

# 항공LiDAR 시스템 검정 및 정확도 평가 연구 A Study on Airborne LiDAR System Calibration and Accuracy Evaluation

최윤수<sup>1)</sup> · 강인규<sup>2)</sup> · 이강원<sup>3)</sup>

Choi, Yun Soo · Kang, In Ku · Lee, Kang Won

## Abstract

Airborne LiDAR integrated with on-board GPS/INS and scanning technology is a state-of the-art system for direct 3D geo-spatial data acquisition. In this study, LiDAR data were calibrated using ground points in calibration site for the higher system accuracy. The accuracy results are  $\pm 15\sim 30$  cm in horizontal and  $\pm 15$  cm in vertical. The results show that LiDAR system has capability for precise DEM and contour generation, 3D urban modeling and engineering design.

Keywords : Airborne LiDAR, Accuracy, System Calibration, GPS/INS

## 요 지

3차원 지형정보에 대한 사용자 요구의 증가에 따라 GPS/INS, 레이저 스캐너 시스템이 조합된 항공레이저측량 기술이 각광받고 있다. 본 논문에서는 항공레이저측량(LiDAR) 시스템의 정확도 확보를 위해 검정장에서의 측량 데이터를 바탕으로 시스템 검정을 실시하였다. 검정결과, 수평 정확도는  $\pm 15\text{cm}\sim 30\text{cm}$  이내, 수직정확도는  $\pm 15\text{cm}$  이내로 나타났다. 이를 통해 항공레이저측량 데이터를 이용하여 정밀 DEM 및 등고선 제작, 도시지역의 3차원 모델 제작, 엔지니어링 설계 등의 활용에 충분함을 입증하였다.

핵심용어 : 항공레이저측량, 정확도, 시스템 초기화, GPS/INS

## 1. 개 요

최근 사회 전 분야에서 디지털화가 가속되고 있으며, 유비쿼터스 기반의 정보화 환경구축이 화두로 등장하고 있다. 따라서 과거의 2차원 기반의 지형정보가 아닌 현실 세계를 컴퓨터에 그대로 재현할 수 있는 3차원 공간정보를 통한 실세계의 보다 생생한 재현에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 또한 범정부 차원에서 추진하고 있는 차세대 성장동력 산업인 텔레매틱스(Telematics), 위치기반서비스(LBS) 등 첨단 산업에서 3차원 공간정보에 대한 신규 수요가 늘고 있다. 이러한 국내 수요를 감안하여 국토지리정보원에서는 고정밀 국가 DEM 및 디지털 영상 구축과 더불어 3차원 입체 동영상정보를 구축하는

다차원공간정보구축사업을 2004년부터 대전광역시를 시범지역으로 하여 수행하고 있다(그림 1 참조).

현실세계를 컴퓨터에 그대로 재현하기 위해서는 현실 공간에 존재하는 인공 및 자연 지형지물을 효과적으로 측

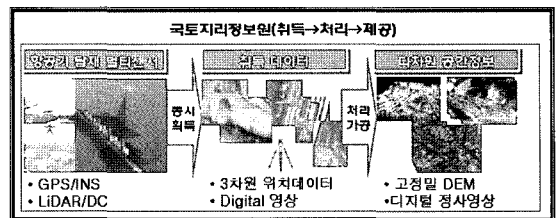


그림 1. 다차원 공간정보구축 사업 개념

1) 연결저자 · 정회원 · 서울시립대학교 지적정보학과 교수(E-mail:choiys@uos.ac.kr)  
 2) 정회원 · 건설교통부 국토지리정보원 공간영상과 사무관(E-mail:kig777@mocet.go.kr)  
 3) 정회원 · 한진정보통신(주) GIS담당 상무(E-mail:kwlee@hist.co.kr)

량할 수 있어야 한다. 이러한 목적을 만족시키기 위하여 항공기에 GPS/INS, 레이저 스캐너를 통합한 항공레이저 측량장비를 탑재하여 지상의 3차원 위치 데이터를 신속하고 조밀하게 획득할 수 있게 되었다. 국내에서도 2004년에 한진정보통신(주)에서 상업용 장비를 도입하여 현재 국가 DEM 구축, 해안선지역 조사측량, 건설 및 엔지니어링 설계분야, 재해 및 방재 분야, 국방 및 환경분야 등 다양한 분야에 활용하고 있다.

