

# 수치지형도를 이용한 항공라이다 데이터의 기하보정 Georegistration of Airborne LiDAR Data Using a Digital Topographic Map

한동엽<sup>1)</sup> · 유기윤<sup>2)</sup> · 김용일<sup>3)</sup>  
Han, Dong Yeob · Yu, Ki Yun · Kim, Yong Il

## Abstract

An airborne LiDAR system performs several observations on flight routes to collect data of targeted regions accompanying with discrepancies between the collected data strips of adjacent routes. This paper aims to present an automatic error correction technique using modified ICP as a way to remove relative errors from the observed data of strip data between flight routes and to make absolute correction to the control data. A control point data from the existing digital topographic map were created and the modified ICP algorithm was applied to perform the absolute automated correction on the relatively adjusted airborne LiDAR data. Through such process we were able to improve the absolute accuracy between strips within the average point distance of airborne LiDAR data and verified the possibility of automation in the geometric corrections using a large scale digital map.

Keywords : Airborne LiDAR, Digital topographic map, Georegistration, ICP

## 초 록

항공라이다 시스템은 대상지역의 자료를 취득하기 위하여 여러번 경로 관측을 수행하게 되며, 이로 인해 취득된 데이터의 인접 경로간에 편차가 발생한다. 본 연구에서는 스트립 데이터의 비행경로간 관측값의 상대오차를 제거하고 기준 데이터에 절대보정하는 방법으로 수정된 ICP를 이용한 자동 오차보정 기법을 제안하였다. 항공라이다 데이터에 절대 자동보정을 수행하기 위하여 기존의 수치지형도에서 기준점 데이터를 추출하고, 수정된 ICP 알고리즘을 적용하였다. 위의 과정을 통하여 항공라이다 데이터의 평균 점간 거리 이내로 스트립간 조정 정확도를 향상시킬 수 있었으며, 대축척 수치지형도를 이용한 절대보정 과정의 자동화 가능성을 확인하였다.

핵심어 : 항공라이다, 수치지형도, 기하보정, ICP

## 1. 서 론

항공라이다 시스템은 다른 수치표고자료 획득기법에 비해 높은 정확도의 데이터를 쉽게 취득할 수 있지만, 수직위치 정확도에 비해 수평위치 정확도가 낮다. 또한 서로 다른 비행경로에서 관측된 스트립간에는 상대적으로 큰 오차가 발생하여 데이터 전체 정확도와 정밀도를 저하시키기 때문에, 초기 데이터를 최종 결과물로 사용하기 어렵다. 초기 데이터의 정확도를 향상시키기 위해 항공라

이다 시스템을 지속적으로 향상시켜, 단일 스트립 데이터의 정밀도는 높아지고 있지만, 직접적인 기하보정 정보를 제공하는 GPS(global positioning system)와 IMU(inertial measurement unit)의 정확도 한계와 시스템의 불완전한 보정결과로 인해 여전히 관측 스트립간에 상당한 상대오차가 존재하고 있다(Pfeifer, 2005). 특히 다양한 높이의 건물이 복잡하게 밀집되어 있는 도심지역에서 1:1,000 이상의 대축척 지형정보가 사용되는 우리나라의 경우, 대축척 지도와 상호 활용을 위하여 스트립 데이터간의 상대오차와 지형

1) 정희원 · 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 조교수(E-mail:hozilla@chonnam.ac.kr)  
2) 정희원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수(E-mail:kiyun@snu.ac.kr)  
3) 교신저자 · 정희원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 교수(E-mail:yik@snu.ac.kr)

도에 맞춰 보정하는 것이 중요하다.

스트립간 오차를 제거하기 위해서 우선, 항공라이다 데이터 오차의 수학적 모델을 구하고(Crombaghs 등, 2000), 이 모델과 함께 기준점을 이용한 오차보정 변환식을 적용하여 문제를 해결하고 있다(Crombaghs 등, 2000; 이병길, 2001; 이상훈 등, 2009; 이원춘 등, 2011). 대응 개체(conjugate feature)를 찾아 조정을 수행하는 연구가 많이 이루어지고 있으며, 대응 관계에 사용되는 개체의 종류에 따라 점과 점 매칭 (Kager 등, 2001), TIN(triangular irregular network) 매칭 (Maas, 2000), 점과 면 요소(surface) (Filin 등, 2004), 면 요소(surface objects)와 면 요소 (Pfeifer, 2005), 선형 개체와 선형 개체의 매칭 (Lee 등, 2005) 방법이 제안되었다. 이와 같은 연구에서는 조정을 수행하기 위해 항공라이다 데이터로부터 선택된 대응 개체가 추출되어 대응 관계가 인식되어야 하지만, 중복 데이터 지역에서 적절한 개체가 부족한 경우에는 기존에 제안된 알고리즘을 적용하기 어려워진다.

Besl 등(1992)이 제안한 ICP(iterated closest point) 알고리즘은 대응 개체를 찾고 변환 행렬을 갱신하여 두 데이터를 조정한다. 항공 라이다 데이터는 초기 좌표정보가 포함되어 있으므로, 스트립의 초기 배치가 비교적 정확할 때 효율적으로 조정량을 자동 추정하는 ICP 알고리즘을 응용하면 항공라이다 데이터의 보정 자동화가 가능하다.

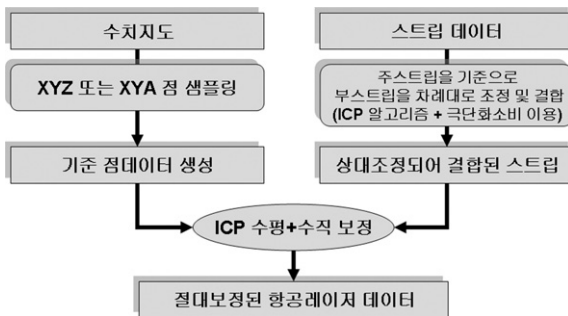


그림 1. 연구흐름도

본 연구에서는 절대보정을 위한 기준 점데이터의 생성 방법을 제시하며, ICP를 이용하여 기준 점데이터에 상대보정된 항공라이다 데이터를 절대보정한다. 한편, 사용되는 수치지형도에 따라 방위각 점데이터에 적용할 수 있는 수정된 ICP 알고리즘을 제안한다. 모든 처리 단계는 Matlab 소프트웨어로 코딩하였으며 입력 데이터와 각 조정인자가 설정되면 자동으로 상대 조정 및 절대보정을 수행한다. 그림 1은 연구 흐름도이다.

