creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학박사 학위논문

라이다 센서 데이터와 어안 렌즈 카메라 영상 간 융합을 위한 멀티 센서 시스템 캘리브레이션

Multi-Sensor System Calibration for Lidar and Fish-eye Lens Camera Data Integration

2018년 8월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

최 강 혁

라이다 센서 데이터와 어안 렌즈 카메라 영상 간 융합을 위한 멀티 센서 시스템 캘리브레이션

지도교수 김 용 일

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2018년 5월

서울대학교 대학원
건설환경공학부
최 강 혁

최강혁의 공학박사 학위논문을 인준함
2018년 6월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

최근 측량, 위치기반 서비스, 증강 현실, 모션 캡쳐, 그리고 교통 관리 등 다양한 분야에서 3차원 모델링의 활용 가능성에 주목하고 있다. 특히 멀티 센서 시스템을 이용한 3차원 모델링은 시스템을 구성하는 센서에 따라서 주변 환경에 대한 깊이, 색상 그리고 온도 등의 다양한 정보를 3차원 모델화 할 수 있다는 장점이 있어, 멀티 센서 시스템 개발과 활용에 관한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 백팩, 로봇, 그리고 드론 등의 다양한 플랫폼을 기반으로 한 멀티 센서 시스템의 개발이 진행됨에 따라서, 센서 시스템의 효율성 확보 및 경량화는 시스템 운용에 필수적인 요소가 되었다. 따라서 어안 렌즈 카메라와 3차원 라이다 등의 데이터 획득 효율성이 높은 센서를 활용한 멀티 센서 시스템이 주목받고 있다.

멀티 센서 시스템 데이터를 이용하여 3차원 모델을 제작하기 위해서는 시스템을 구성하는 센서의 수학적 모델식과 센서 간 상대적인 위치가 정확히 계산되어야 하며, 이는 정확한 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션을 통하여 해결될 수 있다. 하지만 최근 개발되고 있는 멀티 센서 시스템은 정확한 캘리브레이션 수행을 제한하는 다음과 같은 요인을 지니고 있다. 먼저 다수의 센서 시스템에서 사용되고 있는 어안 렌즈 카메라는 일반 광학 카메라와 투영 모델이 다름에도, 일반 광학 카메라에 대한 연구 결과에 기초하여 셀프 캘리브레이션이 수행되고 있다. 따라서 일반 광학 카메라와 구별되는 어안 렌즈 카메라의 특성을 파악하고 이를 통하여 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 정확도를 확보할 수 있는 연구가 필요하다. 다음으로 데이터 획득의 효율을 높이기 위하여 센서 간 시야각 중첩도가 최소화되도록 설계된 멀티 센서 시스템의 캘리브레이션에 관한 연구가 필요하다. 센서 간 시야각 중첩도를 최소화한 멀티 센서 시스템은 캘리

브레이션 수행이 크게 제한되기 때문에 이를 극복하기 위한 시스템 캘리브레이션 방법이 필요하다.

본 연구는 기존 연구의 한계점을 극복하고 색상 데이터와 깊이 데이터 간 정확한 융합을 위한, 센서 간 시야각 중첩도가 낮은 멀티 센서 시스템에 대한 캘리브레이션 방법을 제안한다. 연구는 크게 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션과 멀티 센서 시스템 캘리브레이션의 두 부분으로 나누어 볼 수 있다.

제안된 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 방법은 표정요소 간 상관관계를 효율적으로 낮추어 높은 정확도의 결과를 보여주었다. 본 연구에서는 어안 렌즈 투영 모델에 대한 분석 및 표정요소 간 상관관계 분석을 통하여 어안 렌즈 카메라의 경우 일반 광학카메라와는 다른 방식으로 표정요소 간 상관관계가 나타나는 것을 확인하였으며, 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 중요 표정요소 간 상관관계를 낮출 수 있는 검정 대상지 구성 방법을 제시하였다. 제안된 검정 대상지를 이용한 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션은 영상 잔차 RMSE(Root Mean Square Error) 기준 0.56 및 0.67 픽셀의 높은 정확도를 보였으며, 표정요소 간 상관관계는 최대 0.75 수준을 나타내었다.

멀티 센서 시스템 캘리브레이션 방법의 제안은 어안 렌즈 카메라와 라이다 간의 시스템 캘리브레이션과 라이다 간 시스템 캘리브레이션의 두 부분으로 진행되었다. 본 연구에서는 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소를 구하는 방법으로 점 대 면 시스템 캘리브레이션을 제안하였다. 점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법은 영상 기준점과 라이다 평면 패치 간의 기하학적 관계를 이용한 방법으로, i) 지상 기준점 좌표를 측정하는 과정이 필요 없으며, ii) 라이다 평면 패치의 일부만을 이용하여 해당 평면 위 모든 영상 기준점을 캘리브레이션에 사용할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 라이다 간 시스템 캘

리브레이션 방법은 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소와 표정요소의 편차를 이용하는 방법으로, 광학 카메라와 라이다 간의 시스템 캘리브레이션 결과와 정밀도를 이용하여 전역 최적화를 수행하는 방법이다. 해당 방법은 센서 간 위치관계에 대한 제한조건 설정만으로 시스템을 구성하는 모든 센서에 대한 상대표정요소를 계산할 수 있으며, 구현이 용이하면서도 기존 방법들에 비하여 높은 정확도를 기대할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 시스템 캘리브레이션 방법은 다양한 분석을 통하여 정확도가 검증되었으며, 영상 잔차 RMSE 기준 0.68에서 0.79픽셀 수준의 정확도를 보였다. 제안된 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션의 결과는 최종적으로 데이터 융합에 사용되었으며, 제작된 융합 데이터는 기존 방법에 비하여 높은 정확도를 보였다.

본 연구는 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션과 시야각 중첩도가 낮은 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하고, 센서 간 데이터 융합을 수행하였다. 제안된 방법은 구현이 편리하고 효율적이며 기존의 방법에 비하여 정확한 결과를 기대할 수 있다는 점에서 그 가치가 있다. 제안된 캘리브레이션 방법은 어안 렌즈 카메라의 셀프 캘리브레이션이 필요한 연구들에서 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 실시간 또는 현장 시스템 캘리브레이션에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 멀티 센서 시스템, 시스템 캘리브레이션, 어안 렌즈 카메라, 셀프 캘리브레이션, 데이터 융합, 백팩형 모바일 플랫폼

학 번 : 2013-30981

목 차

1. 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구동향 ····· 6

1.2.1 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 연구동향 ····· 7

1.2.2 시스템 캘리브레이션 연구동향 ····· 10

1.3 연구의 목적 및 범위 ····· 16

2. 멀티 센서 시스템의 구성 ····· 19

2.1 어안 렌즈 카메라의 제원 및 특징 ····· 19

2.2 라이다 센서의 제원 및 특징 ····· 20

2.3 센서 시스템 구성 및 센서 배치 ····· 21

3. 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 ····· 24

3.1 셀프 캘리브레이션의 이론적 배경 ····· 24

3.1.1 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계 ····· 25

3.1.2 영상 기준점과 캘리브레이션의 정확도 ····· 28

3.1.3 검정 대상지 구성 ····· 28

3.2 어안 렌즈 카메라의 수학적 모델 ····· 30

3.2.1 어안 렌즈 카메라의 투영 모델 ····· 30

3.2.2 투영 모델 편미분식 분석 ····· 32

3.3 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계 분석 ····· 35

3.3.1 평면 형태 검정 대상지에서의 표정요소 간 상관관계 ····· 36

3.3.2 검정 대상지 형태 변화에 따른 표정요소 간 상관관계 ····· 40

3.3.3 표정요소 간 상관관계 분석 및 종합 ····· 42

3.4 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 ····· 43

3.4.1 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 설계 ····· 44
3.4.2 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 정확도 평가 및 분석 ····· 48
3.5 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 ····· 61
3.5.1 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 설계 ····· 62
3.5.2 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 결과 분석 ····· 67

4. 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 ····· 73
4.1 멀티 센서 시스템 센서 간 위치관계 해석 ····· 74
4.2 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법 ··· 78
4.3 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 ····· 85
4.3.1 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 설계 ····· 86
4.3.2 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 결과 분석 ····· 91
4.4 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 ····· 96
4.4.1 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 설계 ····· 98
4.4.2 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 결과 분석 ····· 103

5. 멀티 센서 데이터 융합 ····· 108
5.1 데이터 융합의 수학적 모델 ····· 109
5.2 데이터 융합 정확도 평가 ····· 110
5.2.1 어안 렌즈 카메라와 라이다 데이터 간 융합 정확도 ····· 111
5.2.2 라이다 데이터 간 융합 정확도 ····· 116

6. 결 론 ····· 124

참 고 문 헌 ····· 127

부 록 ····· 141

표 목 차

[표 1-1] 연구의 목적과 세부 목표 ····· 17
[표 2-1] 어안 렌즈와 카메라의 제원 ····· 20
[표 2-2] 라이다 센서 제원 ····· 21
[표 2-3] 백팩형 멀티 센서 시스템 제원 ····· 22
[표 3-1] 투영 모델 편미분 수식 ····· 33
[표 3-2] 상관관계 분석 케이스별 이름 ····· 36
[표 3-3] 시뮬레이션 검정 대상지의 형태와 내용 ····· 47
[표 3-4] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 파라미터 설정 ····· 47
[표 3-5] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 안정성 평가 ····· 49
[표 3-6] 영상 기준점 잔차의 RMSE(pixel) ····· 51
[표 3-7] 디스토션 잔차의 RMSE(pixel) ····· 54
[표 3-8] 영상 기준점의 면적 비율(평균, %) ····· 55
[표 3-9] 주점 좌표의 오차(평균, pixel) ····· 56
[표 3-10] 초점 길이의 오차(평균, μm) ····· 56
[표 3-11] 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계(시뮬레이션) 58
[표 3-12] 등거리 투영 어안 렌즈 및 카메라의 제원 ····· 62
[표 3-13] 셀프 캘리브레이션용 검정 대상지와 영상 촬영 위치 · 64
[표 3-14] 어안 렌즈 카메라1의 셀프 캘리브레이션 결과 ····· 68
[표 3-15] 어안 렌즈 카메라1의 셀프 캘리브레이션 정확도 ····· 68
[표 3-16] 어안 렌즈 카메라2의 셀프 캘리브레이션 결과 ····· 69
[표 3-17] 어안 렌즈 카메라2의 셀프 캘리브레이션 정확도 ····· 69
[표 3-18] 어안 렌즈 카메라3의 셀프 캘리브레이션 결과 ····· 70
[표 3-19] 어안 렌즈 카메라3의 셀프 캘리브레이션 정확도 ····· 70
[표 3-20] 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계 ····· 72
[표 4-1] 각 센서 내부표정요소 및 특성 설정치 ····· 87

[표 4-2] 어안 렌즈 카메라의 외부표정요소 (시스템 캘리브레이션 시뮬레이션) ····· 88
[표 4-3] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 상대표정요소(ROP) 및 외부표정요소(EOP)의 오차 ····· 93
[표 4-4] 지상 기준점의 잔차 (시스템 캘리브레이션 시뮬레이션) 94
[표 4-5] 영상 기준점의 잔차 (시스템 캘리브레이션 시뮬레이션) 94
[표 4-6] 상대표정요소(ROP) 간 상관관계 (시스템 캘리브레이션 시뮬레이션) ····· 94
[표 4-7] 외부표정요소(EOP) 간 상관관계 (시스템 캘리브레이션 시뮬레이션) ····· 95
[표 4-8] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소 ····· 105
[표 4-9] 상대표정요소(ROP) 편차 ····· 105
[표 4-10] 영상 기준점의 잔차 (시스템 캘리브레이션) ····· 105
[표 4-11] 상대표정요소(ROP) 간 상관관계 ····· 106
[표 4-12] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소 보정값 107
[표 4-13] 멀티 센서 시스템의 상대표정요소 ····· 107
[표 5-1] 데이터 융합에 사용된 라이다 간의 상대표정요소 ····· 116
[표 5-2] 라이다 데이터 간 융합 정확도 ····· 123
[표 A.2-1] 광속조정 행렬의 구성 (어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션) ····· 145
[표 A.2-2] 광속조정 행렬의 구성 (어안 렌즈 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션) ····· 146

그 림 목 차

[그림 2-1] 멀티 센서 시스템에 사용된 어안 렌즈(좌)와 카메라(우) ····· 19
[그림 2-2] 멀티 센서 시스템에 사용된 라이다(Velodyne HDL-16E) ····· 20
[그림 2-3] 백팩형 멀티 센서 시스템의 구성 ····· 22
[그림 2-4] 멀티 센서 시스템의 데이터 획득 범위 ····· 23
[그림 3-1] 광학 카메라의 내부표정요소 ····· 25
[그림 3-2] 표정요소 간 상관관계가 셀프 캘리브레이션 정확도에 미치는 영향 (a) 지역 최적해 현상이 나타난 셀프 캘리브레이션 결과 (b) 지역 최적해의 문제점 ····· 27
[그림 3-3] 셀프 캘리브레이션에서 관찰되는 표정요소의 발산 현상 ····· 27
[그림 3-4] 표정요소 간 상관관계 분석 설정 (a) 평면 검정 대상지 회전 (b) 검정 대상지 모양 변경 ····· 36
[그림 3-5] xp와 X0, yp와 Y0, 그리고 f와 Z0 간의 상관관계 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 38
[그림 3-6] $\frac{dx_p}{dX0}$, $\frac{dy_p}{dY0}$, 그리고 $\frac{df}{dZ0}$의 표준편차 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 38
[그림 3-7] x_p와 Y0 그리고 y_p와 X0 간의 상관관계 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 39

[그림 3-8] $\frac{dx_p}{dY0}$ 그리고 $\frac{dy_p}{dX0}$의 표준편차 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 39
[그림 3-9] xp와 X0, yp와 Y0, 그리고 f와 Z0 간의 상관관계 (κ=0°, 검정 대상지 형태 변화) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 41
[그림 3-10] $\frac{dx_p}{dX0}$, $\frac{dy_p}{dY0}$, 그리고 $\frac{df}{dZ0}$의 표준편차 (κ=0°, 검정 대상지 형태 변화) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 41
[그림 3-11] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션의 흐름도 ····· 44
[그림 3-12] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 검정 대상지 (a) 평면형태 (b) 보완된 평면형태 (c) V형태 (d) 보완된 V형태 (e) A형태 (f) 보완된 A형태 (g) 방형태 ····· 46
[그림 3-13] 보완된 A 형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션의 화소별 잔차 (녹색: 0.5 픽셀 이하 오차, 빨간색: 0.5 픽셀 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 52
[그림 3-14] 보완된 V 형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션의 화소별 잔차 (녹색: 0.5 픽셀 이하 오차, 빨간색: 0.5 픽셀 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 53
[그림 3-15] V형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션에서의 영상 기준점 분포와 디스토션 파라미터 잔차 (녹색: 0.5 pixel 이하 오차, 빨간색: 0.5 pixel 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영 ····· 55

[그림 3-16] 검정 대상지 형태에 따른 원근 투영 카메라((a), (c), (e)) 및 등입체각 투영 카메라((b), (d), (f))의 영상 기준점 분포 (a), (b) 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 A형태 검정 대상지 (c), (d) 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지 (e), (f) 100m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지 ····· 60
[그림 3-17] 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 흐름도 ····· 61
[그림 3-18] 등거리 투영 어안 렌즈 및 카메라 바디 ····· 62
[그림 3-19] 셀프 캘리브레이션에 사용된 어안 렌즈 카메라의 렌즈와 바디 간 결착 방법 ····· 63
[그림 3-20] 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 검정 대상지 및 영상 촬영 위치 (a) 보완된 A형태 (b) A형태 (c) 평면 형태 ····· 65
[그림 3-21] 등입체각 투영 렌즈 카메라(어안 카메라1과 2) 영상 (a) 보완된 A 형태, κ=0° (b) 보완된 A형태, κ=90° (c) 평면 형태, κ=0° (d) 평면 형태, κ=90° ····· 66
[그림 3-22] 등거리 투영 렌즈 카메라(어안 카메라3) 영상 (a) 보완된 A 형태, κ=0° (b) 보완된 A형태, κ=90° (c) 평면 형태, κ=0° (d) 평면 형태, κ=90° ····· 66
[그림 4-1] 멀티 센서 시스템 및 일반적인 상대표정요소 설정 … 74
[그림 4-2] 멀티 센서 시스템 센서 간 상대적 위치 정의 ····· 75
[그림 4-3] 가중치 조정을 통한 점 대 면 등록법의 개념 ····· 79
[그림 4-4] 라이다 평면 기준 좌표계(UVW)와 지상 좌표계(XYZ) 간 관계 ····· 80
[그림 4-5] 라이다 평면 위 초기 기준점 좌표의 오차타원 ····· 80
[그림 4-6] 멀티 센서 시스템에서의 점 대 면 등록법 ····· 81
[그림 4-7] 라이다 패치 외부에 위치한 기준점의 조정 (점 대 면 시스템 캘리브레이션) ····· 83

[그림 4-8] 점 대 면 방법의 장점 (a) 각 센서의 시야각 (b) 점 대 면 방법에서 사용 가능한 기준점 (c) 기존 방법에서 사용 가능한 지상 기준점 ····· 83
[그림 4-9] 라이다 평면의 정확도가 시스템 캘리브레이션 정확도에 미치는 영향 ····· 84
[그림 4-10] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 흐름도 ····· 86
[그림 4-11] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 검정 대상지와 어안 렌즈 카메라 촬영위치 ····· 87
[그림 4-12] 시뮬레이션 라이다 데이터 ····· 89
[그림 4-13] 시뮬레이션 어안 렌즈 카메라 영상 ····· 89
[그림 4-14] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 지상 기준점 및 외부표정요소의 초기 위치 ····· 90
[그림 4-15] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 결과 ····· 91
[그림 4-16] 시스템 캘리브레이션을 통하여 조정된 지상 기준점 92
[그림 4-17] 시스템 캘리브레이션을 통하여 조정된 지상 기준점 (오차 발생 구간) ····· 92
[그림 4-18] 시스템 캘리브레이션의 흐름도 ····· 97
[그림 4-19] 캘리브레이션 타겟(좌) 및 검정 대상지 구성(우) ····· 98
[그림 4-20] 시스템 캘리브레이션 데이터가 획득된 위치와 방향 99
[그림 4-21] 시스템 캘리브레이션용 데이터 획득 ····· 100
[그림 4-22] 어안 렌즈 카메라 영상(위) 및 영상 기준점(아래) ····· 101
[그림 4-23] 라이다 데이터(위)와 데이터에서 추출된 평면(아래) ····· 102
[그림 4-24] 시스템 캘리브레이션 전 외부표정요소와 지상 기준점의 초기 위치 ····· 103
[그림 4-25] 시스템 캘리브레이션 후 조정된 외부표정요소 및 지

상 기준점의 위치 ····· 104
[그림 5-1] 멀티 센서 시스템 데이터 융합의 흐름도 ····· 108
[그림 5-2] 어안 렌즈 카메라와 라이다 데이터 융합의 개념도 ····· 109
[그림 5-3] 데이터 융합 정확도 판단을 위한 색상 부여 (a) 검증지1, 원본 영상 (b) 검증지2, 원본 영상 (c) 검증지1, 색상 부여 영상 (d) 검증지2, 색상 부여 영상 ····· 111
[그림 5-4] 멀티 센서 데이터 융합 영상 (a) 검증지1, 원본 영상 (b) 검증지1, 색상 부여 영상 (c) 검증지2, 원본 영상 (d) 검증지2, 색상 부여 영상 ····· 112
[그림 5-5] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지1, 라이다1) ····· 113
[그림 5-6] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지2, 라이다1) ····· 114
[그림 5-7] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지1, 라이다2) ····· 115
[그림 5-8] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지2, 라이다2) ····· 115
[그림 5-9] 라이다 데이터 간 융합 정확도 평가 위치 ····· 117
[그림 5-10] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (1번) (a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값 ····· 118
[그림 5-11] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (2번) (a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값 ····· 119
[그림 5-12] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (3번) (a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값 ····· 120
[그림 5-13] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (4번) (a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값 ····· 121

[그림 5-14] 라이다 데이터 간 융합 정확도 계산 방법 ····· 122
[그림 A.1-1] 등입체각 투영 모델의 개념 ····· 141
[그림 A.1-2] 등거리 투영 모델의 개념 ····· 142
[그림 A.1-3] 정사 투영 모델의 개념 ····· 142
[그림 A.1-4] 스테레오 투영 모델의 개념 ····· 143
[그림 A.3-1] 시스템 캘리브레이션 전 외부표정요소와 지상 기준점의 초기 위치(어안 카메라1 - 라이다2) ····· 147
[그림 A.3-2] 시스템 캘리브레이션 후 조정된 외부표정요소 및 지상 기준점(어안 카메라1 - 라이다2) ····· 147
[그림 A.3-3] 시스템 캘리브레이션 전 외부표정요소와 지상 기준점의 초기 위치(어안 카메라2 - 라이다2) ····· 148
[그림 A.3-4] 시스템 캘리브레이션 후 조정된 외부표정요소 및 지상 기준점(어안 카메라2 - 라이다2) ····· 148
[그림 A.4-1] 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어의 흐름도 ····· 149
[그림 A.4-2] 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어 시작 화면 ··· 150
[그림 A.4-3] 각 센서의 시뮬레이션 파라미터 설정 화면 ····· 150
[그림 A.4-4] 센서 시스템의 시뮬레이션 상대표정요소 설정 화면 ····· 151
[그림 A.4-5] 시뮬레이션 타겟 및 검정 대상지 설정 화면 ····· 152
[그림 A.4-6] 시뮬레이션 센서 시스템의 외부표정요소 설정 화면 ····· 153
[그림 A.4-7] 광학 카메라 시뮬레이션 데이터 제작 화면 ····· 154
[그림 A.4-8] 라이다 시뮬레이션 데이터 제작 화면 ····· 154
[그림 A.4-9] 단일 위치에서 제작된 모든 센서의 시뮬레이션 데이터 ····· 155
[그림 A.4-10] 캘리브레이션 소프트웨어의 흐름도 ····· 156
[그림 A.4-11] 캘리브레이션 소프트웨어 시작 화면 ····· 157

[그림 A.4-12] 센서 내부표정요소 및 파라미터 설정 화면 ····· 158
[그림 A.4-13] 광학 카메라 영상 기준점 획득 화면 ····· 158
[그림 A.4-14] 라이다 데이터 평면 패치 획득 화면 ····· 159
[그림 A.4-15] 전처리가 완료된 센서 데이터 및 지상 기준점 좌표 불러오기 ····· 160
[그림 A.4-16] 상대표정요소 및 외부표정요소 초기값 설정 화면 ····· 160
[그림 A.4-17] 시뮬레이션 표정요소 및 파라미터 설정값 불러오기 ····· 161
[그림 A.4-18] 캘리브레이션 수행 화면 ····· 162
[그림 A.4-19] 영상 또는 영상 기준점을 캘리브레이션에서 배재하는 기능 ····· 163
[그림 A.4-20] 영상 기준점 전체의 화면 배치 및 면적 비율 확인 기능 ····· 163
[그림 A.4-21] 영상 기준점의 잔차 확인 기능 ····· 164
[그림 A.4-22] 캘리브레이션 시뮬레이션 정확도 분석 기능 ····· 165
[그림 A.4-23] 내부표정요소 및 디스토션 파라미터 정확도 분석 기능 ····· 166

1. 서 론

1.1 연구배경

최근, 3차원 모델은 위치기반서비스, 측량, 지능형 교통시스템, 구조적 안전 모니터링, 구조물 및 환경 모니터링, 증강 현실 구축, 모션 캡쳐, 공공 안전, 화재 대응 계획, 그리고 의료 서비스 등의 다양한 분야에서 활용이 기대되고 있다. 따라서 3차원 모델 제작에 사용되는 멀티 센서 시스템에 대한 수요 또한 증대되고 있다(Chow et al. 2014).

멀티 센서 시스템은 다수의 센서를 하나의 플랫폼에 설치하고 각 센서 데이터를 동시에 획득할 수 있도록 설계된 시스템으로, 포함된 센서의 종류에 따라서 크게 단종 센서 시스템(single-modal system)과 다종 센서 시스템(multi-modal system)으로 나뉜다. 단종 센서 시스템은 한 종류의 센서만으로 구성된 시스템으로, 일반적으로 다수의 광학 카메라를 이용하여 제작된다. 반면 다종 센서 시스템은 서로 다른 종류의 센서로 구성된 시스템으로, 일반적으로 색상 정보(RGB)를 제공하는 광학 카메라와 깊이 정보(depth)를 제공하는 라이다 센서로 구성된다.

단종 센서 시스템은 다음과 같은 장점과 단점을 지니고 있다. 먼저 단종 센서 시스템은 시스템 구성에 필요한 비용이 상대적으로 적으며, 3차원 모델 제작에 사용될 경우 높은 해상도의 데이터를 생산할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 영상에 특징점 정보가 부족하거나, 유사한 텍스쳐가 반복되는 경우 제작된 3차원 모델의 정확도가 크게 낮아지며, 다종 센서 시스템에 비하여 다수의 카메라가 필요하기 때문에 시스템의 크기와 무게가 크게 증가할 수 있다는 단점이 있다(Salinas et al. 2015).

단종 센서 시스템의 단점을 극복하기 위하여 최근 3차원 모델 제작에는 주로 다종 센서 시스템이 이용된다. 다종 센서 시스템의 장점은 크게 정확도 향상 부분과 시스템 설계 유연성 확보의 두가지 측면으로 나눌 수 있다. 먼저 다종 센서 시스템을 이용하여 3차원 모델을 제작할 경우, 제작된 모델은 단종 센서 시스템의 경우에 비하여 일반적으로 높은 정확도를 나타낸다. 즉 다종 센서 시스템은 대상의 형태를 보다 정확하게 재구성할 수 있으며(Shim et al. 2012), 텍스쳐가 부족한 곳이나 깊이가 비연속적인 곳에서도 3차원 모델의 정확도가 감소하지 않는다(Nair et al. 2013). 다음으로 다종 센서 시스템은 시스템을 구성하는 센서의 숫자가 단종 센서 시스템에 비하여 상대적으로 적기 때문에 시스템 구성에 사용될 수 있는 플랫폼 선택의 폭을 크게 증가시킨다. 이와 같은 장점으로 인하여 백팩, 드론, 로봇, 그리고 차량 등의 다양한 플랫폼을 활용한 다종 센서 시스템 개발이 이루어지고 있다.

한편 최근 다종 센서 시스템은 데이터 획득의 효율성을 보다 높이는 방향으로 개발되고 있다. 데이터 획득의 효율성을 확보하는 방법은 보다 넓은 시야각을 지닌 센서를 이용하여 시스템을 구축하는 방식이 있으며, 다음으로 센서 간 시야각 중첩을 최소화하는 방식이 있다. 이 같은 두 가지 방식은 일반적으로 동시에 적용되어 센서 시스템의 데이터 획득 효율성을 극대화시킬 수 있게 한다. 대표적으로 어안 렌즈 카메라는 넓은 시야각을 통하여 빠르게 주변 지역에 대한 색상 정보를 획득할 수 있다는 장점(Li 2016, Miyamoto 1964, Perfetti et al. 2017)이 있기 때문에, 최근 다양한 멀티 센서 시스템에 사용되고 있으며, 멀티 센서를 구성하는 어안 렌즈 카메라들 간에는 일반적으로 시야각 중첩이 최소화되도록 배치한다.

멀티 센서 시스템의 데이터 융합은 셀프 캘리브레이션과 시스템 캘리브레이션 과정을 통하여 수행된다. 데이터 융합은 서로 다른 센

서에서 취득된 데이터를 하나의 좌표계로 통합하는 것으로, 이를 통하여 참조 센서의 데이터에 매칭되는 다른 센서의 데이터를 특정할 수 있다. 이때 셀프 캘리브레이션은 각 센서에 관련된 수학적 모델식의 파라미터를 계산하는 것이며, 시스템 캘리브레이션은 센서 간 상대적 위치를 계산하는 것이다. 따라서 라이다와 광학 카메라로 이루어진 멀티 센서 시스템의 데이터 간 융합은 i) 라이다 셀프 캘리브레이션, ii) 광학 카메라 셀프 캘리브레이션, iii) 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션, 그리고 iv) 라이다와 라이다 간 시스템 캘리브레이션의 네가지 측면에서 살펴볼 수 있다.

라이다 셀프 캘리브레이션은 라이다의 종류, 시스템의 목적 등에 따라서 그 중요도가 달라진다. 라이다 센서 셀프 캘리브레이션이 생략될 수 있는 경우는 다음과 같다. 먼저 라이다의 점군 데이터에서 평면 등의 3차원 정보를 추출하여 사용할 때, 점군 데이터의 오차 수준이 평면 등의 3차원 정보 정확도에 큰 영향을 주지 않는다고 판단되면 셀프 캘리브레이션이 생략될 수 있다. 다음으로 특정 객체의 움직임 파악을 위하여 제작된 시스템의 경우, 일정 수준 이상의 깊이 값 변화를 감지하는 것이 시스템의 목적이기 때문에 요구되는 깊이 정확도가 상대적으로 낮아 라이다에 대한 셀프 캘리브레이션 과정이 생략되기도 한다(Van den Bergh et al. 2011 and Munaro et al. 2016). 마지막으로 라이다 깊이 값의 디스토션이 운용 시간 그리고 주변 온도 등의 다양한 요인에 의하여 영향을 받아 깊이 값의 디스토션이 수학적 모델로 충분히 설명되지 못하는 경우에도 셀프 캘리브레이션이 생략될 수 있다(Lindner et al. 2007, Wu et al. 2009, Borrmann et al. 2012, Mikhelson et al. 2014 and Munaro et al. 2016).

