

## 자연지형을 이용한 항공 LiDAR 데이터의 보정

### Calibration of Airborne LiDAR data using Natural Topography

이임평<sup>1)</sup> · 최윤수<sup>2)</sup> · 박지혜<sup>3)</sup> · 김경옥<sup>4)</sup>

Lee, Impyeong · Choi, Yunsoo · Park, Jihye · Kim, Kyoung-ok

<sup>1)</sup> 서울시립대학교 도시과학대학 지적정보학과 교수(E-mail:ipllee@uos.ac.kr)

<sup>2)</sup> 서울시립대학교 도시과학대학 지적정보학과 교수(E-mail:choiys@uos.ac.kr)

<sup>3)</sup> 서울시립대학교 대학원 지적정보학과 석사과정(E-mail:jihye@uos.ac.kr)

<sup>4)</sup> 한국전자통신연구원 텔레매틱스연구단 공간연구정보팀 팀장(E-mail:kokim@etri.re.kr)

#### Abstract

LIDAR data often include systematic errors, which should be removed by a calibration process. This paper proposes a robust approach to calibrating LIDAR data using natural surfaces as reference data. The uniqueness of this approach is to employ a sophisticated selection scheme so that only a portion of LIDAR points can be used to estimate the bias parameters generating the systematic errors. This approach was applied to calibrating simulated LIDAR data. The results show that the approach can successfully recover the bias parameters and calibrate the data with acceptable RMS errors. Particularly, the parameter recovery model can be easily extended to register image data with LIDAR data.

## 1. 서 론

라이더는 사물의 표면으로부터 추출한 점들의 정밀한 좌표를 효과적으로 생성한다. 이것은 GPS (Global Positioning System) 모듈, INS (Inertial Navigation System) 모듈, 레이저 레인지(ranging) 모듈로 구성되며 각각의 모듈은 위치, 방향 및 거리 정보를 제공하는데 이러한 세 가지 정보를 조합하여 하나의 표적점의 좌표를 계산한다. 이렇게 계산된 좌표는 흔히 다양한 원인에 의하여 발생하는 정오차(systematic errors)를 포함한다. 이러한 오차들은 예를 들면 각각의 모듈에 포함된 편의(systematic biases)로부터 비롯되거나 또는 전체 모듈을 통합할 때 완벽하게 상호정렬하지 못하기 때문에 발생한다. 정오차를 제거하는 과정을 보정이라고 하며 이 과정은 보다 정확한 좌표를 생성하기 위해 필수적이다.

전형적인 보정의 과정은 1) 오차의 원인을 분석하여 정오차를 편의변수로 모델링하고, 2) 모델링된 변수를 측정된 점의 좌표를 주어진 기준 데이터와 비교를 통해 추정하고, 3) 추정된 변수를 이용하여 측정된 점의 좌표에서 정오차의 영향을 제거하는 과정으로 구성된다. 여기서 변수의 추정은 흔히 수학적으로 단순하게 정의되는 평면패치를 기준데이터로 사용하였다. 그러나, 일반적으로 상관도(correlation)가 높은 편의변수들을 정확하게 추정하는데 어려움이 있는데 이는 상호독립적인 충분한 개수의 평면패치가 기준데이터로 주어지기 어렵기 때문이다. 예를 들어, 평면패치는 빌딩과 같은 도시의 인공구조물에서 흔히 발견되는데 대부분의 패치는 지표면에 수직으로 동일한 경사도를 갖는다. 이로 인해 다양한 경사도의 패치를 포함하는 자연지형을 기준데이터로 사용할 필요성이 증가하고 있다.

자연지형을 기준데이터로 사용하여 편의변수를 추정할 때 발생하는 대표적인 문제점은 편의변수에 대한 초기 근사값에 대해 민감하다는 것이다. 초기 근사값에 따라 최종 추정값에 수렴하기까지 요구되는 반복 계산량의 횟수와 수렴된 최종값의 정확도에 큰 차이를 보인다. 이를 해결하기 위해 Filin (2001, 2002)은 주어진 오차의 범위 내에서 상당히 많은 수의 초기 근사값을 임의로 설정하여 각각 설정된 초기값으로부터 반복 계산을 수행한 후 수렴된 최종값들 중에 가장 잔차를 작게 생성하는 값을 선택하였

다. 이 방법은 여러 개의 초기값을 고려하기 때문에 계산량이 증가하고 가장 잔차를 작게 생성하는 최종값이 반드시 최적값이라는 보장이 없다는 단점이 있었다.