## 2. 수치지형도를 이용한 보정

수치지형도에는 다양한 지형지물의 위치가 점, 선(line), 폴리라인(polyline) 등의 형식으로 표현되어 있다. Besl 등(1992)은 점 데이터와 다른 곡선이나 곡면 상에서의 가장 근접한 대응 후보점을 근사적인 반복계산에 의하여 추정할 수 있다고 설명하였다. 그러나, 대응점의 추정계산에 많은 시간이 소요되므로 기준 데이터를 적절한 샘플링 간격을 통하여 점 데이터로 변환하는 것이 효율적이다. 수치지형도에 존재하는 개체는 2D 또는 3D 정점 집합(point set)으로 이루어져 있으며, 선이나 폴리라인의 선분들을 적당한 간격으로 샘플링하면 2D 또는 3D 기준점 데이터를 생성할 수 있다. 현재 수치지형도 생성은 항공사진의 도화 작업을 이용한다. 도화 작업후에 생성되는 도화 데이터에는 3차원(X,Y,H)의 좌표값을 유지하고 있으며, 후처리 편집과정에서 등고선, 표고점, 삼각점, 수준점 등을 제외한 나머지 개체의 표고정보를 제거하여 수치지형도를 공개하고 있다<sup>4)</sup>.

우리나라의 수치지형도는 각 축척에 따라 일정한 허용 오차를 규정하고 있다(국토지리정보원, 2005). 1:5,000 수치지형도의 경우, 수평위치정확도와 수직위치정확도는 각각 1m, 50cm이고, 1:1,000 수치지형도의 경우, 수평위치정확도와 수직위치정확도는 각각 20cm, 15cm이다. 고도 1,000m에서 취득한 항공라이다 데이터의 수평 및 수직 위치정확도를 50cm, 15cm라고 가정할 때, 1:1,000 대축척 수치지형도를 기준 데이터로 사용하는 것이 적당하다고 할 수 있다.

### 2.1 3D 수치지형도를 이용한 보정

3D 도화 수치지형도가 이용가능한 경우에는 속성 레이어를 제외한 점, 선, 폴리라인 레이어의 개체 정보로부터 3D 점을 샘플링할 수 있다(그림 2). 샘플링된 점은 X,Y,Z 좌표를 가지고 있기 때문에 ICP 알고리즘을 이용하여 항공라이다 데이터와 직접 보정을 수행할 수 있다. 기타 기하속성 정보를 추가로 생성하여 보정 과정에 이용할 수도 있다. 수치지형도에서 선이나 폴리라인은 선분(segment)으로 이루어져 있다. 각 선분의 양 끝점  $A(x_1, y_1, z_1)$

4) 본 논문에서는 편의상 도화 데이터와 같이 모든 개체에 3차원 좌표값을 가지고 있는 수치지형도를 3D 수치지형도라 하고, 일반적으로 사용되고 있는 수치지형도를 2D 수치지형도로 명명하였다.

와  $B(x_2, y_2, z_2)$ 가 있을 때,  $\overline{AB}$ 의 샘플링 식은 다음과 같다.

$$\text{Sampled Points}(i) = i \times \vec{n} + A \quad (1)$$

여기서,  $m = \text{floor}\left(\frac{\text{Distance}(A, B)}{\text{Sample Resolution}}\right)$   
 $\vec{n} = (B - A) / m$   
 $i = 1, \dots, m$

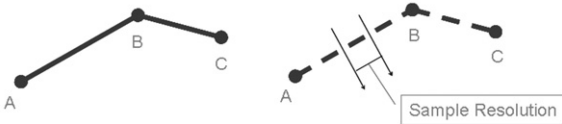


그림 2. 폴리라인과 샘플링

### 2.2 2D 수치지형도를 이용한 보정

2D 수치지형도에서 높이 정보는 등고선과 표고점 레이어에서 취득할 수 있으며, 많은 지형지물 레이어에서 수평위치를 참고할 수 있다(그림 3). 특히 불연속선(break line)을 형성하는 건물, 다리, 제방, 벽 등은 2D 정보만으로도 정확한 수평 구분 정보를 제공할 수 있다. 2D 수치지형도가 제공하는 표고값은 지표면(surface) 표고값이 아니고 지면 표고값이기 때문에 항공라이다 데이터의 표고값과 일치하지 않을 수 있다. 따라서, 표고 정보대신에 선분의 방위각을 이용하여 매칭점을 찾는다.

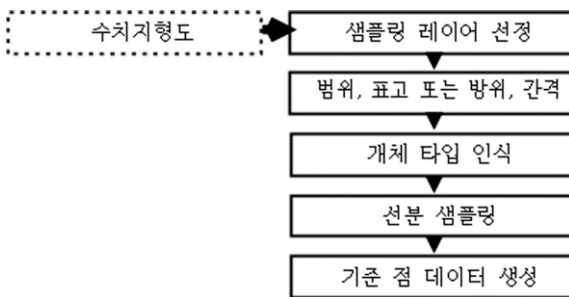


그림 3. 수치지형도 기준 점데이터 생성

방위점 데이터를 생성하기 위하여 항공라이다 데이터를 2D TIN으로 구성하고, 각 에지의 경사와 방위를 쉽게 구할 수 있다. 항공라이다 데이터에서 생성된 TIN의 각 삼각형은 평면을 구성하며, 각 평면의 경사방향(aspect)을 이용하여 건물이나 주요 지물을 추출하는 연구가 수행되었다(그림 4). 본 연구에서는 각 삼각형의 경사를 이용하여 건물 경계 후보 지역을 찾고, 후보 삼각형의 에지 중에서

건물 경계 후보선을 추출하였다. 추출된 후보 에지의 높이차가 일정 크기 이상인 에지에 대하여 방위각을 계산하였다. 각 에지를 구성하는 두 점에 동일 방위각을 부여하며, 모든 에지에 대하여 이와 같은 연산을 수행하여 방위각 점데이터(X,Y,Azimuth)를 생성하였다. 따라서, 한 점에 대하여 여러 개의 방위각이 존재할 수 있으며, 이러한 값들과 수치지형도에서 샘플링된 방위각 점데이터와의 거리가 임계거리 이내이면 각 쌍을 매칭후보쌍으로 가정한다.