광학 카메라의 셀프 캘리브레이션은 데이터 융합에 필수적이다. 광학 카메라의 내부표정요소는 셀프 캘리브레이션을 통하여 계산되며,

계산된 표정요소를 이용하여 영상의 계통 오차(systematic error)가 모두 보정되어야 정확한 데이터 융합이 가능하기 때문이다. 광학 카메라 셀프 캘리브레이션은 대상 카메라의 투영 모델에 따라서 크게 원근 투영(perspective projection) 카메라 캘리브레이션과 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션으로 나눌 수 있다. 원근 투영은 가장 일반적으로 광학 카메라에 적용되는 투영법이며, 원근 투영 카메라의 셀프 캘리브레이션은 1960년대부터 최근까지 다양한 연구를 통하여 충분히 검증되어 왔다(Brown 1966, Beyer 1992, Fraser 1997 and Remondino et al. 2006). 그러나 어안 렌즈 카메라의 경우는 큰 방사 방향 디스토션으로 인하여 최근에서야 3차원 모델링에 사용되기 시작하였으며, 따라서 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 관한 연구는 아직 충분하지 않은 상황이다.

시스템 캘리브레이션은 센서의 배치와 각 센서의 종류에 큰 영향을 받는다. 멀티 센서 시스템의 경우, 일반적으로 이종 센서(광학-깊이) 간에는 시야각의 중첩도를 높여 데이터 융합의 효율을 높일 수 있도록 설계된다. 센서 간의 높은 시야각 중첩도는 센서 데이터의 공통 기준요소 확보와 시스템 캘리브레이션 수행에 용이한 조건을 제공한다. 따라서 이종 센서 간의 시스템 캘리브레이션 관련 연구는 각 센서 데이터 특성을 보다 잘 활용하여 시스템 캘리브레이션의 효율성을 확보하고, 결과의 정확도를 높이는 방향으로 이루어지고 있다.

멀티 센서 시스템을 구성하는 동종 센서들의 배치는 센서 간 시야각 중첩도를 낮추어 보다 넓은 지역의 데이터를 획득할 수 있도록 설계된다. 센서 간의 낮은 시야각 중첩도는 공통된 기준점, 선 또는 면 등의 정보 부족의 원인이 되며, 시스템 캘리브레이션의 수행 및 정확도 확보를 어렵게 한다. 그러므로 동종 센서 간 상대적 위치를 보다 정확히 결정할 수 있는 시스템 캘리브레이션 방법론에 관한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

결론적으로, 라이다와 광학 카메라로 이루어진 다종 센서 시스템 데이터의 융합에 있어 광학 카메라 셀프 캘리브레이션과 센서 간 시스템 캘리브레이션은 필수적으로 수행되어야 하며, 각 캘리브레이션에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 정밀한 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션과 멀티 센서 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있는 방법을 제시하고, 이를 이용하여 데이터 융합을 수행하고자 한다.

1.2 연구동향

멀티 센서 시스템의 데이터 융합을 위해서는 센서에 대한 셀프 캘리브레이션 및 센서 시스템에 대한 시스템 캘리브레이션이 수행되어야 한다. 셀프 캘리브레이션은 각 센서의 수학적 특성을 해석하는 것으로, 내부 표정 요소(Interior Orientation Parameters)인 주점(principal point)의 좌표, 주점 거리(principal distance), 그리고 디스토션 파라미터(distortion parameters) 등을 도출하는 단계이다. 시스템 캘리브레이션은 센서 간의 기하학적 위치관계를 해석하는 것으로, 상대 표정 요소(Relative Orientation Parameters)인 센서 간 변위와 회전 관계를 계산하는 것이다.

내부표정요소와 상대표정요소는 한 번의 캘리브레이션 단계를 통하여 계산되기도 한다. 특히 셀프 캘리브레이션을 수행할 센서가 4대 이상일 경우, 한 번의 캘리브레이션 과정을 통하여 내부표정요소와 상대표정요소를 함께 계산하는 것은 캘리브레이션에 필요한 시간을 감소시켜, 전체 과정의 효율성을 크게 높일 수 있다(Detchev et al. 2018). 하지만 내부표정요소와 상대표정요소를 함께 계산할 경우, 변수의 증가에 따른 과모수화(over-parameterization) 상태가 나타날 수 있으며, 이로 인하여 불량 조건(ill condition) 또는 특이점(singularity) 현상이 발생할 수 있다(Gruen et al. 2001). 따라서, 본 연구에서는 과모수화에 따른 불량 조건 및 특이점 현상을 방지하고 캘리브레이션의 정확도를 높이기 위하여, 셀프 캘리브레이션과 시스템 캘리브레이션을 독립적으로 진행하였다.

1.2.1 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 연구동향

최근, 어안 렌즈 카메라는 측량, 실·내외 3차원 모델링, 로봇공학, 증강현실, 그리고 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다. Marković et al.(2014)과 Caruso et al.(2015)은 SLAM 및 모바일 로봇 구현에 어안 렌즈 카메라를 활용한 바 있으며, Sánchez et al.(2016)은 도심지 내비게이션 정확도 향상에 어안 렌즈 카메라를 사용하였다. Schöps et al.(2015)은 어안 렌즈 카메라를 사용하여, 넓은 지역에 대한 3차원 모델 제작을 수행한 바 있다.

어안 렌즈 카메라는 영상의 외곽 부분을 중앙부에 비하여 압축적으로 표현하여 넓은 지역에 대한 색상 정보를 기록하기 때문에, 시야각이 크다는 장점과 영상에 강한 왜곡이 존재한다는 단점을 동시에 지니고 있다. 따라서 어안 렌즈 카메라의 장점을 극대화 하고 단점을 극복하기 위해서는 정확한 셀프 캘리브레이션을 통하여 영상의 왜곡을 보정하여야 한다(Mei et al. 2007 and Marcato Junior et al. 2015).

어안 렌즈 카메라 영상의 왜곡은 투영 모델과 렌즈 디스토션, 두 가지 성분에 의하여 나타난다. 투영 모델에 의한 왜곡은 어안 렌즈 카메라의 설계 및 제작 단계에서 의도된 왜곡으로, 영상의 중앙에서 외곽 방향으로 갈수록 보다 큰 왜곡 효과를 나타낸다. 렌즈 디스토션은 어안 렌즈 카메라를 포함하는 모든 광학 카메라에서 나타나는 왜곡 성분으로, 설계 및 제작 단계에서 의도되지 않은 기술적 오차에 의하여 발생하는 왜곡이다(Hughes et al. 2010). 렌즈 디스토션 모델은 투영 모델에서 설명되지 않는 방사 및 편심 왜곡 등에 대한 해석을 제공하며, 이는 Beyer (1992), Brown (1966), 그리고 Fraser (1997)등의 다양한 연구를 통하여 충분히 검증되어 왔다.

대표적인 어안 렌즈 카메라의 투영 모델로는 등거리(equidistant),

등입체각(equisolid angle), 정사(orthogonal), 그리고 스테레오(stereographic) 투영의 4가지 모델이 있다(Miyamoto 1964, Ray 2002, Abraham et al. 2005 and Kannala et al. 2006). 기존의 많은 연구에서는 대표적인 4가지 투영 모델을 적용하여 셀프 캘리브레이션을 수행하고 있다. 이 외에도 FET(Fish Eye Transform) 모델 및 PFET(Polynomial Fish Eye Transform) 모델(Basu et al. 1993 and Basu et al. 1995), FOV(Field Of View) 모델(Devernay et al. 2001), 그리고 Division 모델(Brauer-Burchardt et al. 2001 and Fitzgibbon 2001) 등의 다양한 어안 렌즈 카메라 모델이 제시된 바 있다.

서로 다른 투영 모델을 지닌 어안 렌즈 카메라의 셀프 캘리브레이션은 다양한 연구에서 수행된 바 있으며, 각 투영 모델이 실제 어안 렌즈 카메라의 방사방향 왜곡을 적절히 설명할 수 있음이 아래와 같은 논문들을 통하여 확인된 바 있다. Li(2006)와 Chunyan et al.(2010) 등은 등거리 투영 모델과 렌즈 디스토션 모델을 적용하여, 파노라믹 카메라의 셀프 캘리브레이션을 수행한 바 있다. Hughes et al.(2010)은 등거리 투영 어안 렌즈 카메라의 영상에서 선분 정보를 추출하여 소실점을 계산하고, 이들을 이용하여 왜곡 효과를 제거하는 방법을 제시하였다. Sahin(2016)은 등거리 투영 모델을 사용하여, 휴대폰 카메라에 대한 캘리브레이션을 수행한 바 있다. Schneider et al.(2008)은 등입체각 모델의 어안 렌즈 카메라와 라이다 센서로 구성된 멀티 센서 시스템을 제작하고, 각 센서에 대한 캘리브레이션을 수행한 바 있다. Perfetti et al.(2017)은 스테레오 투영 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션을 수행을 통해서 보정된 영상을 사용하여 문화유산에 대한 3차원 모델 제작을 수행하였다. 한편 Bakstein et al.(2002)은 스테레오 투영과 등입체각 모델을 혼합한 새로운 투영 모델을 제시하고, 이를 사용하여 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션을 수행하였다. Xiong et al.(2011)은 PFET-렌즈 디스토션 모델을 사용하여, 모바일 로봇 실내

위치 결정에 이용될 어안 렌즈 카메라에 대한 셀프 캘리브레이션을 수행한 바 있다.

어안 렌즈 카메라의 각 투영 모델에 대한 검증 이외에도 투영 모델 간의 비교 그리고 투영 모델의 대체 가능성에 대한 연구 역시 아래와 같이 수행된 바 있다. Hughes et al.(2010)과 Schneider et al.(2009) 등은 서로 다른 투영 모델의 다양한 어안 렌즈 카메라에 대하여, 각각 셀프 캘리브레이션을 수행하고, 그 정확도를 비교 검증한 바 있다. Schneider et al.(2009)은 4가지 대표적 투영 모델을 이용하여 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션을 수행하여, 어안 렌즈 카메라의 실제 투영 모델이 아닌 모델을 사용할 경우 방사 왜곡의 보정은 렌즈 디스토션 파라미터 조정을 통하여 가능하지만 주점의 좌표나 초점 길이 등의 내부 표정 요소가 정확히 계산되지 않음을 확인하였다. Hughes et al.(2010)은 대표적인 4가지의 투영 모델 및 FET, PFET, FOV, 그리고 Division 투영 모델들 간의 셀프 캘리브레이션 정확도를 비교 검증한 바 있다. 한편 Marcato Junior et al.(2015)은 어안 렌즈 카메라 투영 모델에 관한 정보가 사전에 제공되지 않을 경우의 셀프 캘리브레이션에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 다양한 어안 투영 모델들 및 원근 투영 모델을 모두 적용하여 스테레오 투영 카메라 셀프 캘리브레이션을 수행하고 그 정확도를 확인하였다. 이를 통하여, 원근 투영 - 렌즈 디스토션 모델의 조합으로는 어안 렌즈 카메라 왜곡을 정확히 설명할 수 없다는 것을 확인하였다.

기존의 연구들은 각 투영 모델이 어안 렌즈 카메라의 방사 왜곡을 얼마나 정확히 해석할 수 있는지에 대한 분석을 제공한다. 하지만 다수의 기존 연구에서는 내부 표정요소, 외부 표정요소, 그리고 렌즈 디스토션 파라미터들 간에 상관관계가 관찰된 바 있음에도(Schneider et al. 2009, Marcato Junior et al. 2015 and Urban et al. 2015), 이에 대한 분석은 거의 이루어지지 않았다.

각 표정요소 간 상관관계는 셀프 캘리브레이션 결과에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 캘리브레이션의 정확도를 평가하는 매우 중요한 지표이다. 표정요소 간 상관관계는 일반적인 광학 카메라(원근 투영 카메라)의 경우에도 관찰되는 현상이며, 일반 광학 카메라의 경우 다양한 기존 연구를 통하여 파라미터간의 상관관계를 낮추기 위한 캘리브레이션 방법론이 제시된 바 있다(Beyer 1992, Li et al. 1996, Shortis et al. 1998, Habib et al. 2003, Remondino et al. 2006, Schiller et al. 2008, and Fraser 2013). 하지만 어안 렌즈 카메라의 경우, 이와 같은 연구가 부족한 상황이다. 어안 렌즈 카메라는 일반 광학 카메라와 투영 모델식이 다르기 때문에, 상관관계가 나타나는 방식도 다를 수 있으며, 이는 어안 렌즈 카메라의 셀프 캘리브레이션 정확도에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 어안 렌즈 카메라의 셀프 캘리브레이션 파라미터간 상관관계를 최소화하여, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

1.2.2 시스템 캘리브레이션 연구동향

시스템 캘리브레이션 방법은 원-스텝 방법(one-step method)과 투-스텝 방법(two-step method)으로 나눌 수 있다. 원-스텝 방법은 센서 간의 위치 관계가 좌표계 기준이 되는 센서의 외부표정요소들과 하나의 상대표정요소로 표현되며, 광속조정(bundle block adjustment)을 통하여 바로 상대표정요소가 도출된다. 투-스텝 방법은 센서 간의 위치 관계가 좌표계 기준이 되는 센서의 외부표정요소들과 다른 센서의 외부표정요소들로 표현되며, 각 센서의 외부표정 요소들은 각각의 광속조정을 통하여 계산된다. 이때 상대표정요소는 각 센서 외부표정요소 간의 차이를 평균하여 계산된다. 원-스텝 방법이 결과 정확도 확보에 보다 유리하다는 사실은 Choi et al.(2018) 등과 같은 많은 연

구를 통하여 검증된 바 있으며, 다양한 연구에서 원-스텝 방법을 이용하여 시스템 캘리브레이션을 수행한 바 있다(Wu et al. 2009, Van den Bergh et al. 2011, Zhu et al. 2011, Herrera et al. 2012, Shim et al. 2012, Vidas et al. 2013, Mikhelson et al. 2014 and Hansard et al. 2015).

멀티 센서 시스템 캘리브레이션에 관한 연구는 센서 조합과 사용된 기준요소에 따라서 나누어 살펴볼 수 있다. 즉 센서 조합을 기준으로 크게 i) 광학 카메라와 라이다 센서 간 시스템 캘리브레이션, 그리고 ii) 라이다 간 시스템 캘리브레이션으로 부분으로 구분된다. 또한 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션은 사용된 기준요소에 따라서 강도(intensity) 영상을 이용한 점 대 점(point-to-point) 방법, 라이다 데이터의 3차원 기준점을 이용한 점 대 점 방법, 선 대 면(line-to-plane) 방법, 점 대 선(point-to-line) 방법, 그리고 점 대 면(point-to-plane) 방법 등으로 구분된다(Taguchi et al. 2013).

강도 영상을 이용한 방법은 광학 영상과 강도 영상에서 동시에 나타나는 지상 기준점을 활용하여 시스템 캘리브레이션이 수행된다. Chen et al.(2016), Horaud et al.(2016), Pandey et al.(2015), Taylor et al. (2015), 그리고 Zhang et al.(2012)은 강도 영상을 이용한 점 대 점 시스템 캘리브레이션을 수행한 바 있다. 강도 영상을 이용한 점 대 점 방법은 광학 카메라 간의 시스템 캘리브레이션과 동일한 방식으로 진행되기 때문에 상대적으로 구현이 용이하며, 라이다 데이터에서 특정 객체를 추출하는 등의 전처리 과정이 필요 없다는 장점이 있다. 하지만 강도 영상을 제공하지 않는 라이다 센서가 사용된 멀티 센서 시스템에는 적용할 수 없으며, 강도 영상의 해상도가 낮을 경우 최종 정확도가 크게 감소할 수 있다는 단점이 있다.

라이다 데이터의 3차원 점을 이용한 점 대 점 방법은 라이다 데이터에서 추출된 3차원 기준점과 이에 매칭되는 광학 영상의 기준점을

사용한 시스템 캘리브레이션 방법이다. Park et al.(2014)과 Wang et al.(2015)은 삼각형 또는 사각형 모양의 평면 타겟을 이용하여 점 대 점 시스템 캘리브레이션을 수행하였다. 이들은 타겟 모서리의 3차원 좌표를 라이다 데이터로 부터 추출하여 시스템 캘리브레이션에 사용하였다. Staranowicz et al.(2015)은 구 형태의 검정 대상지를 제작하고, 깊이 데이터 및 광학 영상에서 구의 무게 중심점을 계산하여 기준점으로 사용하였다. 이 같은 점 대 점 시스템 캘리브레이션 방법은 기준요소가 점으로 이루어져 있기 때문에 센서 간의 상대적 위치 관계가 강하게 제한된다는 장점이 있다. 하지만 라이다 데이터에서 추출한 평면 또는 구면의 정확도가 최종 시스템 캘리브레이션 결과에 큰 영향을 줄 수 있다는 단점이 있다.

선 대 면 방법은 주로 라이다 라인 스캐너 센서에 적용되는 방법으로, 광학 영상에서 획득한 3차원 평면 정보와 라인 스캐너의 선분 정보를 이용한 시스템 캘리브레이션 방법이다. Pless et al.(2003)은 라인 스캐너와 광학 카메라로 이루어진 센서 시스템을 제작하고, 두 센서가 동일한 평면을 촬영할 경우, 라인 스캐너의 3차원 선분은 광학 카메라에서 나타나는 평면 위에 위치해야 한다는 조건을 이용한 시스템 캘리브레이션을 제안한 바 있다. Bok et al.(2011)은 Pless et al.(2003)이 제안한 선 대 면 시스템 캘리브레이션은 3차원 선분이 평면을 따라서 이동하는 것을 제한할 조건이 없을 경우, 시스템 캘리브레이션의 정확도가 크게 낮아질 수 있음을 지적하고 점 대 선 방법을 이용한 시스템 캘리브레이션을 제안하였다. Bok et al.(2011)은 검정 대상지 평면을 촬영한 깊이 데이터에서 획득한 선분의 양 끝 점은 검정 대상지 모서리 선분위에 위치해야 한다는 기하 조건을 이용한 점 대 선 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하였다. Bok et al.(2014), Cramer(2014), 그리고 Song et al.(2016)은 점 대 선 방법을 사용하여 멀티 센서 시스템의 시스템 캘리브레이션을 수행한 바 있다. 점 대

선 방법은 선 대 면 방법에 비하여 높은 기하적 안정성을 확보하였다는 장점이 있다. 하지만 깊이 데이터의 해상도가 충분히 높지 않아, 추출된 3차원 선분의 정확도가 낮아질 경우에는 시스템 캘리브레이션의 정확도가 크게 낮아질 수 있다는 단점이 있다.

점 대 면 방법은 깊이 데이터의 특정 평면 위 점들을 광학 카메라로 재투영(re-projection)할 때, 모든 점들은 광학 영상의 해당 평면 위로 투영되어야 한다는 조건을 이용한 시스템 캘리브레이션 방법이다. Lee et al.(2016)과 Mirzaei et al.(2012)은 3차원 라이다와 파노라믹 카메라 간에 시스템 캘리브레이션에 점 대 면 방법을 사용하였다. 이외에도 3차원 선분과 2차원 선분 정보를 이용한 방법(Moghadam et al. 2013), 3차원 평면과 평면 정보를 이용한 방법(Shin et al. 2012), 그리고 선 대 면, 면 대 면 조건을 모두 이용한 방법(Owens et al. 2015) 등 다양한 시스템 캘리브레이션 방법이 제안된 바 있다. 이와 같은 3차원 선 또는 면을 이용한 시스템 캘리브레이션 방법은 강도 영상이 제공되지 않는 라이다에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 기준 선 또는 면들이 서로 평행 또는 평행에 가까울 경우, 센서 간 위치관계가 다양하게 해석될 수 있다는 단점이 있기 때문에 기준 선이나 면의 배치를 사전에 정밀히 계획할 필요가 있다.

광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션에 대한 기존 연구들에서는 점, 선, 그리고 평면 등의 다양한 기준요소를 이용하여 제약조건(constraints)을 설정하고, 이를 기반으로 한 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 하지만 기존의 연구들은 다음과 같은 점에서 추가 연구의 필요성을 보이고 있다. 먼저 기존의 방법들은 각 기준요소에 매칭되는 지상 기준점의 좌표를 측정하는 과정이 필요하며, 이는 시스템 캘리브레이션 수행에 필요한 시간을 크게 증가시킨다. 다음으로 라이다 데이터로 부터 추출된 기준 요소들의 정확도가 최종 시스템 캘리브레이션 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다는 단점이 있다. 마

지막으로 라이다 데이터의 3차원 점을 이용한 점 대 점 방법 또는 점 대 면 방법 등은 평면 타겟의 라이다 정보가 불완전할 경우, 해당 평면을 시스템 캘리브레이션에 사용할 수 없다는 단점이 있다. 즉 점 대 점 또는 점 대 면 방법의 경우, 시스템 캘리브레이션 수행에 라이다 데이터에서 추출된 평면의 모서리 점이 사용되며, 이를 정확히 획득하기 위해서는 라이다가 해당 평면 전체를 높은 해상도로 스캔한 상태여야 한다. 하지만 캘리브레이션용 검정지는 일반적으로 다수의 타겟을 다양한 위치와 방향을 나타내도록 구성되며, 이 때문에 평면의 일부분에 대한 정보만이 획득되거나 라이다 점군 데이터의 해상도가 낮아질 수 있다.

멀티 센서 시스템에 장착된 라이다 간 시스템 캘리브레이션에 관한 연구는 제한적으로 진행되어 왔다. 이는 라이다 간 시야각 중첩이 매우 낮아, 공통되는 기준요소가 부족하여 시스템 캘리브레이션 수행이 매우 어렵기 때문이다. 이 때문에 다양한 기존 연구(Weingarten et al. 2006, Paparoditis et al. 2012, Trevor et al. 2012, Kim 2013, Lauterbach et al. 2015 and Nüchter et al. 2015)에서 라이다 간의 시스템 캘리브레이션이 생략된 바 있다. Paparoditis et al.(2012)은 3개의 3차원 라이다와 광학 카메라로 구성된 모바일 맵핑 시스템을 제작하고, 라이다 간 상대적 위치는 시스템 설계 단계에서 설정된 값을 그대로 사용하였다. Lauterbach et al. (2015), Nüchter et al. (2015), 그리고 Trevor et al. (2012)은 2D 라인 스캐너와 3D 라이다로 구성된 센서 시스템을 구성하였다. 이때, 2D 스캐너는 시스템의 위치정보를 확인하는 용도로 사용하였기 때문에, 두 센서 간 상대표정요소를 계산하지 않았다. Weingarten et al.(2006) 역시 위치정보 확인에 사용되는 라이다 1대와, 깊이 정보 획득에 사용되는 라이다 간에 상대표정요소를 계산하지 않고, 시스템을 운용하였다. Bok et al.(2011)은 4대의 광학 카메라와 2대의 라이다로 이루어진 멀티 센서 시스템을

이용하여 3차원 모델링을 수행하였다. Bok et al.(2011) 멀티 센서 시스템의 라이다 간 시스템 캘리브레이션은 생략하고, 두 개의 참조 좌표계로 데이터를 획득하였다.

Corso et al.(2013)과 Kim(2013)은 2D 라인 스캐너 간의 상대표정요소를 계산하지 않고, 2D SLAM을 통하여 등록된 각 스캐너 데이터를 ICP(iterative closest points)를 이용하여 정합하였다. 한편 Corso(2013), Chen et al. (2016), 그리고 Smith(2012)은 각각 2D 라인 스캐너 간, 다수의 키넥트 센서 간, 그리고 3차원 라이다 간의 상대적 위치를 ICP를 통하여 계산한 바 있다. 하지만 이들 연구에서 사용된 시스템은 라이다 간의 시야각 중첩도가 높은 편이였기 때문에, 일반적인 멀티 시스템에 그 결과를 적용하기에 한계가 있다. 또한 ICP는 상대표정요소의 초기 설정 값에 매우 민감하고, 지역 최적해(Local minimum) 문제가 빈번히 나타나는 문제가 있어(Taguchi et al. 2013), 안정적인 캘리브레이션 결과를 기대하기 어렵다.

1.3 연구의 목적 및 범위

본 연구는 멀티 센서 시스템 데이터를 이용하여 높은 정확도의 데이터 융합을 수행하는 것을 최종 목적으로 하고, 데이터 융합의 핵심 과정인 셀프 캘리브레이션과 시스템 캘리브레이션 각각의 정확도 향상을 세부 목표로 설정하였다.

[표 1-1]은 본 연구의 목적, 대상, 세부 목표, 그리고 연구 내용 등을 보여준다. 연구 내용은 크게 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 부분과 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 부분으로 나눌 수 있다. 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션은 어안 렌즈 카메라 표정요소 간 상관관계 분석을 통하여 정확한 셀프 캘리브레이션을 수행할 수 있는 방법을 제시한다. 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 연구에서는 보다 효율적인 시스템 캘리브레이션 방법을 소개하고, 시야각 중첩도가 낮은 라이다 간의 상대표정요소를 계산할 수 있는 방법을 제안한다.

제안된 캘리브레이션 방법은 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 검증되었다. 시뮬레이션의 경우, 모든 파라미터의 참값을 연구자가 사전에 결정하고, 각 파라미터의 정확도를 직접적으로 확인할 수 있다. 때문에 시뮬레이션은 캘리브레이션 방법의 수학적 신뢰도를 명확히 판단할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 사전에 정교하게 설계된 시뮬레이션을 통하여 제안 방법의 정확도를 확인하고, 실제 실험을 진행하여 제안 방법을 검증하였다. 본 논문의 모든 실험은 직접 제작한 소프트웨어를 이용하여 진행되었으며, 소프트웨어의 기능 및 사용법 등은 부록 A.4에서 설명한다.

[표 1-1] 연구의 목적과 세부 목표

연구의 목적	멀티 센서 시스템 데이터 융합	
대상	어안 렌즈 카메라와 라이다 센서로 구성된 멀티 센서 시스템	
세부 목표	어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 정확도 향상	시스템 캘리브레이션 정확도 향상
연구 내용 (세부 목표 달성 방법)	· 표정요소 간 상관관계 분석 · 어안 렌즈 카메라에 적합한 검정 대상지 제안	· 어안 렌즈 카메라-라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법 제안 · 라이다-라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법 제안
제안 방법 검증	시뮬레이션 및 실제 실험	

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 2장에서는 실험에 사용된 멀티 센서 시스템에 대하여 소개한다. 다음으로 3장과 4장에서는 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 및 멀티 센서 시스템 캘리브레이션에 대하여 다루고 있다. 마지막으로 5장에서는 데이터 융합에 관련된 내용에 대하여 설명한다. 각 장의 자세한 내용은 다음과 같다.

2장에서는 연구에 사용된 멀티 센서 시스템에 대하여 설명한다. 본 연구에서 사용한 멀티 센서 시스템은 백팩형 플랫폼을 기반으로 어안 렌즈 카메라 2대와 라이다 2대로 구성되어 있다. 2장에서는 어안 렌즈 카메라와 라이다 각각의 제원과 특징에 대하여 설명하고, 각 센서가 플랫폼에 배치된 방식에 대하여 설명한다.

3장에서는 어안 렌즈 카메라의 표정요소 간 상관관계에 대하여 분석하고, 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 방법을 제안한다. 어안 렌즈 카메라의 내부 표정 요소와 외부 표정 요소들 간의 상관관계는 다양한 연구를 통하여 관찰된 바 있다. 하지만 기존의 연구에서는 이를 해결하기 위한 구체적인 방안이 제시된 바 없다. 이에 본 연구에

서는 표정요소들 간의 상관관계를 심도있게 분석하고, 이를 바탕으로 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 정확도를 향상시킬 수 있는 방안을 제안한다.

4장에서는 본 연구를 통하여 제안된 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 방법에 대하여 다음과 같은 순서로 설명한다. 먼저 멀티 센서 시스템을 구성하는 센서 간 위치관계 해석 방법을 설명하고, 라이다 센서 간 상대표정요소를 계산하는 방법에 대하여 제안한다. 다음으로 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 제시된 방법의 정확도를 분석한다. 마지막으로 실제 실험을 통하여 제안된 캘리브레이션 방법에 대한 최종 검증을 수행한다.

5장에서는 멀티 센서 시스템 데이터 융합을 수행하고, 이에 대한 정확도를 분석한다. 데이터 융합에는 3장과 4장에서 계산된 어안 렌즈 카메라 내부표정요소 및 센서 간 상대표정요소가 사용되었으며, 데이터 융합의 정확도는 i) 색상 정보와 깊이 정보 간 융합의 정확도 그리고 ii) 깊이정보 간 융합의 정확도로 나누어 분석되었다.

마지막 6장은 본 논문의 결론으로서, 연구의 목적, 내용, 결과, 그리고 의의에 대하여 최종적으로 정리하여 설명한다. 결론에서는 제안된 각 캘리브레이션의 결과, 장점, 그리고 활용에 대하여 제시한다.

