

LiDAR 데이터의 3D Hough 변환을 이용한 건물 지붕 평면의 세그멘테이션 및 정밀 평면방정식 추출

The Segmentation and the Extraction of Precise Plane Equation of Building Roof Plane using 3D Hough Transformation of LiDAR Data

이영진¹⁾ · 오재홍²⁾ · 신성웅³⁾ · 조우석⁴⁾

Lee, Young Jin · Oh, Jae Hong · Shin, Sung Woong · Cho, Woo Sug

Abstract

The 3D Hough transformation is the one of the most powerful and popular algorithm for extracting plane parameters from LiDAR data. However, there are some problems when extracting building roof plane using 3D Hough transformation. This paper explains possible problems and solution for extracting roof plane. The algorithm defines peak plane, exact plane, and LESS plane for extracting accurate plane parameters in the accumulator of the 3D Hough transformation. The peak plane is the plane which is represented by peak in the accumulator. The exact plane is the plane which is represented by the accumulator cell which is closest to the actual plane. The LESS plane can be calculated from all LiDAR points in the exact plane by using least-square adjustment. Test results show that proposed algorithm can extract building roof plane very accurately.

Keywords : 3D Hough transformation, Building model, LiDAR

초 록

LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 건물 지붕의 평면을 추출할 경우, 추출하고자 하는 평면에 포함되지 않는 LiDAR 점 데이터로 인하여 잘못된 평면이 추출될 수 있다는 문제점과, 누적배열에서 최대값을 갖는 누적배열인자가 여러 개 발생할 수 있다는 문제점이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 최다평면(peak plane), 정확평면(exact plane), 최확평면(LESS plane)을 정의하고 이를 이용하여 위의 문제점들을 해결하는 방법을 제안하였다. 또한, 위의 문제점이 발생할 수 있는 데이터를 제작하여 본 논문에서 제안한 알고리즘을 테스트하였다.

핵심어 : 3D Hough 변환, 건물모델링, LiDAR

1. 서 론

본 논문은 LiDAR 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 건물지붕 평면의 평면방정식을 추출하는 것을 그 목적으로 한다. 이를 위하여, 3D Hough 변환을 이용하여 평면을 추출하는 경우에 발생할 수 있는 문제점을 분석하

고, 발견된 문제점을 해결할 수 있는 방법을 제안한다.

LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 평면을 추출하는 연구는 다음과 같다. Vosselman과 Dijkman (2001)은 LiDAR 점 데이터를 이용하여 건물모델을 제작하기 위해서 건물의 도면(ground plane)으로 LiDAR 점 데이터를 분리한 다음, 3D Hough 변환을 적용하였다.

1) 오하이오 주립대학교 Geodetic Science & Surveying 박사과정(E-mail:lee.3043@osu.edu)

2) 오하이오 주립대학교 Geodetic Science & Surveying 박사과정(E-mail:oh.174@osu.edu)

3) 연결저자 · 정회원 · 한국전자통신연구원 공간정보연구팀 선임연구원(E-mail:sshin@etri.re.kr)

4) 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수(E-mail:wcho@inha.ac.kr)

Hofmann 등(2003)은 건물 평면을 추출하기 위해서, LiDAR 점 데이터로 TIN을 제작한 다음 TIN의 각 삼각형의 기울기와 방향을 매개변수로 이용한 2D Hough 변환과, 평면의 세 개의 매개변수를 이용한 3D Hough 변환을 비교하였다. Tarsha-Kurdi 등(2007)은 LiDAR 점 데이터에서 건물 지붕의 평면을 추출하기 위한 방법으로 3D Hough 변환과 RANSAC 알고리즘을 비교하였다. Lohani와 Singh(2007)는 LiDAR 점 데이터에 3D Hough 변환을 적용하여 건물 지붕의 평면을 추출하였으며, Novacheva(2007)은 3D Hough 변환에서 과대오차 제거 및 connectivity 정보를 이용하여 건물의 모델을 제작하였다.

LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 평면을 추출할 시, 실제 평면에 포함되지 않는 LiDAR 점 데이터로 인하여 잘못된 평면이 추출되는 경우가 있다. 또한, 누적배열의 최대값이 실제 평면을 나타내지 못하는 경우도 있다. 본 논문에서는 LiDAR 점 데이터를 이용하여 정확한 건물평면을 추출하기 위한 방법을 제안한다.

