

## UAV 영상과 SfM 기술을 이용한 가로수의 탄소저장량 추정\*

김다슬<sup>1)</sup> · 이동근<sup>2)</sup> · 허한결<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 대학원 생태조경 지역시스템공학부 학생 · <sup>2)</sup> 서울대학교 조경 지역시스템공학부 교수 ·

<sup>3)</sup> 서울대학교 협동과정 조경학 학생

## Estimation Carbon Storage of Urban Street trees Using UAV Imagery and SfM Technique\*

Kim, Da-Seul<sup>1)</sup> · Lee, Dong-Kun<sup>2)</sup> and Heo, Han-Kyul<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Seoul National University, South Korea, Student,

<sup>2)</sup> Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, South Korea, Professor,

<sup>3)</sup> Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, South Korea, Student.

### ABSTRACT

Carbon storage is one of the regulating ecosystem services provided by urban street trees. It is important that evaluating the economic value of ecosystem services accurately. The carbon storage of street trees was calculated by measuring the morphological parameter on the field. As the method is labor-intensive and time-consuming for the macro-scale research, remote sensing has been more widely used. The airborne Light Detection And Ranging (LiDAR) is used in obtaining the point clouds data of a densely planted area and extracting individual trees for the carbon storage estimation. However, the LiDAR has limitations such as high cost and complicated operations. In addition, trees change over time they need to be frequently. Therefore, Structure from Motion (SfM) photogrammetry with unmanned Aerial Vehicle (UAV) is a more suitable method for obtaining point clouds data. In this paper,

\* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (과제번호: 2019002760002).

**First author** : Kim, Da-Seul, Graduate School of Seoul National University, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Landscape Architecture Major, Student,  
Tel : +82-2-880-4885, Email : daslekim@snu.ac.kr

**Corresponding author** : Lee, Dong-Kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Professor,  
Tel : +82-2-880-4875, Email : dklee7@snu.ac.kr

**Received** : 11 June, 2019. **Revised** : 2 November, 2019. **Accepted** : 30 October, 2019.

a UAV loaded with a digital camera was employed to take oblique aerial images for generating point cloud of street trees. We extracted the diameter of breast height (DBH) from generated point cloud data to calculate the carbon storage. We compared DBH calculated from UAV data and measured data from the field in the selected area. The calculated DBH was used to estimate the carbon storage of street trees in the study area using a regression model. The results demonstrate the feasibility and effectiveness of applying UAV imagery and SfM technique to the carbon storage estimation of street trees. The technique can contribute to efficiently building inventories of the carbon storage of street trees in urban areas.

*Key Words* : Aerial Photogrammetry, RANSAC, Circle fitting, Tree classification, Carbon Storage, DBH

## I. 서 론

최근 기후변화와 관련된 지구환경 문제가 국제적 이슈로 떠오르는 가운데, 기후변화의 원인인 온실가스에 대한 관심도 함께 증대되고 있다 (Allen et al, 2010). 온실가스 감축 관리를 위해서는 탄소 배출량과 함께 저장량의 산정도 중요하다 (Omasa et al, 2003). 탄소 저장량을 산정하는 연구는 현재 전 지구적 관점에서 (Solomon et al, 1994), 국가 단위에서 (Jingyun et al, 2001), 산림지역을 대상으로 (Pregitzer and Euskirchen, 2004; Houghton, 2005; Gibbs et al, 2007; Luysaert et al, 2008) 진행되었다. 그러나 도시의 생태적 문제가 양적인 측면과 질적인 측면에서 모두 크게 악화되면서 산림지역 뿐만 아니라 도시 수목의 탄소저장량 추정에 대한 중요성도 부각되고 있다 (Dorendorf et al, 2015).

도시 내 탄소는 토양과 산림, 가로수 등에 저장된다. 도시 지역의 토양이 저장하는 탄소량을 추정하는 연구가 진행되었으며 (Pouyat et al, 2006), 도시 산림 종류와 행정구역, 도시-농촌 구배에 따른 토양과 지상부 탄소저장량의 관계를 확인하였다 (Lv et al, 2017). 또한 가로수가 제공하는 탄소 저장기능을 생태계 서비스 관점에서 정량화하는 모델을 제시되었다 (Revelli and Porporato, 2018). 수목의 탄소저장량을 정량화하는 가장 이상적인 방법은 수목을 굴취하

여 무게를 측정하는 방법이다 (McHale et al, 2009). 그러나 가로수에는 이러한 방법을 적용하기 어렵기 때문에 이를 대체하는 측정방식들이 사용되고 있다.

기본적인 탄소저장량 추정방법은 직접 개체목의 수고, 흉고직경 및 수관폭 등을 측정하고 이를 상대 생장식에 대입하여 추정한다 (Stoffberg et al, 2010). 하지만 이 방법은 노동집약적이며 측정에 많은 시간이 소비된다는 문제점이 있다. 이러한 한계를 보완하기 위한 다양한 원격탐사 기법이 활용되고 있다.

최근에는 위성영상, 항공사진, LiDAR 등 다양한 원격탐사 자료를 이용하여 탄소저장량을 추정하는 연구가 진행되고 있다. 위성영상을 이용하여 도시 지역의 탄소흡수량을 산정한 연구가 진행되었지만 (Kim et al, 2011), 해상도가 낮아 개체목 단위로 분석하기 어렵다. 따라서 위성영상을 활용하여 탄소저장량을 추정하면 가로수 탄소량의 오차가 클 수 있다. 반면에 LiDAR (Light Detection And Ranging)는 고출력의 펄스레이저를 이용하여 물체에 반사되어 돌아오는 레이저 빔의 시간을 측정하여 거리 데이터를 구축하기 때문에 개체목의 수고와 흉고직경을 정확하게 측정할 수 있다. 따라서 정확하게 측정된 수치를 이용하여 탄소저장량을 추정할 수 있다 (Zhao et al, 2018). LiDAR는 3차원 정보를 cm급의 높은 정확도로 제공하지만 (Lefsky et al, 2002), 장비가

매우 고가이고 넓은 지역을 대상으로 데이터를 취득할 때 시간 소비적인 한계점을 가지고 있다.