2. 멀티 센서 시스템의 구성

멀티 센서 시스템의 센서 구성과 배치는 셀프 캘리브레이션의 대상과 시스템 캘리브레이션의 방법을 결정한다. 따라서 2장에서는 본 연구에 사용된 센서의 제원, 특징 그리고 센서의 배치에 대하여 설명한다.

2.1 어안 렌즈 카메라의 제원 및 특징

멀티 센서 시스템에는 총 2대의 어안 렌즈 카메라가 사용되었다. 어안 렌즈는 등입체각 투영 모델을 지는 Sunnex DSL315 렌즈가 사용되었으며, 카메라 바디는 2448×2048 픽셀 크기로 영상을 획득하는 Chameleon3 5.0 MP Color USB3 Vision 모델이 사용되었다([그림 2-1], [표 2-1]). 해당 카메라는 외부에서 구동되는 카메라 셔터 버튼이 없는 모델로, 센서 시스템을 제어하는 컴퓨터로 부터 신호를 받아 촬영이 이루어진다.

[그림 2-1] 멀티 센서 시스템에 사용된 어안 렌즈(좌)와 카메라(우)

[표 2-1] 어안 렌즈와 카메라의 제원

	어안 렌즈	카메라
모델명	Sunnex DSL315	Chameleon3 5.0 MP Color USB3 Vision
투영 모델	등입체각 투영 (equisolid angle projection)	
영상 크기 (pixel)	2448 × 2048	
픽셀 사이즈 (mm)	0.00345	
초점 거리 (mm / 명목값)	2.67	

2.2 라이다 센서의 제원 및 특징

멀티 센서 시스템에는 총 2대의 라이다가 사용되었으며, 해당 라이다의 모델명은 Velodyne HDL-16E이다([그림 2-2]). 연구에 사용된 라이다는 수평방향 360°의 시야각으로 0.1°에서 0.4°의 간격마다 깊이 값을 획득하며, 수직방향으로는 30°의 시야각, 2°의 해상도를 지니고 있다([표 2-2]).

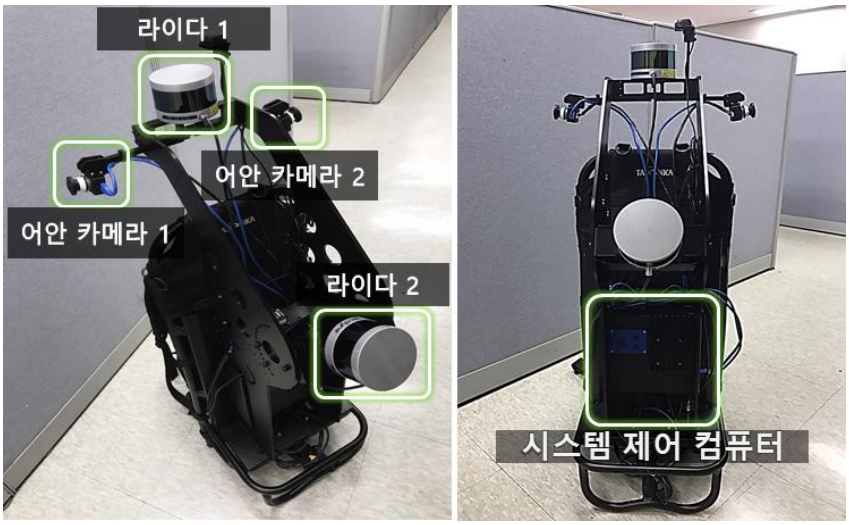
[그림 2-2] 멀티 센서 시스템에 사용된 라이다
(Velodyne HDL-16E)

[표 2-2] 라이다 센서 제원

모델명	Velodyne HDL-16E	
채널	16	
시야각	수평	360°
	수직	30° (±15°)
해상도	수평	0.1°(5Hz) 0.2°(10Hz) 0.4°(20Hz)
	수직	2°
촬영 범위	최대 100 m	
정확도 (명목)	± 3 cm	
크기	104 mm × 72 mm	
무게	0.83 kg	

2.3 센서 시스템 구성 및 센서 배치

연구에 사용된 멀티 센서 시스템은 백팩형 모바일 플랫폼을 기반으로 제작되었으며, 시스템 제어용 컴퓨터를 통하여 데이터 획득 및 저장이 이루어진다([그림 2-3]). 시스템의 제어는 윈도우 운영체제를 기반으로 제작된 전용 프로그램으로 이루어지며, 광학 카메라 기준 1초 주기로 촬영이 이루어진다. 시스템은 어안 렌즈 카메라 영상, 깊이 데이터, 그리고 각 센서 데이터의 타임 스탬프 정보를 제공한다.



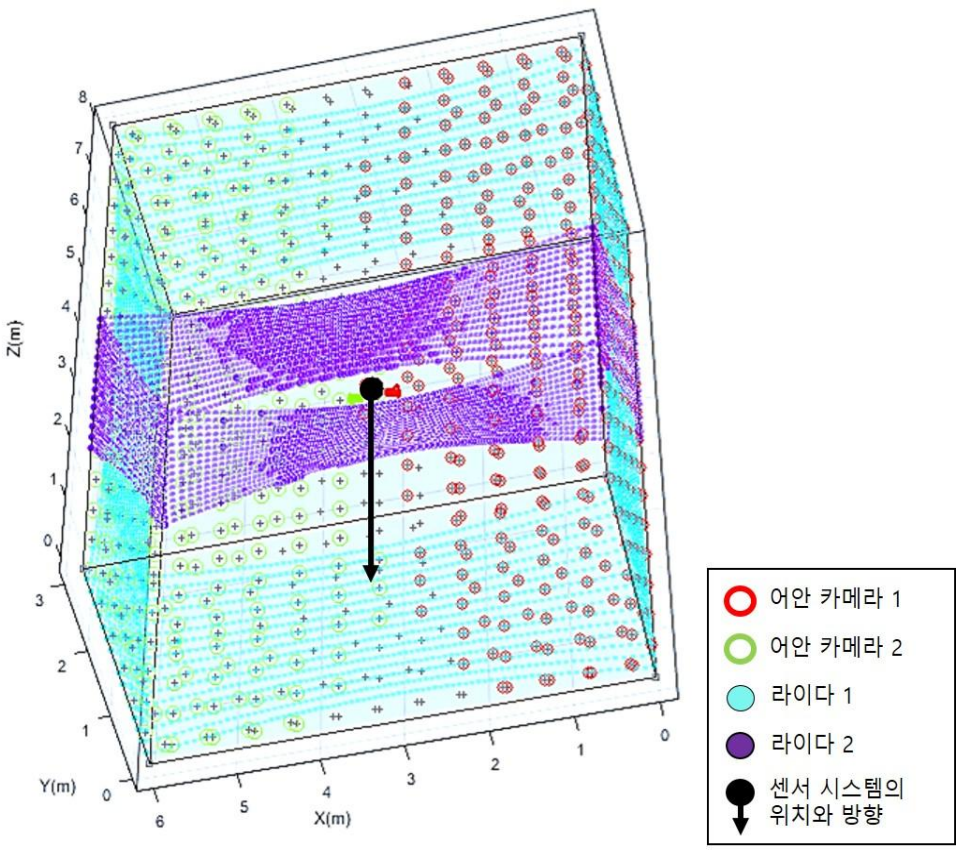
[그림 2-3] 백팩형 멀티 센서 시스템의 구성

[표 2-3] 백팩형 멀티 센서 시스템 제원

운용시스템	크기	무게	어안 렌즈 카메라 촬영 주기
window 10	1.0m (높이) 0.5m (폭) 0.6m (가로)	17 kg	1초

어안 렌즈 카메라는 시스템의 좌측과 우측을 바라보도록 배치하였으며, 라이다1([그림 2-3])을 기준으로 약 20cm의 거리를 두고 설치되었다. 한편 라이다는 시스템의 위쪽(라이다 1)과 뒤쪽(라이다 2)에 설치되었다. 라이다 1은 촬영 진행 방향과 평행하게 설치되었으며, 라이다 2는 수평방향을 기준으로 약 60도의 각도로 설치되었다. [그림 2-4]는 멀티 센서 시스템의 데이터 획득 범위를 보여준다. 붉은색과 초록색 원은 각각 어안 렌즈 카메라의 촬영 범위이며 하늘색과 보라

색 점은 각각 라이다의 촬영 범위를 나타낸다. 그림을 통하여 두 대의 어안 렌즈 카메라 간에 중첩된 영역 없이 주변 지역을 상호보완적으로 촬영하고 있으며, 두 대의 라이다 간에도 상호 보완적으로 수평 및 수직 방향의 깊이 정보를 획득하고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 2-4] 멀티 센서 시스템의 데이터 획득 범위

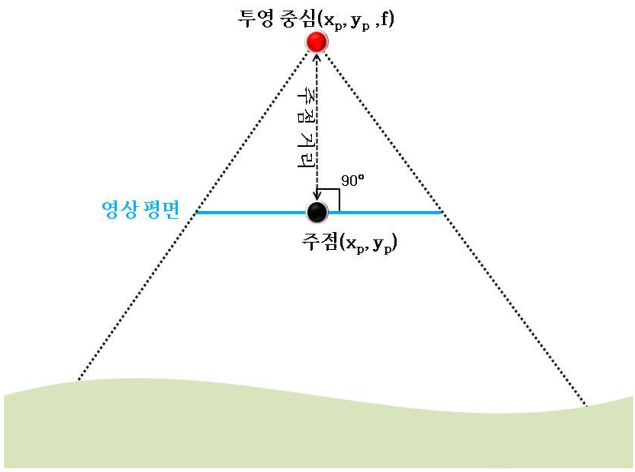
3. 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션

멀티 센서 시스템 데이터 간 융합을 위해서는 셀프 캘리브레이션 그리고 시스템 캘리브레이션 단계가 순차적으로 수행되어야 한다. 따라서 3장에서는 먼저 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 대하여 설명한다.

어안 렌즈 카메라 캘리브레이션에 대한 설명은 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저 3장 1절에서는 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션 수행 시에 고려해야할 중요 사항에 대한 이론적 배경에 대하여 설명한다. 2절에서는 투영 모델 그리고 투영 모델 편미분 식 등의 어안 렌즈 카메라와 관련된 주요 수학 모델식에 대하여 설명한다. 다음으로 3절에서는 검정 대상지의 변화가 표정요소 간 상관관계에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 4절과 5절에서는 각각 시뮬레이션과 실제 셀프 캘리브레이션을 수행하여, 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 적합한 검정 대상지 구성 방법을 제안하였다.

3.1 셀프 캘리브레이션의 이론적 배경

셀프 캘리브레이션은 센서의 내부표정요소를 결정하는 과정으로, 내부표정요소에는 주점 좌표(x_p, y_p), 주점 거리(f), 그리고 디스토션 파라미터가 포함된다. 이때 주점은 카메라 투영 중심에서 영상 평면에 내린 수직선이 영상 평면과 만나는 점이며, 주점 거리는 투영 중심에서 주점까지의 거리를 의미한다([그림 3-1]). 셀프 캘리브레이션을 통하여 내부표정요소가 모두 정확하게 결정되면, 센서와 촬영 대상 간의 위치관계를 수학적으로 표현할 수 있다. 셀프 캘리브레이션의 정확도를 결정하는 중요한 요소에는 표정요소 간 상관관계 그리고 영상 기준점의 분포 등이 있다(Remondino et al. 2006).



[그림 3-1] 광학 카메라의 내부표정요소

3.1.1 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계

상관관계는 두 변수 간 선형 관계의 강도를 나타낸다(Danko Nikolić et al. 2012). 즉 한 변수의 변화에 따라, 다른 변수가 얼마나 증가 또는 감소하는 지를 나타낸다. 이때 변수들이 함께 증가 또는 감소할 경우에는 양의 상관관계, 한쪽 변수가 증가함에 따라서 다른 쪽 변수가 감소할 경우 음의 상관관계가 나타난다고 표현한다.

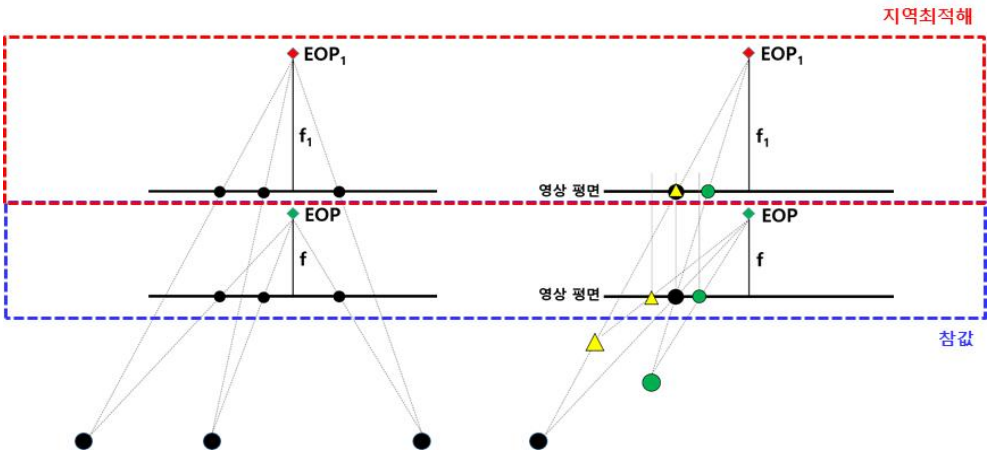
카메라 셀프 캘리브레이션에 있어 표정요소 간의 상관관계가 높다는 것은 하나의 표정요소의 변화량을 다른 표정요소가 흡수하여 전체 방정식을 만족 시킬 수 있다는 의미이다. 즉 방정식을 만족 시키는 참값 이외에도 다수의 지역 최적해가 존재한다는 의미이며, 이는 셀프 캘리브레이션을 통하여 계산된 표정요소의 정확도가 낮아질 수 있다는 것을 뜻한다.

높은 상관관계로 인하여 표정요소가 정확히 계산되지 않으면, [그림 3-2]와 같은 문제가 나타날 수 있다. [그림 3-2]의 (a)는 셀프 캘

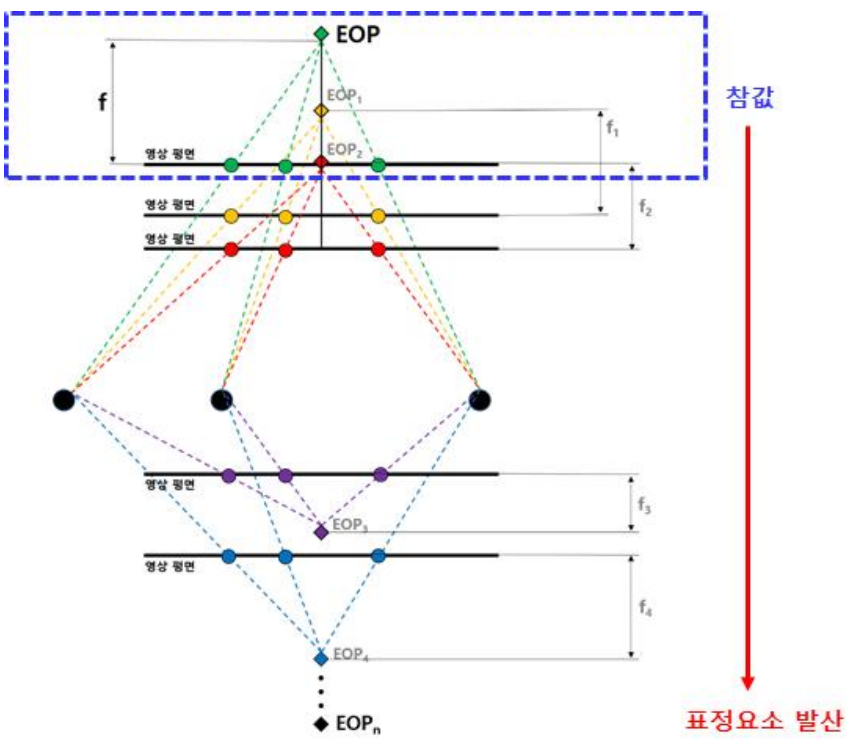
리브레이션 수행 시에 외부표정요소(EOP)와 주점 좌표(f) 간에 발생한 상관관계에 의하여 지역 최적해(EOP_1, f_1)가 나타난 상황을 보여준다. 계산된 지역 최적해가 카메라와 객체 간의 기하학적 관계를 잘 설명해주고 있음을 그림을 통하여 확인할 수 있다. [그림 3-2]의 (b)는 촬영 지역 또는 대상이 바뀌었을 경우 (a)에서 계산된 지역 최적해가 카메라의 위치와 객체 간의 관계를 설명할 수 없음을 보여준다. 즉 높은 상관관계로 인하여 셀프 캘리브레이션에 지역 최적해 현상이 나타날 경우, 도출된 표정요소는 캘리브레이션 당시의 검정 대상지와 카메라 간의 관계는 설명할 수 있다. 하지만 일반적인 데이터 획득 상황에서 나타나는 객체와 카메라 간의 관계는 정확히 설명하지 못하게 될 수 있다.

[그림 3-3]은 표정요소 간 상관관계가 1또는 -1에 가까울 때, 셀프 캘리브레이션에서 나타날 수 있는 표정요소의 발산 현상을 보여준다. 상관관계가 최대치(±1)에 가까울 경우, 카메라 위치와 지상 기준점 간의 관계를 설명할 수 있는 표정요소 조합은 무한히 많아진다. 이때 셀프 캘리브레이션을 수행하면 최소제곱-광속조정이 정상적으로 완료되지 않고 표정요소가 발산하게 된다. 따라서 표정요소 간 상관관계를 낮추는 것은 셀프 캘리브레이션 수행에 있어 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

원근 투영 카메라 표정요소 간의 상관관계를 낮추기 위한 방법은 다수의 연구를 통하여 확인된 바 있다(Atkinson 1996, Gruen et al. 2001, El-Hakim et al. 2003). 기존의 방법들은 검정 대상지와 카메라 간의 상대적인 위치와 방향을 조정하여 셀프 캘리브레이션에 유리한 네트워크 기하구조를 구현하는 방식으로 표정요소 간 상관관계를 낮추고 있다. 대표적인 기존 방법으로는 i) 가로 및 세로 방향으로 촬영한 영상을 사용하고 ii) 검정 대상지를 대각 방향으로 촬영하는 것 등이 있다(Remondino et al. 2006).



[그림 3-2] 표정요소 간 상관관계가 셀프 캘리브레이션 정확도에 미치는 영향 (a) 지역 최적해 현상이 나타난 셀프 캘리브레이션 결과 (b) 지역 최적해의 문제점



[그림 3-3] 셀프 캘리브레이션에서 관찰되는 표정요소의 발산 현상

3.1.2 영상 기준점과 캘리브레이션의 정확도

영상 기준점은 검정 대상지에 배치된 지상 기준점에 대응되는 영상점을 의미하며, 영상 기준점의 숫자와 분포는 셀프 캘리브레이션의 정확도를 결정하는 중요한 요인이다. 일반적으로 다수의 영상 기준점이 영상 전반에 고루 분포할 경우, 그리고 동일한 지상 기준점을 촬영한 영상이 많을수록 셀프 캘리브레이션의 정확도는 증가한다(Remondino et al. 2006). 각 경우에 대한 자세한 내용은 다음과 같다. 먼저 다수의 영상 기준점이 영상에 고르게 분포할수록, i) 셀프 캘리브레이션 수행에 보다 유리한 네트워크 기하구조(내부표정요소, 외부표정요소, 그리고 지상 기준점 간의 기하학적 구조)를 확보할 수 있으며, ii) 영상 전반의 디스토션을 보다 잘 설명할 수 있는 디스토션 파라미터를 도출할 수 있다. 다음으로 지상 기준점에 대응되는 영상 기준점이 몇 장의 영상에 나타나는 지도 캘리브레이션 정확도에 영향을 미친다. 지상 기준점은 최소 두 장 이상의 영상에서 대응되는 영상 기준점이 나타나야 캘리브레이션에 사용할 수 있으며, 대응되는 영상 기준점이 많은 지상 기준점일수록 캘리브레이션에 긍정적인 효과를 미친다(Remondino et al. 2006).

3.1.3 검정 대상지 구성

표정요소의 상관관계와 영상 기준점의 분포 및 배치는 모두 셀프 캘리브레이션 수행에 필수적으로 고려해야할 요소이며, 이 두 요소는 모두 검정 대상지 구성 및 배치와 연관성이 높다. 상관관계의 경우 검정 대상지와 카메라 간의 상대적 위치를 적절히 설정함으로써 낮출 수 있으며, 영상 기준점 역시 검정 대상지를 어떻게 구성하느냐에 따라서 기준점의 수와 분포를 조절할 수 있다. 따라서 검정 대상지의

구성, 그리고 검정 대상지를 촬영하는 방식은 셀프 캘리브레이션의 정확도와 높은 연관성을 지닌다. 본 연구에서는 이와 같은 이론적 배경을 토대로 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 정확도를 향상시키고자 한다.

3.2 어안 렌즈 카메라의 수학적 모델

광학 카메라의 수학적 모델은 투영 모델식(부록 A.1)과 렌즈 디스토션 모델식으로 구분된다. 광학 카메라의 대표적인 투영 모델은 원근 투영(일반 광학 카메라), 등거리, 등입체각, 정사, 그리고 스테레오 투영 모델(어안 렌즈 카메라)이 있으며, 각 모델은 카메라 영상의 좌표와 기준점의 좌표, 그리고 카메라의 위치인 외부표정요소로 표현된다. 렌즈 디스토션 모델은 일반 광학 카메라와 어안 카메라 모두 동일한 모델을 사용하며, 카메라 렌즈에 의한 방사 및 편심 왜곡 등을 설명한다. 본 절에서는 광학 카메라의 투영 모델과 디스토션 모델의 수학적 모델식을 확인하고, 이에 대한 편미분을 수행하였다.

3.2.1 어안 렌즈 카메라의 투영 모델

수식 (3-1)부터 (3-4)는 각 지상 기준점(ground control points)의 좌표를 카메라 좌표계로 변환하는 수식이다. U, V, W는 카메라 좌표계로 변환된 기준점의 좌표이며, X, Y, Z는 지상 좌표계(ground coordinates)로 표현된 기준점 좌표이다. X0, Y0, Z0, ω, φ, κ는 외부표정요소의 3차원 위치(X0, Y0, Z0)와 회전(ω, φ, κ) 성분이며, M은 3차원 회전행렬이다.

$$U = m11(X - X0) + m12(Y - Y0) + m13(Z - Z0) \tag{3-1}$$

$$V = m21(X - X0) + m22(Y - Y0) + m23(Z - Z0) \tag{3-2}$$

$$W = m31(X - X0) + m32(Y - Y0) + m33(Z - Z0) \tag{3-3}$$

$$M(\omega,\phi,\kappa) = \begin{bmatrix} m_{11}\, m_{12}\, m_{13} \\ m_{21}\, m_{22}\, m_{23} \\ m_{31}\, m_{32}\, m_{33} \end{bmatrix} \tag{3-4}$$

각 투영 모델을 따르는 카메라의 영상좌표 x, y는 수식 (3-5)부터 (3-13)과 같이 계산된다. 이때 f는 초점 길이, x_p, y_p는 주점 좌표, r은 주점 좌표로 부터 영상 좌표까지의 거리, 그리고 θ는 지상 기준점의 입사각이다.

$$x = x_p - \frac{r}{R}U \tag{3-5}$$

$$y = y_p - \frac{r}{R}V \tag{3-6}$$

$$R = \sqrt{U^2 + V^2} \tag{3-7}$$

원근 투영 : $r = f\tan\theta$ (3-8)

등거리 투영 : $r = f\theta$ (3-9)

등입체각 투영 : $r = f2\sin\frac{\theta}{2}$ (3-10)

정사 투영 : $r = f\sin\theta$ (3-11)

스테레오 투영 : $r = f2\tan\frac{\theta}{2}$ (3-12)

$$\theta = \arctan\frac{R}{W} \tag{3-13}$$

렌즈 디스토션의 수학적 모델식은 수식 (3-14)부터 (3-18)과 같다. 여기서 Δx와 Δy는 영상좌표 x와 y의 디스토션이다. K_1, K_2, 그리고 K_3는 방사 왜곡(radial distortion) 파라미터이며, P_1과 P_2는 편심 왜곡(decentering distortion) 파라미터, 그리고 A_1과 A_2는 영상의 왜도(skewness)를 나타내는 파라미터이다.

$$\triangle x = \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2(\bar{x})^2) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} + A_1 \bar{x} + A_2 \bar{y} \quad (3\text{-}14)$$

$$\triangle y = \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2(\bar{y})^2) + 2P_1 \bar{x}\bar{y} \quad (3\text{-}15)$$

$$\bar{x} = x - x_p \quad (3\text{-}16)$$

$$\bar{y} = y - y_p \quad (3\text{-}17)$$

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (3\text{-}18)$$

최종 광학 카메라의 수학적 모델식은 투영 모델식 (3-5)와 (3-6), 그리고 디스토션 모델식 (3-14)와 (3-15)를 이용하여 표현된다. (수식 3-19)와 (3-20)는 최종 정리된 광학 카메라의 수학적 모델식으로, 광학 카메라의 영상 좌표 x, y가 내부표정요소, 외부표정요소, 그리고 렌즈 디스토션으로 표현된다.

$$x = x_p - \frac{r}{R} U + \triangle x \quad (3\text{-}19)$$

$$y = y_p - \frac{r}{R} V + \triangle y \quad (3\text{-}20)$$

3.2.2 투영 모델 편미분식 분석

본 연구에서는 주점 좌표 및 초점거리와 외부표정요소간의 상관관계를 분석하기 위하여 수식 (3-19)와 (3-20)에 대한 편미분을 수행하였다. [표 3-1]은 xp, yp와 외부표정요소 X0, Y0 간의 편미분 수식을 보여준다. 이때 $\overline{X}$는 지상 기준 좌표 X와 외부표정요소 X0의 차이며, $\overline{Y}$는 지상 기준점 좌표 Y와 외부표정요소 Y0의 차이다.

[표 3-1] 투영 모델 편미분 수식

ω = φ = κ = 0°	
$\frac{dx_p}{dX0} = \frac{1}{R^3}(r\overline{X}^2 - rR^2 - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta\,\overline{X}^2)$	(3-21)
$\frac{dx_p}{dY0} = \frac{\overline{X}\,\overline{Y}}{R^3}(r - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta)$ (원근투영 카메라 : $\frac{dx_p}{dY0} = 0$)	(3-22)
$\frac{dy_p}{dX0} = \frac{\overline{X}\,\overline{Y}}{R^3}(r - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta)$ (원근투영 카메라 : $\frac{dy_p}{dX0} = 0$)	(3-23)
$\frac{dx_p}{dY0} = \frac{1}{R^3}(r\overline{Y}^2 - rR^2 - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta\,\overline{Y}^2)$	(3-24)
ω = φ = 0°, κ = 90°	
$\frac{dx_p}{dX0} = \frac{\overline{X}\,\overline{Y}}{R^3}(r - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta)$ (원근투영 카메라 : $\frac{dx_p}{dX0} = 0$)	(3-25)
$\frac{dx_p}{dY0} = \frac{1}{R^3}(r\overline{Y}^2 - rR^2 - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta\,\overline{Y}^2)$	(3-26)
$\frac{dy_p}{dX0} = -\frac{1}{R^3}(r\overline{X}^2 - rR^2 - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta\,\overline{X}^2)$	(3-27)
$\frac{dx_p}{dY0} = \frac{\overline{X}\,\overline{Y}}{R^3}(r - \frac{dr}{d\theta}\cos\theta\sin\theta)$ (원근투영 카메라 : $\frac{dx_p}{dY0} = 0$)	(3-28)

한편 초점거리와 외부표정요소 Z0의 편미분은 수식 (3-29)와 같이 정리 된다. 이때 ω와 φ는 0°로, 주점 좌표 x_p와 y_p는 0으로 설정되었다.

$$\frac{df}{dZ0} = -\frac{f}{Z-Z0}\left(\frac{dr}{d\theta}\frac{\cos\theta\sin\theta}{r}\right) \tag{3-29}$$

[표 3-1]의 편미분식과 수식 (3-29)은 두 가지 중요한 특성을 보이며, 이는 일반 광학 카메라와 어안 렌즈 카메라의 표정요소 간 상관관계가 서로 다르게 나타날 수 있음을 알려준다. 각 특성에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

원근 투영 카메라, 즉 일반 광학 카메라의 경우, 수식 (3-22), (3-23), (3-25), 그리고 (3-28)는 모두 0으로 정리될 수 있으며, 편미분 값이 0이 된다는 것은 표정요소간의 상관관계가 없다는 것을 의미한다. 즉 일반 광학 카메라의 경우. κ가 0°일 경우, xp와 Y0 간, yp와 X0 간의 상관관계가 없으며, κ가 90°일 경우, xp와 X0 간, yp와 Y0 간의 상관관계가 없다는 것을 확인할 수 있다.

