

## LiDAR 데이터와 RANSAC 알고리즘을 이용한 철도 전력선 자동탐지에 관한 연구

### A Study on the Automatic Detection of Railroad Power Lines Using LiDAR Data and RANSAC Algorithm

전왕규<sup>1)</sup> · 최병길<sup>2)</sup>

Jeon, Wang Gyu · Choi, Byoung Gil

#### Abstract

LiDAR has been one of the widely used and important technologies for 3D modeling of ground surface and objects because of its ability to provide dense and accurate range measurement. The objective of this research is to develop a method for automatic detection and modeling of railroad power lines using high density LiDAR data and RANSAC algorithms. For detecting railroad power lines, multi-echoes properties of laser data and shape knowledge of railroad power lines were employed. Cuboid analysis for detecting seed line segments, tracking lines, connecting and labeling are the main processes. For modeling railroad power lines, iterative RANSAC and least square adjustment were carried out to estimate the lines parameters. The validation of the result is very challenging due to the difficulties in determining the actual references on the ground surface. Standard deviations of 8cm and 5cm for x-y and z coordinates, respectively are satisfactory outcomes. In case of completeness, the result of visual inspection shows that all the lines are detected and modeled well as compare with the original point clouds. The overall processes are fully automated and the methods manage any state of railroad wires efficiently.

Keywords : railroad power lines, LiDAR, RANSAC, detecting, modeling, automation

#### 초 록

LiDAR 측량은 고밀도로 정확하게 거리를 측정하는 장점 때문에 지표면과 지표면 위의 객체를 3D 모델링하는데 사용되는 주요기술 중의 하나이다. 본 연구의 목적은 고밀도 LiDAR 데이터와 RANSAC 알고리즘을 이용하여 자동으로 철도전력선을 탐지하고 모델링하는 방법을 개발하는데 있다. 철도전력선을 탐지하기 위하여 레이저 데이터의 다중반사 특성과 철도전력선에 대한 형상정보를 이용한다. 이를 위한 프로세스는 최초 단위라인을 찾기 위한 직육면체 분석과 라인 추적, 연결 그리고 색인 작업으로 구성되며, 반복 RANSAC과 라인 파라미터를 구하기 위한 최소제곱법이 모델링을 위하여 사용된다. 철도전력선의 경우에는 정확도 확인을 위한 실측자료를 구하는 것이 매우 힘들어서 정량적인 정확도 평가가 어려우나 모델에 대한 레이저점군의 표준편차는 x-y 및 z 좌표 각각 8cm 와 5cm로 양호하였고, 육안 검사에 의한 완성도면에서도 원 데이터와 비교할 때 모든 철도전력선 라인이 탐지 및 모델링된 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시하는 방법의 모든 과정은 완전히 자동화하였으며, 특히 다수의 전력선이 복잡하게 설치된 지역에서도 적용될 수 있도록 개발하였다.

핵심어 : 철도 전력선, LiDAR, RANSAC, 탐지, 모델링, 자동화

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University(E-mail:wgjean@kasm.or.kr)

2) Regular member, Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University(E-mail:bgchoi@incheon.ac.kr)

## 1. 서론

철도 시스템에서 전력을 공급하는 철도 전력선은 철도 서비스를 유지하기 위한 관리자와 전력 공급자에게 매우 유용한 자료로 활용되고 있다. International Union of Railways의 GEORAIL 프로젝트(Barbu, 2008)에서는“모든 철도 시스템은 좌표기반의 묘사가 요구된다.”라고 강조하고 있다. 그러나 철도 전력선 및 레일과 같은 시설물을 모델링 할 경우 객체의 가늘고 긴 특성 때문에 항공사진측량에 의해 식별하고 가시화하는 것이 거의 불가능하고, 토탈스테이션 등을 이용한 지상측량 방법 역시 시간과 비용 면에서 매우 비효율적이다. LiDAR를 이용한 방법은 고밀도로 정확하게 객체까지의 거리를 측정 할 수 있기 때문에 지표면과 지표면 위의 다양한 객체들을 모델링하는 데 자주 이용되고 있다. 최근에는 이러한 LiDAR 데이터를 이용하여 전력선이나 철도레일 등과 같은 가늘고 긴 선형 객체를 추출하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있으며 LiDAR를 이용한 방법은 가늘고 긴 객체를 정확하고 경제적으로 모델링할 수 있는 최적의 기술이라 할 수 있다(Baltsavias, 1999; Melzer and Briese, 2004). 그러나 레이저 스캐닝 장비의 비약적인 발전에도 불구하고 선형 객체 추출의 자동화에 대한 연구는 초기단계에 머무르고 있는 실정이다.

LiDAR 데이터를 이용하여 고압 전력선과 같은 단선의 선형 객체를 자동으로 탐지하기 위한 연구가 수행되고 있으나, 다수의 시설물이 복잡하게 설치되어 있는 지역에서의 선형 시설물을 자동으로 탐지하기 위한 연구는 미흡한 실정이다.

철도 전력선의 경우에는 일반적인 전력선과 달리 지표면으로부터 설치된 높이가 일정하고, 마운팅 와이어에 의하여 거의 직선을 이루고 있어 자동으로 탐지할 수 있는 가능성이 높다.