UAV (Unmanned Aerial Vehicle)와 SfM (Structure-from-Motion)기법을 활용한 방법은 넓은 지역에 대해 LiDAR와 같은 3차원 정보를 취득할 수 있으며 자재 비용과 운영에 있어 경제성이 높고 시간 해상도가 높아서 새로운 데이터 취득 방법으로 각광을 받고 있다 (Remondino et al, 2011). 이에 따라 UAV와 SfM기법으로 3차원 데이터를 구축하여 탄소 저장량을 추정한 연구들이 진행되었다 (Li et al, 2016; Bendig et al, 2014; Dandois and Ellis, 2013). UAV-SfM 기반 탄소저장량 추정 관련 선행연구들은 대부분 수고를 측정하는 방식으로 진행되었다. 그러나 Whittaker and Marks (1975)에 따르면 수고나 수관폭을 사용하는 방법이 흉고직경 만을 이용하여 탄소 저장량을 추정하는 회귀식보다 정확도가 낮다.

따라서 본 연구는 UAV-SfM방법을 이용하여 가로수의 흉고직경을 추출하여 개체목들의 탄소 저장량을 추정하였다. 그리고 1) UAV-SfM을 이용하여 추정한 흉고직경의 정확도 평가 2) 흉고직경과 탄소저장량 추정에 미치는 요인과 정확도를 높이기 위한 방안 3) UAV-SfM 활용 가능성을 확인하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구 대상지

연구 대상지는 서울특별시 관악구 봉천동 서

**Table 1.** Characteristics of UAV and camera used

UAV(Inspire 2)	
Manufacturer	DJI
Size	427×317×425mm
Weight	4kg
Flight Time	27 minutes
Maximum Speed	94km/h
Range	7km
Camera Resolution	20MP
Camera (Zenmuse 5XS)	
Resolution	5280×3956 (4:3)
FOV	72°
ISO	100
Focal Length	30 mm

울대학교 캠퍼스 내 2차선 도로이다 (Figure 1). 본 대상지는 도시 지역의 특성이 드러나 있는 지역으로 도로를 중심으로 동쪽으로는 주차장과 공지, 소규모 녹지공간이 위치하고, 서쪽에는 저층 주거지가 있다. 대상지에는 총 50그루의 가로수가 식재되어 있으며 가로수의 수종은 2018년 기준 서울시 가로수 중 현존 수량이 가장 많은 은행나무이다.

### 2. UAV 촬영

연구에 사용한 UAV 기체는 회전익 UAV로서 광범위하게 활용되고 있는 DJI사의 Inspire 2이다. 이 기체는 4개의 프로펠러를 갖는 quadcopter이며, 기체에 GPS와 IMU가 장착되어 있어 자세제어와 지비행 (Hovering), 자동 이착륙



**Figure 1.** study area

이 가능하다. UAV에 탑재된 짐벌 카메라는 Zenmuse 5XS이다. Inspire 2와 카메라 Zenmuse 5XS의 제원은 Table 1과 같다. 촬영 대상지의 면적은 약  $6,930m^2$ 이다.

본 연구에서는 수목의 흉고직경이 추출되어야 하기 때문에 UAV 영상으로 흉고직경을 탐지가 용이하도록 수목의 잎이 제거된 시기인 3월에 촬영하였다. UAV 비행은 Pix4D capture 어플리케이션을 이용하여 비행 변수를 설정하고 어플리케이션이 제공하는 경로 선택지 중 더블 그리드를 선택하여 자동 비행시켰다. 고도는 영상의 해상도를 최대 높이기 위하여 설정 가능한 고도 중 가장 낮은 고도인 30m로 설정하였다. 중복도는 최대한 많은 특징점을 생성시켜 영상 간의 정합에 유리하게 위해 최대 중복도인 90%로 지정하였다. 하지만 최대 비행 시간과 대상지 면적을 고려하여 횡중복도는 80%로 낮추어 비행하였다. 대상 수목의 줄기부분의 이미지의 중첩도를 높이기 위하여 같은 대상지를 다른 비행경로로 2회 비행하였다. 사용된 UAV 기체의 최대 비행가능 시간을 고려하여 대상지를 2개의 지역으로 나누어 총 4회 비행하였다. 1회당 비행시간은 10분 48초로 설계되었으며 영상은 총 1245매 취득하였다. Figure 2의 a는 각각의 비행 경로이며 Figure 2의 b는 각각의 다른 비행경로에서 찍힌 단일 영상이다. Figure 3는 연구흐름도이다.

### 3. 3D 포인트 클라우드 데이터 구축

UAV와 SfM기법을 이용하여 가로수의 3차원 데이터를 획득하기 위해서 Pix4D mapper soft-

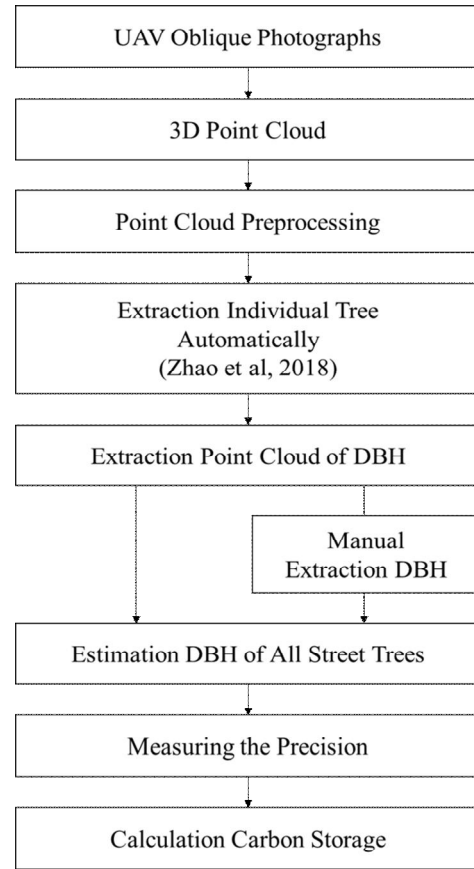


Figure 3. Study flow

ware를 이용하였다. 포인트 클라우드 데이터(point cloud)는 개별 포인트의 좌표정보(X, Y, Z)를 가지고 있다. 이는 영상 후처리에서 최초로 취득되는 데이터로, 촬영한 대상을 3차원으로 확인하기 적합한 데이터이다.