2. 기본이론

2.1 Hough 변환

Hough 변환은 영상에서 직선이나 타원을 추출할 수 있는 알고리즘으로 Hough(1962)에 의해 제안되었다. Hough

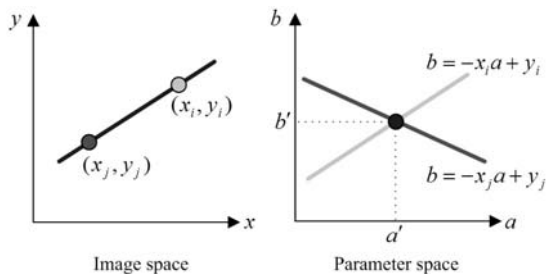


그림 1. 2D Hough 변환을 이용한 직선 추출의 원리

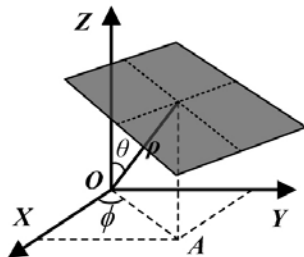


그림 2. 3D Hough 변환을 위한 평면의 표현

변환은 추출하고자 하는 기하학적 형태를 매개변수화 하여 매개변수 공간(parameter space)에서 그 기하학적 형태를 추출하는 것을 그 원리로 한다(Gonzalez 등, 2002).

2.1.1 2D Hough 변환(직선 추출)

영상과 같은 이차원 xy -평면 위의 직선은 식 $y = a'x + b'$ 로 나타낼 수 있다(그림 1). xy -평면 상의 이 직선은 ab -평면에서 하나의 점 (a', b') 로 표현된다. 이와 같이, xy -평면 위의 하나의 점 (x_i, y_i) 은 ab -평면에서 직선 $b = -x_i a + y_i$ 로 나타낼 수 있다.

이진영상에서 직선을 추출하기 위해서는 다음과 같은 원리가 사용된다. 이진영상에서 값을 가지는 모든 n 개의 픽셀에 대해서 Hough 변환을 적용하면, ab -평면에 n 개의 직선이 생성된다. 이 매개변수(ab) 평면 위의 직선의 교차점의 좌표가 이진영상에서의 직선의 매개변수를 나타낸다. 만약, 매개변수 평면에서 m 개의 직선이 교차된 지점의 좌표가 (a_i, b_i) 이면, 이진영상에서 직선 $y = a_i x + b_i$ 상에 값을 가지는 픽셀이 m 개 있다는 것이다. 일반적으로 영상에서 직선을 추출하기 위해서는 식 (1)을 이용한다.

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ 는 xy -평면의 원점에서부터 직선까지의 수직거리, θ 는 x 축으로부터 반 시계방향으로 x 축과 수직거리 사이의 각, x 와 y 는 영상에서 값을 가지는 픽셀의 좌표를 나타낸다.

2.1.2 3D Hough 변환(평면 추출)

삼차원 공간에서 평면은 3D Hough 변환을 이용하여 추출할 수 있다. 예를 들어, XYZ -공간에서의 평면은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 ρ 는 XYZ -공간의 원점에서부터 평면까지의 수직거리, ϕ 는 X 축으로부터 반 시계방향으로 X 축과 수직거리를 XY -평면으로 투영한 직선(\overline{OA}) 사이의 각, θ 는 X 축과 수직거리 사이의 각 x, y, z 는 XYZ -공간에서 데이터의 좌표를 나타낸다(그림 2).

$$\rho = x \cos \phi \sin \theta + y \sin \phi \sin \theta + z \cos \theta \quad (2)$$

LiDAR 점 데이터와 같이 삼차원 공간에 분포된 점을 이용하는 경우, 평면을 추출하기 위한 방법은 다음과 같



그림 3. 영상에서 직선추출을 위한 이차원 누적배열 (accumulator)의 예

다. 모든 LiDAR 점 데이터의 좌표(x, y, z)에 대하여 θ 와 ρ 를 변화시키면서 ρ 를 계산한다. 여기서, 평면 추출을 위한 매개변수 공간은 삼차원 $\theta\phi\rho$ -공간이 된다. n 개의 LiDAR 점 데이터에 대하여 Hough 변환을 적용하면 매개변수 공간에는 n 개의 곡면이 생성된다. 만약, 매개변수 공간의 좌표 (θ, ϕ, ρ)에서 m 개의 곡면이 교차된다면, 이 좌표 (θ, ϕ, ρ)로 표현되는 평면은 m 개의 LiDAR 점 데이터로 이루어졌다는 것이다. 그러므로, 매개변수 공간에서 최대교차점의 좌표를 찾는다면 가장 많은 수의 LiDAR 점 데이터로 이루어진 평면을 추출할 수 있다.

