

항공 라이다데이터를 이용한 개별수목탐지 및 평균수고추정

Detection of Individual Trees and Estimation of Mean Tree Height using Airborne LIDAR Data

황 세 란* 이 미 진** 이 임 평***
Se Ran Hwang Mi Jin Lee Im Pyeong Lee

요 약 산림의 보존과 관리에 대한 필요성이 점차 증가하면서 항공 라이다데이터를 이용한 산림연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 산림연구에서 수목고도는 정량적인 산림측정을 위한 중요한 변수로 이용된다. 이에 본 연구는 항공 라이다데이터로부터 수목고도 추정을 위한 대표적인 두 종류의 방법을 적용하고 그 결과를 비교분석한다. Local maximum 필터링에 기반한 개별수목탐지 방법으로 개별수목의 수, 위치, 높이 및 평균수고를, 수목고도모델 또는 히스토그램을 이용한 평균수고 추정방법으로 개별격자 또는 전체영역에 대한 최대, 평균수고, 평균 수관고를 추정한다. 현장에서 실측한 검증데이터와 비교한 결과 개별 수목은 76.6%의 정확도로 탐지되었으며 개별수고는 전체 수종의 경우 1.91m, 침엽수종에 대해서는 0.75m의 RMSE로 추정되었다. 반면 수목고도모델을 이용하여 추정된 평균수고는 약 1~2m의 RMSE를 보였으며, 히스토그램을 이용하여 추정된 평균수고는 약 0.6m 과소 추정되었다. 정확하고 다양한 산림정보 추출을 위해 수종 및 추정인자에 따라 적합한 상호보완적인 방법을 선택하고 융합하는 것이 필요하다.

키워드 : 항공라이다, 산림, 수목탐지, 수고추정

Abstract As the necessity of forest conservation and management has been increased, various forest studies using LIDAR data have been actively performed. These studies often utilize the tree height as an important parameter to measure the forest quantitatively. This study thus attempt to apply two representative methods to estimate tree height from airborne LIDAR data and compare the results. The first method based on the detection of the individual trees using a local maximum filter estimates the number of trees, the position and heights of the individual trees, and the mean tree height. The other method estimates the maximum and mean tree height, and the crown mean height for each grid cell or the entire area from the canopy height model (CHM) and height histogram. In comparison with the field measurements, 76.6% of the individual trees are detected correctly; and the estimated heights of all trees and only conifer trees show the RMSE of 1.91m and 0.75m, respectively. The tree mean heights estimated from CHM retain about 1~2m RMSE, and the histogram method underestimates the tree mean height with about 0.6m. For more accurate derivation of diverse forest information, we should select and integrate the complimentary methods appropriate to the tree types and estimation parameters.

Keywords : Airborne LIDAR, Forest, Tree Detection, Tree Height Estimation

† 본 연구는 공간정보 전문인력 양성사업의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-0027398)을 받아 수행되었습니다.

* 서울시립대학교 공간정보공학과 석사 serany@uos.ac.kr

** 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정 mj-lee@uos.ac.kr

*** 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수 iplee@uos.ac.kr(교신저자)

1. 서론

산림의 보존 및 효율적인 관리를 위해서는 산림 영역에 대한 정량적인 측정과 분석이 필요하다. 이에 라이다를 이용한 산림연구에서는 산림생체량 추정, 산림변화 탐지와 같은 산림의 생물물리학적(biophysical) 측정인자를 추정하는 연구들이 수행되어왔으며[8, 19, 23], 이러한 연구에서 수목의 고도는 산림의 규모를 정량적으로 측정하는 중요한 변수로 이용되었다[20]. 따라서 수목의 고도를 추정하기 위한 연구도 활발히 수행되었으며 일반적으로 개별수목탐지에 기반을 둔 방법과 특정 영역 내의 포함된 수목들의 평균높이를 추정하는 방법으로 분류된다.

개별수목기반 수고추정 방법은 산림영역에 분포한 개별 수목을 탐지하여 수목의 수, 높이 및 위치 등 수목에 관한 정보를 비교적 정량적으로 추정한다. 개별수목탐지는 일반적으로 수목의 고도분포를 나타내는 CHM(Canopy Height Model)을 생성하고 영상처리기반의 방법을 적용한다. Watershed 알고리즘[12]은 영상의 변화, 화소값에 따른 물의 흐름을 가정하여 영역을 분할하는 기법으로, Schardt 등(2002)과 장안진 등(2005)은 이를 개별수목탐지에 적용하여 수관영역을 구별하고 수고를 추정하는데 이용하였다[10, 22]. 이와 유사한 pouring 알고리즘 역시 수목을 탐지하고 수관영역을 분할하는데 효과적인 결과를 보였다[2, 19]. 영역분할 방법 외에도 영상에 이동 윈도우를 설정하고 local maximum 필터링을 적용하여 개별 수목을 탐지하기도 하였다[7, 15, 21]. Lin 등(2011)은 MMAC(Multi-level Morphological Active Contour algorithm)을 이용하여 개별 수목의 수관을 추출하였다[3]. MMAC는 CHM에 상, 하 방향의 침식 및 팽창연산을 수행하여 수관의 경계를 추정하였으며 특정 크기의 윈도우를 사용하지 않고도 영상의 높이값으로 수목을 탐지하였다.

수목의 평균수고 추정방법은 다수의 수목에 대한 평균높이를 추정하는 것으로 라이다데이터의 높이값을 직접적으로 이용하여 통계적인 방법으로 결정된다. Nasset(2002)와 Popescu 등(2002)은 표준지에 포함된 라이다데이터에서 추출된 높이 변수의 값들과 실제 측정된 평균수고, 흉고직경 및 부피 등의 값들과 다중회귀분석을 수행하여 선형 예측모델

을 유도하였다[4, 15]. Hall 등(2005)은 산림영역에서 첫 번째로 반사된 신호를 중심으로 다양한 높이 변수를 유도하여 최대 수고, 수고 범위, 평균수고 및 수관고를 추정하였으며 이로부터 지상 바이오매스를 결정하였다[13]. 이와 다르게 Maltamo 등(2005)은 히스토그램에 기반을 둔 HistMod 알고리즘을 이용하여 여러 수종으로 이루어진 산림에 대해 다층구조 여부를 판단하고 하층식생(understory)을 분석하였다[9].