이로 인해 본 연구는 자연지형을 기준데이터로 사용하여 편의변수를 비교적 초기값에 민감하지 않게 추정하는 방법을 개발하였고 이런 과정을 통해 항공 라이다데이터를 보정하는 방법을 제안한다. 본 추정방법의 핵심은 주어진 기준데이터와 중첩하는 모든 점들을 사용하지 않고, 이러한 점들 중에서 변수 추정에 유리한 일부의 점만을 정교하게 선택하는 것이다. 이러한 선택은 점의 좌표에 관련된 측정오차의 범위 내에서 기준표면의 선형성과 거칠기를 고려한다. 본 논문은 제안된 방법을 개념적 또는 수학적 으로 기술하고, 제안된 방법을 시뮬레이션을 통해 얻어진 가상 라이다데이터에 적용한 실험 결과를 요약하고, 결론으로 마무리 한다.

## 2. 데이터보정방법 및 편의변수추정이론

### 2.1 데이터보정방법

항공 라이다 측량을 통해 지표면과 지상위의 사물의 표면에서 측정된 많은 점의 정확한 좌표를 취득하는 과정은 그림 1과 같이 데이터 획득, 검증 및 보정으로 구성된다. 데이터 획득에서는 측량범위를 설정하여 항공측량의 경로를 수립하여 라이다데이터를 취득하고, 측량범위에 포함되는 자연지형의 정밀한 DEM을 기준데이터로 준비한다. 데이터 검증에서는 측량으로 취득한 라이다데이터를 기준데이터에 중첩하여 그 차이를 계산하고 그러한 오차가 발생하게 된 원인을 분석한다. 오차의 크기가 크고 오차의 원인에 체계적인 요소가 포함되어 있으면 데이터 보정을 수행한다. 데이터 보정은 오차의 원인에 대한 분석 결과를 참고로 이를 편의변수로 도입하여 모델링하고, 편의변수를 라이다데이터와 기준데이터의 차이를 최소로 하는 최적의 값으로 추정하고, 추정된 모델을 이용하여 측정된 점의 좌표를 다시 계산하는 과정으로 구성된다.

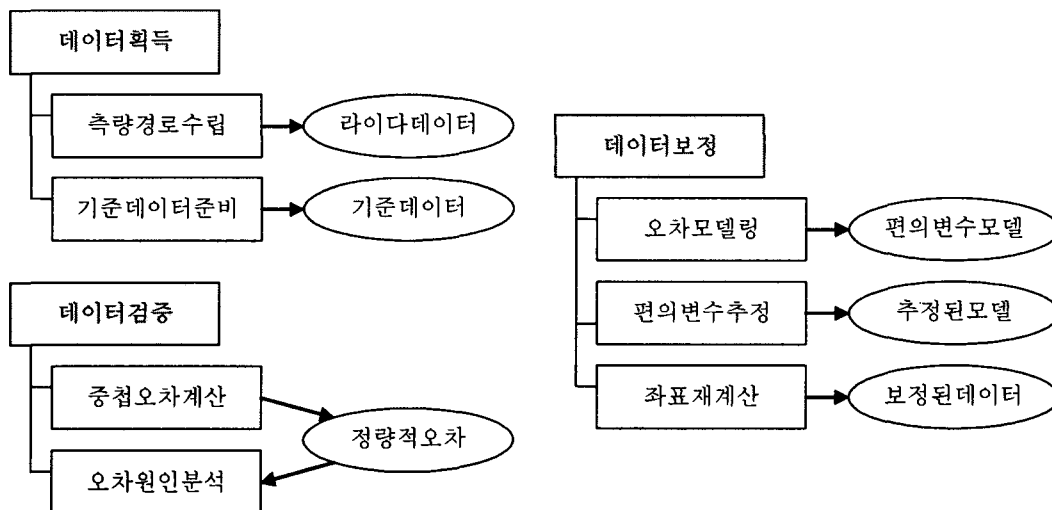


그림 1. 라이다 측량: 데이터 획득, 검증 및 보정

### 2.2 편의변수추정이론

편의변수 추정에 필요한 여러 가지 공식의 수학적 전개는 Lee 등 (2004)이 상세히 기술하고 있다. 여기서는 기술된 내용을 요약해서 소개한다.