2.1.3 매개변수 공간의 구현

Hough 변환을 이용한 기하학적 형태의 추출은 매개변수 공간에서 이루어진다. 이 매개변수 공간은 누적배열 (accumulator)의 형태로 구현할 수 있다. 이진영상에서 직선을 추출하는 경우, 누적배열은 ρ 축과 θ 축을 가지는 그림 3과 같은 이차원 배열이다. 이 누적배열의 해상도에 ($\Delta\rho, \Delta\theta$)따라서 누적배열의 크기와 추출할 수 있는 직선의 정밀도가 달라진다. 만약, $\Delta\rho = 1\text{m}$, $\Delta\theta = 1^\circ$ 라면, 1m 와 1° 의 정밀도로 직선의 추출이 가능하다. 이 누적배열에서 최대값(peak)을 가지는 누적배열인자(accumulator cell)의 좌표 (ρ, θ)가 영상에서 가장 많은 수의 값을 가지는 픽셀로 이루어진 직선을 나타낸다. LiDAR 점 데이터에서 평면을 추출하는 경우에는 누적배열은 삼차원 배열이 된다.

2.2 평면의 최소제곱조정(LESS)

LiDAR 점 데이터와 같은 삼차원 좌표를 이용하여 평면의 매개변수를 구하고자 할 때 적용할 수 있는 최소제곱조정 방법은 다음과 같다.

$$y = A\xi + e, \quad e \sim (0, \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (3)$$

식 (3)에서, y 는 $n \times 1$ 관측 벡터, A 는 $n \times m$ 계수행렬, ξ 는 $m \times 1$ 미지수 벡터, e 는 $n \times 1$ 랜덤에러 벡터이다. e 는 식 (4)와 같은 특성을 갖는다.

$$E\{e\} = 0, \quad D\{e\} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (4)$$

식 (4)에서, σ_0^2 는 variance component, P 는 $n \times n$ 크기를 갖는 가중행렬이다. 가중최소제곱조정은 식 (5)와 같다.

$$E\{e\} = 0, \quad D\{e\} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (5)$$

위 식 (5)는 다음 식 (6)와 같은 조건에서 유일해를 갖는다(Schaffrin 등, 2006).

$$rk N = rk A = m \leq n \quad (6)$$

잔차벡터와 variance component는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{e} = y - A\hat{\xi}, \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{e}^T P \tilde{e}}{n - m} \quad (7)$$

위 방법을 이용하여 평면의 최소제곱조정 해는 다음과 같이 구할 수 있다. 일반적인 평면방정식은 식 (8)과 같다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (8)$$

위 식은 다음 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$z = Ax + By + D \quad (9)$$

여기서, $A = -a/c$, $B = -b/c$, $D = -d/c$ 이다.

그러므로, 평면방정식의 매개변수를 구하기 위한 최소제곱조정에 사용되는 행렬을 식 (10)과 같다.

$$y = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \quad \xi = \begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