항공레이저측량의 장점은 높은 작업 효율성과 정확도이다. 레이저 스캐너는 능동센서이므로 기후에 관계없이 주야로 자료획득이 가능하며 또한 스캐너로부터 지표면까지 거리를 직접 산출할 수 있으므로 고밀도의 3차원 위치정보를 신속하고 효율적으로 얻을 수 있다. 특히 접근이 어려운 해안지역의 높이정보나 지도제작 분야에 효과적으로 이용할 수 있다. 또한 최근에는 항공레이저측량 장비가 레이저 스캐너와 더불어 디지털 카메라와 일체형으로 제작되어 고해상도(최대 지상해상도: 5cm) 디지털 영상을 동시에 취득할 수 있으며 LiDAR 포인트 데이터만으로는 어려웠던 지상의 정성적인 분석까지도 수행하고 있는 실정이다.

항공레이저측량장비(이하, 항공 LiDAR 시스템이라고 한다)는 레이저 스캐너와 GPS/INS시스템으로 구성되어 있으며, 통합된 센서에 의하여 수집된 3차원 포인트 데이터의 3차원 위치 정확도는 GPS/INS에서 제공되는 외부표점요소(exterior orientation)의 정확도에 좌우된다. 따라서 LiDAR 시스템을 사용하기 위해서는 데이터 획득시 발생하는 GPS/INS와 레이저 스캐너의 오차요인을 분석하고 오차를 제거하는 시스템 보정(system calibration) 과정이 선행되어야 한다.

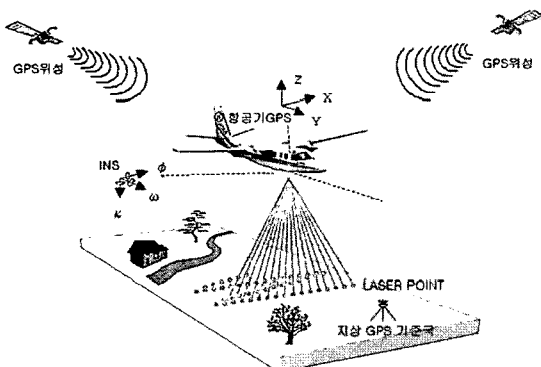


그림 2. 항공레이저측량 원리

따라서 본 연구에서는 LiDAR 시스템을 항공기에 탑재하여 지상에 설치한 검정장(calibration site)의 3차원 위치좌표를 기준으로 하여 3회에 걸쳐 실험 데이터를 취득한 후에 검정을 수행하였다. 검정 파라미터별 보정값을 취득된 LiDAR 포인트 데이터에 적용하여 최종 정확도를 평가하였다. 즉, 시스템 검정 후에 위치정확도의 평가는 지상에서 GPS와 토달스테이션 측량을 통하여 획득한 검사점을 기준으로 수행하였으며, 평가 결과 시스템 검정 후의 LiDAR 데이터의 정확도는 평균 1,200m 고도로 측량시에 수평정확도는  $\pm 15\text{cm} \sim 30\text{cm}$  이내, 수직정확도는  $\pm 15\text{cm}$ 임을 알 수 있었다. 이 결과는 공공측량 작업규정(건설교통부고시 제2003-326호) 제47조(지도의 정확도)에서 제시한 정확도 이내(측척 1/1,000기준)임을 알 수 있었다. 따라서 LiDAR 데이터를 고정밀 DEM 및 등고선 제작, 건물 외곽선 추출 등 다양한 수치지형도의 편집 및 수정·갱신에 효과적으로 이용할 수 있다. 이러한 각종 공공측량 성과 활용에 반드시 사전에 시스템 검정을 실시하여야 하며, 향후에 관련 제도 개선에 반영되어야 한다.

## 2. 항공레이저(LiDAR) 측량

항공레이저 측량의 원리는 LiDAR(Light Detection And Ranging) 시스템을 항공기에 장착하여, 레이저 펄스를 지표면에 주사하고 반사된 레이저파의 도달시간을 이용하여 반사되는 지점의 3차원 위치좌표를 계산하는 것이다. LiDAR 시스템은 지형지물 및 구조물의 거리와 종류에 따라 레이저파가 반사되는 시간과 반사강도가 다르기 때문에 수치표면모델(DSM: Digital Surface Model) 생성에 효과적이다. 또한 고해상도 영상과 결합되어 건물 및 도로 외곽 등의 선형 추출이 용이하고, 광학영상에서는 추출이 어려운 3차원 위치정보를 쉽게 추출하여 고정밀 DEM(Digital Elevation Model)을 생성할 수 있다. 또한 항공레이저측량은 촬영고도, 레이저 펄스 반복율(PRF), 주사폭(scan angle), 주사주기(scan rate) 등의 조정을 통해 취득 자료에 대한 정확도 및 점밀도(point density)를 조정할 수 있으며, 기존의 항공사진측량, 수치지도, 위성영상 등 타 방법에 비하여 상대적으로 정확도가 우수하며, 작업의 경제성 및 효율성 측면에 많은 장점이 있다.

