

항공수심라이다 데이터 해지면 포인트 클라우드 분리를 위한 CSF 알고리즘 적용에 관한 연구

Segmentation of Seabed Points from Airborne Bathymetric LiDAR Point Clouds Using Cloth Simulation Filtering Algorithm

이재빈¹⁾ · 정재훈²⁾ · 김혜진³⁾
Lee, Jae Bin · Jung, Jae Hoon · Kim, Hye Jin

Abstract

ABL (Airborne Bathymetric LiDAR) is an advanced survey technology that uses green lasers to simultaneously measure the water depths and oceanic topography in coastal and river areas. Seabed point cloud extraction is an essential prerequisite to further utilizing the ABL data for various geographic data processing and applications. Conventional seabed detection approaches often use return waveforms. However, their limited accessibility often limits the broad use of the bathymetric LiDAR (Light Detection And Ranging) data. Further, it is often questioned if the waveform-based seabed extraction is reliable enough to extract seabed. Therefore, there is a high demand to extract seabed from the point cloud using other sources of information, such as geometric information. This study aimed to assess the feasibility of a ground filtering method to seabed extraction from geo-referenced point cloud data by using CSF (Cloth Simulation Filtering) method. We conducted a preliminary experiment with the RIGEL VQ 880 bathymetric data, and the results show that the CSF algorithm can be effectively applied to the seabed point segmentation.

Keywords : Airborne Bathymetric LiDAR, Seabed Points Segmentation, Ground Filtering, Cloth Simulation Filtering Algorithm

초 록

항공수심라이다(ABL: Airborne Bathymetric LiDAR)는 녹색 레이저(green laser)를 사용하여 연안 및 하천에 대해 해저지형과 수심에 대한 관측을 동시에 수행하는 첨단측량 기술이다. 항공수심라이다를 활용하여 해저지형 정보를 구축하기 위해서는 취득된 포인트 클라우드로부터 해수면과 해지면 점들을 분리하고 추출하는 과정이 필요하다. 기존의 해지면 점을 추출하기 위한 연구는 주로 waveform 분석(analysis)을 기반으로 수행되었다. 하지만 일반 사용자의 경우 waveform 데이터에 대한 접근성이 낮으며, waveform 분석 기반 해지면 추출 방법론에 대한 보완도 필요하다. 본 연구는 항공수심라이다 데이터의 지형학적 정보를 사용하여 해지면 점들을 추출하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지면분리(ground filtering) 기법인 CSF (Cloth Simulation Filtering) 알고리즘을 RIEGL VQ880 항공수심라이다 시스템으로부터 취득된 데이터에 적용하고 효율성을 분석하였다. 실험결과 CSF 알고리즘을 항공수심라이다 데이터의 해지면 포인트 추출에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

핵심어 : 항공수심라이다, 해지면 포인트 클라우드 분리, 지면분리, CSF 알고리즘

Received 2020. 01. 09, Revised 2020. 01. 15, Accepted 2020. 02. 14

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Professor, Mokpo National University, Next Generation Drone Commercialization Research Lab. (E-mail: lee2009@mokpo.ac.kr)

2) Civil and Construction Engineering, Post-doctoral researcher, Oregon State University (E-mail: jaehoon.jung@oregonstate.edu)

3) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ph.D. student, Seoul National University (E-mail: vicky2@snu.ac.kr)

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.

