

논문 2007-44CI-4-4

라이다 파장 분석 방법론에 대한 연구

(Analysis Method for Full-length LiDAR Waveforms)

정 명 희*, 윤 의 중**, 김 천 식*

(Myunghee Jung, Eui-jung Yun, and Cheonshik Kim)

요 약

최근 중요한 매핑기술이 된 LiDAR(Light Detection And Ranging)는 다른 수치표고자료 획득 기법에 비해 높은 정확도와 세밀한 밀도를 가지고 있어 3차원 모델링에 필요한 높이정보를 제공한다. 이러한 시스템의 가장 중요한 작업은 디지털화된 리턴 펄스의 모양을 이해하여 수신권내의 반사되어 오는 시간을 측정하여 이와 대응되는 표면 위치를 계산하고 이를 지리좌표와 연결시키는 것이다. 디지털화된 파형(waveform)은 수신권내의 지표 형태에 따라 다른데 처음 발생된 펄스와 같은 단일 모드이거나 수신권내에 여러 표면이 있는 경우 각 반사 표면에 해당하는 여러 모드로 구성된 복잡한 파형일 수 있다. 자료처리 과정에서 반사표면에 대해 일관성 있는 거리측정 지점을 찾기 위해서는 리턴 파장에서 각 모드의 중심위치나 피크 진폭의 위치를 찾아내는 방법이 필요하다.

복잡한 파장의 경우에는 여러 개의 반사지점에 대해 정확한 높이를 계산해 내는 것이 쉽지 않는데 이를 위해 각 모드가 수신권내의 반사 표면에서 레이저 에너지가 반사되는 분포를 나타낸다고 가정하고 리턴 파장을 각 구성 모드로 분해하는 방법이 제안되었다. 이때 분석을 단순화하기 위해 레이저 출력 펄스 모양이 가우시안 분포를 따른다고 가정하고 전체 리턴 파장을 다변량 가우시안(multivariate Gaussian) 분포를 이용하여 분석한다. 여기서는 혼합분포에서 정확한 피크 위치와 half-width와 같이 모형의 파라미터에 대한 추정치를 구하기 위해 EM 알고리즘을 적용하여 MLE 값을 구하였다. 그러나 실제 레이저 고도계에서 얻어진 데이터는 가우시안이 아닌 오른쪽으로 기울어진 분포를 보여주고 있어 응용분야에 따라 정확한 분석이 필요한 경우 이러한 펄스 모양을 고려한 방법이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 펄스 모양을 처리하기 위한 새로운 방법론이 제시되어 있다.

Abstract

Airborne laser altimeters have been utilized for 3D topographic mapping of the earth, moon, and planets with high resolution and accuracy, which is a rapidly growing remote sensing technique that measures the round-trip time emitted laser pulse to determine the topography. The traveling time from the laser scanner to the Earth's surface and back is directly related to the distance of the sensor to the ground. When there are several objects within the travel path of the laser pulse, the reflected laser pluses are distorted by surface variation within the footprint, generating multiple echoes because each target transforms the emitted pulse. The shapes of the received waveforms also contain important information about surface roughness, slope and reflectivity.

Waveform processing algorithms parameterize and model the return signal resulting from the interaction of the transmitted laser pulse with the surface. Each of the multiple targets within the footprint can be identified. Assuming each response is gaussian, returns are modeled as a mixture gaussian distribution. Then, the parameters of the model are estimated by LMS Method or EM algorithm. However, each response actually shows the skewness in the right side with the slowly decaying tail. For the application to require more accurate analysis, the tail information is to be quantified by an approach to decompose the tail. One method to handle with this problem is proposed in this study

Keywords : LiDAR, laser altimetry, waveforms, Gaussian distribution, 3D mapping

* 정희원, 안양대학교 디지털미디어공학과
(Department of Digital Media Engineering, Anyang University)

** 정희원, 호서대학교 정보제어공학과
(Department of Semiconductor & Display Engineering, Hoseo University)

※ 본 연구는 한국학술진흥재단(KRF) 지원을 통하여 (과제 번호 R04-2004-000-10117-0) 수행되었다.