3차원 포인트 클라우드 구축에는 다수의 2차원 영상에서 3차원 지점을 구축하는 SfM 알고리즘이 활용된다. SfM 알고리즘은 SIFT (Scale

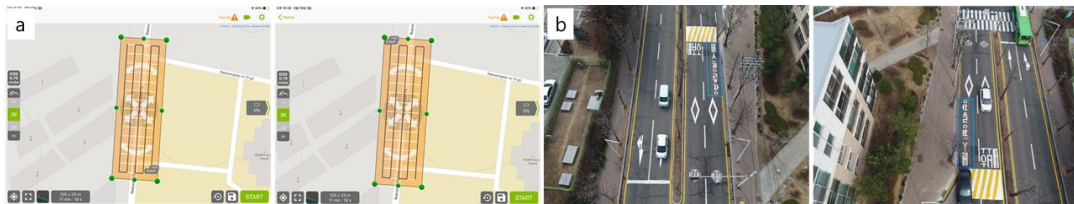


Figure 2. Flight courses(a) and images(b) according to the flight courses

Invariant Feature Transform) 알고리즘으로 추출된 특징점들이 이용된다. SIFT 알고리즘은 영상의 크기와 회전 변화에서 다수의 영상을 일치시켜 정합하는 방법으로 UAV를 통해 촬영한 영상에서 주요 특징점을 도출하고 특징점들을 매칭시킨다 (Lowe, 2004). SIFT 알고리즘으로 매칭된 특징점들로부터 두 영상 사이의 기하 관계를 이용하여, 두 카메라 사이의 상대적인 위치와 방향이 추정되고 이로부터 특징점의 3차원 위치가 추정된다. 그리고 특징점 이외 점들의 위치가 조정되면서 세밀한 3차원 포인트 클라우드 데이터가 구축된다. Figure 4는 구축된 3차원 포인트 클라우드이다.

#### 4. 포인트 클라우드 전처리

Statistical Outlier Removal (SOR) 알고리즘을 이용하여 구축된 포인트 클라우드 데이터에 포함되어 있는 노이즈를 제거하였다. SOR 알고리즘은 포인트들간의 거리를 통계적으로 분석하여 노이즈를 제거하는 방법이다. 이 알고리즘은 사용자가 각 포인트 별 거리의 평균과 표준편차를 계산할 포인트의 개수와 거리 표준편차에 곱할 임계값 ( $n$ )을 지정한다. 그리고 지정된 값을 가지고 최대 거리를 계산한다. 마지막으로 계산된 최대 거리보다 멀리 위치한 포인트를 노이즈로 간주하여 제거한다.

$$\max distance = average distance + n \times std.dev. \quad \dots 식 1$$

개체목 추출을 용이하게 하기 위하여 매칭 작업에서 생성된 포인트 클라우드 데이터를 지면과 비지면 포인트로 분리한다. 분리를 위해 Zhang et al (2016)가 제안한 Cloth Simulation Filter (CSF) 알고리즘을 사용하였다. CSF 알고리즘은 상하 반전시킨 포인트 클라우드를 위에서 덮는 천이 있다고 가정하고 천이 덮히는 포인트들을 지면으로 고려하는 방식이다. CSF 알고리즘을 활용하여 지면과 빌딩, 가로수, 가로시설물, 차량, 펜스, 표지판이 포함된 비지면 포인트로 분류하였다.

흉고직경 측정 시 높이를 도출하기 위하여 원 데이터의 높이 값을 지면으로부터의 높이 값으로 변화하였다. 이를 위해 분류된 지면 포인트를 Mesh형태로 전환시킨 후, mesh to distance tool을 활용하여 비지면 포인트들의 높이 값을 mesh로부터의 높이 값으로 대체하였다. 이후 분석에 불필요한 지면 포인트 클라우드는 완전히 제거하였다. 본 연구에서는 해당 처리를 Cloud Compare software V2.1을 이용하여 진행하였다.

전체 대상지의 포인트 클라우드에서 개별 가로수의 흉고 부분 포인트만을 추출하여 분석하

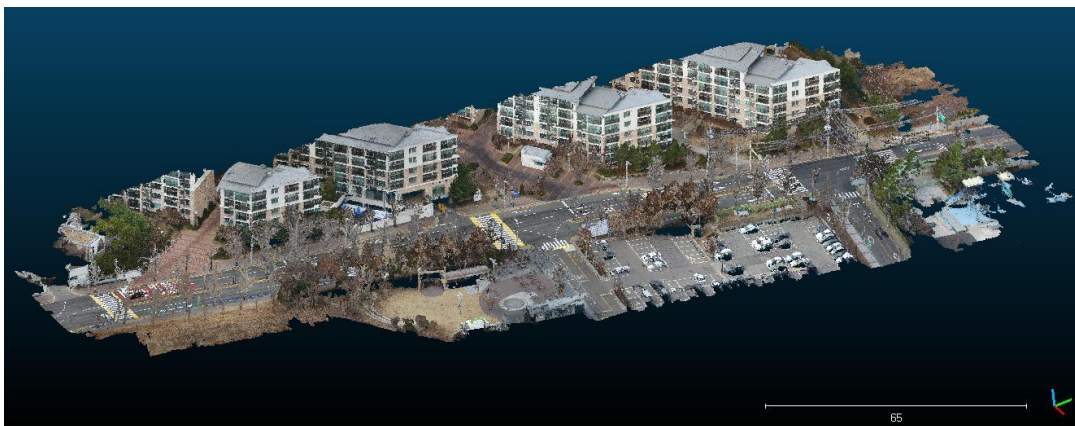
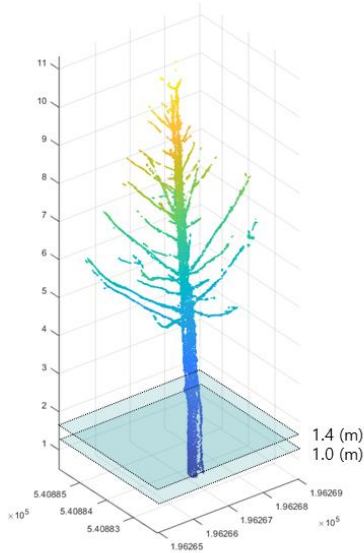


