

# 시스템 초기화(Calibration)에 따른 항공레이저측량의 정확도 평가 The Evaluation of Accuracy for Airborne Laser Surveying via LiDAR System Calibration

이대희<sup>1)</sup> · 위광재<sup>2)</sup> · 김승용<sup>3)</sup> · 김갑진<sup>4)</sup> · 이재원<sup>5)</sup>

Lee, Dae Hee · We, Gwang Jae · Kim, Seung Young · Kim, Gab Jin · Lee, Jae Won

<sup>1)</sup> 한진정보통신(주) GIS기술팀, dhlee@hist.co.kr

<sup>2)</sup> 한진정보통신(주) GIS기술팀, 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, giwe@hist.co.kr

<sup>3)</sup> 한진정보통신(주) GIS기술팀, 세종대학교 지구과학과 박사과정, sykim@hist.co.kr

<sup>4)</sup> 한진정보통신(주) GIS기술팀장, 공학박사, gjkim@hist.co.kr

<sup>5)</sup> 대한측량협회 측량정보산업연구원 연구위원 겸 심사부장, 공학박사, jwlee@kasm.or.kr

## Abstract

The calibration for systematic error in LiDAR is crucial for the accuracy of airborne laser scanning. The main error is the misalignment of platforms between INS(Inertial Navigation System) and Laser scanner. For planimetric calibration of LiDAR, the building is good feature which has great changes in height and continuous flat area in the top. The planimetry error(pitch, roll) is corrected by adjustment of height which is calculated from comparing ground control points(GCP) of building to laser scanning data. We can know scale correction of laser range by the comparison of LiDAR data and GCP is arranged at the end of scan angle where maximize the height error. The area for scale calibration have to be large flat and have almost same elevation. At 1000 m for average flying height, The Accuracy of laser scanning data using LiDAR is within  $\pm 10\text{cm}$  in height and  $\pm 50\text{cm}$  in planimetry so we can use laser scanning data for generating 3D terrain surface, especially digital surface model(DSM) which is difficult to measure by aerial photogrammetry in forest, coast, urban area of high buildings

## 1. 서 론

최근 측량 기술의 발달과 컴퓨터 그래픽 기술의 발달로 인하여 공간 객체에 대한 입체적 분석이 가능해졌으며, GIS산업에서도 3차원 공간정보의 활용이 다양화 되고 있는 실정이다.

3차원 공간정보는 지상 위에 존재하는 모든 객체와 지형을 함께 나타내는 DSM(Digital Surface Model)과 지상위의 3차원 객체를 제거하고 순수한 지형으로만 구성된 DEM(Digital Terrain Model)으로 구분할 수 있다. 3차원 공간정보의 취득 방법에는 다양한 측량 기술이 이용되고 있으며, 최근에는 LIDAR(Light Detection and Ranging)를 이용한 항공레이저측량을 통해 지상위의 공간객체 및 건물의 외형을 나타내는 3차원 좌표를 쉽게 취득할 수 있게 되었다. 항공레이저측량 데이터는 높은 정확도를 갖으며, 특히 해안선이나 산악지와 같이 접근이 용이하지 않은 지역의 DEM 구축 및, 고층건물이 밀집한 도심지역의 3차원 모델 제작에 효과적이라고 알려져 있다.

항공레이저측량에 이용되는 LiDAR는 레이저 스캐너와 GPS/INS시스템으로 구성되어 있으며, LiDAR 데이터의 결과 정확도는 GPS/INS에서 제공되는 3차원 위치정보의 정확도에 크게 준한다. 따라서 LiDAR 장비를 사용하기 위해서는 GPS/INS와 레이저 스캐너의 오차요인을 제거하는 시스템 초기화(calibration) 과정이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 LiDAR 시스템을 초기화하고 그에 따른 항공레이저측량을 통하여 획득된 데이터의 정확도를 제시하고자 한다.

## 2. 항공레이저측량

### 2.1 개념

항공레이저측량은 LiDAR(Light Detection And Ranging) 시스템을 항공기에 장착하여, 레이저 펄스를 지표면에 주사하고 반사된 레이저파의 도달시간을 이용하여 반사체의 3차원 위치좌표를 계산해 낼 수 있다. LiDAR 시스템은 지형지물 및 구조물 측정 목적에 따라 레이저파가 반사되는 시간과 반사강도가 다르기 때문에 DSM 생성에 효과적이다. 또한 고해상도 영상과 결합되어 건물 및 도로 외곽선 등의 선형 추출이 용이하고, 광학영상에서는 추출이 어려운 3차원 위치정보를 쉽게 추출하여 고정밀 수치표고모델을 생성할 수 있다. 또한 항공레이저측량방법은 기존의 항공사진측량, 수치지도, 위성영상 등 타 방법에 비하여 상대적으로 정확도가 우수하며, 작업의 경제성 및 효율성 측면에서 우수하다고 알려져 있다.

항공레이저측량은 촬영고도, 레이저 펄스의 주사폭 및 주사주기, 레이저 펄스의 스캔주기(scanning frequency) 등의 조정을 통해 취득 자료에 대한 정확도 및 점밀도(point density)를 조정할 수 있다.

LiDAR 시스템은 크게 두가지 내부 시스템으로 구성된다. 하나는 지상의 공간객체와 항공기간의 거리를 구하는 레이저 스캐너와, 다른 하나는 레이저 센서의 절대적인 위치와 회전량을 측정하는 GPS/INS(Global Positioning System/Inertial Navigation System) 시스템이다.