접수일자: 2007년2월9일, 수정완료일: 2007년6월21일

I. 서 론

레이저 고도계라고 불리는 LiDAR(Light Detection And Ranging)는 지표의 물체 높이에 대한 정확한 정보를 제공하는 원격탐사기술로 최근 중요한 매핑기술이 되어가고 있고 지질학, 토목, 군사, 산림관리, 등 여러 분야에서 활용되고 있다. 또한 LiDAR 자료는 다른 수치표고자료 획득 기법에 비해 높은 정확도와 세밀한 밀

도를 가지고 있어 3차원 도시 건물 모델링에 필요한 높이정보를 제공한다. LiDAR 는 레이저 스캐닝 시스템, GPS, IMU(Inertial Measuring Unit)으로 구성되어 있는데 레이저 스캐닝은 지형에 대한 정보를 제공하고 GPS와 IMU는 해당 수신권의 정확한 지리적 위치를 알아내기 위해 사용된다. 리턴 레이저 펄스 모양은 수신권(footprint)내에 있는 각 반사 물체의 위치와 지형(topographic)에 대한 정보를 제공하는데 그 원리는 레이저에서 지표를 향해 발사된 펄스가 지표 물체의 표면에 반사되어 돌아오는데 걸리는 시간을 이용하여 높이를 계산하는 것이다. 레이저 수신권은 지리좌표를 이용해 지표면과 연결되어 있다.

처음 레이저 고도계 시스템은 1970년 달 탐사임무를 맡은 Apollo 15, 16, 17 호에 장착되어 있었는데^[1] 지난 20년 동안 화산이나 빙상 지형, 해양, 등 지표의 지형적 특징을 측정하기 위해 많은 항공 시스템이 개발되었다. 위성거리 측정과 처리기술이 발달되어 감에 따라 최근 레이저 고도계 시스템은 지구와 다른 행성의 정보를 미터 단위로 수집할 수 있는데 예를 들어 LVIS(Laser vegetation Imaging Sensor)의 경우 십 센티 단위의 정확성을 보여주고 있다^[2]. 현재 GLAS (geoscience laser altimeter system)는 십 센티 단위의 정확도를 가지고 대륙빙하의 고도변화를 측정하고, VCL(vegetation canopy lidar)은 미터 단위 정확도로 나무 높이와 수직 구조, sub-canopy의 지형도를 알아내고 있다^[3]. 우리나라에서는 2000년4월에 분당지역의 LiDAR 시험 촬영이 있었으며, 2002년 9월경에 서울과 안성지역을 촬영하였다^[4].

이러한 시스템에서 가장 중요한 작업은 디지털화된 리턴 펄스의 모양을 이해하여 수신권내의 물체표면의 반사 시간을 추출해 내고 대응되는 반사표면 위치를 지리좌표와 연결시키는 것이다. 디지털화된 파형(waveform)은 레이저 펄스가 물체 표면에 부딪히면서 반응하는 시점에 대한 정보를 제공해 주는데 파장은 처음 발생된 펄스와 같은 단일 모드이거나 각 표면으로부

터 반사된 여러 모드로 구성된 복잡한 파형일 수 있다. 평평한 지역이나 해표면의 경우는 단순 형태이고 산림 지역은 복잡한 파형으로 나타나게 된다. 시간적으로는 처음 모드와 마지막 모드가 각각 가장 높은 반사표면과 가장 낮은 반사표면에 대응되고 자료처리 과정에서 반사표면에 대해 일관성 있는 거리측정 지점을 찾기 위해서는 리턴 파장에서 각 모드의 중심위치나 피크 진폭의 위치를 찾아내 처리하는 방법이 필요하다.

복잡한 파형의 경우에는 여러 개의 반사지점에 대해 정확한 높이를 계산해 내는 것이 쉽지 않다. 이를 위해 각 모드가 수신권내의 반사 표면에서 레이저 에너지가 반사되는 분포를 나타낸다고 가정하고 리턴 파장을 각 구성 모드로 분해하는 방법이 제안되었다^[2]. 각 모드의 위치는 수직 방향으로 반사표면의 위치를 알아내는데 사용된다. 이때 분석을 단순화하기 위해 레이저 출력 펄스 모양이 가우시안 분포를 따른다고 가정하고 다변량 가우시안(multivariate Gaussian) 분포를 이용하여 리턴 파장을 분석하고 있다. 그러나 실제 레이저 고도계에서 얻어진 데이터는 가우시안이 아닌 오른쪽으로 기울어진 분포를 보여주고 있어 응용분야에 따라 정확하게 자료가 이용되기 위해서는 펄스 모양을 고려한 분석이 필요하다^[5]. 본 연구에서는 오른쪽으로 치우쳐 있는 tail 부분을 해당 반사지점에 대한 피크와 분리하여 모형화 하는 방법이 제시되어 있다.

II. LiDAR 파형 자료 분석

1. LiDAR 원리

정확한 매핑은 측지학, 지형학, 산림관리, 도시계획, 자연재해 모니터링에 이르기까지 응용분야에 중요한 영향을 끼치고 있고 특히 라이다를 이용한 지형 매핑은 지구 표면의 3차원 영상 형성에서 매우 중요하다.

