

항공라이다시스템의 오차분석 및 모델링

Error Analysis and Modeling of Airborne LIDAR System

유병민¹⁾ · 이임평²⁾ · 김성준³⁾ · 강인구⁴⁾

Yoo, Byoungmin · Lee, Impyeong · Kim, Seongjoon · Kang, Inku

¹⁾ 서울시립대학교 대학원 지적정보학과 석사과정(E-mail:ybm@uos.ac.kr)

²⁾ 서울시립대학교 도시과학대학 지적정보학과 교수(E-mail:iplee@uos.ac.kr)

³⁾ 서울시립대학교 대학원 지적정보학과 석사과정(E-mail:sinus7953@uos.ac.kr)

⁴⁾ 서울시립대학교 대학원 지적정보학과 박사과정, 국토지리정보원 공간영상과 영상담당
(E-mail:kig777@moc.t.go.kr)

Abstract

Airborne LIDAR systems have been increasingly used for various applications as an effective surveying mean that can be complementary or alternative to the traditional one based on aerial photos. A LIDAR system is a multi-sensor system consisting of GPS, INS, and a laser scanner and hence the errors associated with the LIDAR data can be significantly affected by not only the errors associated with each individual sensor but also the errors involved in combining these sensors. The analysis about these errors have been performed by some researchers but yet insufficient so that the results can be critically contributed to performing accurate calibration of LIDAR data. In this study, we thus analyze these error sources, derive their mathematical models and perform the sensitivity analysis to assess how significantly each error affects the LIDAR data. The results from this sensitivity analysis in particular can be effectively used to determine the main parameters modelling the systematic errors associated with the LIDAR data for their calibration.

1. 서 론

항공라이다시스템은 최근 들어 기존의 항공사진을 이용한 측량을 보완하거나 대체하는 용도로 도시모델생성, 산림지역의 DTM 생성, 하천 및 해안지역의 매핑 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 라이다와 같은 새로운 장비의 성공적인 도입 및 적극적인 활용을 위하여, 취득된 데이터의 정확도를 평가하고 개선하기 위한 오차의 분석 및 모델링을 수행해야 한다. 특히, 다양한 지표면의 정확한 위치기반의 정보를 수집하고 처리해야 하는 측량분야에서는 이러한 연구는 필수적이다.

라이다는 GPS(Global Positioning System), INS(Inertial Navigation System), LS(Laser Scanner)의 3개의 개별센서로 구성된 다중센서시스템이다. 라이다시스템은 항공에서 지상으로 레이저 펄스를 송신하여 지표면에서 반사된 펄스를 수신하여 반사된 지점의 3차원 좌표를 취득한다. 3차원 좌표는 LS에서 측정한 LS의 원점에서부터 표적까지의 거리를 GPS에서 측정한 위치와 INS에서 측정한 방향을 조합함으로써 얻어진다. 이로 인해 취득된 3차원 좌표 즉 라이다데이터에 포함된 오차는 3개의 개별센서에 포함된 오차와 센서들을 통합함에 따라 발생하는 오차에 큰 영향을 받는다.

라이다에 대한 오차원인 및 모델링에 관한 연구 중 Gardner (1992)는 항공라이다의 오차원인에 대한 자세한 설명을 제공했다. 또한, Schenk(2001)는 에어소스와 모델링은 제공하였으나 오차의 발생원인과 영향에 대한 내용은 다루지 않았다. 이에 본 연구는 라이다데이터의 정확도를 개선하기 위해서 오차의 발생에 대한 원인을 분석하고 이를 수학적으로 모델링하고 모델링된 각각의 오차가 최종적으로 측정된 3차원 좌표에 미치는 영향을 평가하기 위한 민감도 분석을 수행하는 것을 목표로 하였다.

2. 항공라이다시스템에 수반된 오차의 종류 및 발생원인

2.1 개별센서오차

개별센서오차는 라이다와 같은 다중센서로 구성된 각각의 개별적인 센서에 수반된 오차를 의미한다. 오차는 발생의 원인을 알 수 없어 통계적으로 기술하는 우연오차와 물리적인 원인으로 인해 체계적으로 발생하는 시스템적 오차로 구성된다. 우연오차와는 달리 시스템적 오차는 원인 분석에 기반한 모델링을 통해 제거할 수 있다. GPS, INS, LS에 개별적으로 수반된 시스템적 오차의 종류와 발생 원인은 아래와 같다.