다수의 연구에서 많은 선형 시설물이 복잡하게 설치된 지역에 대하여 객체를 자동으로 정확하게 탐지하는 것은 어려움이 있음을 말하고 있다. LiDAR 데이터를 이용하여 복잡한 지역의 선형 시설물을 자동으로 추출하기 위한 연구는 거의 없으며, 대체적으로 소수의 일반 전력선을 수동 선택 또는 자동 탐지 후 모델링하는 연구가 이루어졌다.

Neubert *et al.*(2008)은 매우 점밀도가 높은 레이저 스캐닝 데이터와 고해상도의 수직항공사진을 이용하여 철도 시설물을 자동으로 추출하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 상용 이미지 프로세싱 소프트웨어에서 제공하는 다양한 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 객체 추출을 시도하였으나, 완성도와 기하학적 정확도면에서 만족스러운 결과를 얻지 못하였다. LiDAR 데이터를 이용하여 철도 선형객체를 추출하는 방법으로 RANSAC(RANdom SAmple Consensus) 알고리즘

과 형상정보를 이용한 2차원 단면을 사용하였다. 이 연구에서는 아주 고밀도의 LiDAR 데이터를 이용하면 항공사진 없이도 높은 정확도로 철도 시설물을 추출할 수 있다고 결론지었다. 그러나 철도역과 같이 복잡하게 선로가 설치된 지역에서는 객체 추출에 한계가 있음을 밝혔다.

Melzer and Briese (2004)는 LiDAR 데이터를 이용하여 전력선을 탐지하는 실용적인 방안을 제안하였다. 이 방법은 5개의 단계, (i) pre-processing, (ii) 필터링, (iii) 반복 HT, (iv) 라인 군집화(Line clustering), (v) 국부 분석(Local analysis)과 Catenary fitting으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 x-y 평면을 셀로 나누어서 임의의 셀과 인접 셀 안의 점의 수를 이용하여 전력선 후보점을 구분하는 새로운 필터링 기술을 제안하였다. 이 연구에서는 세그먼트 연결, 점군이 동일각도로 나열되었다는 가정, 반복 HT에서 하나의 잘못된 가설이 후속작업에 지속적으로 영향을 미친다는 것을 문제점으로 제시하고 있다.

Ussyshkin and Smith(2007)은 선형 시설물에 대한 LiDAR 데이터 정확도를 평가하기 위한 새로운 방법을 제시하였으며, 전력선과 같은 선형시설물의 경우 지상측량으로 검증데이터를 구할 수 없기 때문에 현재까지 대축척 선형 매핑에 대하여 일반적이고 광범위하게 통용되는 정확도 표준 및 가이드라인이 없는 것으로 분석하였다. 이 연구에서는 수직과 수평 정확도를 구분하여 평가하였으며, 전력선은 항상 수직 평면에 놓여있는 형식을 가지고 있기 때문에 3D문제를 2D로 나누어 처리할 수 있으며, 수작업으로 선택된 점군에서 평균값을 구하고 최소제곱법으로 모델을 결정한 후 표준편차를 계산하여 정확도를 평가하였다.

Cho *et al.*(2013)은 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 건물의 경계정보를 추출하기 위하여 점 데이터의 기하정보만을 이용하여 델로니 삼각망 구성 과정을 통해 얻어진 삼각망에 대상 삼각형의 최장변이 일정 기준 값을 초과하였을 경우 그 변을 제거해 나가는 방법인 확장 카이 알고리즘을 제안하였다.

Lee and Kim(2012)은 항공 LiDAR 데이터를 이용하여 오목한 부분이 포함된 건물의 곡선 경계점을 추출하기 위하여 사용하는 국지적 컨벡스힐 알고리즘을 수정한 적응적 컨벡스힐 알고리즘과 큰 반경의 국지적 컨벡스힐 알고리즘을 적용하여 경계점을 추출하였다.

따라서 본 연구에서는 다수의 연구에서 문제점으로 인식되고 있는 LiDAR 데이터를 이용한 선형 객체 추출의 자동화 및 복잡한 지역에서의 선형 객체 추출방법을 연구하고자 한다. 특히 고밀도의 LiDAR 데이터와 이미지 프로세싱 분야에서 객체의 자동추출에 사용되는 RANSAC 알고리즘을 이용하여 철도 전력선을 자동 탐지하는 방안을 연구하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 고밀도 LiDAR데이터와 RANSAC 알고리즘을 이용하여 철도 전력선을 자동으로 탐지하고 모델링하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

선형시설물을 자동 추출하기 위하여 전 연구대상지역을 스스로 탐색하여 선형객체를 탐지하는 탐색 직육면체를 설계하였고, 각 점의 이웃점을 먼저 정의하여 선형 추적에 대한 프로세싱 시간을 대폭 줄였다.

Fig. 1은 본 연구의 철도 전력선 탐지 및 모델링 과정을 나타내고 있다.