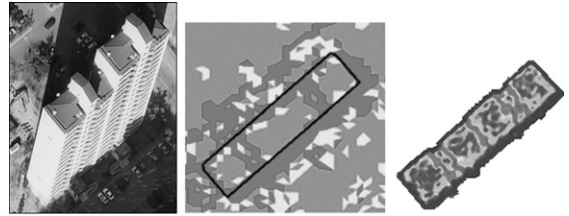


그림 4. 건물과 경사

점  $A(x_1, y_1, z_1)$ ,  $B(x_2, y_2, z_2)$ ,  $C(x_3, y_3, z_3)$ 로 이루어진 삼각형의 방향벡터  $\overline{BA}$ ,  $\overline{CA}$ 의 외적을 이용하여 법선벡터  $\vec{n}$ 을 구할 수 있다. 법선벡터의 z성분을 1로 정규화한 벡터로부터 삼각면의 경사  $\phi$ 를 식 (3)과 같이 계산한다.

$$\vec{n} = \overline{BA} \times \overline{CA} \Rightarrow \begin{bmatrix} n_r \\ n_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{n_r^2 + n_c^2}}\right) \quad (3)$$

삼각형 ABC의 경사가 임계값(실험에서 45°) 이상이면 각 에지에 대하여 방위  $\lambda$ 를 계산한다. 식 (4)는 에지  $\overline{CA}$ 의 방위각을 구하는 식이다. 분할을 목적으로 래스터 데이터에서 8개의 주위화소에 대하여 동일 그룹 여부를 판단하는 것과 마찬가지로, 2D TIN에서는 임의점과 삼각형으로 연결되는 모든 점에 대해 동일 그룹 여부를 판단할 수 있다. 동일 그룹 여부를 결정하는 속성값은 경사, 방위 등이 있으며, 이를 각 점에 부여하기 위하여 식 (5)을 적용할 수 있다. 하지만 점을 구성하는 모든 에지에 대하여 평균이나 중앙값 등의 대표값을 적용하면 고유한 속성 정보를 잃어버리게 된다. 따라서 각 에지는 개별 방위각마다 고유한 점정보를 보유한 상태로 방위각 정보를 이용하여야 한다.

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{x_1 - x_3}{y_1 - y_3}\right) \quad (4)$$

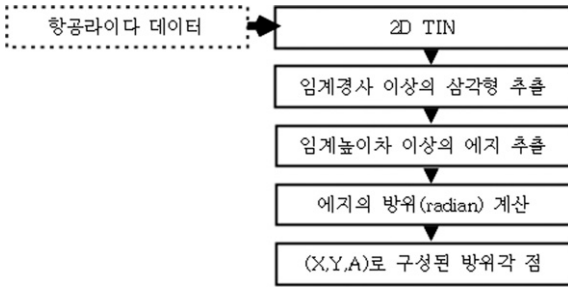


그림 5. 방위각 점데이터 생성

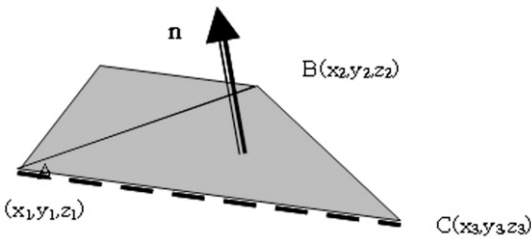


그림 6. 삼각형의 법선벡터

경사(또는 방위) = (인접 삼각형의) 대표 경사  
(또는 방위) (5)

방위각은  $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 의 값을 가지기 때문에, 인접공간에 X와 Y의 변화량보다 훨씬 크게 변화한다. 이와 같이 대응 방위각 점의 탐색에서 도단위 방위각은 수평거리보다 과도한 영향을 미치므로, 방위각을 적절하게 정규화할 필요가 있다. 항공라이다 데이터의 점밀도가 0.5~4.0일 때, 점간 평균 거리는 1.4~0.5m이고, 방위각을 라디안(radian) 단위로 표현하면, -1.57~1.57의 범위의 값을 가지며, 45도 방위각 차이는 1.0의 차이로 나타나므로 수평방향의 거리와 라디안 방위각 차이는 유사한 크기로 영향을 준다. 따라서 라디안 방위각으로 정규화하여 보정에 이용하였다.