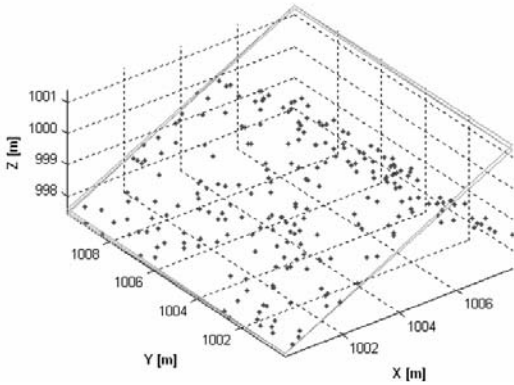


그림 4. 동일한 최대값을 가지는 누적배열인자(3개)를 평면으로 표현한 예

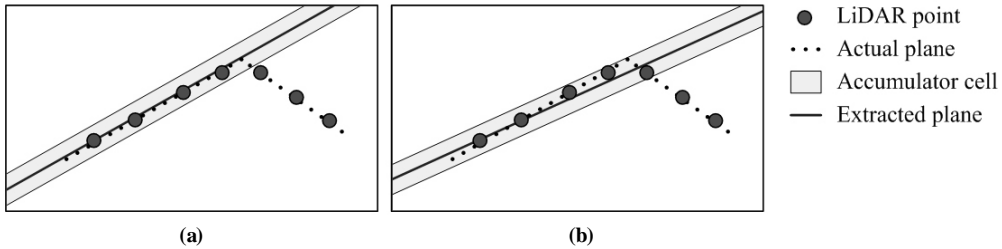
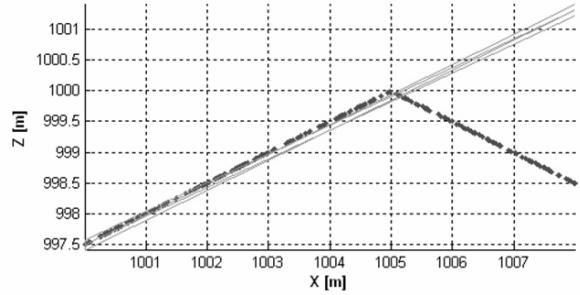


그림 5. 3D Hough 변환의 잘못된 평면 추출의 예

3. 3D Hough 변환을 이용한 건물 지붕 평면의 평면방정식 추출

3.1 3D Hough 변환을 이용한 건물 지붕 평면의 평면 방정식 추출 시의 문제점

3D Hough 변환을 이용하여 LiDAR 점 데이터로부터 추출한 평면의 정밀도는 2.1.3절에서 설명한 바와 같이 누적배열의 해상도에 따라 결정된다. 즉, Hough 변환 만으로는 누적배열의 해상도 이상의 정밀도를 기대할 수 없다. 또한, 누적배열의 해상도에 따라 최대값을 가지는 누적배열인자가 여러 개가 발생할 수 있다. 예를 들어, 그림 4의 점 데이터는 $1000m \leq x < 1005m$, $1000m \leq y < 1010m$ 의 범위에서 평면방정식 $-x + 2z - 995 = 0$ 을 만족하는 임의의 150개의 점과, $1005m \leq x < 1008m$, $1000m \leq y < 1010m$ 의 범위에서 평면방정식 $x + 2z - 3005 = 0$ 을 만족하는 임의의 90개의 점으로 이루어져 있으며, 평면추출을 위한 3D Hough 변환의 누적배열의 해상도는 $\Delta\phi = 1^\circ$, $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta\rho = 0.3m$ 이다. 누적배열은 총 $180(\phi) \times 180(\theta) \times 85(\rho) = 2,754,000$ 개의 누적배열인자로 이루어져 있다. 그림 4의 평면은 3D Hough 변환의 결과로 누적배열에서 동일한 최대값을 가지는 누적배열인자를 평

면으로 표현한 예이다. 누적배열의 최대값은 157이며, 같은 최대값을 가지는 누적배열인자는 총 3개로, 각 누적배열인자의 좌표 (θ, ϕ, ρ) 를 평면으로 표현하였다. 이와 같이, 여러 개의 최대값이 발생할 경우에는 어떤 최대값이 실제 평면을 표현하는 지 알 수 없다.

LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 평면을 추출할 때 발생할 수 있는 또 다른 문제점으로는, Vosselman and Dijkman(2001)이 지적한 바와 같이 추출하고자 하는 평면에 포함되지 않는 점들로 인하여 잘못된 평면이 추출될 수 있다는 것이다. 예를 들어, 그림 5과 같이 LiDAR 점 데이터로 이루어진 두 개의 평면이 존재하는 경우, 각 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점의 개수를 세어보면 그림 5(a)의 경우 4개, 그림 5(b)의 경우가 5개(데이터 내에서 최대값이라 가정)로 최대값을 가지는 누적배열인자는 그림 5(b)의 경우이다. 이와 같은 경우, 최대값을 가지는 누적배열인자를 그대로 이용하여 평면을 추출하면 그림 5(b)의 실선과 같은 잘못된 평면이 추출되게 된다. Vosselman 과 Dijkman(2001)은 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 외부정보를 이용하여 미리 데이터를 분리한 후 3D Hough 변환을 적용하였다.

