높은 이상점 비율을 갖는 고감도 가이거모드 영상 라이다 데이터로부터 이상점 검출

김성준* · 이임평*[†] · 이영철** · 조민식**

* 서울시립대학교 공간정보공학과, ** 국방과학연구소

Outlier Detection from High Sensitive Geiger Mode Imaging LIDAR Data retaining a High Outlier Ratio

Seongjoon Kim*, Imyeong Lee*[†], Youngcheol Lee* and Minsik Jo*

* Department of Geoinformatics, The University of Seoul, ** Agency for Defense Development

Abstract : Point clouds acquired by a LIDAR(Light Detection And Ranging, also LADAR) system often contain erroneous points called outliers seeming not to be on physical surfaces, which should be carefully detected and eliminated before further processing for applications. Particularly in case of LIDAR systems employing with a Geiger-mode array detector (GmFPA) of high sensitivity, the outlier ratio is significantly high, which makes existing algorithms often fail to detect the outliers from such a data set. In this paper, we propose a method to discriminate outliers from a point cloud with high outlier ratio acquired by a GmFPA LIDAR system. The underlying assumption of this method is that a meaningful target surface occupy at least two adjacent pixels and the ranges from these pixels are similar. We applied the proposed method to simulated LIDAR data of different point density and outlier ratio and analyzed the performance according to different thresholds and data properties. Consequently, we found that the outlier detection probabilities are about 99% in most cases. We also confirmed that the proposed method is robust to data properties and less sensitive to the thresholds. The method will be effectively utilized for on-line realtime processing and post-processing of GmFPA LIDAR data.

Key Words : LIDAR, Geiger APD, GmFPA, Imaging LIDAR, Flash LIDAR, Outlier Detection, Noise Reduction, Simulation

요약 : 라이다 센서로 취득된 점군에는 실제 물리적인 표면에 존재하지 않는 이상점이 포함되어 있다. 이러한 이상점들은 활용을 위한 후속처리를 하기 전에 반드시 제거되어야 한다. 특히 민감도가 아주 높은 가이거 모드 검출기를 이용하는 라이다로 취득한 데이터는 높은 비율의 이상점을 포함하고 있다. 이로 인해 기존의 알고리즘은 이러한 데이터로부터 성공적으로 이상점을 검출하는데 어려움이 있었다. 이에 본 연구는 가이거 모드 영상 라이다로 획득된 높은 이상점 비율을 갖는 점군에서 이상점을 제거하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 의미 있는 표적의 표면은 검출기상에서 두 개 이상의 이웃픽셀에 검출되며, 이러한 이웃픽셀들로부터 출력되는 거리값은 유사하다는 점을 이용한다. 개발된 제거 기법은 시뮬레이션으로 생성된 다양한

점밀도와 이상점 비율의 모의 데이터에 적용하여 임계값과 데이터 특성에 따른 성능을 분석하였다. 대부분의 경우에 약 99% 이상의 이상점 검출성능이 나타났으며, 데이터 특성에 강인하고 임계값에 크게 민감하지 않는 검출성능을 확인하였다. 제안된 방법은 향후 가이저 모드 라이다 데이터의 온라인 실시간 처리 또는 후 처리에 효과적으로 활용될 것으로 판단된다.

1. 서론

라이다는 표적까지 레이저 펄스의 송수신 시간을 이용하여 거리를 측정하여 반사지점의 3차원 좌표를 출력하는 시스템이다(Baltsavias, 1999). 표적 표면에 대한 조밀한 샘플링을 통해 3차원 점군(point cloud)을 생성할 수 있다는 장점으로 공간정보 분야에서는 이를 이용해 주로 정밀한 지형이나 도시모델(조우석 외, 2003; Haala and Brenner, 1999; Vosselman, 2002; Rottensteiner, 2003; Dorninger and Pfeifer, 2008; Sohn and Dowman, 2008)을 생성하며, 고고학에서는 유물/유적지에 대한 정교한 재현(reconstruction)에 많이 사용한다(Alshawabkeh and Haala, 2004.; Remondino, 2011). 특히, 국방 분야에서는 항공 플랫폼에 탑재되어 표적을 정찰/감시하거나 송전선과 같은 비행장애물을 탐지하는데 이용되고 있다(Carlsson *et al.*, 2001; Mills *et al.*, 2010; Jing *et al.*, 2011; Pal *et al.*, 2001; Navarro-Serment *et al.*, 2010; Gronwall *et al.*, 2006).

이상점 제거는 라이다 데이터가 다양한 분야에 보다 잘 활용되기 위한 필수적인 과정이다. 이상점은 레이저 펄스가 표적의 물리적인 표면에서 반사된 위치라고 보기 어려운 점을 의미한다(문지영 외 2005). 보통 이상점은 데이터에서 표적에 대한 인지성(perceivability)과 가시성을 떨어뜨린다(Cho *et al.*, 2006). 또한, 통계적인 영향이 매우 크기 때문에 분류(classification), 분할(segmentation), 탐지(detection) 등의 활용 알고리즘 결과를 왜곡시킨다(Shekhar *et al.*, 2003).