1. 서론

항공수심라이다는 녹색 레이저를 사용하여 비교적 얇고 맑은 물에 대해 항공에서 수심과 해저지형을 동시에 측량하는 첨단기술이다. 1960년대 처음 개념이 도입된 이래로 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 항공 해양라이다(airborne oceanographic LiDAR)의 현장 테스트를 성공적으로 수행함으로써 본격적인 기술개발이 이루어졌다. 그 후, 다양한 정부기관들(U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Geological Survey, U.S. NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, Canadian Hydrographic Service, Royal Australian Navy, Swedish Armed Forces)을 중심으로 초기 버전의 시스템들이 개발되기 시작하였다. 이후 지속적인 기술개발을 통해 항공수심라이다 시스템은 보다 작아지고 직관적으로 현장에서 운용할 수 있게 되었으며, 음향측심(echo sounding) 혹은 위성 원격탐사 기술과 비교하여 연안 지역에서 가장 경제적이며 효과적으로 사용할 수 있는 시스템으로 발전하였다(Guenther *et al.*, 2002). 대표적인 활용분야로는 해안선 매핑, 모니터링 및 관리, 폭풍 및 허리케인에 대한 대응 및 피해상황 분석, 하천 지형도 구축, 해양 동물 서식지 지도제작, 산호초 조사 및 지도제작 등이 있다(Kinzel *et al.*, 2013; Paine *et al.*, 2015). Webster *et al.* (2014)는 해저에 대한 고해상도 지형지도 제작이 가능하다는 항공수심라이다의 장점을 활용하여, 유조선 안전을 위해 복잡한 연안지역을 모델링하고 해저지형에 존재하는 위험요소들을 탐지하는 연구를 수행하였다. 국내에서도 항공수심라이다를 활용하여 연안 지역에 대한 지형자료를 구축하기 위한 초기 연구들이 진행되었다. Jeong (2015)은 항공수심라이다 데이터와 다중빔음향측심기(MBES: Multi Beam Echo Sounder) 데이터의 통합 가능성을 확인하기 위해 다양한 보간법을 적용하여 지형정보를 생성하고 상대오차를 최소화하는 보간법을 제시하였다. 연구결과 두 데이터 간의 평균오차는 0.21m, 표준편차는 $\pm 0.30m$ 라고 보고하였으며 연근해에 대해 연속성 있는 수심모델의 구축 가능성 및 활용성을 제시하였다. 하지만 한국의 해양환경에 적합한 오차보정모델의 개발과 다양한 지역에 대한 연구가 필요함을 지적하였다. Shin *et al.* (2016)은 항공수심라이다 측량시스템의 검정에 관한 연구결과를 발표하였다. 육상 검정장을 활용하여 항공수심라이다 시스템의 활용을 위한 기하학적 편차들에 대한 영향과 보정방법을 제시하였다. 추가연구로 항공수심라이다 시스템의 경우 추가적인 해상검정장이 필요함을 지적하였으며 성공적인 수심측량을 위한 전략을 제시하였다. Lee *et al.* (2019)은 항공수심라이다와 MBES로부터 취득

된 근해의 해저지형 데이터를 통합하기 위해 이중 데이터 간의 통합 시 발생하는 상대오차를 검증하였다. 특히 데이터 취득 시 환경적 요인과 기준면 변환과정으로부터 발생하는 오차의 영향을 최소화하기 위해 타원체고 기반으로 MBES 데이터를 구축하여 정확도 평가를 수행하였다. 정확도 평가결과 RMSE (Root Mean Square Error)가 $\pm 0.136m$ 로 IHO (International Hydrographic Organization)에서 규정한 특등급 수심별 허용 오차범위 $\pm 0.56m$ (수심 20m 기준)를 만족하는 것으로 보고하였다. 항공수심라이다 데이터를 다양한 분야에 활용하기 위해서는 해저지형에 대한 DEM (Digital Elevation Model) 생성이 기본적으로 수행되어야 한다. 원시 항공수심라이다 포인트 클라우드로부터 DEM을 생성하는 과정은 일반적인 라이다 포인트 클라우드의 처리와 유사하다. 하지만 항공수심라이다 데이터는 녹색 레이저의 특성상 해수면(sea surface)과 해저면(seabed)에 대해 동시에 데이터를 수집하기 때문에 원시 포인트 클라우드로부터 해저면 점들을 탐색하고 분리하는 과정이 추가적으로 필요하다(Huising and Pereira, 1998). 본 연구에서는 사용자의 간섭을 최소화하여 항공수심라이다 원시 포인트 클라우드로부터 해저면 점들을 추출하기 위해 대표적인 지면분리 기법 중 하나인 CSF 알고리즘을 적용하고 활용 가능성을 분석하였다.

2. 연구동향 분석

항공수심라이다의 녹색 레이저(512nm)는 최소한의 감쇠(attenuation)로 해수면으로 침투하며 이를 통해 해저에 대한 지형정보를 수집한다. 레이저 송신기에서 발사된 광선은 공기와 물의 경계면을 가로질러 해저에 도달할 때까지 수역(water body)으로 전파된다. 공기와 물의 매개체를 통해 laser가 전파되는 동안 완전히 감쇠되지 않으면 반사된 에너지(backscatter)가 수신기에 도달하고 감지 가능한 물체에 해당하는 고유한 peak를 가진 waveform의 형태로 기록된다(Fig. 1).

