

무인항공기 기반 산림병해충 탐지 연구동향

Recent Research Trends of UAV-Based Forest Pests and Disease Detection

강동완¹

Dongwann Kang¹

요약

숲은 지속 가능한 지구를 위해 중요한 역할을 한다. 농업의 측면에서는, 숲은 물의 흐름을 느리게 만들어 토양 침식을 막아준다. 또한, 숲은 목재, 종이, 과일 등과 같이 다양한 범위의 자원들을 우리에게 제공한다. 심지어, 숲은 온실가스를 흡수하여 기후 변화의 속도를 완화시키기도 한다. 따라서 숲을 보존할 수 있도록 잘 관리하는 것은 우리에게 매우 중요하다. 숲을 관리하는데 있어서 중요한 이슈 중 하나는 산림병해충으로부터 산림의 건강과 생장을 모니터링 하는 것이다. 산림병해충은 곤충과 주로 곰팡이 등을 포함하는 병원체로부터 야기되는 산림 문제이다. 나무의 모든 부분이 감염되어 목재의 품질과 생산성이 저하되고 끝내는 죽음에 이를 수 있다. 이 논문은 산림병해충 예측을 위해 기계학습 기반의 접근을 한 연구들을 포괄적으로 간략한 리뷰한다. 이 논문에서 산림병해충에 관한 몇몇 주요 연구들에서 항공사진으로부터 감염목을 분류하거나 탐지한 주목할 만한 사례들을 소개한다.

핵심어 : 무인항공기, 소나무재선충병, 기계학습, 감염목 분류

Abstract

Forests play a key role in sustainable Earth. In terms of agricultural fields, forests prevent soil erosion by slowing water movement. Also, forests provide us a wide range of resources, such as wood, paper, and fruits. Even forests fight climate changes by absorbing greenhouse gases. Therefore, it is very significant for us to manage forests to preserve it. One of main issues concerning forest management is monitoring of health and growth of trees against forest pests and diseases. Forest pests and diseases are forestry problems caused by insects and pathogens, primarily fungi in trees. All parts of a tree can become infected, leading to decreases in wood quality, productivity and occasionally death. This paper presents a comprehensive brief review for machine learning-based approaches for the prediction of forest pests and diseases. In the paper, we introduce some noticeable cases for classifying and detecting infected trees from aerial images in some major researches on forest pests and disease.

Keyword : UAV, Pine Wilts Disease, Machine Learning, Classification of Infected Tree

¹ Dept. Computer Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea [Professor]
e-mail: dongwann@seoultech.ac.kr

* 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 ‘(2021338B10-2123-CD02)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

Received(July 25, 2021), Review Result(1st: August 20, 2021, 2nd: September 17, 2021), Accepted(October 8, 2021), Published(October 31, 2021)



© 2021 The Authors. Published by NCISS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

1. 서론

산림에는 다양한 종의 생물들이 서식하며 산림 생태계를 구성하고 있다. 이 중, 식물의 정상적 성장을 방해함으로써 산림으로부터 인간이 얻을 수 있는 이익을 직접적 또는 간접적으로 저해하는 병과 해충을 산림병해충으로 정의할 수 있다. 산림병해충은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫 번째는 국외로부터 우연히 유입된 외래 해충으로, 일반적으로 원산지에서는 큰 문제를 일으키지 않으나 천적이 없는 국내에 유입되며 큰 피해를 유발하는 경우가 많다. 두 번째는 과거에는 큰 문제가 되지 않던 토착종이 특정 원인으로 인해 산림에 피해를 주는 경우이다. 세 번째는 병해충의 발발이 과거와 크게 다르지 않음에도 생활양식의 변화로 인해 인간이 병해충에 민감하게 반응하게 되는 경우이다. 네 번째는 일시적 원인으로 인해 돌발적으로 병해충이 발생하는 경우이다.



[그림 1] 소나무재선충병 감염목

[Fig. 1] A tree infected with the fine wilt disease

이러한 다양한 산림병해충 중에서 [그림 1]에서 보이는 소나무재선충병은 국내 산림생태계에 가장 위협이 되는 병해충 중 하나로 인식된다. 국내 입목지 면적의 약 26%를 소나무림이 차지하고 있기 때문인데, 이는 단일 수종 기준으로 가장 넓은 면적에 해당한다. 소나무림에 치명적인 피해를 주는 소나무재선충병은 소나무가 소나무재선충이라는 선충에 감염되는 것에 의해 발병한다. 솔수염하늘소, 북방수염하늘소 등 매개충이 나무 사이를 이동할 때 나무 조직 내부로 소나무재선충이 침입하여 번식한다. 소나무재선충은 소나무에 기생하며 뿌리로부터 흡수한 물과 양분이 체내에서

이동하는 것을 방해하기 때문에 감염목은 끝내 고사하게 된다. 소나무재선충병은 동시 다발적으로 발생하며 빠르게 확산되는데 일정 기간 잠복기를 가지고 있어 사전에 발견하기가 어렵다는 특징을 갖는다. 더욱이 감염에 대한 치료법이 없어 감염된 모든 나무를 고사시키는 극심한 피해를 야기한다.

