Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 23, No. 5 pp. 572-579, 2022

https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.5.572
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

드론 영상을 이용한 3차원 도로정보 추출 및 갱신 프레임워크

김한세[1], 최강혁[2*]
[1](주)써니항공 기술연구소, [2]한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부

A Framework of 3D Road Extraction and Update Using Drone Images

Hansae Kim[1], Kanghyeok Choi[2*]
[1]Research Institute, Sunny Air Inc.
[2]Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Tech.

요 약 디지털 도로지도는 차량 위치 결정, 도로환경 정보 제공 서비스의 핵심 데이터 중 하나로 인식되고 있어 도로지도 작성과 관련된 다양한 연구가 진행되어 왔다. 기존의 많은 연구들은 도로지도 작성의 효율성 확보를 위하여 영상 기반의 도로정보 추출 및 갱신 기법을 활용하고 있다. 특히, 최근에는 드론 기술의 발전과 함께 드론 영상을 활용한 도로지도 작성 기술에 대한 관심이 커지고 있다. 하지만 기존의 영상 기반 도로 추출 기술은 일반적으로 다중분광 영상을 대상으로 하고 있기 때문에 색상정보만을 제공하는 드론 영상에 적용할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 드론 영상에 최적화된 도로정보 추출 및 갱신 프레임워크를 제안 한다. 제안된 프레임워크는 DSM 및 정사영상 생산, 객체 분할, 개미 군집 최적화를 통한 도로정보 추출 그리고 오분류 도로 제거의 단계를 통하여 드론 영상을 이용한 도로정보 추출 및 갱신을 수행한다. 제안된 프레임워크는 드론 영상을 이용하여 정확하고 효율적인 도로정보를 추출하며, 일반적으로 2차원 도로정보를 제공하는 기존의 방법론들과는 다르게 3차원 도로정보를 추출한다는 장점이 있다. 본 연구에서는 제안된 프레임워크 성능 검증을 위하여 복잡한 도심지에 대한 도로 추출 및 갱신을 수행하였다. 실험 결과 제안된 프레임워크는 식생이나 그림자 등에 가려진 도로 구간을 제외한 주요 도로의 추출에 우수한 성능을 나타내는 것으로 확인되었다.

Abstract The digital road map is considered a core data for vehicle localization and road information service. Accordingly, various studies related to road map extraction have been conducted. In particular, many previous studies had utilized image-based road extraction techniques for efficient road map generation. Meanwhile, road extraction using drone imagery has been receiving increased attention in recent years. However, since the conventional image-based road extraction techniques generally target multi-spectral images, they cannot be applied to drone images that provide only color information. Hence, this study proposes a framework for road extraction optimized for drone imagery. The proposed framework performs road extraction through the steps of DSM and orthoimage production, object segmentation, road information extraction through ant colony optimization, and removal of misclassified roads. As a result, the proposed framework extracts accurate and efficient road information using drone images. It also has the advantage of extracting 3D road information, unlike existing methodologies that generally provide 2D road information. Subsequently, the performance of the proposed framework was verified by performing road extraction and update for complex urban areas. This verification confirmed that the proposed framework was accurate for roads excluding some sections covered by vegetation or shadows.

Keywords : Road Extraction, Road Update, Digital Road Map, 3D Road, Ant Colony Optimization

*Corresponding Author : Kanghyeok Choi(Korea Institute of Civil Engineering and Building Tech.)
email: cwsurgy@kict.re.kr
Received March 31, 2022 Revised April 27, 2022
Accepted May 6, 2022 Published May 31, 2022

1. 서론

최근 자율주행 자동차 기술의 발전과 함께 자율주행의 안전을 지원하기 위한 다양한 기술의 수요가 증대되고 있다. 특히 디지털 도로지도는 차량의 위치 파악, 다양한 도로환경 정보 제공의 기반이 되는 핵심 데이터라는 점에서 도로정보 구축 및 갱신과 관련된 다양한 기술 개발이 요구되고 있다. 기존의 많은 연구들에서는 항공 및 위성 영상 기반의 도로지도 구축 기술을 개발하여 왔으며, 이는 공중에서 운용되는 플랫폼을 통하여 얻어진 영상은 지상 객체에 의한 시야 방해가 상대적으로 적고, 보다 넓은 대상지에 대한 도로 정보를 효율적으로 획득할 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 이와 같은 관점에서 드론은 도로정보 추출과 관련하여 기존의 항공 및 위성을 대체할 수 있는 플랫폼으로 기대되고 있다. 드론은 기존의 항공 및 위성보다 짧은 재방문 주기로 고해상도의 도로 영상 정보를 효율적으로 취득할 수 있다는 장점이 있기 때문이다.