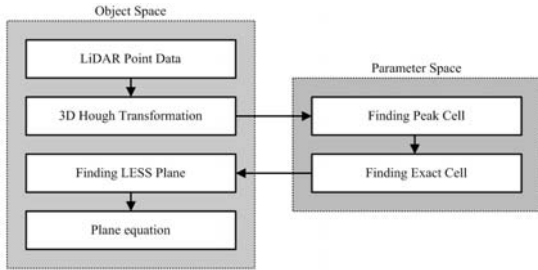


그림 6. 알고리즘 순서도

3.2 건물 지붕 평면의 세그멘테이션 및 정밀 평면방정식 추출 방법

3.1절에서 설명한 바와 같이 LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 평면을 추출할 경우, 최대값을 가지는 누적배열인자(peak cell)가 여러 개 발생할 수 있는 문제점과, 최대값을 가지는 누적배열인자(peak cell)가 실제 평면을 나타내지 못할 수 있다는 문제점이 발생할 수 있다. 이와 같은 문제점들은 최대값에 가까운 누적배열인자들 중에서 각 누적배열인자가 표현하는 평면과 그 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점 데이터들과의 수직거리의 제곱의 합을 계산하여, 그 값이 최소가 되는 누적배열인자를 선택하는 방법으로 해결할 수 있다. 예를 들어, 그림 5(b)의 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점 데이터의 수는 4개이지만, 누적배열인자가 표현하는 평면으로부터 이 4개의 LiDAR 점 데이터까지의 수직거리의 제곱의 합은, 5개의 LiDAR 점 데이터를 가지는 누적배열인자를 나타낸 그림 5(b)의 경우보다 작다. 다시 말해, 최대값을 가지는 누적배열인자는 그림 5(b)의 경우이지만, 그 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점 데이터와 그 누적배열인자가 표현하는 평면의 거리의 제곱의 합은 그림 5(a)의 경우보다 크다. 이와 같은 원리를 이용하면 앞서 제기된 두 가지 문제점을 동시에 해결할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은, 3D Hough 변환의 누적

배열에서 최대값을 찾는 단계(peak cell), 최대값에 가까운 값을 갖는 누적배열인자들이 표현하는 평면 중에서 실제 평면과 가장 가까운 평면을 나타내는 누적배열인자(exact cell)를 찾는 단계, 마지막으로, 이 누적배열인자(exact cell)에 포함되는 LiDAR 점 데이터에 최소제곱조정(LESS)을 적용하여 평면방정식을 추출하는 단계로 나눌 수 있다(그림 6).

본 논문에서는 이후의 설명을 위해, 첫 번째 단계에서 생성된 평면(최대값을 가지는 누적배열인자(peak cell)가 표현하는 평면)을 최다평면(peak plane), 두 번째 단계에서 생성된 평면(실제 평면과 가장 가까운 평면을 나타내는 누적배열인자(exact cell)가 표현하는 평면)을 정확평면(exact plane), 세 번째 단계에서 생성된 평면을 최확평면(LESS plane)이라고 정의한다(그림 7). 최다평면의 ‘최다’는 누적배열의 최대값을 의미하며, 그 누적배열인자(peak cell)에 가장 많은 수의 곡면이 중첩된다는 뜻이다(한 개의 LiDAR 점 데이터는 매개변수 공간에서 한 개의 곡면으로 표현된다). 정확평면의 ‘정확’은 누적배열인자가 나타낼 수 있는 가장 정확한 평면이라는 뜻이며, 최확평면의 ‘최확’은 최소제곱조정의 결과를 뜻한다.

최다평면은 누적배열에서 최대값을 가지는 누적배열인자를 찾는 것으로 간단히 구할 수 있다. 여러 개의 최다평면이 발생하는 문제, 즉, 누적배열에서 여러 개의 최대값이 발생하는 문제는 정확평면을 구하는 단계에서 해결된다.

그림 8의 각 점들은 LiDAR 점 데이터를 나타내며, 사각형은 누적배열인자가 표현하는 범위를 나타낸다. 그림 8(a)는 Vosselman and Dijkman(2001)이 지적한, 최대값을 가지는 누적배열인자(peak cell)가 실제 평면(actual plane)을 나타내지 못하는 예이다. 가장 많은 수의 점(12개)으로 이루어진 Plane1이 추출되어야 하나, 데이터에 여러 평면들이 있을 경우 최대값(15)을 가지는 누적배열인자는 평면을 나타내지 못할 수 있다. 그림 8(b)는 같은