일반적으로 소나무재선충병의 피해 및 확산을 방지하기 위한 고사목 예찰은 현장조사를 기반으로 한다. 그러나 현장조사는 지형적으로 접근이 어려운 지역에서 수행되기 어렵고 인력 수급, 비용 등 물리적·경제적 문제로 대규모 산림에 적용하는데 한계가 있었다. 하지만 무인항공기 기술이 발전하게 되면서, 협소한 지역에서의 고해상도 항공 영상 촬영을 통해 현장조사의 한계를 보완하는 원격예찰이 가능해지게 되었다. 더욱이, 최근 영상분야 기계학습의 급격한 발전은 무인항공기를 이용한 소나무재선충병 탐지의 자동화를 전망케 하고 있다.

본 논문은 무인항공기를 이용한 소나무재선충병 탐지 연구들의 연구동향을 다룬다. 국내외에서 발표된 논문들을 통해 소나무재선충병 탐지를 위해 무인항공기가 어떻게 운용되고 있는지 조사하고, 항공 영상으로부터 소나무재선충병 감염목 탐지를 위해 기계학습이 어떻게 활용되고 있는지 살펴본다. 그리고 각 연구들이 보여주고 있는 감염목 탐지 정확도를 분석하여, 향후 무인항공기를 이용한 소나무재선충병 예찰의 자동화 가능성을 전망한다.

2. 무인항공기를 이용한 소나무재선충병 예찰

2.1 산림분야에서의 무인항공기 활용

무인항공기는 운용의 용이성으로 인해 다양한 분야에서 활용되어져 왔다. 지도제작을 위한 국토 모니터링 연구 [1]에서는 국내에 도입된 무인항공기 현황을 분석하고 무인항공기가 활용된 사례를 조사하였다. 내란·재해 분야에서는 수해 발생 지역에서의 피해현황을 파악하거나 화재 감시를 위해 무인항공기를 이용해 촬영된 항공영상이 활용되었다. 또한, 3차원 공간정보를 취득하고 사진측량함으로써 지도제작 분야에서 활용되었다. 이러한 분야에서 무인항공기와 이에 탑재된 센서들이 실용적으로 활용될 수 있는 정밀도를 갖고 있음이 확인되었고 이를 통해 효과적인 국토모니터링이 가능함을 보였다. [그림 2]에서 볼 수 있듯이, 무인항공기에서 다양한 센서를 이용해 촬영된 정사영상은 농경지 항공사진측량 [2], 해안선변화 추출 [3], 하천부유쓰레기 탐지 [4]등 여러 분야에서 활용되었다.

무인항공기는 산림분야에서도 유용하게 활용되었다. [5]에서는 정밀농업 관리를 위해 항공영상을 통해 산림작물의 생육 단계를 파악하는 연구가 이뤄졌다. 무인항공기상의 다양한 센서를 통해 주기적으로 항공촬영이 수행되었고, 지상에서는 다양한 생육인자가 조사되었다. 촬영된 항공사진과 생육인자간의 상관관계가 분석되었고, 이를 통해 품종에 따른 최적 식생지수를 산출하였다. 소나무

재선충병 예찰은 무인항공기가 산림분야에서 가장 효과적으로 활용된 사례이다.



[그림 2] 해양쓰레기 탐지에 사용된 해양경찰청의 무인항공기
[Fig. 2] An UAV that used for detecting ocean garbage

[6]은 세종특별자치시를 중심으로 무인항공기를 이용한 소나무재선충병 예찰 사례를 고찰하였다. 소나무재선충병 확진 지역을 중심으로 세종자치시에서 대상지가 선정되었고, 고화질의 항공영상이 무인항공기에서 촬영되었다. 이를 바탕으로 육안식별을 통해 감염의심목을 1차적으로 분류하는 작업이 이뤄졌다. 계절적 영향으로 인해 항공사진만으로는 육안 식별이 어려운 점을 감안하여, 다양한 각도에서 동시촬영된 스냅사진을 함께 활용하는 2차 분류가 이뤄졌고, 감염의심목으로 분류된 소나무들은 현장조사를 통해 모두 감염목인 것이 확인됨으로써 무인항공기를 이용한 예찰의 효과를 입증하였다. 하지만, 무인항공기에서 촬영된 항공사진의 분류가 인력에 의해 육안으로 분류되었다는 점에서 활용성에 다소 한계가 있었다.