도로정보 추출에 있어 기존의 영상 기반 도로정보 추출 방법론은 주로 항공 및 위성 영상을 대상으로 개발되어 왔다. 즉, 기존의 연구들은[1-6] 도로정보 추출에 주로 항공 및 위성에서 취득된 다중분광(Multi-spectral) 영상을 활용하여 왔다. 다중분광 영상은 시각적으로 확인되는 색상(RGB) 정보 이외에도, 근적외선(NIR, Near Infra Red) 등과 같은 추가 정보를 제공할 수 있어 도로와 유사한 색상의 객체와 도로 간 분류를 가능하게 한다는 장점이 있어 다양한 연구에서 활용되어 왔다. 하지만 다중분광 데이터는 취득에 상대적으로 높은 비용이 요구되며 신속한 데이터 취득이 용이하지 않기 때문에, 신속한 도로 정보 구축 및 갱신에 활용이 적합하지 않다는 단점이 있다. 특히 드론 영상은 일반적으로 색상 정보만을 제공하기 때문에, 다중 분광 영상을 기반으로 한 기존 도로 추출 및 갱신 방법론은 드론 영상에 활용되기 힘들다.

최근 연구들에서는 드론 등에서 획득된 색상 이미지에 최적화된 도로 추출 방법론 개발이 진행되어 왔다. 기존의 색상 이미지 기반 도로정보 추출 방법론은 크게 모폴로지(morphology) 기반의 방법, 머신러닝 기반의 방법, 그리고 추가정보를 활용한 도로 추출 방법론을 나누어 볼 수 있다. 먼저, 모폴로지 기반 방법론은 색상 영상에서 생산된 객체의 형태학적 정보를 이용하여 도로정보를 추출한다. Lee 등[7]은 영상의 채도를 이용한 모폴로지 기반의 객체 분류를 통하여 도로정보를 추출한 바 있다. Abdollahi 등[8]은 영상 분할(segmentation)을 통하여 드론 영상의 객체를 추출하고 모폴로지 연산 기반의 도로정보 추출 방법론을 제시하였다. 하지만, 모폴로지 기반 방법론은 객체 분류에 색상 정보만이 활용되기 때문에 분류의 정확도가 크게 낮아질 수 있다는 단점이 있다.

머신러닝 기반 방법론은 최근 딥러닝 기술의 발전과 함께 상대적으로 최근에 기술 개발이 진행되고 있다. Li 등[9]은 신경망 기법을 기반으로 한 도로 추출 기법을 제안한 바 있다. Kestur 등[10]은 FCN(Fully Convolutional Network) 기반의 도로 추출 방법론을 제시하였다. 또한, Varia 등[11]은 FCN과 GAN(Conditional Generative Adversarial Network)의 조합을 통하여 드론 이미지에서 도로를 추출한 바 있다. Gupta 등[12]는 YOLO(You Only Look Once) 알고리즘을 활용한 드론 영상 기반의 도로정보를 추출 방법론을 제시한 바 있다. 하지만, 머신러닝 기반의 방법론은 도로와 다른 지역에 대한 구분이 상대적으로 용이한 비도심 지역에 주로 적용되어 왔다는 한계가 있다. 특히, 기존 머신러닝 기반 방법론들 또한 주로 드론에서 획득된 색상 영상만을 활용한다는 점에서 복잡한 도시 환경에 적용될 경우 정확도가 크게 하락할 수 있다는 단점을 지니고 있다.

추가정보를 이용한 방법론은 영상만을 이용한 방법론의 한계를 극복할 수 있다는 장점이 있어[13], 기존의 연구들에서는 색상 이미지와 함께 수치지도 또는 DSM 등의 데이터를 활용하여 도로 추출의 정확도를 향상 시킨 바 있다[14,15]. 하지만 기존의 방법론들은 추가정보를 주로 도로정보 교차검증 등에 제한적으로 활용하고 있으며 도로정보 갱신은 다루고 있지 않다는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 위와 같은 기존 연구의 한계를 극복하고 도심지 도로정보 추출 및 갱신 정확도 향상을 위하여 벡터 레이어와 DSM(Digital Surface Model)을 이용한 드론 이미지 기반의 도로정보 추출 및 갱신 방법론을 제시한다. 제안된 방법론은 객체 기반의 도로 추출 방법론인 개미 군집 최적화 알고리즘(ACO, Ant Colony Optimization)을 기반으로 하고 있으며, 도로 객체 추출 및 분류의 정확도 향상을 위하여 연속적으로 촬영된 드론 이미지를 이용하여 생산된 정사영상과 DSM 그리고 도로 벡터 레이어가 함께 활용된다.