개별수목탐지 방법은 수목의 밀도가 낮고 수관의 형태가 뚜렷한 경우 효과적으로 수목을 탐지하지만 수종이 다양하고 밀도가 높은 경우 탐지 정확도가 떨어질 수 있고, 다층 산림구조에서는 하층의 수목들을 파악하기 어렵다. 반면 평균수고추정은 넓은 영역에 대한 평균값을 추정하거나 다층구조의 산림 및 하층식생 분석에 용이하지만 개별수고 추정방법에 비하여 정량적인 정보제공이 어렵다는 단점이 있다[24].

이에 본 연구에서는 국내 혼합산림영역에 대해 개별수목탐지와 평균수고추정을 수행하고 그 결과를 비교하고자 한다. 개별수목탐지 방법으로 각 개별수목의 위치, 높이 및 평균수고를 추정하며, 평균수고 추정방법으로 최대, 평균수고, 평균 수관고를 추정한다.

2. 수목고도 추정방법

산림영역에서 획득된 라이다데이터로부터 수목의 고도를 추정하기 위해서는 수목의 상단부분에서 반사된 점들의 높이에서 지면의 높이를 차분하였다. 이를 위해 먼저 필터링을 수행하여 지면점과 비지면점을 분류하고 지면점으로 DTM(Digital Terrain Model)을 생성한다. 필터링으로 분류된 비지면점과 DTM을 차분하면 평지를 기준으로 하는 실제 수목의 높이분포를 나타내는 점들을 획득할 수 있다. 이 점들은 개별수목탐지와 평균수고추정에 이용되며, 본 장은 실험에 적용된 지면점 필터링과 수고추정 방법을 기술하고자 한다.

2.1 지면점 필터링

필터링은 라이다데이터의 지면점을 분류하는 과정으로 산림의 DTM을 생성하기 위해서는 필수적이며 필터링 연구는 형태학적(morphological) 필터

링, Robust 추정법 기반 필터링 및 TIN기반 필터링 등 지면점 분류 원리에 따라 다양하게 수행되어 왔다. 본 연구에서는 형태학적 필터링의 방법 중 하나로, 지면점 여부를 판단하기 위해 경사각 및 높이 차이를 비교하는 Vosselman(2000)의 필터링을 구현하여 적용하였다[6]. 필터링은 실험 영역 내에 포함된 지형의 최대 경사각을 파악하여 이를 적용하여야 하며 고정된 경사각을 이용하기 때문에 다양한 객체들이 포함된 영역에서 필터링 오차가 발생할 가능성이 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 Sithole(2001)은 필터링 지역에 대한 경사맵을 생성하고 영역별로 다른 경사를 적용하는 개선된 경사기반 필터링[5] 방법을 제안하였으며 adaptive TIN기반의 필터링[11]과 비교하여 지면점을 보다 많이 분류하는 결과를 보였다. 또한 다른 필터링과 비교 실험결과 복잡한 영역에서 보다 높은 성능을 나타냈다[24]. 이에 본 연구에서는 경사맵을 제작하는 대신 라이다데이터의 지면점 분포를 분석하여 지형 경사에 따른 경사각을 적용하였다.

2.2 개별수목탐지 및 수고추정

기존의 개별수목 탐지 방법들은 일반적으로 라이다데이터를 보간한 후 영상처리 기법을 적용하여 수관영역을 분할하거나, 수목의 최대 높이 위치를 추정하였다. 그러나 점밀도가 낮은 경우 라이다데이터 보간 영상의 정밀도가 떨어지므로 인접한 수목 또는 수관영역을 효과적으로 분할하기 어렵다. 개별수목을 탐지하기 위한 국외 연구사례들을 살펴보면 일반적으로 약 5~10 점/m²의 점밀도를 갖는 데이터를 사용하였다[17,2,19]. 본 연구에서는 데이터의 점밀도가 약 1~2점/m²로 비교적 낮다는 점을 고려하여 데이터를 보간하지 않고 점 기반의 개별수목탐지를 수행하였다. 점 기반의 개별수목탐지 방법은 각 수목의 수관영역 내에서 반사된 데이터들 중 가장 높은 값을 갖는 점을 찾고 이 점으로부터 개별수목의 위치 및 높이를 결정하였다.

이를 위한 개별수목탐지 과정은 다음과 같다. 먼저 필터링으로 분류된 비지면점과 DTM을 차분하여 평지 기준의 높이값을 갖는 수목점을 계산하고 수목점 중 탐지하고자 하는 최소 수목의 높이값(5m) 이상의 점들에 대하여 인접한 점들 중 가장 높은 값을 갖는 점을 탐지하는 local maximum 필터링을 적용하였다. 이 필터링은 각 검사점과 수평

의 원형 반경 내에 포함되는 점들의 높이값을 비교하여 검사점이 필터링 범위 내에서 최고점인지 여부를 판단할 수 있다. 인접 범위 내에서 검사점이 최고 높이를 가질 경우 각 수목의 상단에서 반사한 최고점으로 가정하고 이 점으로부터 수목의 위치와 높이를 직접 추정하며 탐지 결과는 그림 1과 같이 나타난다. 이는 라이다데이터 보간 영상에서 개별수목을 탐지하는 방법과 유사하나 수관영역을 분할하지 못한다는 단점이 있다. 그러나 개별 수목의 위치 및 높이는 측정된 점 데이터로부터 직접적으로 계산되므로 영상기반 방법에 비해 개별 수목의 높이에 대한 과소추정오차가 보다 작게 나타날 수 있다.