이러한 LiDAR 시스템을 실용적으로 사용하기 위해서는 각 센서간의 검정과정이 필요하다. 시스템 검정은 거리측정을 위한 실험실 관측 및 지상관측, 비행을 통해서

취득된 데이터를 이용하여 레이저 센서와 INS 센서 축간 회전량의 차이 계산과 GPS 모호정수(ambiguity) 해를 통해 얻어진다. 레이저 데이터는 GPS 시간에 의해 시각 동기화되며 여기에 Calibration 변수를 적용하여 3차원좌표를 취득한다.

항공레이저측량시스템은 크게 두 가지 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.

### 2.1 레이저 스캐너

항공기에 탑재된 레이저 스캐너는 레이저파의 발사지점에서부터 반사된 지상의 지형·지물까지의 거리를 측정한다. 시스템 개발 초기에는 스캔각이 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 있으며, 비행 방향과 동일한 방향으로 일정한 주사폭을 갖고 레이저 펄스를 수신한다. 광학섬유는 비행기와 같은 이동체에서도 레이저 펄스의 방향을 안정화시키는데 반사 거울이 비행기의 비행 특성상 많은 움직임의 변형을 발생시키지만 광학섬유가 레이저파의 방향을 일정하게 고정시켜주는 역할을 한다.

### 2.2 GPS/INS 시스템

레이저 스캐너는 레이저 펄스를 일정한 고도에서 지상으로 주사하며 반사되어 오는 시간을 기록하여 반사지점의 3차원 위치를 결정한다. 항공 LiDAR 시스템에서 외부표정요소의 결정은 GPS/INS를 통하여 가능하며, Calibration 과정을 마치면 지상 측량없이 직접 외부표정요소를 결정할 수 있으므로 시간과 비용을 크게 절감할 수 있다.

GPS 수신기를 이동하여 이동체의 절대적인 위치를 구할 수 있으며, INS는 회전요소와 속도 및 위치를 계산한다. 이 회전요소는 매 순간 변화하는 이동체의 회전량을 빠르

고 정확하게 산출하고, 이때의 회전량과 측정된 가속도를 이용하여 변화하는 이동체의 위치를 도출한다. 회전량을 구하는 관성항법장치를 자이로(gyro)로라 하고, 동체의 가속도를 측정하는 센서를 가속도계(accelerometer)라 한다. 시스템 하드웨어는 수신된 GPS 신호와 INS 신호를 조합하여 후처리 가능한 형태로 저장하고, 측량당시의 레이저 스캐너의 주사 신호를 수신 및 저장, 장치 세팅과 각 센서의 상태를 모니터링 할 수 있다.

### 2.3 연구동향

국내에서는 GPS/INS를 기반으로 항공사진의 활용연구가 주로 진행되었다. 2002년 한상득은 GPS와 INS를 결합하여 항공사진측량에 필요한 외부표정요소에 해당하는 카메라의 노출순간의 위치와 회전각을 직접 결정하는 기법에 대하여 연구하였으며, 2004년 박운용 등은 GPS/INS를 이용한 항공사진측량을 이용하여 외부표정에 필요한 지상기준점의 수를 70~80%를 절감할 수 있다는 결과를 제시하였다. 해외에서는 2000년 Helen Burman이 반사성이 강한 금속성 타겟을 지상에 설치하여 레이저포인트를 보정하는 방법과 동일 지형지물에 대해 다양한 비행방향에서 얻어진 레이저 포인트를 이용하여 시스템을 검증하는 방법을 연구하였다.