이상점 검출기법에 대한 선행연구를 살펴보면 크게 점군(point cloud), 웨이블릿(wavelet), 하드웨어 기반의 접근방법들이 연구되었다(Fang and Huang, 2004; Sotoodeh, 2006; Kong *et al.*, 2011). 특히, 점군에서 이상점을 검출하고자 하는 방법들은 분포(distribution), 군집(clustering), 밀도(density) 등에 기반한 다양한 방

법들이 개발되었다(Sotoodeh, 2006).

분포기반 방법은 통계분포모델을 이용하여 이상치(blunder)를 추출하며(Hawkins, 1980), 군집기반 방법은 분할(segmentation)과 같은 클러스터링 기법을 사용하여 이상점이 아닌 의미 있는 개체를 추출함으로써 노이즈를 배제시키는 방법이다(Jain *et al.*, 1999). 밀도기반 방법은 한 점을 기준으로 일정한 거리 내에 존재하는 이웃점(neighborhood)들의 밀도를 계산하여 이상점 여부를 판별한다(문지영 외 2005; Breunig *et al.*, 2000; Papadimitriou *et al.*, 2003). 그러나 이러한 방법들은 여전히 만족스러운 결과를 보이기에 한계가 있다(Papadimitriou *et al.*, 2003; Breunig *et al.*, 2000). 라이다 데이터의 점 분포(밀도)는 스캐닝 패턴과 대상물의 지오메트리에 따라 일정하지 않으며, 이러한 현상은 국부적으로도 편차가 심하기 때문이다. 이를 보완하기 위해 상대적인 점밀도에 기반한 기법도 연구되었지만, 모든 점에 대해서 이웃점들을 탐색하기 위한 공간연산량이 많으며, 알고리즘에 사용하는 변수(격자간격, 비교범위, 이상점 결정을 위한 임계치 등)에 다소 민감하다. 웨이블릿 기반의 방법은 WT(wavelet transform)을 기반으로 수신신호의 SNR을 높여 이상점의 발생을 줄이거나(Fang and Huang, 2004), 영상으로 변환하고 Wavelet-based denoising 기법을 적용하여 노이즈를 제거하는 기법이다(Akyay, 2008).

위의 기법들은 대부분 소수(1% 이하)의 이상점이 포함된 데이터에 적합하도록 개발되었다. 그래서 Fig. 1과 같이 가이저 모드 검출기(GmAPD, Geiger mode Avalanche Photodiode)를 이용한 라이다 데이터와 같은 이상점 비율이 높은 점군(point cloud)에는 적합하지 않다.

수신기로 입사하는 에너지 세기에 비례하는 신호(full-waveform)를 출력하는 선형 모드 검출기(Linear mode APD)와는 다르게 가이저 모드 검출기는 off 상태로 있다가 임계치(single photon) 이상의 에너지가 감지될 때 on 상태를 출력한다. 가이저 모드는 선형 모

Fig. 1. Examples of GmFPA LIDAR data.

드에 비해 민감도가 높기 때문에, 오경보(false alarm)에 의한 이상점이 매우 많이 발생한다(Cho *et al.*, 2006; O'Brien and Fouche, 2005). 따라서 가이저 모드 라이다 데이터의 특성을 고려한 이상점 검출기법 개발이 필요하다.

Kong *et al.* (2011)은 이러한 고비용의 이상점을 제거하기 위해 하드웨어적인 측면에서 접근한 방법을 개발하였다. 빔 스플리터(beam splitter)와 두 개의 GmFPA(Geiger mode Focal Plane Array) 검출기를 장착하였다. 그리고 동일한 표적에 대한 두 검출기의 결과를 AND Gate에 적용시킴으로써 노이즈를 제거하였다. 그러나 검출기의 수신에너지가 반으로 줄어들기 때문에 시스템 성능이 저하된다는 단점이 있다.

O'Brien과 Fouche (2005)는 동일한 표적에 대해 여러 번의 레이저 펄스(multiple pulse)를 발사하고, 그 결과로 출력된 검출기 픽셀의 거리값들의 최빈값만을 사용함으로써 이상점을 제거하였다. 그러나 이러한 방법은 라이다 시스템과 표적이 모두 정지된 상태에서만이 가능한 방법이다.

본 연구에서는 GmFPA 라이다 데이터의 특성을 분석하고, 이를 기반으로 점군에 포함되어 있는 이상점을 검출할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 제안된 방법은 하나의 표적은 두 개 이상의 픽셀에서 나타난다는 점과 서로 이웃하는 픽셀들의 거리(펄스 검출시간)는 유사하다는 점에 착안하여 개발되었다.