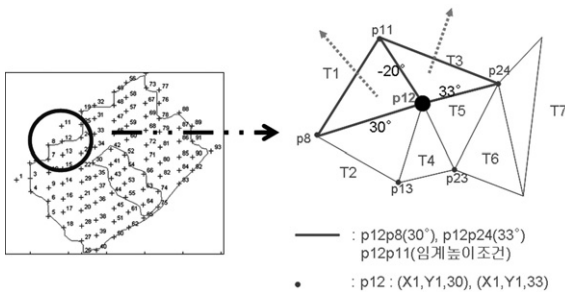


그림 7. 방위각 점데이터의 생성

그림 7에서 점 p12에 대한 방위각 점데이터는 경사조건을 만족하는 삼각형 T1과 T3에서 추출될 수 있다. T1과 T3의 5개 에지 중에서 점 p12를 포함하고 높이 변화 조건을 만족하는  $p_{12}p_8$  과  $p_{12}p_{24}$  에지가 방위각 점데이터를 형성한다. 수치지형도에서 추출된 방위각 점데이터와 항공라이다 데이터의 TIN에서 생성된 방위각 점데이터로부터 대응점을 탐색하여 수평방향 절대보정량을 계산한다. 점군 데이터에 ICP 알고리즘을 적용할 때, 기존 알고리즘들은 X와 Y외에 세 번째 속성정보로 Z, 컬러, 곡률, 반사강도 등을 이용하였지만, 본 연구에서는 방위각 정보를 속성정보로 이용하는 수정된 ICP 알고리즘을 제시하였다. 특히, 방위각 정보는 영상의 에지에서 쉽게 유도할 수 있기 때문에 영상의 보정이나 매칭에도 활용될 수 있다.

수평위치가 조정되었다는 가정하에, 동일 수평위치에 있는 기준점 표고와 대응되는 항공라이다 데이터의 표고점 차이를 비교하였다. 보정 영역이 넓지 않은 경우에 높이차를 상수로 가정하고, 평균 또는 중앙값 등의 통계량을 이용하여 데이터를 Z축 방향으로 이동하여 보정할 수 있다. 대상지역이 넓은 경우에는 매칭점간의 공간적 높이차 분포를 분석하여 2차원 함수로 보정식을 세울 수 있다.

### 3. 실험 데이터

2D 수치지형도와 3D 도화 수치지형도의 이용가능성에 따라 두 가지 실험을 수행하였다. 우선 분당 일부 지역에 대하여 3D 수치지형도를 기준으로 항공라이다 데이터의 절대보정을 수행하였다. 이 지역은 가로 800m × 세로 800m 범위의 수내동·정자동 일원의 도심지역으로 캐나다 Optech 사의 ALTM1020 장비를 사용하여 데이터가 취득되었다. 총 28개의 비행경로에서 관측이 수행되었으며, 획득된 모든 데이터의 점밀도는 2.8점/㎡이고, 평균 점간격은 약 0.6m이다. 개별 스트립의 점밀도는 약 0.31점/㎡이고, 주사방향과 비행방향의 평균 점간격은 각각 약 1.82m, 약 1.78m이다. 본 연구에서는 28개 스트립 중에서 비교적 중복도가 높은 1, 2, 18, 19, 20, 28번 6개 스트립을 이용하였다.

두 번째, 대전 일부 지역에 대하여 2D 수치지형도를 기준으로 항공라이다 데이터를 절대보정하였다. 대상지역은 가로 600m × 세로 1,200m의 도심이며, 데이터 취득에 Optech 사의 ALTM 3070이 사용되었다. 약 120여개의 스트립 데이터 중에서 10, 14, 15번 스트립을 실험에 사용하였다. 개별 스트립의 점밀도는 약 2.8점/㎡내외로 평균 점간격은 0.6m이다.

### 4. 3D 수치지형도를 이용한 스트립 보정

#### 4.1 수치지형도 데이터 샘플링

본 실험에서는 분당 지역의 1:1,000 도화지도를 기준 데이터로 사용하고, 동일 지역의 항공라이다 데이터를 보정하였다(표 1, 표 2). 3D 수치데이터는 X, Y, Z 좌표를 가지고 있기 때문에, 샘플링된 점데이터를 직접 보정에 사용할 수 있지만, 분당 데이터의 경우에 두 데이터의 기준 좌표계가 다르기 때문에 보정 전에 기준 데이터의 변환을 수행할 필요가 있다. 특히 두 데이터의 높이 기준이 지오이드와 타원체로 다르기 때문에 이를 좌표변환 과정에서 고려하여야 한다(표 2).

표 1. 데이터 취득 장비의 제원

	ALTM 1020	ALTM 3070
측량가능고도	330~1000m	200~3000m
표고정확도(1σ)	±15cm 이상	±15cm@1200m ±25cm@2000m ±35cm@3000m
평면위치정확도 (H: 측량고도)	H/1000	H/2000
주사각	0~±20°	0~±25°
관측폭	0~0.68H (H: 측량고도)	0~0.93H
Laser 반복율	100~5000 Hz	70 KHz
Beam diverg.	0.3 mrad	-
Laser 분류	Class 4	-

표 2. 사용된 항공라이다 데이터의 제원

	분 당	대 전
측정기기	ALTM1020	ALTM3070
측량고도	800m(지표면기준)	200~3,000m
Repetition Rate	5,000 Hz	-
주사각	± 9°	0 ~ ±25°
Scan Rate	18 Hz	-
지상 관측폭(m)	253	3,272×1,603
점밀도(m <sup>2</sup> )	전체 2.8점, 스트립 0.4점	스트립 2.8점

지오이드고를 참조하기 위하여 국립해양조사원에서 개발된 Nori-05를 이용하였다. 전국 121개 수준점에서 측정한 GPS/Levelling 지오이드와 비교한 결과, Nori-05 지오이드 모델의 RMS 오차는 0.132m이고 최대차이가 ±0.3m

이내에 분포하는 것으로 알려져 있다(해양수산부, 2005). Nori-05 소프트웨어에 경위도 좌표를 입력하면 해당 지역의 지오이드고를 계산하므로, 실험에 사용된 수치지형도를 포함하는 사각형의 네 꼭지점을 계산하고 각각의 지오이드고를 산출하였다. 그리고, 네 꼭지점의 지오이드고 평균값인 24.254m를 보정값으로 실험에 사용하였다.