Figure 4. Result of building 3D pointcloud

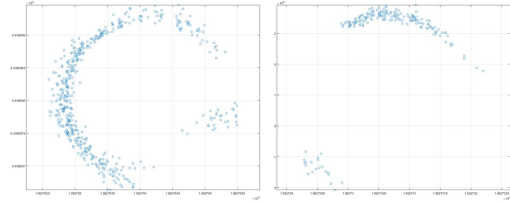


**Figure 5.** Example of individual street trees in the study area

기 위하여 각 가로수를 개체목 단위로 분류하였다. 이를 위해 Zhao et al (2018)의 자동 추출 방법을 Matlab software을 이용하여 직접 코드를 작성하여 본 연구에 적용시켰다. 자동 추출이 되지 않는 가로수는 수동으로 분류하였다. 결과적으로 Figure 5와 같은 개체목이 추출된다.

### 5. 흉고직경 추출

흉고직경은 보통 수목의 근원부분으로부터 1.2m의 높이를 측정한 값이다. UAV-SfM을 이용하여 생성된 3차원 포인트 클라우드 데이터는 LiDAR를 이용하여 구축된 데이터에 비해 포인트의 밀도가 낮다 (Kolzenburg et al, 2016). 따라서 1.2m에 해당하는 높이에 해당하는 포인트 클라우드만을 추출할 경우, 추출되는 포인트의 수가 흉고직경 추정하기에 충분하지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 개체목의 흉고 부분 데이터 추출에 있어 지면으로부터의 높이 1.0m~1.4m 범위의 데이터를 추출하였다. 추정을 위해 추출된 포인트를  $XOY$ 평면에 투영시켰다. Figure 6은 투영된 흉고부분 포인트 클라우드의 예이다.



**Figure 6.** Examples of pointcloud at breast height

데이터 추출 범위를 넓힘으로써 포인트 밀도를 높일 수 있으나, 상대적으로 노이즈 데이터가 많아지는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 RANSAC 알고리즘을 활용하여 흉고직경을 추정하였다.

RANSAC 알고리즘은 많은 노이즈를 포함한 데이터로부터 특정 모델의 파라미터를 추정할 때 적합한 방법이다. 가능한 많은 데이터를 사용하여 해를 구하는 전통적인 통계 방법과 달리 최소한의 데이터를 랜덤으로 선택하여 샘플링 하면서 노이즈를 계산하고, 노이즈가 가장 적은 최적의 해를 찾아내는 방법이다(Fischler and Bolles, 1981). 본 연구에서는 기존의 RANSAC 알고리즘을 포인트 클라우드 데이터를 이용한 흉고직경 추정에 적합하도록 Matlab software을 이용하여 직접 코드를 제작하여 수정하였다. 본 연구에서 사용한 RANSAC 알고리즘은 아래와 같은 과정을 거쳤다.

(1) 모델 파라미터를 결정하는 최소한의 데이터를 랜덤으로 선택한다. 원을 추정하기 위해 3개의 포인트를 선택한다.

(2) 수간의 단면을 원의 형태로 가정하여 3개의 포인트를 지나는 원을 만든다. 원의 기본 방정식을 사용하였다.

(3) 모든 포인트들에 대해서 미리 결정해놓은 허용량 안에 해당하는 포인트의 수를 구한다. 해당하는 포인트의 수는 미리 결정해놓은 허용 거리보다 작은 에러 값 (distance error)을 가진 포인트의 수로 정의하였다. 에러 값은 원의 중심과 포인트 클라우드의 한 점사이의 거리식으로 계산한다.

$$error = \sqrt{(x_p - a)^2 + (y_p - b)^2} - r \dots\dots\dots\text{식 2}$$

a와 b는 각각 원의 x와 y좌표이고,  $x_p$ 와  $y_p$ 는 포인트 클라우드의 한 점의 x와 y좌표, r은 원 C의 반지름을 의미한다. 변수 a, b, r은 랜덤으로 선택되어진 3개의 점으로 구성된 원에 의해 얻어진다. 허용치에 들어가는 포인트는 inlier라고 하고 경계 밖에 해당하는 포인트는 outlier라고 한다. 본 연구에서는 inlier 허용치는 추정된 원에서  $\pm 0.01(m)$  범위로 설정하였다.

(3) 전체 데이터에서 inlier가 차지하는 비율이 가장 클 때, 생기는 원을 최적의 해로 저장한다.

(4) (1)~(3)의 정해놓은 반복 수 만큼 반복한다. 본 연구에서는 반복 수를 3,000번으로 지정하였다. 반복과정 중에 저장되어있는 최적의 해보다 높은 inlier 비율을 가진 원이 생성되면 그것을 다시 새로운 최적의 해로 저장한다. 반복 수는 최대를 N으로 한정해놓는다. N은 inlier가 발생할 확률과 N번 시행 후에 성공할 확률을 고려하여 수식적으로 정한다.