2. 이상점 검출 방법

1) 방법론 개요

하나의 레이저 펄스 송수신으로 반응하는 GmFPA를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 2, Fig. 3). Focal Plane Array(FPA)를 구성하는 16x16개의 각 픽셀은 광학영상 카메라의 CCD(Charge Coupled Device)와 같이 IFOV(Instantaneous Field of View)에 해당하는 입사 에너지에 대해 독립적으로 작동한다. 평소에는 off모드(Fig. 2에서 검은색 픽셀)로 대기하고 있으며, 입사광자량이 검출기상에서 설정된 임계치보다 크면 픽셀은 포화(saturation)되어 on모드(Fig. 2에서 하얀색 픽셀)를 출력한다. 이때 픽셀에 입사되는 에너지는 표적으로부터 반사된 레이저 펄스뿐만 아니라 후방산란된 태양에너지(backscattered sunlight)와 같은 잡음(noise)도 포함한다. 이러한 노이즈 에너지는 오류검출의 원인이 되고, 이는 점군(point cloud)에서 이상점으로 나타난다(Albota *et al.*, 2002; O'Brien and Fouche, 2005; Itzler *et al.*, 2010).

FPA상에서 나타나는 이상점 픽셀의 특징은 공간적인 분포와 픽셀이 가지고 있는 거리값에서 나타난다. 공간적 분포는 함께 검출된 이웃한 픽셀의 개수로 판단할 수 있다. Fig. 2는 검출기상에서 나타나는 이상점 픽셀의 모습을 보여주는 이진(binary) 영상이다. 표적에 의해 검출된 픽셀은 대부분 다수의 이웃 픽셀들이 함께 검출된 반면, 이상점 픽셀은 독립적으로 나타나거나 소수

Fig. 2. Spatial distribution of outlier pixels in 16x16 APD array (white means the pixels detecting photons and black means the other cases).

Fig. 3. Examples of outliers that can be distinguished by the difference of ranges.

(1~2개)의 이웃 픽셀과 함께 분포함을 알 수 있다.

Fig. 3은 픽셀이 검출된 시각으로부터 계산된 거리값을 이용하여 나타난 검출기 영상이다. 한 표면에 의해 검출된 픽셀들의 거리값은 거의 유사하지만, 이상점 픽셀의 거리값은 이웃픽셀들의 거리값과 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

이러한 특성을 종합하면 검출기 영상에서 이상점이 아닌 표적점 픽셀들은 다수의 이웃픽셀들과 함께 존재하며, 유사한 거리값을 가지고 있다. 반면에 이상점 픽셀은 1) 보통 단일 또는 소수의 이웃픽셀들과 나타나며, 2) 다수의 이웃픽셀들과 함께 검출되더라도 같은 표적에 의해 검출되지 않았기 때문에 이웃픽셀 거리값과 상이하다는 사실을 알 수 있다.

본 연구에서는 이러한 이상점 픽셀이 갖는 현상적 특징을 이용하여 기반으로 GmFPA 상에서 나타나는 이상점을 제거하고자 한다. 이를 위해 하나의 표적은 적어도 두 개 이상의 픽셀에 의해 검출된다는 점과 픽셀은 이웃픽셀과 동일한 표면에 의해 검출되고 픽셀들의 거리값들은 유사하다는 가정을 수립하고, 이러한 가정에 기반하여 Fig. 4와 같이 두 단계의 이상점 검출방법을

Fig. 4. Propose method of eliminating outliers.

개발하였다.

먼저 1차 제거 단계에서는 이상점의 공간적 분포 특성을 이용하여, 검사 대상픽셀의 이웃픽셀의 개수를 임계개수와 비교하여 이상점을 탐색한다. 임계개수는 대상픽셀이 이웃픽셀이 아니기 위한 최소 이웃픽셀의 개수를 의미한다. 2차 제거 단계는 1차 제거에서 표적점으로 분류된 픽셀들을 대상으로 한다. 대상픽셀의 거리값과 이웃픽셀의 거리 대표값과의 차이를 임계거리와 비교하여 이상점 여부를 검사한다. 임계거리는 동일한 표면에 의해 검출된 픽셀들의 거리값의 허용오차를 의미한다.

2) 1차 제거 방법

1차 이상점 제거방법은 함께 검출된 이웃픽셀의 개수를 이용한다. 이상점은 독립적이거나 극소수의 이웃픽셀과 함께 검출된다는 가정으로부터, 1차 제거 단계에서는 식 (1)과 같이 함께 검출된 이웃픽셀의 개수(N_{np})가 임계개수(N_{th}) 보다 작으면 이상점으로 분류한다. 임계개수는 대상 픽셀이 이상점이 아니기 위한 최소 이웃픽셀의 개수를 의미한다.

$$N_{np} < N_{th} \quad (1)$$

임계개수는 1차 제거단계에서 이상점 진위를 판단하는 중요한 변수이다. 임계개수가 높아지면 이상점 검출율이 높아지지만 이와 동시에 표적점이 이상점으로 오분류될 가능성이 높아진다. 반대로 임계개수가 낮아지면 표적점이 이상점으로 오분류될 가능성은 낮아지지만 이상점 검출율도 함께 낮아지게 된다.