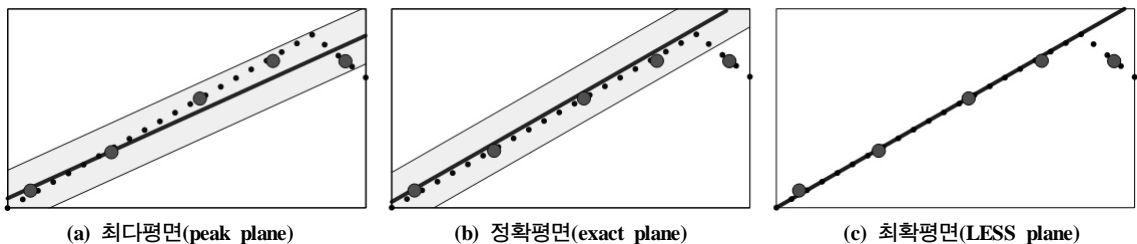
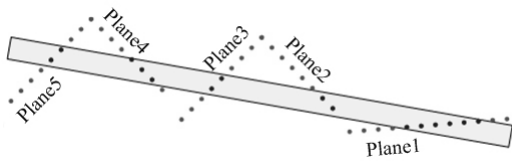
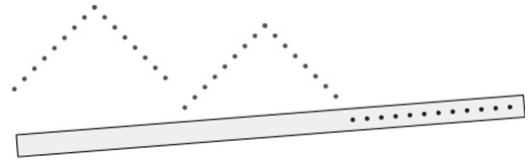


그림 7. 세 가지의 평면의 구분



(a) 최다평면이 실제평면(actual plane)을 나타내지 못하는 예 (Vosselman and Dijkman, 2001)



(b) 정확평면이 실제평면을 나타내는 예

그림 8. 최다평면과 정확평면의 비교

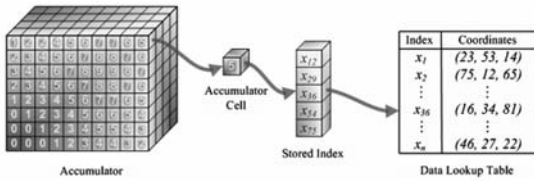


그림 9. 데이터 참조가 가능한 누적배열의 개념도

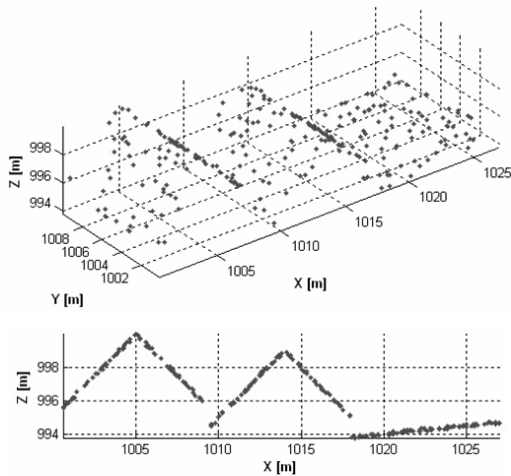


그림 10. 데이터 참조가 가능한 누적배열의 개념도

데이터에서 본 논문에서 제안한 정확평면이 실제 평면을 나타내는 예를 보여준다. 이 정확평면을 구하는 단계까지가 최확평면을 찾기 위한 데이터의 분리(segmentation)

과정이다. 누적배열의 해상도에 따라 정확평면에서도 실제 평면에 포함되지 않는 점들이 존재할 수 있는데, 이와 같은 점들은 최확평면을 계산하는 단계에서 잔차(residual)의 크기를 이용해 제거할 수 있다. 최확평면은 정확평면을 나타내는 누적배열인자에 포함되는 LiDAR 점 데이터에 최소제곱조정을 적용하여 계산할 수 있다.

정확평면, 최확평면을 구하기 위해서 본 논문에서는 변형된 누적배열을 개발하여 적용하였다. 기존의 Hough 변환에 사용되는 누적배열은 필요로 하는 매개변수를 추출하기 위해 단순히 매개변수 공간에서 특정구간에서 중첩되는 데이터의 개수를 세는 역할을 하는데 반해, 본 논문에서 제안하는 방법은 기존의 누적배열의 역할에서 더 나아가 각 누적배열인자에 포함되는 데이터를 참조할 수 있는 기능을 갖는다. 이 기능을 이용하여 정확평면과 최확평면을 구하기 위한 LiDAR 점 데이터의 참조가 가능하다(그림 9).