항공레이저측량에 LiDAR 시스템을 이용하기 위해서는 시스템 초기화(Calibration) 작업이 필요하다. 시스템 초기화는 거리측정을 위한 실험실 관측 및 지상관측, 비행을 통해서 취득된 데이터를 이용하여, 레이저 센서와 INS 센서의 축간 회전량 차이 계산과 GPS 모호정수(ambiguity) 해를 통해 얻어진다. 레이저 데이터는 GPS 시간에 의해 시각 동기화되고 Calibration 변수를 적용하여 3차원좌표가 취득된다. 정확도는 검사점과 레이저 데이터의 거리 차이에 의한 평균값과 표준편차로 나타낼 수 있다. 그림 1은 항공 레이저 스캐너의 측량을 나타낸 것이다.

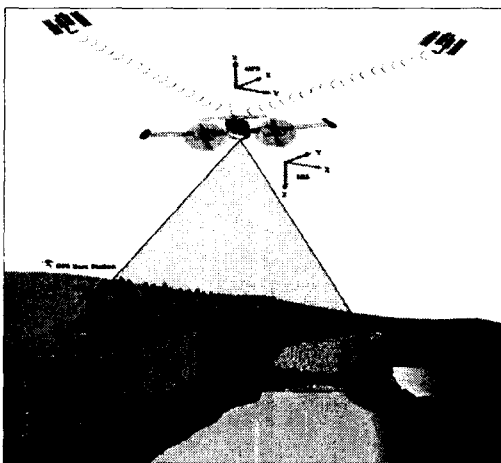


그림 1.  
항공레이저측량

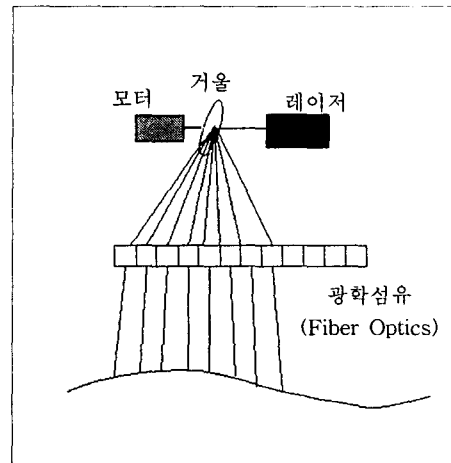


그림 2.  
레이저 라인(line) 스캐너의 원리

## 2.2 장비 구성

### 2.2.1 레이저 스캐너

레이저 스캐너는 지상의 지형·지물과 항공기간의 거리를 측정한다. 항공레이저측량의 초기에는 스캔 각이 0°로 고정된 레이저 스캐너를 이용하여 구축하였으므로 많은 측량시간이 필요하였으나 이러한 시스템은 특히 산림지역의 DEM을 구성하는데 높은 정확도를 보여주었다. 최근에는 높은 점밀도를 갖는

레이저 스캐너가 사용되는데 좌우로 움직이는 거울에 의해 일정한 주사폭을 갖는 레이저파가 광학섬유(fiber optics)를 통과해 지상으로 주사된다. 광학섬유는 서로 다른 각도로 배열된 광학센서의 배열로 구성되어 있다. 따라서 레이저 스캐너는 비행 방향과 동일한 방향으로 일정한 주사폭을 갖으며 레이저 펄스를 수신한다. 광학섬유는 비행기와 같은 이동체에서도 레이저 펄스의 방향을 안정화시킨다. 거울은 비행기의 비행 특성상 많은 움직임의 변형을 발생시키지만 광학섬유가 레이저파의 방향을 일정하게 고정시킨다. 그림 2는 레이저 스캐너에서 펄스를 주사하는 원리를 나타낸다.

레이저 스캐너는 DSM 생성에 적합한 기계적 특성을 가진다. 첫째, 지상위의 지형지물을 취득하기 위해서는 레이저의 파장영역이 지상을 투과하지 않아야 한다. 따라서 레이저 펄스는 근적외선 파장 영역을 사용한다. 또한 레이저파가 펄스(pulse) 형태로 주사되므로 동일한 물체에서 반사된 반사파가 최소 2개 이상으로 존재하며, 최후에 기록된 펄스(last pulse)를 실제 지표면으로 분류할 수 있다.

### 2.2.2 GPS/INS 시스템

레이저 스캐너는 레이저 펄스의 주사와 동시에 이미 그 3차원 위치가 결정되어야 한다. 따라서 이미 레이저 스캐너의 외부표정요소가 결정된 것이라고 할 수 있다. LiDAR 시스템에서 외부표정요소의 결정은 GPS/INS를 통해 가능하다. 기존에 항공사진측량을 수행하기 위해서는 반드시 지상측량이 수반되었으나, GPS/INS의 Calibration 과정을 마치면 지상 측량없이 사진의 외부표정요소를 결정할 수 있으므로 시간과 비용을 크게 절감할 수 있다.

GPS 수신기는 이동체의 절대적인 위치를 구해내며, INS는 회전요소 계산과 속도 및 위치를 계산한다. 이때, 회전요소 계산은 매 순간 변화하는 이동체의 회전량을 빠르고 정확하게 구해주며, 얻어진 회전량과 측정된 가속도를 이용하여 변화하는 동체의 위치를 구해낸다. 회전량을 구하는 관성장치를 자이로(gyro)라고 하고, 동체의 가속도를 측정하는 센서를 가속도계(accelerometer)라 한다. 시스템 하드웨어는 수신된 GPS 신호와 INS 신호를 조합하여 후처리 가능한 형태로 저장하고, 촬영당시의 카메라 노출 신호를 수신 및 저장, 장치 세팅과 각 센서의 상태를 모니터링할 수 있다.