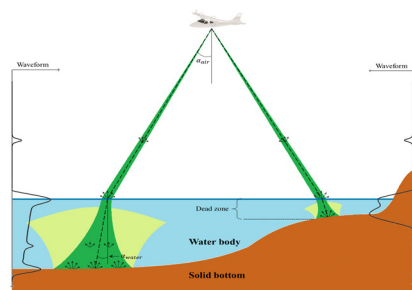


Fig. 1. Conceptual sketch of the laser beam propagation and return signals in airborne bathymetric LiDAR system (Andersen *et al.*, 2017)

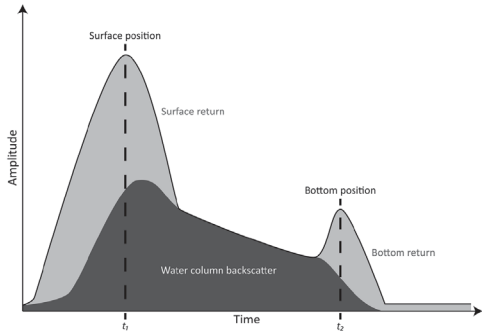


Fig. 2. Bathymetric LiDAR waveform with distinctive surface and bottom peaks (Saylam *et al.*, 2018)

환경적인 요인으로부터 발생하는 노이즈들(새, 해수 속 입자, 물고기, 파도, 시스템 노이즈 등)이 성공적으로 제거되었다면 이론적으로 waveform은 Fig. 2와 같이 표시 될 수 있으며 각 peak의 위치는 해양의 지형학적 특징을 나타내는 고유한 객체들의 위치를 나타낸다. 실세계에서 수집된 waveform은 대상지역의 환경적 특성(탁도, 물결 파, 물 또는 공기 중의 입자 및 기타 노이즈) 및 측량에 사용된 항공수심라이다 시스템의 특징에 따라 변형 및 왜곡되기 때문에 매우 복잡한 모양과 많은 local maximum peak들을 갖게 된다. 이는 항공수심라이다 포인트 클라우드에 multi-return의 결과로 나타난다 (Guenther, 1985). 이러한 waveform을 분석하여 first 및 last return에 해당하는 peak 점들을 탐지하고 이로부터 해수면과 해저면 점들을 탐지하는 기술을 waveform 분석이라고 한다 (Schwarz *et al.*, 2019). 때로는 물이 깨끗하고 매우 얇은 경우 해수면에 대한 peak가 파형에 존재하지 않아 단일 peak가 발생할 수도 있다. 이러한 문제들은 waveform으로부터 특징 객체들의 위치를 결정하는 peak 점들을 탐지하는 과정을 복잡하게 한다.

항공수심라이다의 waveform을 분석하여 해저면 점들을 추출하기 위해 상용 항공수심라이다 시스템 업체들은 자체 솔루션을 개발하여 제공하고 있다. 대표적으로 RIEGL사의 RiHYDRO (RIEGL, 2015), Teledyne Optech사의 HydroFusion (Teledyne Optech, 2013), Leica사의 LiDAR Survey Studio (Leica, 2015)와 같은 소프트웨어 패키지들은 자사의 항공수심라이다 시스템에 최적화된 자체 데이터 처리 솔루션들을 제공한다. 하지만 소프트웨어에서 사용된 알고리즘들을 공개하지 않고 있기 때문에 사용자 측면에서 알고리즘에 대한 이해나 개선이 불가능하다는 단점이 있다 (Nagle *et al.*, 2016; Anderson *et al.*, 2017). 또한, 일반 사용자는 waveform 정보를 사용할 수 없거나 3차원 위치만을 가지

고 있는 포인트 클라우드로부터 해저면의 추출을 수행하여야 하는 경우가 일반적이다. 일례로 현재 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서는 미전역의 연안 지역에 대해 RIEGL VQ820G 및 VQ880G 항공수심라이다 데이터를 waveform 정보가 없는 포인트 클라우드 형태로 제공하고 있다(NOAA, 2018). 따라서 항공수심라이다 데이터의 활용성을 높이기 위하여 포인트 클라우드의 위치정보를 사용하여 해저면 점들을 추출하는 연구의 필요성이 높다. Nagle *et al.* (2016)은 항공수심라이다 데이터의 위치정보를 활용하여 해저면 점들을 추출하기 위해 IRCF (Iterative Random Consensus Filter)를 적용하였다. Waveform 분석으로부터 결정된 last return 점들의 후처리에 IRCF를 적용하였으며 포함된 노이즈를 성공적으로 제거하였다. 하지만 사용자에게 의존하는 임계치들을 자동으로 결정하기 위한 방법론의 개발이 추가적으로 요구된다. Mandlburger *et al.* (2015)는 하천에서 취득된 항공수심라이다 포인트 클라우드에서 수면과 하상의 점들의 분류를 수행하였다. 데이터의 intensity, 수심, 주변 점들과의 거리를 이용하여 하상 점들을 추출하였으며 이를 통해 하상에 대한 고해상도 DEM을 생성하였다. 그러나 연구의 최종 목표가 포인트 클라우드 분류 알고리즘의 개발이 아니기 때문에 다양한 환경적 요인에 따라 많은 임계값을 적용하였으며 더 이상의 추가적인 개선은 이루어지지 않았다. Andersen *et al.* (2017)은 갯벌지역에서 고해상도 DEM을 생성하기 위해 고도 값을 이용하여 디지털 수면 모델을 결정한 후 해저면 점들의 굴절 보정 및 추출에 사용하였다. 해저면 점들의 분할은 주로 사용자의 수작업에 의해 수행되었으며 제안된 알고리즘의 적용대상은 갯벌지역으로 제한되었다. 연구동향에서 살펴본 바와 같이 항공수심라이다 포인트 클라우드의 지형학적 정보를 활용한 해저면 검출 기술의 필요성은 높은 반면 기존 연구사례는 많지 않아, 이에 대한 연구가 필요하다.