본 연구의 내용은 다음과 같은 순서로 설명된다. 먼저 2장에서는 본 연구에서 제안된 도로 추출 및 갱신 알고리즘에 대한 구체적인 내용이 설명되며, 3장에서는 연구에 사용된 데이터에 대한 설명이 제공된다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 이용한 도로 추출 및 갱신의 결과가 분석된다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 의의와 향후

연구 계획 등을 제시한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 제시하는 도로 추출 프레임워크는 Fig. 1과 같이 진행된다. 먼저 획득된 드론 이미지를 이용하여 작성된 정사영상 및 DSM 그리고 벡터 레이어를 이용하여 벡터 기반 다중해상도 객체 분할(MRS, Multi-Resolution Segmentation)이 수행된다. 다음으로 ACO를 이용하여 분할된 객체들 중에 도로 객체가 추출된다. 마지막으로 후처리과정을 통하여 오분류된 도로가 제거되고 최종적으로 도로정보가 도출된다.

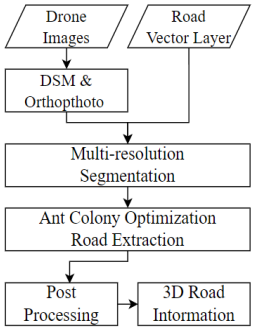


Fig. 1. Flowchart of the proposed method

2.1. 드론 영상을 이용한 객체 분할

드론 영상을 이용한 객체 분할은 i) 정사 영상 및 DSM 생성, 그리고 ii) 객체 분할의 두 단계로 진행된다. 먼저, 정상 영상 및 DSM은 대상지를 연속적으로 촬영한 드론 영상을 이용하여 제작된다. 본 연구에서는 드론 영상 처리를 지원하는 상용화 소프트웨어인 Pix4D mapper를 이용하여 정사 영상 및 DSM을 작성하였다.

본 연구에서는 앞서 작성된 DSM과 도로벡터정보를 활용하여 객체 분할을 진행하였다. 드론 영상은 일반적으로 색상정보만을 포함하고 있기 때문에 영상만을 이용한 객체 분할은 객체 분할의 정확도 확보가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 색상 및 DSM을 이용하여 객체 분할의 정확도를 높이고자 하였다. 또한, 기구축된 도로 벡터 레이어를 적용하여 확실한 도로 객체를 추출하고 이후 ACO 도로 추출의 시드 객체로 활용하였다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 eCognition을 이용하여 MRS을 수행하였으며, MRS의 변수는 R, G, B 그리고 DSM 밴드별 가중치는 1:1:1:3, 분할축척(scale)은 100, 형태 평활도(shape)는 0.5, 그리고 면적 대비 경계 길이인 조밀도(compactness)는 0.3로 결정되었다.

2.2 개미 군집 최적화 도로 추출

본 연구에서는 객체의 특성을 설명하는 다양한 서술자를 기반으로 한 ACO 알고리즘을 이용하여 도로 정보를 추출하였다. ACO는 이전 개미가 경로 상에 표시한 페로몬에 의하여 뒤따르는 개미의 이동 경로가 결정되는 것을 참고하여 작성된 객체 기반의 확률론적 도로추출 방법론이다.