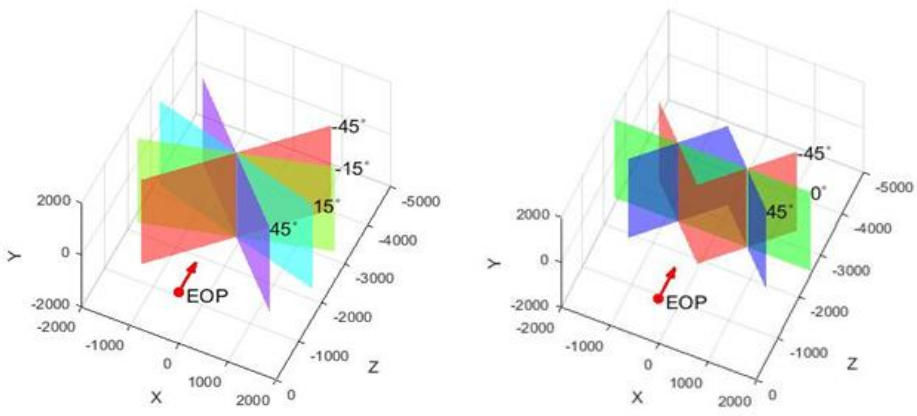
유도된 모든 표정요소 간 편미분식은 내부에 주점 좌표로 부터 영상 좌표까지의 거리(r)를 입사각(Θ)으로 편미분한 부분($\frac{dr}{d\theta}$)을 포함하고 있다는 공통점이 있다. 이는 광학 카메라의 투영 모델에 따라서, 표정요소간의 상관관계가 서로 다르게 나타나게 됨을 의미한다.

3.3 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계 분석

본 절에서는 표정요소 간의 상관관계를 보다 직접적으로 확인하고자 시뮬레이션이 진행되었으며, 그 순서는 다음과 같다. 먼저 사전에 결정된 외부표정요소(X0, Y0, Z0, ω, φ, κ), 기준점 좌표(X, Y, Z), 그리고 내부표정요소를 이용하여 영상 기준점을 계산하였다. 다음으로 표정요소 2개(상관관계를 확인하고자 하는)를 제외한 모든 변수의 참값을 수식 (3-19) 및 (3-20)에 대입하였다. 마지막으로 표정요소 하나의 값을 변화시켜 가며 수식 (3-19) 및 (3-20)를 만족시키는 다른 표정요소의 값을 계산하고, 도출된 표정요소 두 개 간의 상관관계를 계산하였다.

표정요소 간 상관관계는 [그림 3-4]의 (a)와 (b)와 같은 두 가지 경우에 대하여 계산되었다. [그림 3-4]의 X, Y, 그리고 Z축은 지상 좌표계의 각 축(mm), 각 평면은 검정 대상지를 의미한다. 먼저 높이 3m 그리고 폭 4m 크기의 평면 형태 검정 대상지를 -45°에서 45° 까지 1도 간격으로 회전 시켜가며([그림 3-4] (a)) 상관관계를 계산하였다. 다음으로 [그림 3-2]와 같이 검정 대상지의 형태가 V, 평면, 그리고 A형태([그림 3-2] (b))와 같이 바뀌었을 때 각 표정요소간의 상관관계가 어떻게 변하는지를 확인하였다.

검정 대상지 형태 그리고 κ값 기준으로 계산된 각 표정요소의 조합은 [표 3-2]와 같이 분류되었다. 동일한 경향을 나타낸 경우는 표에 같은 색상으로 표기되었으며, 주점 거리 f와 Z0간의 상관관계는 κ값에 영향을 받지 않기 때문에 검정 대상지 형태마다 각각 하나의 경우로 표시되었다(<케이스 1-5> 그리고 <케이스 3-5>).



(a) (b)

[그림 3-4] 표정요소 간 상관관계 분석 설정

(a) 평면 검정 대상지 회전 (b) 검정 대상지 모양 변경

[표 3-2] 상관관계 분석 케이스별 이름

표정요소 조합	검정 대상지 회전		검정 대상지의 모양 변화	
	κ=0°	κ=90°	κ=0°	κ=90°
x_p - X0	<케이스 1-1>	<케이스 2-1>	<케이스 3-1>	<케이스 4-1>
y_p - X0	<케이스 1-2>	<케이스 2-2>	<케이스 3-2>	<케이스 4-2>
x_p - Y0	<케이스 1-3>	<케이스 2-3>	<케이스 3-3>	<케이스 4-3>
y_p - Y0	<케이스 1-4>	<케이스 2-4>	<케이스 3-4>	<케이스 4-4>
f - Z0	<케이스 1-5>		<케이스 3-5>	

3.3.1 평면 형태 검정 대상지에서의 표정요소 간 상관관계

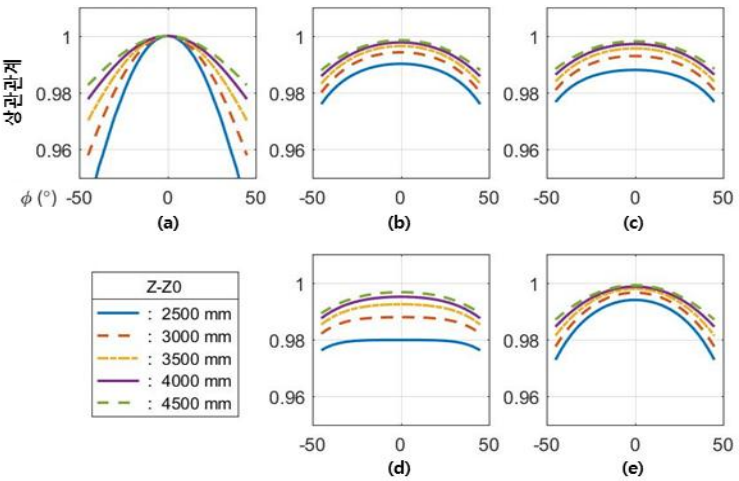
검정 대상지를 회전시킨 경우([그림 3-4] (a))의 주점 좌표와 X0, Y0 간, 그리고 초점 거리와 Z0 간의 상관관계는 [그림 3-5]부터 [그림 3-8]을 통하여 설명된다. 각 그림의 x축은 검정 대상지를 회전 시킨 각도, y축은 표정요소 간 상관관계 또는 편미분 값의 표준편차를

나타내며, 그래프의 실선 및 점선들은 검정 대상지에서 카메라까지의 거리를 의미한다. [그림 3-5]와 [그림 3-6]은 <케이스 1-1>, <케이스 1-4>, <케이스 2-2>, <케이스 2-3> 그리고 <케이스 1-5>에서 나타나는 상관관계와 편미분값의 표준편차를 보여준다. [그림 3-7]과 [그림 3-8]은 <케이스 1-2>, <케이스 1-3>, <케이스 2-1>, <케이스 2-4>, <케이스 3-2>, <케이스 3-3>, <케이스 4-1>, 그리고 <케이스 4-4> 경우의 상관관계와 편미분 값의 표준편차를 보여준다.

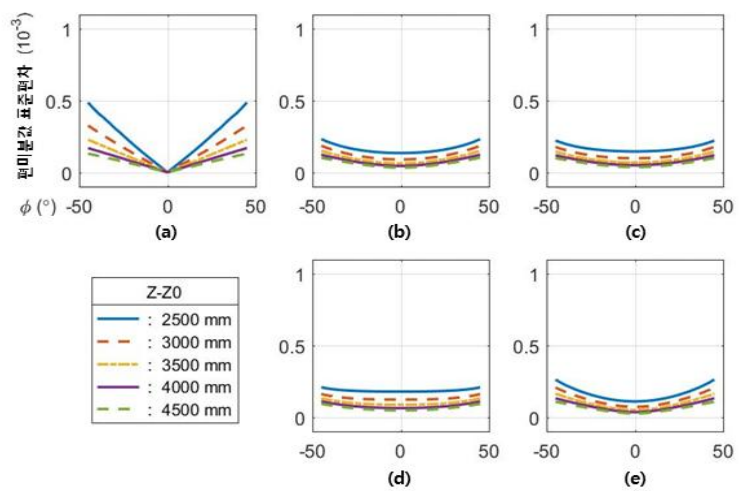
[그림 3-5]는 카메라가 검정 대상지를 촬영하는 각도와 거리에 따라서 x_p와 X0, y_p와 Y0, 그리고 f와 Z0 간의 상관관계가 나타나는 경향을 보여주며 그 내용은 다음과 같다. 먼저 카메라가 검정 대상지를 수직으로 바라볼 때(검정 대상지의 φ가 0일 때) 내부표정요소와 외부표정요소 간 상관관계는 가장 높게 나타나며, 카메라가 검정 대상지를 대각 방향으로 바라볼 때 상관관계는 낮아진다. 이 같은 경향은 증·감의 크기 차이는 있지만 투영 모델에 상관없이 모두 동일하게 나타난다. 다음으로 검정 대상지와 카메라 간의 거리(Z-Z0)가 가까울수록 표정요소 간 상관관계가 낮아진다. 다만 원근 투영 모델 카메라가 검정 대상지를 수직으로 촬영했을 때, 카메라-검정 대상지 거리에 상관없이 상관관계는 최대수치인 1을 나타내었다.

[그림 3-6]은 편미분 값들의 표준편차가 클수록 표정요소 간 상관관계가 낮아지는 것을 보여준다. 이는 방정식(각 지상 기준점에 대응되는 모델식)을 만족시키는 표정요소 간의 관계가 다양하게 나타날수록 셀프 캘리브레이션에서의 표정요소 간 상관관계가 낮아지는 것으로 해석된다.

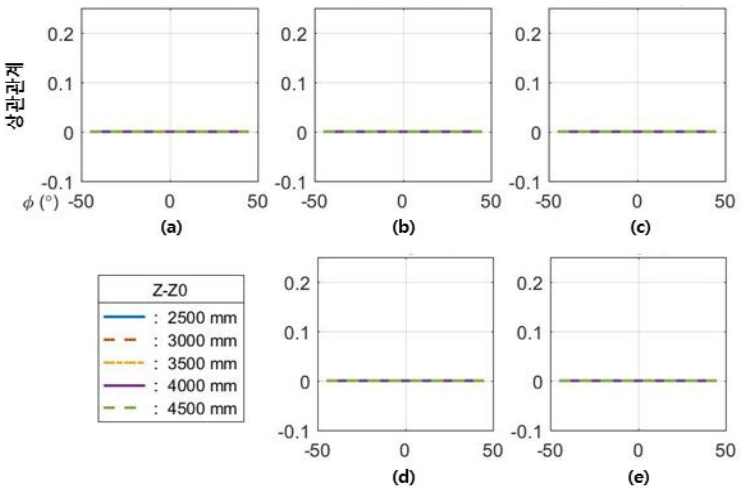
[그림 3-7]과 [그림 3-8]의 경우, 상관관계와 편미분 값이 모두 0에 매우 가깝게 나타났다. 이는 한 표정요소의 변화가 다른 표정요소에 미치는 영향이 매우 낮아서, 두 표정요소 간 상관관계가 0에 가깝게 나타나는 것으로 분석된다.



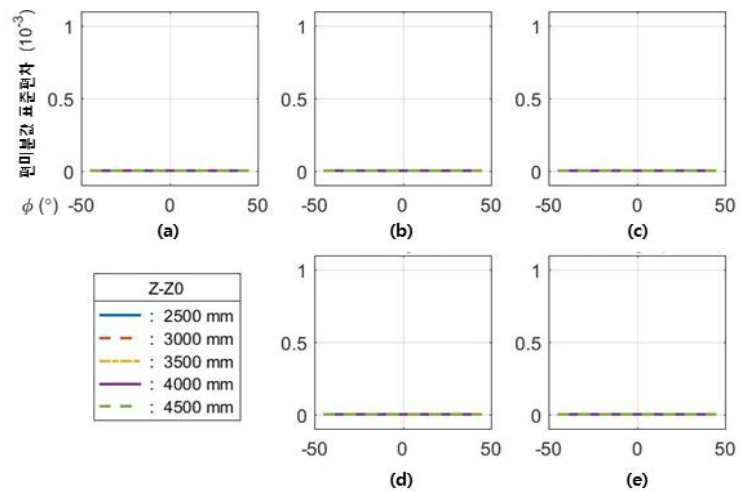
[그림 3-5] x_p와 X0, y_p와 Y0, 그리고 f와 Z0 간의 상관관계 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영



[그림 3-6] $\frac{dx_p}{dX0}$, $\frac{dy_p}{dY0}$, 그리고 $\frac{df}{dZ0}$의 표준편차 (κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영



[그림 3-7] x_p와 Y0 그리고 y_p와 X0 간의 상관관계
(κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영



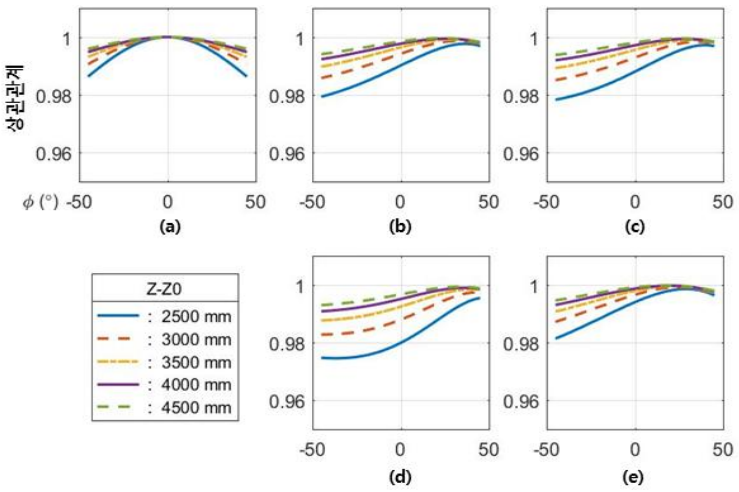
[그림 3-8] $\frac{dx_p}{dY0}$ 그리고 $\frac{dy_p}{dX0}$의 표준편차
(κ=0°, 검정 대상지 회전) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영

3.3.2 검정 대상지 형태 변화에 따른 표정요소 간 상관관계

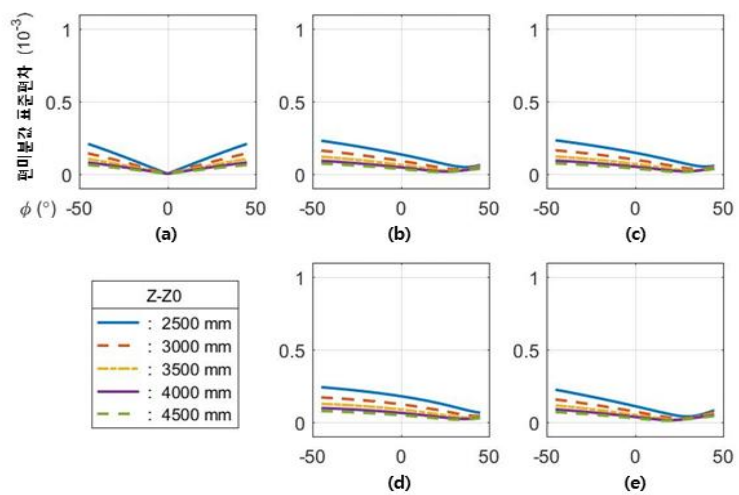
검정 대상지 모양을 바꾼 경우([그림 3-4] (b))의 표정요소 간 상관관계와 편미분 값의 표준편차는 각각 [그림 3-9]와 [그림 3-10]을 통하여 확인할 수 있다. 각 그림의 x축은 검정 대상지를 회전 시킨 각도, y축은 표정요소 간 상관관계 또는 편미분 값의 표준편차를 나타내며, 그래프의 실선 및 점선들은 검정 대상지에서 카메라까지의 거리를 의미한다. <케이스 3-1>, <케이스 3-4>, <케이스 4-2>, <케이스 4-3> 그리고 <케이스 3-5>의 경우가 [그림 3-9] 그리고 [그림 3-10]과 같은 경향을 나타내었다.

[그림 3-9]에서 가장 주목할 특징은, 원근 투영 모델과 다른 4가지 투영 모델(어안 렌즈 카메라 투영 모델)의 변화 경향이 크게 다르다는 점이다. 즉 원근 투영의 경우 검정 대상지를 회전시킨 경우와 유사한 경향을 나타냈지만, 어안 렌즈 카메라 투영 모델의 경우에는 V형태, 평면형태, 그리고 A형태의 검정 대상지 순으로 상관관계가 높아지는 경향이 나타났다.

검정 대상지의 형태를 변화시킨 경우에도 표정요소 간 상관관계와 편미분 값의 표준편차는 반비례하는 경향을 보여주었다. 즉 [그림 3-10]에서 편미분 값이 상대적으로 큰 경우에 상관관계는 낮게 나타났으며, 편미분 값이 상대적으로 작은 경우 표정요소 간 상관관계는 높게 나타났다.



[그림 3-9] x_p와 X0, y_p와 Y0, 그리고 f와 Z0 간의 상관관계 (κ=0°, 검정 대상지 형태 변화) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영



[그림 3-10] $\frac{dx_p}{dX0}$, $\frac{dy_p}{dY0}$, 그리고 $\frac{df}{dZ0}$의 표준편차 (κ=0°, 검정 대상지 형태 변화) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영

3.3.3 표정요소 간 상관관계 분석 및 종합

어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 표정요소 간 상관관계는 검정 대상지의 형태와 검정 대상지와 카메라 간의 상대적인 위치에 따라서 광학 카메라와 구별되는 경향을 나타내었다. 어안 렌즈 카메라 표정요소 간 상관관계가 나타나는 경향은 크게 i) 검정 대상지와 카메라 간의 거리, ii) 카메라가 검정 대상지를 촬영하는 방향, 그리고 iii) 검정 대상지의 형태를 기준으로 정리할 수 있다.

카메라와 검정 대상지 간의 거리는 가까울수록(Z-Z0가 작을수록) 표정요소간 상관관계가 낮아지기 때문에 셀프 캘리브레이션에 유리하다. 다만 가까운 거리에서 촬영한 영상의 경우, 동일한 검정 대상지를 보다 먼 곳에서 촬영한 영상에 비하여 영상 기준점의 수가 적고 분포가 고르지 못할 수 있다. 따라서 근거리에서 촬영한 영상과 원거리에서 촬영한 영상을 모두 이용하여 셀프 캘리브레이션을 수행하는 것이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

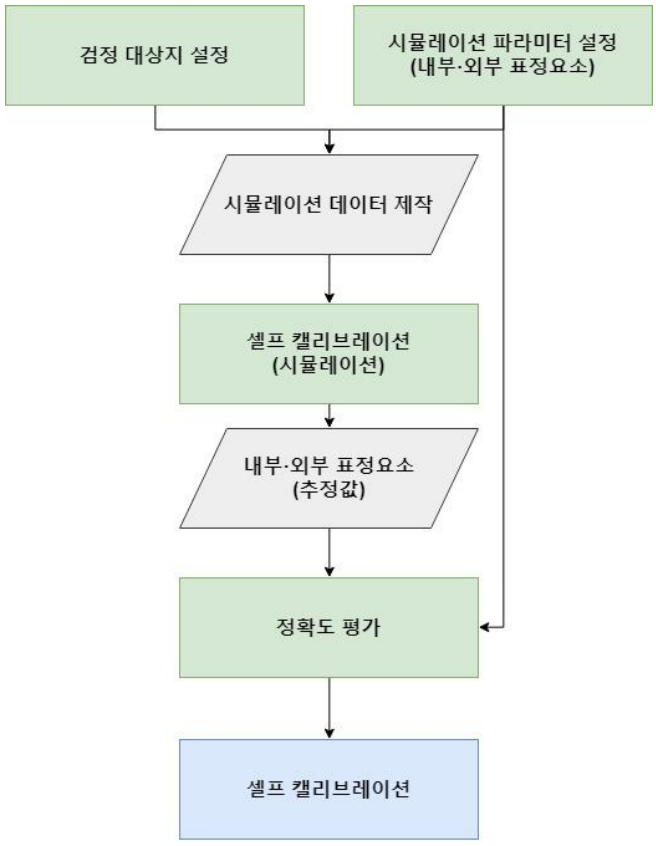
카메라가 평면 검정 대상지를 대각 방향으로 촬영할 경우 표정요소 간 상관관계는 낮아지며, 평면 검정 대상지 수직 방향에 카메라가 위치할 경우 상관관계는 최대치를 나타낸다. 이는 3장 1절 2항에서 언급한 바와 같이, 다수의 기존 연구에서 상관관계를 낮추기 위한 방법으로 제시된 바 있다.

어안 렌즈 카메라의 표정요소 간 상관관계는 V형태-평면 형태-A형태의 순으로 높아진다. A형태의 검정 대상지는 어안 렌즈 카메라의 셀프 캘리브레이션에 자주 사용되는 형태이며, 이는 시야각이 넓은 어안 렌즈 카메라 영상의 외곽 부분까지 기준점이 고르게 위치할 수 있도록 한다는 장점이 있다. 하지만 본 연구의 분석은 A형태의 검정 대상지는 표정요소 간 높은 상관관계가 나타나기 때문에 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 부적합하다는 것을 알려준다.

3.4 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션

본 연구에서는 어안 렌즈 카메라 표정요소 간 상관관계 분석을 셀프 캘리브레이션에 적용하고 결과의 정확도를 확인하고자, 최소제곱-광속조정(부록 A.2)을 이용한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션 단계에서는 표정요소 간 상관관계 이외에도, 디스토션 모델식의 디스토션 해석력을 정확도 판별의 추가 요소로 포함하였다. 이는 셀프 캘리브레이션의 결과로 계산된 디스토션 파라미터가 영상 전체의 디스토션을 충분히 해석할 수 있어야하기 때문이다. 즉 표정요소 간의 상관관계 최소화 및 해석력 높은 디스토션 파라미터의 도출, 두 가지를 모두 달성하여야만 정확도 높은 셀프 캘리브레이션이 수행되었다고 평가할 수 있다.

셀프 캘리브레이션 시뮬레이션의 구체적인 순서는 [그림 3-11]과 같다. 먼저 검정 대상지의 형태와 어안 렌즈 카메라의 내부 및 외부 표정요소를 설정하고, 이를 이용하여 시뮬레이션 데이터가 제작되었다. 다음으로 제작된 데이터를 이용하여 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션이 수행되었다. 마지막으로 계산된 내부 및 외부표정요소는 사전에 설정된 각 표정요소들을 통하여 정확도가 평가되었다. 이와 같이 수행된 시뮬레이션의 최종 결과는 실제 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 반영되었다.



[그림 3-11] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션의 흐름도

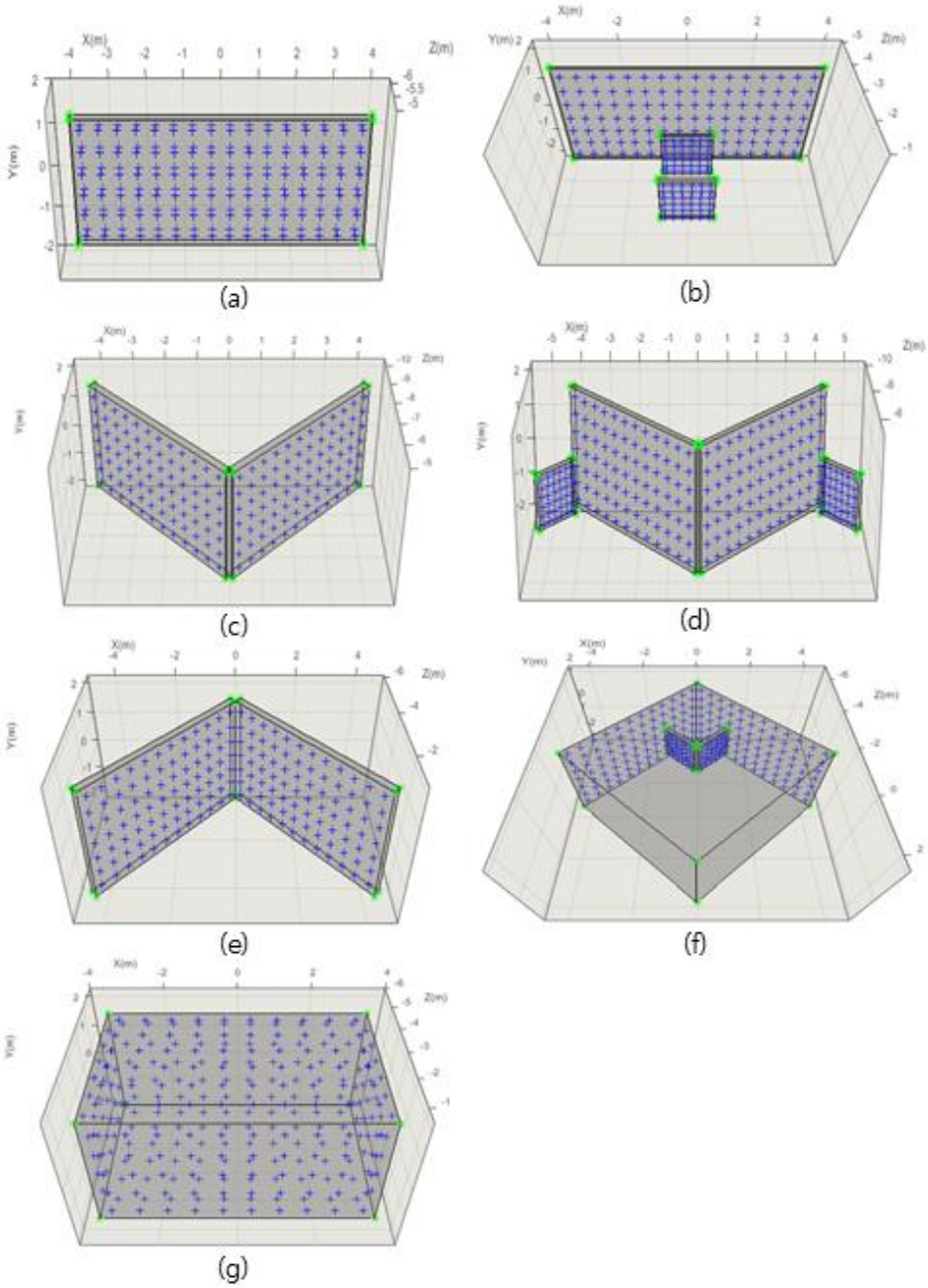
3.4.1 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 설계

본 연구에서는 다양한 형태의 검정 대상지에서 각 표정요소 간의 상관관계가 나타나는 경향을 분석하고자 평면, V, A, 방(room), 보완된 평면, 보완된 V, 그리고 보완된 A형태의 총 7가지 검정 대상지를 이용하여 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션을 수행하였다([그림 3-12], [표 3-3]). 검정 대상지의 크기는 건물의 실내, 방 또는 건물의 외벽을 활용하여 검정 대상지를 제작하였다는 가정 하에, 높이 3m 그리고 폭 8m 수준으로 설정하였다. 각 검정 대상지가 사용된 이유는 다음과

같다. 먼저 평면, A형태, 그리고 방형태의 검정 대상지는 광학 카메라의 셀프 캘리브레이션에 주로 사용되는 형태이며, V 형태의 검정 대상지는 3장 3절에서 어안 렌즈 카메라의 표정요소 간 상관관계가 가장 낮게 나타났던 형태이기에 추가되었다.

보완된 평면, 보완된 V, 그리고 보완된 A는 각각 평면, V, 그리고 A형태 검정 대상지의 단점이 일부 보완된 형태이며, 1m×1m 크기의 평면 두개를 추가하여 구성되었다. 보완된 형태의 검정 대상지들은 사전에 설계된 각 3가지의 후보군들 중, 기본 형태(평면, V, 그리고 A) 검정 대상지의 단점을 가장 잘 보완할 수 있는 것으로 선정되었다. 보완된 검정 대상지가 설계된 구체적인 목적은 다음과 같다. 먼저 보완된 평면 형태의 경우 카메라와 좀 더 가까운 위치에 기준점을 추가하기 위하여 설계되었다. 3장 3절에서 어안 렌즈 카메라와 검정 대상지 간 거리가 가까울수록 표정요소 간 상관관계가 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 보완된 평면 형태의 경우 이와 같은 분석 결과를 반영한 형태이다. 다음으로 보완된 V형태는 영상 기준점 배치를 향상시키기 위한 형태이다. 셀프 캘리브레이션 수행 시, 디스토션 파라미터는 영상에 기준점이 고르게 분포할 경우 정확히 계산될 수 있다. 하지만 V 형태 검정 대상지의 경우, 영상 외곽 부분에 영상 기준점이 부족할 수 있으며, 보완된 V형태의 검정 대상지는 이와 같은 단점을 해결하기 위하여 결정되었다. 마지막으로 보완된 A형태는 3장 3절에서의 결과를 반영한 검정 대상지이다. 3장 3절에서 확인한 바와 같이 A형태의 검정 대상지는 어안 렌즈 카메라의 표정요소 간 상관관계가 높게 나타난다. 따라서 검정 대상지의 중앙에 추가적인 타겟을 V형태로 설치하여, 상관관계를 개선하고자 하였다.

한편 어안 렌즈 카메라의 내부표정요소와 디스토션 파라미터는 [표 3-4]와 같이 설정되었으며, 각 수치는 백팩에 사용된 어안 렌즈 카메라의 명목값과 유사한 수치로 결정되었다.