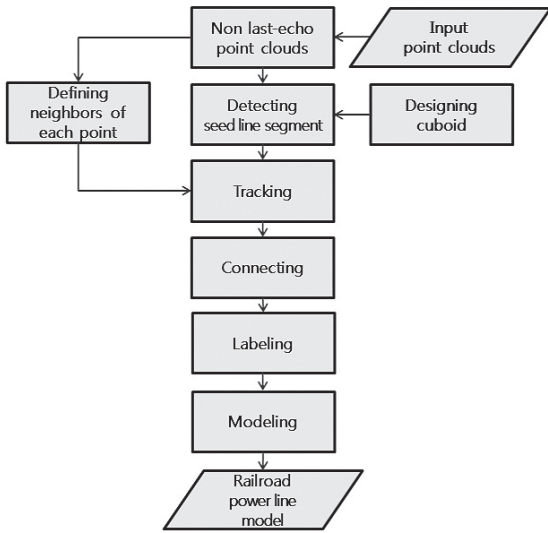


Fig. 1. Process of detecting and modeling railroad power line

LiDAR 데이터를 이용하여 철도 전력선을 탐지하기 위해서 우선 지상으로부터 전력선의 높이, 전력선의 길이 등과 같은 사전 자료를 수집한다. 또한 철도 전력선과 지표면, 초목 등에 대한 LiDAR 데이터의 다중반사 특성을 분석한다. 일반적으로 전력선의 가늘고 긴 형상 때문에 Last-echo는 전력선에 대한 점군이 될 수 없다. 따라서 데이터 용량의 90%이상을 차지하는 Last-echo 점군을 모두 제거한다.

Last-echo 점군이 제거된 자료로부터 각 점의 이웃 점들을 정의한 후 작업을 시작한다. 먼저 철도 전력선이 지표면으로부터 위치하는 일정한 구역을 포함하는 직육면체를 설계하여 최초 라인 세그먼트를 탐색하는데 사용한다. 탐지된 최초 라인 세그먼트를 시발점으로 하나의 라인을 추적하고 각각의 라인을 연결하여 고유의 색인을 부여한다. 이렇게 탐지된 점군

을 이용하여 모델링을 수행한다. 모델링을 위한 과정은 우선 탐지된 점군에 RANSAC을 적용하여 군집화 한 후, 최소제곱법을 적용하여 과대오차를 가진 점군을 제거한다. 제거 후 남은 점군을 이용하여 라인 파라미터를 구하고 라인 간의 교차점을 계산하여 최종적으로 연결한다.

전력선과 같이 아주 가는 객체는 검증 데이터를 구하기가 매우 어렵기 때문에 정확도 평가가 힘들다. 따라서 원시 데이터와 탐지된 데이터와의 비교에 의한 육안검수와 각 라인에 포함된 점군의 표준편차를 분석하여 자동탐지결과를 검증하고자 한다.

### 2.1 Last-echo 점군 제거

현재의 LiDAR 시스템은 하나의 레이저 펄스에서 여러 개의 echoes를 구분하여 제공할 수 있다. 몇몇의 장비는 최대 6개의 echoes를 기록할 수 있고 몇 번째 echo를 사용할지 선택할 수 있는 스위치를 가진 것도 있다(Thiel and Wehr, 2004).

레이저 스캐닝 데이터를 사용함에 있어 하나의 큰 문제는 레이저 점군의 용량이 너무 크다는 것이다. 일반적인 개인용 컴퓨터나 소프트웨어는 이러한 큰 데이터를 처리하는데 한계를 가지고 있다.

일반적으로 전력선은 지면에서 떨어져 있고 레이저 footprint 보다 아주 가늘기 때문에 Last-echo 점군이 될 수 없다. 아래의 Fig. 2는 철도전력선에 대해서 예상되는 레이저 파동의 다중반사 특성을 나타낸다. 철도전력선의 경우는 마운팅 와이어가 있어서 전력선을 수평으로 유지시켜준다는 점이 일반적인 전력선과 다르다.

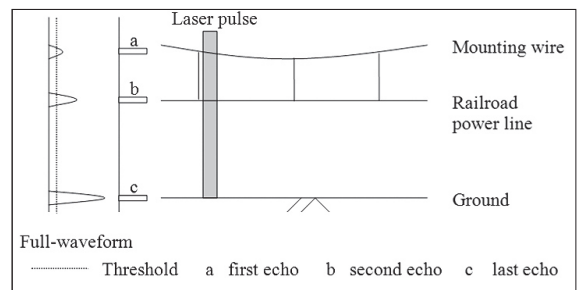


Fig. 2. Expected multi-echo property on railroad wires

### 2.2 최초 라인 세그먼트의 탐색

본 연구에서는 철도 전력선을 자동으로 탐색하기 위하여 3가지 조건에 의해 선형 객체를 자동으로 탐지할 수 있는 기능이 포함된 움직이는 직육면체를 설계, 적용하였다. 철도 전력선의 모양과 위치에 대한 정보를 수집하고 이를 바탕으로 직

육면체의 탐색공간과 크기를 결정한다. 설계된 직육면체는 전체 연구 지역을 탐색하다가 전력선으로 판단되는 객체가 탐지되면 전력선 추적을 위한 최초 라인 세그먼트로 결정하는 역할을 하게 된다. 전력선의 지표면으로부터 높이는 약 6m이며, 마운팅 와이어는 철도 전력선의 1~3m 위에 위치되어 있다. 탐색 직육면체의 크기와 철도 전력선의 위치 정보는 Fig. 3과 같다.