개미 군집 최적화 알고리즘은 Fig. 2와 같은 순서를 통해 수행된다. 먼저, 기구축된 도로 레이어 정보를 이용하여 도로로 분류된 객체가 탐색의 시작 위치로 결정되고, 시작점 인근 객체들의 도로일 확률이 객체의 형상 서술자를 기반으로 계산된다. 다음으로 시작점을 출발한 개미는 인근 객체들의 도로 확률을 기반으로 인접한 임의의 객체로 이동한다. 즉, 개미는 도로 확률이 가장 높은 객체로만 이동하는 것이 아니며, 도로일 가능성이 높은 객체일수록 개미가 다음 경로로 선택할 확률이 높아진다. 출발한 개미는 위와 같은 과정을 통하여 이미 방문했던 객체가 다음 경로로 결정될 때까지 경로 탐색 및 이동을 반복하며 이동한 경로 상에 페로몬을 부여한다. 이때 방문 객체에 부여된 페로몬 값은 각 객체의 도로 확률 상향 조정에 사용되어 이후 개미들의 이동 경로 결정에 영향을 미친다. 최종적으로 ACO 알고리즘에서는 개미들이 방문한 횟수를 기준으로 각 객체의 도로 여부를 판단하게 된다. 본 연구에서는 각 시드 객체마다 5마리의 개미를 배정하여 도로 탐지를 진행하고 최종적으로 개미들이 5번 이상 방문한 객체를 도로로 분류하였다.

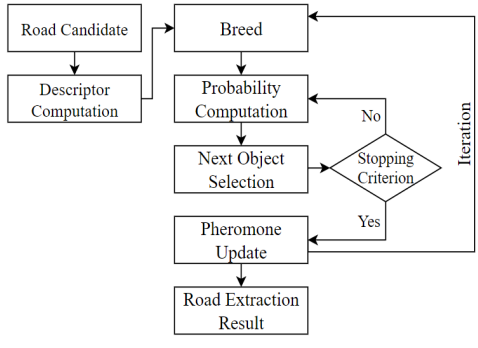


Fig. 2. Flowchart of the ant colony optimization road extraction

본 연구에서는 드론 이미지를 이용한 도로 추출의 정확도를 높이고자 기존 개미 군집 최적화 알고리즘을 수정 적용하였다. 기존 연구에서는 다중분광 위성영상의 R, G, B 그리고 NIR 밴드가 사용되었다. 반면에 드론 영상은 색상(RGB) 밴드만 제공하기 때문에 NIR 밴드를 대신하여 생산된 DSM을 활용하였다.

본 연구의 개미 군집 최적화에서는 총 네 가지의 서술자가 사용되며 그 내용은 Table 1을 통하여 확인할 수 있다. 먼저, SOLI(Skeleton-based Object Linearity Index)는 객체의 형태적 특성을 설명하는 서술자로 객체가 좁고 길수록 높은 값을 나타낸다. 분광 균질성(Spectral homogeneity)은 객체 내 픽셀들의 분광 균질성을 측정하는 서술자이다. 따라서 형태가 좁고 길며 픽셀들 간의 색상 유사도가 높은 도로 객체의 경우 상대적으로 높은 SOLI 및 분광 균질성 값을 보여준다. DSM 및 색상 거리(RGB distance)는 도로임이 확실한 참조 객체와 다른 객체 간 DSM 및 색상 정보 유사도를 나타내는 서술자이다. 따라서 시드 도로 객체와 유사한 색상 및 DSM 값을 지닐수록 높은 값을 나타낸다. 제안된 개미 군집 최적화 알고리즘에서는 위와 같은 네가지 서술자를 곱한 값이 높을수록 해당 객체는 도로일 확률이 높은 것으로 판단하게 된다.

Table 1. Object descriptor used in this research

Object Descriptor	Equation
SOLI	$\frac{L_s^2}{n_{obj}}$
Spectral homogeneity	$e^{-(\prod_{b=1}^{3}\frac{\sigma^b}{L_s})^2}$
DSM distance	$\frac{1}{\sqrt{(H-H_r)^2}}$
RGB distance	$\frac{1}{\sqrt{\sum_{b=1}^{3}(DN_b-DN_b^r)^2}}$

Where, L denotes the length of subscript, s denotes skeleton of the object, n denotes the number of pixels, b denotes the band of pixel, H denotes the DSM value of the object r denotes the corresponding median value of road objects.

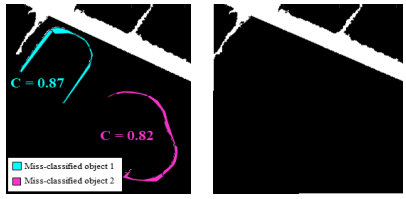
2.3 모폴로지 기반 오분류 제거

모폴로지 기반 오분류 제거 단계에서는 개미 군집 최적화를 통하여 도출된 도로 정보의 정확도 향상을 위한 후처리가 진행된다. 개미 군집 최적화 알고리즘에서 도로로 오분류된 객체들로 이루어진 도로 중 일부는 도로의 형태학적 분석을 통하여 최종 결과에서 제거될 수 있다.