(5) 반복이 종료된 후 마지막으로 저장되어 있는 최적의 해를 흉고에 해당하는 줄기의 둘레로 가정하고 직경을 계산한다. Figure 7은 원 추정 결과 예시이다

**6. 흉고직경 정확도 평가**

추정된 흉고직경의 정확도를 검증하였다. 정확도는 직접 측정한 흉고직경과 비교하여 구하

였다.  $R^2$ 과 평균 제곱근 편차(RMSE)를 통하여 정확도를 계산하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{50} (estimated\ DBH - measured\ DBH)^2}{\sum_{i=1}^{50} (estimated\ DBH - average\ of\ measured\ DBH)^2} \dots\dots\text{식 3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{50} (measured\ DBH - estimated\ DBH)^2}{50}} \dots\dots\dots\text{식 4}$$

**7. 탄소저장량 추정**

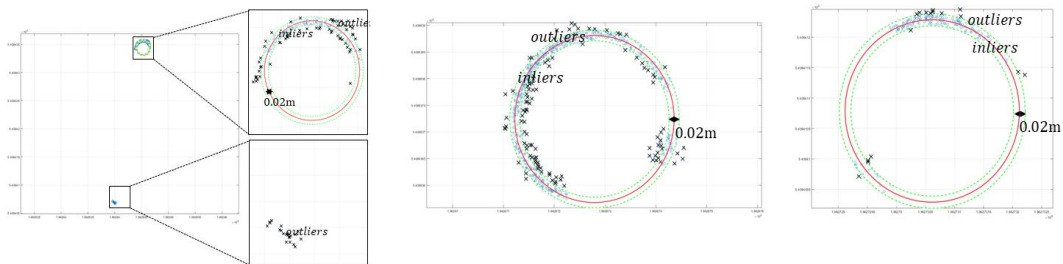
도시 지역에 식재되어진 가로수는 벌목 및 굴취하여 탄소저장량을 산정하는데 난이성이 기인하기 때문에 이전 연구에서 계량화한 자료에 의존하여 추정한다. 본 연구는 지역과 수종의 특성을 고려하여 국내에서 고유한 수형을 유지하면서 수관 등이 정상적으로 성장한 은행나무를 근굴취하여 개발한 Jo and Ahn, 2012의 회귀 모델을 활용하였다.

$$\ln Y(kg) = -2.8428 + 2.3787 \ln DBH(cm) \dots\dots\text{식 5}$$

**III. 결과 및 고찰**

**1. 3D 포인트 클라우드 데이터 구축 결과**

구축된 3차원 포인트 클라우드의 평균 GSD (Ground Sampling Distance)는 0.80cm로 제작되었다. 영상 당 특징점의 중앙값은 3,478개다. 전체 대상지의 포인트는 총 77,154,546개이며 평균 포인트의 밀도는  $6,450.32/m^2$ 로 생성되었다. 또한 이미지 각도 차이로 발생할 수 있는 방향



**Figure 7.** Results of RANSAC algorithm processing

각의 RMS는 x축 7.293, y축은 3.885, z축은 7.753이다.

## 2. 흉고직경 정확도

RANSAC 알고리즘을 이용하여 추정된 흉고 직경과 현장 조사를 통해 측정한 흉고직경을 비교하였다(Table 2). 최소 오차는 0.005cm, 최대 오차는 5.95cm이며 평균 오차는 1.44cm이다. 평균 오차율은 약 6.3%로 추정되었다.  $R^2$ 은 0.93으로 두 변수는 높은 상관관계를 가졌다. RMSE는 1.86cm로 Mobile LiDAR를 이용하여 가로수의 DBH를 추정한 연구 결과 (Zhao et al, 2018) 범주 내에 해당하는 수치가 나타났다(figure 8).

Tree 3과 Tree 9는 오차율이 20% 이상인 결

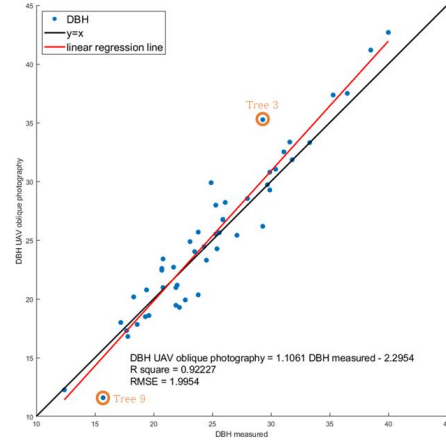


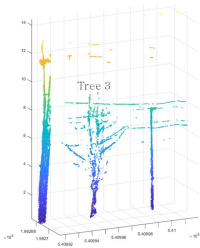
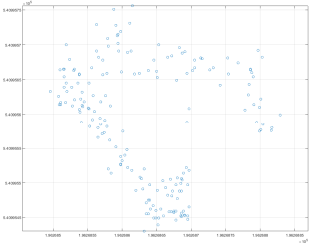
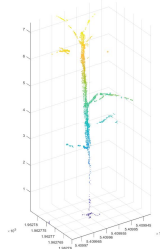
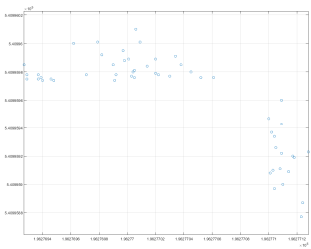
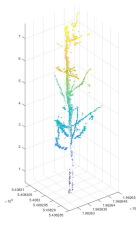
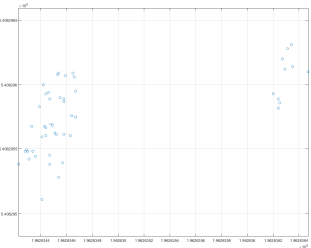
Figure 8. Comparison between DBH from oblique photography and filed measured

