

하도 내 식생의 물리적 구조를 산정하기 위한 3차원 지상 레이저 스캐닝의 도입 및 활용

Introduction and Application of 3D Terrestrial Laser Scanning for Estimating Physical Structures of Vegetation in the Channel

장은경¹ · 안명희² · 지윤^{3,4*}

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원, ²한국건설기술연구원 국토보전연구본부 신진연구원,
³한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, ⁴과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 부교수

Eun-kyung Jang¹, Myeonghui Ahn² and Un Ji^{3,4*}

¹Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²Budding Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

³Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁴Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University of Science and Technology, Goyang 10223, Korea

Received 7 February 2020, revised 30 March 2020, accepted 7 May 2020, published online 30 June 2020

ABSTRACT: Recently, a method that applies laser scanning (LS) that acquires vegetation information such as the vegetation habitat area and the size of vegetation in a point cloud format has been proposed. When LS is used to investigate the physical shape of vegetation, it has the advantage of more accurate and rapid information acquisition. However, to examine uncertainties that may arise during measurement or post-processing, the process of adjusting the data by the actual data is necessary. Therefore, in this study, the physical structure of stems, branches, and leaves of woody vegetation in an artificially formed river channel was manually investigated. The obtained results then compared with the information acquired using the three-dimensional terrestrial laser scanning (3D TLS) method, which repeatedly scanned the target vegetation in various directions to obtain relevant information with improved precision. The analysis demonstrated a negligible difference between the measurements for the diameters of vegetation and the length of stems; however, in the case of branch length measurement, a relatively more significant difference was observed. It is because the implementation of point cloud information limits the precise differentiation between branches and leaves in the canopy area.

KEYWORDS: 3D terrestrial laser scan, Manual survey of vegetation, Physical structures of vegetation, Point clouds

요 약: 최근 식생이 분포하는 면적, 식생의 크기와 같은 형상 정보를 포인트 클라우드 형식의 3차원 형태로 획득할 수 있는 Laser Scanning (LS)을 활용하는 방법들이 제안되고 있다. 식생의 물리적 형상 구현을 위해 LS를 활용할 경우, 식생 정보를 보다 정밀하고 빠르게 취득할 수 있다는 장점이 있으나 측정 혹은 후처리 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 검토하기 위해 실제 데이터와 비교하여 보정하는 과정이 반드시 요구된다. 따라서 본 연구에서는 인공적으로 조성된 하천 수로 내 목본 식생의 줄기, 가지, 잎의 물리적 구조에 대한 매뉴얼 조사를 수행하고 이를 3차원 Terrestrial Laser Scanning (TLS)에 의해 획득한 정보와 비교하였다. 또한, 목본 식생에 대한 3차원 TLS는 여러 방향에서 반복적으로 스캐닝을 수행하여 획득되는

*Corresponding author: jiun@kict.re.kr, ORCID 0000-0002-4925-5018

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

식생 정보의 정밀도를 향상하고자 하였다. 분석 결과, 식생의 직경과 줄기의 길이는 두 방법의 결과가 큰 차이가 없으나 가지의 길이를 측정할 경우, 포인트 클라우드 정보로는 캐노피 영역에서 가지와 잎의 정확한 구별이 어렵다는 한계점으로 상대적으로 큰 차이가 있는 것으로 나타났다.