[7]은 소나무재선충병 피해목을 탐지하기 위해 무인항공기를 이용하여 식생지수를 비교 분석하는 연구를 수행하였다. 이를 통해 피해목 조기 탐지에 적합한 식생지수를 도출하였다.

2.2 무인항공기 영상을 이용한 기계학습 기반의 소나무재선충병 탐지

산림분야에서는 영상을 활용하여 소나무재선충병 피해목을 탐지하고자 하는 많은 연구들이 수행되어져 왔다. [8]은 휴대용 근적외선 카메라를 통해 촬영된 적외선 영상으로부터 정규식생지수를 산출하고, 이 값을 통해 감염목을 분류하는 시도를 하였다. 감염목과 비감염목 사이에서 일정 시기 이후 정규식생지수에 차이가 발생하는 것을 확인하였고, 이를 통해 판별을 위한 최적의 시기와 적절한 판별값을 분석하였다.

초분광 카메라를 이용해 지상에서 촬영된 사진을 통해 소나무재선충병 피해목의 분광 특성을 분석함으로써 감염목을 탐지하고자 하는 연구 [9]도 수행되었다. 감염목을 조제하여 초분광영상을 촬영 및 그 분광특성을 분석하였고, 더 나아가 자연상태에서 감염된 감염목들에 대한 조사도 이뤄졌다. 초분광으로 촬영된 영상에서는 주로 녹색 파장대에서 감염목과 비감염목의 차이가 확연히 드러남을 확인할 수 있었다. 또한, 초분광사진을 이용하여 분류를 위한 최적의 식생지수를 제시하였다.

[10]은 지상 또는 상공에서 촬영된 영상으로부터 감염목을 탐지하기 위해 인력에 의존했던 이전 연구들의 한계를 극복하기 위해, 무인항공기에서 촬영된 영상을 인공신경망과 Support Vector Machine(SVM)을 통해 지도학습하는 접근을 통한 자동화된 예찰 방법을 제안하였다. 소나무재선충병의 피해가 있었던 강원도 춘천시 일대 산림을 연구지역으로 선정하였고, 단풍의 색으로 인한 지도학습의 효과 저하를 막기 위해 촬영 시기를 단풍 시기 이전으로 조정하였다. 연구지역에서 고해상도로 촬영된 정사영상들에 대해 인공신경망과 SVM을 이용한 학습이 수행되었고, 80% 이상의 분류정확도를 얻을 수 있었다. 이를 통해, 기계학습이 소나무재선충병 감염목의 탐지에 활용될 수 있음을 보였다. 이 연구에서 사용된 인공신경망은 최근 급격히 발전하고 있는 심층인공신경망 이전 시대의 것이므로 추후 더욱 더 높은 정확도를 얻을 수 있음을 전망케 한다.

산림병해충 모니터링을 위해 무인항공기가 운용되는 것의 경제성에 대한 연구 [11]도 수행되었다. 인력에 의한 전통적인 예찰방법과 무인항공기를 이용한 방법의 경제성을 비교한 결과, 무인항공기를 이용하였을 때 50% 가량의 비용 절감이 있음이 확인되었다. 이는 산림분야에서 무인항공기의 활용이 업무효율을 효과적으로 증가시킴을 보여준다.

무인항공기를 이용한 소나무재선충병 예찰은 국외의 연구들에서도 활발히 수행되었다. [12]는 상대적으로 넓은 영역을 다룰 수 있는 원격 센싱에 주목하여, 소나무재선충병이 극심한 포르투갈에서 유럽연합의 Horizon 2020 프로젝트의 일환으로 기계학습을 이용한 소나무재선충병의 자동 분류를 시도하였다. 다양한 기온 환경에서의 영상 획득을 위해 2년간 5번의 항공촬영이 이루어졌고, 다중 스펙트럼 영상과 초분광 영상에 대해 각각의 개별적인 Random Forest 알고리즘이 사용되어 영상 분류가 수행되었다. 이 연구에서는 두 알고리즘 모두 91% 이상의 높은 정확도를 달성했으며, 현장에서 증상이 나타나기 이전에 조기 탐지가 가능함을 보여주었다.