[그림 3-12] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 검정 대상지
(a) 평면 형태 (b) 보완된 평면형태 (c) V형태 (d) 보완된 V형태
(e) A형태 (f) 보완된 A형태 (g) 방형태

[표 3-3] 시뮬레이션 검정 대상지의 형태와 내용

검정 대상지 형태	내용
평면	광학 카메라 셀프캘리브레이션에 일반적으로 사용되는 형태
V	A또는 평면 형태에 비하여 상대적으로 낮은 상관관계를 나타낸 형태
A	광학 카메라 셀프캘리브레이션에 일반적으로 사용되는 형태
방(room)	어안 렌즈 카메라 캘리브레이션에 사용되는 형태
보완된 평면	평면 형태의 단점을 일부 보완한 형태 (카메라-검정대상지 간 거리 개선)
보완된 V	V형태의 단점을 일부 보완한 형태 (영상 기준점의 분포를 개선)
보완된 A	A형태의 단점을 일부 보완한 형태 (표정요소 간 상관관계 개선)

[표 3-4] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 파라미터 설정

x_p (mm)		y_p (mm)		focal length (mm)		
0.004		0.004		2.9 (2900 μm)		
pixel size (mm)		random noise (pixel)		image size (pixel)		
				x	y	
0.00345		0.5		2,448	2,048	
K_1	K_2	K_3	P_1	P_2	A_1	A_2
1^{-05}	1^{-07}	3^{-09}	-1^{-05}	-2^{-07}	1^{-05}	2^{-07}

위와 같이 설계된 시뮬레이션은 셀프 캘리브레이션에 사용되는 영상 조합을 바꿔가며 수행되었다. 즉 5가지의 투영모델, 7가지의 검정대상지, 그리고 4가지의 서로 다른 영상조합의 경우를 이용하여 총 140회의 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션이 수행되었다.

3.4.2 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 정확도 평가 및 분석

총 7가지 형태의 검정 대상지와 5가지 투영 모델을 사용하여 수행된 시뮬레이션의 정확도는 캘리브레이션의 안정성, 디스토션 파라미터, 주점 좌표 및 주점 거리, 그리고 표정요소 간 상관관계를 통하여 분석되었다. 먼저 캘리브레이션의 안정성은 표정요소의 발산 여부를 기준으로 판단되었다. 디스토션 파라미터의 정확도는 설정값([표 3-4])을 이용하여 계산된 디스토션과 추정된 파라미터를 이용하여 계산된 디스토션 값 간의 비교를 통하여 판단되었다. 마지막으로 표정요소의 정확도는 참값과 직접 비교하였다.

1) 셀프 캘리브레이션의 안정성 평가

캘리브레이션의 안정성은 표정요소 간 상관관계가 매우 높아서 표정요소가 대부분 발산하는 경우 '불안정'으로 평가되었다. 다음으로 외부표정요소(영상 촬영위치)에 매우 민감하게 반응하여 영상 조합에 따라 발산이 일어나거나, 지역 최적해 문제가 나타나는 경우는 '약간 불안정'으로 평가하였다. 마지막으로 표정요소의 발산이나 지역 최적해 현상이 나타나지 않고 캘리브레이션이 완료된 경우 '안정'으로 평가하였다.

[표 3-5]는 안정성 평가의 결과를 보여주며, 이를 통하여 어안 렌즈 카메라의 경우 검정 대상지의 형태에 따라서 안정성이 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 즉 원근 투영 카메라(일반 광학 카메라)의 경우 검정 대상지의 형태에 상관없이 전반적으로 안정적인 셀프 캘리브레이션이 수행되었지만, 어안 렌즈 카메라의 경우 A형태와 방형태의 검정 대상지에서 매우 불안정한 모습을 보인다. 이는 두 검정 대상지의 경우, 촬영 위치에 관련 없이 A 또는 평면 형태의 검정 대상지를 정면(수

직 방향)에서 촬영한 것과 같은 형태로 영상이 나타나기 때문인 것으로 분석된다. 평면 형태의 검정 대상지는 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션에 있어 촬영 위치에 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 즉 촬영 위치에 따라서 표정요소의 발산이 나타나거나, 지역 최적해 현상이 나타났다. 마지막으로 보완된 평면, 보완된 A, V, 그리고 보완된 V형태의 경우 투영 모델에 관련 없이 전반적으로 안정적으로 나타났다.

[표 3-5] 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션 안정성 평가

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	안정	안정	안정	안정	안정	안정	안정
등거리 투영	약간 불안정	안정	불안정	안정	안정	안정	불안정
등입체각 투영	약간 불안정	안정	불안정	안정	안정	안정	불안정
정사 투영	약간 불안정	안정	불안정	안정	안정	안정	불안정
스테레오 투영	약간 불안정	안정	불안정	안정	안정	안정	불안정

내부표정요소의 정확도 분석에는 안정과 약간 불안정의 경우가 사용되었으며, 매우 불안정의 경우는 표정요소가 정상적으로 계산되지 않기 때문에 제외되었다. 한편 약간 불안정으로 판별된 경우는 발산 현상이 나타난 경우를 제외한 결과를 기준으로 정확도 평가를 수행하였다.

2) 내부표정요소 정확도 평가

내부표정요소 정확도 계산은 다음과 같이 진행되었다. 먼저 계산된 내부표정요소, 그리고 외부표정요소와 기준점 좌표의 참값을 이용하여 영상좌표를 계산하였다(수식 (3-30)부터 수식 (3-34)). 이와 같이 계산된 추정 영상좌표는 모두 참값을 이용하여 계산된 영상좌표(수식 (3-35))와 비교되었다(수식 (3-36)). 이때 x_{p_est}, y_{p_est}, 그리고 f_{est}는 각각 계산된 주점 좌표와 초점거리이며, Δx_{est}와 Δy_{est}는 계산된 디스토션이다. x, y는 실제 영상 좌표이며, r_{est}와 r_{true}는 각각 주점에서 영상 기준점 까지 거리의 계산값 및 참값이다.

$$T_x = \frac{r}{fR}U = \frac{-x + x_p \triangle x}{f} \tag{3-30}$$

$$T_y = \frac{r}{fR}V = \frac{-y + y_p \triangle y}{f} \tag{3-31}$$

$$x_{est} = x_{p_est} - f_{est} T_x + \triangle x_{est} \tag{3-32}$$

$$y_{est} = y_{p_est} - f_{est} T_y + \triangle y_{est} \tag{3-33}$$

$$r_{est} = \sqrt{x_{est}^2 + y_{est}^2} \tag{3-34}$$

$$r_{true} = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3-35}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (r_{est} - r_{true})^2}{N}} \tag{3-36}$$

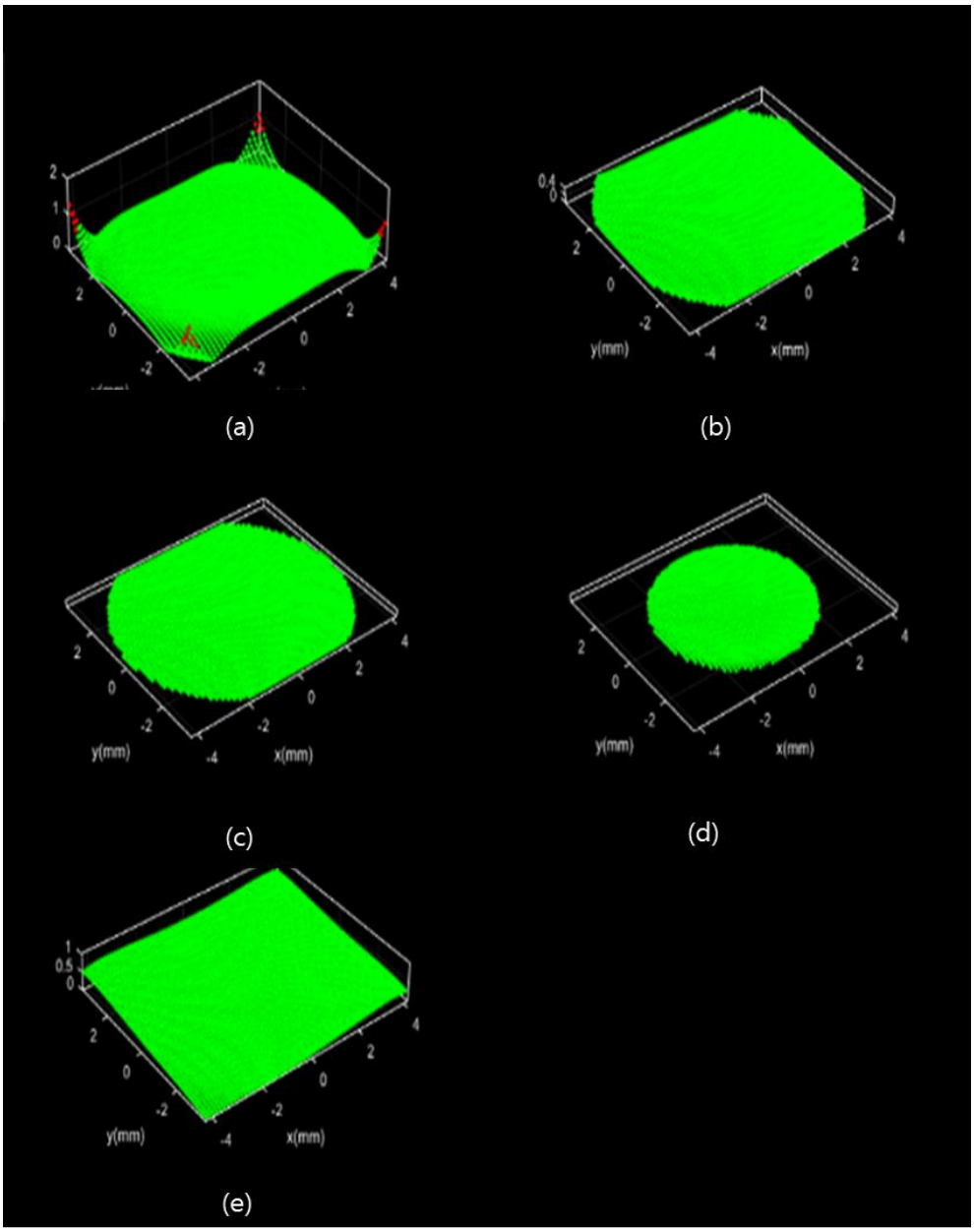
[표 3-6]은 검정 대상지 및 투영 모델별 영상 좌표 잔차의 RMSE(Root Mean Square Error)를 보여준다. 안정성 평가에서 '매우 불안정'으로 평가된 항목([표 3-6]의 검정색)은 표정요소가 발산하여

정상적으로 캘리브레이션이 완료되지 않았기 때문에 평가에서 제외되었다. [표 3-6]을 통하여 보완된 평면, 보완된 A, 그리고 보완된 V 형태의 검정 대상지가 다른 경우에 비하여 일반적으로 높은 정확도를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 반면, V형태의 검정 대상지는 다른 경우에 비하여 매우 낮은 정확도가 나타났다.

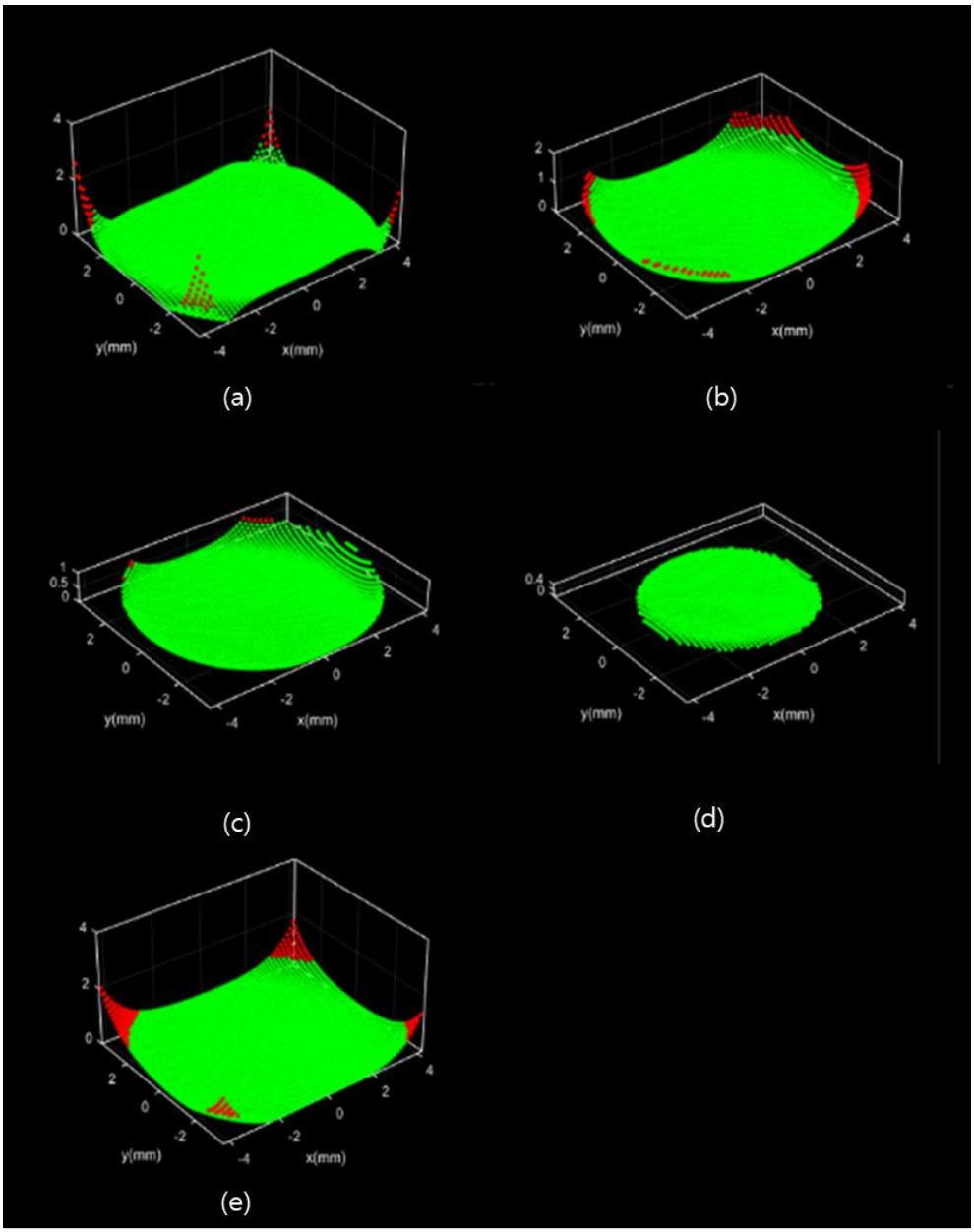
[표 3-6] 영상 기준점 잔차의 RMSE(pixel)

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	0.8669	0.4617	0.3443	0.2813	1.9945	0.3740	0.3864
등거리 투영	0.4790	0.3170		0.1875	4.2771	0.2504	
등입체각 투영	0.4450	0.2143		0.1660	10.1545	0.5492	
정사 투영	0.4037	0.1826		0.1485	0.7530	0.1630	
스테레오 투영	0.3521	0.2907		0.3131	4.5461	0.8383	

보완된 A와 보완된 V의 경우 정확도가 모두 높게 나타났으나, 오차의 발생 양상은 다르게 나타났다. [그림 3-13]과 [그림 3-14]는 각각 보완된 A와 보완된 V형태 검정 대상지의 셀프 캘리브레이션 정확도를 보여준다. 이때 그림의 x, y축은 각 영상의 가로 세로 방향이며, z축은 영상 각 화소의 잔차 크기를 의미한다. 녹색으로 표시된 부분은 0.5 픽셀 이하의 오차를 보여준 부분이며, 빨간색으로 표시된 부분은 0.5 픽셀 이상의 오차가 나타난 부분이다. 그림을 통하여 보완된 V형태에서 수행된 셀프 캘리브레이션의 디스토션은 영상 외곽 부분의 정확도가 보완된 A형태의 경우보다 낮음을 확인할 수 있다.



[그림 3-13] 보완된 A 형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션의 화소별 잔차 (녹색: 0.5 픽셀 이하 오차, 빨간색: 0.5 픽셀 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영



[그림 3-14] 보완된 V 형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션의 화소별 잔차 (녹색: 0.5 픽셀 이하 오차, 빨간색: 0.5 픽셀 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영

3) 디스토션 파라미터 정확도 평가

디스토션 파라미터의 정확도는 [표 3-7]을 통하여 확인할 수 있다. 디스토션 파라미터 정확도는 보완된 A형태의 검정 대상지에서 가장 높게 나타났으며, V형태의 검정 대상지에서 가장 낮은 정확도가 나타났다.

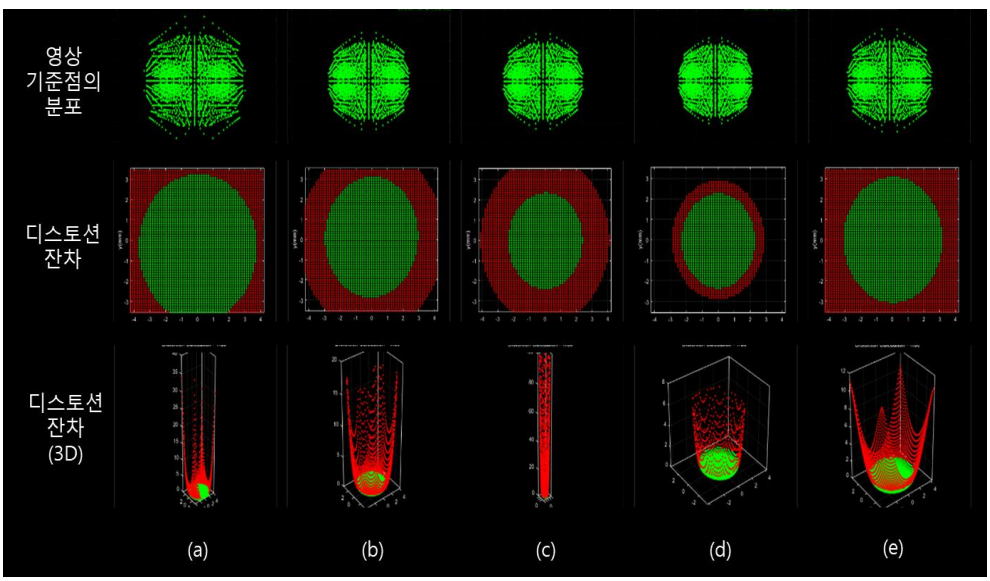
이 같은 결과가 나타난 이유는 [표 3-8]과 [그림 3-16]을 통하여 확인할 수 있다. [표 3-8]은 영상 기준점이 영상 전체 면적 중 차지하는 비율을 보여주며, 이는 영상 기준점이 얼마나 영상 전체에 고르게 분포되어 있는지를 의미한다. 표를 통하여, V형태의 검정 대상지는 다른 검정 대상지에 비하여 영상 기준점 분포가 고르지 않다는 것을 확인할 수 있다. V형태의 검정 대상지에서 디스토션 파라미터의 오차가 가장 크게 나타난 이유는 영상 기준점 분포가 고르지 않았기 때문이며, 이는 [그림 3-15]를 통하여 다시 확인할 수 있다. [그림 3-15]의 x, y축은 각각 영상의 가로 세로 방향, z축(디스토션 잔차(3D))은 영상 각 화소의 잔차 크기를 의미한다. 그림을 통하여 외곽 부분에서 매우 큰 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 영상의 외곽 부분에 영상 기준점이 거의 존재하지 않기 때문으로 판단된다.

[표 3-7] 디스토션 잔차의 RMSE(pixel)

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	0.6517	0.2928	0.2412	0.1889	1.8920	0.2951	0.2570
등거리 투영	0.7471	0.1961		0.0674	4.2193	0.2648	
등입체각 투영	0.8990	0.2347		0.0601	9.9063	0.1882	
정사 투영	0.7181	0.2086		0.2140	0.7303	0.3144	
스테레오 투영	0.2907	0.2224		0.0936	4.4685	0.7962	

[표 3-8] 영상 기준점의 면적 비율(평균, %)

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	85.12	81.00	92.70	92.50	62.67	73.25	91.30
등거리 투영	73.12	75.50		88.75	39.33	66.75	
등입체각 투영	70.12	72.25		86.00	39.80	56.50	
정사 투영	81.50	83.50		89.50	56.30	67.50	
스테레오 투영	80.37	84.50		91.25	44.17	58.75	



[그림 3-15] V형태 검정 대상지를 이용한 셀프 캘리브레이션에서의 영상 기준점 분포와 디스토션 파라미터 잔차 (녹색: 0.5 pixel 이하 오차, 빨간색: 0.5 pixel 이상 오차) (a) 원근 투영 (b) 등거리 투영 (c)등입체각 투영 (d) 정사투영 (e) 스테레오 투영

4) 주점 좌표 및 초점 거리 정확도 평가

주점 좌표 및 주점 거리의 오차는 [표 3-9] 그리고 [표 3-10]과 같다. 표를 통하여, 주점 좌표와 주점 거리는 각각 1 픽셀 이내 그리고 29μm(주점 거리 참값의 0.01 수준)이하 오차 수준의 매우 높은 정확도로 계산되었음을 확인할 수 있다. 다만 보완된 형태의 검정 대상지가 일반적으로 좀 더 높은 정확도를 나타내었으며, 평면 형태 검정 대상지의 경우 초점 길이의 정확도가 상대적으로 낮게 나타났다.

[표 3-9] 주점 좌표의 오차(평균, pixel)

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	0.3813	0.2196	0.1730	0.0955	0.2675	0.1296	0.2042
등거리 투영	0.2683	0.1741		0.1225	0.4446	0.0705	
등입체각 투영	0.2347	0.1600		0.0833	0.6323	0.5328	
정사 투영	0.2411	0.1883		0.1619	0.1948	0.0887	
스테레오 투영	0.2656	0.1319		0.1576	0.2926	0.1419	

[표 3-10] 초점 길이의 오차(평균, μm)

	검정 대상지 종류						
	평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	1.33	0.31	0.18	0.40	0.51	0.54	0.29
등거리 투영	4.03	0.68		0.26	1.62	0.44	
등입체각 투영	4.22	0.77		0.31	0.79	0.31	
정사 투영	5.76	1.01		1.36	1.26	2.10	
스테레오 투영	1.20	0.58		0.78	1.04	0.45	

5) 표정요소 간 상관관계 평가

[표 3-11]은 셀프 캘리브레이션 시뮬레이션의 주요 표정요소 간 상관관계를 보여준다. A형태와 방형태의 경우 발산 현상이 나타났기 때문에, 최소제곱-광속조정법의 첫번째 이터레이션에서 나타난 상관관계를 분석하였다.

검정 대상지의 형태와 상관없이 x_p-X0 그리고 y_p-Y0 간의 상관관계는 전반적으로 낮은 상관관계를 나타내었다. 이는 모든 시뮬레이션에 k를 0°와 90°로 촬영한 영상을 포함했기 때문으로 판단된다. 반면 f와 Z0 간의 상관관계는 검정 대상지 별로 큰 차이를 보인다.

A형태와 방형태의 검정 대상지를 이용한 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션에서, f와 Z0 간의 상관관계는 1에 가까운 상관관계를 보여주고 있다. 안정성 평가에서 매우 불안정으로 판별되었던 경우(A형태 그리고 방형태)를 제외하면, 평면 형태의 검정 대상지에서 상대적으로 가장 높은 상관관계가 나타났으며, 특히 주점 거리(f)와 Z0간의 상관관계는 0.95 이상의 높은 값을 보였다.

전반적으로 가장 낮은 상관관계를 나타낸 경우는 V형태 및 보완된 V형태의 검정 대상지로, 이는 앞선 3장 3절 상관관계 분석과 동일한 결과로 판단할 수 있다. 보완된 A형태의 검정 대상지의 경우, 최대 0.68 수준의 안정적인 상관관계가 나타났으며, 이는 추가된 타겟을 통하여 상관관계가 상당히 계선되었기 때문으로 판단된다.

[표 3-11] 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계(시뮬레이션)

		검정 대상지 종류						
		평면	보완된 평면	A	보완된 A	V	보완된 V	방
원근 투영	x_p-X0	0.64	0.14	0.29	0.15	0.28	0.10	0.28
	y_p-Y0	0.41	0.14	0.35	0.20	0.21	0.07	0.27
	f-Z0	0.93	0.75	0.51	0.63	0.49	0.51	0.33
등거리 투영	x_p-X0	0.58	0.19	0.25	0.21	0.07	0.08	0.28
	y_p-Y0	0.48	0.31	0.30	0.26	0.13	0.05	0.29
	f-Z0	0.97	0.74	0.99	0.67	0.43	0.53	0.99
등입체각 투영	x_p-X0	0.49	0.18	0.31	0.19	0.07	0.08	0.27
	y_p-Y0	0.33	0.29	0.32	0.25	0.13	0.05	0.26
	f-Z0	0.96	0.73	0.99	0.66	0.44	0.53	0.99
정사 투영	x_p-X0	0.51	0.19	0.25	0.16	0.07	0.10	0.20
	y_p-Y0	0.29	0.26	0.27	0.21	0.14	0.05	0.23
	f-Z0	0.96	0.69	0.98	0.62	0.45	0.53	0.98
스테레오 투영	x_p-X0	0.54	0.19	0.30	0.21	0.08	0.09	0.24
	y_p-Y0	0.37	0.30	0.29	0.25	0.12	0.06	0.25
	f-Z0	0.97	0.76	0.99	0.68	0.43	0.54	0.99

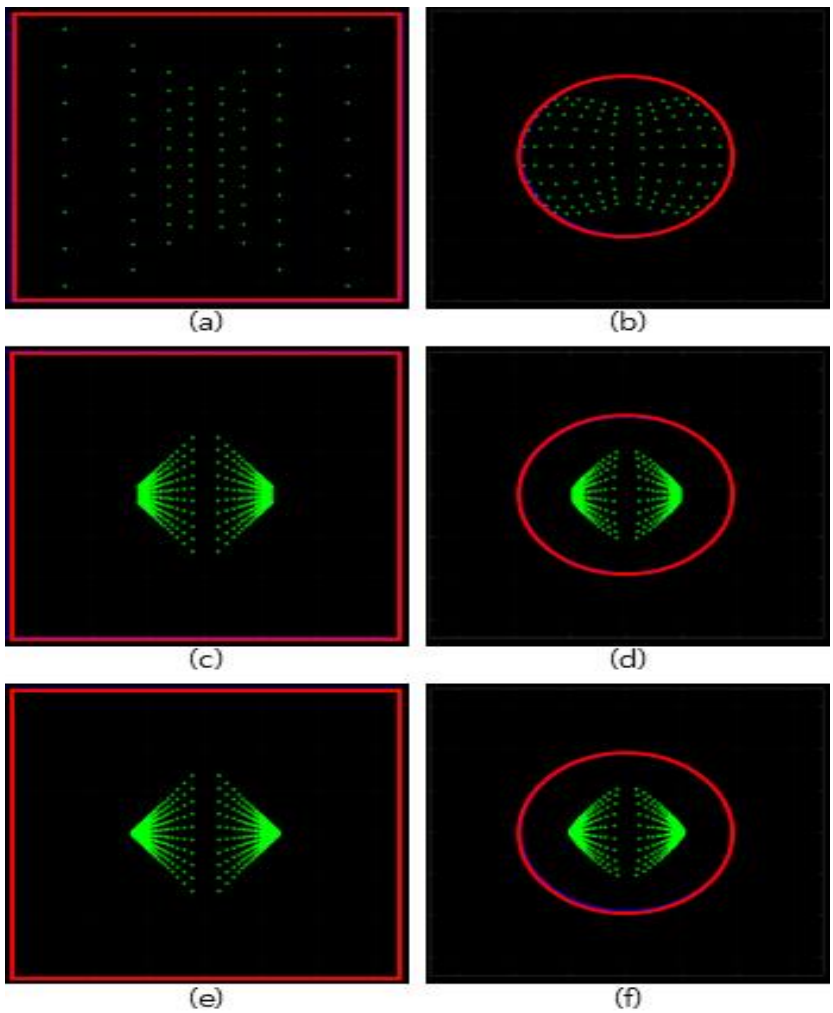
최소제곱-광속조정의 첫번째 반복(iteration)에서의 상관관계

6) 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 검정 대상지 결정

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 보완된 A형태의 검정 대상지를 사용하는 것이 어안 렌즈 카메라의 캘리브레이션 정확도 확보에 가장 유리한 것으로 판단하였다. 보완된 A형태의 검정 대상지는 상대적으로 고른 영상 기준점 분포를 나타냈으며, 표정요소 간의 상관관계 해소에도 적합한 것으로 판별되었다.

V형태의 검정 대상지는 내부표정요소 간 상관관계를 낮추는 데에는 유리하지만, 영상 기준점 분포가 불균일하여 디스토션 파라미터의 정확도가 매우 낮게 나타났다. 보완된 V형태의 경우 이와 같은 단점이 일부 해소되지만, 여전히 영상 최외각 부분에서의 정확도는 보완된 A형태에 비하여 다소 낮게 나타났다. 이외에 추가로 관찰된 V형태 그리고 보완된 V형태 검정 대상지의 단점은 해당 검정 대상지를

사용할 경우 영상의 외곽 부분으로 갈수록 기준점의 영상 좌표를 획득하기 어렵다는 것이다. [그림 3-16]은 A형태와 V형태의 검정 대상지에서 촬영한 원근 투영 카메라 영상((a), (c), (e))과 등입체각 투영 카메라의 영상((b), (d), (f))을 보여준다. 그림의 붉은색 선은 각 카메라의 영상이 기록되는 범위를 의미하며, 녹색점은 영상 기준점을 보여준다. (a)와 (b)의 경우는 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 A형태 검정 대상지에서 촬영된 영상, (c)와 (d)는 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지에서 촬영된 영상, (e), (f) 100m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지에서 촬영된 영상을 보여준다. 그림을 통하여, A형태 검정 대상지에서 촬영한 영상은 기준점이 고루 분포되어 있으나, V형태 검정 대상지의 경우 크기를 100m 수준으로 증가시킨 경우에도 영상 외곽 부분에 기준점이 부족함을 알 수 있다. 또한 영상의 중앙에서 외곽으로 갈수록 영상 기준점 좌표 간의 거리가 매우 가깝게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 영상 기준점이 나타날 경우, 실제 캘리브레이션 상황에서는 이들의 영상 좌표를 획득하기 매우 어렵기 때문에 셀프 캘리브레이션에 부정적인 영향을 주게 된다.