3.3 실험

그림 10은 3.2절에서 설명한 내용을 실험하기 위하여 제작한 데이터를 나타내는 것으로, 전체 260개의 가상의 LiDAR 점 데이터를 이용하여 그림 8과 유사하게 5개의 평면으로 이루어진 데이터를 제작하였다. 전체 데이터의 점밀도는 약 $1 \text{ 점}/\text{m}^2$ 이며, Plane1(그림 8 참조)은 $1018.0\text{m} \leq x < 1027.0\text{m}$, $1000.0\text{m} \leq y < 1010.0\text{m}$ 의 범위에서 평면방정식 $x - 10z + 8920 = 0$ 을 만족하는 임의의 90개의

표 1. 실험 데이터 상세내용

평면	평면방정식	x 범위 [m]	y 범위 [m]	점의 개수
Plane1	$x - 10z + 8920 = 0$	$1018.0 \leq x < 1027.0$	$1000.0 \leq y < 1010.0$	90
Plane2	$x + z - 2013 = 0$	$1014.0 \leq x < 1018.0$	$1000.0 \leq y < 1010.0$	40
Plane3	$x - z - 30 = 0$	$1019.5 \leq x < 1014.0$	$1000.0 \leq y < 1010.0$	45
Plane4	$x + z - 2005 = 0$	$1005.0 \leq x < 1009.0$	$1000.0 \leq y < 1010.0$	40
Plane5	$x - z - 5 = 0$	$1000.5 \leq x < 1005.0$	$1000.0 \leq y < 1010.0$	45

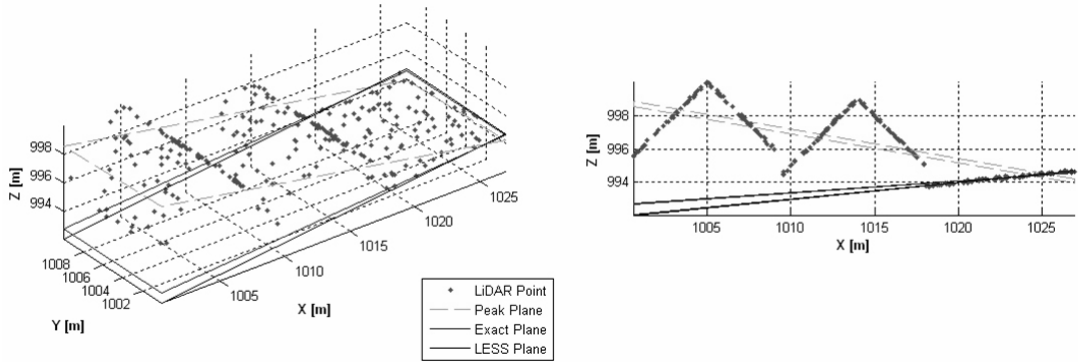


그림 11. 추출된 최다평면, 정확평면, 최확평면

표 2. 실험결과 : 각 평면의 평면방정식 매개변수 비교

		Peak Plane	Exact Plane	LESS Plane	Actual Plane
Plane Parameters	A	0.174	-0.070	-0.100	-0.100
	B	0.028	0.004	-0.003	0.000
	D	-1200.674	-926.541	-888.852	-892.000
Number of Points		98	90	90	90
$\hat{\sigma}_0^2$		-	-	0.052m2	-

점으로 이루어져 있으며, 값에는 $-0.2m \leq e_z < 0.2m$ 범위에서 임의의 오차를 생성하여 포함하였다. 데이터의 자세한 내용은 표 1과 같다.

그림 11은 표 1과 그림 10에서 설명한 데이터에 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 실제 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 누적배열의 해상도는 $\Delta\phi = 1^\circ$, $\Delta\theta = 1^\circ$, $\Delta\rho = 1m$ 이다. 누적배열은 총 개의 누적배열인자로 이루어져 있으며, 누적배열의 최대값은 98이고, 단 한 개의 누적배열인자만 최대값을 갖는다. 이 최대값을 갖는 누적배열인자(peak cell)가 표현하는 평면은 그림 11에서 peak plane으로 표현되어 있다. 정확평면은, 누적배열의 최대값(98)의 90%(88) 이상인 값을 갖는 누적배열인자들을 선택하고, 그 중에서 각 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점 데이터와 그 누적배열인자가 표현하는 평면과의 거리의 제곱의 합을 계산하여 가장 작은 값을 갖는 누적배열인자가 표현하는 평면이다. 이렇게 선택된 정확평면은 그림 11에서 exact plane으로 표현되어 있다. 정확평면을 나타내는 누적배열인자(exact cell)의 값은 90, 즉 90개의 LiDAR 점 데이터가 매개변수 공간에서 정확평면을 나타내는 누적배열인자 구간에 포함되며, plane1의 LiDAR 점 데이터와 일치한다. 최확평면은 정확평면의 누적배열인자에 포함된 LiDAR 점 데이터로 최소제곱조정을 이용

하여 계산되었으며, 그림 11에서 LESS plane으로 표현되어 있다.