## 3. 시스템 검정(Calibration) 방법

항공 LiDAR 시스템의 에러를 발생시키는 요인으로는 크게 기계적 오차와 우연오차로 구분할 수 있다. 오차 요인의 분류는 표 1과 같다. 기계적 오차 중, 오차 발생의 주요원인은 GPS/INS 시스템에서 발생하며, GPS/INS에서 취득되는 레이저 스캐너의 위치결정 정확도가 항공레이저측량의 최종 정확도에 큰 영향을 미친다. 따라서 가

표 1. LiDAR 시스템의 오차 요인 분류

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

장 큰 오차요인은 레이저 스캐너와 INS의 좌표계의 축간 회전량 차이(misalignment)이며, 이 오차를 제거하는 방법을 시스템 검정(calibration)이라 한다.

본 연구에서의 검정 방법은 레이저 측량시에 비행노선과 비행고도, 스캐닝 조건 등을 설정하여 반복 측량함으로써 INS와 GPS에서 발생하는 정오차인 수평·수직오차를 제거하였으며, 파라메타별 방법은 다음과 같다.

### 3.1 Pitch 보정

Pitch 보정은 항공레이저 측량시, 발생하는 Y축의 회전량 오차를 제거하는 것을 말하며, 레이저 스캐너의 X축 방향은 그림 3과 같이 비행기의 진행방향과 동일하게 나타난다.

보정 방법은 건물과 같이 높이값의 기복변위가 지형과 경계면에서는 크고 일정 구간에서 평평한 면이 존재하는 건물 지붕면을 기준면으로 간주하고 수행하였다. 스캔 주사폭을 0°로 레이저 측량을 하는 경우, X축의 회전량의 영향을 최소화 할 수 있으므로 정확한 Y축의 회전량 오차를 구할 수 있다. 지붕이 수평면인 빌딩옥상 위를 측량한 모든 LiDAR 데이터의 점들은 거의 동일한 높이 값을 가지며, 건물위에 점들과 지면의 점들을 명확하게 구분할 수 있다. 따라서 비행방향으로 건물에 대하여 실제 측량한 건물의 외관점과 레이저측량을 통해 얻어진 점들과의 높이 차이를 산출하여 보정하였다. 측량된 LiDAR 데이터 중, 빌딩 옥상의 범위는 LiDAR 데이터의 높이 값이 갑자기 변화하는 점들로 Calibration 영역의 시작점과 끝점으로 잡는다. 또한 정확한 보정을 위해 건물의 모서리 부분을 실측하여 건물의 영역을 정의하도록 하였으며, 비행경로는 건물 위를 반드시 비행해야 하므로, 건물의 종축을 따라 비행하도록 설계하였다.

### 3.2 Roll 보정

Roll의 보정은 항공레이저 측량시, 발생하는 X축의 회전량 오차를 제거하는 것을 말한다. 레이저 펄스가 일정한 주사폭으로 비행방향에 직교하게 좌우로 주사될 때,



그림 3. 항공기의 XYZ축과 회전요소

레이저 펄스의 3차원 위치는 X축의 회전량 변화에 크게 영향을 받는다. 따라서 Roll 보정을 위해서는 빌딩의 옥상면이 모두 측량 가능하도록 빌딩의 횡방향을 따라 항공 레이저측량을 실시하여야 한다.

### 3.3 Scale 보정

Scale 보정은 항공레이저측량시 발생하는 거리측정의 scale을 보정하는 것이다. 항공레이저측량 데이터 중, 레이저 스캔 주사폭의 양 끝에서 scale의 영향이 가장 크게 발생하며, 그림 5와 같다. 따라서 Scale 보정을 위해서는 넓고 평평한 지면에 항공레이저측량의 주사폭 만큼의 범위 안에 지상기준점을 미리 현지 측량하여야 한다. Scale 보정을 위한 비행방법은 지상기준점 배치와 직교하는 형태로 반복 비행하여야 한다.

### 3.4 Offset 보정

지상기준점과 LiDAR 데이터와의 일정한 높이값의 차이를 Offset이라 정의한다. Z축으로 일정한 변위를 조사하기 위해 지상기준점 배치를 따라 비행하여야 한다. 기준점 바로 위를 비행하는 경우에는 Scale 에러의 영향을 최소화할 수 있으므로 보다 정확한 Offset 변위를 알아낼 수

