells. The different feature extraction techniques provide different results. Hence, there is a need for an automatic feature extraction technique. For this, deep learning techniques are widely used.

Deep learning techniques are usually applied in several areas of medical imaging [8]. Among the existing deep learning techniques, convolutional neural networks (CNNs) are extensively used to classify cervical cells [9]. These techniques eliminate the need for pre-processing steps such as feature extraction. These techniques directly utilize the original image and reduce the

Efficient Evolving Deep Ensemble Medical Image Captioning Network

Dilbag Singh[✉], Senior Member, IEEE, Manjit Kaur[✉], Senior Member, IEEE, Jazem Mutared Alanazi, Ahmad Ali AlZubi[✉], and Heung-No Lee[✉], Senior Member, IEEE

Abstract—With the advancement in artificial intelligence (AI) based E-healthcare applications, the role of automated diagnosis of various diseases has increased at a rapid rate. However, most of the existing diagnosis models provide results in a binary fashion such as whether the patient is infected with a specific disease or not. But there are many cases where it is required to provide suitable explanatory information such as the patient being infected from a particular disease along with the infection rate. Therefore, in this paper, to provide explanatory information to the doctors and patients, an efficient deep ensemble medical image captioning network (DCNet) is proposed. DCNet ensembles three well-known pre-trained models such as VGG16, ResNet152V2, and DenseNet201. Ensembling of these models achieves better results by preventing an over-fitting problem. However, DCNet is sensitive to its control parameters. Thus, to tune the control parameters, an evolving DCNet (EDC-Net) was proposed. Evolution process is achieved using the self-adaptive parameter control-based differential evolution (SAPCDE). Experimental results show that EDC-Net can efficiently extract the potential features of biomedical images. Comparative analysis shows that on the Open-i dataset, EDC-Net outperforms the existing models in terms of BLUE-1, BLUE-2, BLUE-3, BLUE-4, and kappa statistics (KS) by 1.258%, 1.185%, 1.289%, 1.098%, and 1.548%, respectively.

Index Terms—Medical, diagnosis, pre-trained models, explanatory information.

I. INTRODUCTION

WITH the advancement in artificial intelligence (AI) based E-healthcare applications, the role of automated

diagnosis of various diseases has increased at a rapid rate. Deep learning models have recently been used by many researchers to classify patients suffering from a particular disease. But these models generally provide results in a binary fashion such as whether the patient is infected from a specific disease or not. However, there are many cases where it is required to provide suitable information to the patients such as the patient being infected with some disease with this much infection rate. Therefore, these days many researchers have started utilizing image captioning techniques to provide explanatory information to doctors and patients.

Recently, semantic concepts were used to detect the captions from the image. Image-caption pairs were used to train the concept detector. However, it suffers from vocabulary discrepancy and deficiency of required information [1]. To increase the accuracy of pathological information in diagnostic reports, Semantic fusion networks (SFNet) were utilized [2]. Attention-based models were also used in image captioning. The attention masks were queried using hidden states of LSTM from image features. It provided better image information for training deep sequential networks. However, these models did not ensure that layers significantly focused on regions of interest due to indirectly supervised learning [3]. These problems were overcome by utilizing differentiable neural networks to obtain the captions from the images [4]. To describe the disease information in ultrasound images, LSTM was used to decode the encoding vectors [5].

Most image captioning techniques are based on visual information and rarely rely on semantic content. Therefore, it is also needed to express the emotions of text descriptions for better captioning. Yang et al. [6] made sentences using both emotional and visual information by combining latent codes. The quality of AI-generated diagnostic reports is equally important as the development of models. However, [6] performs poorly for images with poor visibility.

Babar et al. [7] proposed a new measure to evaluate the quality of generated diagnostic reports. Convolutional neural network (CNN)-based image captioning models can retain only a few features of the original image. The image captioning DCNet based on a recurrent neural network (RNN) suffers from a gradient vanishing problem. The multimodal fusion method solved these issues by using CNN and RNN into the same DCNet for image captioning [8]. A semi-supervised deep generative DCNet generated the description more naturally from images [9]. An adaptive multimodal attention network was also designed to produce better quality captioned images [10].

Manuscript received 4 February 2022; revised 22 August 2022; accepted 30 September 2022. Date of publication 18 November 2022; date of current version 6 February 2023. This work was supported in part by the Ministry of Science and ICT, Korea, through the Information Technology Research Center Support Program under Grant IITP-2021-0-01835 supervised by the Institute for Information and Communications Technology Planning and Evaluation, in part by the National Research Foundation of Korea funded by the Korean Government, MSIP, under Grant NRF-2021R1A2B5B03002118, and in part by the Researchers Supporting Project, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, under Grant RSP-2021/395. (Corresponding author: Heung-No Lee.)