Table 2. Comparison of DBH estimated and measured

Tree No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measured (cm)	31.80	21.90	29.30	19.40	18.30	31.60	17.70	29.90	15.70	18.60
Estimated (cm)	31.85	20.97	35.26	20.77	20.17	33.35	17.30	30.79	11.59	17.83
error (cm)	0.05	-0.93	5.96	1.37	1.87	1.75	-0.40	0.89	-4.11	-0.77
error rate	0.0015	0.0425	0.2034	0.0706	0.1022	0.0555	0.0225	0.0298	0.2618	0.0413
Tree No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Measured (cm)	25.90	21.70	17.20	20.80	24.30	23.10	23.50	23.80	19.60	19.30
Estimated (cm)	26.73	22.70	18.00	20.97	24.46	24.88	24.03	20.35	18.59	18.49
error (cm)	0.83	1.00	0.80	0.17	0.16	1.78	0.53	-3.45	-1.01	-0.81
error rate	0.0322	0.0462	0.0462	0.0080	0.0065	0.0769	0.0223	0.1450	0.0516	0.0420
Tree No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Measured (cm)	20.70	21.90	25.40	29.90	33.30	40.00	25.30	20.80	25.30	12.40
Estimated (cm)	22.44	19.46	24.26	29.27	33.31	42.69	25.53	23.41	27.98	12.26
error (cm)	1.74	-2.44	-1.14	-0.63	0.01	2.69	0.23	2.61	2.68	-0.14
error rate	0.0842	0.1115	0.0447	0.0210	0.0002	0.0672	0.0090	0.1254	0.1060	0.0110
Tree No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Measured (cm)	36.50	35.30	38.50	30.40	31.10	27.10	28.00	24.50	22.20	29.70
Estimated (cm)	37.50	37.36	41.18	31.04	32.52	25.42	28.55	23.30	19.28	29.72
error (cm)	1.00	2.06	2.68	0.64	1.42	-1.68	0.55	-1.20	-2.92	0.02
error rate	0.0273	0.0583	0.0696	0.0211	0.0457	0.0620	0.0195	0.0491	0.1317	0.0007
Tree No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Measured (cm)	25.60	26.10	23.80	25.90	29.30	24.90	20.70	17.80	22.00	22.70
Estimated (cm)	25.64	28.21	25.69	26.77	26.18	25.56	22.59	16.80	21.17	19.92
error (cm)	0.04	2.11	1.89	0.87	-3.12	0.66	1.89	-1.00	-0.83	-2.78
error rate	0.0015	0.0810	0.0793	0.0337	0.1064	0.0265	0.0913	0.0560	0.0377	0.1226



**Table 3.** Example of trees having high error rate

	point cloud of individual street tree	point cloud of DBH
Tree 3		
Tree 9		
Tree 28		

과를 보였으며, Tree 5와 Tree 18, Tree 22, Tree 28, Tree 29, Tree 39, Tree 45, Tree 50은 오차율이 10%를 초과하였다. 이와 같은 결과를 가진 데이터 분석을 통해 흉고직경 추정의 정확도를 낮추는 다양한 요인들을 예상하였다. 첫째, 대상물을 탐지하려는 카메라를 물리적으로 방해하는 주변 시설물들의 영향이다. 생성되는 포인트 데이터의 질은 UAV가 대상물의 영상을 얼마나 획득하느냐에 따라 달라진다. 즉, 카메라가 가로수를 탐지할 때 주변에 물리적으로 흉고직경 측정 부분을 가리는 도시 시설물이나 대상이 아닌 다른 가로수가 주변에 위치하면 SIFT 알고리즘 과정시, 충분한 특징점을 생성하지 못하여 밀도가 상대적으로 낮고 고르지 못한 분포를 가진 포인트

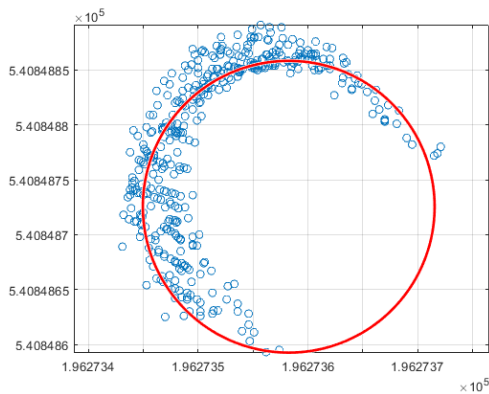
클라우드 데이터가 생성된다. Tree 3의 경우, 전신주가 가로수 가까이 위치해있으며 가로수 수관 위에는 전선이 복잡하게 놓여있다. Tree 18 주변에는 교통안전 표지판과 가로등이 위치하고 있어 낮은 정확도를 보였다. 둘째, 대상지의 바깥 부분에 위치해 있는 가로수들에게 낮은 정확도 결과가 보였다. Tree 28, 29, 39, 50는 촬영 대상지의 바깥 쪽에 위치해 있는 가로수로 모두 오차율이 10%이상이다. 그리드 경로와 각도를 주어 촬영한 방식 특성상 촬영 대상지에서 바깥 쪽에 위치한 가로수 영상은 중심에 위치한 가로수 영상보다 개수가 적다. 결과적으로 충분한 포인트 클라우드가 생성되지 않아 정확도가 떨어지게 된다. 셋째, Tree 9와 Tree 5는 각각 흉고직

**Table 4.** Comparison of carbon storage estimated and measured

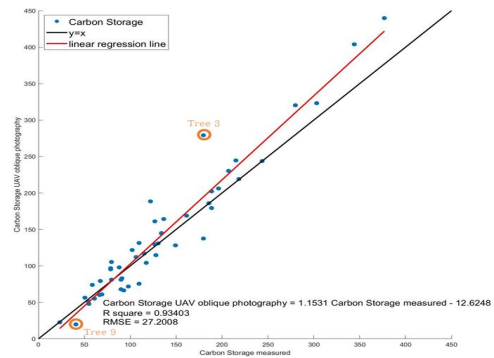
Tree No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Measured (kg)	218.38	89.93	179.73	67.40	58.67	215.13	54.19	188.61	40.74	60.98
Estimated (kg)	219.15	81.10	279.19	79.28	73.95	244.60	51.33	202.26	19.79	55.15
error (kg)	0.77	-8.83	99.46	11.88	15.28	29.47	-2.86	13.64	-20.95	-5.83
error rate	0.0035	0.0982	0.5534	0.1762	0.2605	0.1370	0.0527	0.0723	0.5142	0.0956
Tree No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Measured (kg)	134.03	87.99	50.62	79.55	115.17	102.10	106.35	109.61	69.07	66.58
Estimated (kg)	144.51	97.97	56.37	81.08	116.95	121.78	112.09	75.51	60.89	60.12
error (kg)	10.48	9.98	5.75	1.53	1.78	19.69	5.74	-34.10	-8.18	-6.46
error rate	0.0782	0.1134	0.1135	0.0192	0.0155	0.1928	0.0540	0.3111	0.1184	0.0970
Tree No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Measured (kg)	78.65	89.93	127.96	188.61	243.68	376.88	126.76	79.55	126.76	23.24
Estimated (kg)	95.32	67.89	114.77	179.32	243.78	439.91	129.48	105.36	161.10	22.64
error (kg)	16.68	-22.04	-13.19	-9.29	0.10	63.03	2.72	25.80	34.34	-0.61
error rate	0.2120	0.2451	0.1031	0.0493	0.0004	0.1672	0.0215	0.3243	0.2709	0.0261
Tree No.	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Measured (kg)	303.12	279.95	344.13	196.20	207.12	149.28	161.34	117.43	92.89	185.62
Estimated (kg)	323.20	320.34	403.90	206.18	230.35	128.19	168.92	104.19	66.38	185.94
error (kg)	20.08	40.39	59.77	9.98	23.23	-21.09	7.58	-13.25	-26.51	0.32
error rate	0.0662	0.1443	0.1737	0.0509	0.1122	0.1413	0.0470	0.1128	0.2853	0.0017
Tree No.	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Measured (kg)	130.37	136.51	109.61	134.03	179.73	122.05	78.65	54.92	90.91	97.94
Estimated (kg)	130.84	164.30	131.42	145.01	137.53	129.88	96.82	47.89	82.96	71.75
error (kg)	0.47	27.80	21.81	10.98	-42.21	7.83	18.18	-7.03	-7.95	-26.19
error rate	0.0036	0.2036	0.1990	0.0820	0.2348	0.0642	0.2311	0.1281	0.0874	0.2674