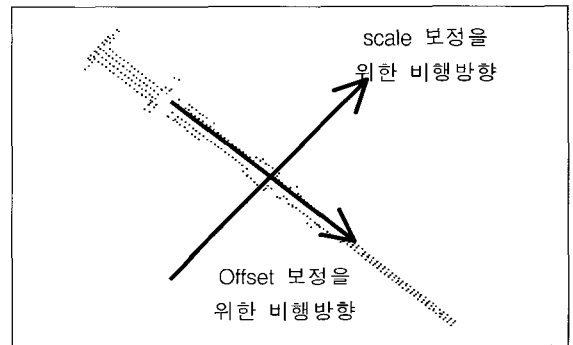


그림 4. Scale 보정 및 Offset 보정을 위한 비행방향

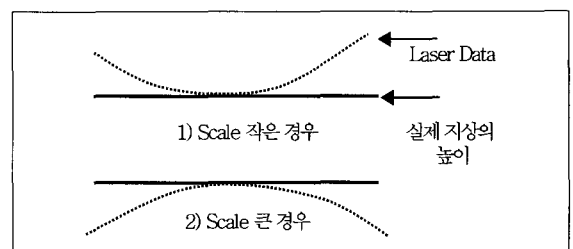


그림 5. Scale에 따른 LiDAR 데이터 형태

있다. 보정을 위해서는 취득된 모든 항공레이저측량 데이터가 지상기준점과 동일한 높이값을 갖도록 조정한다.

#### 4. 실험 데이터 취득

LiDAR 시스템의 검정작업을 수행하기 위하여 별도의 검정장(Calibration Site)을 설치하였으며, 실험 데이터 취득을 위하여 검정장을 3회에 걸쳐 항공레이저측량을 실시하였다.

##### 4.1 지상측량

LiDAR 시스템 검정을 위하여 건물과 평평한 대지에 GPS와 토탈스테이션을 이용하여 WGS-84 기준의 지상측량을 수행하였다. 건물은 천안 독립기념관 부근에 위치한 초등학교 건물이고, 대지는 독립기념관 내부에 존재한다.

Pitch와 Roll보정에 사용된 건물의 크기는 가로·세로의 길이가 100m×20m이며, 건물 외곽선 추출을 위해 모서리 점 12점에 대하여 GPS 측량을 실시하였고, scale 보정을 위해서는 970m×30m 크기의 평지와 같은 평탄한 면에 4점의 GPS 측량결과를 토대로 토탈스테이션(total station)을 이용하여 340점 정도의 지상기준점을 측량하였다.

##### 4.2 사용 장비

항공레이저측량을 위해 Optech사에서 제조한 ALTM 30/70 이용하였고, 장비의 구체적인 사양은 표 2와 같다.

##### 4.3 데이터 취득

LiDAR 시스템을 장착한 항공기의 검정장에서의 비행궤

적은 그림 6과 같으며, Pitch, Roll 보정을 위해서 건물을 기준으로 수행하였고, Scale과 Offset조정을 위하여 독립기념관 내의 평평한 대지에 대한 비행을 일정한 조건별로 수행하였다. 비행 당시 GPS 신호 수신 상태로는 PDOP이 최고 3.5 미만이고, 평균 위성수는 6개로 양호하였다.

#### 5. 시스템 검정 및 평가

##### 5.1 GPS 처리

측량 날짜에 따른 촬영노선의 GPS 후처리의 내용은 아래의 표 3과 같으며, 각각 촬영당시에 지상에 GPS 기준점의 데이터를 동일시간대에 수신하였다.

##### 5.2 지상기준점 측량

검정을 위해 천안독립기념관 주변에 약 350여점의 지상기준점을 GPS 및 토탈스테이션을 이용하여 현지 측량

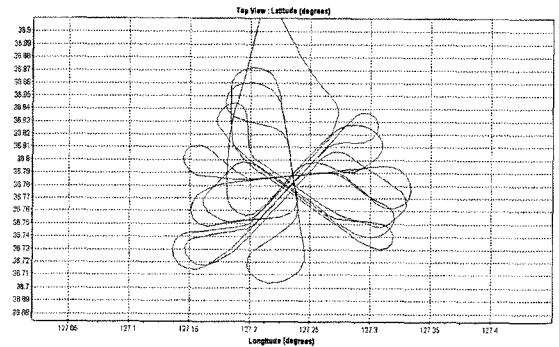


그림 6. LiDAR Calibration 측량궤적

표 3. GPS 후처리 내용

촬영일자	1회	2회	3회
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	Yes	Yes	Yes
GPS 신호 단절 여부	No	No	No
GPS 전리층 보정 여부	Yes	No	No