3. CSF 알고리즘 최적화

3.1 CSF 알고리즘

지면분리 기술은 라이다 포인트 클라우드의 지형학적 정보를 활용하여 지면과 비지면 객체(건물, 나무 등)를 분류하는 기술로 지난 30년 동안 수많은 종류의 기술이 개발되었다 (Chen *et al.*, 2017). 다양한 지면분리 기술 중에서 본 연구에서는 사용자의 접근성 및 편의성이 높고, 지면분리 기술로써 성능을 인정받고 있는(Polat and Uysal, 2015) CSF 알고리즘을 해저면 점들을 분리하는데 적용하였다. CSF 알고리즘은 3D 컴퓨터 그래픽 분야에서 사용되는 직물 시뮬레이션(cloth

simulation) 기술을 라이다 데이터의 지면분리에 적용할 수 있도록 고안된 방법이다(Zhang *et al.*, 2016). Fig. 3과 같이 포인트 클라우드의 위아래를 뒤집은 후 상하 반전된 지형 위에 뿔뿔한 재질의 천을 덮는다고 가정하면, 그 천이 반전된 DTM (Digital Terrain Model)의 형태일 것이라는 점에 착안하여 개발되었다.

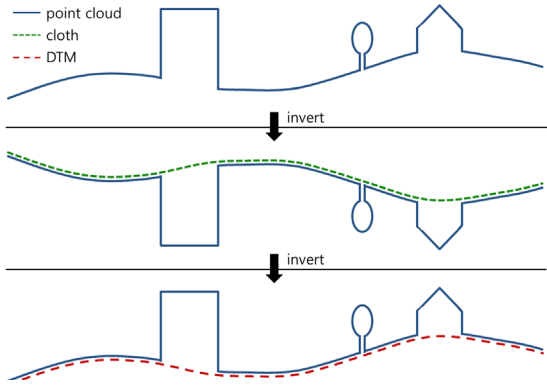


Fig. 3. Overview of the cloth simulation filtering algorithm

식물 시뮬레이션은 mass-spring model (Provot, 1995)을 이용하여 상호 연결된 입자(particle)로 구성된 격자(grid) 형태로 식물을 모델링하며, 중력이나 바람 및 외부 장애물에 의한 외력(external force)과 식물의 형태를 유지하고자 하는 내력(internal force)의 영향을 계산하여 각 입자의 위치를 결정한다. 특정 시간에 식물의 형태를 시뮬레이션하기 위한 각 입자의 위치는 뉴턴의 제 2법칙에 따라 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$m \frac{\partial^2 X(t)}{\partial t^2} = F_{ext}(X, t) + F_{int}(X, t) \quad (1)$$

where, X means the position of a particle at time t ; $F_{ext}(X, t)$ is the external force, which consists of gravity and collision forces that are produced by obstacles; and $F_{int}(X, t)$ is the internal forces, which is produced by interconnections.

포인트 클라우드를 반전시킨 후 미리 정의된 격자의 크기를 적용하여 식물을 구성할 입자 수를 결정한다. 라이다 데이터의 가장 큰 높이 값을 이용하여 초기 식물 입자들의 위치를 정의한 후, 각 입자들은 높이 변화가 안정될 때까지 중력과 내력에 의해 하강과 상승을 반복한다. 최종 위치에 도달한 식물 surface까지의 수직 거리가 지정된 임계값보다 작으면 대상점은 지면점으로 분류된다. CSF 알고리즘의 적용을 위해 다음의

세 가지 매개변수를 설정해야 한다.

- RI (Rigidity Index): 지형 유형을 나타내는 시뮬레이션 식물의 강성을 나타낸다. RI 가 클수록 더 강성이 높은 직물을 의미하며 $RI=3$ 은 평평한 지형 또는 완만한 경사, $RI=2$ 는 가파른 또는 계단식 경사, $RI=1$ 은 높고 가파른 경사를 의미한다.
- GR (Grid Resolution): 인접 입자 사이의 수평 거리이며 점 밀도와 지형 복잡성을 고려하여 경험적으로 결정된다.
- h_{cc} (Height Threshold): 라이다 점의 분류를 결정하는 직물과 라이다 점 사이의 거리 임계값을 의미한다.