최근 영상 분류 분야에서 합성곱 인공신경망은 눈부신 발전을 거듭하고 있는데, [13]은 합성곱 인공신경망을 소나무재선충 감염목 분류에 사용하였다. Faster-RCNN [14]과 ResNet [15], VGG16 [16] 모델들이 감염목 탐지 학습에 사용되었고, 실험결과는 정확도 90% 이상으로, ResNet이 비교적 우수한 결과를 보여주었음이 확인되었다.

[그림 3]과 같이 [17]은 무인항공기에서 촬영된 초분광 영상과 LiDAR 센싱을 결합함으로써 소나무재선충병 감염목 분류가 효과적으로 이뤄질 수 있음을 보였다. 초분광 영상만을 사용한 분류에

비해 LiDAR가 함께 결합된 분류가 더 향상된 정확도를 이끌어냄을 확인하였다. 이를 통해, 무인항공기에서 초분광 카메라, LiDAR 등 다양한 센서의 조합을 통해 항공 영상을 획득할 경우 보다 효과적으로 소나무재선충의 분류가 가능함을 확인할 수 있다.



[그림 3] LiDAR센서를 장착한 무인항공기

[Fig. 3] An UAV that equipped with a LiDAR sensor

기존의 기계학습을 이용한 무인항공기 영상 분류 방법들이 2차원 합성곱 인공신경망을 사용한 반면, [18]은 3차원 합성곱 인공신경망인 3D-ResCNN을 사용함으로써 분류 성능을 더욱 향상시킬 수 있었다.

3. 결론

산림은 인류에게 매우 큰 혜택을 준다. 직접적으로는, 우리에게 각종 산림자원을 제공하고, 농업에 도움이 되도록 토양의 유실을 막아준다. 간접적으로는, 다양한 동식물이 살 수 있는 생태계를 제공하고, 온실가스를 흡수함으로써 기후변화를 저지하여, 인류가 지구에서 지속 가능할 수 있도록 도와준다. 따라서 산림을 잘 보존할 수 있도록 관리하는 것은 인류에게 매우 중요하고, 산림 관리의 측면에서 효과적인 산림병해충의 예방 및 예찰이 요구된다.

무인항공기 기술 및 이미징 기술의 발달은 산림 관리 분야에서 기존에는 인력에 의존하던 것들을 무인항공기 운용으로 대체함으로써 효과적인 관리를 가능케 하고 있다. 특히, 대표적 산림병해충에 해당하는 소나무재선충병 감염목을 탐지하기 위해 국내외에서 무인항공기에서 촬영한 영상을

기계학습을 활용하여 분류하는 다양한 연구들이 수행되었다. 전통적인 지도학습 방법인 SVM에서부터 최신의 합성곱 인공신경망에 이르기까지 다양한 이미징 및 기계학습 기술들이 산림병해충 예찰을 위해 활용되었고, 실제로 실험을 통해 그 유용함이 증명되었다. 본 논문에서는 이러한 연구들을 흐름을 간략히 살펴봄으로써 향후 산림병해충 분야에서 이미징 및 기계학습 관련 기술들이 무인항공기 운용과 결합하여 효과적으로 활용될 수 있음을 전망해보았다.

향후 연구에서는 기존에 제시된 연구들의 성능을 더 개선하기 위한 알고리즘적, 시스템적 개선에 대해 연구하고자 한다. 기존의 연구들은 무인항공기를 활용해 항공 영상을 촬영하고, 이로부터 감염의심목을 자동 탐지하는 것에 주로 초점을 맞추었다. 하지만, 효과적인 예찰을 위해서는 무인항공기 기체에서의 감염의심목 탐지와 무인항공기의 자동화된 운용이 서로 연계되어야 한다. 이를 위해서는 경량화된 감염의심목 탐지 모델이 연구되어야 하고, 실시간 탐지에 따라 적응적으로 동작하는 무인항공기를 위한 자동 운용시스템이 개발되어야 한다. 향후 연구에서는 이러한 통합 시스템을 설계하고 개발하는 것을 다루고자 한다.