본 연구에서는 도로의 원형성(circularity)를 기준으로 오분류 객체를 제거하였다. 원형성은 Eq. (1)과 같이 계산되며 완벽한 원형 객체는 1의 값을 나타낸다. 본 연구에서는 원형성이 0.5이상인 도로는 오분류된 것으로 판단하고 최종 도로에서 제외하였다. Fig. 3은 모폴로지 기반 오분류 제거의 예시를 보여준다. 그림에서 오분류된 도로들(하늘색 및 분홍색)은 각각 3개 및 4개의 오분류된 도로 객체로 구성되어 있으며, 해당 객체들은 도로와 매우 유사한 서술자 특성을 지니기 때문에 단일 객체 단위에서는 도로와 구분이 힘들다. 하지만 Fig. 3의 (a)에서와 같이 서로 연결된 오분류 객체들을 하나로 통합하면 일반적인 실제 도로와 구별되는 형태적 특성(매우 높은 곡률)을 나타낸다.

$$C = \frac{4\pi \times A}{P^2} \quad (1)$$

Where, C is circularity, A is area of the object, and P is perimeter of the object.



(a) (b)

Fig. 3. Morphology-based misclassified object elimination (a) misclassified objects (b) result of misclassified objects elimination

3. 실험 데이터

본 연구에서는 일산 건설기술연구원 본원 일대에서 취득된 드론 영상을 이용하여 도로 추출 및 갱신 실험을 수행하였다. 대상지는 고층 빌딩, 상가 그리고 주거 지역을 포함하고 있어 다양한 크기와 형태의 도로가 나타난다. 또한 연구 대상지는 고층 빌딩 및 식생의 그림자, 주차장, 대형 체육시설(경기장) 그리고 하천 등과 같은 도로와 유사한 색상 또는 형태적 특성이 다수 확인되는 공간이다. 따라서 연구 대상지는 복잡한 도심지에서의 제안된 프레임워크의 성능 분석에 최적 공간으로 판단할 수 있다. Fig. 4는 대상지의 정사영상, 참조 도로 정보 그리

고 시드 도로 레이어를 보여준다. Fig. 4(c)의 시드 도로 레이어는 참조 도로 중에 일부 주요 도로로 선정되었다. 이때, 도로 정보가 이미 구축되어 있는 것으로 가정된 시드 도로는 이를 제외한 도로에 대한 정보 추출 및 갱신 프로세스의 입력 데이터로 활용된다.

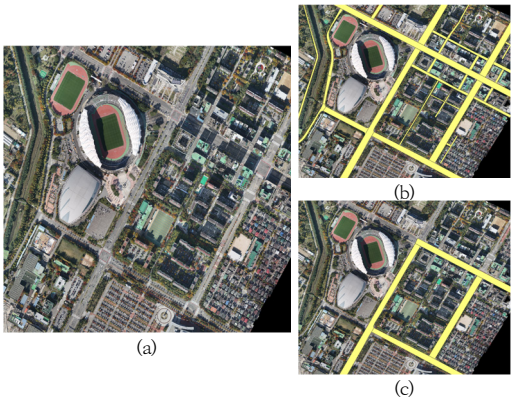


Fig. 4. Images of experiment site (a) ortho mosaic image, (b) reference road vector layer, (c) seed road layer

4. 실험 결과 및 분석

제안된 프레임워크를 통하여 도출된 도로 추출 및 갱신 결과는 Fig. 5 와 Fig. 6을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 5는 도로 추출결과에 대한 평면도를 보여주며 Fig. 6은 추출된 3차원 도로의 조감도를 보여준다. 이때, Fig. 6의 녹색은 DSM을 이용하여 추가 분류한 도로 위의 가로수 및 차량 등을 나타낸다. 그림을 통하여 주요도로에 대한 도로 추출 및 갱신이 적절이 수행되었음을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 6(b)를 통하여 제안된 방법론을 통하여 주요도로의 3차원 정보가 적절히 추출되었음을 확인할 수 있다.