### 2.3 시스템 초기화(LiDAR Calibration)

LiDAR 시스템의 에러를 발생시키는 요인으로는 크게 기계적 오차(systematic error)와 우연오차(random error)로 구분할 수 있다. 오차 요인의 분류는 표 1과 같다. 기계적 오차 중, 오차 발생의 주요 원인은 GPS/INS 시스템에서 발생하며, GPS/INS에서 취득되는 레이저 스캐너의 위치결정 정확도가 LiDAR의 최종 정확도에 큰 영향을 미친다. 따라서 가장 큰 오차요인은 레이저 스캐너와 INS의 좌표계의 축간 회전량 차이(misalignment)이다. 이러한 오차를 제거하는 방법은 항공레이저측량시, 측량 비행 노선의 중복을 통해 INS와 GPS의 정오차로 발생한 수평·수직 오차를 제거하는 방법이다.

표 1. LiDAR 시스템의 오차 요인 분류

| 기계적 오차                     | 우연 오차                      |
|----------------------------|----------------------------|
| 레이저 스캐너 기계오차               | 펄스의 탐지                     |
| 레이저 펄스의 지연                 | 점위치의 호트러짐(Pointing jitter) |
| INS 축의 불위치(misalignment)   | INS                        |
| INS gyro drift             | GPS                        |
| GPS 기선거리(기선거리가 > 30 km 일때) | 거친 지형                      |
| GPS 신호의 대류권 지연효과           | 반사력                        |
| 지형의 경사                     |                            |
| 식물                         |                            |

#### 2.3.1 Pitch Calibration

Pitch의 보정은 항공레이저측량시, 발생하는 Y축의 회전량 오차를 제거한다. 레이저 스캐너의 X축 방

향은 비행기의 진행방향과 동일하다.

보정 방법은 빌딩과 같이 높이값의 기복변위가 크며, 평평한 면이 존재하여 일정 구간에서는 기복변위가 일어나지 않는 공간객체를 보정 대상지역으로 삼는다. 스캔 주사폭을 0°로 측량하였을 경우, 빌딩 옥상위를 측량한 모든 LiDAR 데이터의 점들은 동일한 높이값을 가져야 한다. 측량된 LiDAR 데이터 중, 빌딩 옥상의 범위는 LiDAR 데이터의 높이값이 갑자기 변화하는 점들로 Calibration 영역의 시작지점과 끝점으로 잡는다. 또한 정확한 보정을 위해 건물의 모서리 부분을 실측하여 건물의 영역을 정의한다. 항공레이저측량시, 비행경로는 건물 위를 반드시 비행해야 하므로, 건물의 종축을 따라 비행하도록 설계한다. 그러한 예는 그림 4와 같다.

### 2.3.2 Roll Calibration

Roll의 보정은 항공레이저측량시, 발생하는 X축의 회전량 오차를 제거한다. 레이저 펄스가 일정한 주사폭으로 비행방향에 직교하게 좌우로 주사될 때, 레이저 펄스의 3차원 위치는 Y축의 회전량 변화에 크게 영향을 받는다. 따라서 Roll 보정을 위해서는 빌딩의 옥상면이 모두 측량 가능하도록 빌딩의 횡방향을 따라 항공레이저측량을 실시한다. 비행방향은 그림 5와 같다.

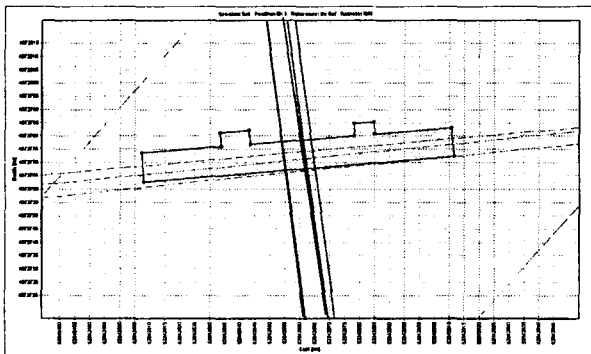


그림 4. Pitch Calibration 비행 방향

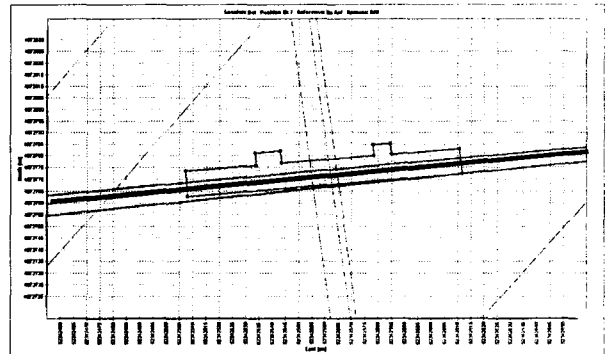


그림 5. Roll Calibration 비행 방향

### 2.3.3 Scale Calibration

Scale의 보정은 항공레이저측량시 발생하는 Z축의 회전량 오차를 제거한다. LiDAR 데이터 중, Z축의 회전량 오차는 레이저 스캔 주사폭의 양 끝에서 가장 크게 발생한다. 따라서 Scale 보정을 위해서는 넓고 평평한 대지에 항공레이저측량의 주사폭 만큼의 범위 안에 지상기준점 측량을 실시한다. 항공레이저측량을 위한 비행방법은 지상기준점 배치와 직교하는 형태로 반복 비행하고 또한 Z축으로 일정 변위를 조사하기 위해 지상기준점 배치를 따라 비행한다. 보정을 위해서는 취득된 모든 LiDAR 데이터가 지상기준점과 동일한 높이값을 가져야 한다.