Dilbag Singh, Manjit Kaur, and Heung-No Lee are with the School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, South Korea (e-mail: dg-gil2@gmail.com; manjitkaur@gist.ac.kr; heungno@gist.ac.kr).

Jazem Mutared Alanazi and Ahmad Ali AlZubi are with the Computer Science Department, Community College, King Saud University, Riyadh 11451, Saudi Arabia (e-mail: ajazem@ksu.edu.sa; aalzubi@ksu.edu.sa).

Digital Object Identifier 10.1109/JBHI.2022.3223181

2168-2194 © 2022 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission. See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

Authorized licensed use limited to: Kwangju Institute of Science and Technology. Downloaded on January 25, 2024 at 14:22:45 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.



TomFusioNet: A tomato crop analysis framework for mobile applications using the multi-objective optimization based late fusion of deep models and background elimination

Harshit Kaushik^a, Anvi Khanna^b, Dilbag Singh^c, Manjit Kaur^c, Heung-No Lee^{c,*}

^a School of Computing and Information Technology, Manipal University Jaipur, Jaipur, Rajasthan 303007, India

^b Department of Computer Science and Engineering, Manipal University Jaipur, Jaipur, India

^c School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, South Korea



ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 July 2022

Received in revised form 23 October 2022

Accepted 27 November 2022

Available online 1 December 2022

Keywords:

Deep learning

Evolutionary computation

Image processing

Late fusion

Multi-objective optimization

ABSTRACT

Crop disease is a critical concern for the farmers which needs to be addressed to mitigate production loss. Multifarious frameworks have been proposed for the rapid recognition of tomato crop diseases, however, their practical deployment is a daunting task. The existing models suffer from performance issues such as overfitting and gradient vanishing. To alleviate these issues, this research proposes an end-to-end tomato crop analysis framework, TomFusioNet, for mobile applications. For feature extraction, the late-fusion technique is leveraged by aggregating the results of modified cross-domain transfer learning models using the maximum likelihood prediction strategy. Multi-layer Perceptron models are utilized as meta-learners. TomFusioNet's pipeline comprises two modules, namely, DeepRec and DeepPred. DeepRec provides preliminary disease recognition results while DeepPred further identifies the type of illness in crop. Logic gate mapping is employed to reduce unnecessary wastage of mobile computation. The hyperparameters of DeepPred are tuned using the multi-objective optimization based non-dominated sorting genetic algorithm II for performance enhancement. We highlighted the significance of feature relevancy; therefore, a hue, saturation and value (HSV) color model-based background elimination technique is also proposed. TomFusioNet can be incorporated in a smartphone app, conceptualized for remote crop monitoring. The proposed DeepRec and DeepPred models achieved an average accuracy of 99.93% and 98.32%, respectively. According to experimental results, TomFusioNet, which is built on NSGA-II, beats state-of-the-art models with a convergence loss of 0.021 and an AUC value of 99.10%. The proposed app framework's functioning does not require any human in loop. Furthermore, the latency of framework in real-time is less than 2 s, hence, it is effective for rapid tomato crop analysis.

© 2022 Published by Elsevier B.V.

1. Introduction

Agriculture plays an inevitable role in boosting the economic upturn of a country. According to [1], the agriculture sector of India contributes 35% to the national income and 14% in Gross Domestic Product (GDP). In India, tomato is the third most important crop after potato and onion, however, its harvest index is less than other nations [2]. Bacterial diseases are a serious restricting factor that threatens the healthy yield of tomatoes. These diseases affect the nutritional value of the crop which can have adverse effects on human health. Failure to timely gauge crop diseases would have a negative correlation with farmer's profit. Studies have shown that crop loss due to pests, diseases and weeds approximately range from 10% to 30% of overall crop

productions [2]. In the context of tomatoes, there are various pathogens responsible for a disease. For instance, an annual economic loss of 20%–70% is because of the *Blight* disease, which is caused by a fungal pathogen, i.e., *Phytophthora infestans* [3]. Tomatoes also retain a prominent place in the human diet and, therefore, its crop illness analysis is of significant value.

Traditionally tomato disease identification was done through manual human assessment by farmer which was a strenuous job. Also, this assessment methodology is subject to drawbacks such as high misjudgement error and less efficiency [4]. With the accelerated developments in the field of Artificial Intelligence, Internet of Things (IoT), and Cyber-physical Systems (CPS) several pragmatic solutions have been discussed in this domain. The agricultural sector has started adopting precision farming – an emanating farming management paradigm to develop a decision support mechanism for conducting a focussed assessment of infected crops and plants – for the early detection of inter-field

* Corresponding author.

E-mail address: hleungno@gist.ac.kr (H.-N. Lee).