핵심어: 3차원 지상 레이저 스캔, 매뉴얼 식생 조사, 식생의 물리적 구조, 포인트 클라우드

1. 서론

자연 하천의 흐름 해석에서 하도 내 식생의 분포는 흐름 저항과 수위 결정에 중요한 요소일 뿐만 아니라 하천시스템의 물리적, 화학적, 생물학적 과정에도 영향을 미치는 요소이다 (Aberle and Järvelä 2013). 하도 내 식생 활착 및 식생의 이입, 천이 현상은 하도 변화와 홍수위를 상승시켜 치수적인 문제를 유발하며 (Kim et al. 2014), 홍수 범람 해석에서 식생의 유형 및 분포 홍수량, 홍수 빈도에 영향을 미치는 것으로 나타났다 (Jin and Cho 2016). 이에 따라, 식생에 의한 흐름 저항을 추정하는 것은 수위의 변화를 예측하고 하천 관리를 위한 자료를 도출한다는 측면에서 매우 중요한 문제이다. 식생에 의한 흐름 저항을 추정하기 위한 중요한 변수 중 하나는 식생의 물리적 구조와 분포 특성을 정량화하는 것이다 (Luhar and Nepf 2013). 그러나 현장에서 이를 직접 모니터링하여 취득하는 경우 제한적이고 국부적인 정보만 취득될 수 있으며, 상대적으로 많은 시간과 비용이 소모된다. 특히 직접적인 모니터링 방식은 상당한 시간이 소요될 뿐만 아니라 취득된 데이터 또한 다수의 불확실성이 존재한다. 또한, 규칙적이지 않은 식생의 형상을 구현하기 위해서는 작은 가지 하나도 반복적인 측정이 필요할 뿐만 아니라 경우에 따라 측정 방향에 영향을 받기도 한다. 따라서 하천 범위 내 혼합된 식생 중에 대한 현장 데이터 획득 및 복잡한 식생의 특성을 일반화된 매개변수로 규정하는 것은 쉽지 않다.

최근에는 포인트 클라우드 형태로 물체의 3차원 정보를 획득할 수 있는 지상 레이저 스캐닝 (Terrestrial Laser Scanning, TLS)을 통해 식생의 구조와 형상을 분석하는 연구가 시도되고 있다. Brodu and Lague (2012)는 하천에서 3차원 포인트 클라우드 데이터를 획득하여 자갈, 하상, 식생 등을 분류하는 연구를 수행한 바 있으며, Jalonen et al. (2015)은 TLS를 이용하여 초본성과 목본성 식생의 포인트 클라우드 자료를 구축하여 식생의 2차원 면적 산출 및 검증을 통해 신뢰성 있는 연구

결과를 제시하였다. Wu et al. (2018)은 TLS를 이용하여 3가지 종류의 나무를 스캐닝한 후 잎사귀와 가지를 분류하고 3차원 포인트 클라우드 자료를 복셀 (Volume pixel, Voxel)화하여 면적 및 밀도를 산정하였다. 그러나 TLS의 경우 취득되는 수백만 개의 대규모 포인트 클라우드 데이터 내에서 원하는 정보를 추출하기 위한 추가적인 프로세스가 수행되어야 하며, 특히 측정 시점의 환경과 밀집도에 따른 면밀한 분석이 요구된다. 따라서 TLS를 활용한 측정 결과와 실제 식생 특성 간의 차이를 분석하고 이에 대한 관계를 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 3차원 TLS를 활용하여 실험실 규모로 내 제한된 환경 안에 설치된 인공 식생의 물리적 구조를 분석하였다. 이를 위해 먼저 실험실 규모로 내 설치된 인공 식생의 표본을 추출하여 매뉴얼 조사를 수행하였으며, 이를 3차원 TLS로 취득한 식생 데이터와 비교하였다.

2. 실험실 규모 및 대상 식생의 개요

2.1 실험실 규모 및 인공 식생

본 연구에서는 국내 하천에서 보이는 자연 식생의 형태를 유사하게 재현하기 위해 하천 내에 가장 많이 활착되어있는 버드나무와 형태의 인공 식생을 제작하여 이를 활용하였다. 인공 식생은 실제 나무에 방수처리된 줄기와 가지로 형성되어 있으며, 버드나무의 잎사귀와 가장 유사한 잎사귀인 인공 올리브 잎사귀 형태를 적용하여 제작하였다 (Fig. 1). 식생의 전체 높이는 1.1 m이며, 식생의 가지는 4-5개로 구성되어있고, 평균 직경은 3-5 cm, 잎사귀의 길이는 7-9 cm, 폭은 1.3-1.8 cm이다. 또한, 일정한 식생패치 조건 조성 및 식생 활착을 고려하기 위해 인공수로 내 식생패치를 설치하였으며, 이를 위해 한국건설기술연구원 하천연구센터 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology-River Experiment Center, KICT-REC)의 직선 수로를 활용하였다.



Fig. 1. Photograph of sample vegetation.