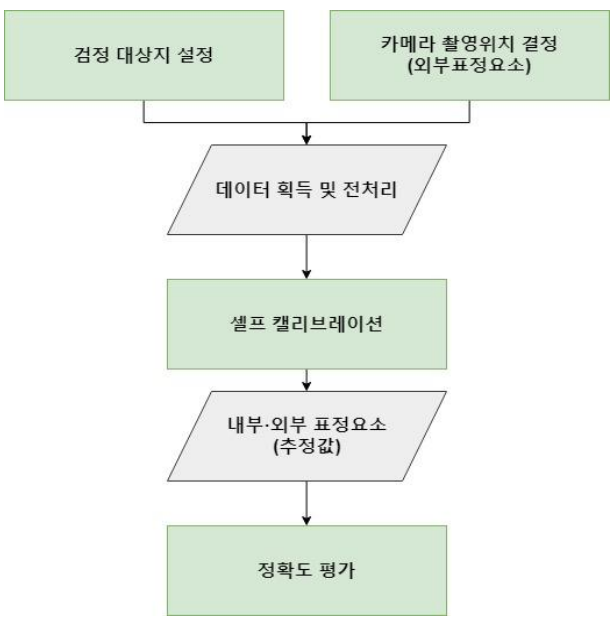


[그림 3-16] 검정 대상지 형태에 따른 원근 투영 카메라((a), (c), (e)) 및 등입체각 투영 카메라((b), (d), (f))의 영상 기준점 분포
(a), (b) 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 A형태 검정 대상지
(c), (d) 20m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지
(e), (f) 100m×5m 크기의 두 평면으로 구성된 V형태 검정 대상지

3.5 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션

본 연구에서는 시뮬레이션의 분석을 토대로 실제 어안 렌즈 카메라에 대한 셀프 캘리브레이션을 수행하였다. 셀프 캘리브레이션은 총 3대의 어안 렌즈 카메라에 대하여 수행되었으며, 3대의 카메라는 센서 시스템에 사용된 등입체각 투영 카메라 2대와 3장 3절의 분석결과를 보다 강건히 하고자 추가된 등거리 투영 모델 카메라 1대를 포함한다.

[그림 3-17]은 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 흐름도이다. 검정 대상지와 카메라 간 상대적 위치는 표정요소 간 상관관계를 최소화 하고 영상 기준점의 분포가 최대한 고르게 나타나도록 설정되었다. 셀프 캘리브레이션을 통하여 계산된 내부 및 외부표정요소의 정확도는 영상 잔차, 상관관계, 그리고 편차 등을 통하여 평가되었다.



[그림 3-17] 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션의 흐름도

3.5.1 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 설계

셀프 캘리브레이션은 2종류, 총 3대의 어안 렌즈 카메라를 대상으로 수행되었다. 백팩에 사용된 어안 렌즈 카메라 이외에, 추가로 셀프 캘리브레이션에 실험에 사용된 어안 렌즈 카메라([그림 3-18])의 제원은 [표 3-12]와 같다.

[그림 3-18] 등거리 투영 어안 렌즈 및 카메라 바디

[표 3-12] 등거리 투영 어안 렌즈 및 카메라의 제원

	어안 렌즈	카메라
모델명	Samyang Fisheye lens	Sony α6000
투영 모델	등거리 투영 (equidistant projection)	
영상 크기 (pixel)	6000 ×4000	
픽셀 사이즈 (mm)	0.00391	
초점 거리 (mm / 명목값)	7.5	

추가된 어안 렌즈 카메라(이하 어안 카메라3)는 등거리 투영 카메라로 멀티 센서 시스템에 사용된 2대의 등입체각 투영 카메라(이하

어안 카메라1, 어안 카메라2)와는 다른 투영 모델을 지닌 카메라로 선택되었다. 등입체각 및 등거리 투영 카메라를 이용하여 셀프 캘리브레이션을 수행한 이유는, 해당 투영 모델이 어안 렌즈 카메라에 가장 많이 사용되기 때문이다(Abraham et al. 2005, Schneider et al. 2009, Marcato Junior et al. 2015).

추가된 어안 렌즈 카메라는 렌즈와 카메라 바디가 서로 다른 마운트 형태를 지니고 있기 때문에 마운트 컨버터를 이용하여 렌즈와 바디 간 결착이 이루어지며([그림 3-19]), 이는 주점 좌표 및 주점 거리가 명목 수치와 큰 차이가 나타나게 할 수 있다. 백팩에 사용된 어안 카메라1 및 2의 경우에도 유사한 원인으로 인하여 명목수치와 내부표정요소 실제 수치 간에 큰 차이가 나타날 수 있다. 이는 어안 카메라 1과 2는 추가적인 고정 작업을 통하여 렌즈와 카메라 간의 완벽한 고정이 이루어지기 때문이다.

[그림 3-19] 셀프 캘리브레이션에 사용된 어안 렌즈 카메라의 렌즈와 바디 간 결착 방법

검정 대상지의 종류와 영상 촬영 위치에 대한 내용은 [그림 3-20]과 [표 3-13]을 통하여 확인할 수 있다. [그림 3-20]의 (a), (b), 그리고 (c)는 각각 보완된 A형태, A형태, 그리고 평면 형태의 검정 대상

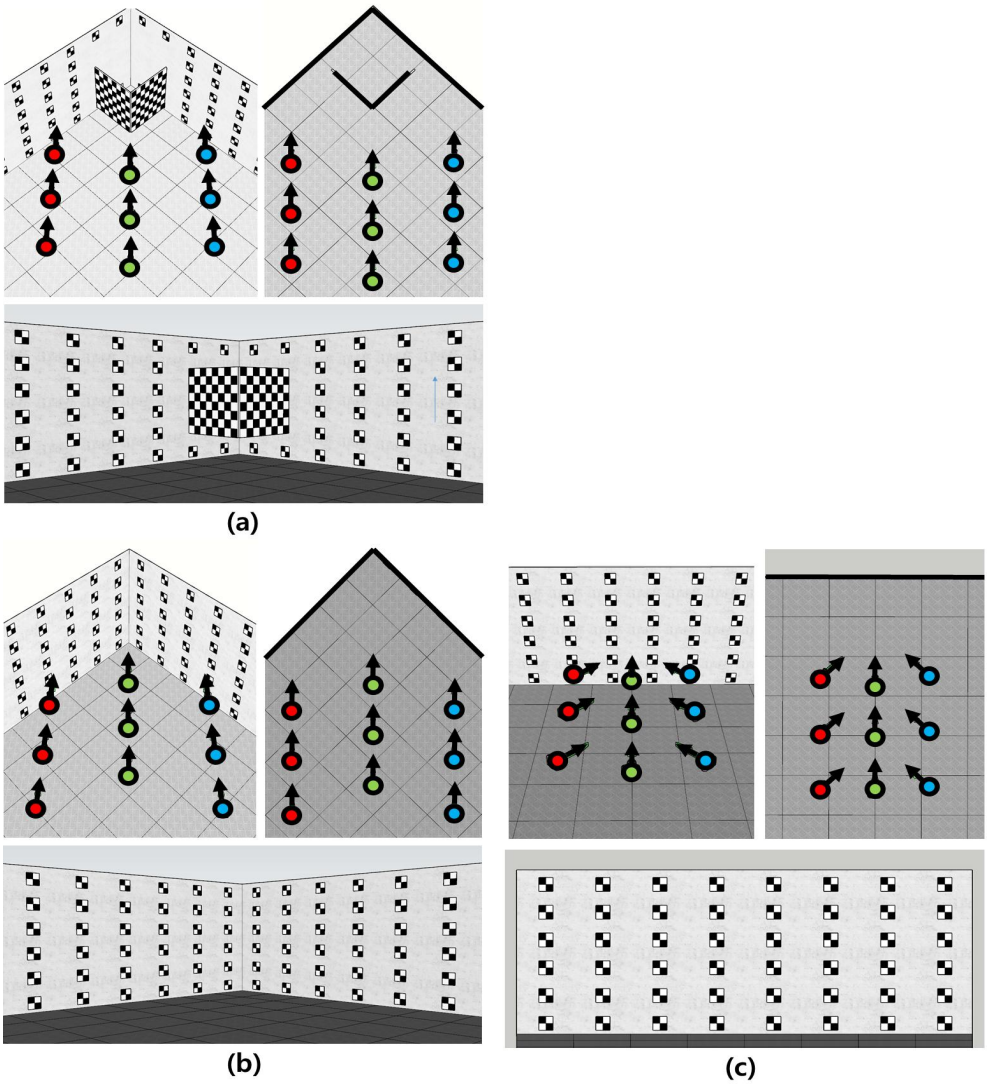
지를 보여준다. 각 그림의 좌측 상단은 검정 대상지와 어안 렌즈 카메라 촬영 위치 및 방향, 우측 상단은 좌측 상단 그림의 평면도, 그리고 하단은 검정 대상지를 정면에서 바라본 모습을 보여준다.

검정 대상지는 총 3종류가 사용되었으며, 각 검정 대상지가 사용된 이유는 다음과 같다. 보완된 A의 경우 시뮬레이션에서 가장 높은 정확도를 나타내었기에 선정되었다. A와 평면 형태의 검정 대상지는 기존 연구들에서 가장 많이 사용된 형태이기 때문에 보완된 A와의 비교군으로 선정되었다.

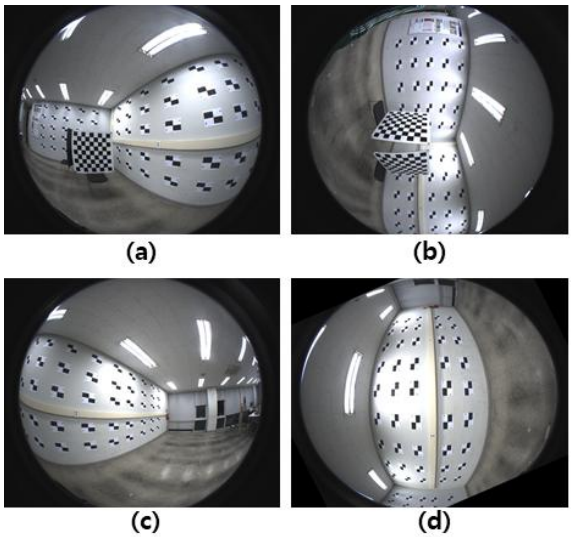
영상 촬영 위치는 [그림 3-20]의 화살표와 같이 설정되었으며, 각 그림의 빨간색, 녹색 그리고 파란색 원과 화살표는 어안 렌즈 카메라 촬영 위치 및 방향을 의미한다. 녹색 원 위치에서는 κ를 90°만큼 회전시켜 영상을 촬영하였으며, 빨간색 및 파란색 원에선 κ값을 0°로 설정하고 검정 대상지 평면을 대각선 방향으로 촬영하도록 설정하였다. 이와 같은 촬영 위치 및 방향 설정은 x_p와 X0 그리고 y_p와 Y0간의 상관관계를 낮추기 위함이며, 각 검정 대상지에서 실제 획득된 영상은 [그림 3-21] 및 [그림 3-22]와 같다.

[표 3-13] 셀프 캘리브레이션용 검정 대상지와 영상 촬영 위치

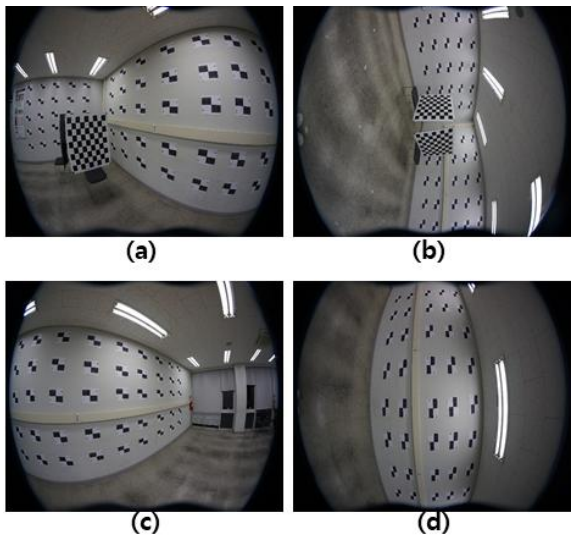
	구분	내용
검정 대상지	보완된 A	시뮬레이션 결과 최고 정확도
	A	비교군
	평면	
촬영 위치	검정 대상지 중앙	κ=90° (x_p-X0, y_p-Y0 간의 상관관계 해소)
	검정 대상지 좌·우측	κ=0° 검정 대상지 평면과 대각 방향 촬영 (x_p-X0, y_p-Y0 간의 상관관계 해소)



[그림 3-20] 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 검정 대상지 및 영상 촬영 위치 (a) 보완된 A형태 (b) A형태 (c) 평면 형태



[그림 3-21] 등입체각 투영 렌즈 카메라(어안 카메라1과 2) 영상
(a) 보완된 A 형태, κ=0° (b) 보완된 A형태, κ=90°
(c) 평면 형태, κ=0° (d) 평면 형태, κ=90°



[그림 3-22] 등거리 투영 렌즈 카메라(어안 카메라3) 영상
(a) 보완된 A 형태, κ=0° (b) 보완된 A형태, κ=90°
(c) 평면 형태, κ=0° (d) 평면 형태, κ=90°

3.5.2 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 결과 분석

셀프 캘리브레이션 정확도 검증은 잔차의 RMSE와 표정요소의 표준 편차를 통하여 수행되었다. RMSE가 낮다는 것은 계산된 표정요소가 카메라의 디스토션을 정확히 설명할 수 있다는 것이며, 표정요소의 편차가 낮다는 것은 각 표정요소의 정밀도가 높다는 것으로 판단할 수 있다.

최종 결과는 [표 3-14]부터 [표 3-19]와 같으며, 모든 카메라는 보완된 A형태의 검정 대상지에서 가장 높은 정확도와 정밀도를 나타내었다. 멀티 센서 시스템에 사용된 등입체각 투영 모델의 어안 렌즈 카메라1과 2의 경우 모두 보완된 A형태에서 가장 안정적인 셀프 캘리브레이션이 이루어졌으며, 평면 형태의 검정 대상지에서는 표정요소가 발산하여 정상적인 캘리브레이션이 수행되지 못하였다([표 3-14], [표 3-16]). 반면 보완된 A와 A형태에서는 모두 셀프 캘리브레이션의 결과가 정상적으로 계산되었다. 보완된 A형태 검정 대상지에서의 결과가 상대적으로 낮은 편차를 보였으며, 잔차의 RMSE도 더 낮게 나타났다([표 3-15], [표 3-17]). 이는 보완된 A형태의 검정 대상지에서 보다 높은 정확도와 정밀도로 표정요소가 계산되었음을 의미한다.

[표 3-18]과 [표 3-19]는 어안 렌즈 카메라3의 표정요소와 그 정확도를 보여주며, 보완된 A형태의 검정 대상지에서 가장 낮은 RMSE와 편차가 나타났음을 확인할 수 있다. 어안 렌즈 카메라3의 경우 A형태의 검정 대상지에서는 표정요소가 발산하였다.

[표 3-14] 어안 렌즈 카메라1의 셀프 캘리브레이션 결과

	검정 대상지 형태		
	보완된 A	A	평면
x_p (pixel)	-13.33	-13.89	발산
y_p (pixel)	-32.19	-32.44	
f (mm)	2.6868	2.6869	
K_1	-4.44×10^{-4}	1.56×10^{-4}	
K_2	4.16×10^{-4}	$-1..01\times10^{-5}$	
K_3	-4.62×10^{-5}	2.21×10^{-5}	
P_1	-9.84×10^{-6}	-5.19×10^{-5}	
P_2	1.41×10^{-4}	2.17×10^{-5}	
A_1	-1.6×10^{-4}	5.50×10^{-4}	
A_2	2.06×10^{-4}	7.31×10^{-5}	

[표 3-15] 어안 렌즈 카메라1의 셀프 캘리브레이션 정확도

		검정 대상지 형태		
		보완된 A	A	평면
RMSE (pixel)		0.6691	0.7878	발산
표준 편차	x_p (pixel)	0.3453	0.5910	
	y_p (pixel)	0.3343	0.4793	
	f (mm)	0.0016	0.0015	
	X0 (mm)	1.14	1.85	
	Y0 (mm)	1.07	1.37	
	Z0 (mm)	1.35	1.62	
	ω (min, sec)	1′34″	1′54″	
	ϕ (min, sec)	1′42″	2′31″	
	κ (min, sec)	38″	45″	

[표 3-16] 어안 렌즈 카메라2의 셀프 캘리브레이션 결과

	검정 대상지 형태		
	보완된 A	A	평면
x_p (pixel)	-45.98	-47.94	발산
y_p (pixel)	-11.10	-11.20	
f (mm)	2.6834	2.6831	
K_1	-4.40×10^{-4}	-4.60×10^{-4}	
K_2	4.16×10^{-4}	4.46×10^{-4}	
K_3	-4.62×10^{-5}	-4.75×10^{-5}	
P_1	-9.84×10^{-6}	-1.74×10^{-5}	
P_2	1.41×10^{-4}	1.52×10^{-4}	
A_1	-1.6×10^{-4}	1.4×10^{-4}	
A_2	2.06×10^{-4}	2.41×10^{-4}	

[표 3-17] 어안 렌즈 카메라2의 셀프 캘리브레이션 정확도

		검정 대상지 형태		
		보완된 A	A	평면
RMSE (pixel)		0.5655	1.0357	발산
표준 편차	x_p (pixel)	0.3768	0.5423	
	y_p (pixel)	0.3188	0.3011	
	f (mm)	0.0017	0.0051	
	X0 (mm)	0.98	0.85	
	Y0 (mm)	0.95	1.47	
	Z0 (mm)	1.47	1.95	
	ω (min, sec)	1′29″	2′45	
	φ (min, sec)	1′56″	2′	
	κ (min, sec)	32″	38″	

[표 3-18] 어안 렌즈 카메라3의 셀프 캘리브레이션 결과

	검정 대상지 형태		
	보완된 A	A	평면
xp (pixel)	-15.21	발산	-14.55
yp (pixel)	39.72		40.49
f (mm)	7.4832		7.4965
K_1	-4.30×10^{-4}		-4.70×10^{-4}
K_2	1.39×10^{-6}		$2..37\times10^{-6}$
K_3	-2.83×10^{-8}		-3.44×10^{-8}
P_1	1.72×10^{-5}		1.03×10^{-5}
P_2	4.11×10^{-5}		3.92×10^{-5}
A_1	4.39×10^{-4}		4.40×10^{-4}
A_2	1.35×10^{-5}		1.14×10^{-5}

[표 3-19] 어안 렌즈 카메라3의 셀프 캘리브레이션 정확도

		검정 대상지 형태		
		보완된 A	A	평면
RMSE (pixel)		0.6852	발산	0.7106
표준 편차	xp (pixel)	0.3483		0.5450
	yp (pixel)	0.3149		0.4483
	f (mm)	0.0016		0.0030
	X0 (mm)	0.46		1.03
	Y0 (mm)	0.44		1.38
	Z0 (mm)	0.57		0.85
	ω (min, sec)	40′′		1′39′′
	ϕ (min, sec)	43′′		1′
	κ (min, sec)	15′′		38′′

[표 3-20]은 셀프 캘리브레이션 주요 표정요소 간 상관관계를 보여준다. 표정요소 간 상관관계는 어안 렌즈 카메라 및 검정 대상지와 관계없이 주점 거리(f)와 Z0간의 상관관계가 가장 높게 나타냈다. 이는 x_p-X0 그리고 y_p-Y0의 경우 κ를 90°로 설정하여 표정요소 간의 상관관계를 낮출 수 있었기 때문으로 판단된다.

검정 대상지 별 상관관계를 살펴보면, 먼저 어안 렌즈 카메라에 관계없이 보완된 A형태의 검정 대상지에서 상관관계가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 보완된 A형태의 검정 대상지는 주점 좌표와 외부표정요소 간에는 최대 0.25 수준의 상관관계를 보였으며, 주점 거리와 외부표정요소 Z0 간에는 최대 0.75 수준의 상관관계를 나타내었다.

A형태의 검정 대상지를 이용하여 어안 렌즈 카메라1과 2에 대한 셀프 캘리브레이션을 수행한 경우, 주점 거리와 Z0간에 상관관계가 0.91 이상의 매우 높은 수준을 나타냈다. 어안 렌즈 카메라3의 경우 A형태의 검정 대상지에서 표정요소의 발산 현상이 나타났으며, 이는 3장 3절의 시뮬레이션 및 어안 렌즈 카메라1과 2에서의 결과를 고려해볼 때, 표정요소 간의 높은 상관관계 때문인 것으로 판단할 수 있다.

평면 형태의 검정 대상지를 이용한 어안 렌즈 카메라3 셀프 캘리브레이션의 주점 거리와 Z0간에 0.87 수준의 상관관계가 나타났다. 어안 렌즈 카메라 1과 2의 경우 표정요소의 발산 현상이 나타났으며, 이는 주점 거리와 Z0간의 높은 상관관계 때문으로 판단된다.

이와 같은 셀프 캘리브레이션 결과는 시뮬레이션 결과와 매우 유사하며, 보완된 A형태의 검정 대상지가 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 적합함을 확인할 수 있게 한다. 보완된 A형태의 검정 대상지는 셀프 캘리브레이션에 정확도를 결정하는 중요 조건인, i) 표정요소 간의 상관관계 개선과 ii) 지상 기준점의 고른 분포, 두 가지 요

소를 모두 만족시켰다. 이를 통하여 계산된 각 어안 렌즈 카메라의 내부표정요소는 시스템 캘리브레이션 및 데이터 융합에 사용되었다.

[표 3-20] 셀프 캘리브레이션 표정요소 간 상관관계

		검정 대상지 종류		
		보완된 A	A	평면
어안 렌즈 카메라1 (등입체각 투영)	x_p-X0	0.14	0.15	
	y_p-Y0	0.25	0.10	
	f-Z0	0.75	0.92	
어안 렌즈 카메라2 (등입체각 투영)	x_p-X0	0.20	0.22	
	y_p-Y0	0.22	0.17	
	f-Z0	0.72	0.91	
어안 렌즈 카메라3 (등거리 투영)	x_p-X0	0.21		0.10
	y_p-Y0	0.21		0.19
	f-Z0	0.72		0.87

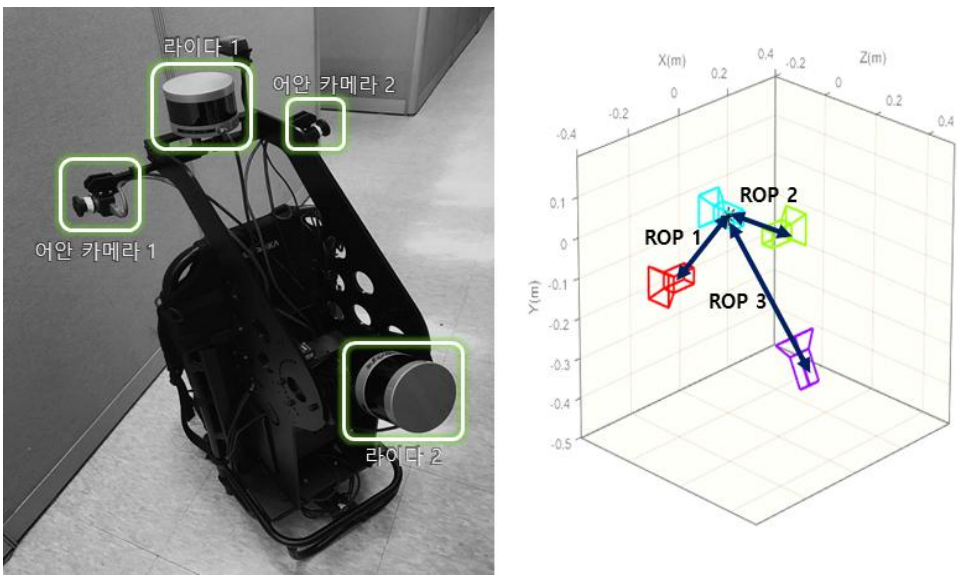
4. 멀티 센서 시스템 캘리브레이션

4장에서는 본 연구에서 제안한 멀티 센서 시스템 캘리브레이션에 대하여 설명한다. 광학 카메라와 라이다로 구성된 멀티 센서에 대한 시스템 캘리브레이션은 i) 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션과 ii) 라이다 간 시스템 캘리브레이션 부분으로 나누어 볼 수 있다. 따라서 4장에서는 멀티 센서 시스템에 보다 적합한 캘리브레이션 방법을 각 부분별로 제안한다.

각 연구의 내용에 대한 설명은 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저 4장 1절에서는 본 연구에서 설정한 센서 간 위치관계 해석 방법에 대하여 설명하고, 시야각 중첩도가 낮은 라이다 간의 상대표정요소를 계산하는 방법을 제안한다. 다음으로 2절에서는 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하고, 3절에서는 2절에서 제안된 방법의 검증을 위하여 수행된 시뮬레이션의 결과를 분석한다. 마지막으로 4절에서는 실제 멀티 센서 시스템 캘리브레이션을 수행하고 그 결과에 대하여 분석한다.

4.1 멀티 센서 시스템 센서 간 위치관계 해석

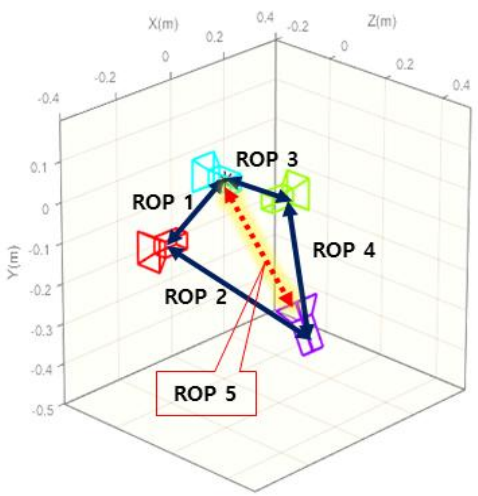
본 연구에서 사용된 센서 시스템은 2대의 어안 렌즈 카메라와 2대의 라이다로 구성되어 있으며([그림 4-1]), 일반적인 경우 시스템의 센서 간 상대적 위치는 [그림 4-1]과 같이 해석된다. 즉 하나의 참조 센서를 기준으로 다른 센서들의 상대적 위치를 계산하게 된다.



[그림 4-1] 멀티 센서 시스템 및 일반적인 상대표정요소 설정

본 연구에서 사용한 멀티 센서 시스템의 경우, 라이다와 라이다간의 중첩 영역이 매우 작기 때문에 두 센서 간의 상대표정요소([그림 4-1]의 ROP3)를 바로 계산하기 어렵다. 기존 연구들에서는 라이다 간 상대표정요소 계산에 ICP를 이용하거나, 시스템 설계상에서 정했던 상대적 위치를 그대로 사용하였다. 하지만 이와 같은 기존 방법들은 정확한 상대표정요소를 확보할 수 없기 때문에 라이다 간 데이터 융합의 정확도가 낮아질 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 [그림 4-2]와 같은 방식으로 상대적 위치를 정의하였다. 먼저 시스템의 상단 라이다(이하 라이다1)와 좌우의 어안 렌즈 카메라(이하 어안 렌즈 카메라1 및 어안 렌즈 카메라2) 각각의 위치 관계(이하 ROP1, ROP3)를 계산하였다. 다음으로 뒤쪽 라이다(이하 라이다2)와 어안 렌즈 카메라1 및 2와의 위치관계(이하 ROP2, ROP4)를 계산하였다. 이와 같이 각각 계산된 상대표정요소를 통하여 라이다 간의 상대표정요소(이하 ROP5)를 도출하였다. 즉 ROP1과 ROP2 그리고 ROP5는 폐합을 이루어야 하며, ROP3, ROP4 그리고 ROP5 간에도 폐합이 이루어져야 한다. 따라서 ROP1부터 ROP4가 계산되면, 폐합 관계를 제한조건으로 하여 ROP5를 계산할 수 있다. 위와 같은 설계에 따라서 어안 렌즈 카메라와 라이다 간의 시스템 캘리브레이션(라이다1-어안 렌즈 카메라1 및 2, 라이다2-어안 렌즈 카메라1및 2)이 총 4번 수행되었으며, 이들 결과를 사용하여 라이다와 라이다 간의 상대표정요소가 계산되었다.