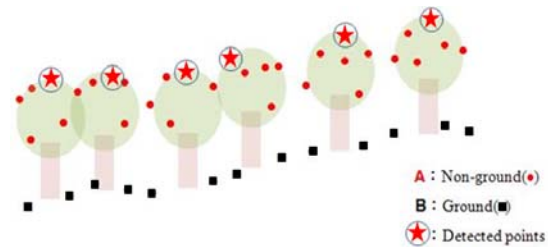


그림 1. 개별수목탐지

2.3 평균수고 추정

평균수고 추정방법으로 표준지(plot) 내에 포함된 다수의 수목에 대한 평균높이를 추정한다. 이를 위해 본 연구에서는 수목의 높이 분포를 나타내는 CHM(Canopy Height Model)을 이용한 방법과 수직 구조분석이 가능한 히스토그램 추정방법을 이용한다. CHM은 수목영역의 비지면점에서 DTM을 차분한 점들 중, 격자 영역 내에서 가장 높은 고도값을 갖는 점들을 보간한 모델이며, 평지를 기준으로 한 수목의 높이 분포를 격자 단위로 나타낸다. CHM은 격자 간격에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 점데이터의 간격(1~2m)을 고려하여 2m와 4m의 CHM을 생성하여 수목 상단부분의 평균높이를 추정하는 방법에 적용하였다. CHM을 이용한 평균수고추정은 개별수목의 위치를 추정하거나 수직구조를 분석하기는 어렵지만 산림의 수평적인 높이분포를 보여주거나 분석하기에 적합한 방법이다.

히스토그램기반 추정방법은 개별수목탐지, CHM과는 달리 산림의 수직구조를 파악할 수 있는 방법

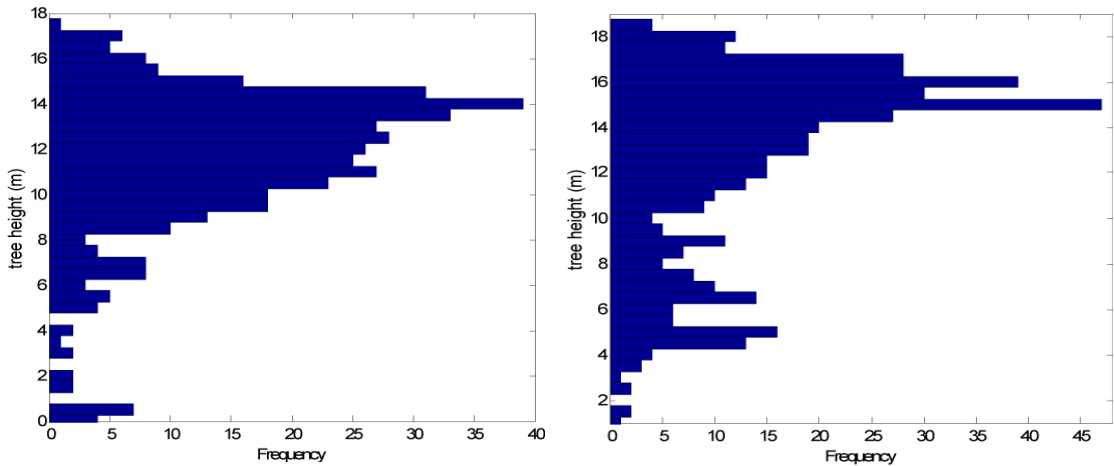


그림 2. 산림영역에서 획득된 라이다데이터의 히스토그램 분포

으로 산림영역의 표준지에서 획득된 라이다데이터의 높이값들을 y축, 빈도수를 x축으로 하는 히스토그램은 그림 2와 같이 나타난다. 유사한 높이의 수목만 분포하는 경우 그림 2(좌)와 같은 분포를 보이지만 상층 수목아래 하층식생이 존재하는 경우 그림 2(우)와 같은 히스토그램을 보이기도 한다.

표준지 내 최대 수고와 레이저 반사가 가장 많이 발생한 위치의 높이는 히스토그램의 최대 높이와 최빈 구간 값으로 추정할 수 있다. 그림 2에서는 두 히스토그램에서 최대 높이가 각각 17.5m, 18.5m, 최빈 구간값은 14m, 15m로 나타난다. 현장측정에서 평균수고는 수목의 최대 높이를 측정하고, 흉고직경(DBH, diameter at breast height)을 가중으로 한 평균높이로 계산하였다. 본 연구에서는 라이다데이터로부터 평균수고를 추정하기 위해 최대 높이와

최빈 구간 사이에 분포하는 데이터들의 평균을 계산하였다. 또한 히스토그램으로부터 수목들의 평균 수관고(crown height)를 추정하기 위해 수관 경계의 추정하였다. 수목의 수관고는 수목의 잎이 분포하는 수관의 높이를 말하며(그림 3), 평균 수관고는 실험영역 내에 분포하는 수목들의 수관고에 대한 평균값을 의미한다. 히스토그램에서 수관의 경계는 수관부가 시작되는 높이로 그림 2의 좌측 히스토그램에서 최소 높이값 0m와 최빈 구간 높이인 14m의 사이에서 약 8~12m로 추정되었다.

본 연구에서는 수관 경계를 추정하기 위해 Lloyd 알고리즘을 적용한다[16]. Lloyd알고리즘은 초기 경계를 히스토그램의 중앙값으로 설정한 후 중앙값의 상층부분의 평균값과 하층부분의 평균값 차이에 대한 변화가 매우 작을 때까지 반복하여 경계를 재계산한다[9]. 히스토그램에서 평균 수관고는 최대 수고에서 수관 경계높이 차이로 추정되며 이는 현장에서 각 수목별로 실측된 수관고의 평균값과 비교하여 검증한다. 또한 수목 높이의 현장측정의 정확도가 1m내외인 것을 고려하여, 히스토그램의 높이 구간을 0.5m로 설정하고 실험영역 내 평균높이를 추정하였다.

수관폭

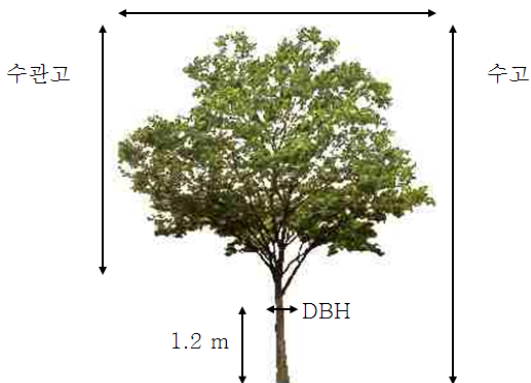


그림 3. 수목측정 요소

3. 실험 지역 및 데이터

3.1 라이다 데이터

본 연구에서는 수고추정 실험을 위해 충남 천안 지역에서 취득한 라이다데이터를 이용하였다. 이 데

이터는 황세란 등(2011)이 산림지역의 지면점 필터링에 대한 연구에 사용하였던 데이터로써, Leica ALS50-II라는 시스템을 이용하여 2009년 10월 8일에 획득되었다[24].