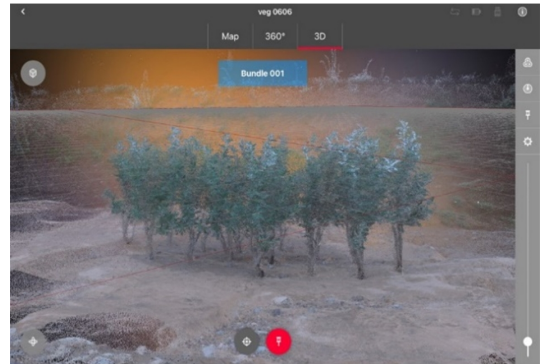
2.2 3차원 TLS 측정

TLS는 대상 체면을 투사하고 레이저가 간섭이나 반사되어 돌아올 때까지 시각 혹은 주파수 위상차를 이용하여 3차원의 위치 정보를 취득하는 장비로서, 대상체에 대한 점 자료 (Point Data)의 점군 (Point Cloud) 형태 데이터를 취득할 수 있다. 본 연구에서는 KICT-REC 실험수로에서 식생패치를 대상으로 Leica에서 제작된 RTC 3D 스캐너 (Leica Geosystems)를 이용하여 3차원 포인트 클라우드 정보를 취득하였다 (Fig. 2 (a)). Leica RTC 3D 스캐너는 360도 측정을 통해 초당 2백만 포인트로 2분 내로 1회 스캔을 완료하는 성능을 갖고 있으며, 0.5 m에서 130 m까지의 범위에서 물체의 스캔이 가능하다. 10 m 범위에서는 1.9 mm의 정밀도, 20 m와 40 m 범위에서는 각각 2.9 mm, 5.3 mm의 정밀도를 가진다 (Leica 2018).

본 연구에서는 첫 번째 패치를 중심으로 9개 지점에서 6 mm의 정밀도로 식생을 스캔하였다. 한 지점에서 스캔하고 이동하여 스캔할 때 이전의 스캔한 데이터 내에서 주변의 고정된 물체를 이용하여 자동으로 정합이 이루어지며, 스캔한 파일은 Cyclone REGISTER 360 프로그램으로 정밀한 정합을 수행하였다 (Fig. 2 (b)). 식생패치의 정합 오차는 0.004 m이며, 전체 스캔 파일의 포인트 수는 462,871,840개이고, 전체 스캔 파일에서 식생패치만 추출한 포인트 수는 5,927,695개이다.



(a)



(b)

Fig. 2. Vegetation measurement in the channel and measured 3D TSL point clouds.

3. 식생 물리적 특성 조사

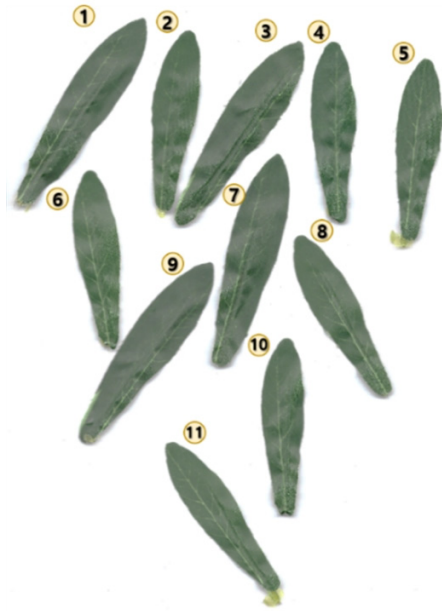
3.1 매뉴얼 식생 조사

대상 식생의 정확한 물리적 제원을 분석하기 위해 식생 샘플의 매뉴얼 조사를 수행하였다. 매뉴얼 조사를 위해 버니어 캘리퍼스와 줄자를 사용하였으며, 식생의 높이와 직경 그리고 줄기의 길이와 직경, 잎의 개수를 측정하였다. 매뉴얼 조사를 수행한 결과, Table 1에 나타난 바와 같이 식생 줄기의 길이는 75 cm이며 직경은 2.3 cm이다. 식생 줄기를 중심으로 4개의 작은 가지로 구성되어 있으며, 줄기와 가지에 분포된 잎의 개수는 485개이다.