표 3. 분당지역 수치지형도와 항공라이다 데이터의 좌표계

	수치지형도	항공라이다 데이터
원 점	동경	WGS84
투영방법	TM	UTM
투영원점	중부원점	동경 129°
높이 기준	지오이드	WGS84 타원체

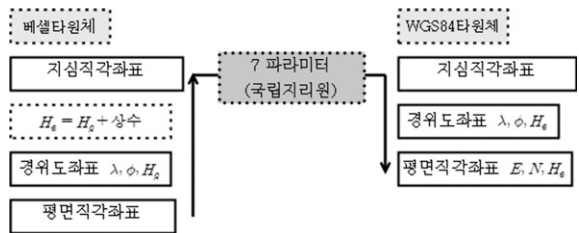


그림 8. 분당 기준 점데이터의 좌표변환

표 4. 분당 실험지역의 네 모서리 위치에서 산출된 정표고

	위 도	경 도	정표고
좌하단점	127.0980	37.3574	24.222
좌상단점	127.0980	37.3824	24.190
우하단점	127.1263	37.3574	24.321
우상단점	127.1263	37.3824	24.282

좌표변환 프로그램은 Matlab으로 코딩하였으며, 국토지리정보원의 좌표변환 프로그램인 GDKtrans를 개발과정에 사용된 기준점을 이용하여, 직접 코딩한 좌표변환 프로그램의 정확도를 검증하였다. 정확도를 평가한 결과, 개발된 프로그램은 수 cm 이내의 오차를 나타내었다.

#### 4.2 항공라이다 데이터의 보정

분당지역 28개의 스트립 중에서 스트립 1번, 2번, 18번, 19번, 20번, 28번의 6개 스트립을 실험에 사용하였다. 이 6개의 스트립에 대하여 X의 범위가 327,000~335,000인 점을 선택하였다(그림 9). 스트립간의 조정량을 계산하기 위하여, 먼저 ICP 알고리즘으로 이동변환량을 추정하고, 극

단화소비 알고리즘으로 X, Y, Z,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$  인자를 추정하였다.

스트립 중에서 하나의 주 스트립을 선택하고, 나머지 스트립을 주 스트립에 차례대로 연결시켜 모든 스트립을 조정하였다. 스트립간의 중복 여부를 판단하고, 중복 스트립간에 중복 데이터 점수를 계산하여 각 스트립별로 총 중복점수를 산정하며, 총 중복점수가 가장 높은 스트립을 주 스트립으로 선택하였다. 주 스트립과 가장 많이 겹치는 부 스트립을 선택하여 이들을 조정하였으며, 조정량을 적용하여 두 스트립을 결합하였다. 결합된 스트립을 다시 주 스트립으로 지정하고 나머지 스트립 중에서 중복 점수에 따라 부 스트립으로 지정하여, 모든 스트립을 결합할 때까지 이 과정을 반복한다. 실험에서 스트립 결합 순서는 다음과 같다.

<스트립의 결합 순서>

- ① 주스트립(2)와 부스트립(18)을 찾아 결합 스트립 생성
- ② 결합스트립에 부스트립(28)을 찾아 결합 스트립 생성
- ③ 나머지 스트립(1, 19, 20)을 차례대로 상대조정하여 결합 스트립 생성

모든 스트립이 결합되어 상대조정된 항공라이다 데이터와 수치지형도에서 샘플링된 점 데이터간의 보정은 ICP 알고리즘을 이용하여 수행하였다.

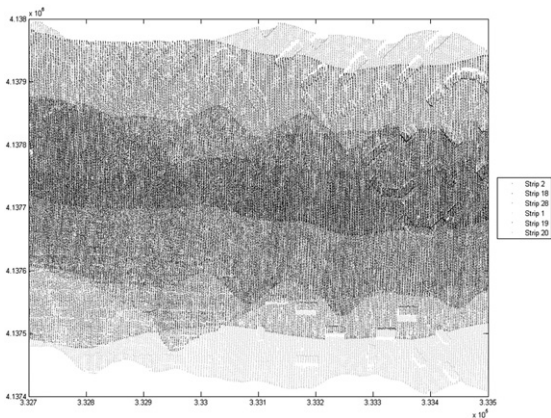


그림 9. 대상지역의 항공라이다 스트립 데이터(분당)

### 4.3 정확도 평가

보정전후에 정확도를 확인하기 위하여 건물이 포함된 소지역에 대하여 보정 전 항공라이다 데이터와 수치지형도를 중첩시켰다(그림 10). 그림에서 건물 경계를 살펴보면, 보정 후에 항공라이다 데이터의 위치정확도가 향상된

것을 시각적으로 쉽게 확인할 수 있다.



(a)보정 전



(b)보정 후

그림 10. 항공라이다 데이터와 수치지형도의 보정 전·후 중첩

보정 정확도를 평가하기 위해 항공라이다 데이터와 수치지형도를 샘플링한 점 데이터에서 대응점으로 판단할 수 있는 12개의 검사점을 이용하였다(표 5). 보정전후에 검사점에 대한 RMSE(root mean square error)는 2.82m에서 0.77m로 향상되었다. 최대오차는 X, Y, Z 방향으로 보정 전 2.53m, 1.5m, 2.67m에서 보정 후 각각 0.83m, 0.39m, 1.27m이었으며, Z 방향의 오차 및 RMSE가 가장 크게 나타났다. 이렇게 낮은 수직위치 정확도는 좌표변환 과정에서 발생하는 오차와 정확히 동일한 점이 아닌 대응점을 검사점으로 사용해서 발생하였으리라 여겨진다. 본 연구에서 수행한 결과는 지상기준점을 이용하여 동시조정된 보정 정확도에는 미치지 못하지만 원래 항공라이다 데이터가 가지고 있는 정확도에 비해 많이 향상되었음을 알 수 있다.

그림 11과 그림 12는 수치지형도 기준점(화살표 끝)에

대한 보정 전후의 오차벡터를 100배 확대하여 그린 것이다. 보정전 데이터에 일정한 방향으로 오차가 형성되어 있다는 것을 알 수 있으며, 보정 후 이런 경향은 사라졌다. 보정 후 오차벡터에서, 평면 시점의 경우 점밀도가 낮은 아랫부분에서 오차가 크다는 것을 알 수 있으며, 수직 시점의 경우 높은 점과 낮은 점의 오차 경향이 반대로 나타났다.