추출된 도로의 정확도는 Wiedemann[16]에 의해 제시된 정확도(correctness)를 기준으로 평가되었다. 이때 정확도는 탐지된 도로의 일정 버퍼 안에 포함되는 참조 도로 레이어 길이의 비율로 정의되며 Eq. (2)를 통하여 계산된다.

$$Correctness = L_{me} / L_e * 100 \quad (2)$$

Where, L denotes the length of subscript, me denotes matched extraction, e denotes extraction.

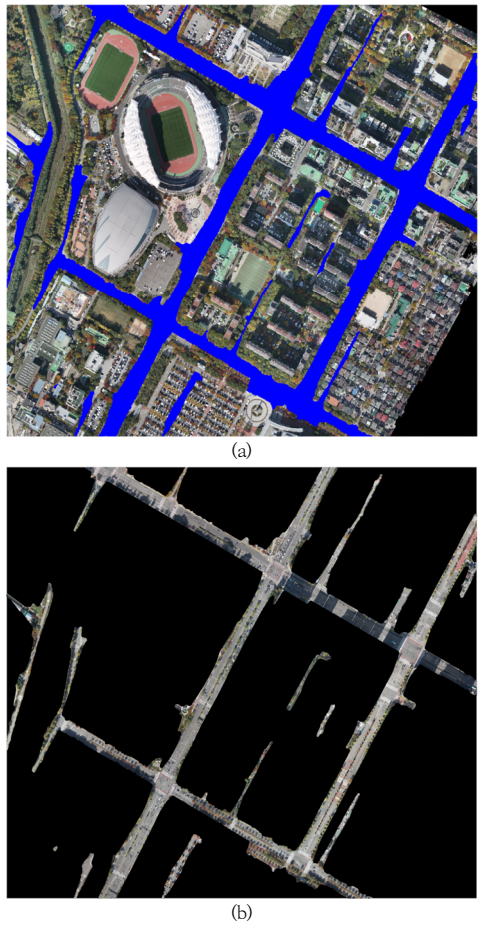
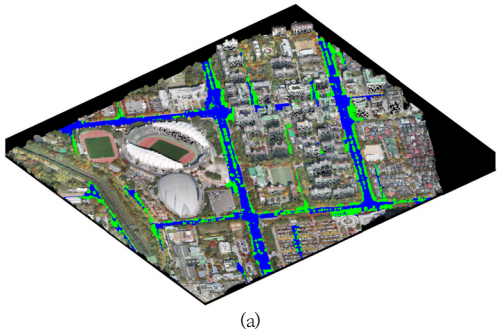
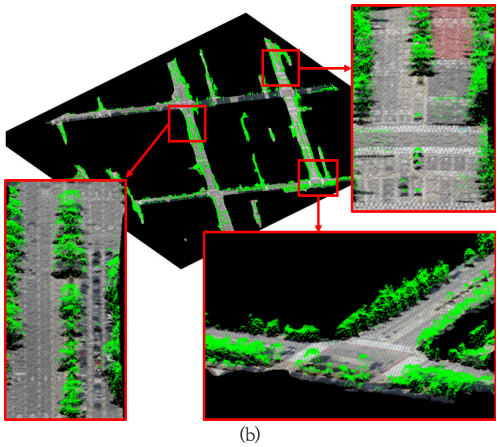


Fig. 5. Road extraction result (a) extracted road colored in blue, (b) extraction road with background removed





(b)

Fig. 6. Bird view of extracted road (a) extracted road colored in blue, (b) extracted road with background removed

추출된 도로의 정확도와 이에 대한 분석은 Table 2, Fig. 7 및 8을 통하여 확인할 수 있다. 도로 추출의 정확도는 약 91.6%으로 나타났다(Table 2). 도로 추출이 정확히 수행된 위치와 오탐지된 지역의 구체적인 위치는 Fig. 7을 통하여 확인할 수 있다. 이때, Fig. 7의 파란색은 참조 도로, 노란색은 정확히 탐지된 도로, 그리고 청록색은 오탐지된 도로를 의미한다. 도로 추출에 대한 육안 분석결과 오탐지는 주로 주차장 등과 같은 유사도로가 존재하는 지역에서 나타나는 것으로 확인되었다(Fig. 8(a)~(c)). 한편 도로 탐지 실패의 주된 원인은 그림자에 의한 도로 객체 오분할인 것으로 판단된다(Fig. 8(d)). 즉, 그림자에 의하여 도로가 지나치게 짧은 형태의 객체로 분할되고 도로의 특성을 반영하지 못하게 되어 도로로 추출되지 못한 것으로 판단된다.