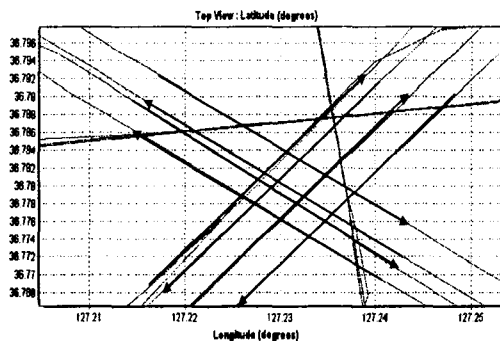


그림 6. Scale 보정을 위한 비행 방향

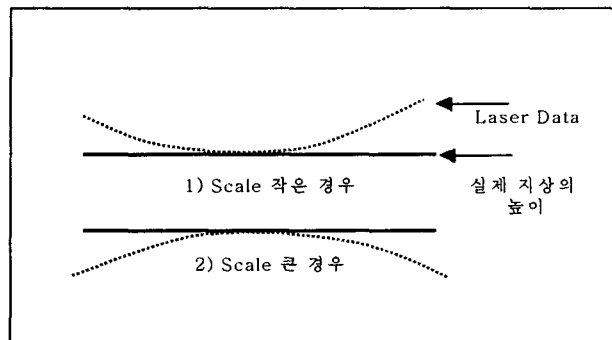


그림 7. Scale에 따른 Laser 데이터의 형태

### 2.3.4 그 외의 오차 요인

그 외의 오차로는 동일한 물체에 대해 first pulse와 last pulse의 거리차가 발생하는 offset 요인, 스캐너의 특성상 좌우 스캔각의 끝부분에서 거울을 움직이는 회전모터의 떨림 현상으로 발생 lag 등이 있는데, 본 연구에서는 LiDAR 시스템 제작시, 실험실에서 결정된 값을 사용하였다.

## 3. 항공레이저측량

LiDAR 시스템 초기화 작업과 정확도를 알아보기 위해, 천안 지역의 독립기념관 부근을 3회에 걸쳐 항공레이저측량을 실시하였다. 항공레이저측량 방법은 아래와 같이 수행하였다.

### 3.1 지상측량

LiDAR 시스템 초기화를 위해, 건물과 평평한 대지에 지상기준점 측량을 실시하였다. 건물은 천안 독립기념관 부근의 위치한 초등학교 건물이고, 대지는 독립기념관 내부에 존재한다.

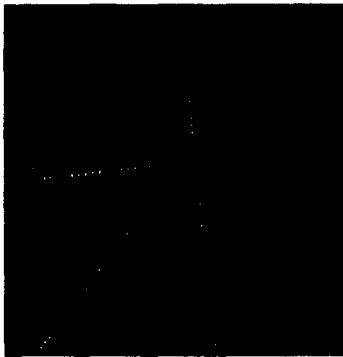


그림 8. Calibration 영역

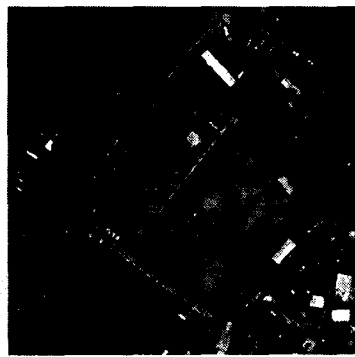


그림 9. Calibration 건물

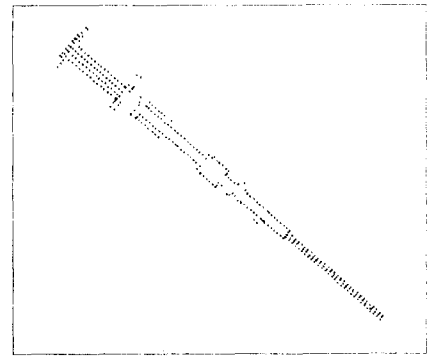


그림 10. Calibration Site의 지상측량점 배치도

건물의 크기는 가로·세로의 길이가 100×20m이며 건물 외곽선을 추출을 위해 모서리점 12점에 대하여 GPS 측량을 실시하였고, scale 보정을 위해서는, 970×30 m 크기의 평지와 같은 평탄한 면에 4점의 GPS 측량결과를 토대로 토달스테이션(total station)을 이용하여 340점의 3차원 위치좌표를 취득하였다. 그림 8은 측량 비행 노선에 따른 빌딩과 평지의 위치를 나타내며, 그림 10은 평지에 배치된 지상측량점의 형태를 나타낸다.

### 3.2 사용 장비

항공레이저측량을 위해 Optech사에서 제조한 ALTM 3070 이용하였고, 장비의 구체적인 사양은 표 2와 같다.