[그림 4-2] 멀티 센서 시스템 센서 간 상대적 위치 정의

라이다 간 상대표정요소(ROP5)는 전역 최적화(global optimization)를 통하여 계산되었다. 전역 최적화에 사용된 제한 조건은 수식 (4-1)부터 (4-4)와 같으며, 이는 상대표정요소 간 폐합 조건을 의미한다. 이때 T_{rop1}, T_{rop2}, 그리고 T_{rop5}은 각각 ROP1, ROP2, 그리고 ROP5의 변위성분이며, M_{rop1}, M_{rop2}, 그리고 M_{rop5}는 각각 ROP1, ROP2, 그리고 ROP5의 회전행렬이다. 한편 전역 최적화의 가중치 설정에는 시스템 캘리브레이션에서 계산된 상대표정요소의 편차가 사용되었다. 즉 각 상대표정요소의 정밀도를 가중치로 사용하여 시스템 전체에 대한 전역 최적화를 수행하였다. 전역 최적화 단계에서 계산된 상대표정요소들(ROP1부터 ROP4)에 대한 미세 조정이 이루어지며, 라이다 간 상대표정요소(ROP5)가 계산된다.

$$T_{rop1} = T_{rop5} + M_{rop5}^{T}\, T_{rop2} \tag{4-1}$$

$$M_{rop1} = M_{rop2}\, M_{rop5} \tag{4-2}$$

$$T_{rop3} = T_{rop5} + M_{rop5}^{T}\, T_{rop4} \tag{4-3}$$

$$M_{rop3} = M_{rop4}\, M_{rop5} \tag{4-4}$$

전역 최적화를 통하여 라이다 간의 상대표정요소를 계산하는 방식은 ICP나 SLAM 등의 기존 방법에 비하여 멀티 센서 시스템 캘리브레이션에 적합할 것으로 판단된다. 먼저 ICP는 라이다 데이터 간 공통된 객체가 부족할 경우, 결과의 신뢰도가 매우 감소한다. 또한 수직에 가까운 방향으로 데이터를 획득하는 라이다가 시스템에 포함된 경우, 해당 라이다는 촬영위치별 데이터 중첩도가 낮을 수 있으며, 이는 SLAM의 정확도 감소로 이어진다. 때문에 각각의 라이다 데이터를 SLAM으로 통합하고, 통합 데이터 간 정합을 하는 기존의 방식은 라

이다의 배치에 따라서 그 정확도가 크게 낮아질 수 있다. 반면 본 연구에서 제안한 방식은 라이다 간 위치관계를 라이다와 중첩도가 높은 어안 렌즈 카메라를 통하여 해석하기 때문에 위와 같은 정확도 감소가 나타나지 않는다.

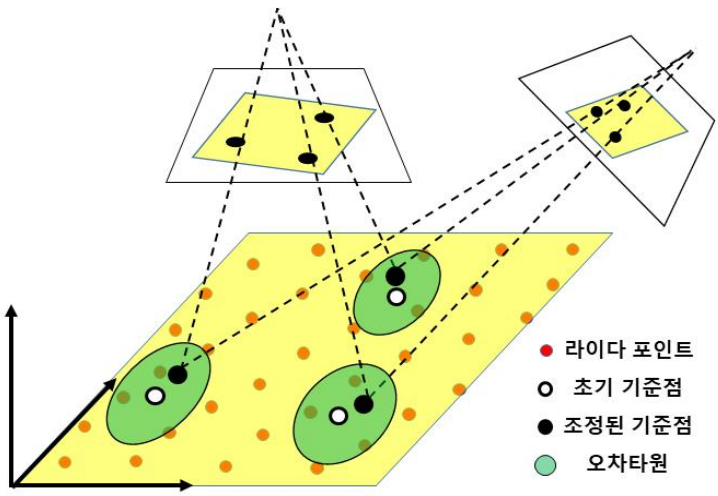
4.2 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법

본 연구에서는 가중치 조정을 통한 점 대 면 등록(registration)법이 사용되었다. 해당 방법은 본래 Habib et al.(2005) 그리고 Ghanma (2006) 등이 항공 라이다와 항공 영상 간의 정합을 위하여 제안한 방법으로, 어떤 물체의 평면을 나타내는 광학 영상의 모든 화소는, 동일한 평면을 나타내는 라이다 평면(라이다 점군 데이터로부터 계산된) 위에 위치해야 한다는 제한 조건을 이용한 방법이다.

점 대 면 등록법은 다음과 같은 순서로 진행된다. 먼저 다수의 광학 영상에서 동시에 나타나는 건물의 지붕이나 벽면 등의 영상 기준점들을 추출한다. 다음으로 광학 영상과 매칭되는 라이다 평면 위 임의의 점을 지상 기준점으로 설정하고, 영상 기준점과 지상기준점을 이용하여 최소제곱-광속조정을 수행한다. 이때 지상 기준점은 [그림 4-3]의 녹색 타원과 같은 오차를 포함하고 있으며, 해당 오차는 라이다 평면의 수직 방향으로는 작은 값을 가지며, 라이다의 평면에 평행한 방향으로는 크게 나타나게 된다. 이와 같은 특징을 최소제곱-광속조정의 가중치에 반영하여 평면과 수직방향의 가중치는 상대적으로 높게 설정하고, 평면과 평행한 방향으로는 낮은 가중치로 설정하면, 지상 기준점은 최소제곱-광속조정의 반복을 통하여 실제 지상 기준점의 위치로 이동하게 된다.

각 지상 기준점의 조정과 조정을 위한 가중치 설정은 수식 (4-5)부터 수식 (4-7), [그림 4-4], 그리고 [그림 4-5]를 통하여 설명할 수 있다. 여기서 U, V, 그리고 W는 각 라이다 평면 패치 좌표계 기준의 지상 기준점 좌표를 의미하며, X, Y, 그리고 Z는 지상 좌표계 기준의 지상 기준점 좌표를 의미한다. 이때 UVW 좌표계의 설정은 [그림 4-4]와 같으며, R은 XYZ 좌표계와 UVW 좌표계 간 회전 행렬이다. σ_U, σ_V,그리고 σ_W는 각각 초기 기준점의 U, V, 그리고 W축 방향 오

차 수준(표준 편차)을 의미하며, P_{UVW}와 P_{XYZ}는 각각 UVW 좌표계와 XYZ 좌표계 기준의 가중치 행렬을 의미한다([그림 4-5]).

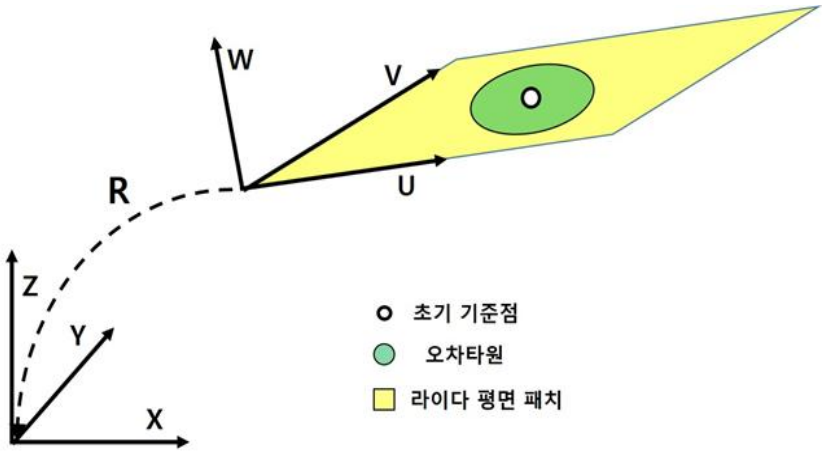


[그림 4-3] 가중치 조정을 통한 점 대 면 등록법의 개념

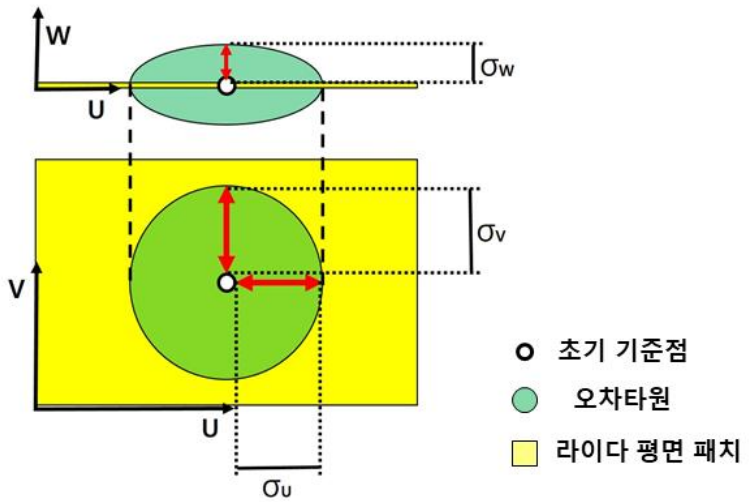
$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{4-5}$$

$$P_{UVW} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_U^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_V^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_W^2} \end{bmatrix} \tag{4-6}$$

$$P_{XYZ} = R^T P_{UVW} R \tag{4-7}$$

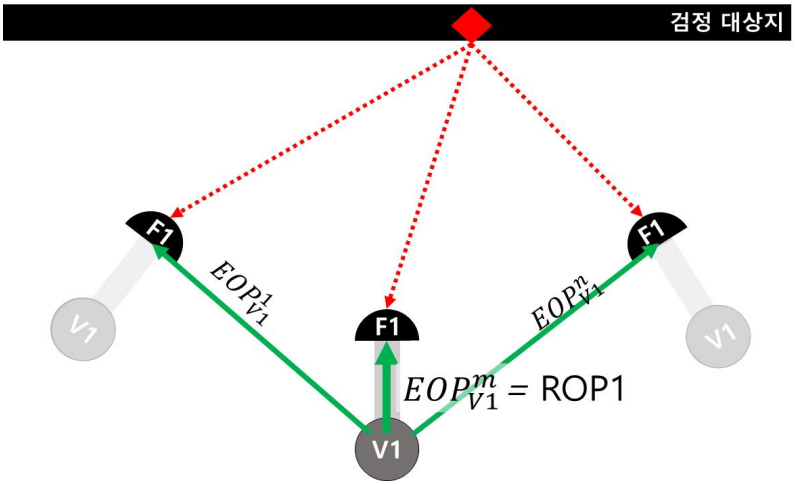


[그림 4-4] 라이다 평면 기준 좌표계(UVW)와
지상 좌표계(XYZ) 간 관계



[그림 4-5] 라이다 평면 위 초기 기준점 좌표의 오차타원

[그림 4-6]은 가중치 조정을 통한 점 대 면 등록법을 하나의 플랫폼에 장착된 광학 카메라-라이다 시스템에 적용할 경우를 보여준다. [그림 4-6]에서 V1은 라이다 센서이며, F1은 광학 카메라이다. 서로 다른 n개의 위치에서 멀티 센서 데이터를 취득할 경우, 광학 카메라는 n개의 영상, 그리고 라이다는 n개의 깊이 데이터를 획득한다. 만약 m번째 촬영에서 사용된 라이다의 데이터를 이용하여 점 대 면 등록법을 수행하면 카메라의 n개의 위치(EOP)는 m번째 라이다 데이터의 좌표계를 기준으로 표현된다. 이때 멀티 센서 시스템의 광학 카메라와 라이다는 플랫폼에 고정되어 있기 때문에, 광학 카메라의 m번째 위치는(EOP_{V1}^{m}) m번째 라이다와의 상대표정요소와 동일하다. 즉 점 대 면 등록법을 이용하여 시스템 캘리브레이션을 수행하고 상대표정요소를 계산할 수 있다.



[그림 4-6] 멀티 센서 시스템에서의 점 대 면 등록법

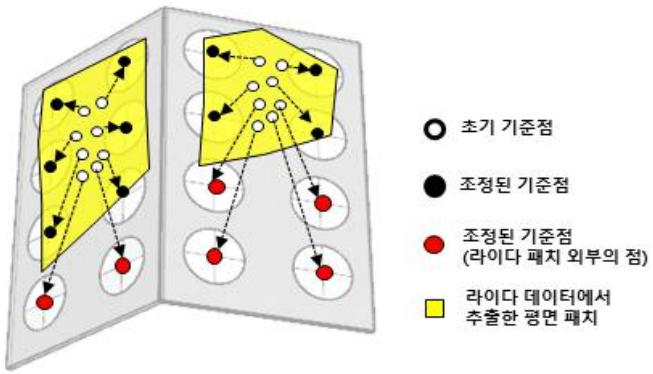
가중치 조정을 통한 점 대 면 시스템 캘리브레이션(이하 점 대 면 방법)은 기존 방법에 비하여 다양한 장점을 지니고 있어, 보다 효율적이고 정확한 시스템 캘리브레이션을 가능하게 한다. 점 대 면 방법의

중요 장점은 크게 4가지로 구분될 수 있으며, 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

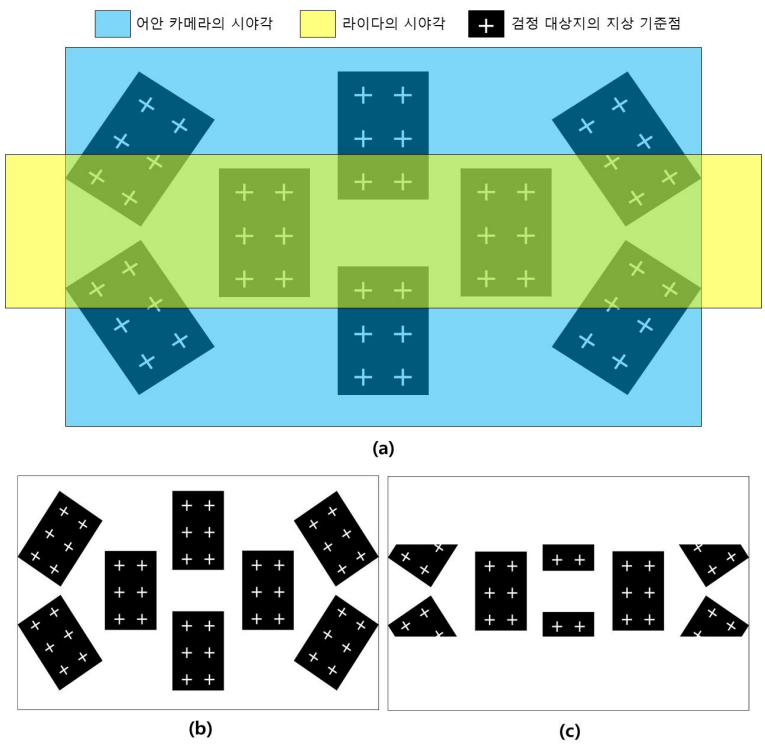
점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법은 지상 기준점의 좌표를 따로 취득할 필요가 없다. 대부분의 시스템 캘리브레이션 방법은 지상 기준점의 좌표를 획득하는 작업이 선행된다. 이는 지상 기준점이 많아질 경우, 시스템 캘리브레이션에 드는 시간을 크게 증가시킨다. 따라서 지상 기준점 좌표 취득 작업의 생략은 시스템 캘리브레이션 효율성을 크게 증가시킨다.

점 대 면 방법은 광학 카메라 간 시스템 캘리브레이션의 가중치 설정만을 조정하여 광학 카메라-라이다 간 시스템 캘리브레이션을 수행한다. 광학 카메라 시스템 캘리브레이션은 많은 연구를 통하여 진행된 바 있기 때문에, 수식, 행렬 구성, 그리고 코드 등에 대한 정보에 쉽게 접근할 수 있다. 따라서 점 대 면 시스템 캘리브레이션은 상대적으로 구현이 용이하다

점 대 면 방법은 라이다 평면 일부만으로, 평면 위 영상 기준점 전체를 이용하여 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있으며, 이는 평면 위 임의의 점으로 설정된 초기 지상 기준점이 캘리브레이션 과정에서 실제 위치로 조정되기 때문이다([그림 4-7]). [그림 4-8]은 영상 기준점 전체를 사용하는 것이 시스템 캘리브레이션 정확도에 미치는 영향을 보여준다. [그림 4-8]의 (a)는 어안 렌즈 카메라와 라이다의 시야각이 중첩되는 구간을 보여주며, 이때 점 대 면 방법을 이용할 경우 사용되는 지상 기준점은 [그림 4-8]의 (b)와 같다. 반면 센서들의 시야각이 겹치는 구간의 지상 기준점만을 사용할 경우, 캘리브레이션에 사용되는 지상 기준점은 [그림 4-8]의 (c)와 같다. 이때 (b)는 (c)보다 영상 전반에 기준점이 고르게 위치하기 때문에, 보다 안정적인 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있게 한다.

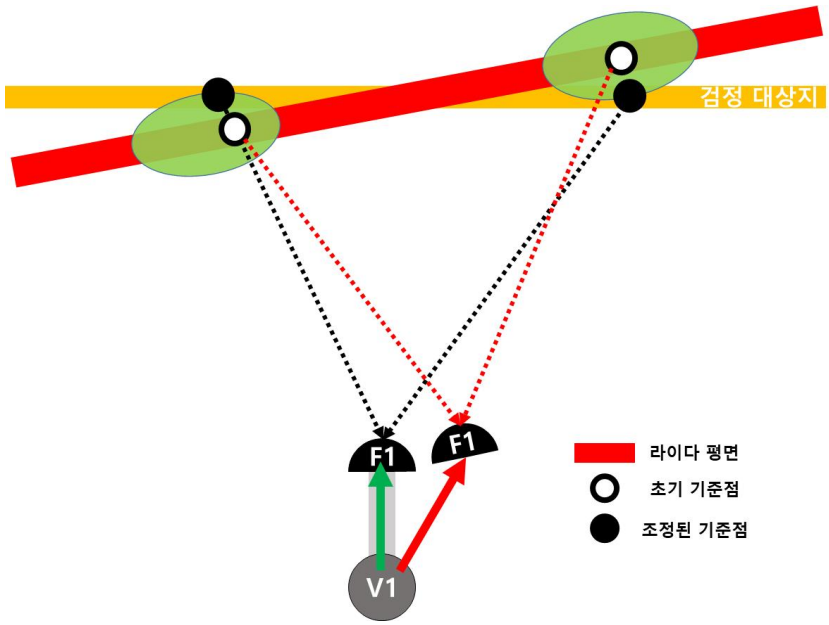


[그림 4-7] 라이다 패치 외부에 위치한 기준점의 조정
(점 대 면 시스템 캘리브레이션)



[그림 4-8] 점 대 면 방법의 장점 (a) 각 센서의 시야각 (b) 점 대 면 방법에서 사용 가능한 기준점 (c) 기존 방법에서 사용 가능한 지상 기준점

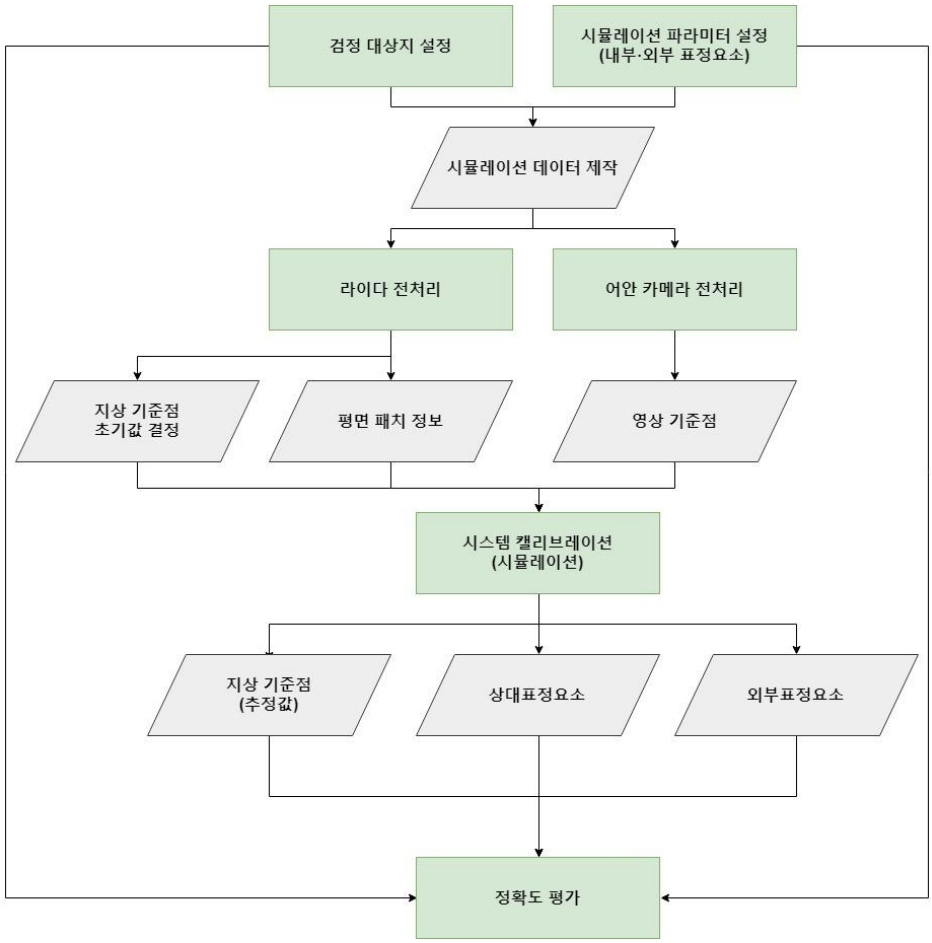
마지막으로 점 대 면 방법은 추출된 라이다 평면의 정확도가 상대표정요소 정확도에 미치는 영향이 상대적으로 적다는 장점이 있다. [그림 4-9]에서 붉은색 선분은 라이다 평면을 나타낸다. 그림과 같이 라이다 평면이 잘못 추출되었을 경우, 라이다 데이터에서 선 또는 평면을 추출하여 사용하는 방법은 오차가 바로 상대표정요소에 반영된다. 반면에 가중치 조정을 통한 점 대 면 등록법은 기준점이 오차타원을 따라 이동하여 실제 위치와 유사하게 조정되며, 이는 라이다 평면의 오차를 상쇄하는 효과를 나타낼 수 있다.



[그림 4-9] 라이다 평면의 정확도가 시스템 캘리브레이션 정확도에 미치는 영향

4.3 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션

본 연구에서는 실제 시스템 캘리브레이션에 앞서 점 대 면 방법의 정확도를 보다 정확히 검증하고자 시뮬레이션을 수행하였다. [그림 4-10]은 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 흐름도이다. 시뮬레이션은 검정 대상지 구성 및 파라미터 설정 그리고 시뮬레이션 데이터 제작 단계로 시작된다. 제작된 각 센서 데이터는 전처리 과정을 거치게 된다. 라이다 센서의 경우 데이터에서 평면 패치가 추출되고 평면 방정식이 유도되었다. 또한 해당 평면의 무게중심점은 각 평면에 매칭되는 어안 렌즈 카메라 영상의 초기 지상 기준점의 좌표로 설정되었다. 어안 렌즈 카메라 영상은 영상 기준점을 획득하는 전처리 수행하였다. 마지막으로 시스템 캘리브레이션을 통하여 도출된 각 추정치는 각 파라미터 설정값과 비교를 통하여 정확도가 평가되었다.



[그림 4-10] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 흐름도

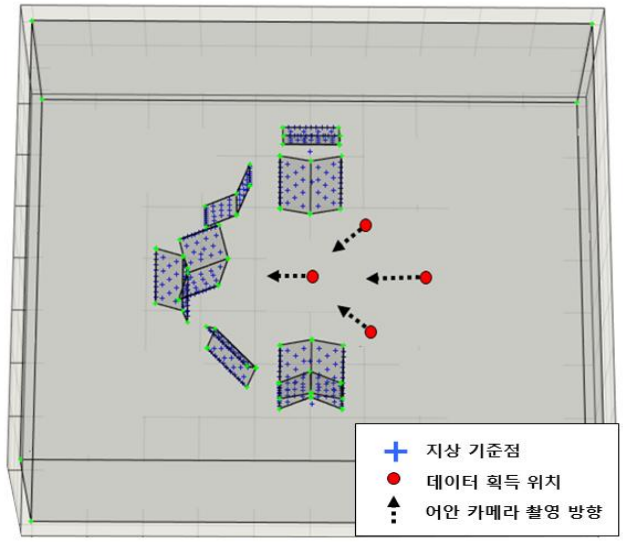
4.3.1 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 설계

내부표정요소는 [표 4-1]과 같이 결정되었다. 사전에 셀프 캘리브레이션이 수행되어 해석 가능한 디스토션은 모두 제거 되었다는 가정하에 디스토션 파라미터는 모두 0으로 설정되었다. 랜덤 오차는 어안 렌즈 카메라의 경우 ±0.5 픽셀 수준, 라이다 데이터의 경우 ±15mm 수준으로 설정되었다.

[표 4-1] 각 센서 내부표정요소 및 특성 설정치
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

어안 렌즈 카메라		라이다	
주점 좌표 xp (pixel)	0	수직 시야각	30°
주점 좌표 yp (pixel)	0	수직 해상도	2°
초점 거리 (mm)	2.67	수평 시야각	360°
화소 크기	0.00345mm	수평 해상도	0.5°
랜덤 오차	±0.5 pixel	랜덤 오차	±15mm

검정 대상지는 [그림 4-11]과 같이 설정 되었다. 타겟들의 배치는 검정 대상지가 반원 형태를 나타내도록 구성하여, 검정 대상지 중앙에서 촬영한 라이다 데이터가 각 타겟에 해당되는 데이터를 고르게 포함할 수 있도록 하였다. 각 타겟은 다양한 각도로 배치되었으며, 이를 통하여 지상 기준점의 위치를 제한할 기하 조건을 강화하였다.



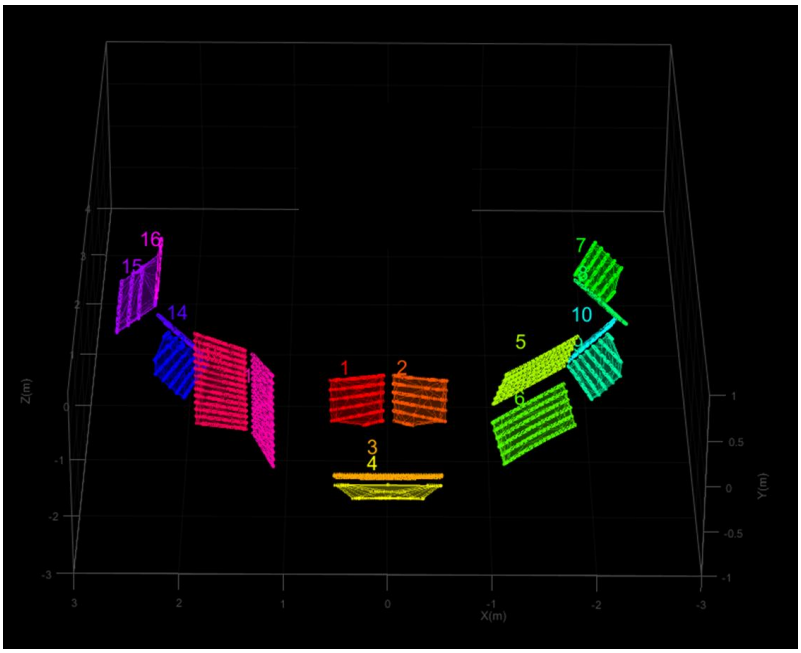
[그림 4-11] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션
검정 대상지와 어안 렌즈 카메라 촬영 위치

외부표정요소는 [그림 4-11] 및 [표 4-2]와 같이 설정되었다. [그림 4-11]의 빨간색 원은 데이터 촬영 위치를 의미하며, 화살표는 어안 렌즈 카메라의 촬영 방향을 의미한다. [표 4-2]는 촬영위치와 방향의 구체적인 수치를 보여준다. 외부표정요소는 어안 렌즈 카메라 영상 간에 중첩도가 높게 나타날 수 있도록 설정되었다.