표 2. 항공레이저측량에 사용된 장비 사양

항목	세부사양
비행 고도	200m~3000m
평면 정확도	1/2000 X 고도(1σ)
높이 정확도	< 15cm at 1200m(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	70kHz(최고 비행고도가 1.5km 이내)

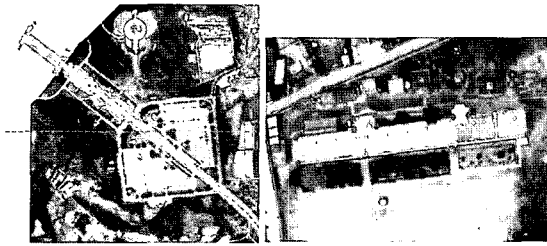


그림 7. 지상기준점의 분포(노선 및 건물)

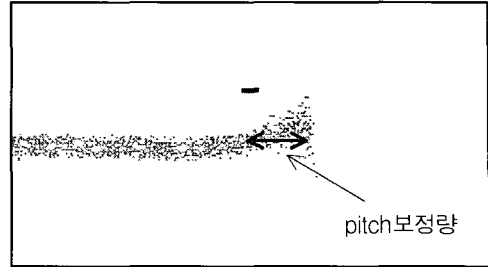


그림 9. Pitch 보정량

하였으며, 그 성과는 국토지리정보원의 GPS상시기준점을 연결하여 산출하였다. 분포는 그림 7과 같다.

### 5.3 시스템 검정(Calibration)

시스템의 검정에서 pitch 및 roll의 보정은 기측정된 건물을 이용하여 보정을 실시한다. 건물 모서리마다 측정된 기준점을 연결하여 건물외곽선을 형성하고 이를 기준으로 항공 레이저 측량값과 비교하게 된다. 또한 scale 및 offset의 보정은 긴 노선을 따라 측정된 GCP를 기준으로 실시된다.

#### 5.3.1 Pitch 보정량 계산

Pitch 보정을 위해서 초등학교 건물 위를 종방향으로 2번 비행하였으며, 2번의 비행동안 약 35,000 점이 건물위에서 취득되어 Pitch 보정에 이용되었다. 아래 그림 8을 보면 스캔각을 0°로 측량하였기 때문에 각각의 비행노선이 하나의 선으로 취득된다.

Pitch 보정량 계산의 원리는 LiDAR 데이터의 진입점의 좌표 및 건물 최외곽 지상측량좌표의 거리를 측정하여, Y축 회전량 오차 pitch값을 산출하였다.

그림 9를 보면 pitch 보정을 위한 비행시, LiDAR 데이터로부터 건물 진입점을 쉽게 구할 수 있다. 반복수행하여 얻어진 pitch 보정량 값은 표 4와 같다. 비행고도는 약 960m이며, 이 값은 비행기와 지상과의 거리를 나타낸 것이다.

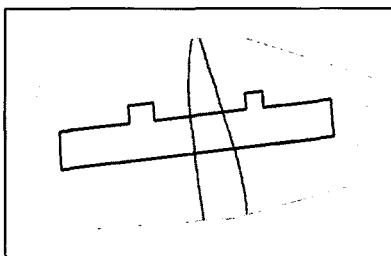


그림 8. Pitch 보정을 LiDAR 데이터 궤적

표 4. Pitch 보정량

pitch 조정 횟수	거리 보정량(m)	pitch 보정량 (degree)	표준편차 (m)
1	-1.63	-0.097	0.519
2	-0.28	-0.0166	0.218

pitch 보정량의 부호는 비행방향에 따라 다르며, 비행방향과 동일한 방향으로 LiDAR 데이터가 건물의 외곽선보다 위쪽에 위치한 경우는 양수의 값을 갖는다.

#### 5.3.2 Roll 보정량

Roll 보정량의 계산은 레이저 펄스를 반사거울을 통해, 비행방향에 수직하게 좌우로 주사하여 빌딩의 옥상면이 모두 측량 가능하도록 데이터를 취득한다. pitch 보정 후, LiDAR 데이터는 2차원 x,y평면상에 레이저 펄스의 위치 정확도는 X축의 회전량 변화에 민감하다. 그림 10과 같이 Roll 보정을 위해서 초등학교 건물 위를 횡방향으로 2번 비행하였다.