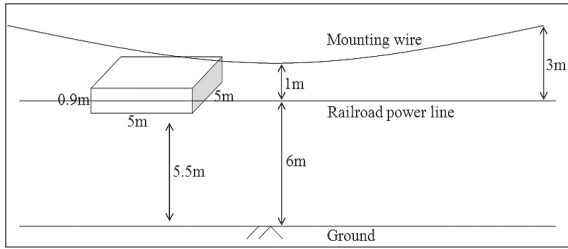


Fig. 3. Position of cuboid and railroad wires

최초 라인 세그먼트가 되기 위해서는 직육면체 안의 점군이 3가지 조건을 만족하여야 한다. 첫 번째 조건은 가장 높은 점과 가장 낮은 점의 높이차가 거의 없어야 한다는 것이며, 이 조건은 초목으로부터 전력선을 구분하기 위함이다. 두 번째는 직육면체 안의 점군이 선형으로 생각할 수 있을 정도의 개수를 가져야 한다. 점군의 개수가 적으면 라인을 형성할 수 없고, 너무 많으면 건물의 지붕 등으로 판단할 수 있다. 세 번째 조건은 RANSAC을 적용하였을 때, 직선으로 인식될 수 있는 합치점(Inlier)의 개수가 충분하여야 한다는 것이다. 위의 3가지 조건을 만족하면 최초 라인 세그먼트로 결정하고 전력선을 추적한다.

### 2.3 전력선의 추적

전력선을 추적하려면 라인 세그먼트의 연장선과 주위 점들 간의 거리를 계산하여야 한다. 그러나 전체 점군의 개수가 너무 많기 때문에 이 모든 점군과 라인과의 거리를 일일이 계산하는 것은 시간적인 측면에서 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 전력선 추적의 효율을 높이기 위하여 각 점의 이웃 점들을 미리 결정하고 이웃 점들만을 고려하여 라인으로부터의 거리 계산하여 프로세싱 시간을 대폭 줄였다.

본 연구에서는 K-Nearest Neighbor(KNN)방법을 이용하여 이웃 점을 선택한다.

탐지된 최초 라인 세그먼트를 시작점으로 연결된 전체 전력선을 추적하는 프로세스는 아래와 같다.

- ① 최소 제곱법을 이용하여 라인 세그먼트 점군의 3D 직선

파라미터를 계산한다.

- ② 라인 세그먼트의 끝점을 찾는다.
- ③ 끝점의 이웃 점을 선택한다.
- ④ 라인 세그먼트 연장선과 ③의 이웃 점간의 거리를 계산한다.
- ⑤ ④에서 계산된 거리를 이용하여 라인 세그먼트에서 일정한 거리 이내에 존재하는 이웃 점을 선택한다.
- ⑥ ①에서 ⑤를 반복한다.

철도 전력선에 대한 3D 직선 파라미터는 선택된 점군을 이용하여 최소제곱법으로 구한다.

점  $P1=(x_1, y_1, z_1)$ 과 점  $P2=(x_2, y_2, z_2)$  그리고 점  $P=(x, y, z)$  가 3D 공간에서 하나의 직선에 놓여있다고 가정하면 아래의 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} x - x_1 &= t(x_2 - x_1); y - y_1 = t(y_2 - y_1); \\ z - z_1 &= t(z_2 - z_1) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $t=|PP1|/|P1P2|$ 이고 이 식은 아래와 같이 바뀔 수 있다.

$$\frac{x - x_1}{a} = \frac{y - y_1}{b} = \frac{z - z_1}{c}, (a, b, c) \neq 0 \quad (2)$$

a, b, c는 3D 직선의 방향 코사인을 나타낸다(Agterberg, 1974).

방향 벡터를 구하기 위해서는  $x_1, y_1, z_1$ 에서 전체 점군의 평균값( $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ )을 각각 빼고 아래와 같은 매트릭스를 형성한다.

$$A = \begin{pmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} & z_1 - \bar{z} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} & z_2 - \bar{z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} & z_n - \bar{z} \end{pmatrix} \quad (3)$$

매트릭스 A를 이용하여 Singular Vector Decomposition(SVD)방법을 이용하면 3D 직선의 방향벡터를 구할 수 있다.

이러한 추적은 전력선의 양쪽 방향으로 이루어지며 추적에서 선택된 점군은 색인 후 모두 지워지고, 탐색 직육면체는 라인으로 판단되는 점군이 없을 때까지 그 지점에서 움직이지 않고 다른 라인 탐색을 계속 시도한다.

### 2.4 전력선 연결과 색인

레이저 스캐닝 데이터는 용량이 매우 크기 때문에 최초 입력 데이터는 61개의 타일로 분리되어 있고, 하나의 타일 안에



서도 공백이 있을 수 있기 때문에 조각난 라인을 하나의 라인으로 만들기 위한 연결 작업이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 라인을 연결하기 위한 3가지 조건을 제시하고자 한다. 첫 번째 조건은 후속 라인의 시작점이 선행 라인의 끝점에 가까이 있어야 한다는 것이고, 두 번째는 후속 라인의 끝점이 선행 라인의 진행방향 선상에 있어야 하며, 세 번째 조건은 후속 라인의 방향이 선행 라인의 방향과 유사하여야 한다는 것이다. 연결을 위한 조건은 Fig. 4에 나타내었다.