임계개수를 결정하기 위해, 본 연구에서는 점밀도와 이상점 비율을 고려한 다양한 시나리오 기반으로 시뮬레이션을 수행하여 모의 데이터를 생성하고 표적점과 이상점의 이웃픽셀 개수를 살펴보았다. 라이다 시뮬레이션 기법에 대한 설명은 3장 2절에서 논의된다. Table 1은 생성된 시뮬레이션 데이터 분석을 통한 이상점과 표적점에 대한 이웃픽셀 개수 비율을 보여주는 예시이며, Fig. 5는 이를 그래프로 표현한 것이다. 표적점(inlier)의 경우 0.08%가 단독으로 존재하며, 대다수가 1개 이상의 이웃픽셀을 가지고 있다. 이상점의 경우에는 대부분의 점(94.12%)이 0개 또는 1개의 이웃픽셀을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1. Ratio of inliers and outliers of the simulated point cloud according to the number of neighbor pixels

No. of neighbor pixels	Inlier ratio	Outlier ratio
0	0.08	83.19
1	0.51	10.93
2	1.23	1.09
3	2.39	0.44
4	6.14	0.50
5	14.86	0.78
6	3.66	0.20
7	9.24	0.37
8	61.88	2.51
Sum	100	100

Fig. 5. Ratio of inliers and outliers of the simulated point cloud according to the number of neighbor pixels.

만약 임계개수를 1로 설정하면, 0.08%의 표적점이 이상점으로 오분류되며, 83.19%의 이상점을 탐지할 수 있다. 그러나 10.93%의 이상점은 탐지하지 못한다. 반면에 임계개수를 2로 설정하면, 94.12%의 이상점을 검출할 수 있지만, 약 0.59%의 표적점이 이상점으로 오분류된다.

본 연구에서는 1차 제거단계에서 정탐지율(이상점을 이상점으로 탐지할 확률)을 90%이상으로 높이고, 오탐지율(표적점을 이상점으로 잘못 탐지할 확률)은 0.1% 이하로 낮추기 위해, 대상 픽셀을 거리값에 따라 표적 구간과 비표적 구간으로 나누고, 임계개수를 구간별로 각각 1개와 2개로 결정하였다.

라이다 데이터의 픽셀은 거리값에 따라 히스토그램 상에서 표적구간과 비표적구간으로 나뉘질 수 있다 (Fig. 6). 표적구간은 레이저 펄스가 후방산란될 수 있는 표적(사물)의 표면이 존재하기 때문에 다수의 표적점이 분포하는 영역이다(Fig. 6에서 파란색 구간). 비표적 구

Fig. 6. Histogram of the pixel's ranges.

간은 표적이 존재하지 않는 영역이며 대부분 검출기에 수신되는 신호잡음(noise signal)에 의해 발생한 이상점이 분포해 있다(Fig. 6에서 자주색 구간).

표적/비표적 구간을 구분할 수 있는 기준(H_{cr})은 비표적 구간의 평균 도수값을 이용하여 계산한다. 비표적 구간의 평균 도수는 라이다 시스템의 오경보율(false alarm rate)을 이용하여 계산할 수 있다. 오경보율은 신호잡음에 의해 이상점이 생성될 확률을 의미하며, 이는 실제 시스템에 대한 실험을 통하여 결정되는 센서 성능지표이다. 이 지표를 이용하면 반대로 대략적인 이상점의 개수를 예측할 수 있다. 전제 데이터에서 예측되는 이상점의 개수의 기대값($E(N_{outlier})$)은 펄스반복률(R_{pulse}), 촬영시간(t), 픽셀개수(N_{pixel}), 오경보율(P_{far})로부터 식 (2)와 같이 계산될 수 있다. 그리고 식 (3)과 같이 이상점의 개수를 히스토그램 구간 개수(N_{bin})로 나누면, 히스토그램 각 구간별 이상점 개수 기대값이 되고, 여기에 $buf(1.5)$ 를 곱한 값을 구간 기준(H_{cr})으로 설정하였다(Fig. 6에서 빨간색 점선)

$$E(N_{outlier}) = R_{pulse} \cdot t \cdot N_{pixel} \cdot P_{far} \quad (2)$$

$$H_{cr} = \frac{E(N_{outlier})}{N_{bin}} \cdot buf \quad (3)$$

3) 2차 제거 방법

함께 포화된 이웃픽셀의 개수가 임계값보다 크더라도 여전히 이상점이 될 수 있는 가능성은 존재한다. Fig. 7에서와 같이 포화된 픽셀 영역의 크기가 조건을 만족시키더라도, 이웃픽셀의 거리(range)값과 차이가 크면 표적이 아닌 잡음에 의해 검출된 픽셀이므로, 이는 이상점으로 분류되어야 한다. 2차 이상점 제거의 목적은 다수의 이웃픽셀과 함께 검출된 이상점을 탐지하여 제거하는 것이다.