표 2는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 결과이다. 매개변수 공간에서 각 누적배열인자의 좌표로 표현되는 최대평면과 정확평면의 평면방정식의 매개변수와, 최소제곱조정으로 계산된 최확평면의 평면방정식의 매개변수를, 실제평면의 평면방정식 매개변수와 비교하였다. 이 실험 데이터에는 위에서 설명한 바와 같이, 값에 $-0.2m \leq e_z < 0.2m$ 범위에서 임의로 생성된 오차가 포함되어 있다. 오차를 포함하지 않는 데이터의 경우, 최확평면의 평면방정식 매개변수는 실제 평면의 매개변수와 일치한다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문은 LiDAR 점 데이터에서 3D Hough 변환을 이용하여 건물지붕 평면의 평면방정식을 추출할 때, 누적배열에서 최대값이 여러 개가 나올 수 있는 문제점과 최대값을 가지는 누적배열인자(peak cell)가 실제 추출하고자 하는 평면을 표현하지 못하는 문제점을 해결할 수 있는 방법에 대한 내용을 다루고 있다. 이 두 가지 문제점을 해결하기 위해서, 3D Hough 변환의 누적배열에서 최대값을 구하고, 이 값을 이용하여 실제 추출하고자 하는 평

면을 표현하는 누적배열인자(exact cell)를 구한 다음, 이 누적배열인자에 포함되는 LiDAR 점 데이터만을 이용하여 최소제곱조정으로 최확평면(LESS plane)을 구하는 세 단계로 이루어지는 알고리즘을 개발하였다. 또한, 이 알고리즘의 구현에 필요한 데이터 참조가 가능한 누적배열을 고안하였다. 실험을 통하여, 누적배열의 최대값을 가지는 누적배열인자가 실제 평면을 표현하지 못하는 경우에도 정확한 평면방정식을 추출할 수 있다는 것을 검증하였다.

실제 LiDAR 데이터에서 여러 개의 평면으로 이루어진 건물의 지붕면들을 추출하기 위해서는, 본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하여 첫 번째 최확평면을 추출한 다음, 본 논문에서 개발한 데이터 참조가 가능한 누적배열을 이용하여 이 최확평면 추출에 사용된 LiDAR 점 데이터를 제거하고, 이 데이터에서 다시 두 번째 최확평면을 추출하는 방법으로, 더 이상 의미 있는 평면이 추출되지 않을 때까지 반복 적용하는 것으로 건물의 지붕면들을 추출할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Gonzalez, R. C., Woods R. E.(2002), *Digital Image Processing*, Prentice Hall.
- Hofmann, A. D., Maas, H.-G., Streilein, A.(2003), Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laser scanner point clouds. *Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop on 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*, Dresden, October 8-10, 2003.
- Hough, P.,(1962), Methods and means for recognizing complex patterns, US Patent 3,069,654.
- Lohani, B., Singh, R.(2007), Development of a hough transform based algorithm for extraction of buildings from actual and simulated LiDAR data, *Proceedings, Map World Forum 22-25 Jan, India*, 2007.
- Novacheva, A.(2007), Toward automatic 3D roof reconstruction from laser scanner point clouds, *Recent Problems in Geodesy and Related Field with International Importance 4th International Conference*, Feb 28-Mar 2, Sofia, Bulgaria, 2007.
- Schaffrin, B., Lee, I., Choi, Y., Felus, Y.(2006), Total Least-squares(TLS) for geodetic straight-line and plane adjustment, *ANNO LXV - BOLLETTINO DI GEODESIA E SCIENZE AFFINI- N. 3*, 2006.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P.(2007), Hough-transform and extended ransack algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from LiDAR data, *IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52*, 2007.
- Vosselman, G., Dijkman, S.(2001), 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans, *IAPRS, Vol. XXXIV-3/W4 Annapolis, MD*, 22-24 Oct. 2001.

(접수일 2008. 9. 18, 심사일 2008. 10. 13, 심사완료일 2008. 10. 16)