경이 15.7cm, 18.3cm로 직경이 얇은 가로수이다. 얇은 두께는 영상에 찍힌 물체를 정합하는

과정에서 식별되기 어려워서 낮은 밀도의 포인트 클라우드 데이터가 생성된다 (Table 3). 단 흉



**Figure 9.** Pointcloud at breast height and the circles fitted using RANSAC algorithm



**Figure 10.** Comparison between Carbon Storage from oblique photography and filed measured

고직경이 가장 작은 Tree 30의 경우 도로 분리용 가로수로 대상지의 중심에 위치하고 주변 가로수들과 거리가 상대적으로 넓어 흉고부분 영상이 충분히 획득되어 졌다.

또한 원 추정 기법에서 오차가 유발될 수 있다. RANSAC 알고리즘은 원을 추정이기 때문에 불규칙한 줄기에 적용하였을 때, 오차가 생긴다. Figure 9에서 볼 수 있듯이, 대상 가로수의 줄기는 타원에 가까운 모양이다. 하지만 RANSAC 알고리즘이 원을 추정하기 때문에 흉고직경이 과소 추정되었다.

### 3. 탄소 저장량 산정

추정된 원의 직경을 이용하여 탄소저장량을 산출한 결과, 대상지 전체 50그루의 추정된 탄소저장량은 대략 6,940kg으로 계산되었다. 실측한 흉고직경을 통해 산정된 탄소저장량과 비교한 결과는 최소 오차는 0.09kg, 최대 오차는 99.45kg이며 평균 오차는 19.03kg이다. 최소 오차율은 약 0.04%이고 최대 오차율은 약 55%이었으며 평균 오차율은 약 15%이다. 탄소저장량 추정의  $R^2$ 은 0.94, RMSE는 25.5kg이다(Figure 9).

본 연구에서 제안한 방법은 흉고직경 추정 오차가 수목의 탄소저장량 오차량에 직접적인 영향을 미친다. 수목의 흉고직경이 10cm인 수목에서 2cm의 흉고직경 오차가 발생하였을 때 탄소저장량 5.73 kg를 과소 추정하거나 7.56 kg를 과대추정하게 된다. 하지만 흉고직경이 30cm인 수목에서는 과소추정 시 28.77 kg, 과대 추정 시 31.54 kg 오차량이 생긴다. 이러한 결과는 같은 오차량이라도 수목의 직경이 큰 수목일수록 탄소저장량 추정에 더 큰 오차량을 유발함을 보여준다. 또한 Tree 48와 Tree 31은 모두 1cm 흉고직경 오차를 보였다. 하지만 오차가 탄소저장량으로 환산되었을 때 Tree 48는 12%, Tree 31은 6%의 오차율을 유발하였다. 같은 흉고직경 오차량이라도 수목의 직경이 작은 수목의 더 큰 오차율을 유발하였다.

정확한 탄소저장량 추정을 위해서는 대상의 충분한 데이터를 구축해야 한다. 충분한 데이터를 획득하기 위해서는 적합한 대상지와 시기 선택이 중요하다. 상공에서 대상물을 촬영할 때 방해하는 물체가 많을수록 추정을 위해 사용할 수 있는 데이터 수가 감소된다. 따라서 가로수 간의 식재 거리가 넓고 다른 도시 시설물이 적은 지역일수록 본 연구에서 제안한 기법이 잘 적용된다. 또한 잎이 제거되어 흉고직경 탐지가 쉬운 겨울철이 유리하다.

## V. 결론

UAV의 영상과 SfM 기법을 통해 3차원 모델을 제작하여 탄소저장량을 추정하는 방법은 기존의 다른 원격탐사 방법들에 비해 경제적이며 시간 해상도가 높다. 본 연구는 UAV-SfM 기법을 사용하여 50그루의 가로수 흉고직경을 추정하였고, 추정한 흉고직경을 변수로 하는 회귀모델을 이용하여 개체목들의 탄소저장량을 산정하였다. 추정한 흉고직경을 이용하여 추정한 탄소저장량은 현장에서 측정한 값과 비교하였다. 추정된 흉고직경의 RMSE는 1.86cm이고 탄소저장량의 RMSE는 25.5kg의 결과를 보였다. 또한 흉고직경의 평균 오차율은 6.3%, 탄소저장량의 오차율 중앙값은 대략 11%임을 확인하였다.