또한, 식생 잎의 면적 추정을 위해 인공 식생에서 임의로 잎의 표본을 추출하여 실험실에서 스캐너로 스케일 바와 함께 잎의 스캔 이미지를 생성하였다 (Fig. 3). 다양한 크기의 잎들을 대표할 수 있는 평균값 도출과 분석과정에서 발생할 수 있는 오차를 반영하기 위해 총 11개의 잎의 표본을 추출하여 분석하였다. 잎의 이미지는

Table 1. Vegetation properties by manual survey

Main stem	Height (cm)		75
	Diameter (cm)		2.3
	(a) No. of leaf		264
Branch	No. of branch		4
	1	Diameter (cm)	1.2
		Length (cm)	36
		(b) No. of leaf	112
	2	Diameter (cm)	1.3
		Length (cm)	11.9
		(c) No. of leaf	39
	3	Diameter (cm)	1.1
		Length (cm)	28.5
		(d) No. of leaf	28
	4	Diameter (cm)	1.05
Length (cm)		29	
(e) No. of leaf		42	
Total No. of leaf (a) + (b) + (c) + (d) + (e)			485

**Fig. 3.** Photograph of sample leaves.

모두 평평하게 스캔 된 것으로 실제 현장에서 주름지거나 휘어진 실제 잎에 비해 다소 크게 산정될 수 있음에 유의하였다. 스캔 이미지 파일에서 정확한 수치를 측정하기 위해 CAD 프로그램에서 스케일을 보정한 후 잎의 길이와 폭을 산정하였다. 이미지 파일에서 측정한 잎의 길이와 폭을 곱하여 잎의 면적을 산정하였다.

Table 2. Leaf dimensions by image analysis

No.	Length (cm)	Width (cm)	Area (cm ²)
1	9.02	2.01	18.16
2	7.41	1.86	13.77
3	8.88	2.09	18.57
4	7.26	1.82	13.20
5	7.59	1.81	13.69
6	7.23	1.78	12.85
7	8.89	2.03	17.99
8	7.37	1.80	13.24
9	8.87	2.03	17.98
10	7.15	1.69	12.05
11	7.88	1.77	13.95
Avg.	7.96	1.88	15.04

분석 결과, 잎의 길이는 7.15 cm에서 9.02 cm의 범위로 측정되었고 폭은 1.69 cm에서 2.09 cm인 것으로 나타났다. Table 2에 나타난 바와 같이 잎의 면적은 10.94 cm²에서 19.68 cm²의 범위로 산정되었으며, 평균 길이는 7.96 cm, 평균 폭은 1.88 cm로 잎의 평균 면적은 15.04 cm²인 것으로 나타났다.

3.2 3D 포인트 클라우드를 활용한 인공 식생 정보 획득

본 절에서는 실규모 실험수로 내 설치한 인공 식생에 대해 6 mm의 정밀도로 스캔한 후 정합하여 3D 포인트 클라우드를 수집하였다(Fig. 4). 식생패치에서 식생의 물리적 특성을 분석하기 위해 패치 내에서 한 그루의 식생만 추출하였으며, 이때 식생 한 그루의 포인트 수는 776,590개이다. 수집된 3D 포인트는 잎과 줄기로 구분하여 각각을 분석하였으며, 줄기와 가지를 구현하여 계산한 결과 줄기의 총 길이는 79.21 cm, 줄기의 직경은 2.43 cm였다(Table 3). 식생의 줄기는 3.1절에서 수행한 매뉴얼 조사와 동일하게 4개의 가지로 구분하였으며, 모든 가지의 직경은 1.2 cm 내외인 것으로 나타났다.

식생의 잎은 모두 유사한 사이즈를 적용하여 제작되었으나 측정 오차를 보정하기 위해 매뉴얼 조사와 마찬가지로 무작위로 취득된 다수 표본을 사용하여 이를 평균하였다. 각각의 잎의 표본은 모두 이상치(outlier)가 제거된 것이다(Fig. 5). 총 5개의 샘플을 취득하여 분석한 결과 잎의 길이는 6.42 cm에서 9.42 cm의 범위였으며, 폭은 1.59 cm에서 2.09 cm인 것으로 나타났다.