지형의 가파른 경사에 의해 발생하는 오류를 처리하기 위한 후처리를 위해 두 개의 매개변수를 더 추가할 수 있지만 연안의 해저지형은 가파른 경사가 아니기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았다. CSF 알고리즘은 MATLAB 스크립트 및 범용 소프트웨어인 CloudCompare plug-in으로 활용할 수 있다(CloudCompare, 2019a).

3.2 CSF 매개변수 최적화

해저지형 추출에 CSF를 적용하기 위해 본 연구에서는 각각의 매개변수에 대한 최적화(parameter optimization)를 실시한 후 실험을 수행하였다. 실험 대상지역 중 연안의 해안 경계 선부터 해저단면의 높이 값의 변화를 고려하여 2,059,645점 (50m(E)×250m(N)×6.0m(H))을 추출하였다. 매개변수 최적화를 위한 참조 데이터는 Maptech software를 이용하여 해저면 점들을 수작업으로 추출하였다. 매개변수의 변화에 따른 정확도는 TPR (True Positive Rate), PPV (Positive Predictive Value), OA (Overall Accuracy), K (Kappa)를 이용하여 측정하였다(Fawcett, 2006). K 는 우연히 분류가 정확히 되었을 가능성을 보완하며 일반적으로 0.8 이상일 경우 분류정확도를 신뢰할 수 있다고 간주한다(Landis and Koch, 1977).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (4)$$

$$K = \frac{OA - P(e)}{1 - P(e)} \quad (5)$$

$$\text{where, } P(e) = \frac{(TP + FN)(TP + FP) + (FP + TN)(FN + TN)}{(TP + FP + FN + TN)^2},$$

TP is true positive, TN is true negative, FN is false negative, and FP is false positive.

해저면 점들을 추출하기 위해서 3개의 매개변수를 결정하여야 한다. 연안의 해저지형은 가파른 경사가 아니기 때문에 본 연구에서는 $RI=3$ (평평한 지형)으로 고정하고 나머지 두 개의 매개변수(h_{ce} , GR)에 대한 최적화를 수행하였다. 실험결과 높이 값 임계치 h_{ce} 는 0.4m와 0.5m에서 가장 높은 정확도를 보였으며 이후 값이 증가할수록 정확도가 감소되었다(Fig. 4). GR 의 경우 2.0m 이하인 구간에서의 정확도 변화는 크지 않으나 2.0m 이상인 경우 TPR 과 K 값이 급격히 감소하는 경향을 보인다(Fig. 5). 따라서 본 연구에서는 정확도와 효율성을 고려하여 최적화 매개변수를 $RI=3$, $GR=1.0m$, $h_{ce}=0.5m$ 로 결정하였다.

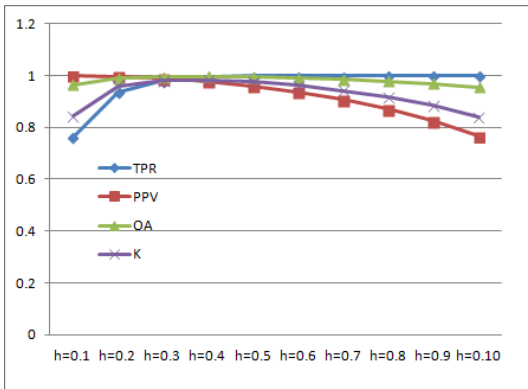


Fig. 4. Accuracy assessment by h_{ce} changes

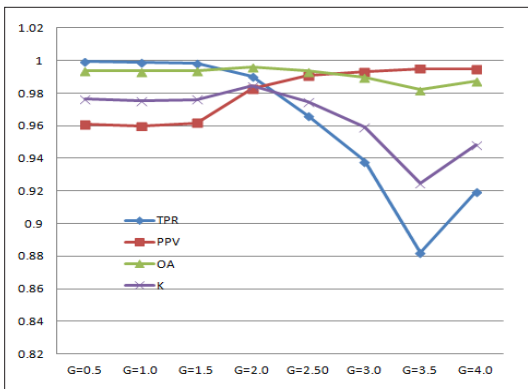


Fig. 5. Accuracy assessment by GR changes

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험지역 및 데이터

실험을 위해 RIEGL VQ880G 시스템(Table 1)을 사용하여 미국 Florida Marco Island 지역에 대해 2016년 5월 6일부터 2016년 5월 17일 사이에 취득된 항공수심라이다 데이터를 활용하였다. 본 데이터는 NOAA의 미국 전 연안지역에 대한 통합 해안 매핑 프로젝트(CMP: Coastal Mapping Program)의 일환으로 구축되었다. NAD83 기준타원체를 기준으로 취득되었으며 수직 및 수평 정확도는 각각 $15cm(\pm 1\sigma)$, $100cm(\pm 1\sigma)$ 라고 보고되었다. RIEGL RiProcess를 활용하여 LAS(Ver. 1.2) 파일로 제공되며, 초기 생성된 waveform의 모든 return 값들이 기록되어있다.