2차 제거방법은 이상점이 아닌 서로 이웃한 픽셀들은 동일한 표적표면에 의해 검출되며, 따라서 거리값이 유사하다는 점을 이용한다. 식 (4)는 픽셀 거리값을 이용한 이상점 제거방법을 표현한 식이다. 검사 대상픽셀의 거리값(R_p)과 주위의 이웃픽셀 거리 대표값(R_{rep})과의 차이가 임계거리(R_{th})보다 크면 이상점으로 분류하게 된다.

$$|R_p - R_{rep}| > R_{th} \quad (4)$$

이웃픽셀 거리값(R_{np})들의 중간값을 대표값(R_{rep})으로 계산한다. Fig. 7에서와 같이 검출된 이웃픽셀중에서도 이상점 픽셀이 존재할 수 있으며, 이러한 픽셀들은 배제시켜야 하기 때문이다.

$$R_{rep} = Median(R_{np}) \quad (5)$$

Fig. 7. Example of determining the representative range of the neighbor pixels.

Fig. 8. Range difference of the neighbor pixels according to the look-angle of LOS.

임계거리(R_{th})은 이상점 픽셀이 아니기 위한 이웃픽셀과의 허용거리차이다. 대상 픽셀과 이웃 픽셀의 거리차이에 대한 임계치는 식 (6)과 같이 Line of sight (LOS)에 따른 인접픽셀간 거리 차이(R_{dif})와 픽셀의 거리측정 오차(σ)를 고려하였다. 서로 이웃한 픽셀간의 거리차이는 검출기와 표적표면의 기하학적 관계에 의해 나타난다. 표면의 기하요소는 표적에 따라 다양하지만, 본 연구에서는 지표면을 표적으로 가정하고 Fig. 8과 같이 지표면을 대상으로 검출기 시선방향(LOS)에 따른 이웃 픽셀간 거리를 계산하였다. Fig. 8에서와 같이 검출기가 경사방향으로 지표면을 바라볼 때, 이웃 픽셀간 거리(range) 차이는 식 (7)과 같이 계산할 수 있다. 검출기가 연직아래방향으로 바라보면 시선각 α 는 90° 이므로 거리차이 α 는 거의 0에 가까워지지만, 시선각이 작아지면, 그에 따른 거리차이도 증가한다.

$$R_{th} = R_{dif} + \sigma \quad (6)$$

$$R_{dif} = \frac{d}{\tan(\alpha)} \quad (7)$$

3. 검증 및 성능평가

1) 실험개요

제안한 방법을 이용하여 GmFPA 라이다 데이터의 이상점 검출을 실험해보았다. Fig. 9는 본 연구에서 수행한 실험개요를 도식화한 그림이다. 기존의 선행연구들은 대부분 실측데이터를 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나 이상점 검출은 적용하는 이상점 분포량이나 점밀도 등의 데이터 특성에 따라 성능이 달라질 수 있다(Breunig *et al.*, 2000). 이에 본 연구에서는 보다 합리적이고 객관적인 알고리즘 성능평가를 위해 시뮬레이션으로 생성된 모의 데이터를 이용하였다. 시뮬레이션을 이용한 알고리즘 검증실험은 다양한 표적과 시스템변수에 의해 생성된 모의 데이터를 알고리즘에 적용시킬 수 있다(김성준, 이임평, 2011). 뿐만 아니라 개별점에 대한 이상점 진위를 알고 있기 때문에 알고리즘의 성능을 보다 정확하고 합리적으로 측정할 수 있다(Breunig *et al.*, 2000). 자세한 내용은 다음 절에서 논의된다.

Fig. 9. Outline of experiment.

Fig. 10. Simulation process of GmFPA LIDAR data.

Fig. 11. Main modules and data flow of simulation software.

2) GmFPA 라이다 시뮬레이션

연구는 김성준 외(2012)이 제안한 센서모델링에 기반한 GmFPA 라이다 시뮬레이션 방법을 이용하여 알고리즘 검증에 이용할 모의 데이터를 생성한다. GmFPA 라이다 시뮬레이션은 다면체(B-rep, boundary representation) 형태(format)로 이루어진 3차원 배경/표적 모델과 라이다 시스템변수를 입력으로 3차원 점군(point cloud)를 출력하는 것을 목적으로 개발됐다. 이를 위해 Fig. 10과 같이 라이다시스템에 대한 기하/복사/검출 모델링을 수행하였으며, 이를 기반으로 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. Fig. 11은 개발된 소프트웨어를 구성하는 주요 모듈과 입출력데이터의 흐름을 도식화한 그림이다.

시뮬레이터의 모듈은 크게 기하/복사/검출 모듈로 분류할 수 있으며, 기하모듈에서는 광학 기하학(geometric optics)을 고려한 개별 픽셀에서 표적까지의 거리를 계산하고(Kim et al., 2009), 이를 시간으로 환산해서 복

사모듈에 전달한다. 복사모듈에서는 전달받은 시간과 수신에너지를 계산하여 픽셀에 입사하는 반사파형을 생성하고, 이를 검출모듈에 전달한다. 마지막으로 검출 모듈에서는 가이저 모드 검출기의 특성을 반영한 확률모델을 이용하여 검출기 픽셀이 광자(photon)에 의해 포화(saturation)되는 시간을 모의 생성한다.