첫 상업적 항공 레이저 스캐너는 하나의 후광산란 펄스(backscatter pulse)만을 기록하여 단일 모드 반사 펄스를 해석하기 간단하였다. 그러나 아무리 작은 레이저 수신권(0.2~2m)이라도 각각의 반사 펄스를 갖는 여러 물체가 존재하기 때문에 여러 펄스를 기록할 수 있는 레이저 스캐너로 발전되어 갔다. 상업적 레이저 스캐너는 보통 처음과 마지막 펄스를 측정하는데 그 이상을 펄스를 측정하여 제공하는 것들도 있다. 이때 중요한 것은 이러한 측정된 값을 어떻게 해석하느냐 하는 것인데 예를 들어 그림 1에서와 같이 처음은 나무 위 부분에 대한 정보이고 마지막은 지표부분을 나타낸다.

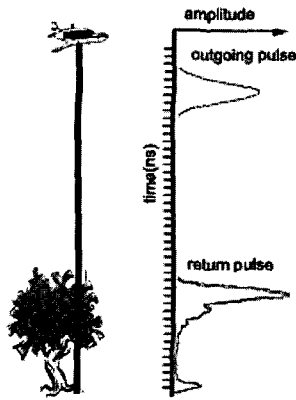


그림 1. 레이저 리턴 펄스
Fig. 1. Laser return waveforms.

레이저 지점은 GPS에서 의해 위치가 결정된다. 라이다는 펄스 레이저와 연속파형 레이저 두 종류가 있는데 펄스 레이저는 소수신권에 대해 측정하고 연속파형 레이저는 전체 리턴 파형을 기록해서 비교적 넓은 수신권에 대해 리턴 신호의 전체 구조를 알아낼 수 있다. 리턴 펄스는 여러 표면에서 반사가 되기 때문에 복잡한 모양의 파형으로 나타난다. 상업적인 지형 라이다 시스템은 15개의 리턴 펄스를 감지하는데 복잡한 반사 표면을 찾아내는데 제한적이다. NASA의 연구 라이다 시스템은 전체 리턴 파장을 디지털화하여 기록할 수 있는데 이 시스템은 위성에 장착되어 빙상지역이나 열대 지역의 지형을 매핑하기 위해 설계되었다. 소프트웨어 알고리즘을 사용하여 복잡한 파형을 분석하고 서로 가까운 목표점을 구분하고 목표점의 표면조도나 기울기에 대한 정보를 알아낸다^[6].

현재 기존의 라이다 시스템의 레이저 범위(range)와 후방산란 강도(backscatter intensity) 정보에 대해 리턴 파형 전체를 디지털화하는 것에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어 소수신권 라이다 시스템인 Optech ALTM 1225에는 레이저 펄스의 유사 파장을 샘플링하여 이것을 디지털 측량으로 전환하는 모듈이 개발되고 있고 ALTM 시스템은 디지털라이저와 통합되어 전체 파장에 대한 정보뿐 아니라 기존 라이다 시스템처럼 각 레이저 펄스에 대한 시작과 끝 리턴 신호가 기록된 정보를 가지고 있어 기존 시스템과 전체 파장 정보를 제공하는 시스템을 직접 비교해 볼 수 있다. SLA(Shuttle Laser Altimeter)도 지표면으로부터 반사되는 전체 리턴 파장을 기록하여 단일 가우시안이나 혼합 가우시안 분포를 이용하여 수신권내의 복잡한 표면(표면 지형, 산림, 빌딩 등)을 분석하는데 사용된다. 전

체 파장 분석에 대한 연구에서는 주로 단일 파장에 비해 막대한 자료의 양이 얼마나 유용성이 있는 정보를 제공하고 있고 이것을 정확하게 분석하고 활용할 수 있는가에 대해 이루어지고 있다.

라이다 매핑 시스템은 레이저 펄스가 송신되어 표면에 부딪힌 후 반사 펄스가 돌아오는데 걸리는 시간을 이용해 목표지점까지의 거리를 다음과 같이 계산한다.

$$D = \frac{vt}{2} \tag{1}$$

D 는 비행체에서 물체까지의 거리이고 v 는 빛의 속도, t 는 신호가 송신되어 돌아올 때까지 걸리는 시간이다.

또한 복잡한 파형을 분석하여 나무들의 수직적 구조를 통해 물체형태를 파악할 수 있다^[6]. 그림 2는 수직적 구조를 통해 수신권내의 산림나이를 예측하는 예를 보여준다.