표 5. 절대보정 정확도 평가

	보정 전				보정 후			
	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta D$	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\Delta D$
1	1.52	1.02	1.32	2.26	0.20	0.19	0.07	0.28
2	1.82	0.79	1.83	2.69	-0.09	0.39	-0.43	0.59
3	1.61	1.50	1.31	2.56	0.10	-0.35	0.07	0.38
4	2.05	1.10	2.51	3.43	-0.31	-0.01	-1.12	1.17
5	2.02	1.33	2.32	3.35	-0.27	-0.26	-0.92	0.99
6	2.34	1.22	0.63	2.71	-0.59	-0.18	0.75	0.98
7	1.34	0.97	2.67	3.14	0.38	0.03	-1.27	1.32
8	2.54	1.28	1.96	3.45	-0.83	-0.27	-0.58	1.06
9	1.93	1.11	1.29	2.57	-0.26	-0.10	0.05	0.29
10	1.43	1.24	1.21	2.24	0.20	-0.23	0.13	0.34
11	1.68	1.42	1.48	2.65	-0.04	-0.32	-0.13	0.35
12	1.30	1.28	1.50	2.36	0.37	-0.12	-0.13	0.41
평균	1.80	1.19	1.67	2.78	-0.10	-0.10	-0.29	0.68
최대	2.54	1.50	2.67	3.45	0.83	0.39	1.27	1.32
RMSE	1.84	1.20	1.77	2.82	0.37	0.24	0.64	0.77

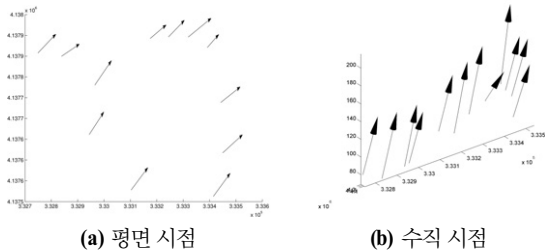


그림 11. 검사점에 대한 보정 전 오차 벡터

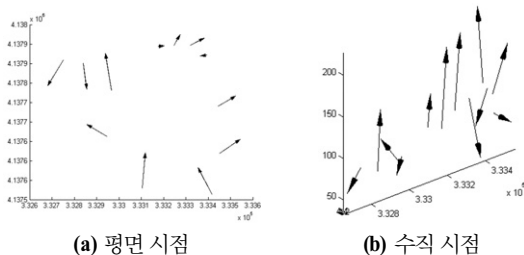


그림 12. 검사점에 대한 보정 후 오차 벡터

## 5. 2D 수치지형도를 이용한 스트립 보정

### 5.1 수치지형도 데이터 샘플링

2D 수치지형도를 이용하여 항공라이다 데이터를 보정하기 위하여 개체의 방위각과 표고를 샘플링하였다. 방위각 점데이터는 불연속선 개체의 에지를 샘플링하여 취득하였으며, 표고 점데이터는 등고선과 표고점을 샘플링하여 생성하였다.

실험 대상지역은 대전 도심지역으로 1:1,000 수치지형도를 이용하였다. 사용된 수치지형도는 베셀타원체, 동경원점, 지오이드 높이 기준으로 제작되어 있지만, 항공라이다 데이터가 GRS80 타원체, 지오이드 높이 기준을 가지고 있기 때문에, 국토지리정보원에서 배포한 변환 프로그램인 1000GDKTrans을 이용하여 GRS80 타원체로 변환하였다.

2D 수치지형도를 이용한 항공라이다 데이터 보정에는 먼저 수평보정을 수행하고, 이후 수직보정을 수행하였다. 실험에서는 수평보정을 위한 불연속선 정보로 건물 경계선의 방위각을 사용하였다. 1:1,000 수치지형도에서 건물 레이어는 AAA001(일반주택), AAA002(연립주택), AAA003(아파트), AAA004(무벽건물), AAA005(온실), AAA006(공사중 건물), AAA007(가건물), AAA008(빌딩: 주택외 건물)의 코드값으로 설정되어 있다. 수직보정을 위한 등고선과 표고점의 경우 해당 레이어를 참조하여 읽어 들어서 표고 점데이터를 생성하였다(그림 13). 각 건물의 레이어를 읽는 과정에서 선분의 평면위치와 방위각을 계산하여 방위각 점데이터를 생성하였다(그림 14).

표 6. 대전지역 수치지형도와 항공라이다 데이터의 좌표계

	수치지형도	항공라이다 데이터
원 점	동경	GRS80
투영방법	TM	TM
투영원점	중부원점	중부원점
높이 기준	지오이드	지오이드

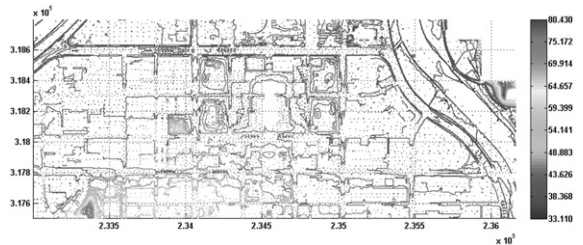


그림 13. 대전 1:1,000 수치지형도의 표고 정보

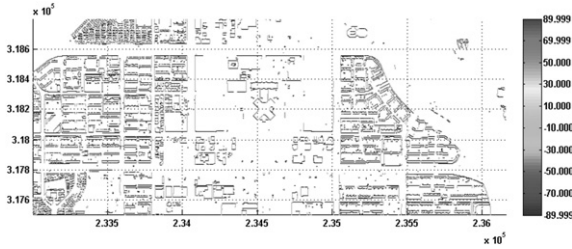


그림 14. 대전 1:1,000 수치지형도의 건물에 대한 방위각 점데이터

### 5.2 항공라이다 데이터의 보정

대전지역의 항공라이다 데이터 중에서 10번, 14번, 15번 스트립을 조정하여 수치지형도를 기준으로 보정하였다. 3개 스트립간의 상대조정을 수행하기 위하여 10번 스트립을 주스트립으로 하여, 14번, 15번 부스트립을 차례대로 주스트립에 조정결합하였다.