시뮬레이션 결과로 두 개의 점군(point clouds)이 생성된다. 하나는 기하학적 모델을 기반으로 생성된 점군이며(Fig. 10의 기하모델링에서 마지막 프로세스), 다른 하나는 검출모듈에서 출력하는 점군이다. 전자는 순수하게 기하학적인 측면에서 생성되었지만, 후자는 복사학적 측면과 검출기의 특성이 고려되어 생성되었기 때문에 두 점군을 비교함으로써 노이즈 에너지에 의해 발생한 이상점의 진위를 분석할 수 있다(김성준, 이임평, 2011).

3) 모의 데이터 생성

Fig. 12는 입력데이터로 사용하는 배경객체로서, 실

Fig. 12. 3D background image(city model) as the input data for LIDAR simulation.

Fig. 13. 3D target image (a fighter model) as the input data for LIDAR simulation.

제 서울특별시 영등포구 영등포동 일부 지역에 대한 모델이다. 지형은 삼각망(TIN)으로 이루어져 있으며, 건물은 총 99,018개의 다각형으로 구성된 B-rep 기반의 다면체 모델로 생성하였다. Fig. 13은 표적객체로 사용한 비행체의 모습이다. 건물과 마찬가지로 다면체 모델이며, 1,256개의 다각형으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 배경 위에 표적이 약 50 m 상공에서 정지 상태로 있다고 설정하였다. 그리고 라이다 시스템은 플랫폼에 탑재되어 1 km 상공에서 연직아래 방향을 바라보고 데이터를 획득하는 시나리오로 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2는 시뮬레이션 실행을 위해 결정한 주요 변수이다.

Fig. 14는 최종적으로 생성된 모의 GmFPA 라이다 데이터를 점군(point cloud)로 가시화한 그림이다. 총 46,928개의 점이 생성되었으며, 점밀도는 약 44.51개/m²(0.22개/m³)로 나타났다. 그리고 이상점(Fig. 14c에

Table 2. System parameters and values

System parameter	Value
laser mean power	10 W
pulse repetition	25 kHz
data acquisition time	0.1s
no. of pixels	16 x 16
measurement range	900~1,100 m
across range resolution	0.3 m
range error	0.3 m
false alarm rate	1.85%
flight height	1,000 m
look angle	90°

(a) 2D Ground plan (x-y axis)

(b) 3D Point cloud color coded by height (c) 3D Point cloud color coded by class

(d) 3D Point cloud without outliers

Fig. 14. Simulated LIDAR point cloud.

서 녹색 점)은 11,110개(약 23.67%)로 나타났다.

(a) Outliers (green) detected by the proposed method

(b) 3D point cloud after outlier elimination

Fig. 15. Result of the outlier detection.

4) 이상점 검출 실험 및 검증

본 연구에서 제안한 이상점 제거 방법을 시뮬레이션을 통해 생성한 모의 점군에 적용하여 보았다. 식(2)와 식(3)으로부터 계산된 표적/비표적 구간기준은 구간의 크기가 5 m인 거리 히스토그램상에서 444개로 계산되었으며, 방법론에 기술된 것과 같이 기준값보다 큰 구간의 픽셀에 대해서는 이웃픽셀의 최소 개수를 1개로, 낮은 구간에서는 2개로 적용하였다. 라이다 센서가 시선 각이 90°인 연직아래방향을 바라보기 때문에 서로 이웃한 픽셀들간의 거리임계치는 픽셀의 거리측정오차만이 반영된 0.3 m로 결정하였다. Fig. 15는 결정된 알고리즘 변수를 이용하여 이상점 검출을 수행한 결과이다. 총 46,928개의 점 중에서 11,731개(약 25%)의 점을 이상점으로 검출하였음을 확인하였다. 알고리즘 적용 후, 데이터의 이상점 비율은 23.67%에서 0.04%로 줄어들었다. Fig. 16(a)는 점군을 이상점과 표적점을 구분하여 보여주는 그림이며, (b)는 이상점을 제거한 후 표적점들의 모습이다.

본 연구에서는 이상점 검출 알고리즘 결과를 보다 정량적으로 판단하기 위해 알고리즘의 Type I, type II,

Table 3. Error Matrix of the detection result

		Proposed method	
		Inlier	Outlier
True data	Inlier	True 1(35,183)	False 1(635)
	Outlier	False 2(14)	True 2(11,096)
Type I		$\frac{false\ 1}{true\ 1 + false\ 1} (1.77\%)$	
Type II		$\frac{false\ 2}{true\ 2 + false\ 2} (0.13\%)$	
Total error		$\frac{\sum false}{\sum true + \sum false} (1.38\%)$	
Correctly undetection probability		1 - Type I(98.23%)	
Correctly detection probability		1 - Type II(99.87%)	

Total 오차율을 계산하였다. 오차율은 이상점에 대한 정분류와 오분류에 의해 결정되며 분류결과는 Table 3과 같다. Type I은 실제 표적점 중 이상점으로 분류된 오차 비율이며, Type II는 실제 이상점 중 표적점으로 분류된 오차 비율이다. Total은 전체 점에 대해 발생한 오차 비율을 의미한다. 각각의 오차비율을 분석한 결과 Type I은 약 1.77%, Type II는 약 0.13%, Total 오차비율은 약 1.38%로 나타났다. 이상점 제거 알고리즘의 성능은 표적점 보존율과 이상점 제거율로 분석할 수 있다. 오차분석을 통해서 제안된 이상점 제거알고리즘은 98.23%의 표적점 보존율(Correctly undetection probability)과 99.87%의 이상점 제거율(Correctly detection probability) 성능결과를 보여주었다.