References

- [1] D. I. Kim, Y. S. Song, G. H. Kim, C. W. Kim, "A Study on the Application of UAV for Korean Land Monitoring", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 32, no. 1, February 2014, pp. 29-38, doi: 10.7848/ksgpc.2014.32.1.29.
- [2] S. M. Sung, J. O. Lee, "Accuracy of Parcel Boundary Demarcation in Agricultural Area Using UAV-Photogrammetry", *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 34, no. 1, February 2016, pp. 53-62, doi: 10.7848/ksgpc.2016.34.1.53.
- [3] K. S. Lee, J. M. Choi, C. H. Joh, "Method to Extract Coastline Changes Using Unmanned Aerial Vehicle", *Journal of the Korean Geographical Society*, vol. 50, no. 5, October 2015, pp.473-483.
- [4] H. M. Kim, H. J. Yoon, S. W. Jang, Y. H. Chung, "Detection Method of River Floating Debris Using Unmanned Aerial Vehicle and Multispectral Sensors", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 33, no. 5_1, October 2017, pp. 537-546, doi: 10.7780/kjrs.2017.33.5.1.7.
- [5] S. I. Na, C. W. Park, Y. K. Cheong, C. S. Kang, I. B. Choi, K. D. Lee, "Selection of Optimal Vegetation Indices for Estimation of Barley & Wheat Growth based on Remote Sensing - An Application of Unmanned Aerial Vehicle and Field Investigation Data -", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 32, no. 5, October 2016, pp. 483-497, doi: 10.7780/kjrs.2016.32.5.7.
- [6] M. J. Kim, H. S. Bang, J. W. Lee, "Use of Unmanned Aerial Vehicle for Forecasting Pine Wood Nematode in Boundary Area: A Case Study of Sejong Metropolitan Autonomous City", *Journal of Korean Forest Society*, vol. 106, no. 1, March 2017, pp. 100-109, doi: 10.14578/jkfs.2017.106.1.100.
- [7] Y. Y. Jung, S. W. Kim, "A Study on the UAV-based Vegetable Index Comparison for Detection of Pine Wilt Disease Trees", *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, vol. 50, no. 1, June 2020, pp. 201-214, doi: 10.22640/lxsiri.2020.50.1.201.
- [8] M. I. Kim, W. K. Lee, T. H. Kwon, D. A. Kwak, Y. S. Kim, S. H. Lee, "Early Detecting Damaged Trees by Pine Wilt Disease Using DI(Detection Index) from Portable Near Infrared Camera", *Journal of Korean Society of Forest Science*, vol. 100, no. 3, August 2011, pp.374-381.
- [9] J. B. Lee, E. S. Kim, S. H. Lee, "An Analysis of Spectral Pattern for Detecting Pine Wilt Disease Using Ground-Based Hyperspectral Camera", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, October 2014, pp. 665-675, doi: 10.7780/kjrs.2014.30.5.11.
- [10] S. K. Lee, S. J. Park, G. M. Baek, H. B. Kim, C. W. Lee, "Detection of Damaged Pine Tree by the Pine Wilt Disease Using UAV Image", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 35, no. 3, June 2019, pp. 359-373, doi: 10.7780/kjrs.2019.35.3.2.
- [11] K. W. Lee, J. K. Park, "Economic Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle for Forest Pest Monitoring", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 20, no. 1, January 2019, pp. 440-446, doi: 10.5762/KAIS.2019.20.1.440.
- [12] M. Iordache, V. Mantas, E. Baltazar, K. Pauly, N. Lewyckyj, "A machine learning approach to detecting Pine Wilt Disease using airborne spectral imagery", *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, July 2020, doi: 10.3390/rs12142280.

- [13] X. Deng, Z. Tong, Y. Lan, Z. Huang, "Detection and location of dead trees with pine wilt disease based on deep learning and UAV remote sensing", *AgriEngineering*, vol. 2, no. 2, May 2020, pp. 294-307, doi: 10.3390/agriengineering2020019.
- [14] S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 6, June 2017, pp. 91-99, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [15] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, "Deep residual learning for image recognition", *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 27-30 June, 2016, Las Vegas, NV, USA, pp. 770-778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [16] K. Simonyan, A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition", *International Conference on Learning Representations*, 7-9 May, 2015, San Diego, CA, USA, pp. 1-14.
- [17] R. Yu, Y. Luo, Q. Zhou, X. Zhang, D. Wu, L. Ren, "A machine learning algorithm to detect pine wilt disease using UAV-based hyperspectral imagery and LiDAR data at the tree level", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 101, September 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102363.
- [18] R. Yu, Y. Luo, H. Li, L. Yang, H. Huang, L. Yu, L. Ren, "Three-Dimensional Convolutional Neural Network Model for Early Detection of Pine Wilt Disease Using UAV-Based Hyperspectral Images", *Remote Sensing*, vol. 13, no. 20, October 2021, doi: 10.3390/rs13204065.