하지만 UAV에 디지털 카메라를 장착하여 얻은 영상으로 3차원 공간 데이터를 구축한 경우, 구축된 데이터는 위치 좌표와 RGB값 만 가지고 있으므로 자동으로 수목을 추출하는 것에 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 자동으로 분류되지 않는 경우 수동으로 분류하였다. 이 과정으로 인해 정보 취득 이후 데이터처리 과정에서 많은 시간이 소요되었다. 따라서 향후 연구에서는 수목 추출방법을 고도화할 필요가 있다. 위치 좌표뿐 아니라 수목의 형태적인 특징등을 추가 고려하여 분류하면 자동 추출에 도움이 될 수 있을 것이다. 예를 들어 가로수의 높이와 부

피, 도로 중앙으로부터 거리 변수에 제한을 둔다면 보다 정확한 추출 결과를 얻을 수 있다. 더불어 포인트 클라우드 데이터에서 객체 추출을 위한 복셀화나 머신러닝 기법을 활용하면 자동 분류 기법이 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

제시한 한계점이 보완된다면 가로수의 탄소 저장량 인벤토리 구축에 있어 시간적 비용적 효율을 높일 수 있을 것이다. 이는 도시의 녹지 복원 사업 전후 현황 조사나 조성 이후 관리를 위한 정기적인 모니터링을 위한 효율적 방안으로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

## References

- Allen, C. D. · A. K. Macalady · H. Chenchouni · D. Bachelet · N. McDowell · M. Venetier · T. Kitzberger · A. Rigling · D. D. Breshears · E. H. (Ted) Hogg · P. Gonzalez · R. Fensham · Z. Zhang · J. Castro · N. Demidova · J. H. Lim · G. Allard · S. W. Running · A. Semerci and N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4) : 660-684.
- Bendig, J. · A. Bolten · S. Bennertz · J. Broscheit · S. Eichfuss and G. Bareth. 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing* 6(11) : 10395-10412.
- Dandois, J. P. and E. C. Ellis. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment* 136 : 259-276.
- Dorendorf, J. · A. Eschenbach · K. Schmidt and K. Jensen. 2015. Both tree and soil carbon need to be quantified for carbon assessments of cities. *Urban Forestry and Urban Greening* 14(3) : 447-455.
- Fischler, M. a and R. C. Bolles. 1981. Random Sample Paradigm for Model Consensus: A Apphcatlons to Image Fitting with Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM* 24(6) : 381-395.
- Gibbs, H. K. · S. Brown · J. O. Niles and J. A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2(4) :
- Houghton, R. A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11(6) : 945-958.
- Jingyun, F. · C. Anping · P. Changhui · Z. Shuqing and C. Longjun. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* 292(June) : 2320-2322.
- Jo, H.-K. and T.-W. Ahn. 2012. Carbon Storage and Uptake by Deciduous Tree Species for Urban Landscape. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 40(5) : 160-168. (In Korean with English summary)
- Kim, K. T. · J. W. Cho and H. H. Yoo. 2011. Carbon Storage Estimation of Urban Area Using KOMPSAT-2 Imagery. *Journal of the Korean society for geospatial information science (Bk 21)* : 49-54. (In Korean with English summary)
- Kolzenburg, S. · M. Favalli · A. Fornaciai · I. Isola · A. J. L. Harris · L. Nannipieri and D. Giordano. 2016. Rapid Updating and Improvement of Airborne LIDAR DEMs Through Ground-Based SfM 3-D Modeling of Volcanic Features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54(11) :

- 6687-6699.
- Li, W. · Z. Niu · H. Chen · D. Li · M. Wu and W. Zhao. 2016. Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators* 67 : 637-648.
- Lefsky, M. A. · W. B. COHEN · G. G. PARKER and D. J. HARDING. 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52(1) : 19.
- Lowe, D. G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints.pdf. *International Journal of Computer Vision*: 1-28.
- Luyssaert, S. · E. D. Schulze · A. Börner · A. Knohl · D. Hessenmöller · B. E. Law · P. Ciais and J. Grace. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455(7210) : 213-215.
- Lv, H. · W. Wang · X. He · C. Wei · L. Xiao · B. Zhang and W. Zhou. 2018. Association of urban forest landscape characteristics with biomass and soil carbon stocks in Harbin City, Northeastern China. *PeerJ* 6 : e5825.
- McHale, M. R. · I. C. Burke · M. A. Lefsky · P. J. Peper and E. G. McPherson. 2009. Urban forest biomass estimates: Is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosystems* 12(1) : 95-113.
- Omasa, K. · G. Y. Qiu · K. Watanuki · K. Yoshimi and Y. Akiyama. 2003. Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environmental Science and Technology* 37(6) : 1198-1201.
- Pouyat, R. V. · I. D. Yesilonis and D. J. Nowak. 2006. Carbon Storage by Urban Soils in the United States. *Journal of Environment Quality* 35(4) : 1566.
- Pregitzer, K. S. and E. S. Euskirchen. 2004. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10(12) : 2052-2077.
- Remondino, F. · L. Barazzetti · F. Nex · M. Scaioni and D. Sarazzi. 2012. Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling - Current Status and Future Perspectives. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/ (September)* : 25-31.
- Revelli, R. and A. Porporato. 2018. Ecohydrological model for the quantification of ecosystem services provided by urban street trees. *Urban Ecosystems* 21(3) : 489-504.
- Solomon, A. M. · J. Wisniewski · S. Brown · M. C. Trexler · R. A. Houghton and R. K. Dixon. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263 (5144) : 185-190.
- Stoffberg, G. H. · M. W. van Rooyen · M. J. van der Linde and H. T. Groeneveld. 2010. Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the City of Tshwane, South Africa. *Urban Forestry and Urban Greening* 9(1) : 9-14.
- Whittaker, R. H. and P. L. Marks. 1975. Methods of Assessing Terrestrial Productivity. *Primary Productivity of the Biosphere*: 55-118.
- Zhang, W. · J. Qi · P. Wan · H. Wang · D. Xie · X. Wang and G. Yan. 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing* 8(6) : 1-22.
- Zhao, Y. · Q. Hu · H. Li · S. Wang and M.

Ai. 2018. Evaluating Carbon Sequestration and PM2.5 Removal of Urban Street Trees Using Mobile Laser Scanning Data. Remote Sensing 10(11) : 1759.