표 1. 라이다 데이터의 특성

| | |
|---------------------------|----------------|
| 시스템 모델 | Leica ALS50-II |
| 데이터획득지역 | 충남청남도 천안시 |
| 넓이(m ²) | 56×44 |
| 전체점수 | 2,505 |
| 전체점 밀도(n/m ²) | 1.02 |

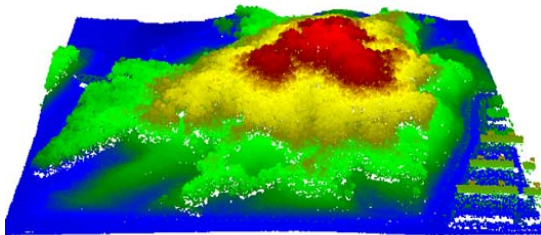


그림 4. 라이다 데이터의 가시화

3.2 검증 데이터

수목의 위치 및 높이추정결과를 검증하기 위하여 2011년 10월 7일 현장측량을 수행하였다. TM좌표계에 기반을 둔 라이다 데이터 값과 수목의 위치를 비교하기 위해 GPS를 이용하여 지상점을 측량하였으며, 이를 기준으로 반사경과 토탈스테이션을 이용하여 수목의 하단부의 좌표를 결정하였다.

실험영역에서 두 개의 지상점(GCP 1, GPC 2)과 토탈스테이션의 위치(TSP)는 그림 6과 같으며 수목이 없는 실험영역의 외부에서 지상점 좌표를 측

정하였다. 토탈스테이션을 이용하여 GCP 2를 원점으로 GCP 1과 TSP의 상대좌표를 측정하였다. 또한 좌표변환을 위해 GCP 2에서 GCP 1으로의 방향을 토탈스테이션의 X축을 기준으로하고 TSP의 방향각을 측정하였으며, 수목의 위치 및 높이 측정 결과는 표 2와 같다.



그림 5. 현장측정을 수행한 실험영역의 항공사진

수목의 위치는 모두 TSP에서 반사경을 이용하여 수목 하단부를 직접 측정하였다. 수목의 높이는 경사각, 방위각 등을 측정할 수 있는 아날로그 수고측정기(SUUNTO Compass/Clinometer, Tandem)를 이용하였다(그림 6). 약 15m거리에서 수목의 하단부와 상단부의 각을 측정하고 지형의 경사각을 측정하여 수고를 계산하였으며 이와 함께 수관고, 흉고직경 및 수종을 기록하였다.

본 연구에서는 황세란 등(2011)에서 이용한 기준점 및 수목위치 측정데이터를 이용하였다[24]. 기준

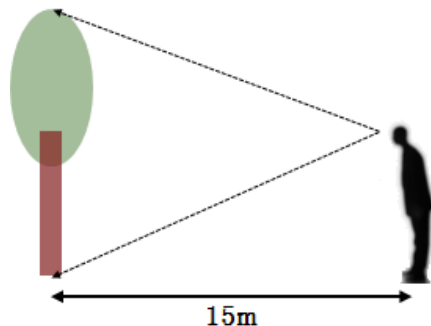


그림 6. 수고측정기와 수고측정 방법

표 2. 수목위치 및 높이 측정 결과

(단위 : m)

| No. | N | E | h | 수고 | 수관고 | 흉고직경(cm) | 수종 |
|-----|----------|----------|-------|------|-----|----------|----|
| 1 | 210977.8 | 370917.6 | 101.6 | 13.6 | 5.6 | 15.8 | C |
| 2 | 210993.2 | 370913.1 | 101.1 | 15.2 | 5.4 | 14.9 | C |
| 3 | 210991.1 | 370914.0 | 101.1 | 12.4 | 6.4 | 10.5 | C |
| 4 | 210990.8 | 370916.7 | 101.2 | 11.6 | 5.6 | 10.0 | C |
| 5 | 210990.7 | 370922.5 | 101.1 | 14.6 | 6.6 | 12.3 | C |
| 6 | 211001.8 | 370924.7 | 101.3 | 15.0 | 6.0 | 18.5 | C |
| 7 | 211009.2 | 370921.3 | 101.9 | 14.4 | 4.4 | 15.0 | C |
| 8 | 211001.1 | 370926.8 | 100.9 | 18.2 | 7.4 | 13.5 | C |
| 9 | 210998.1 | 370926.5 | 100.9 | 16.6 | 7.4 | 22.6 | C |
| 10 | 210993.7 | 370921.9 | 101.3 | 15.0 | 6.6 | 14.8 | C |
| 11 | 210982.3 | 370909.3 | 100.2 | 14.4 | 4.6 | 18.6 | C |
| 12 | 210089.5 | 370912.2 | 100.6 | 9.6 | 3.4 | 13.4 | C |
| 13 | 211010.5 | 370916.8 | 102.3 | 15.2 | 4.0 | 18.5 | C |
| 14 | 211009.5 | 370918.2 | 102.2 | 15.4 | 6.2 | 15.1 | C |
| 15 | 211009.3 | 370920.0 | 102.0 | 11.2 | 4.0 | 7.6 | D |
| 16 | 211010.8 | 370920.9 | 102.1 | 16.4 | 7.2 | 14.2 | C |
| 17 | 211014.9 | 370913.0 | 102.3 | 17.0 | 7.0 | 11.0 | D |
| 18 | 211014.6 | 370915.0 | 102.3 | 8.6 | 1.8 | 5.2 | D |
| 19 | 211015.6 | 370912.1 | 102.4 | 9.6 | 3.0 | 4.7 | D |
| 20 | 211018.9 | 370908.7 | 102.5 | 15.4 | 6.6 | 15.8 | C |
| 21 | 211020.3 | 370912.3 | 102.7 | 18.5 | 7.0 | 8.9 | D |
| 22 | 211018.6 | 370907.1 | 102.3 | 15.4 | 7.0 | 12.6 | C |
| 23 | 211017.3 | 370903.6 | 101.8 | 17.0 | 5.8 | 13.0 | D |
| 24 | 211017.5 | 370898.3 | 100.5 | 13.2 | 6.4 | 7.6 | D |
| 25 | 211017.5 | 370895.9 | 100.2 | 15.4 | 4.2 | 18.6 | C |
| 26 | 211006.6 | 370896.1 | 99.7 | 17.0 | 4.4 | 8.0 | D |
| 27 | 211003.6 | 370897.6 | 99.8 | 15.4 | 5.4 | 11.3 | D |
| 28 | 211000.5 | 370899.5 | 100.0 | 16.0 | 5.4 | 9.7 | C |
| 29 | 210991.1 | 370901.6 | 99.9 | 15.1 | 6.0 | 19.9 | C |
| 30 | 210974.0 | 370901.1 | 97.9 | 13.1 | 5.6 | 14.2 | C |