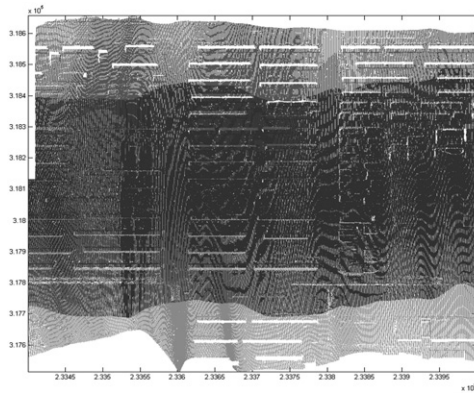


그림 15. 대상지역의 항공라이다 스트립 데이터(대전)

조정된 항공라이다 데이터는 방위각 점데이터를 기준으로 수평위치를 보정하고, 표고 점데이터를 기준으로 수직위치를 보정하였다. 수평위치 보정은 ICP 알고리즘을 이용하고, 수직위치 보정은 중앙값을 이용하였다. ICP 알고리즘에 입력되는 점 데이터는 평면위치와 방위각 정보로 이루어져 있다.

수직위치 중앙값은 0.12m였다. 그림 16은 수직위치 보정값과 표고 점데이터간의 최단거리 매칭쌍을 찾아, 매칭쌍간의 높이차를 나타낸 것이다. 아파트 또는 단독 주택 지역의 높이차는 작고, 나대지의 부분은 높이차가 큰 경향을 보이는 등 지역적인 경향성이 일부 나타나고 있다. 항공라이다 데이터에 미리 DTM 생성시에 이루어지는 노이즈 제거와 같은 처리를 수행하고 높이차 분석을 수행하면, 높이차 경향을 더욱 확실하게 파악할 수 있을 것이다.

높이차에 대한 히스토그램은 정규분포와 유사한 분포 형태를 나타내고 있다(그림 17).

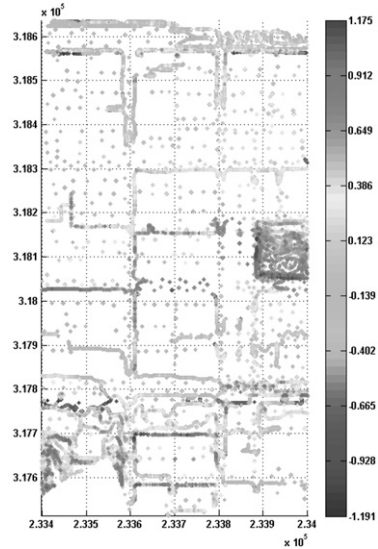


그림 16. 수직보정에 사용된 대응쌍의 높이차 분포

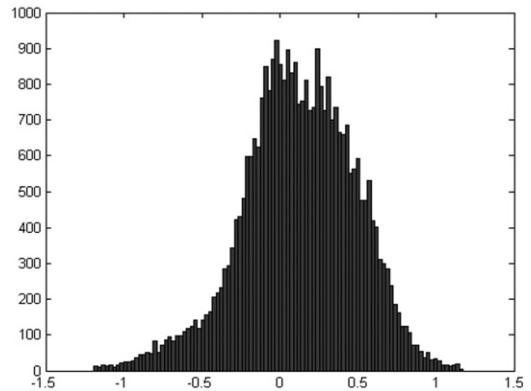


그림 17. 수직보정에 사용된 수직 대응쌍의 높이차 히스토그램

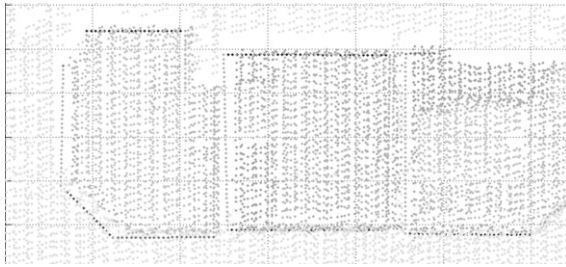
### 5.3 정확도 평가

보정 전후의 평면위치 정확도에 대한 향상 여부를 알아보기 위해 그림 18과 같이 방위각 점데이터와 항공라이다 데이터를 중첩시켰다. 그림 18 (a)에서 보정 전 데이터간에 X축 방향으로 상대오차가 크게, Y축 방향으로 상대오차가 작게 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그림 18 (b)의 보정 후 중첩 그림에서, X축 및 Y축 방향으로 상대오차가 유사한 정도로 작아진 것을 볼 수 있다.

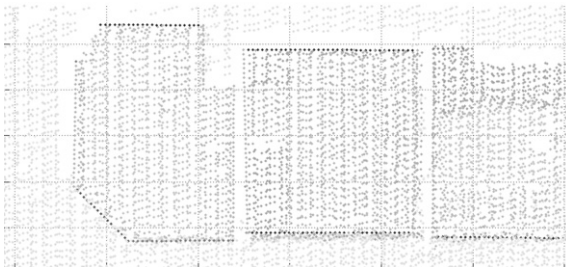
보정 전후의 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 건물 모서리로 여겨지는 검사점을 관측하였다. 보정전 검사점



과 보정후 검사점의 수평위치 정확도 평가는 표 7과 같다.