GPS는 인공위성으로부터 송신된 전파의 도달시간을 측정하여 위성과 수신기간의 거리를 산출, 수신기의 위치를 결정하는 방식이다. GPS에 발생하는 주요 오차는 전리층과 대류층의 대기오차, 위성 및 수신기의 시계오차, 건물이나 교량, 산과 같은 장애물에 의해 반사되는 신호로 인한 다중경로오차, 인위적으로 신호를 수신할 수 없도록 암호화한 AS(Anti-Spoofing)의 영향으로 인한 오차 등이 있다.

INS는 중력장 내에서의 가속도와 회전을 측정하는 관성항법장치로서 3개의 가속도계와 3개의 회전계로 이루어져 있으며, 매 시간 움직이는 물체의 회전과 가속도를 측정하여 항법 방정식에 융합 적분함으로써 속도, 자세, 위치 등을 결정하는 시스템이다. INS오차는 측정된 가속도와 회전에 포함된 편이와 스케일 오차와 중력의 효과에 의한 오차 등이 있다. INS 오차 방정식은 항법 방정식에 이러한 오차를 고려한 섭동 작용소를 적용하여 유도한다.

LS는 레이저 펄스를 이용하여 표적까지 거리를 측정하는 시스템이다. LS오차는 표적과의 거리 측정값에 포함된 편이와 스케일 오차와 레이저 펄스가 스캐닝 거울을 통해 반사되어 발사되는 방향에 포함된 스캔각 오차, 스캔범위오차, 스캔평면오차 등이 존재한다.

2.2 센서통합오차

다중센서시스템에서 개별센서에서 취득한 정보를 융합하여 정확한 관측값을 생성하기 위해서는 개별센서들 사이에 상호적인 기하학적, 시간적인 일치성을 정교하게 수립하는 것이 필수적이다. 기하학적 일치는 개별센서가 단일의 공통 좌표계를 기준으로 위치와 방향이 정확하게 정의되는 것을 의미한다. 개별센서의 위치와 방향은 개별센서를 항공기와 같은 운반체(platform)에 탑재한 후에 정밀한 지상측량을 통해 결정한다. 결정된 위치와 방향은 지상측량장치에 수반된 오차와 탑재 후 운영 중에 진동이나 예기치 못한 외력에 의해 발생하는 변화에 의해 실제의 참값과 정확하게 일치되지 못하는 현상이 발견되는데 이러한 불일치를 탑재오차라 부른다. 항공라이다시스템에 포함된 GPS, INS, LS는 각각의 독립적인 좌표계를 기준으로 정보를 생성하는데 이들을 조합하기 위해서 INS좌표계를 기준으로 나머지 센서의 정보에 대한 좌표변환을 수행해야한다. 좌표변환을 위해 좌표계 사이의 원점 및 방향의 차이를 정밀측량을 통해 결정하는데 결정된 값과 참값의 차이로 인해 발생하는 오차가 탑재오차이다.

시간적인 일치는 각각의 센서의 시각이 정확하게 동기화되는 것을 의미한다. 개별센서는 센서마다 개별적인 시각의 기준을 가지고 정보를 생성하는데 생성된 정보를 통합하기 위해서는 기준 시각의 정확한 동기화가 필수적이다. 완벽한 동기화를 이루지 못해 발생하는 오차를 동기화 오차라고 한다. 또한, 개별센서마다 정보를 생성하는 주기와 시점이 다르기 때문에 정보 융합을 위해서 내삽(interpolation)을 수행하여야 하는데 이로 인해 발생하는 오차를 내삽오차라고 한다. 예를 들어, GPS, INS, LS가 개별적으로 생성한 정보를 조합해서 지상의 3차원 좌표를 계산하는데, GPS는 수Hz, INS는 수십Hz, LS는 수십 KHz 정도의 주파수를 가지기 때문에 이 들을 조합하기 위해서는 낮은 주파수를 갖는 GPS와 INS의 정보를 내삽을 통해 LS와 동일한 주파수의 정보로 변환해야 한다. 이 때 내삽오차가 포함된다.