#### 2.2.1 편의변수를 포함한 레이저 공식

레이저 공식은 라이다 측량을 통해 얻은 위치, 방향, 거리 정보를 조합하여 한 점의 좌표를 계산하는

공식이다. 한 점의 좌표  $p=[x,y,z]^T$  는 관측값  $p'=[x',y',z']^T$  에 정오차에 의한 영향을 제거하기 위한 보정값  $\Delta p=[\Delta x,\Delta y,\Delta z]^T$  의 합으로 식(1)처럼 나타난다.

$$p = p' + \Delta p \quad (1)$$

정오차의 영향을 단순화하여 위치에 대한 3개, 방향에 대한 3개, 거리에 대한 1개와 같은 전체적으로 7개의 편의변수로 모델링하면,  $\Delta p$  는 다음 식(2)와 같다. 여기서  $P'$  는 위치의 관측값,  $\Delta P$  는 위치의 관측값에 포함된 편의( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ),  $R'$  는 INS로 측정된 방향의 관측값으로 계산되는 레이저 좌표계와 지상좌표계 사이의 좌표변환을 나타내는 회전행렬,  $\Delta R$  은 방향의 관측값에 포함된 편의( $\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa$ )에 의해 발생하는 회전행렬에 포함된 편의,  $u$  는 레이저 좌표계로 나타낸 레이저 펄스가 발사된 방향을 나타내는 단위 벡터,  $l'$  은 레인징 모듈로 측정된 거리의 측정값,  $\Delta l$  은 거리의 측정값에 포함된 편의를 나타낸다.

$$\Delta p \equiv \Delta P + \Delta R R' \cdot u \cdot l' + R' \cdot u \cdot \Delta l \quad (2)$$

$$\Delta P \equiv \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad \Delta R \equiv \begin{bmatrix} 0 & -\Delta \kappa & \Delta \phi \\ \Delta \kappa & 0 & -\Delta \omega \\ -\Delta \phi & \Delta \omega & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.2.2 편의변수추정을 위한 관측방정식

기준데이터로 주어지는 DEM은 일반식으로 2차원 표면함수  $z=f(x,y)$  로 나타낼 수 있으며, 보정된 좌표는 주어진 표면함수를 만족해야하므로 식(4)와 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$z' + \Delta z = f(x' + \Delta x, y' + \Delta y) \quad (4)$$

식(4)를 선형화한 후  $n$  개의 점으로부터 얻은  $n$  개의 조건식을 이용하여 7개의 편의변수  $\xi \equiv [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ \Delta \omega \ \Delta \phi \ \Delta \kappa \ \Delta l]^T$  를 추정하기 위한 식(5)와 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$y = A\xi + e, \quad e \sim (0, \sigma_0^2 I_n) \quad (5)$$

여기서  $k$  번째 점으로부터 구성한 하나의 조건식은 식(6)처럼 나타난다. 이 식의 자세한 설명은 Lee 등 (2004)의 논문에 기술되어 있다.

$$y_k \equiv z' - f(x', y')$$

$$A_k \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & RL'_z & -RL'_y & Ru_x \\ 0 & 1 & 0 & -RL'_z & 0 & RL'_x & Ru_y \\ 0 & 0 & 1 & RL'_y & -RL'_x & 0 & Ru_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 2.2.3 편의변수의 반복적 추정

편의변수는 식(5)와 같은 선형화 모델을 이용한 반복적 계산을 통해 추정된다. 최초의 단계에서는 7개의 초기 근사치를 편의변수 모두에 대해 0으로 주고, 이 후로는 이전 단계의 추정치를 현 단계의 계산

을 위한 초기 근사치로 사용한다. 이러한 계산은 추정치의 변화가 미미할 때까지 반복한다.

이러한 반복 계산에 있어서 중요한 점은 초기 근사치에 대한 종속성, 최종 수렴값에 대한 정확도, 수렴의 속도 등이다. 이들은 모두 선형화 과정에서 발생하는 오차의 크기와 밀접하게 관련되어 있다. 즉, 선형화 과정의 오차가 작으면 작을수록, 반복 계산에 있어 보다 나은 결과를 얻을 수 있다. 이론적으로는 주어진 기준 표면이 완벽하게 평면인 경우에는 선형화 오차가 거의 0에 가깝다. 그러나 일반적으로 대부분의 지형은 하나의 무한히 넓은 평면으로 구성되기 보다는 다양한 넓이와 거칠기를 보이는 평면패치들의 집합으로 나타난다. 이러한 평면패치들 중에 측정된 점의 좌표에 포함된 오차의 범위를 충분히 포함할 만큼 넓은 패치들을 선택하고, 선택된 패치들의 거칠기는 하나의 평면패치와 점으로 구성되는 조건식의 가중치로 사용한다. 결과적으로 기준데이터와 중첩된 모든 점을 사용하지 않고, 충분히 넓고 어느 정도 이하의 거칠기를 갖는 평면패치위에 놓여있는 점만을 신중하게 선택하여 관측방정식을 구성한다.