2. LIDAR 파형 분석 모형

일련의 일정한 간격으로 나뉜 $x_k : k = 1, 2, \dots, N$ 에 대해 대응되는 자료 값 $\{y_k : k = 1, \dots, N\}$ 이 주어졌을 때 리턴 파장을 다음과 같이 혼합밀도함수(mixture density function)로 나타낼 수 있다.

$$y = p(x | \Psi) = \sum_{j=1}^n \pi_j p_j(x | \theta_j) \tag{2}$$

이때 π_j 와 $p_j(\cdot | \theta_j)$ 는 혼합 밀도(mixture density)를 이루는 각 성분의 비율과 밀도 함수를 나타내고 θ_j 는 각 밀도함수의 매개변수들을 나타낸다. 예를 들어 리턴

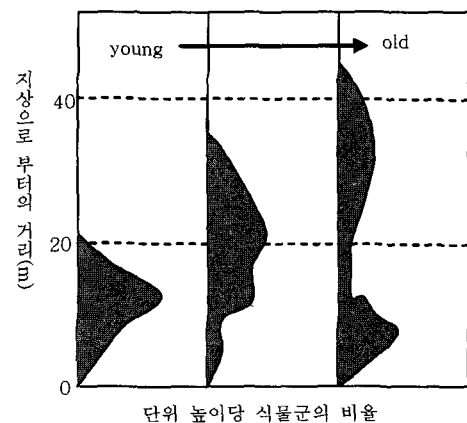


그림 2. 수직 구조를 통한 산림나이 예측
Fig. 2. Canopy vertical structure and predicted age.

펄스 모양이 다변량 가우시안 분포인 경우라면 $p_j(\cdot | \theta_j)$ 는 다음과 같다.

$$p_j(x | \theta_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_j}{\sigma_j}\right)^2\right] \quad (3)$$

$y = p(x | \Psi)$ 는 각 $j = 1, \dots, n$ 에 대해 매개변수 θ_j 를 갖는 분포함수의 합으로 나타낸다. 해당모형의 실제 자료에 대한 fitting 에러율은 y_i 가 실제 관찰치라고 하고 $ERR_i = \sigma_i$ 를 관찰치 y_i 에서의 표준편차에 해당하는 오차로 본다면 잔차(residual)는 다음과 같이 계산된다.

$$residuals = (f(x_i) - y_i) / ERR_i \quad (4)$$

전체 χ^2 값은 다음과 같고 이를 모형 최적화에 이용할 수 있다.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2 / ERR_i \quad (5)$$

혼합 밀도 함수의 각 매개변수는 이러한 기준치를 최소화시키기 위한 최소제곱법(LMS)을 사용하거나 EM 알고리즘을 이용하여 최대우도추정량(MLE)을 구할 수 있다.

파형은 먼저 필터를 사용하여 노이즈를 제거하고 다변량 분포를 구성하는 각 성분의 개수와 초기 파라미터를 추정한다. 예를 들어 가우시안을 기본 분포함수로 사용하는 경우 연속적인 변곡점(inflexion point)들을 분리하거나 2차 미분을 통해 각 가우시안 성분의 초기 위치와 절반폭(half-width) 추정치를 구한다. 초기 진폭 파라미터는 비음(nonnegative) 최소자승법을 사용하여 동시에 추정한다. Levenbug-Marquadt 기법이나^[5] MLE^[7]를 이용하여 구한 최적화된 파라미터를 이용해 파형을 다변량 가우시안 분포로 근사적으로 모형화할 수 있게 된다. 이때 실제 파장의 관찰치와 대응되는 가우시안 분포 사이의 잔차차(residual difference)를 기준으로 fitting 정도를 측정할 수 있는데 이 값이 파장의 기본 노이즈 수준일 때 최적화된 분포로 여겨진다.

리턴 파장을 분석하기 위한 처리 과정은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- S1: 파형의 기본 노이즈 구분(평균과 표준편차를 구하고 정규분포 이용)
- S2: 임계치 이상이 되는 파형의 시작 지점과 마지막 지점을 찾아내 노이즈 제거
- S3: 필터링을 통해 파장의 스무딩

S4: 파형 모형의 초기 매개변수 추정을 위해 1차, 2차 미분을 통해 신호의 각 피크 위치와 진폭, half-width를 측정하여 초기 파라미터 추정치로 사용

S5: 모형의 적합성(fitting)을 위해 반복적으로 피크 위치와 진폭, half-width를 재측정하며 모형의 파라미터 추정

S6: 주어진 기준 에러율을 이용한 모형의 적합성 측정

스무딩하기 위한 필터링은 가우시안 필터를 사용하거나 웨이블릿을 적용한다. 이때 레이저 감지거나 기록 시스템으로부터 미리 알고 있는 레이저 펄드의 half-width를 이용할 수 있는데 알려지지 않은 경우는 해양과 같이 평평한 지역의 리턴 펄스에서 구한 half-width를 이용할 수 있다. 배경 노이즈는 디지털 때문에 생기는 정규분포의 랜덤 노이즈로 다룬다. half-width가 증가할수록 실제 반사 표면으로부터 리턴을 구분하기 어렵지만 이것은 대부분 파장 내 배경 노이즈와 관련되어 있어 최적화 과정을 통해 실제 반사되어 돌아오는 지점을 구분할 수 있다.