5) 검출 성능분석

이상점 검출 알고리즘의 성능분석을 위해 다양한 데이터 특성(점밀도, 이상점 비율)을 갖는 점군에 대해 실험을 수행하였다. 시뮬레이션을 이용해 점밀도와 이상점 비율이 서로 다른 모의데이터를 각각 6개씩 생성하고, 여기에 이상점 검출 알고리즘을 적용시켜 보았다. Fig. 16은 라이다 센서 탑재체의 비행고도가 500 m에서 1 km까지 높아짐에 따른 모의 데이터의 점밀도(point/m³)와 이상점 검출결과의 오차율 변화를 그래프로 표현하고 있다. 촬영 고도가 높아짐에 따라 생성된 모의 데이터의 점밀도는 점점 감소(1.27~0.28 개/m³)하며, 점밀도가 감소함에 따라 이상점 검출오차율도 증

Fig. 16. Performance of the outlier detection according to point density.

Fig. 17. Performance of the outlier detection according to position of outliers.

가함을 볼 수 있다. 그러나 오차율의 증가폭이 매우 낮으며, Total 오차율도 2% 이내로 나타났다.

Fig. 17은 라이다 센서의 조리개 구경(aperture diameter)이 8 cm에서 13 cm까지 증가함에 따른 모의 데이터에 포함된 이상점 비율과 이상점 검출결과의 오차율 변화 그래프이다. 조리개 구경이 커짐에 따라 수신되는 노이즈 에너지가 증가하여 이상점의 비율이 약 22%에서 40%까지 증가하였다. 그러나 개발된 이상점 검출 알고리즘은 점군 안에 포함된 이상점 비율과는 상관없이 일관성 있게 높은 검출성능을 보여주었다.

4. 결론

본 연구에서는 검출기 픽셀을 이용하여 Geiger mode FPA 라이다 데이터에 포함된 이상점을 검출하는 방법을 제안하였다. 그리고 시뮬레이션을 이용하여 다양한 점밀도와 이상점 비율을 갖는 모의데이터를 생성

하여 제안된 검출 방법에 적용하여, 개발된 알고리즘에 대한 검증 및 성능평가를 위한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 본 연구에서 개발된 알고리즘은 실제 약 23.67%의 이상점이 포함된 46,928개의 점군에서 Total 오차율이 약 1.38%인 성능을 나타냈다. 특히, 이상점 정분류 효율은 약 99.82% (1-type II)로 매우 높았음을 확인하였다. 뿐만 아니라 다양한 특성(점밀도, 이상점 비율)을 갖는 데이터에서도 높은 검출성능을 발휘함을 알 수 있었다. 기존 연구에서 제안된 이상점을 제거방법에 비해 본 연구에서 제안된 알고리즘은 화각(FOV)을 유지하면서, 라이다 시스템과 표적이 거동하는 동안에도 유효하다는 장점이 있다. 그러나 실측 데이터를 적용한 성능 검증이 이루어지지 않았기 때문에 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

향후 가이저모드 영상 라이다 시스템의 온라인 실시간 처리 또는 임무 수행 후 지상 영상처리 SW에 효과적으로 적용될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 “3차원 LIDAR 영상처리기법 연구” 과제(계약번호: UD100028GD)와 한국과학기술원 영상정보특화연구센터의 II-21 “레이저 영상 신호특성모델링 기법 연구” 과제(계약번호 UD070007AD)를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김성준, 이임평, 2011. 가이저모드 영상 lidar 센서 모델링 및 시뮬레이션 기법, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, pp. 1001-1004.
- 문지영, 이임평, 김성준, 김경옥, 2005. 점밀도 기반의 lidar 데이터로부터 outlier 검출, 대한토목학회 논문집, 25(6D): 891-897.
- 조우석, 이영진, 좌윤석, 2003. 항공사진과 항공레이저 데이터를 이용한 건물 자동추출, 대한원격탐사학회지, 19(4): 307-317.