표 2. 항공레이저측량에 사용된 장비 사양

|         |  |
|---------|--|
| 비행 고도   | 200 ~ 3000m  |
| 평면 정확도  | 1/2000 X 고도(1σ)  |
| 높이 정확도  | < 15cm at 1200m(1σ)<br>< 25cm at 2000m(1σ)<br>< 35cm at 3000m(1σ)            |
| 반사 해상력  | 1cm 이상의 객체   |
| 반사파 감지력 | last pulse를 포함한 4 개의 반사파   |
| 반사 분해력  | 12 bit   |
| 스캔 주기   | 최고 70Hz  |
| 스캔각     | 0 ~ ±25°, ±1° 씩 증감   |
| 주사폭     | (0 ~ 0.93) × 비행고도  |
| 레이저 주사율 | 33kHz(최고 비행고도가 3km 이내)<br>50kHz(최고 비행고도가 2km 이내)<br>70kHz(최고 비행고도가 1.5km 이내) |

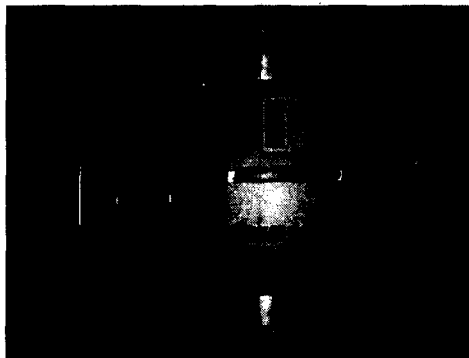


그림 11. 항공LiDAR 센서의 상단부



그림 12. 항공LiDAR 센서의 하단부

### 3.3 측량 비행

아래 그림은 항공레이저측량의 비행 노선을 나타낸다. 그림 13은 김포공항부터 천안까지 총비행노선이며, 그림 14는 천안 지역에서 측량된 비행노선을 나타내며, 그림 15는 LiDAR Calibration을 위해 건물 및 평지 부근

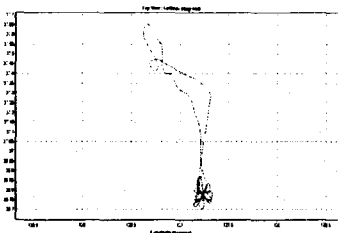


그림 13. 전체 비행 경로

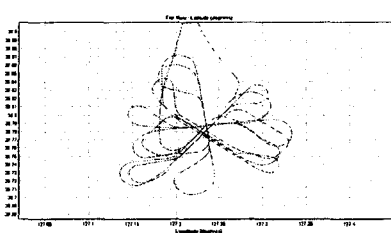


그림 14. 천안 지역

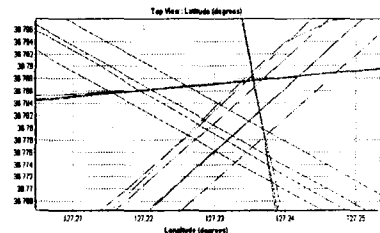


그림 15. 건물 및 평지 부근

촬영 당시 GPS 신호 수신 상태로는 PDOP이 최고 4 미만이고, 평균 위성수는 6개로 양호하였다.

## 4. 데이터 처리

### 4.1 GPS 후처리

비행 날짜에 따른 촬영노선의 GPS 후처리의 내용은 표 3.과 같으며, 각각 촬영당시에 지상에 GPS 기준점에 데이터를 동일시간대에 수신하였으며, 처리시 이용하였다.

표 3. GPS 후처리 내용

| 촬영일자               | 2004.02.28 | 2004.03.03 | 2004.03.04 |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 평균 GPS 기선 거리       | 6          | 5          | 5          |
| 최고 GPS 기선거리(km)    | 12         | 20         | 12         |
| 평균 PDOP            | 1.9        | 2.5        | 1.6        |
| 최고 PDOP            | 2.6        | 3.7        | 2.5        |
| 평균 GPS 위성의 수       | 8          | 6          | 7          |
| 최소 GPS 위성의 수       | 7          | 5          | 6          |
| 최고 GPS 위성의 수       | 9          | 7          | 8          |
| GPS Elevation Mask | 10         | 10         | 10         |
| 양방향 모호정수 해의 결정 여부  | Yes        | Yes        | Yes        |
| GPS 신호 단절 여부       | No         | No         | No         |
| GPS 전리층 보정 여부      | Yes        | No         | No         |

## 4.2 Calibration

### 4.2.1 Pitch Calibration

Pitch 보정을 위해서 초등학교 건물 위를 종방향으로 3번 비행하였다. 3번의 비행동안 약 35,000 점이 건물위에서 취득되어 Pitch 보정에 이용하였다. 그림 16을 보면 스캔각을 0°로 측량하였기 때문에 각각의 비행노선이 하나의 선으로 취득된다.