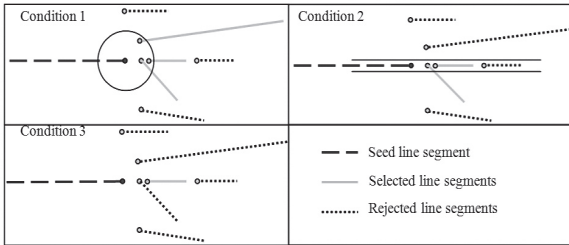


Fig. 4. Connecting conditions

- Condition 1: Distance limitation of points will be connected
- Condition 2: Restriction of location of points will be connected
- Condition 3: Checking the direction similarity of lines will be connected

이렇게 연결된 각각의 전력선 점군에는 고유의 색인을 부여한다. 이는 모델링 과정에서 RANSAC 알고리즘이 여러 개의 라인을 가로질러 적용되지 않고 오직 같은 색인의 점군만을 대상으로 수행될 수 있도록 하기 위함이다.

### 2.5 RANSAC 알고리즘 적용

탐지된 점군으로부터 RANSAC 알고리즘을 이용하여 철도 전력선의 모델링을 수행한다. 모델링은 탐지된 점군의 입력, 군집화를 위한 RANSAC 알고리즘 적용, 라인 파라미터를 구하기 위한 최소제곱법 적용, 2D 평면에서의 교차점 계산, 3D 연결을 위한 파라미터 조정 등으로 이루어진다.

탐지과정에서 각각의 철도 전력선에 대한 점군은 여러 개의 연속된 직선으로 이루어져 있기 때문에 반복 RANSAC 알고리즘을 적용한다.

직선에 대한 RANSAC 알고리즘의 절차는 다음과 같다 (Hartley and Zisserman, 2003).

- ① 전체 데이터 점군에서 두 점을 무작위로 샘플링한다.
- ② ①의 두 점을 이용하여 라인 모델식을 만든다.

- ③ ②의 라인 모델과의 거리가 임계치(Threshold) 이내의 점들(Inliers)을 선택한다.
- ④ 만약 Inliers의 개수가 미리 정해진 수치 T보다 크면 Inliers만을 가지고 다시 라인 모델식을 만들고 종료한다.
- ⑤ 만약 Inliers의 개수가 T보다 작으면 위의 과정을 다시 반복한다.
- ⑥ N번의 시도 후에 가장 많은 Inliers를 가진 모델식을 선택하고 합치셋으로 정한다.

RANSAC 알고리즘을 적용할 때에는 몇 개의 파라미터를 고려하여야 하는데, 첫 번째는 모델식을 수립하는 데 필요한 최소한의 점수(n), 두 번째는 요구되는 반복횟수(k), 세 번째는 모델로부터의 거리 임계치(t)이다(Forsyth and Ponce, 2003). 파라미터 중 n과 t는 모델과 데이터셋에 따라 다르지만 k를 결정하기 위해서는 무작위로 샘플링한 점 중 적어도 하나는 Outliers에서 자유로울 확률을 계산하여야 한다.

$$1-p = (1-w^n)^k, k = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^n)} \quad (4)$$

여기서, w=Inliers 개수 / 전체 점의 개수이며, p는 RANSAC 이 최고의 모델을 발견할 확률 즉, 오로지 Inliers만을 선택할 확률을 의미한다.

반복 RANSAC은 앞의 과정에서 합치셋으로 결정된 Inliers를 지우고 다시 RANSAC 프로세스를 진행하여 한 공간에서 한 개 이상의 직선 객체가 있을 경우 사용하는 방법이다.

### 2.6 라인 파라미터 결정 및 연결

라인 파라미터는 2.5절에서 구해진 합치셋을 이용하여 구할 수 있지만, 정확한 모델식을 구하기 위하여 과대오차 점을 소거한 후 모델식을 재계산하여야 할 필요가 있다. 따라서 각각의 직선 파라미터를 최소제곱법을 이용하여 구한 후, 잔차가 많은 점들을 제거하고 최종적으로 직선 파라미터를 다시 구한다.

라인을 연결하기 위해서는 인접한 두 직선의 교차점을 계산하여야 한다. 그러나 아무리 정확하게 레이저 스캐닝 데이터를 획득하였어도 3D 공간에서 두 직선모델식이 정확하게 한 점에서 교차하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 교차점은 2D x-y 평면에서 계산하고 z 방향으로 조정한다.

3D 직선 라인을 정의하는 방법은 2가지가 있다. 첫 번째는 직선에 놓인 두 개의 점(x1, y1, z1, x2, y2, z2)을 지정하는 것

이고, 두 번째는 하나의 점과 방향 벡터(x1, y1, z1, dx, dy, dz)를 지정하는 것이다. 2가지 방법 모두 6개의 파라미터로 나타낼 수 있지만 본 연구에서는 연결과 모델링의 편의를 위하여 직선의 시작점과 끝점 그리고 방향 벡터를 합하여 총 9개의 파라미터를 사용하였다.