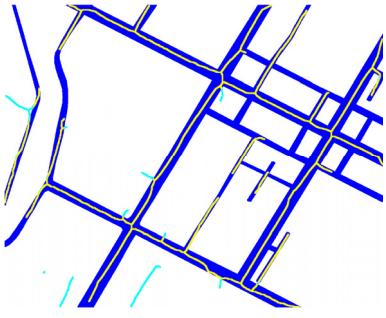


Fig. 7. Accuracy evaluation of extracted road (blue: reference, yellow: matched extraction, and cyan: unmatched extraction)

Table 2. Road extraction results

Metric	Percent (%)
Correctness	91.6

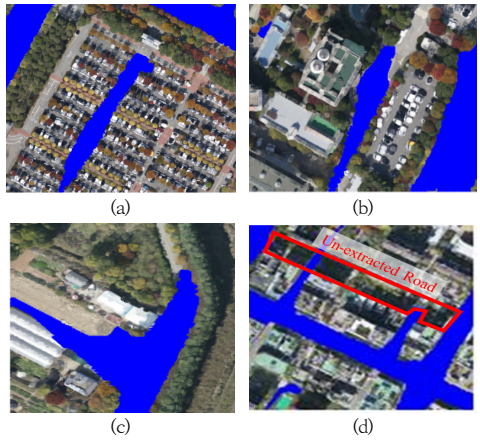


Fig. 8. Road extraction failure site (a) parking lot 1, (b) parking lot 2, (c) parking lot 3, (d) shadowed region

5. 결론

본 연구에서는 도심지 도로정보 추출 및 갱신을 위한 드론 영상 기반의 도로 추출 및 갱신 방법론이 제안되었다. 제안된 방법론은 객체 기반 도로 추출 방법론인 개미 군집 최적화 알고리즘을 기반으로 하고 있으며 다음과 같은 단계를 통하여 도로 정보 추출 및 갱신을 수행한다. 첫번째 단계에서는 연속적으로 촬영된 드론 영상을 이용하여 정사 영상과 DSM이 도출되고, 색상정보(정사 영상), DSM 그리고 기존 도로에 대한 벡터 레이어를 이용한 영상 분할을 통한 객체 추출이 수행된다. 두 번째 단계에서는 추출된 객체들의 특징을 설명하는 다양한 서술자를 기반으로 한 개미 군집 최적화를 통하여 도로 객체가 분류된다. 마지막 단계에서는 객체들의 형태학적 특성을 기반으로 오분류된 도로 객체가 제거되고 최종 도로정보가 도출된다.

본 연구에서 제안된 방법론은 전반적으로 복잡한 도심지 환경에서도 우수한 도로 추출 및 갱신 결과를 보여주었다. 또한, 제안된 방법론은 3차원 도로 정보를 제공할 수 있다는 점에서 기존의 이미지 기반 도로 추출 접근법들과 차별화된다. 다만 도로의 상당 부분이 고층 건물 그림자에 영향을 받거나 식생에 대부분의 도로가 가려진

구간에서는 도로 추출 정확도가 하락하는 경우가 나타났다. 이와 같은 한계점은 다른 시간이나 계절에 촬영된 드론 영상을 활용한다면 해결이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 도로정밀지도 갱신, 디지털트윈 구축 등과 같은 분야에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 고층 건물 그림자 제거 및 영상 복원 등을 통하여 제안된 방법론의 정확도를 향상시키고자 한다.

References

[1] H. S. Kim, K. H. Choi, Y. I. Kim, D. Kim, J. J. Jeong, "Object-Based Road Extraction from VHR Satellite Image Using Improved Ant Colony Optimization", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.37, No.3, pp.109-118, June 2019.
DOI: https://doi.org/10.7848/KSGPC.2019.37.3.109

[2] A. Medhi, A. K. Saha, "Rural Road Extraction using Object Based Image Analysis (OBIA): A case study from Assam, India", *29th International Cartographic Conference*, Advances in Cartography and GIScience of the ICA, Tokyo, Japan, pp.1-8, July 2019.
DOI: https://doi.org/10.5194/ica-adv-1-13-2019

[3] T. Peng, I. H. Jermyn, V. Prinet, J. Zerubia, "Incorporating Generic and Specific Prior Knowledge in a Multiscale Phase Field Model for Road Extraction From VHR Images", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol.1, No.2, pp.139-146, June 2008.
DOI: https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.922318

[4] P. Mhangara, J. Odindi, L. Kleyn, H. Remas, "Road extraction using object oriented classification", *Visualisation Technical*, pp.45-50, Nov. 2011.