파형의 각 피크 성분의 개수는 스무딩한 파형의 미분을 통해 알아낼 수 있는데 그림 3에서 피크 위치가 점으로 표시되어 있다. 단일 분포의 경우 그림 3.(a)에서처럼 두 개의 변곡점을 갖고 한 개의 중심 위치를 알아낼 수 있지만 n 개의 가우시안 성분의 경우 각각의 위치를 찾아내는 것이 쉽지 않다. 그림 3.(b)에서처럼 배경 노이즈 피크들이 가우시안 성분 위치로 추정될 수도 있는데 이러한 지점은 제거되어야 한다. 또한 레이저 고도계의 수직적 해상도에 따라 두 반사 표면이 가까울 경우 실제 두 위치를 분리하기가 쉽지 않고 이러한 문제를 최소화하기 위해서는 고주파 노이즈를 제거하도록 필터링 해준다.

이때 파형 내에서 평균 배경 노이즈는 신호가 없는 파형 영역으로부터 추정할 수 있다. 보통 파형의 마지막 15개 정도의 노이즈 값이 이용되는데 이것으로부터

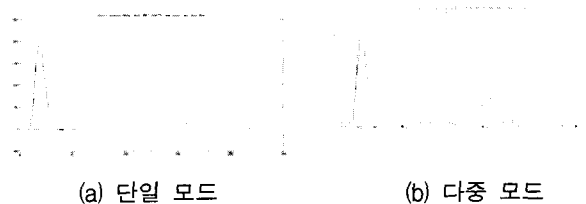


그림 3. 리턴 펄스 파형 처리 예
Fig. 3. Example of return pulse processing.

터 노이즈의 평균과 표준 편차를 구하고 정규분포로 다룬다.

때로는 노이즈 때문에 다변량 가우시안을 구성하는 수를 정확히 알아내기 어려운데 파형을 설명하는 의미 있는 피크만을 다변량 가우시안으로 포함하도록 해야 한다. 이를 위한 기준점은 half-width 추정치가 레이저 펄스 반응의 half-width와 같거나 크고 초기 진폭 추정치가 평균 노이즈의 표준편차 σ_n 의 3배 이상일 때만 의미 있는 피크로 본다. 이러한 기준을 만족하지 않는 피크는 분석대상에서 제거되는 것이 바람직하다.

비선형 LSM을 이용하여 파라미터 최적화를 수행할 때 최적치가 국소값에 머물지 않도록 주의해야 한다. MLE를 측정할 때는 우도함수가 비선형이기 때문에 평균 측정값이 수식으로 직접 계산될 수 없다. 따라서 이 방법 또한 반복적으로 근사값을 구해야 하는데 이를 위해 EM(Expectation Maximization) 알고리즘이 자주 사용되고 있다^[7].

파형이 가우시안이 아닌 경우 정확한 분석을 위해 해당 피크의 분포를 설명할 수 있는 모형이 사용되어야 한다. 각 피크 성분 분포의 파라미터는 모형을 통해 수신권내에 수직적으로 반사되는 위치와 구조를 설명된다. 실제 레이저 고도계에서 얻어진 데이터는 가우시안이 아닌 오른쪽으로 기울어진 분포를 보여주고 있어 응용분야에 따라 정확하게 자료가 이용되기 위해서는 이러한 펄스 모양을 고려한 분석이 필요하다. 그림 4는 Optech ALTM 1225에서 얻어진 파장의 한 예인데 실제 각 반사위치에 대한 구성성분이 정규 테스트 결과 정규분포가 아니다.

각 성분들은 정규분포와 반사되어 오는 과정에서 생긴 에러로 인해 펄스가 오른쪽 부분으로 꼬리(tail)를 갖는 기울어진 형태를 갖는다. 이러한 분포를 모형화하기 위해서는 가우시안과 테일 성분으로 구성된 혼합 분포로 설명할 수 있다. 피크의 half-width를 구하고 이 half-width가 대칭적인 지점을 구하여 이것을 가우시안 성분으로 여기고 대칭적 지점을 넘어서 기울어진 꼬리부분은 반사되어 오는 과정에서 생긴 에러에 대한 성분으로 여기고 이 부분을 모형화해서 포함시킨다. 이때 모형을 단순화하기 위해 이를 가우시안으로 가정한다. 이를 이용하여 꼬리성분은 순수한 피크 중심 위치의 가우시안 모형으로부터 분리해 낸다. 이때 꼬리성분의 위치를 결정하는 것은 쉽지 않는데 이 성분은 실제 반사 위치에 대한 각 가우시안 성분의 피크 위치에도 영향을 줄 수 있다.