### 3. 철도 전력선 자동 탐지 실험 및 분석

#### 3.1 실험 대상지역 선정 및 데이터 처리

철도 전력선과 같이 아주 가는 선형 객체를 정확하게 탐지하기 위해서는 고밀도의 LiDAR 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 1m<sup>2</sup>당 25점의 점밀도를 가진 고밀도의 레이저 데이터를 사용하였다.

본 연구의 대상 지역은 네덜란드의 동쪽 끝에 위치한 엔스헤데 기차역 주변으로 면적은 길이 650m에 폭 50m 정도로 한 단면에 최대 13개의 철도 전력선이 있는 복잡한 지역이다.

LiDAR 데이터는 Fugro-Inpark사의 FLI-MAP 400시스템을 이용하여 획득하였으며, 헬리콥터에 탑재되어 초당 150,000~250,000의 펄스를 주사하고, 4-echoes까지 기록이 가능하다. 대상지역에 획득된 점은 1.6×10<sup>6</sup>개 이며, 가로, 세로가 각각 25m인 61개의 타일로 이루어져 있다. 다음 Fig. 5는 대상지역의 LiDAR 데이터를 나타내고 있다.

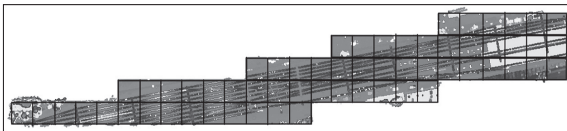


Fig. 5. Original point clouds classified with height (pink : low, green : middle, blue : high)

#### 3.2 실험 및 분석

철도 전력선에 대한 레이저 점군은 수평면과 수직면상의 분포상태가 다르다. 이는 레이저 footprint의 크기가 전력선의 직경보다 더 크므로 footprint의 가장자리에 위치한 전력선에서 반사된 echo도 LiDAR시스템에서는 footprint의 중심으로 계산하기 때문이다. 따라서 철도 전력선의 단면이 원형이라고 하여 레이저 점군의 분포도 원형으로 가정하고 실험을 수행하면 문제가 발생할 수 있다. 실험과정에서 사용되는 모든 파라미터는 이러한 점을 고려하여 결정하였다. Fig. 6은 철도 전력선 점군의 수평, 수직면상의 분포상태를 나타내고 있으며, 수평면상의 점군 분포가 수직면보다 서로간의 이격이 큼을 알 수 있다.

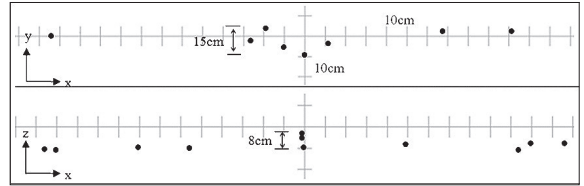


Fig. 6. Local points distribution of railroad power line

최초 라인 세그먼트 탐색을 위한 직육면체 설계는 철도 전력선이 지표면으로부터 위치한 높이와 철도 전력선과 마운팅 와이어와의 간격, 평방미터 당 철도 전력선 점군의 개수 등을 고려하여 설계하였다. 레이저 점군 자체가 전 지역에 걸쳐 일정하게 분포된 것이 아니기 때문에 모든 경우를 만족하는 직육면체 설계와 파라미터는 있을 수 없지만 탐색 직육면체가 최초 라인 세그먼트 탐지에 일부 실패하여도 라인 추적과정에서 누락된 부분의 처리가 가능하므로 평균적인 값들을 이용하여 설계하였다.

Fig. 7은 전력선 추적을 하지 않고 최초 라인 세그먼트 탐색만을 수행하였을 경우에 탐지된 철도 전력선의 레이저 점군을 나타낸다. Fig. 8과 비교하면 많은 공백이 보이지만 최초 라인 세그먼트 탐색만을 가지고도 상당수의 전력선을 탐지할 수 있음을 알 수 있었다.

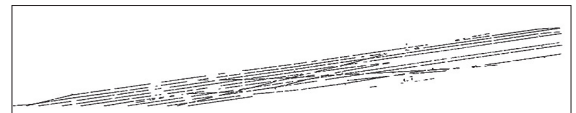


Fig. 7. Point clouds after detecting seed line segment (without tracking)

철도 전력선 추적을 위해서는 최초 라인 세그먼트 또는 선형 라인 세그먼트의 연장선과 라인 세그먼트 끝점의 이웃 점과의 이격거리를 계산하여 라인에 포함시킬 점과 배제할 점을 구분하여야 한다. Fig. 6에서 보면 전력선에 대한 점군의 x-y 평면상의 분포 너비는 15cm 정도이고, 라인 선형식은 최소제곱법을 이용하여 구하므로 이격거리 임계치는 점군 분포 너비의 반 정도인 8cm가 이론적으로 적절할 것으로 보이나 레이저 점군의 불규칙한 배치상태이기 때문에 이보다 2배 정도 큰 값을 주어야 좋은 결과가 나타남을 알 수 있었다.