2번의 비행동안 건물 지붕면의 28,592점이 취득되어 roll 보정에 이용되었다. 스캔각은 20°로 측량되었다. Roll 보정을 위해 취득된 데이터의 분포는 그림 11과 같다.

Roll 보정량을 구하는 공식은 pitch 보정량을 구하는 공식과 동일하며, 본 연구에서 반복적으로 수행한 Roll 보정량은 아래 표 5와 같다.

그림 12에서 보듯이 첫 번째의 높이 보정량 분포는

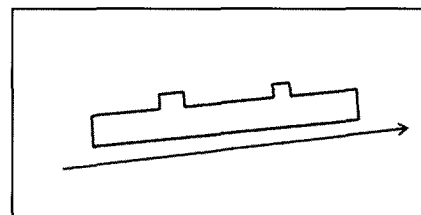


그림 10. Roll 보정을 위한 비행방향

50cm를 기준으로 위 아래로 분포해 있지만, 두 번째 보정에서는 “0”을 기준으로 고르게 분포해 있다. 따라서 Roll 보정이 제대로 수행되었음을 알 수 있다.

### 5.3.3 Scale 보정량

Scale 보정을 위해서는 높이의 변화가 가장 큰 스캔각의 양 끝에서 발생하는 높이의 변화를 알아야 한다. 따라서 지상측량점이 배치된 평지를 비행하여 스캔각의 양 끝에서 취득된 레이저 측량 결과와 좌표를 비교하여 레이저 측량 결과를 조정하였다. 그림 13은 scale 보정을 위해 취득된 LiDAR 데이터의 분포를 단면으로 절취한 것이다.

그림 13의 양 끝지점에서 LiDAR 데이터의 높이값은 지상측량을 통하여 획득한 높이값과 비교하여 보면 5cm 미만의 차이를 보였다. 따라서 Pitch와 Roll 보정이 제대로 수행되었음을 알 수 있다. Scale 보정시에는 offset 보정을 위한 LiDAR 데이터와 Scale 보정을 위한 LiDAR 데이터는 그림 13에서 좌측 건물 부분을 비교하여 수평

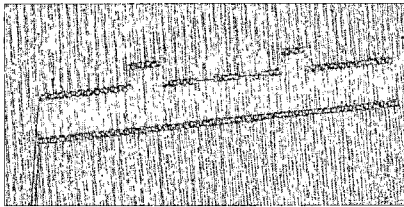


그림 11. Roll 보정을 LiDAR 데이터

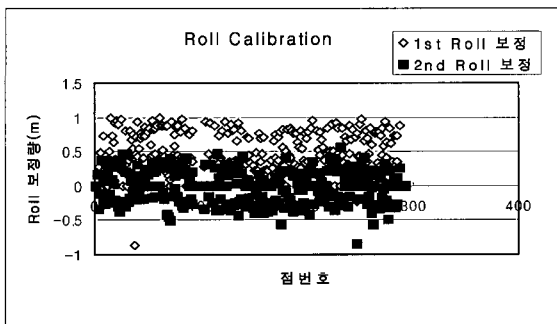


그림 12. Roll 보정량 적용

표 5. Roll 보정량

Roll 조정 횟수	거리 보정량 (m)	Roll 보정량 (degree)	표준편차 (m)
1	1.26	0.077	0.783
2	1.52	0.0929	0.218
3	1.53	0.0931	0.192

위치가 어느 정도 움직였는지를 확인하고 높이값의 변화는 지상기준점과 비교하였다.

### 5.3.4 Offset 보정량

지상측량점의 배치와 평행하게 측량된 비행노선에서는 지상측량점 배치면과 거의 수직으로 촬영되었으므로 Scale 에러가 거의 발생하지 않는다. 따라서 지상기준점과 LiDAR 데이터의 높이값의 차이로 offset 값을 알아낼 수 있었다.

## 5.4 정확도 평가

검정 파라미터에 대한 보정량을 LiDAR 데이터에 적용시킨 후에 검정장(calibration site : 1.8km×1.6km)에 균등하게 검사점을 배치한 후에 지상측량을 통하여 정표고를 취득하였다. 또한 평면정확도를 평가하기 위하여 건물 꼭지점의 좌표를 토달스테이션을 사용하여 취득하였다.