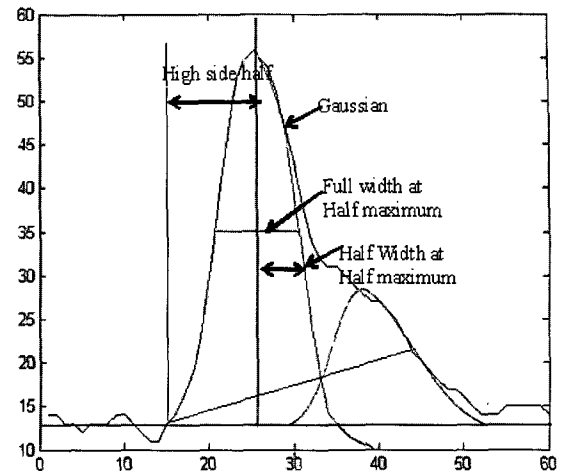


그림 4. 꼬리를 갖는 기울어진 파형 분포의 모형화
Fig. 4. Decomposition of skewed waveform with tail.

이를 위해 먼저 half-maximum이 계산되고 half maximum 위치에서의 half width를 계산하여 이 값을 갖는 피크중심의 순수 가우시안 성분을 빼내고 남은 나머지 부분을 꼬리 성분으로 가정하고 이를 가우시안으로 모형화 한다. 이러한 모형화 과정이 그림 4에 설명되어 있다.

III. 실험

앞 장에서 설명된 파형 분석 방법들이 실제 Optech ALTM 1225에서 얻어진 전체 파형(full waveform) 표본 자료에 적용되었다. Optech ALTM 1225는 range 해상도가 1cm이고 1200m에서는 15cm, 2000m에서는 25cm인 고도 정확도를 갖는 시스템으로 보통 지상에서 410~2000m 위에서 작동한다. 그림 5에 ALTM에서 얻어진 디지털화된 임펄스 파장의 예가 보여지고 있다.

제시된 파장 분석 알고리즘을 통해 파장을 혼합 모형을 이용해 근사적으로 모형화 할 수 있다. 먼저 저주파 필터를 사용하여 스무딩 하였고 결과가 그림에서 파란색 파형으로 보여지고 있다. 다음으로는 1, 2차 미분을 통해 각 피크의 위치를 찾아내었고 결과가 그림에 빨간색 점으로 표시되어 있다. 파형의 마지막 15개 값을 이용하여 파형의 랜덤 노이즈를 계산하고 원래 파형으로부터 노이즈를 제거하였는데 그림 5에서 아래쪽에 있는 파형이 스무딩되고 노이즈가 제거된 결과의 파형이다.

이 예제에서처럼 수신권내 여러 반사지점을 갖는 복잡한 파장의 형태를 갖는 경우 혼합모형으로 분석할 수 있다. 가우시안을 가정하여 파장을 분석한 결과는 다음과 같다. 먼저 피크 위치에 대한 초기 추정치는 3개로

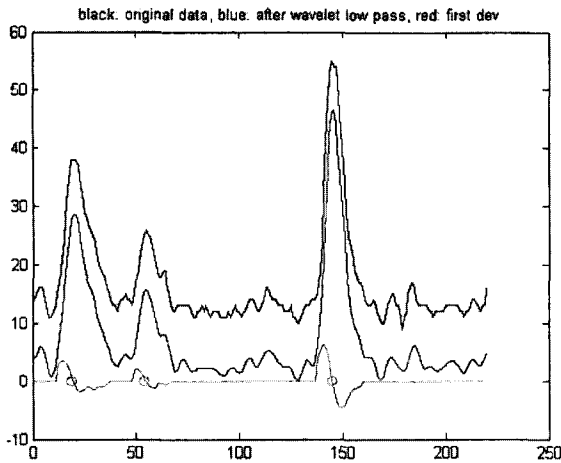


그림 5. 파형 분석: 스무딩 및 노이즈 제거, 피크위치
Fig. 5. Waveform Analysis: smoothing, noise removal and finding peak location.

표 1. EM 알고리즘을 이용한 모형의 파라미터 추정치
Table 1. Estimated parameters obtained using EM algorithm with Gaussian mixture model.

peak 수	3
처음 peak 위치	p(1)=19 p(2)=54 p(3)=145
peak 위치 추정치 (mean of Gaussian)	p(1)=19 p(2)=54 p(3)=145
혼합분포의 각 성분 비	p(1)=0.29 p(2)=0.21 p(3)=0.50
σ^2 추정치	$\sigma^2(1)=28.849$ $\sigma^2(2)=46.814$ $\sigma^2(3)=12.80$

이를 그림 5에서 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 전체 파형은 3개의 성분으로 구성된 혼합모형으로 분석하였고 EM 알고리즘을 이용하여 모형의 최적화 파라미터를 추정하였다.