Fig. 6. Test sites: blue and red lines show the boundaries of the original and experimental data, respectively

실험 및 정확도 평가를 위해 연안의 해안 경계선부터 해저단면의 높이 값의 변화를 고려하여 site 1 ($2733m(E) \times 100m(N) \times 8.11m(H)$), site 2 ($50m(E) \times 5772m(N) \times 6.78m(H)$)의 실험 지역을 추출하였다. Fig. 6는 전체 데이터 및 실험 데이터의 공간적 범위를 보여준다. Fig. 7은 site 1에 대한 Z값의 도수분포를, Fig. 8은 site 1 지역에서 수심에 따라 변화하는 항공수심라이다 점들의 분포를 보여준다.

Table 1. Specification of RIEGL VQ880G; Hydrography (RIEGL, 2018)

Parameters	Specifications
Laser wavelength	532nm, green
Operating altitude	600m (nominal)
Scan angle	±20° circular
Scanning mechanism / Scan pattern	rotating prism / circular
Swath width	70% of operating altitude
Laser pulse repetition rate	up to 550kHz
Max. effective measurement rate	up to 550,000meas./sec (@ 550kHz PRR)
Typical measurement range	1.5 Secchi depth for bright ground
Accuracy / Precision	25mm*

* ± 1σ@150m range under RIEGL test conditions.

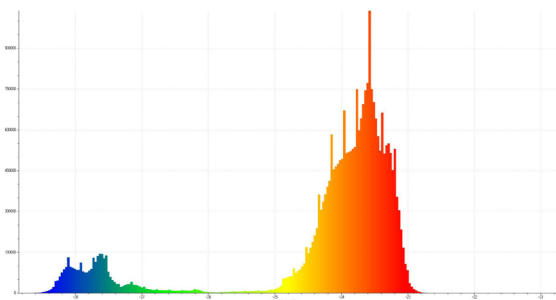


Fig. 7. Distribution of Z-values (Site 1)

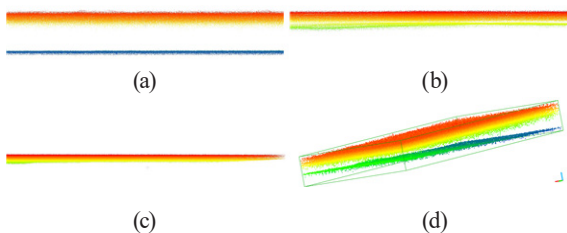


Fig. 8. Vertical profile examples of site 1: (a) deep water area, (b) shallow water area, (c) near shore area, and (d) 3D display of (c)

4.2 실험결과 및 분석

항공수심라이다 원 데이터의 경우 waveform에 라이다의 모든 반사값(return values)들이 기록되어 있으므로 실험을 수행하기 전에 아웃라이어(조류, 대기 입자, 새, 물고기, 시스템 노이즈 등)들을 제거하여야 한다. 이를 위해 SOR (Statistical Outlier Removal) 공간필터(3σ, N=10)를 적용하였으며, 전체 데이터에서 평균적으로 0.5%의 데이터가 노이즈로 간주되어 제거되었다(CloudCompare, 2019b).

정확도 평가를 위한 참조 데이터는 Maptech software를 이용하여 수동으로 구축하였다. 3장에서 결정된 최적화 매개변수(RF=3, GR=1.0m, h_{cc}=0.5m)를 활용하여 해저면 점들을 분류하고 정확도 평가를 실시한 결과는 Table 2와 같다.

정확도 평가결과 전반적인 정확도(OA)는 두 site 모두에서 각각 0.971, 0.998로 매우 높게 나타났다. 이는 항공수심라이다 데이터가 해수면과 해저면에 대해 명확하게 두 개의 레이어로 취득된 경우 CSF 알고리즘이 잘 작동한다는 것을 보여준다. 다음의 Fig. 9는 수심에 따른 실험결과를 시각적으로 보여준다.