3. 항공라이다시스템에 수반된 오차의 수학적 모델링

항공라이다시스템은 개별센서와 센서통합에 관련된 다양한 종류의 오차에 영향을 받는다. 정확하고

신뢰성 있는 데이터를 획득하기 위해서는 오차요소를 잘 설명하고 적용할 수 있는 오차모델을 개발해야 하며, 실험을 통해 개선해야 한다. 이 과정의 수행은 측정된 3차원 좌표의 정확도를 개선하기 위한 보정 과정을 위해 필수적이다.

2장에서 기술한 항공라이다시스템에 포함된 오차의 원인 분석결과를 바탕으로 수학적 모델을 유도한다. 이를 위해서 오차의 물리적인 원인을 함축적으로 표현하는 다수의 변수를 정의한 후 이를 조합하여 함수적으로 모델링한다.

3.1 오차를 고려하지 않은 다중센서방정식

다중센서방정식이란 GPS, INS, LS에서 획득한 정보를 조합하여 레이저 펄스의 반사 지점에 대한 3차원 좌표를 계산하기 위한 식이다. 다중센서방정식은 사용하는 라이다시스템에 따라 달라지며 일반적으로 시스템을 제조한 회사에서 주어진다. 식(1)은 대부분의 항공라이다시스템에 공통적으로 적용될 수 있는 다중센서 방정식을 유도한 것이다. 유도된 방정식은 개별센서와 센서통합에 관련된 여러 가지 시스템적 오차를 포함하지 않는 식이다. 자세한 유도과정은 이임평 등(2005)의 보고서를 참조한다.

$$P_W = R_{GW}R_{NG}(R_{LN}R_{0L}u_z r + t_{NL_N} + t_{NG_N}) + t_{WG_N} \quad (1)$$

여기서 첨자로 사용된 0, L, N, G, W는 각각 LS초기좌표계, LS좌표계, INS좌표계, GPS좌표계, WGS84좌표계를 의미한다. 표 1은 각각의 좌표계의 정의를 소개한다. P 는 반사지점의 3차원 좌표값 벡터, R 과 t 는 각각 두 개의 좌표계 사이의 관계를 설정하는 회전행렬과 이동벡터를 나타낸다. 표 2는 식(1)에 포함된 각각의 변수의 설명을 언급한다. 그림 1은 각각의 좌표계와 이동벡터를 보여준다.

표 1. 좌표계의 정의 및 설명

좌표계	코드	정의 및 설명
LS초기좌표계	0	x축은 비행방향, y, z축은 스캔평면과 평행하고, z축은 레이저 펄스의 진행방향으로 정의된다.
LS좌표계	L	x축은 비행방향 y, z축은 스캔평면과 평행하고, z축은 스캔각이 0인 방향으로 정의된다.
INS좌표계	N	x축은 비행방향, x와y축 평면이 지표면과 평행하도록 INS를 비행기 내부에 설치한다.
GPS좌표계	G	x축은 북쪽(천문자오선)방향을 z축은 중력방향, y축은 동쪽방향을 나타낸다. 또한, 좌표계의 원점은 GPS 안테나의 중심으로 정의된다.
WGS-84좌표계	W	최종적인 3차원 지상좌표를 나타낼 때 기준이 되는 좌표계이다.

표 2. 오차를 고려하지 않은 다중센서방정식에 포함된 변수의 정의 및 설명

변수	정의 및 설명
r	LS로 측정한 LS와 반사지점까지의 거리
u_z	LS초기좌표계의 z방향의 단위벡터(0,0,1)
R_{0L}	LS초기좌표계에서 LS좌표계로 변환하는 회전행렬
R_{LN}	LS좌표계에서 INS좌표계로 변환하는 회전행렬
R_{NG}	INS좌표계에서 GPS좌표계로 변환하는 회전행렬
R_{GW}	GPS좌표계에서 WGS84좌표계로 변환하는 회전행렬
t_{NL_N}	INS좌표계로 표현된 INS좌표계의 원점에서 LS좌표계의 원점을 연결하는 이동벡터
t_{NG_N}	INS좌표계로 표현된 INS좌표계의 원점에서 GPS좌표계의 원점을 연결하는 이동벡터
t_{WG_W}	WGS84좌표계로 표현된 WGS84좌표계의 원점에서 GPS좌표계의 원점을 연결하는 이동벡터. 즉, WGS84좌표계로 표현한 GPS원점의 위치좌표
P_W	WGS84좌표계로 표현된 레이저펄스의 반사지점의 3차원 좌표