추정된 파라미터 결과 값이 표 1에 보여 지고 있다. 혼합모형은 표 1에서 보여지고 있는 파라미터를 갖고 각 비율이 29%, 21%, 50% 으로 구성된 혼합 모형이다. 추정된 파라미터 값을 갖는 분포를 이용하여 모형이 실제 데이터를 얼마나 잘 fitting 하였는지 시각적으로 확인해 볼 수 있는데 이를 위해 추정된 모형에서 시뮬레이션 된 결과와 실제 데이터가 함께 그림 6에 비교되어 있다.

그림 6에서 혼합분포 모형이 실제 데이터를 비교적 잘 fitting 하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이때 발생하는 모형과 실제 데이터와의 오차 원인 중 하나는 각 성분의 파형이 정확한 가우시안이 아니기 때문에 기인한다. 보다 더 정확한 분석을 요구하는 응용분야에서는 앞에서 제시한 실제 파형 분포에서 에러를 분리해 내는 모형을

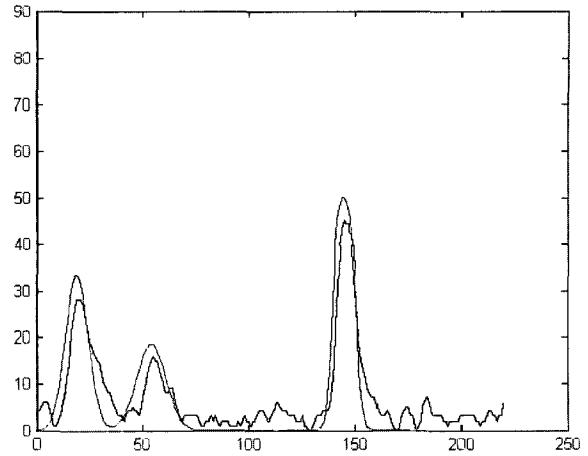


그림 6. 추정된 파라미터를 갖는 모형을 통해 시뮬레이션된 데이터와 실제 데이터 분포 비교: 파란색-실제 데이터, 빨간색-시뮬레이션 데이터
Fig. 6. Comparison of simulated data with the estimated parameters and real data: blue-original data, red-simulated data.

표 2. 기울어진 분포의 혼합모형 파라미터 추정치
Table 2. Estimated parameters for skewed distribution with Gaussian mixture model.

main peak 수	3
처음 peak 위치	p(1)=19 p(2)=54 p(3)=145
각 peak에서의 mixture Gaussian	(p(1-1)=19, p(1-1)=28) (p(2-1)=54 p(2-1)=61) (p(3-1)=145 p(3-1)=153)
혼합분포의 성분비	p(1)=0.29,p(2)=0.21,p(3)=0.50
σ^2 추정치	($\sigma^2(1-1)=12.81$, $\sigma^2(1-1)=21.34$) ($\sigma^2(2-1)=15.32$, $\sigma^2(2-2)=18.51$) ($\sigma^2(3-1)=8.12$, $\sigma^2(3-2)=11.49$)

표 3. χ^2 를 이용한 goodness-of-fit test(95% confidence)
Table 3. Goodness-of-fit test to determine if significance differences exit between the original data and simulated data using mixture models.

모형	χ^2 value	p value
혼합 가우시안	47.5	0.11
tail을 고려한 혼합 가우시안	20.1	0.26

이용하여 보다 세밀하게 모형화 할 수 있다.

오른쪽 부분으로 꼬리(tail)를 갖는 형태의 분포를 모형화 하기 위해 3장에서 설명된 가우시안과 테일 성분으로 구성된 혼합분포를 적용하여 구해진 파라미터가 표 2에 보여 지고 있다. 이를 정규분포를 이용한 혼합 모형의 결과와 비교하기 위해 식 5의 χ^2 를 구하여

fitting 테스트를 한 결과가 표 3에 나와 있다.

결과를 통해 tail을 고려한 혼합모형 분포가 파형을 더 잘 모형화 할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

최근 들어 리턴 파장 전체 정보를 제공하는 라이다 고도계에 대한 관심이 높고 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어 전체 파장 정보는 수신권내의 수직적 구조를 이해하는데 매우 중요하지만 데이터양이 매우 증가하게 됨으로 대량의 데이터를 효율적으로 처리하기 위한 방법론이나 전체 파장을 분석하고 처리하는 방법론에 대한 관심이 매우 높다.