### 3. 가상 데이터를 이용한 데이터 보정의 실험 결과 및 토의

제안된 보정 방법은 다양한 종류의 가상 데이터에 적용되었다. 보정된 결과를 정량적으로 정확하게 평가하기 위해서 실측데이터 대신에 시뮬레이션을 통해 얻어진 가상 데이터를 사용하였다.

#### 3.1 시뮬레이션을 통한 가상 데이터의 생성

시험데이터는 항공 라이다 측량의 시뮬레이션을 통해 생성하였다. 시뮬레이션을 위해서 먼저 측량대상지역의 DEM, 라이다의 시스템 변수, 측량의 비행경로, 정오차 발생을 위한 편의변수 등을 합리적으로 가정하였다. 대상지역은 그림 1(a)에서 표현된 지형으로 보는 바와 같이 다양한 경사도, 방향 및 거칠기를 보이는 평면들로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 대상지역의 등고선그래프에 항공측량의 비행경로, 생성된 데이터의 범위, 데이터보정에 사용될 기준데이터의 범위를 나타낸다. 5개의 가상 데이터 셋을 적절한 중첩을 포함하도록 생성하였다. 전체적으로 약 173초의 비행을 시뮬레이션하여 5,201,400의 점을 생성하였다. 데이터 보정을 위해서는 주어진 전체 DEM을 사용하지 않고, 5개의 데이터 셋 중에서 4개의 셋이 중첩되는 지역의 일부를 보정에 사용된 기준데이터의 범위로 설정하였다. 시뮬레이션에 대한 보다 자세한 정보 및 방법은 Lee (2003)와 Lee 등 (2004)의 논문들을 참조하면 알 수 있다.

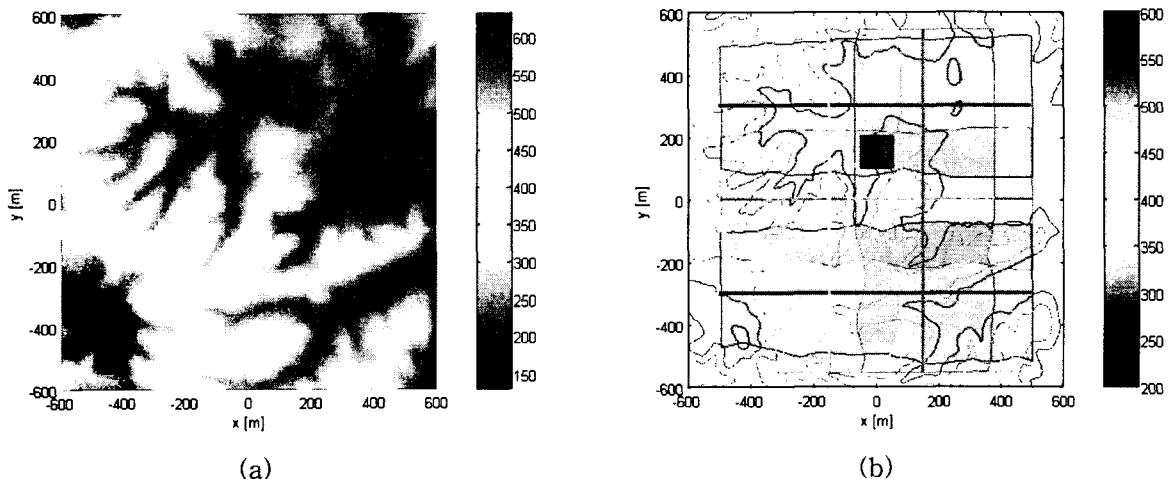


그림 2. 시뮬레이션: (a) 대상지역의 지형 (DEM을 이용한 표면그래프), (b) 대상지역의 등고선위에 표시한 항공측량비행경로(굵은실선), 데이터의 범위(가느실선), 기준데이터의 범위(회색직사각형)

### 3.2 데이터 보정의 실험 결과 및 토의

시뮬레이션을 통해 생성한 가상데이터에 제안된 데이터 보정 방법을 적용하였다. 반복계산을 통해 얻어진 편의변수의 추정값을 나타낸 표 1에서 보는 바와 같이 상당히 빠른 속도로 참값에 가깝게 수렴하는 것을 알 수 있다. 엄밀하게는 최종적인 추정값이 참값과 미세하게 다른 것을 볼 수 있는데 이는 변수들 사이에 상관도(correlation)가 아주 높기 때문인 것으로 추측된다. 예를 들어,  $\Delta X$ 는  $\Delta\phi$ 와  $\Delta Y$ 는  $\Delta\omega$ 와 높은 상관도를 갖는다. 그렇지만, 이렇게 미세하게 다른 추정값의 영향들은 서로 상쇄되어 이를 이용하여 보정한 좌표값들에 포함된 편의의 의한 영향은 아주 미미하다.