CRediT authorship contribution statement

Harshit Kaushik: Conceptualisation, Modelling, Experimentation, Writing, Figures, Editing. **Anvi Khanna:** Analysis, Modelling. **Dilbag Singh:** Project administration, Supervision, Analysis, Writing – review & editing. **Manjit Kaur:** Supervision, Analysis, Writing – review & editing. **Heung-No Lee:** Supervision, Analysis, Writing – review & editing, Funding.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This work was partly supported by the MSIT (Ministry of Science and ICT), Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2021-0-01835) supervised by the IITP (Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation) and the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean government (MSIP) (NRF-2021R1A2B5B03002118).

References

- [1] Anil Kumar Singh, Ashutosh Upadhyaya, Sonia Kumari, Prem K. Sundaram, Pawan Jeet, Role of agriculture in making India \$5 trillion economy under corona pandemic circumstance: Role of agriculture in Indian economy, *J. AgriSearch* 7 (2) (2020) 54–58.
- [2] Sanjeev Kumar, Plant disease management in India: Advances and challenges, *Adv. J. Agric. Res.* 9 (15) (2014) 1207–1217.
- [3] Vipin Kumar Singh, Amit Kishore Singh, Ajay Kumar, Disease management of tomato through PGPR: current trends and future perspective, *3 Biosci* 7 (4) (2017) 1–10.
- [4] Andrew M. Mulla, Rebecca S. Bart, Image-based phenotyping of plant disease symptoms, *Front. Plant Sci.* 5 (2015) 734.
- [5] Abdelouahed Selmani, Hassan Oubehar, Mohamed Ouranoute, Abdelali Ed-Dahhak, Mohammed Guerbaoui, Abdelham Lachhah, Benachir Bouchikhi, Agricultural cyber-physical system enabled for remote management of solar-powered precision irrigation, *Biosyst. Eng.* 177 (2019) 18–30.
- [6] R. Sujatha, Jyoti May Chatterjee, N.Z. Jhanjhi, Sarfaraz Nawaz, Brohi, Performance of deep learning vs machine learning in plant leaf disease detection, *Microprocess. Microsyst.* 80 (2021) 103615.
- [7] Aboul Ella Hassanien, Tarek Gaber, Usama Mokhtar, Hesham Hefny, An improved moth flame optimization algorithm based on rough sets for tomato diseases detection, *Comput. Electron. Agric.* 136 (2017) 86–96.
- [8] Arya Kusuma, M. Dahvin Marno Putra, Tomato maturity classification using naive bayes algorithm and histogram feature extraction, *J. Appl. Intell. Syst.* 3 (1) (2018) 39–48.
- [9] Zhong-Qiu Zhao, Peng Zheng, Shou-tao Xu, Xindong Wu, Object detection with deep learning: A review, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 30 (11) (2019) 3212–3232.
- [10] Harshit Kaushik, Dilbag Singh, Manjit Kaur, Hammad Alsharfy, Aref Zaguia, Habib Hamam, Diabetic retinopathy diagnosis from fundus images using stacked generalization of deep models, *IEEE Access* 9 (2021) 108276–108292.
- [11] Shigeyuki Hamori, Minami Kawai, Takahiro Kume, Yuji Murakami, Chikara Watanabe, Ensemble learning or deep learning? Application to default risk analysis, *J. Risk Financ. Manag.* 11 (1) (2018) 12.
- [12] Harshit Kaushik, Tanus Kumar, Kirti Bhatta, iSecureHome: A deep fusion framework for surveillance of smart homes using real-time emotion recognition, *Appl. Soft Comput.* (2022) 108788.
- [13] Nilay Ganatra, Anil Patel, Deep learning methods and applications for precision agriculture, *Mach. Learn. Predict. Anal.* (2021) 515–527.
- [14] Sharada P. Mohanty, David P. Hughes, Marcel Salathé, Using deep learning for image-based plant disease detection, *Front. Plant Sci.* 7 (2016) 1419.
- [15] R. Karthik, M. Haritharan, Sundar Anand, Priyanka Mathikshara, Anne Johnson, R. Menaka, Attention embedded residual CNN for disease detection in tomato leaves, *Appl. Soft Comput.* 86 (2020) 105933.
- [16] Junde Chen, Defu Zhang, Md. Suzuddola, Adnan Zeb, Identifying crop diseases using attention embedded MobileNet-V2 model, *Appl. Soft Comput.* 113 (2021) 107901.
- [17] Marko Arsenovic, Mijana Karanovic, Srdjan Sladojevic, Andras Anderia, Darko Stefanovic, Solving current limitations of deep learning based approaches for plant disease detection, *Symmetry* 11 (7) (2019) 939.
- [18] Victor Gonzalez-Huiron, José A. Iedn-Borges, A.E. Rodriguez-Mara, Leonel Ernesto Amabilis-Sosa, Blenda Ramirez-Pereda, Hector Rodriguez, Disease detection in tomato leaves via CNN with lightweight architectures implemented in Raspberry Pi 4, *Comput. Electron. Agric.* 181 (2021) 105951.