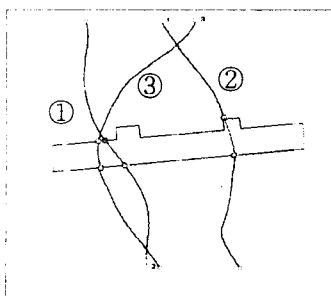


그림 16. Pitch 보정을  
LiDAR 데이터 취득

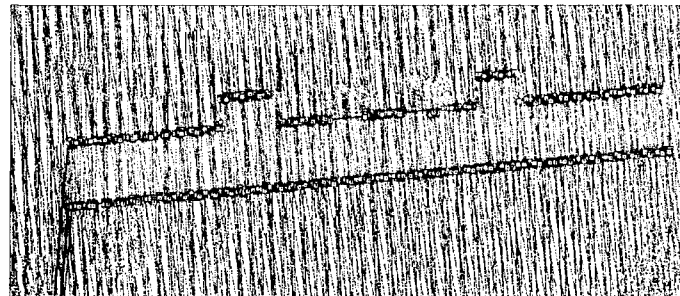


그림 17.  
Roll 보정을 LiDAR 데이터 취득

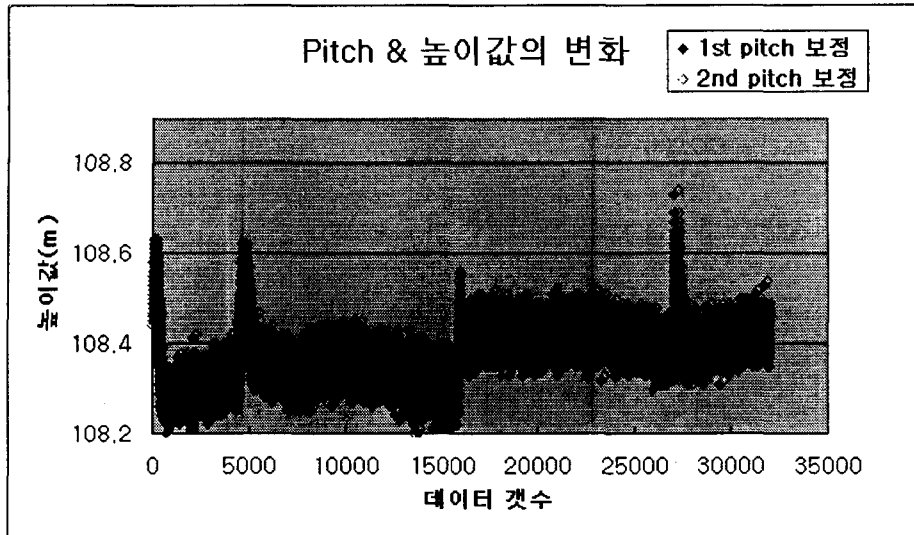


그림 18. Pitch 보정을 위해 취득된 건물의 높이값

그림 18은 pitch 보정을 위한 비행시, 각 노선에서 취득된 건물의 높이값을 나타낸다. 그림을 보면 첫 번째 보정과 2번째 보정에 의한 높이값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. pitch 조종을 위한 통계량은 표 4와 같다. 여기서 pitch의 조정량의 표준편차가 매우 큰데, 평면오차 중 X축으로의 회전량 오차가 제거되지 않았기 때문이다. 그림에서 3번째 비행노선의 높이값이, 1, 2 비행노선의 높이값보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 그림 16의 3번째 비행노선을 보면, 비행시 편류가 작용하여 발생된 오차라고 해석된다.

표 4. Pitch 보정의 통계량

| pitch 조정 횟수 | 평균 높이값(m) | 평균 높이 조종량(m) | 표준편차(m) |
|-------------|-----------|--------------|---------|
| 1           | 108.488   | -0.056       | 0.519   |
| 2           | 108.449   | -0.129       | 0.481   |

#### 4.2.2 Roll Calibration

Roll 보정을 위해서 초등학교 건물 위를 횡방향으로 3번 비행하였다. 3번의 비행동안 약 22,000 점이 취득되어 Pitch 보정에 이용하였다. 스캔각은 50° 로 측량되었다. Roll 보정을 위해 취득된 데이터의 분포는 그림 17과 같으며, 그림 19는 Roll 보정을 위해 적용된 높이값의 조종량이다. 그림에서 한 점은 약 30점의 대표값이다.



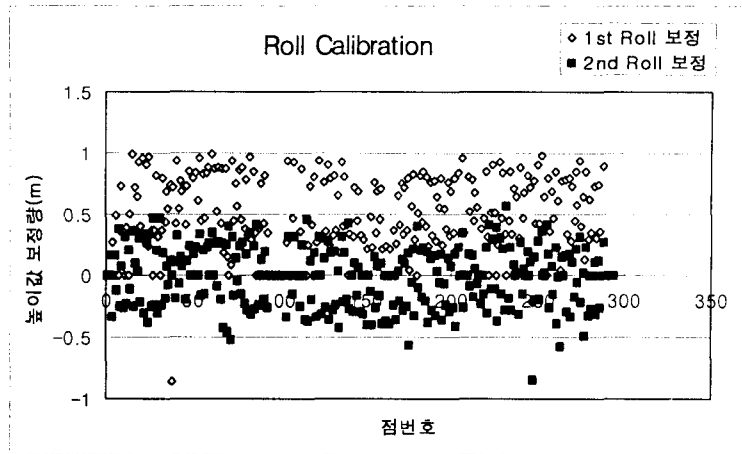


그림 19. Roll 보정

그림 19.에서 보듯이 첫 번째의 높이 보정량 분포는 50cm를 기준으로 위 아래로 분포해 있지만, 두 번째 보정에서는 0을 기준으로 고르게 분포해 있다. 따라서 Roll 보정이 제대로 수행되었음을 알 수 있다.

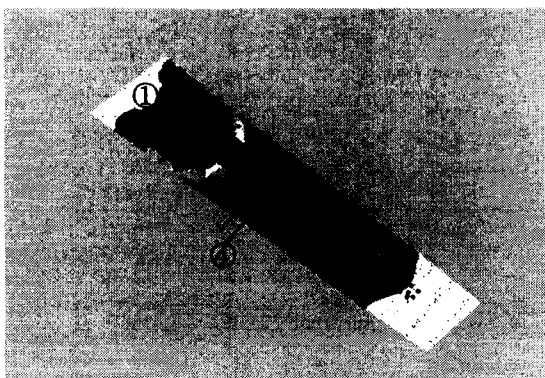
표 5. Roll 보정의 통계량

| Roll 조정 횟수 | 평균 높이값(m) | 평균 높이 조종량(m) | 표준편차(m) |
|------------|-----------|--------------|---------|
| 1          | 108.742   | 0.192        | 0.587   |
| 2          | 108.742   | -0.016       | 0.178   |

표 5의 Roll 보정의 통계값을 보면, 두 번째 보정량의 표준편차가 20cm 이내로 크게 작아진 것을 알 수 있다. 따라서 pitch 보정과 Roll 보정을 수행함으로써, LiDAR 데이터의 평면오차가 크게 제거되었음을 알 수 있다.