[5] S. Puttinaovarat, P. Horkaew, "Multi-spectral and Topographic Fusion for Automated Road Extraction", *Open Geosciences*, Vol.10, No.1, pp.461-473, Sept. 2018.
DOI: https://doi.org/10.1515/geo-2018-0036

[6] S. L. K. Reddy, C. V. Rao, P. R. Kumar, R. V. G. Anjaneyulu, V. M. Bothale, "Automatic Road Feature Extraction using MRF from LANDSAT-8 OLI Images", 2019 IEEE Recent Advances in Geoscience and Remote Sensing : Technologies, Standards and Applications, IEEE, Kerala, India, pp.15-20, Oct. 2019.
DOI: https://doi.org/10.1109/TENGARSS48957.2019.8976046

[7] K. M. Lee, S. Y. Go, K. M. Kim, G. S. Cho, "Extracting Method The New Roads by Using High-resolution Aerial Orthophotos", *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, Vol.22, No.3, pp.3-10, Sept. 2014.
DOI: https://doi.org/10.7319/kogsis.2014.22.3.003

[8] A. Abdollahi, B. Pradhan, N. Shukla, "Extraction of road features from UAV images using a novel level set segmentation approach", *International Journal of Urban Sciences*, Vol.23, No.3, pp.391-405, July 2019.
DOI: https://doi.org/10.1080/12265934.2019.1596040

[9] Y. Li, B. Peng, L. Hei, K. Fan, Z. Li, L. Tong, "Road Extraction from Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Images Based on Improved Neural Networks", *Sensors*, Vol.19, No.19, pp.1-19, Sept. 2019.
DOI: https://doi.org/10.3390/s19194115

[10] R. Kestur, S. Farooq, R. Abdal, E. Mehraj, O. S. Narasipura, M. Mudigere, "UFCN: A fully convolutional neural network for road extraction in RGB imagery acquired by remote sensing from an unmanned aerial vehicle", *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol.12, No.1, pp.16-20, Feb. 2018.
DOI: https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.016020

[11] N. Varia, A. Dokania, J. Senthilnath, "DeepExt: A Convolution Neural Network for Road Extraction using RGB images captured by UAV", *2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, IEEE, Bangalore, India, pp.1890-1895, Nov. 2019.
DOI: https://doi.org/10.1109/SSCI.2018.8628717

[12] H. Gupta, O. P. Verma, "Monitoring and surveillance of urban road traffic using low altitude drone images: a deep learning approach", *Multimedia Tools and Applications*, pp.1-21, June 2021.
DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-021-11146-x

[13] I. Kahraman1, I. R. Karas1, and A. E. Akay, "Road Extraction Techniques from Remote Sensing Images: A Review", The International Archives of the Photogrammetry, *International Conference on Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2018)*, ISPRS, Kuala Lumpur, Malaysia, pp.1339-342, Oct. 2018. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-339-2018

[14] J. B. Mena, J. A. Malpica, "An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery", *Pattern Recognition Letters*, Vol.26, No.9, pp.1209-1220, July 2005.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.11.005

[15] C. H. Park, K. Choi, I. Lee, "Lane Extraction through UAV Mapping and Its Accuracy Assessment", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.34, No.1, pp.11-19, Feb 2016.
DOI: https://doi.org/10.7848/KSGPC.2016.34.1.11

[16] C. Wiedemann, "External evaluation of road networks", *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/W8), pp 93-98, Sept. 2003.

김 한 세(Hansae Kim) [정회원]

- 2020년 2월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 2022년 2월 : 명지대학교 토목공학과 연구원
- 2022년 3월 ~ 현재 : (주)써니항공 기술연구소 연구원

〈관심분야〉
사진측량, 원격탐사

최 강 혁(Kanghyeok Choi) [정회원]

- 2013년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학석사)
- 2018년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부 (공학박사)
- 2019년 2월 ~ 2019년 12월 : 명지대학교 연구교수
- 2020년 1월 ~ 2020년 11월 : Purdue University Post Doc Researcher
- 2021년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 박사후연구원

〈관심분야〉
공간정보, 교통정보, 스마트 모빌리티, 디지털트윈