Table 2. Accuracy assessment

Site	Total(pts)	TP(pts)	FP(pts)	TN(pts)	FN(pts)	TPR	PPV	OA	K
Site 1	27,508,932	3,801,780	769,249	22,932,771	5,132	0.998	0.831	0.971	0.891
Site 2	30,645,915	5,897,637	27,781	24,716,536	3,961	0.999	0.995	0.998	0.996

Table 3. Accuracy assessment

Site	Total(pts)	TP(pts)	FP(pts)	TN(pts)	FN(pts)	TPR	PPV	OA	K
Site1-1	118,737	30,726	10,024	77,954	33	0.998	0.754	0.915	0.800
Site1-2	135,755	34,710	5,935	95,039	71	0.997	0.853	0.955	0.889
Site2-1	81,267	22,989	8,676	49,584	18	0.999	0.726	0.893	0.763
Site2-2	86,889	20,552	7,789	58,514	34	0.998	0.725	0.909	0.779

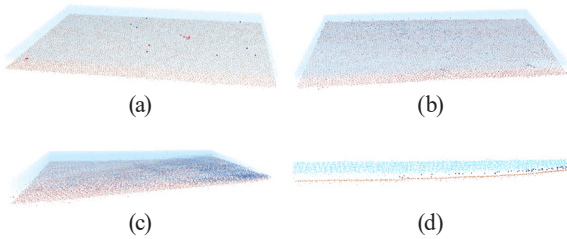


Fig. 9. Examples of segmentation results of site 2 (Brown, blue, skyblue and red points show TP, FP, TN and FN points, respectively. False points are exaggerated for visual understanding.): (a) deep water area, (b) shallow water area, (c) near shore area, and (d) 2D profiles of (c)

하지만 다른 정확도 평가 요소에 비해 상대적으로 PPV가 낮은 경향을 보이는 이유는 일부지역에서 해수면 점들이 해저면으로 오분류되는 현상이 발생하기 때문이다. 이는 주로 해안선 근처의 저수심 영역과 환경적 요인에 의해 일부지역에서 해저면 데이터가 누락된 결과에 따라 발생하였다. Fig. 10은 해당지역에서 데이터가 오분류된 실험결과와 예를 보여준다. 전체 데이터에서 이러한 지역이 차지하는 비율이 상대적으로 낮기 때문에 결과적으로 전체 정확도를 과대 추정하는 경향이 존재하였다. 따라서 각 site의 해안선 근처의 저수심 지역(수심<2.5m)의 측량결과에 대해 추가적으로 정확도 평가를 실시하였다(Table 3).

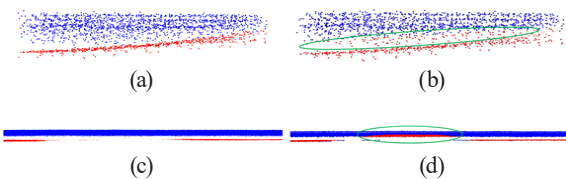


Fig. 10. Examples of FP points (Red and blue points show sea surface and seabed points, respectively.): (a) reference data and (b) segmentation result in near shore area, (c) reference data, and (d) segmentation result in the area with missing data

정확도 평가결과 전체 정확도(OA)가 상대적으로 저하되었으며 특히 K값과 PPV값이 크게 저하된 것을 확인할 수 있었다. 해안선 지역에 대해 항공수심라이다 측량을 실시할 경우 탁도, 파도 등의 요인에 의해 해수면과 해저면의 경계가 모호하게 되며 이는 정확도를 저하시키는 원인이 된다. 따라서 저수심 영역에 대해 해저면 점들을 추출하기 위해서는 추가적인 후처리 기술의 개발이 요구된다.

5. 결론

항공수심라이다 자료의 지형학적 정보를 사용하여 해저면 점들을 추출하는 연구를 수행하였다. 연구결과 기존 라이다의 포인트 클라우드로부터 객체추출을 위해 적용되던 지면분리 기법인 CSF 알고리즘을 항공수심라이다의 해수면 분리에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 waveform 분석에 의존하던 해저면 추출 연구를 보완하여 항공수심라이다 자료의 활용성을 증대하는데 기여할 수 있을 것이라 기대된다. 하지만 환경적인 요인에 의해 데이터의 누락이 발생한 지역과 수심이 매우 낮은 지역에서는 해수면 데이터가 해저면으로 오분류되는 경우가 발생하며 이는 전체 정확도를 저하시키는 것을 확인할 수 있었다. 향후 광역의 지역에 대해 알고리즘을 확대 적용하기 위해서는 데이터 누락을 자동으로 감지할 수 있는 방법론의 개선이 요구된다. 또한, 해안선 근처 및 하천 지역과 같은 저수심 영역에 항공수심라이다 측량을 활용하기 위해 추가적인 방법론의 개선이 필요하다.

감사의 글

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1061743).