(a)보정 전



(b)보정 후

그림 18. 표고점과 기준자료 건물 외곽선의 보정 전·후 비교

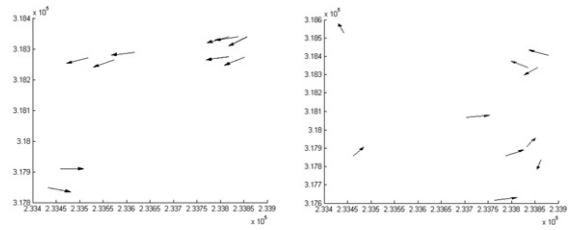
표 7. 수평위치 보정 전·후 정확도 평가

	보정 전		보정 후	
	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$
1	2.13	0.51	0.65	-0.61
2	1.25	0.51	0.17	0.25
3	1.01	0.81	0.42	-0.28
4	1.54	0.57	0.24	-0.95
5	0.75	0.39	-0.30	-0.05
6	1.09	0.17	-0.09	-0.22
7	0.72	0.44	-0.37	-0.80
8	1.04	0.23	-0.36	-0.31
9	-0.76	0.21	0.05	0.33
10	-0.52	-0.00	-1.03	-0.28
평균	0.83	0.38	-0.06	-0.29
최대	2.13	0.81	1.03	0.95
RMSE	1.17	0.44	0.46	0.49
RMSE(수평)	1.25		0.67	

보정 전후 검사점에서 수평위치 RMSE는 1.25m에서 0.67m로 향상되었다. 최대오차는 보정 전 X 방향으로 2.13m에서, 보정 후 1.03m로 작아졌으며, X 방향 RMSE도 1.17m에서 0.46m로 작아졌다. Y 방향 오차가 일부 개선된 것을 시각적으로 확인할 수 있었지만, 검사점 평가에서 Y

방향 오차는 보정 전후에 유사하였다. 검사점에서 오차가 감소되지 않은 이유는 조정된 항공라이다 데이터의 Y 방향에서 지역적 불안정성이 커서, 절대 보정에 영향을 끼친 것으로 여겨진다.

그림 19는 수치지형도 기준점(화살표 끝)에 대한 보정 전후 검사점의 오차벡터를 50배 확대하여 그린 것이다. 보정 전에는 스트립에 포함된 오차의 방향성이 드러났지만, 보정 후에는 방향성이 약해진 것을 알 수 있었다. 오차 벡터의 크기도 작아진 것을 확인할 수 있었다.



(a)보정 전

(b)보정 후

그림 19. 검사점의 수평위치 보정 전·후 오차벡터

## 6. 결론

본 연구에서는 항공라이다 데이터 스트립의 반자동의 절대보정 방법을 제안하였다. 항공라이다 데이터를 절대 보정하기 위하여 수치지형도를 샘플링한 점데이터를 기준으로 ICP 알고리즘을 적용하였다. 입력되는 수치지형도를 2차원 수치지형도와 3차원 도화지도로 구분하여 다른 보정 과정을 사용하였다. 2차원 수치지형도가 입력되는 경우, 수평보정과 수직보정으로 나누어 보정을 수행하였다. 건물 경계선에 대한 방위각 점데이터를 사용하여 수평위치를 보정하고, 표고 점데이터를 사용하여 수직위치를 보정하였다. 3차원 도화지도가 입력되는 경우에는 모든 개체를 점 데이터로 변환하여 수평보정과 수직보정을 동시에 수행하였다. 2차원 수치지형도를 이용한 보정 실험에서 정확도 평가 결과, 보정 전 1.25m에서 보정 후 0.67m로 수평 RMSE를 감소시켰으며, 3차원 수치지형도를 이용한 보정실험에서 RMSE를 보정 전 2.82m에서 보정 후 0.77m로 감소시켰다.

본 연구를 통하여 수치지형도를 기준 데이터로 사용하여 항공라이다 스트립에 대하여 절대오차를 자동으로 보정할 수 있었으며, 항공라이다 데이터의 활용성 및 범용성을 높일 수 있게 되었다. 추가적인 연구 과제로 자동 상대조정에 적합한 스트립간 변환 모델식을 파악하고 적용

모델을 개발해야 할 것이다. 또한 2차원 수치지형도를 이용한 절대보정에서 항공라이다 데이터의 3D 좌표값과 반사강도 값을 동시에 활용하여 기준점 생성에 사용될 개체로서 건물 이외의 다른 지형지물을 적용할 수 있는 방안 에 대한 연구도 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0025564)

### 참고문헌

국토지리정보원 지리정보과 (2005), 국가기본도 수정 작업 지침서.

해양수산부 (2005), 정밀 지오이드 모델 구축에 관한 연구.

이병길 (2001), 대축척 DSM 제작을 위한 항공레이저측량 데이터의 보정에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교.

이상훈, 이병길, 김진광, 김창재 (2009), 산림지역에서 LiDAR 측량의 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 제 5호, pp. 545-553.

이원춘, 위광재, 정태준, 권오섭 (2011), 항공라이다데이터 정표고 변환을 위한 정밀지오이드 모델 이용, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 29권, 제 4호, pp. 351-357.

Besl, P. and McKay, N. (1992), A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transaction on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, IEEE, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256.

Crombaghs, M. J. E., Brugelma, R. and Min, E. J. (2000), On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, Amsterdam, ISPRS, the Netherlands, Vol. 33, part B3/1, pp. 230-237.

Filin, S. and Vosselman, G. (2004), Adjustment of airborne laser altimetry strips, *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Istanbul, Turkey, Vol. 35, part B3, pp. 285-289.

Kager, H. and Kraus, K. (2001), Height discrepancies between overlapping laser scanner strips - simultaneous fitting of aerial laser scanner strips, *In Fifth Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, ISPRS, Vienna, Austria, pp. 103-110.

Lee, J., Yu, K., Kim, Y. and Habib, A. F. (2005), Segmentation and extraction of linear features for adjustment of discrepancies between ALS data strips, *In IEEE Proceedings IGARSS 2005*, IGARSS, Seoul, Korea, Vol. 7, pp. 4954-4957.

Maas, H. (2000), Least-squares matching with airborne laser-scanning data in a TIN structure, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 33, Part B3, Amsterdam, 2000, pp. 548-555.

Pfeifer, N. (2005), Airborne laser scanning strip adjustment and automation of tie surface measurement, *Boletim de Ciências Geodésicas*, Universidade Federal do Paraná, Vol. 11, No. 1, pp. 3-23.