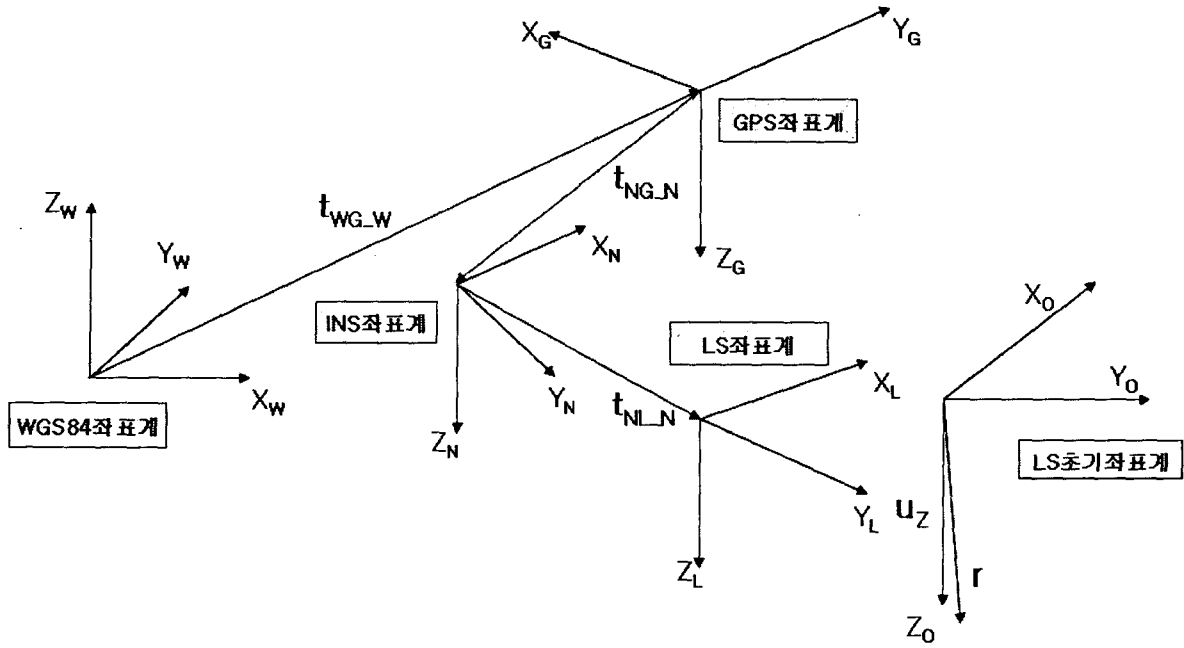


그림 1. 개별센서에 정의된 좌표계

3.2 오차를 포함한 다중센서방정식

개별센서와 센서통합에 관련하여 여러 가지 종류의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 오차를 포함한 센서 방정식을 세우기 위해서는 오차가 포함되지 않은 다중센서 방정식을 보완하여 시스템적인 오차요소를 고려한 다중센서 방정식을 유도할 수 있다. 개별센서와 센서통합에 관련된 오차를 수학적(또는 함수적)으로 개별적으로 모델링하여 다중센서방정식에 추가하면 최종적인 시스템적인 오차요소를 고려한 식(2)와 같은 다중센서 방정식이 유도된다. 여기서 고려된 시스템적오차는 LS에 대해 거리오차, 스캔각오차, 스캔평면오차, LS, INS, GPS 사이의 탑재오차, 시간오차 등이다. 각각의 오차가 모델링된 변수의 설명이 표 3에 기술된다. 자세한 유도과정은 이임평 등(2005)의 보고서를 참조한다.

$$P_W^* = R_{GW} \Delta R_{NG} R_{NG} (\Delta R_{LN} R_{LN} \Delta R_{0L} R_{0L} u_z (r + \Delta r) + t_{NL_N} + \Delta t_{NL_N} + t_{NG_N} + \Delta t_{NG_N}) + t_{WG_N} + \Delta t_{WG_N} + \Delta t_{TI} \quad (2)$$