C:침엽수, D:활엽수

점 및 수목 기준점 GCP 1, 2는 GPS를 이용하여 수 cm 이내의 정확도로 측정되었으며 기준점 측량결과를 TM좌표계로 변환하였다. GCP 1, 2에 대한 GPS 측정결과와 TSP의 방향각을 이용하여 토탈스테이션 측정결과를 TM좌표계로 변환하였다. 그림 7은 TM좌표변환 후 N, E 좌표에 대해 각각 370900, 211000만큼 평행이동 한 결과이다[24]. 본 연구에서는 이를 이용하여 개별수목탐지 및 평균수고측정 결과에 대한 검증을 수행하였다.

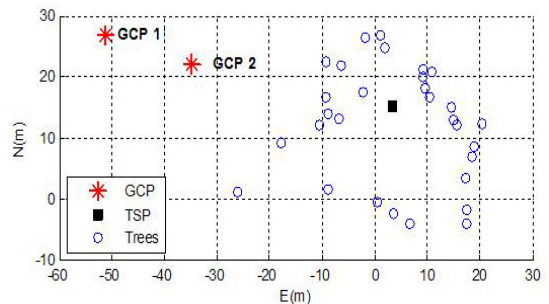


그림 7. 좌표변환 후 GCP, TSP 및 수목의 위치

4. 실험 결과 및 검증

획득된 라이다 데이터를 2장에서 제시한 방법론에 기반하여 그림 8과 같은 실험 과정을 거쳐 수목 고도를 추정하였다. 먼저 형태학적 필터링을 통해 지면점을 분류하고, 분류된 지면점·비지면점 라이다 데이터를 이용하여 CHM 및 수목고도를 추정하였다. 산림영역의 지면점으로 생성된 DTM은 산림 지형을 나타내며 CHM은 수목의 고도분포를 보여준다.

4.1 지면점 분류 결과

형태학적(morphological) 필터링의 하나인 경사각 및 높이 차이를 비교하여 지면점 여부를 분류하였으며 결과는 그림 9와 같이 나타났다. 실험영역(56m×44m)의 점 개수는 2,505개, 점밀도는 약 1개/m²이다. 실험영역에서 필터링 결과 분류된 지면점은 866개, 지면점밀도는 0.35개/m²이며 수목을 투과한 지면점의 비율은 약 35%로 나타났다. 이 형태학적 필터링은 높은 경사각을 설정하면 허용 높이값이 커져 더 많은 지면점을 분류할 수 있지만 동시에 지면점에 가까운 비지면점들도 지면점으로 포함하는 비율이 높아진다는 단점을 가지고 있다.

4.2 개별수목 탐지 결과

DTM의 높이가 차분된 비지면점으로부터 local maximum 필터링을 적용하여 개별수목위치 및 수목의 고도를 추정하였다. 그림 10은 개별수목탐지 위치, 수목의 현장측정 위치 및 측정경계를 보여준다. 탐지된 수목은 (○)로 표시되었으며 수목위치는 (*)로 나타내었다. 개별수목탐지 결과를 분석하기 위해 현장측정 시 수목위치로부터 약 2~3m 떨어진 위치에 경계점을 설정하였으며 이를 선으로 연결하여 수목측정 경계를 보여주고 있다. 탐지결과 실제수목이 존재함에도 이를 탐지하지 못하는 경우와 실제수목이 존재하지 않는 위치에서 개별 수목이 탐지되는 오차가 발생함에 따라 이를 각각 Type I, Type II 오차율로 분류하여 탐지오차를 계산하였다. 이 때 실험지역 수목들의 수관폭은 2~3m에 이르고 수목간 인접거리는 1~5m 이상 떨어져 분포함에 따라 오차범위(3m)이상의 차이가 날 경우 탐지오차로 판단하였다.

현장 측정범위 내에 존재하는 실제 측정 수목에 대한 개별 수목의 탐지 정확도는 표 2과 같다. 현장에서 측정된 총 30개의 수목에 대해 개별 탐지된 수목의 수는 30개였으며 오차범위 내에서 정확히 개별 수목을 탐지한 확률은 76.6%(23본)이었다. 실