원시자료가 타일로 구성되어 있고, 레이저 점군에도 공백이 있으므로 추적 후 연결을 수행하여야 한다. 연결은 두 번에 걸쳐서 수행하는데 두 번째 연결은 Fig. 4와 같은 라인 연결 조건에 대하여 첫 번째보다 더 큰 값을 부여하였다. 전력선 연결

전에 총 라인 세그먼트는 266개의 조각이었으나 첫 번째와 두 번째 연결 후에는 각각 24개와 15개로 줄어들었다.

다음 Fig. 8은 철도 전력선에 대한 탐지 결과를 나타낸다. 15개의 철도 전력선은 모두 고유의 번호로 색인되어 있다.

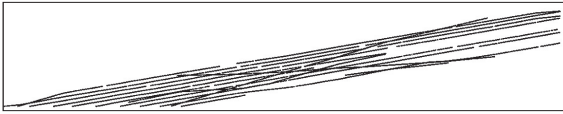


Fig. 8. Result of detecting railroad power lines

Fig. 9는 철도 전력선을 모델링한 결과를 나타내고 있다. 모델링은 위에서 탐지된 점군을 색인별로 분리하여 수행하였으며, 같은 색인을 가진 하나의 연결된 라인에 직선이 여러 개가 존재하므로 56개의 직선 모델로 구성된다. Fig. 8에서 탐지된 점군과 비교하였을 때 모든 라인 빠짐없이 모델링된 것을 알 수 있었다.

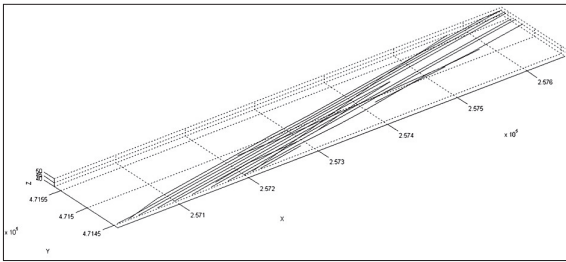


Fig. 9. Result of modeling railroad power lines

### 3.3 탐지 결과의 신뢰성 평가

철도 전력선에 대한 지상 정밀측량 데이터를 구하기 어려우므로 최종 평가는 육안검수에 의한 완성도 평가와 각 라인에 대한 점군의 표준편차를 구하여 수행하였다. 수작업으로 분

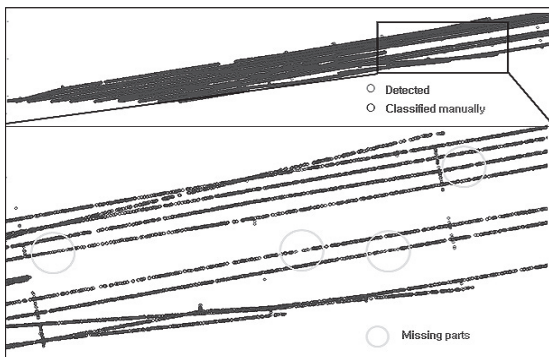


Fig. 10. Visual comparison between detected and manually classified points of railroad power lines

리한 철도 전력선에 대한 점군과 본 연구에서 개발한 방법에 의해 탐지된 점군을 중첩하여 확인한 결과, 약간의 누락된 점군이 발견되었지만 모델링에 영향을 주지 않을 정도의 수였다. Fig. 10은 수작업으로 분류한 철도 전력선의 레이저 점군과 자동 탐지된 레이저 점군을 비교한 것이다.

Fig. 10에서 전력선을 가로지르는 선형은 철도 전력선을 받쳐주는 보이며, Fig. 10의 하단은 전력선 탐지에서 누락된 부분이 많은 곳을 확대한 모습을 나타내고 있다. 누락이 발생하는 이유는 전력선 추적과정에서 소수의 점만을 사용하여 라인의 방향을 결정함으로써 국부적으로 추적의 방향이 라인을 벗어나는 경우가 있기 때문으로 판단된다.

전력선과 같이 가늘고 긴 객체의 경우는 레이저 펄스의 footprint 크기가 수직보다는 수평 정밀도에 영향을 더 미치기 때문에 수평, 수직의 정밀도를 분리해서 계산하는 것이 타당하다.

철도 전력선에 대한 각 라인별 점군의 수평과 수직으로 분리한 표준편차는 Table 1과 같다.

Table 1. Standard deviation of railroad power lines

No.	# pts	Standard deviation (m)	
		x-y coord.	z coord.
1	618	0.08	0.08
2	243	0.05	0.09
:	:	:	:
24	105	0.05	0.03
25	85	0.04	0.02
26	51	0.04	0.06
27	48	0.05	0.03
28	45	0.04	0.02
29	604	0.07	0.03
30	474	0.19	0.03
31	368	0.21	0.04
:	:	:	:
55	51	0.03	0.02
56	246	0.04	0.08
평균		0.08	0.05

Fig. 11는 철도 전력선이 일반적인 전력선과 비슷하게 현수 곡선(catenary curve)을 이루고 있는 모습이다. 철도 전력선의 경우에는 마운팅 와이어에 의하여 전력선이 직선을 이루고 있는 점이 일반적인 전력선과 다른 점이나 일부 철도 전력선의 경우 전력선 자체의 하중과 기차 접촉면과의 지속적인 마찰로 인하여 처짐현상이 발생한 것으로 판단된다. 그러나 하나의 철도 전력선 길이가 70m 정도이고 처짐의 크기는 30cm 정도여서 현장에서 육안으로 식별하는 것은 힘들 것으로 보인다.