표 3. 오차를 고려한 다중센서방정식에 포함된 변수의 정의 및 설명

변수	정의 및 설명
Δr	LS로 측정된 LS와 반사지점까지의 거리에 포함된 편이
ΔR_{0L}	스캔각오차와 스캔평면오차로 인해 R_{0L} 에 추가되는 회전행렬
ΔR_{LN}	INS와 LS사이의 탑재오차로 인해 R_{LN} 에 추가되는 회전행렬
ΔR_{NG}	INS와 GPS사이의 탑재오차로 인해 R_{NG} 에 추가되는 회전행렬
Δt_{NL_N}	INS와 LS사이의 탑재오차로 인해 t_{NL_N} 에 추가되는 이동벡터
Δt_{NG_N}	INS와 GPS사이의 탑재오차로 인해 t_{NG_N} 에 추가되는 이동벡터
Δt_{WG_N}	GPS로 측정된 위치좌표에 포함된 편이
Δt_{TI}	시간오차로 인해 발생하는 편이
P_W^*	WGS84좌표계로 표현된 레이저펄스의 반사지점의 시스템적오차가 포함된 3차원 좌표

4. 항공라이다시스템에 수반된 오차에 대한 민감도 분석

라이다데이터의 정확도를 개선하기 위해 데이터에 포함된 시스템적 오차를 제거하는 보정과정은 크게 1) 시스템적오차를 모델링하고, 2) 이를 기준데이터를 이용하여 추정하고, 3) 추정된 오차를 고려해서 좌표값을 재계산하는 과정으로 구성된다(Lee 등, 2004). 여기서 가장 중요한 과정인 오차 변수의 추정은 일반적으로 기준데이터와 측정데이터의 차이를 최소화하는 방법으로 수행하는데, 식(2)에 포함된 다수의 오차변수들을 동시에 독립적으로 추정하기는 어렵다. 이는 오차변수들 사이의 상관관계(correlation)가 크고 주어진 기준데이터가 불충분하기 때문이다. 따라서 다중센서방정식을 통해 최종적으로 계산된 3차원 좌표에 가장 큰 영향을 끼치며 상관관계가 크지 않은 오차변수를 선정해서 선정된 주요 변수만에 대한 추정을 수행해야 한다. 참고로 3.2절에서 나열한 시스템적 오차의 전형적인 값은 표 4와 같다. 시스템적 오차는 기본적으로 단위가 다르기 때문에 직접적인 대소비교가 불가능하다. 단위가 같아도 다중센서방정식에 대입되어 계산되는 3차원 좌표의 미치는 영향이 다르기 때문에 전형적인 값의 크기에 따라 주요 변수를 선정하면 안된다. 따라서 오차의 변화에 대한 민감도 분석을 통해 가장 큰 영향을 끼치는 변수들을 선정해야한다.

표 4. 다중센서에 수반된 시스템적 오차의 전형적인 값

오차변수	전형적인 값(typical values)
ΔR_{0L}	0.02° (스캔평면오차), 0.033° (스캔간오차)
ΔR_{LN}	0.3 ° (비행전), 0.01° (비행후)
ΔR_{NG}	0.01°
Δt_{NL_N}	3 cm
Δt_{NG_N}	3 cm
Δt_{WG_W}	10 cm
Δt_{TB}	1 cm

민감도 분석은 각각의 오차의 변화에 따른 3차원 좌표의 변화를 이론적으로 유도하여 수행한다. 예를 들어, Δt_{NG_N} 에 따른 3차원 좌표에 영향을 분석하자. Δt_{NG_N} 만을 고려한 3차원 좌표는 식(2)로부터 아래 처럼 나타난다.

$$P_W^* = R_{GW}R_{NG}(R_{LN}R_{0L}u_z r + t_{NL_N} + t_{NG_N} + \Delta t_{NG_N}) + t_{WG_N} \quad (3)$$

이를 식(1)의 오차를 고려하지 않은 3차원 좌표(P_W)와의 차이(ΔP_W)를 구하면 아래와 같다.