표 1. 반복계산을 통해 얻어진 편의변수의 추정값

반복단계	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta\omega$ [deg]	$\Delta\phi$ [deg]
1	2.1791	0.7295	0.1032	0.2109
2	1.9827	0.9711	0.1015	0.1989
3	1.9886	0.9668	0.1010	0.1991
4	1.9886	0.9671	0.1010	0.1991
5	1.9886	0.9671	0.1010	0.1991
참값	2.0000	1.0000	0.1000	0.2000

데이터 보정의 결과를 정량적으로 평가하기 위해 보정된 관측값과 참값의 차이에 대한 RMS (Root Mean Squares)의 값을 계산하였다. 이는 실험에 사용한 데이터가 시뮬레이션을 통해 생성한 가상데이터이기 때문에 각 점의 좌표마다 편의로 인한 영향 즉 정오차가 전혀 포함되지 않은 참값을 알고 있기 때문에 가능하였다. 표 2는 데이터 보정 전과 보정 후의 참값과 관측값과의 차이의 RMS값을 보여준다. 보정 전에 x와 y 방향으로 약  $\pm 2\sim 3$  m정도, z 방향으로 약  $\pm 0.5$  m 이내의 오차를 보였는데, 보정 후에는 모든 방향에서 약  $\pm 0.1$  m 내외의 오차를 보였다. 특히, 세 번째 데이터 셋은 보정에 사용한 기준 DEM과 전혀 중첩을 갖고 있지 않음에도 불구하고 다른 데이터 셋과 거의 비슷한 정도의 오차로 보정된 것을 볼 수 있다.

표 2. 데이터 보정 전후의 RMS 오차 (단위: m)

Set	보정 전			보정 후		
	dx	dy	dz	dx	dy	dz
1	2.346	3.171	0.219	0.007	0.010	0.010
2	2.252	3.123	0.213	0.007	0.011	0.010
3	2.027	3.004	0.203	0.006	0.012	0.009
4	2.296	3.146	0.437	0.007	0.011	0.010
5	2.141	3.066	0.418	0.006	0.011	0.010

## 4. 결 론

자연지형을 이용하여 라이다데이터에 포함된 정오차의 영향을 나타내는 편의변수를 안정적으로 추정하여 이를 통해 데이터를 보정하는 방법을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통해 얻어진 가상데이터에 적용하여 그 성능을 실험적으로 입증하였다. 정량적으로는 제안된 방법을 사용하여  $\pm 2\sim 3$  m의 RMS 오차를 가지고 있던 데이터를  $\pm 0.1$  m 내외의 RMS 오차의 데이터로 보정할 수 있었다.

향후 계획으로는 데이터 보정에서 사용한 편의변수를 추정하는 방법을 응용하여 기준 DEM이 없는 경우에 라이다데이터를 보정하는 문제와 영상 데이터를 라이다데이터에 정렬(registration)하는 문제에 적용하려고 한다.

## 감사의글

이 논문은 2003년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단장비 지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 학교 당국에 감사드립니다. 본 연구에 많은 도움을 주신 인하대학교 토목공학과 조우석 교수님과 한국전자통신연구원 텔레매틱스연구단 공간연구정보팀 이영진 연구원에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- Filin, S. (2001), *Calibration of spaceborne and airborne laser altimeters using natural surfaces*. PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, the Ohio-State University, Columbus, OH.
- Filin, S. (2002), A simultaneous solution to the calibration and the correspondence problems for spaceborne laser altimeters, Proc. *The 3rd International Workshop on Mapping Geo-Surficial Processes Using Laser Altimetry*, Columbus, OH.
- Lee, I. (2003), Verification and calibration of LIDAR data based on simulation with high-resolution DEMs, Proc. *Korean Society of Civil Engineering (KSCE) Conference*, Daegu, Korea, pp. 4436-4440.
- Lee, I., Moon, J. and Kim, O. (2004), Parameter recovery for LIDAR data calibration using natural surfaces, Proc. *International Symposium on Remote Sensing (ISRS)*, Cheju, Korea.