- [19] Mercelin Francis, C. Deisy, Disease detection and classification in agricultural plants using convolutional neural networks—a visual understanding, in: 2015 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN, IEEE, 2019, pp. 1063–1068.
- [20] Arthur Z. da Costa, Hugo E.H. Figueroa, Juliana A. Fracardelli, Computer vision based detection of external defects on tomatoes using deep learning, *Biosyst. Eng.* 190 (2020) 131–144.
- [21] Mriunmayee Dhakare, A.B. Ingole, Diagnosis of pomegranate plant diseases using neural network, in: 2015 Fifth National Conference on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics, NCVPRIPG, IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [22] Sanjeev S. Samakhi, Vijay S. Rajpurohit, V.B. Nargund, Pallavi Kulkarni, Diagnosis and classification of grape leaf diseases using neural networks, in: 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies, ICCCNT, IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [23] Jayme G.A. Barbedo, Factors influencing the use of deep learning for plant disease recognition, *Biosyst. Eng.* 172 (2018) 84–91.
- [24] Max Wertheimer, Laws of organization in perceptual forms, 1938.
- [25] Patrick Wspanialy, Medhat Mousa, A detection and severity estimation system for genetic diseases of tomato greenhouse plants, *Comput. Electron. Agric.* 178 (2020) 105701.
- [26] Xiao-Feng Wang, De-Shuang Huang, Ji-Xiang Du, Huan Xu, Laurent Heutte, Classification of plant leaf images with complicated background, *Appl. Math. Comput.* 205 (2) (2008) 916–926.
- [27] Kai Tian, Jiahao Li, Jiefeng Zeng, Aseeno Evans, Lina Zhang, Segmentation of tomato leaf images based on adaptive clustering number of K-means algorithm, *Comput. Electron. Agric.* 165 (2019) 104962.
- [28] Mark Lawrence Gleason, Brooke A. Edmunds, Tomato Diseases and Disorders, Iowa State University, University Extension, Ames, IA, 2005.
- [29] Chunshan Wang, Pengfei Du, Huarui Wu, Juxi Li, Chunjiang Zhao, Huiji Zhu, A cucumber leaf disease severity classification method based on the fusion of DeepLabV3+ and U-Net, *Comput. Electron. Agric.* 189 (2021) 106373.
- [30] Shrikrishna Kolhar, Jayant Jagtap, Convolutional neural network based encoder-decoder architectures for semantic segmentation of plants, *Ecol. Inform.* 64 (2021) 101373.
- [31] Jayme Garcia Arnel Barbedo, Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning, *Biosyst. Eng.* 180 (2019) 96–107.
- [32] Wan Mohd Rusydan Wan Ibrahim, Norzaidi Mohd Daud, Roslidi Hassan, The roles of ICT for knowledge management in agriculture, *Int. J. Technol. Manag. Inf. Syst.* 2 (2) (2020) 1–13.
- [33] Nikos Petrellis, Mobile application for plant disease classification based on symptom signatures, in: Proceedings of the 21st Pan-Hellenic Conference on Informatics, 2017, pp. 1–6.
- [34] Shradha Verma, Anuradha Chug, Amit Prakash Singh, Shubham Sharma, Puranjay Rajvanshi, Deep learning-based mobile application for plant disease diagnosis: A proof of concept with a case study on tomato plant, in: Applications of Image Processing and Soft Computing Systems in Agriculture, IGI Global, 2019, pp. 242–271.
- [35] Alexander Johannes, Artzi Picon, Altair Alvarez-Gila, Jose Echazarra, Sergio Rodriguez-Vaamonde, Ana Díez Navajas, Amara Ortiz-Barredo, Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case, *Comput. Electron. Agric.* 138 (2017) 200–209.
- [36] David G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Int. J. Comput. Vis.* 60 (2) (2004) 91–110.
- [37] Navneet Dalal, Bill Triggs, Histograms of oriented gradients for human detection, in: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), Vol. 1, IEEE, 2005, pp. 886–893.
- [38] Chit Su Hlaing, Sai Maung Maung Zaw, Model-based statistical features for mobile phone image of tomato plant disease classification, in: 2017 18th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, PDCAT, IEEE, 2017, pp. 223–229.
- [39] Chit Su Hlaing, Sai Maung Maung Zaw, Tomato plant diseases classification using statistical texture feature and color feature, in: 2018 IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science, ICIS, IEEE, 2018, pp. 439–444.