수직 정확도 평가결과는 표 6과 같고, 장비 사양에 제시된 수직 정확도를 만족하였다. 실제 LiDAR 측량영역에 포함되는 지상기준점으로 10점만을 이용하였다. 검정이 완료된 LiDAR 데이터(비행고도 1,000m)의 표준편차는 약 12cm정도로 평가 되었으며, 이는 장비사양에서 제시되는 것과 같음을 알 수 있었다. 다만 검사점의 위치와 배치 지역의 상태 및 측량 상태 등에 따라 차이는 발생할 수 있지만 그 차이가 크다고 할 수는 없다. 평면 정확도

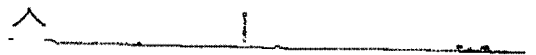


그림 13. 지상측량점 배치를 기준으로 절개한 단면도(폭 2m)



그림 14. 데이터검증에 이용된 GCP의 분포

표 6. LiDAR 데이터의 높이 정확도

No.	검사점(H)-LiDAR(h)의 차이(m)
1	0.011
2	-0.261
3	0.113
4	0.104
5	0.019
6	0.035
8	-0.129
9	0.026
12	-0.134
14	0.062
표준편차(m)	0.120
평균(m)	-0.015

표 7. LiDAR 데이터의 평면 정확도

No.	X	Y	차이량
1	0.13	0.18	0.22
2	0.15	0.24	0.35
3	-0.18	-0.22	0.28
4	0.15	0.21	0.26
5	-0.20	0.18	0.30
6	-0.17	0.30	0.31
표준편차(m)	0.20	0.18	-
평균(m)	0.18	0.22	0.29

평가는 pitch, roll 보정량 산출을 위하여 사용하였던 건물의 꼭지점을 측량하였으며, 그 결과는 표 7과 같다.

## 6. 결 론

정밀 항공레이저 측량을 수행하기 위해서는 항공 LiDAR 시스템의 검정 작업이 필수적이며, 오차발생 요인 중 그 영향이 가장 큰 것은 INS와 레이저 스캐너의 축간 회전량 차이에서 발생한다. 따라서 LiDAR 시스템의 검정을 위해서는 건물의 평평한 옥상과 같이 기복변위가 크고, 일정 구간에서는 높이 차이가 없는 구조물을 대상으로 실시하여야 한다. 시스템검정을 위한 측량 방법은 대상지역을 반복적으로 항공레이저측량한 후, 실제 건물의 지상 측량 결과와 LiDAR 데이터를 비교함으로써 X, Y축의 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 현지측

량점을 비교함으로써 조정할 수 있다.

본 연구에서 제시한 검정방법을 적용하여 LiDAR 데이터의 정확도를 평가한 결과, 1,000m 비행고도에서 측량시, 수평정확도는  $\pm 15 \sim 30\text{cm}$  이내, 수직정확도는  $\pm 15\text{cm}$  이내로 나타났다. 따라서 국가 DEM제작, 등고선제작 및 수치지형도 수정·갱신 등 다양한 3차원 데이터를 생산할 수 있으며, 제시한 시스템 검정방법을 항공 LiDAR 시스템 정확도 분석에 활용하고, 검증자료를 기반으로 정밀 항공레이저 측량을 수행하여야 한다.

## 감사의 글

본 논문은 2004년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 실험지역에 대한 데이터를 제공 해주신 국토지리정보원과 한진정보통신(주) 관계자 여러분에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 이강원, 이재원, 강인구 (2003), GPS/INS에 의한 Direct Georeferencing의 실무적용 연구, 대한토목학회지, pp. 3053-3062.
- 이대희, 위광재, 김승용, 김갑진, 이재원 (2004), 시스템 초기화(Calibration)에 따른 항공레이저측량의 정확도 평가, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 15-26.
- 이승현, 위광재, 이강원 (2004), 항공기용 디지털 영상에 대한 검정(Calibration) 및 정확도 평가, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 183-195.
- Mikhail, E. M. and Bethel, J. S. (2001), Introduction to modern photogrammetry, John Wiley & Sons, New York, pp. 263-265.
- Haala, N., Cramer, M., and 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.
- Huisig, E.J., Gomes Pereira, L.M. (1988), Errors and accuracy Estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic application, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53, No.5, 245-261, pp. 3-5.
- Johannes Kilian, Norbert Haala, Makus English (1996), Capture and evaluation of airborne laser scanner data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 31(B3), pp. 385-388.
- Helen Burman (2000), Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS, Phd. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, pp. 90-91.

(접수일 2005. 7. 30, 심사일 2005. 8. 29, 심사완료일 2005. 11. 1)