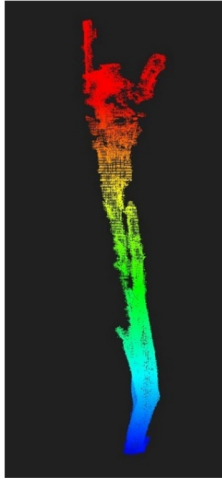


Fig. 4. Sample stem and branches by 3D point clouds.

Table 3. Total properties by 3D point clouds analysis

Main stem	Height (cm)		79.21
	Diameter (cm)		2.43
Branch	No. of branch		4
	1	Diameter (cm)	1.33
		Length (cm)	25.03
	2	Diameter (cm)	1.43
		Length (cm)	31.11
	3	Diameter (cm)	1.00
		Length (cm)	23.41
	4	Diameter (cm)	1.05
Length (cm)		28.20	



Fig. 5. Sample leaf by 3D point clouds.

Table 4. Leaf dimensions estimated by 3D point clouds

	Length (cm)	Width (cm)	Area (cm ²)
1	8.31	2.05	17.01
2	9.42	2.09	19.68
3	6.96	1.82	12.64
4	6.88	1.59	10.94
5	6.42	1.77	11.36
Avg.	7.59	1.86	14.33

따라서 잎의 면적은 10.94 cm²에서 19.68 cm²의 범위에 있음을 알 수 있다. 이를 평균한 결과 평균 길이는 7.59 cm, 평균 폭은 1.86 cm로 잎의 평균 면적은 14.33 cm²로 확인되었다 (Table 4).

3.3 매뉴얼 식생 조사와 3D 포인트 클라우드 결과 비교

매뉴얼 조사 및 3D 포인트 구현 결과를 비교한 결과 (Table 5), 비교적 측정이 용이했던 줄기의 경우 직경 0.13 cm, 길이 4.21 cm의 차이가 발생하였으며, 잎사귀로 인해 매뉴얼 조사 및 3D 포인트 취득이 어려웠던 가지의 경우, 평균 직경 0.27 cm, 6.47 cm의 차이가 있는 것으로 확인되었다. 또한, 식생 잎 길이의 차이는 0.37 cm였으며, 직경은 0.02 cm의 차이가 있었으므로 이를 면적으로 계산했을 때, 매뉴얼 조사의 면적은 15.04 cm²인 것에 반해 3D 포인트 클라우드 결과는 14.33 cm²로 4.72%의 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

또한, 매뉴얼 조사 및 3D 포인트 클라우드를 활용하여 측정한 잎과 줄기, 가지의 물리적 구조를 비교한 결과, 줄기의 직경과 길이는 큰 차이가 없으나 가지의 길이 측정에서 비교적 큰 차이가 있었음을 확인할 수 있다. 특히 No. 2 가지 길이의 경우, 97%의 차이가 있었으며, 이는 대규모의 3D 클라우드 데이터 내에서 식생의 가지로 특정할 수 있는 범위를 구별하는 과정에서 발생한 오차일 것으로 예상된다. 또한, 불일치율 (Discrepancy Ratio, *R*) 분석을 통해 과대 혹은 과소 산정되는 정도를 정량적으로 분석하였으며, Eq. 1에 의해 1에 가까울 경우 측정값과 산정 값이 유사함을 의미한다.

$$R = \frac{\text{Predicted Value}}{\text{Observed Value}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Table 5. Comparison of physical structure of vegetation by manual survey and 3D point clouds

		Manual survey (cm)	3D point clouds (cm)	Difference		Discrepancy ratio, R	
Main stem	Diameter	2.3	2.43	0.13	6%	1.057	
	Length	75	79.21	4.21	6%	1.056	
Branch	1	Diameter	1.2	1.02	0.18	15%	0.850
		Length	36	28.2	7.8	22%	0.783
	2	Diameter	1.3	1	0.3	23%	0.769
		Length	11.9	23.41	11.51	97%	1.967
	3	Diameter	1.1	1.43	0.33	30%	1.3
		Length	28.5	31.11	2.61	9%	1.092
	4	Diameter	1.05	1.33	0.28	27%	1.267
		Length	29	25.03	3.97	14%	0.863