#### 4.2.3 Scale Calibration

Scale 보정을 위해서는 높이의 변형이 가장 큰 스캔각의 양 끝에서 발생하는 높이의 변형을 알아야 한다. 따라서 지상측량점이 배치된 평지를 3번 비행(cross 비행 포함)하여, 스캔각의 양 끝에서 취득된 레이저 측량 결과와 좌표를 비교하여, 레이저 측량 결과를 조정하였다. 그림 20은 scale 보정을 위해 취득된 LiDAR 데이터의 분포를 나타낸다.



- ① 지상측량점 배치와 평행하게 촬영된 비행
- ② 지상측량점 배치와 cross 촬영된 첫번째 비행노선
- ③ 지상측량점 배치와 cross 촬영된 두번째 비행노선
- ④ 지상측량점 배치와 평행하게 촬영된 비행

그림 20. Scale 보정을 위해 취득된 데이터

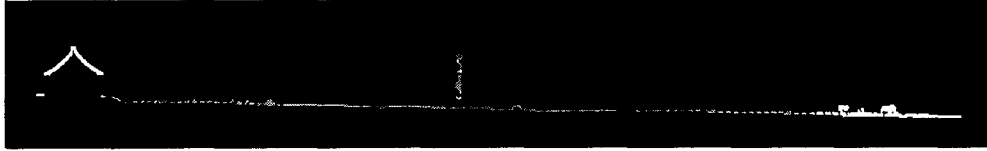


그림 21. 지상측량점 배치를 기준으로 절개한 단면도(폭 2m)



그림 22. 지상측량점 배치를 기준으로 절개한 단면도의 왼쪽 영역(폭 2m)



그림 23. 지상측량점 배치를 기준으로 절개한 단면도의 오른쪽 영역(폭 2m)

그림 22와 23은 지상측량점 배치와 직교한 비행노선의 오른쪽 끝과 왼쪽 끝의 높이값 분포이다. 이 지점에서 LiDAR 데이터 높이값이 지상측량점의 높이값과 5cm 미만의 차이를 보였다. 또한 지상측량점의 배치와 평행하게 측량된 비행노선에서는 지상측량점 배치면과 거의 수직으로 촬영되었으므로 Scale 에러가 거의 발생하지 않았다. 또한 이 지점에서 LiDAR의 높이값과 지상측량점의 높이값이 5cm 미만의 차이를 보였으므로, 레이저 스캐너의 scale이 제대로 조정된 것으로 파악되었다.

### 4.3 결과 정확도

#### 4.3.1 수평 정확도

수평 정확도에 대한 결과는 표 6과 같고, “1/2000×비행고도”의 결과를 만족한다.

표 6. LiDAR 데이터의 수평 정확도

| 비행날짜       | 비행고도<br>(m;AGL) | 보정요<br>소 | 레이저<br>주사율<br>(kHz) | 표준편차<br>(m) | RMS<br>(m) | 검사점<br>개수 | 정확도<br>(m;1σ) | 장비사양<br>(m;1σ) |
|------------|-----------------|----------|---------------------|-------------|------------|-----------|---------------|----------------|
| 2004.02.28 | 1000            | pitch    | 70                  | 0.426       | 0.669      | 6         | ±0.421        | ±0.500         |
|            | 1000            | roll     | 70                  | 0.165       | 0.26       | 638       | ±0.259        | ±0.500         |
| 2004.03.03 | 1000            | pitch    | 70                  | 0.191       | 0.327      | 4         | ±0.312        | ±0.500         |
|            | 1000            | roll     | 70                  | 0.131       | 0.144      | 690       | ±0.140        | ±0.500         |
| 2004.03.04 | 1000            | pitch    | 70                  | 0.481       | 0.627      | 4         | ±0.351        | ±0.500         |
|            | 1000            | roll     | 70                  | 0.148       | 0.169      | 443       | ±0.148        | ±0.500         |

#### 4.3.2 수직 정확도

수직 정확도는 표 7과 같고, 표 2의 수직 정확도를 만족한다.

표 7. LiDAR 데이터의 수직 정확도

| 비행날짜       | 비행고도<br>(m ;AGL) | 레이저<br>주사율<br>(kHz) | 표준편차<br>(m) | RMS<br>(m) | 검사점<br>개수 | 정확도<br>(m; 1σ) | 장비사양<br>(m; 1σ) |
|------------|------------------|---------------------|-------------|------------|-----------|----------------|-----------------|
| 2004.02.28 | 1000             | 70                  | 0.101       | 0.102      | 306       | ±0.076         | ±0.150          |
| 2004.03.03 | 1000             | 70                  | 0.086       | 0.094      | 212       | ±0.073         | ±0.150          |
| 2004.03.04 | 1000             | 70                  | 0.099       | 0.099      | 248       | ±0.068         | ±0.150          |

### 4.3.3 LiDAR 데이터 결과

LiDAR 데이터는 공간객체의 3차원 위치정보와 레이저파가 반사된 반사강도(intensity)를 함께 포함한다. 따라서 LiDAR 데이터의 최종결과 분석시에는 높이값과 반사강도에 의한 데이터를 분석할 수 있다. 아래 그림은 반사강도와 높이값의 차이에 따른 LiDAR 데이터의 결과이다.