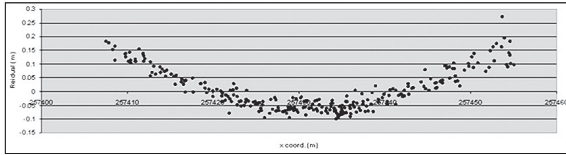


Fig. 11. Sag of a railroad power line

#### 4. 결론

본 연구의 목적은 고밀도 LiDAR 데이터와 RANSAC 알고리즘을 이용하여 철도 전력선을 자동으로 탐지하고 모델링하는 방법을 연구하는 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 고밀도 LiDAR 데이터와 RANSAC 알고리즘을 이용하면 다수의 객체가 복잡하게 설치되어 있는 지역이라 할지라도 자동으로 정확하게 철도 전력선을 탐지할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 RANSAC 알고리즘의 경우는 주로 이미지 프로세싱에 사용되는 기술로써 LiDAR 데이터에도 적용하여 철도 전력선과 같은 선형객체 추출에도 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

둘째, 철도 전력선의 경우에는 접근성과 형태적 특성 때문에 지상측량으로 데이터를 구하는 것이 거의 불가능하여 정확도검증을 위한 검측 자료를 얻기가 매우 어렵지만 육안 검사에 의한 완성도면에서 보면, 원 데이터와 비교할 때 모든 전력선이 탐지되고 모델링된 것을 알 수 있었고, 전력선 점군에 대한 표준편차도 수평 8cm, 수직 5cm로 양호한 결과를 얻었다.

본 연구에서 개발한 철도 전력선 탐지 및 모델링 방법을 이용하여 철도 전력선의 치짐 등 선형의 이상을 주기적으로 모니터링 한다면 사고예방 등 철도시설물 관리에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시하는 선형 추적 방법 등은 철도 전력선뿐만 아니라 어떤 종류의 선형객체에도 응용될 수 있으며, 모든 프로세스는 한 번의 초기 클릭으로 자동 수행될 수 있도록 프로그래밍하여 향후 자동화 소프트웨어 개발에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문을 쓰는데 많은 조언과 지도를 아끼지 않으신 Vosselman 교수께 감사드립니다.

#### References

Agterberg, F. P. (1974), *Geomathematics: Mathematical background and geo-science applications*, Elsevier Scientific Pub. Co., 612p.

Baltsavias, E. P. (1999), A comparison between photogrammetry and laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), pp. 83-94.

Barbu, G. (2008), GEORAIL - Overall needs and requirements for a coordinate-based description of the rail system, *GEORAIL*, Paris, France, [http://www.uic.asso.fr/reunion.php/20874/2\\_georail\\_overall\\_needs\\_and\\_requirements.pdf](http://www.uic.asso.fr/reunion.php/20874/2_georail_overall_needs_and_requirements.pdf)(last date accessed: 20 December 2008).

Brenner, C. (2005), Building reconstruction from images and laser scanning, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3-4), pp. 187-198.

Cho, H and Lee, K and Choi, H and Cho, W and Cho, Y. (2013), Extracting Building Boundary from Aerial LiDAR Points Data Using Extended  $\chi$  Algorithm, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 2, pp. 111-119. (in Korean with English abstract)

Forsyth, D. A. and Ponce, J. (2003), *Computer vision : a modern approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 792p.

Hartley, R. and Zisserman, A. (2003), *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge University, 668p.

Jeon, W. G. (2009), *Extraction of railroad wires from high density laser scanning data*, Master's thesis, ITC, Enschede, Netherlands, 89p.

Lee, J and Kim, Y (2012), Extraction and Modeling of Curved Building Boundaries from Airborne Lidar Data, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 20, No. 4, pp. 117-125. (in Korean with English abstract)

Melzer, T. and Briese, C. (2004), Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds, *Proceeding of 28th OAGM Workshop*, Austrian Association for Pattern Recognition, Osterreichische Computer Gesellschaft, Hagenberg, Austria, 17-18 April, pp. 47-54.



- Neubert, S., Hecht, R., Gedrange, C., Trommler, M., Herold, H., Kruger, T. and Brimmer, F. (2008), Extraction of railroad objects from very high resolution helicopter-borne lidar and ortho-image data, ISPRS WG IV/4 Landscape Modeling and Visualization, *GEographic Object Based Image Analysis for the 21st Century: GEOBIA*, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 38, part 4/C1, 05-08 August, unpaginated CD-ROM.
- Thiel, K. H. and Wehr, A. (2004), Performance capabilities of laser scanners-an overview and measurement principle analysis-, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 36, pp. 14-18.
- Ussyshkin, R. V. and Smith, R. B. (2007), A new approach for assessing LIDAR data accuracy for corridor mapping applications. Interdepartment Research Center for Geomatics: CIRGEO, *The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology: MMT'07*, 29-31 May, Padua, Italy, unpaginated CD-ROM.

---

(Received 2013. 04. 01, Revised 2013. 04. 06, Accepted 2013. 08. 30)