References

- Andersen, M.S., Gergely, Á., Al-Hamdani, Z., Steinbacher, F., Larsen, L.R., and Ernstsens, V.B. (2017), Processing and performance of topobathymetric lidar data for geomorphometric and morphological classification in a high-energy tidal environment, *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 21, pp.43-63.
- Chen, Z., Gao, B., and Devereux, B. (2017), State-of-the-art: DTM generation using airborne LiDAR data, *Sensors*, Vol. 17, No. 1, p. 150.
- CloudCompare (2019a), CSF (plugin), *CloudCompare*, [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=CSF_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=CSF_(plugin)) (last date accessed: 9 January 2020).
- CloudCompare (2019b), SOR filter, *CloudCompare*, https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=SOR_filter (last date accessed: 9 January 2020).
- Fawcett, T. (2006), An introduction to ROC analysis, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 27, No. 8, pp. 861-874.
- Guenther, G.C. (1985), *Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors*, NOAA Professional Paper Series No. 1, National Oceanographic and Atmospheric Administration, Rockville MD, pp. 203-242.
- Guenther, G.C., Lillycrop, W.J., and Banic, J.R. (2002), Future advancements in airborne hydrography, *International Hydrographic Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 67-90.
- Huising, E.J. and Gomes Pereira, L.M. (1998), Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry*, Vol. 53, pp. 245-261.
- Jeong, S.H. (2015), *Accuracy Analysis of Seabed Terrain Modeling Technology*, Master's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, 93p.
- Kinzel, P.J., Legleiter, C.J., and Nelson, J.M. (2013), Mapping river bathymetry with a small footprint green Lidar: applications and challenges, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 49, pp. 183-204.
- Landis, J.R. and Koch, G.G. (1977), The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, Vol. 33, No.1, pp. 159-174.
- Lee, J., Kim, H., Hur, H., and Wie, K. (2019), Integration of airborne bathymetric LiDAR and multi-beam echosounder data for construction of high resolution terrain data in intertidal zone, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 27, No. 2, pp. 23-30. (in Korean with English abstract)
- Leica (2015), Leica LiDAR Survey Studio, *Leica*, <http://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/software/leica-lidar-survey-studio> (last date accessed: 9 January 2020).
- Mandlburger, G., Hauer, C., Wieser, M., and Pfeifer, N. (2015), Topobathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats-A case study at the Pielach River, *Remote Sensing*, Vol. 7, No. 5, pp. 6160-6195.
- Nagle, D.B. and Wright, W.C. (2016), *Algorithms Used in the Airborne Lidar Processing System (ALPS)*, Open-File Report 2016-1046, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, pp. 28-31.
- NOAA (2018), NOAA data access viewer, *NOAA*, <https://coast.noaa.gov/dataviewer/#/> (last date accessed: 9 January 2020).
- Paine, J.G., Andrews, J.R., Saylam, K., and Tremblay, T.A. (2015), Airborne Lidar-based wetland and permafrost-feature mapping on an arctic coastal plain, north slope, Alaska, In: *Remote Sensing of Wetlands*, CRC Press, Boca Raton, F.L., pp. 413-434.
- Polat, N. and Uysal, M. (2015), Investigating performance of airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation, *Measurement*, Vol. 63, pp. 61-68.
- Provot, X. (1995), Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour, *Graphics Interface 95*, 17-19 May, Quebec, Canada, pp.147-154.
- RIEGL (2015), RiHYDRO data sheet, *RIEGL*, http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_RiHYDRO_2018-09-28_01.pdf (last date accessed: 9 January 2020).
- RIEGL (2018), VQ880G information sheet, *RIEGL*, http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf (last date accessed: 9 January 2020).
- Saylam K., Hupp R.J., Averett R.A., Gutelius W.F., and Gelhar W.B. (2018), Airborne lidar bathymetry: assessing quality assurance and quality control methods with Leica

- Chiroptera examples, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 2518-2542.
- Schwarz, R., Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., and Pfeifer, N. (2019), Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 150, pp. 1-10.
- Shin, M.S., Yang, I.T., and Lee, D.H. (2016), A study on airborne LiDAR calibration and operation techniques for bathymetric survey, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 113-120.
- Teledyne Optech (2013), Optech HydroFusion Information Sheet, *Teledyne Optech*, <http://info.teledyneoptech.com/acton/attachment/19958/f-02e0/1/-/-/-/HydroFusion-Information-Sheet-160129-WEB.pdf> (last date accessed: 6 January 2020).
- Webster, T., McGuigan, K., Crowell, N., Collins, K., and MacDonald, C. (2014), *Acquisition and Processing of Topobathymetric Lidar for Isle Madame in Support of the World Class Tanker Safety Initiative*, Applied Geomatics Research Group. NSCC Middleton, NS, pp. 1-56.
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., and Yan G. (2016), An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation, *Remote Sensing*, Vol. 8, p. 501.