그림 24. 반사강도에 따른 결과(1)

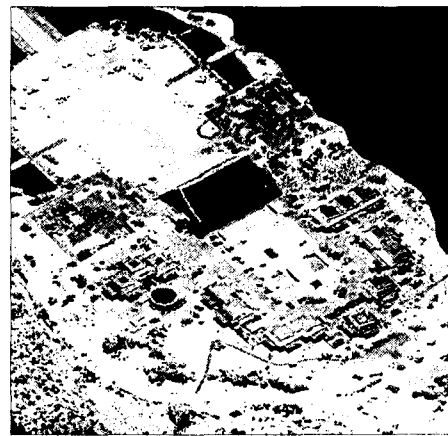


그림 25. 반사강도에 따른 결과(2)



그림 26. 높이값의 차이에 따른 결과(1)

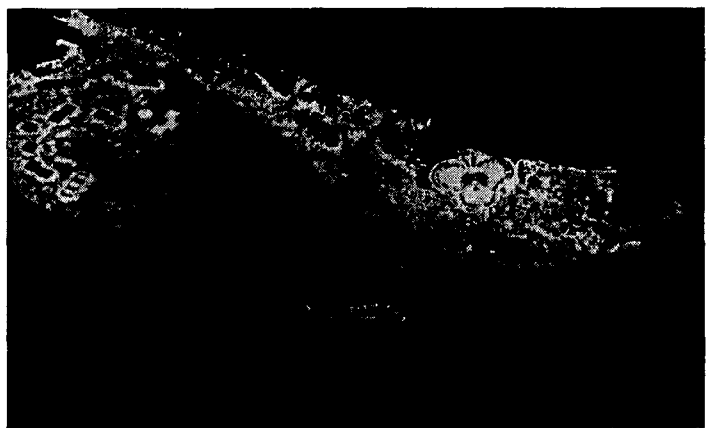


그림 27. 높이값에 따른 결과(2)



그림 28. 높이값에 따른 결과(3)

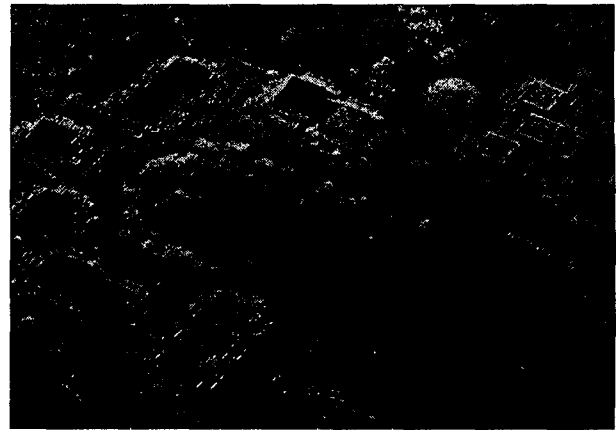


그림 29. 높이값에 따른 결과(4)

## 5. 결 론

항공레이저측량을 수행하기 위해서는 항공 LiDAR 시스템의 초기화 작업이 필요한데, 오차발생 요인 중 그 영향이 가장 큰 것은 INS와 레이저 스캐너의 축간 회전량 차이에서 발생한다. 따라서 LiDAR 시스템의 초기화를 위해서는 건물의 평평한 옥상과 같이 기복변위가 크고, 일정 구간에서는 변위가 없는 지물을 대상으로 실시하였다. 시스템 초기화를 위한 측량 방법은 대상지역을 반복적으로 항공레이저측량한 후, 실제 건물의 지상 측량 결과와 LiDAR 데이터를 비교함으로써 Y, X축의 회전량(roll, pitch)을 보정할 수 있다. Z축의 회전량 보정은 넓고 평평한 대지에 현지 측량을 실시하고, 그 지역을 항공레이저측량할 경우, Z축의 오차가 가장 크게 작용하는 레이저 스캔각의 양 끝단의 LiDAR 데이터와 현지측량 점을 비교함으로써 조정할 수 있다.

LiDAR를 이용한 항공레이저측량의 정확도는 평균 1,000m 고도로 측량시, 수평정확도는  $\pm 30\sim 40\text{cm}$  이내, 수직정확도는  $\pm 10\text{cm}$  이내로 나타났다. 따라서 3차원 공간정보의 취득을 위해 항공레이저측량을 이용하면 높은 정확도의 3차원 데이터를 취득할 수 있으며, 특히 DSM 제작에 용이하며, 기존 항공사진 측량에서 DEM 제작이 어려운 산림지역, 해안선, 고층빌딩이 밀집한 도심지역의 DSM을 얻는데 효과적이라 할 수 있다.

## 참고문헌

- 이강원, 이재원, 강인구 (2003), GPS/INS에 의한 Direct Georeferencing의 실무적용 연구, 대한토목학회지, pp. 3053~3062
- 위광재 외 2인(2002), 도화원도를 이용한 LiDAR DEM의 정확도 평가, 한국측량학회논문집 20권 제2호 pp127~136
- 위광재 외 3인(2004), LiDAR & SHOALS 기술을 이용한 해안선 측량 및 모니터링에 관한 연구, 한국해안·해양공학회, 한국의 해안선 정립을 위한 workshop 논문집, pp. 137-144
- Mikhail, E. M. and Bethel, J. S. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons, New York, pp. 263-265.
- Haala, N., Cramer, M. & Kilian, J. (1996), *Sensor Fusion for Airborne 3D Data Capture*, Paper to be presented at the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco, California, pp. 24-27.
- Lohr, U. & Eibert, M. (1995), *The TopoSys Laser Scanner System*, Fritsch & Hobbie, pp. 263-267.
- E.J.Huising, L.M. Gomes Pereira, *Errors and accuracy Estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic application*, pp. 3-5.
- Johannes Kilian, Norbert Haala, Makus English, *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*, pp. 1-2.