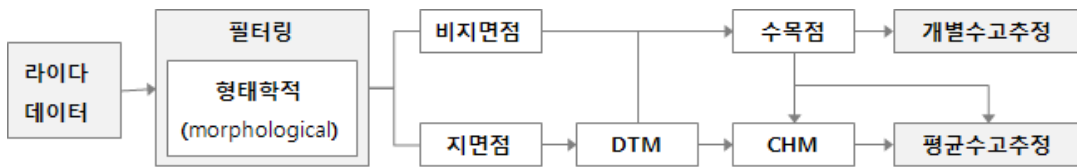


그림 8. 실험 과정

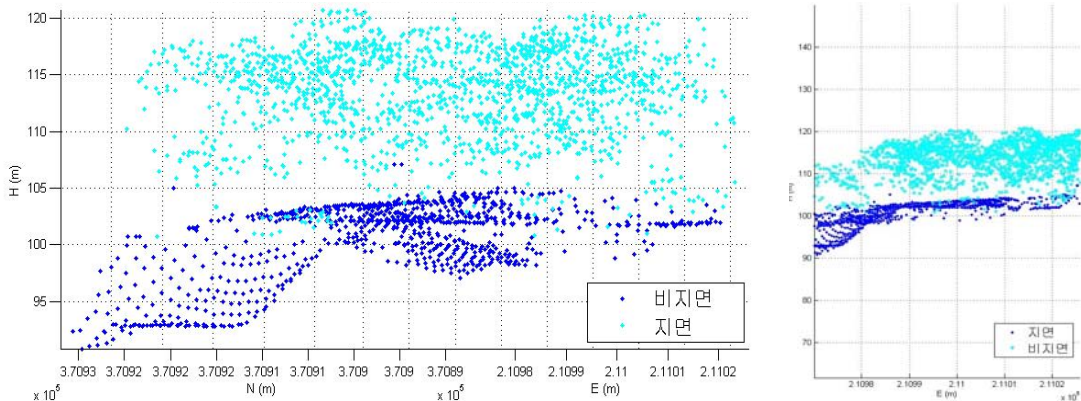


그림 9. 지면점 분류 결과

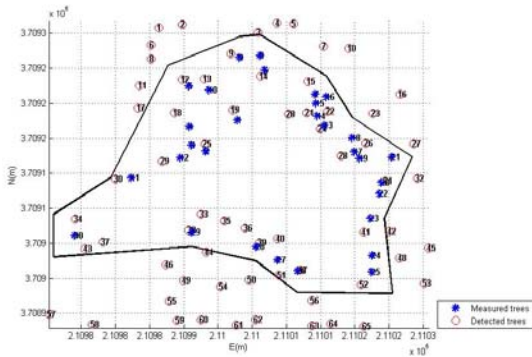


그림 10. 개별 수목 탐지 결과

제 위치한 수목을 탐지하지 못한 Type I 오차율은 23.3%이며 수목이 존재하지 않음에도 개별 수목이 탐지된 Type II 오차율은 23.3%로 나타났다. 개별 수목으로 탐지된 점의 높이값으로 각 수목의 수고를 추정하였으며 수목들의 평균값은 14.0m로 나타났다. 표 3은 개별 탐지된 수목들의 오차결과가 나타났다. 이를 살펴보면 최대 6.2m의 오차가 발생하였는데 현장조사결과 이는 라이다데이터 획득시기와 현장측정시기동안 수목이 벌목된 것으로 확인되었다.

표 2. 개별 수목 탐지 결과

| | |
|------------|--------|
| 개별탐지 수목 수 | 30 분 |
| 현장측정 수목 수 | 30 분 |
| 정탐지율 | 76.6% |
| Type I 오차 | 23.3% |
| Type II 오차 | 23.3% |
| 평균수고(전체) | 14.0 m |

표 3. 수고 추정 오차

| | | |
|-------|------|-------|
| 오차(m) | 전체수종 | 침엽수종 |
| 최소 | -6.2 | -0.53 |
| 최대 | 3.36 | 2.62 |
| 평균 | 0.41 | 0.79 |
| 표준편차 | 1.87 | 0.73 |
| RMSE | 1.91 | 0.75 |

또한 일부 활엽수목에서 3m이상의 큰 오차가 나타남에 따라 침엽수목을 분류하여 이에 대한 실험을 추가적으로 수행하였다. 그 결과 수고추정 RMSE 오차가 약 2m에서 1m이하로 크게 감소하였으며(표 3) 상관관계 분석결과 결정계수 R^2 이 0.29(전체수목)에서 0.83(침엽수목)으로 크게 향상되었다(그림 11). 또한 라이다데이터로부터 추정된 개별 수목의 높이는 수목의 끝을 정확하게 탐지하지 못하기 때문에 실제 측정된 수목의 높이를 과소 추정하는 경향이 있음을 확인하였다.

4.3 평균수고 추정 결과

수목에서 반사된 라이다데이터로부터 평균 수고를 추정하기 위해 CHM을 이용한 방법과 히스토그램기반 방법을 이용하였다. 표 4는 CHM을 이용한 평균수고추정 결과를 검증한 결과이며 그림 12(좌)는 수목이 분포한 영역에서 생성된 CHM과 현장에서 측정된 수목의 위치를 보여준다. 격자크기는 2m와 4m로 설정하여 현장측정 위치와 동일한 격자 내 수목들의 평균높이값을 비교하였다. 격자크기가 2m인 CHM에서는 RMSE가 2.17m, 최대 6.90m의 오차를 보였으나 격자크기가 4m로 증가한 경우 RMSE

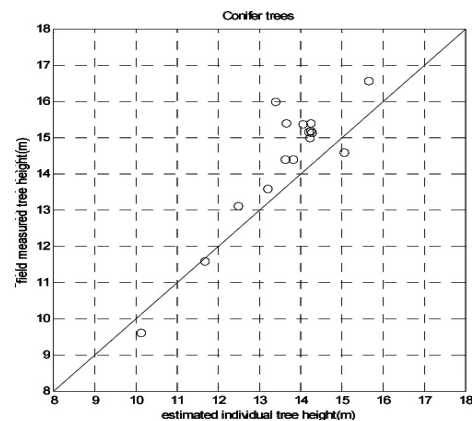
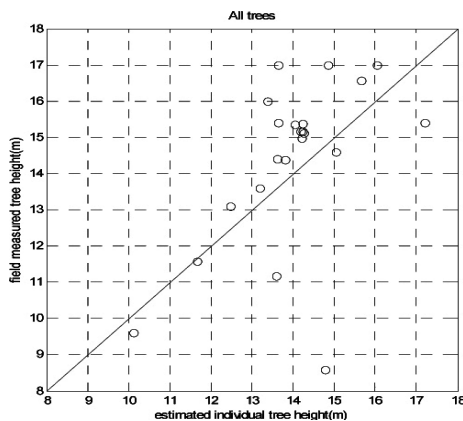


그림 11. 개별수목높이 검증결과 (좌 : 전체수목, 우 : 침엽수목)

는 1.58m, 최대 오차는 4.51m로 감소하였다. 또한 침엽수종에 대해 실험을 수행한 결과 전체수종에 비해 RMSE가 2m, 4m의 경우에 대해 각각 0.76m, 0.29m 낮게 나타났다. 이는 개별수목탐지 결과에서 전체수종과 침엽수종 간의 RMSE 차이가 1.16m인 것에 비해 작은 수치인 것으로 확인되었다.