- Akyay, T., 2008. Wavelet-based outlier detection and denoising of airborne laser scanning data, Middle East Technical University, Master thesis, Ankara, Turkey.
- Albota, M.A., B.F. Aull, D.G. Fouche, R.M. Heinrichs, D.G. Kocher, R.M. Marino, J.G. Mooney, N.R. Newbury, M.E. O'Brien, B.E. Player, B.C. Willard, and J.J. Zayhowski, 2002. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays, *Lincoln Laboratory Journal*, 13(2): 351-370.
- Alshawabkeh, Y. and N. Haala, 2004. Laser scanning and photogrammetry: A hybrid approach for heritage documentation, *3rd International Conference on Science and Technology in Archaeology and Conservation*, Amman, Jordan, Dec. 7-11.
- Baltsavias, E.P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3): 83-94.
- Breunig, M.M., H.P. Kriegel, R.T. Ng, and J. Sander, 2000. Lof: Identifying density-based local outliers, *SIGMOD Rec*, 29(2): 93-104.
- Carlsson, T., O. Steinvall, and D. Letalick, 2001. *Signature Simulation and Signal Analysis for 3-D Laser Radar*, FOI-Swedish Defence Research Agency, Technical Report, Linköping, Sweden.
- Cho, P., H. Anderson, R. Hatch, and P. Ramaswami, 2006. Real-time 3D ladar imaging, *Lincoln Laboratory Journal*, 16(1): 147-164.
- Dorninger, P. and N. Pfeifer, 2008. A comprehensive automated 3D approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds, *Sensors*, 8(11): 7323-7343.
- Fang, H.T. and D.S. Huang, 2004. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform, *Optics Communications*, 233(1-3): 67-76.
- Feng, L., Y. Zhiwei, W. Bo, and D. Qianlin, 2011. Filtering algorithm for LiDAR outliers based on histogram and KD tree, *Image and Signal Processing (CISP)*, Beijing, China, Oct. 15-17, vol. 5, pp. 2741-2745.
- Gronwall, C., F. Gustafsson, and M. Millnert, 2006. Ground target recognition using rectangle estimation, *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(11): 3400-3408.
- Haala, N. and C. Brenner, 1999. Extraction of buildings and trees in urban environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3): 130-137.
- Hawkins, D.M., 1980. *Identification of Outliers*, Chapman and Hall.
- Itzler, M.A., M. Entwistle, M. Owens, K. Patel, X. Jiang, K. Slomkowski, S. Rangwala, P.F. Zalud, T. Senko, J. Tower, and J. Ferraro, 2010. Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays or three-dimensional imaging LADAR, *Proceedings of SPIE*, San Diego, California, USA, Aug. 27, vol. 7808, pp. 78080C-14.
- Jain, A.K., M.N. Murty, and P.J. Flynn, 1999. Data clustering: a review, *ACM Computing Surveys*, 31(3): 264-323.
- Jing, L., Z. Jixian, D. Kazhong, L. Zhengjun, and S. Qunshan, 2011. A new power-line extraction method based on airborne LiDAR point cloud data, *Image and Data Fusion (ISIDF)*, 2011 International Symposium on, Aug. 9-11, pp. 1-4.
- Knorr, E.M., R.T. Ng, and V. Tucakov, 2000. Distance-based outliers: Algorithms and applications, *The VLDB Journal*, 8(3-4): 237-253.
- Kong, H.J., T.H. Kim, S.E. Jo, and M.S. Oh, 2011. Smart three-dimensional imaging ladar using two geiger-mode avalanche photodiodes, *Optics Express*, 19(20): 19323-19329.
- Mills, S.J., M.P.G. Castro, Z.R. Li, J.H. Cai, R. Hayward, L. Mejias, and R.A. Walker, 2010.

- Evaluation of aerial remote sensing techniques for vegetation management in power-line corridors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(9): 3379-3390.
- Navarro-Serment, L.E., C. Mertz, and M. Hebert, 2010. Pedestrian detection and tracking using three-dimensional LADAR data, *The International Journal of Robotics Research*, 29(12): 1516-1528.
- O' Brien, M.E. and D.G. Fouche, 2005. Simulation of 3D laser radar systems, *Lincoln Laboratory Journal*, 15(1): 37-60.
- Pal, N.R., T.C. Cahoon, J.C. Bezdek, and L. Pal, 2001. A new approach to target recognition for LADAR data, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(1): 44-52.
- Papadimitriou, S., H. Kitagawa, P.B. Gibbons, and C. Faloutsos, 2003. LOCI: fast outlier detection using the local correlation integral, *International Conference on Data Engineering (ICDE)*, Bangalore, India, Mar. 5-7.
- Remondino, F., 2011. Heritage Recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning, *Remote Sensing*, 3(6): 1104-1138.
- Rottensteiner, F., 2003. Automatic generation of high-quality building models from lidar data, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(6): 42-50.
- Shekhar, S., C.T. Lu, and P. Zhang, 2003. A unified approach to detecting spatial outliers, *Geoinformatica*, 7(2): 139-166.
- Sohn, G. and I.J. Dowman, 2008. A model-based approach for reconstructing a terrain surface from airborne lidar data, *Photogrammetric Record*, 23(122): 170-193.
- Sotoodeh, S., 2006. Outlier detection in laser scanner point clouds, *IAPRS*, Dresden, Germany, Sep. 25-27, vol. 36, pp. 297-298.
- Vosselman, G., 2002. Fusion of laser scanning data, maps, and aerial photographs for building reconstruction, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS '02. 2002 IEEE International*, vol. 1, pp. 85-88.