$$\Delta P_W = P_W^* - P_W = R_{GW}R_{NG}\Delta t_{NG_N} \quad (3)$$

비슷한 방식으로 시스템적 오차에 대한 민감도 분석을 수행한 결과는 표 5에 요약되어 있다. 자세한 유도과정은 이임평 등(2005)의 보고서를 참조한다. 이와 같이 이론적으로 유도된 민감도를 나타내는 수식은 보정을 위한 주요 변수를 선정할 때 유용하게 활용된다. 예를 들어, 항공라이다측량을 통해 데이터를 취득하고 취득된 지역중 주요 지역의 기준데이터를 사용하여 보정을 수행한다고 가정하자. 실제 측량을 통해 취득된 라이다 원점의 좌표, 표적까지의 거리 및 방향 등의 측정값을 표 5에 기술된 식에 대입하여 각각의 오차변수에 대한 민감도를 정확하게 계산할 수 있다. 민감도가 상대적으로 큰 변수들만을 선정하여 보정을 위한 오차변수추정을 수행한다.

표 5. 다중센서에 수반된 시스템적 오차에 대한 민감도 분석의 결과

오차변수	3차원 좌표의 차이(ΔP_W)
Δr	$R_{GW}R_{NG}R_{LN}R_{0L}u_z\Delta r$
ΔR_{0L}	$R_{GW}R_{NG}R_{LN}\delta R_{0L}R_{0L}u_zr$
ΔR_{LN}	$R_{GW}R_{NG}\delta R_{NG}R_{LN}R_{0L}u_zr$
ΔR_{NG}	$R_{GW}\delta R_{NG}R_{NG}R_{LN}R_{0L}u_zr$
Δt_{NL_N}	$R_{GW}R_{NG}\Delta t_{NL_N}$
Δt_{NG_N}	$R_{GW}R_{NG}\Delta t_{NG_N}$
Δt_{WG_w}	Δt_{WG_w}
Δt_{TB}	Δt_{TB}

5. 결론

본 연구는 항공라이다시스템에 수반된 다양한 시스템적 오차에 대한 원인 분석을 통한 수학적 모델링과 민감도 분석을 수행하였다. 수학적 모델링을 통해 대부분의 라이다시스템에 범용적으로 적용될 수 있는 시스템적 오차가 고려된 다중센서방정식을 제시하였다. 민감도 분석을 통해서 각각의 오차가 측정된 3차원 좌표에 끼치는 영향에 대한 정량적 평가를 가능하게 하는 수학적식을 유도하였다. 민감도 분석의 결과는 라이다데이터에 포함된 시스템적 오차를 제거하기 위한 보정(calibration)을 수행할 때 상관관계가 적고 영향이 큰 시스템적 오차변수를 선정하는 것에 중요하게 활용될 수 있을 것이다.

INS 데이터에 포함된 시스템적 오차가 3차원 좌표에 영향을 크게 미치는 가장 중요한 변수인데 본 연구에서는 시간에 따라 변하지 않는 상수로 가정하였다. 상당히 넓은 지역에 대한 오랜 시간의 측량의 경우에는 시간에 따라 변하는 함수로 모델링한다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각되며 이는 향후 연구를 통해 시도할 예정이다. 또한, 실제와 유사한 비행경로와 DEM을 가정하여 본 연구에서 민감도 분석을 통해 유도한 개별의 시스템적 오차가 측정된 3차원 좌표에 끼치는 영향에 대한 정량적 평가를 수행하려고 한다.

참고문헌

- 이임평, 최윤수, 염재홍, 권재현, 이동천, 유병민, 김성준, 박지혜, 양효진, 오의중, 이상준, 최진욱, 유근홍, 김지선 (2005), 다차원공간정보구축에 관한연구, 국토지리정보원.
- Gardner, C. S. (1992), Ranging performance of satellite laser altimeters, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, Vol. 30, pp. 1061-1072.
- Lee, I., Moon, J. and Kim, K. (2004), Parameter Recovery for LIDAR Data Calibration Using Natural Surfaces, *International Symposium on Remote Sensing (ISRS)*, Jeju, Korea.
- Schenk, T. (2001), *Modeling and analyzing systematic errors of airborne laser scanners*, Technical Notes in Photogrammetry No. 19, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.