표 4. CHM기반 평균수고 추정오차

| 격자크기 | 2m | | 4m | |
|------|-------|-------|-------|-------|
| | 전체수종 | 침엽수종 | 전체수종 | 침엽수종 |
| 최소 | -4.82 | -1.10 | -1.90 | -1.90 |
| 최대 | 6.90 | 4.85 | 4.51 | 3.28 |
| 평균 | 1.60 | 1.53 | 0.82 | 0.61 |
| 표준편차 | 2.13 | 1.37 | 1.54 | 1.25 |
| RMSE | 2.17 | 1.41 | 1.58 | 1.29 |

그림 12(우)는 수목점들의 히스토그램과 함께 수목의 최대 높이, 최빈 구간높이, 평균높이 및 수관 경계 높이를 보여준다. 실험영역에 분포하는 수목 중 높이 측정이 가능한 일부 수목만 측정하였기 때

문에 보다 정확한 분석을 위해 실제 수목측정 위치를 기준으로 2m, 3m, 4m 반경 내에 포함된 점들을 분류하여 실험을 수행하였다. 분류된 수목점의 높이에 대해 0.5m구간을 갖는 히스토그램을 생성하였으며 평균수고는 최대 높이(16.1m)와 최빈 구간 중심 높이(13.5m) 사이에 존재하는 데이터들의 평균값으로 추정하였다. Lloyd 알고리즘을 이용하여 추정된 평균수관고는 약 7~8m로 현장 측정 결과와 약 2m의 오차를 보였다. 수관고의 경우 현장측정 시 수관의 경계를 명확하게 정의하기 어렵다는 점이 오차 발생의 주요인이라고 생각된다.

히스토그램추정, 개별수목기반 방법 및 현장 측정 데이터를 비교한 결과는 표 5와 같다. 본 연구의 수고추정 실험결과, 히스토그램추정과 개별수목기반 방법에서 최대 높이와 평균수고는 모두 현장측정보다 낮은 추정치를 보였으나, 개별수목기반 추정방법의 경우 최대 높이를, 히스토그램 기반방법의 경우 평균수고를 보다 정확하게 추정하였음을 확인할 수 있었다.

표 5. 히스토그램 추정 결과 비교

| | 히스토그램 추정 | | | 개별수목기반추정 | 현장 측정 |
|-----------|----------|------|------|----------|-------|
| | 2m | 3m | 4m | | |
| 인접점거리 | 2m | 3m | 4m | | |
| 인접점 수 | 299 | 541 | 760 | | |
| 최대높이 (m) | 16.1 | 16.5 | 17.2 | 17.2 | 18.5 |
| 최빈높이 (m) | 13.5 | 13.5 | 13.5 | - | - |
| 평균수고 (m) | 14.2 | 14.3 | 14.5 | 14.0 | 14.8 |
| 평균수관고 (m) | 7.2 | 7.5 | 8.3 | - | 5.7 |

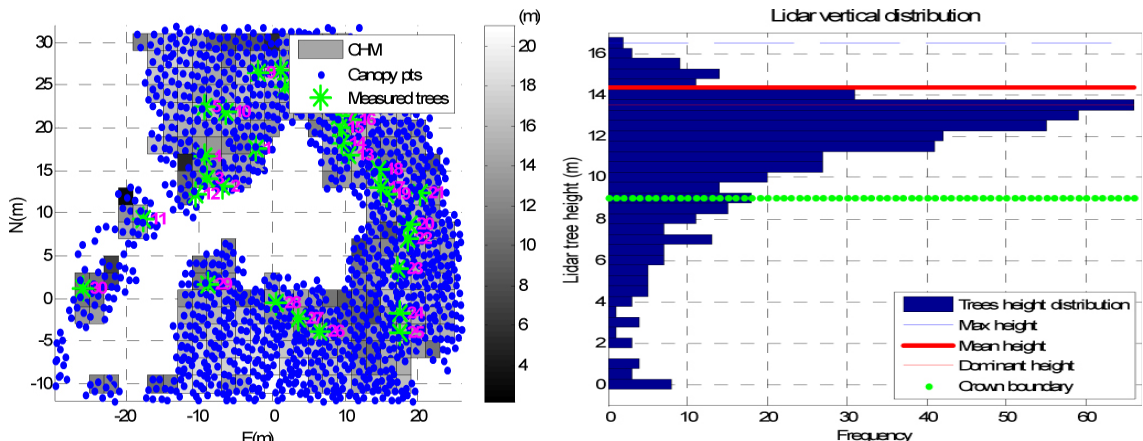


그림 12. CHM생성(좌) 및 히스토그램 추정 결과(우)

5. 결론

본 연구에서는 산림영역에서 국내의 혼합림(mixed forest)에서 획득된 라이다데이터를 이용하여 수목의 고도를 추정하고, 현장측정을 수행하여 추정결과를 검증하였다. 이를 위해 지면점을 분류하여 DTM을 생성하였고, 비지면점과 DTM을 차분한 수목점들로부터 개별수목 및 평균수고 추정하였다.

점 기반의 개별수목탐지 방법은 76.6%의 정확도로 개별 수목을 탐지하였으며 개별 수목의 높이 추정시 RMSE는 약 2m로 나타났다. 평균수고는 CHM을 이용한 방법과 히스토그램기반 방법을 이용하여 추정되었다. 수목상단에서 반사된 데이터로부터 생성된 CHM는 약 1~2m의 RMSE오차를 보였으며 히스토그램은 1m이내의 오차로 평균수고를 추정하였다. 개별수목탐지에 기반을 둔 수고추정 실험에서 전체수목과 침엽수종을 분류하여 상관관계를 분석한 결과, 활엽수종을 포함한 전체수목에 대해 추정한 경우($R^2=0.29$), 침엽수종 만을 고려하였을 때($R^2=0.83$) 보다 수고추정 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평균수고추정 결과에서도 확인할 수 있었다. 또한 활엽수목이 포함된 경우 수고추정의 정확도가 감소함과 동시에, 개별수목탐지 방법 보다 평균수고 추정방법을 적용한 경우 실험영역 내 평균수고를 보다 높은 정확도로 추정하였다.