직경의 경우 평균 불일치율이 1.048로 두 값이 매우 유사하였으며, 길이의 경우 1.136으로 나타났다. 불일치율 분석 결과 직경, 길이 모두 평균적으로 3D TLS 결과가 과대산정되는 경향이 있음을 알 수 있으며, 불일치율은 식생의 직경에 비해 길이에서 더 크게 나타났다. 이는 포인트 클라우드 정보만으로 캐노피 내에서 잎을 제거하여 줄기와 가지의 형태만 구현시키는 과정에서 잎에 가려 측정되지 않은 가지의 길이가 존재한 것으로 판단된다. 또한, 잎의 경우 줄기의 길이에 비해 두 방법의 차이가 크게 나타나지는 않은 것으로 볼 때 포인트 클라우드 정보에서 캐노피 내에서의 잎과 줄기의 명확한 구별의 어려움으로 발생한 오차임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 TLS를 활용하여 실규모 실험수로 내 제한된 환경 안에 설치된 버드나무와 유사한 인공 식생의 물리적 구조를 산정하였으며, 이를 매뉴얼 조사 값과 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

매뉴얼 조사를 통해 대상 식생의 구조는 줄기 길이가 75 cm, 직경은 2.3 cm, 식생 줄기를 중심으로 4개의 작은 가지로 구성되어 있었으며, 줄기와 가지에 분포된 잎의 개수는 485개였다. 이를 3D TLS를 활용하여 포인트 클라우드 데이터를 획득한 결과, 대상 인공 식생에 대해 776,590개의 포인트 데이터가 생성되었다.

3차원 TLS 데이터와 매뉴얼 조사 데이터를 상호 비교 검토하였으며, 대상 식생의 직경과 줄기의 길이는 큰 차이가 없으나 가지의 길이 측정에서 비교적 큰 차이가 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 캐노피 영역에서

가지와 잎이 혼합된 구조를 포인트 정보만으로 정확하게 가지 길이를 구별하기 어렵기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 잎의 경우 매뉴얼 조사 시에는 2차원 형태의 이미지로 잎의 길이 폭, 면적이 분석되는 반면 포인트 클라우드 정보에서는 3차원 정보를 활용하기 때문에 산정 값의 차이가 다소 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 3차원 TLS 방법을 적용하여 식생의 물리적 구조를 취득할 때는 캐노피 내에서의 잎과 가지의 명확한 구분이 필요한 경우 매뉴얼 조사 방법을 보조적으로 활용하는 방안을 고려할 필요가 있다. 그러나 식생하도내 흐름저항 및 흐름해석을 분석하기 위해 식생의 흐름방향 투영면적 및 차단면적의 정보만 필요한 경우 잎과 가지의 명확한 구분이 필요하지 않기 때문에 3D TLS 방법으로 취득한 포인트 클라우드 정보를 활용할 수 있을 것이다. 또한, 이러한 과정이 향후 후처리 과정을 더 쉽고 단순화하기 위한 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (NRF-2019R1C1C1009719)을 받아 수행된 연구임.

References

- Aberle, J. and Järvelä, J. 2013. Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation. *Journal of Hydraulic Research* 51(1): 33-45.

- Brodu, N. and Lague, D. 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68: 121-134.
- Jalonen, J., Järvelä, J., Virtanen, J.P., Vaaja, M., Kurkela, M., and Hyyppä, H. 2015. Determining characteristic vegetation areas by terrestrial laser scanning for floodplain flow modeling. *Water* 7(2): 420-437.
- Jin, S.N. and Cho, K.H. 2016. Expansion of riparian vegetation due to change of flood regime in the Cheongmi-cheon Stream, Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 3(4): 322-326.
- Kim, H.S., Park, M.H., and Woo, H.S. 2014. Numerical experiments of vegetation growth effects on bed change patterns. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 1(2): 68-81.
- Leica 2018. Leica RTC360 3D Reality Capture Solution. Leica Geosystems AG.
- Luhar, M. and Nepf, H.M. 2013. From the blade scale to the reach scale: A characterization of aquatic vegetative drag. *Advances in Water Resources*, 51: 305-316.
- Wu, D., Phinn, S., Johansen, K., Robson, A., Muir, J., and Searle, C. 2018. Estimating changes in leaf area, leaf area density, and vertical leaf area profile for mango, avocado, and macadamia tree crowns using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing* 10(11): 1750.