LiDAR 시스템에서 가장 중요한 작업은 디지털화된 리턴 펄스의 모양을 이해하여 수신권내의 반사되는 지점의 위치를 알아내고 이를 지리좌표계와 연결시키는 것이다. 디지털화된 리턴 파형은 레이저 펄스가 물체 표면에 부딪히면서 반사되는 시점에 대한 정보를 제공해 주는데 반사 지점이 한 곳인 경우는 단일 모드로 나타나고 복잡한 구조인 경우는 여러 모드로 구성된 파형을 보인다. 이러한 파형은 혼합분포(mixture distribution)를 이용해서 분석될 수 있는데 가장 단순한 모형은 각 반사되는 지점으로부터 돌아오는 레이저 에너지가 가우시안 분포라 가정하고 일련의 가우시안 분포로 구성된 혼합 가우시안 모형으로 분석하는 것이다.

이러한 분석을 통해 수신권내의 수직적 구조를 이해할 수 있게 된다. 하지만 실제 리턴에너지의 형태는 오른쪽으로 기울어진 분포를 보여주기 때문에 본 연구에서는 각 반사지점에 대해 리턴 에너지의 가우시안 성분과 물체에 부딪혀 돌아오는 과정에서 생기는 변화에 대한 부분으로 구성된 분포로 나누어 분석되는 방법이 제시되었다. 이러한 예제는 Optech ALTM에서 얻어진 파장의 경우를 예로 들었지만 레이저 고도계에 따라 리턴 파장을 분석할 수 있는 보다 적합한 모형이 개발될 수 있다. 이를 위해서는 먼저 반사지점과 이로부터 반사되어 돌아오는 에너지의 관계를 이해할 필요가 있을 것이고 이러한 정확한 관계가 모형에 포함 되어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF) 지원을 통하여 (과제 번호 R04-2004-000-10117-0) 수행되었다. 자료를

사용할 수 있도록 도움을 주고 자문을 주신 Univ. of Texas, Austin의 Center for Space Research의 Amy Neuenschwander 연구원에게 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] W. M. Kaula, G. Schubert, and R. E. Lingenfelter, W. L. Sjogren, and W. R. Wollenhaupt "Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure," *Geochim. Cosmochim. Acta.*, Vol. 38, No. 5, pp. 3049-3058, 1974.
- [2] J. B. Blair, D. L. Rabine, and M. A. Hofton, "The Laser Vegetation Imaging Sensor(LVIS): A medium altitude, digitization only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sensing*, Vol. 54, no. 3, pp. 115-122, 1999.
- [3] S. Cohen, J. Dignan, J. Bufton, J. Garvin, and J. Abshire, "The Geoscience laser altimetry/ranging system," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 25, pp. 249-264, 1987.
- [4] 이원희, 유기훈, "수치지도와 LiDAR 자료를 이용한 도시지역 건물 3차원 모델링," 대한토목학회논문지, 제24권 D편, 22호, 311-318쪽, 2004년 3월
- [5] M. A. Hofton, J.B. Minster, and J. B. Blair, "Decomposition of laser altimeter waveforms," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, No. 4, pp. 1989-1996, 2000.
- [6] D. J. Harding, M. A. Lefskyn, G. G. Parker, and J. B. Blair, "Laser altimeter canopy height profiles Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forest," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 76, pp. 283-297, 2001.
- [7] R. K. Lenington and C. T. Sorensen, "A mixture model approach for estimating crop areas from Landsat data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 14, pp. 197-206, 1984.

저 자 소 개



정 명 희(정회원)
 1989년 서울대학교 계산통계학과 졸업.
 1991년 U. of Texas, Austin 석사
 1997년 U. of Texas, Austin 산업공학과 박사학위
 2007년 현재 안양대학교 디지털 미디어공학과 교수.

<주관심분야 : 통신, 시뮬레이션, 원격탐사 데이터 처리, 영상처리 멀티미디어 >



김 천 식(정회원)
 1995년 안양대학교 전자계산학과 (공학사)
 1997년 한국외국어대학교 컴퓨터 및 정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 한국외국어대학교 컴퓨터 및 정보통신공학과 (공학박사)

2000년~2003년 경동대학교 정보통신공학부 교수
 2004년~현재 안양대학교 디지털미디어학부 교수
 <주관심분야 : 멀티미디어, 데이터마이닝, 유비쿼터스, 텔레매틱스, 홈네트워크, e-Learning>



윤 희 중(정회원)
 1985년 고려대학교 전자공학과.
 1988년 U. of Texas, Austin, Electrical Engineering 석사
 1994년 U. of Texas, Austin, Electrical Engineering 박사학위

2007년 현재 호서대학교 정보 제어공학과 교수.
 1994년~1996년 미국 University of Texas at Austin 부설 Center for Magnetics Post-Doctor 연구원.

<주관심분야 : 고주파(RF) 수동 부품용 자성박막 (또는 Chip) 인덕터 및 변압기 설계 및 제작 연구, 고주파(RF)용 자성박막재료 개발, MEMS기술을 이용한 Si 압력센서 개발, PIN Diode Array를 이용한 의료 영상기기 개발, 나노입자 자성체 합성 연구>