본 연구를 통해 정확하고 다양한 산림정보 추출을 위해 수종 및 추정인자에 따라 적합한 상호보완적인 방법을 선택하고 융합하는 것이 중요하다고 판단되었다. 또한, 보다 다양한 지형의 다양한 종류의 산림에 대한 다양한 특성의 라이다데이터에 대한 적용과 검증을 통해 표준화된 효과적인 추정방법의 수립이 필요하다고 사료된다. 마지막으로 검증을 위한 현장 데이터의 수집이 용이하지 않은데, 국내 연구팀들이 공동으로 다양한 지역의 대량의 검증 데이터를 체계적으로 구축하는 것이 절실하다고 판단하였다.

참 고 문 헌

- [1] Å. Persson, J. Holmgren, and U. Söderman, 2002, "Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 68, no. 9, pp. 925-932.
- [2] B. Koch, U. Heyder, and H. Weinacker, 2006, "Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 72, no. 4, pp. 357-363.
- [3] C. Lin, G. Thomson, C. S. Lo, and M. S. Yang, 2011, "A Multi-level Morphological Active Contour Algorithm for Delineating Tree Crowns in Mountainous Forest," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 77, no. 3, pp. 241-249.
- [4] E. Næsset, 2002, "Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, no. 1, pp. 88-99.
- [5] G. Sithole, 2001, "Filtering of Laser Altimetry Data using A Slope Adaptive Filter," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Annapolis, MD, Oct. 22-24, vol.34(3/W4), pp. 203-210.
- [6] G. Vosselman, 2000, "Slope based filtering of laser altimetry data," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33(B3/2), pp. 935-942.
- [7] J. Hyypä, O. Kelle, M. Lehtikoinen, and M. Inkinen, 2001, "A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 5, pp. 969-975.
- [8] K. Zhao, S. Popescu, and R. Nelson, 2009, "Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 1, pp. 182-196.
- [9] M. Maltamo, P. Packalén, X. Yu, K. Eerikainen, J. Hyypä, and J. Pitkänen, 2005, "Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data," *Forest Ecology and Management*, vol. 216, no. 1-3, pp. 41-50.
- [10] M. Schardt, M. Ziegler, A. Wimmer, R. Wack, and

- J. Hyypä, 2002, "Assessment of forest parameters by means of laser scanning," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Graz, Austria, vol. 34, pp. 302-309.
- [11] P. Axelsson, 2000, "DEM Generation from Laser Scanner Data using Adaptive TIN Models," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33(B4/1), pp. 110-117.
- [12] P. Soille, 1999, *Morphological Image Analysis*, p. 316, Springer, Berlin.
- [13] S. A. Hall, I. C. Burke, D.O. Box, M. R. Kaufmann, and J. M. Stoker, 2005, "Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests," *Forest Ecology and Management*, vol. 208, no. 1-3, pp. 189-209.
- [14] S. Hwang and I. Lee, 2011, "Current status of tree height estimation from airborne LiDAR data," *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 3, pp. 389-401.
- [15] S. C. Popescu, R. H. Wynne, and R. F. Nelson, 2002, "Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 37, no. 1-3, pp. 71-95.
- [16] S. P. Lloyd, 1982, "Least Squares Quantization in PCM," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129-137.
- [17] T. Brandtberg, T. A. Warner, R. E. Landenberger, and J. B. McGraw, 2003, "Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America," *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, no. 3, pp. 290 - 303.
- [18] X. Yu, J. Hyypä, A. Kukko, M. Maltamo, and H. Kaartinen, 2006, "Change detection Techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 72, no. 12, pp. 1339-1348.
- [19] Y. Wang, H. Weinacker, and B. Koch, 2008, "A Lidar Point Cloud Based Procedure for Vertical Canopy Structure Analysis And 3D Single Tree Modelling in Forest," *Sensors*, vol. 8, no. 6, pp. 3938-3951.
- [20] 송철철, 이우균, 곽두안, 곽한빈, 2008, "산림조사에서의 항공라이다 취득인자에 따른 영향분석을 위한 시물레이션 모델 개발," *한국GIS학회*, 제22권, 제6호, pp. 310-317.
- [21] 우충식, 윤정숙, 신정일, 이규성, 2007, "항공 Lidar 데이터를 이용한 산림지역의 개체목 자동 인식 및 수고 추출," *한국임학회지*, 제96권, 제3호, pp. 251-258.
- [22] 장안진, 김대성, 김용일, 김경옥, 2005, "LiDAR 데이터와 컬러항공사진을 이용한 수목의 개체 추출 및 높이 추정," *한국GIS학회 추계학술대회*, 한국공간정보학회, pp. 67-74.
- [23] 황세란, 김성준, 이임평, "항공 라이다데이터를 이용한 산림영역 탐지," *한국공간정보학회지*, 제18권, 제3호, pp. 23-32.
- [24] 황세란, 이임평, 2011, "산림지형 모델링을 위한 항공 라이다 데이터의 지면점 필터링 비교분석과 정확도 개선," *한국측량학회논문지*, 제29권, 제6호, pp. 641-650.

논문접수 : 2012.01.06
 수정일 : 1차 2012.06.16 / 2차 2012.06.22
 심사완료 : 2012.06.26



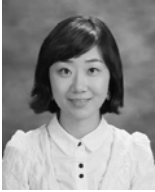
황 세 란

2010년 서울시립대학교 공간정보공학과 학사

2012년 서울시립대학교 공간정보공학과 석사

관심분야는 수목/바이오매스, 라이더

센서융합, 센서시물레이션



이 미 진

2009년 안양대학교 도시정보공학과 학사

2012년~현재 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정

관심분야는 수목/바이오매스, 라이더

센서융합



이 임 평

1991년 KAIST 전기 및 전자공학 학사

1992년 University College London 우주선공학 및 위성통신 석사

2002년 The Ohio State University 측지과학 및 측량 박사

2003년~현재 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수
관심분야는 긴급/모바일/UAV매핑, 건물/수목/지형모델링, 영상/라이더센서융합, 센서시물레이션