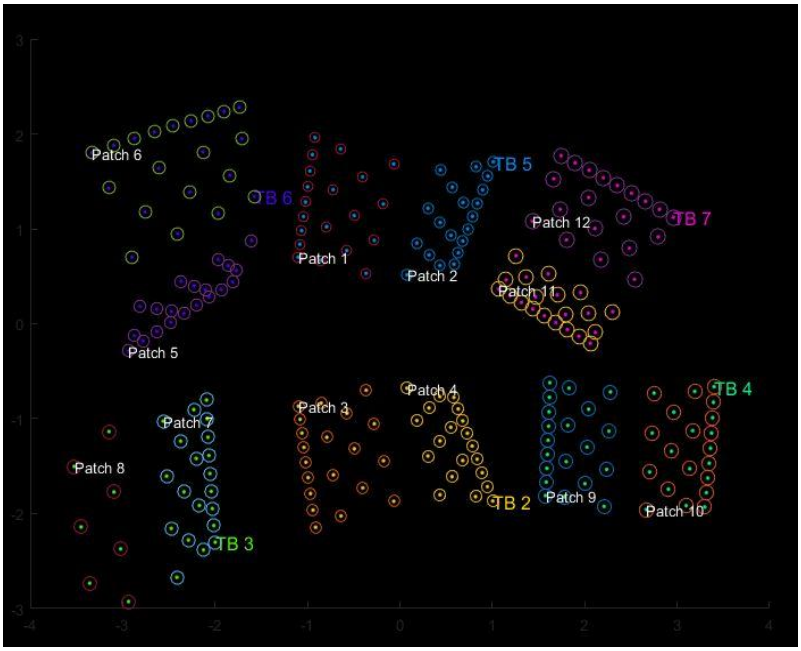
[표 4-2] 어안 렌즈 카메라의 외부표정요소
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

X0 (m)	Y0 (m)	Z0 (m)	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
-0.2000	-0.1000	0.0000	0	0	0
-0.8586	-0.2000	0.8586	0	-45	0
0.8586	-0.2000	0.8586	0	45	0
0.0000	-0.2000	1.8000	0	0	0
-0.7879	-0.1000	0.9293	0	-45	90
0.9293	-0.1000	0.7879	0	45	90
0.1000	-0.1000	1.8000	0	0	90

결정된 각 표정요소를 이용하여 제작된 시뮬레이션 데이터는 [그림 4-12] 및 [그림 4-13]과 같다. [그림 4-12]는 시뮬레이션 라이다 데이터이며, 어안 렌즈 카메라의 평면과 매칭되는 라이다의 각 평면에는 어안 렌즈 카메라 평면과 동일한 ID가 부여되었다. 라이다 데이터 전처리 과정에서는 각 평면 패치에 해당되는 3차원 평면 방정식이 유도되었으며, 이는 시스템 캘리브레이션 가중치 행렬 구성에 사용되었다. [그림 4-13]은 시뮬레이션 어안 렌즈 카메라 영상이며, 그림을 통하여 어안 렌즈 카메라의 영상 기준점에 평면 ID가 부여된 것을 확인할 수 있다.

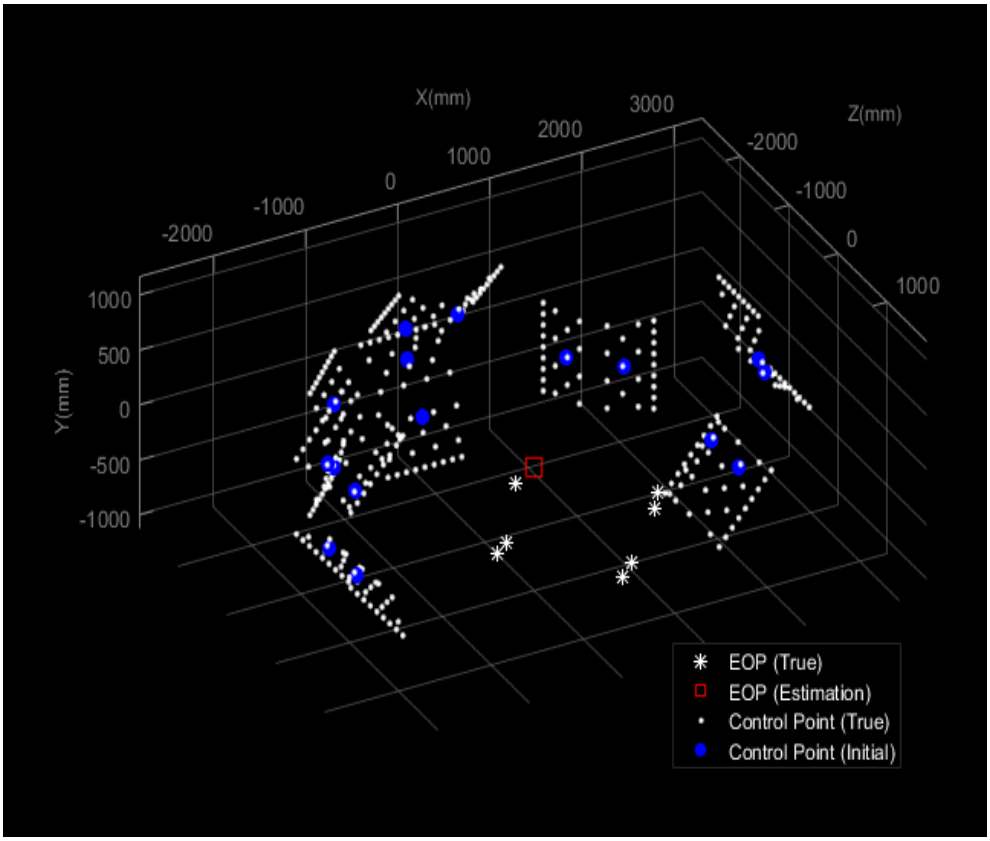


[그림 4-12] 시뮬레이션 라이다 데이터



[그림 4-13] 시뮬레이션 어안 렌즈 카메라 영상

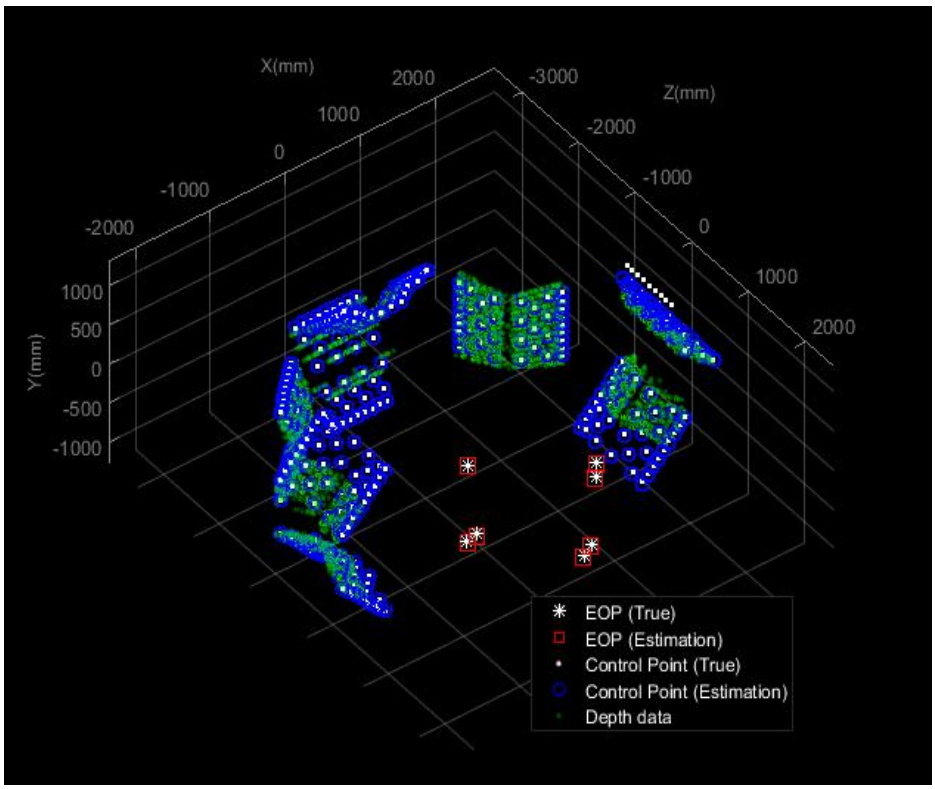
[그림 4-14]는 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 초기 지상 기준점 및 초기 외부표정요소 설정을 보여준다. 초기 지상 기준점의 좌표는([그림 4-14]의 파란색 점) 각 라이다 평면의 무게 중심점으로 설정되었으며, 빨간색 네모로 표시된 초기 외부표정요소는 모두 0으로 설정되었다. 한편 흰색 점과 별표는 각각 지상 기준점과 외부표정요소 참값의 위치이다.



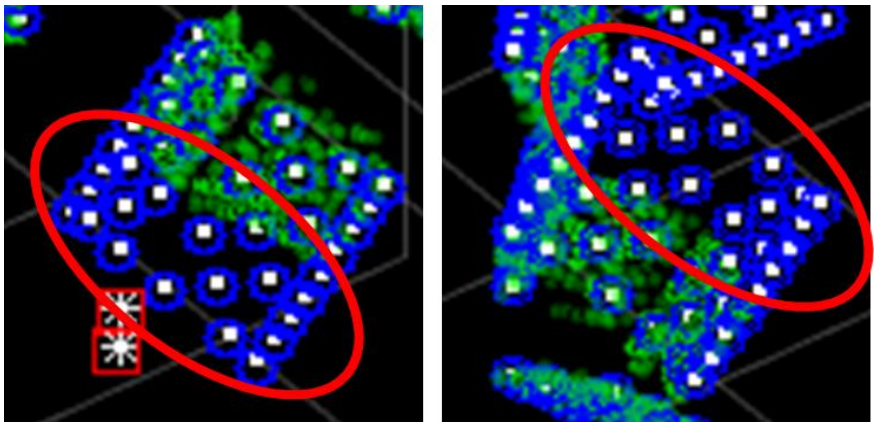
[그림 4-14] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의
지상 기준점 및 외부표정요소의 초기 위치

4.3.2 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 결과 분석

[그림 4-15]는 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의 결과를 보여주며, 흰색 별표와 빨간색 네모는 각각 외부표정요소의 참값과 계산된 외부표정요소이다. 그림을 통하여 모든 외부표정요소가 실제와 거의 유사하게 추정이 되었음을 확인할 수 있다. 녹색 점은 시뮬레이션 라이다 데이터로, [그림 4-16]을 통하여 라이다 포인트가 존재하지 않는 위치에 있던 지상 기준점도 모두 실제 위치와 가깝게 조정되었음을 확인할 수 있다.

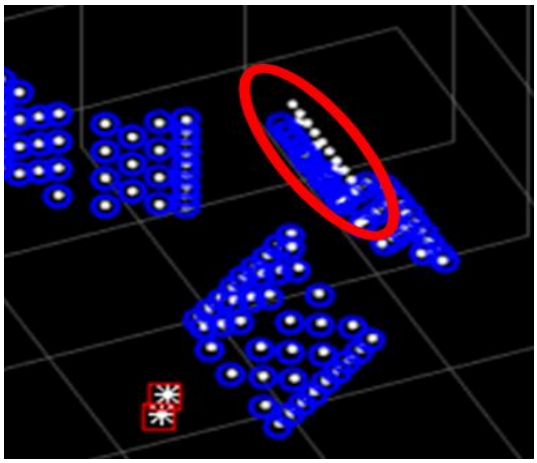


[그림 4-15] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션 결과



[그림 4-16] 시스템 캘리브레이션을 통하여 조정된 지상 기준점

[그림 4-17]은 일부 위치에서 나타난 오차를 보여주며, 빨간색 원 부분에서는 지상 기준점이 정확한 값으로 조정되지 못한 것을 확인할 수 있다. 해당 위치의 기준점은 두 장의 영상에서만 촬영되어 기준점의 위치와 관련된 관측 방정식이 상대적으로 부족했기 때문에 상대적으로 큰 오차가 나타난 것으로 판단된다.



[그림 4-17] 시스템 캘리브레이션을 통하여 조정된 지상 기준점 (오차 발생 구간)

계산된 표정요소의 오차는 [표 4-3]을 통하여 확인할 수 있다. 표정요소의 오차는 변위 성분의 경우 최대 2.23mm 그리고 회전 성분의 경우 최대 30초 수준으로 나타났다. 상대표정요소의 오차는 최대 1.69mm(변위) 및 -21초(회전) 수준으로 나타났으며, 이는 각 축 방향으로 10m 거리에서 -0.9mm(X축), 0.69mm(Y축), 그리고 1.15mm(Z축) 수준의 오차가 나는 것으로 해석된다.

[표 4-3] 시스템 캘리브레이션 시뮬레이션의
상대표정요소(ROP) 및 외부표정요소(EOP)의 오차

	X0 (mm)	Y0 (mm)	Z0 (mm)	ω (second)	ϕ (second)	κ (second)
ROP (EOP1)	-1.00	1.69	1.01	2″	-21″	3″
EOP2	0.94	-2.19	0.10	32″	4″	4″
EOP3	-1.88	-0.98	1.44	18″	-22″	-7″
EOP4	-2.23	-1.36	0.97	15″	-17″	-6″
EOP5	1.08	-2.07	1.49	29″	4″	1″
EOP6	-0.02	-0.01	0.01	16″	-20″	-5″
EOP7	-1.44	0.23	1.55	15″	-21″	-5″

지상 기준점과 영상 기준점의 잔차는 [표 4-4] 및 [표 4-5]와 같다. 지상 기준점 오차는 RMSE 기준 최대 13mm로 나타났다. 라이다 데이터의 랜덤 오차가 ±15mm 수준으로 설정되었다는 것을 기준으로 판단하면, 지상 기준점의 위치 조정이 정확히 이루어졌다고 판단할 수 있다. 영상 기준점의 정확도는 [표 4-5]를 통하여 확인할 수 있으며, 평균(MBE) -7×10^{-4} 그리고 RMSE 기준 0.53 픽셀 수준의 잔차를 보였다. 영상 기준점 랜덤 오차가 ±0.5 픽셀로 설정되었다는 것을 기준으로 판단할 때, 시스템 캘리브레이션이 높은 정확도로 수행되었다고 판단할 수 있다.

[표 4-4] 지상 기준점의 잔차
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
MBE (Mean Bias Error)	-6.34	-3.62	5.36
MAE (Mean Absolute Error)	8.27	6.94	6.96
RMSE	13.03	7.64	8.80

[표 4-5] 영상 기준점의 잔차
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

	MBE	MAE	RMSE
영상 기준점의 잔차 (pixel)	-7×10^{-4}	0.30	0.53

각 표정요소 간의 상관관계는 [표 4-6] 및 [표 4-7]과 같다. 상관관계 최대치는 0.93으로 외부표정요소 X0와 ϕ 간에 나타났으며, 이외 표정요소 간의 상관관계는 전반적으로 0.9이하의 낮은 수치를 나타냈다.

[표 4-6] 상대표정요소(ROP) 간 상관관계
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

	X0	Y0	Z0	ω	ϕ	κ
X0		-0.04	0.61	-0.01	0.91	-0.12
Y0	-0.04		-0.05	-0.88	-0.04	-0.53
Z0	0.61	-0.05		0.02	0.75	0.06
ω	-0.01	-0.88	0.02		-0.07	0.74
ϕ	0.91	-0.04	0.75	-0.07		-0.13
κ	-0.12	-0.53	0.06	0.74	-0.13	

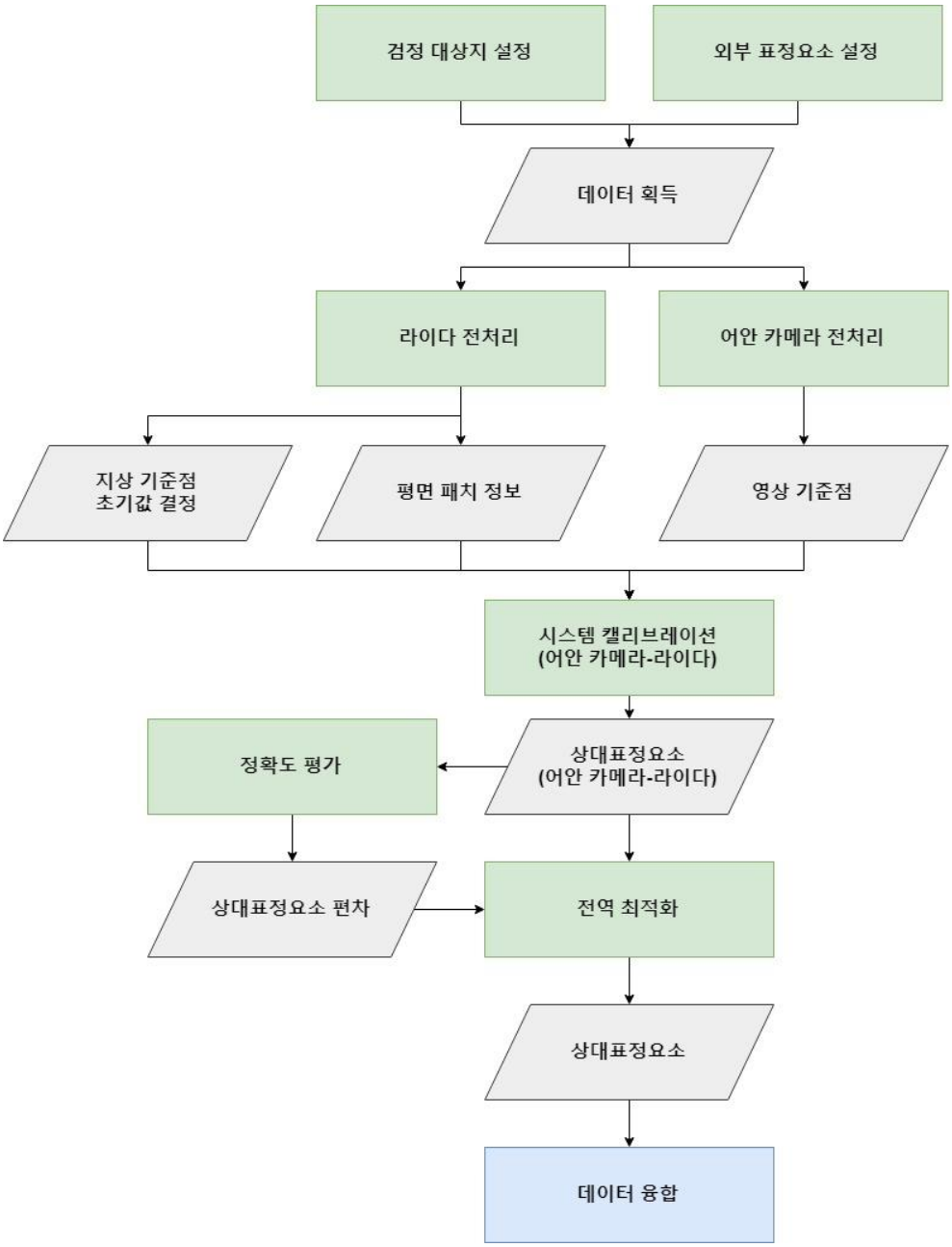
[표 4-7] 외부표정요소(EOP) 간 상관관계
(시스템 캘리브레이션 시뮬레이션)

	X0	Y0	Z0	ω	ϕ	κ
X0		0.27	-0.79	-0.28	0.93	0.37
Y0	0.27		-0.13	-0.92	0.20	0.70
Z0	-0.79	-0.13		0.13	-0.91	-0.09
ω	-0.28	-0.92	0.13		-0.21	-0.77
ϕ	0.93	0.20	-0.91	-0.21		0.21
κ	0.37	0.70	-0.09	-0.77	0.21	

상대표정요소, 외부표정요소, 영상 기준점의 잔차 그리고 표정요소 간 상관관계의 다양한 지표를 분석한 결과, 점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법은 모든 측면에서 높은 정확도와 정밀도를 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법을 통하여 높은 정확도의 상대표정요소를 도출할 수 있다고 판단하였다.

4.4 멀티 센서 시스템 캘리브레이션

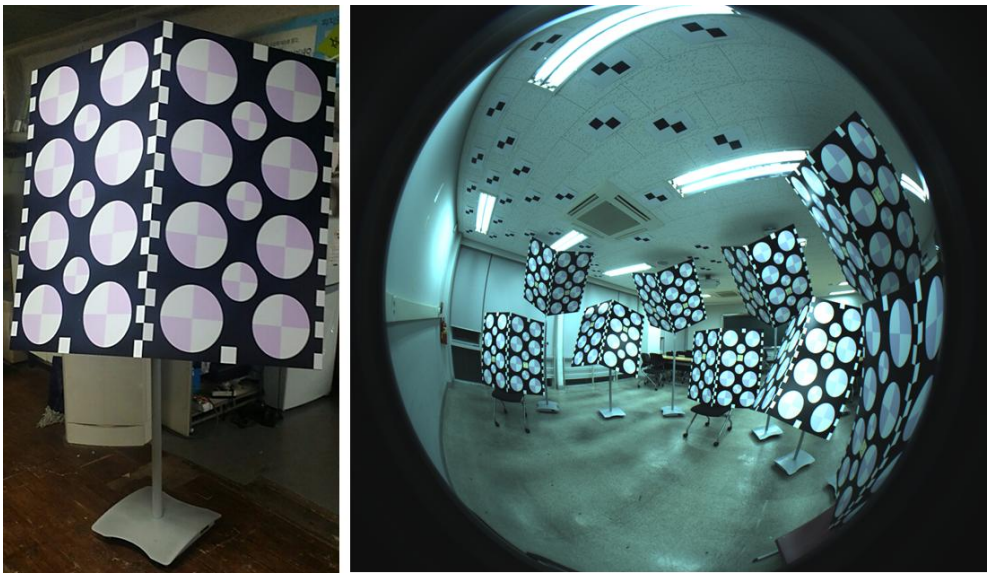
멀티 센서 시스템 캘리브레이션은 다음과 같은 순서로 실행되었다([그림 4-18]). 먼저 시스템 캘리브레이션에 사용될 타겟을 제작하고 이를 이용하여 검정 대상지를 구성하였으며, 어안 렌즈 카메라와 라이다 간의 시스템 캘리브레이션을 위한 총 4세트의 데이터를 획득하였다. 획득된 각 데이터에서는 영상 기준점(어안 렌즈 카메라 영상)과 영상 기준점에 매칭되는 평면 패치(라이다 데이터)가 추출되었으며, 각 평면 패치의 무게 중심점은 지상 기준점의 초기 좌표로 설정되었다. 시스템 캘리브레이션은 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션 및 전역 최적화 순서로 진행되었으며, 가중치 조절을 이용한 점 대 면 방법이 사용되었다. 전역 최적화 과정에는 시스템 캘리브레이션을 통하여 계산된 각 상대표정요소들과 정확도 평가 과정에서 계산된 각 상대표정요소의 편차가 사용되었다.



[그림 4-18] 시스템 캘리브레이션의 흐름도

4.4.1 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 설계

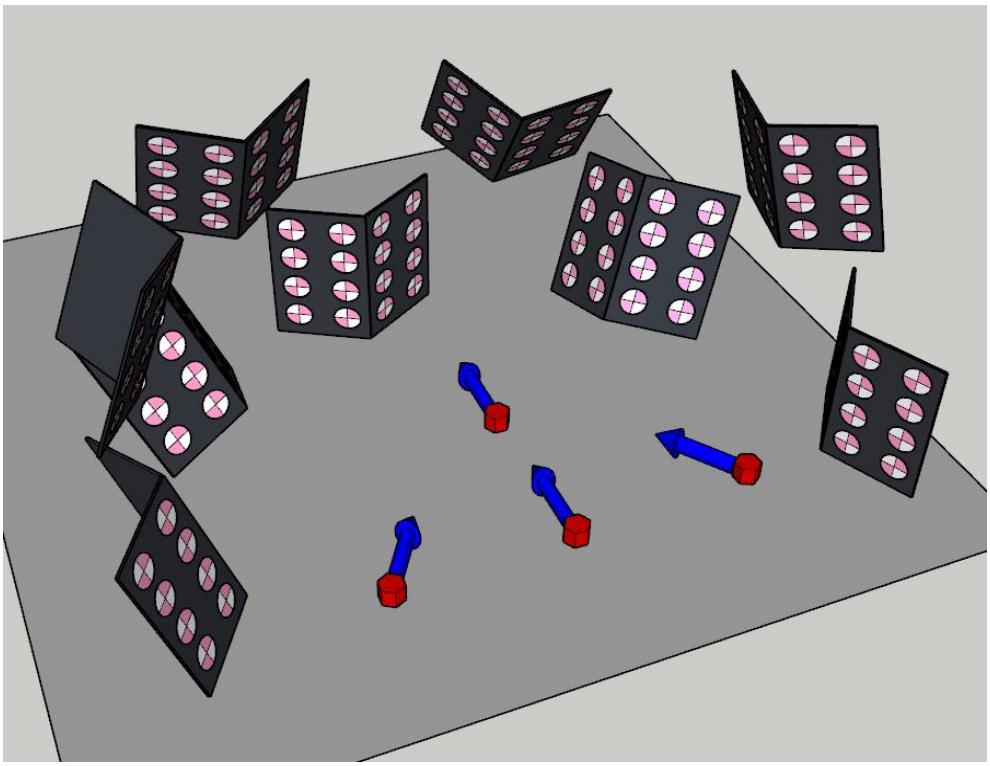
검정 대상지 구성 및 이에 사용된 타겟은 [그림 4-19]와 같다. 타겟은 두 평면으로 이루어져 있으며, 평면 사이의 각도는 약 135도로 설정되었다. 각 평면은 1m(높이)×0.6m(폭)의 크기로 설계되었으며, 기준점으로 사용될 11개의 분홍색-흰색의 패턴을 포함하고 있다. 각 타겟은 높이 조절과 회전이 가능하도록 하여, 검정 대상지를 다양한 형태로 구성할 수 있도록 하였다.



[그림 4-19] 캘리브레이션 타겟(좌) 및 검정 대상지 구성(우)

데이터 획득은 각 어안 렌즈 카메라-라이다 조합(어안 렌즈 카메라1-라이다1, 어안 렌즈 카메라2-라이다1, 어안 렌즈 카메라1-라이다2, 그리고 어안카메라2-라이다2)마다 네 곳의 위치에서 촬영되었으며, 최종적으로 시스템 캘리브레이션 데이터 획득은 16번(센서 조합 4가지 × 데이터 획득 4회) 이루어졌다. [그림 4-20]은 데이터 획득 위치

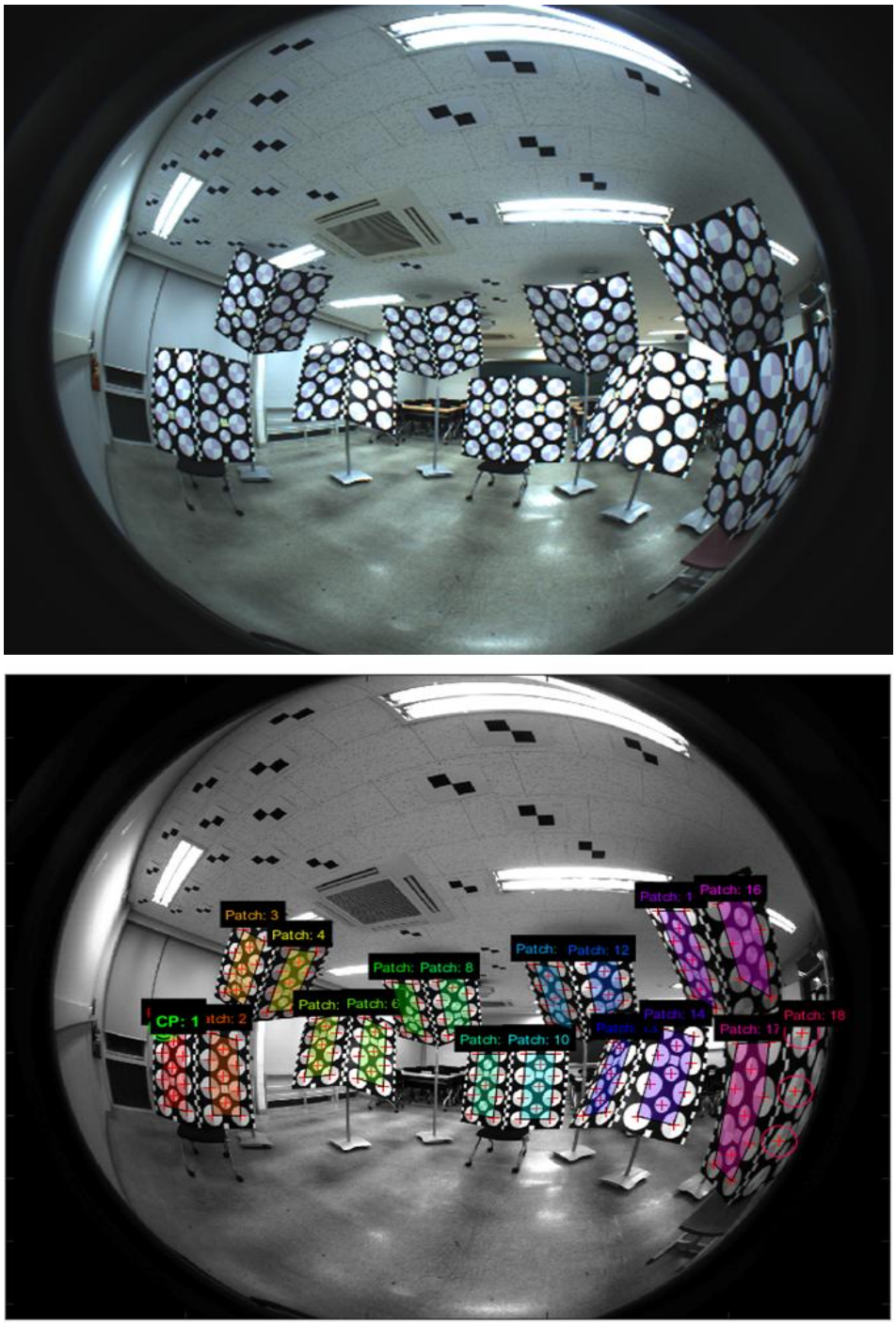
와 방향을 보여준다. 그림의 빨간색 점은 센서 시스템의 위치이며, 파란색 화살표는 어안 렌즈 카메라의 촬영 방향이다. 촬영 위치는 i) 어안 렌즈 카메라 영상 간에 중첩도가 높게 나타나고, ii) 라이다가 전체 타겟 평면을 고르게 획득할 수 있는 곳으로 선정하였다. 한편 [그림 4-21]은 실제 데이터를 획득하는 모습이다.



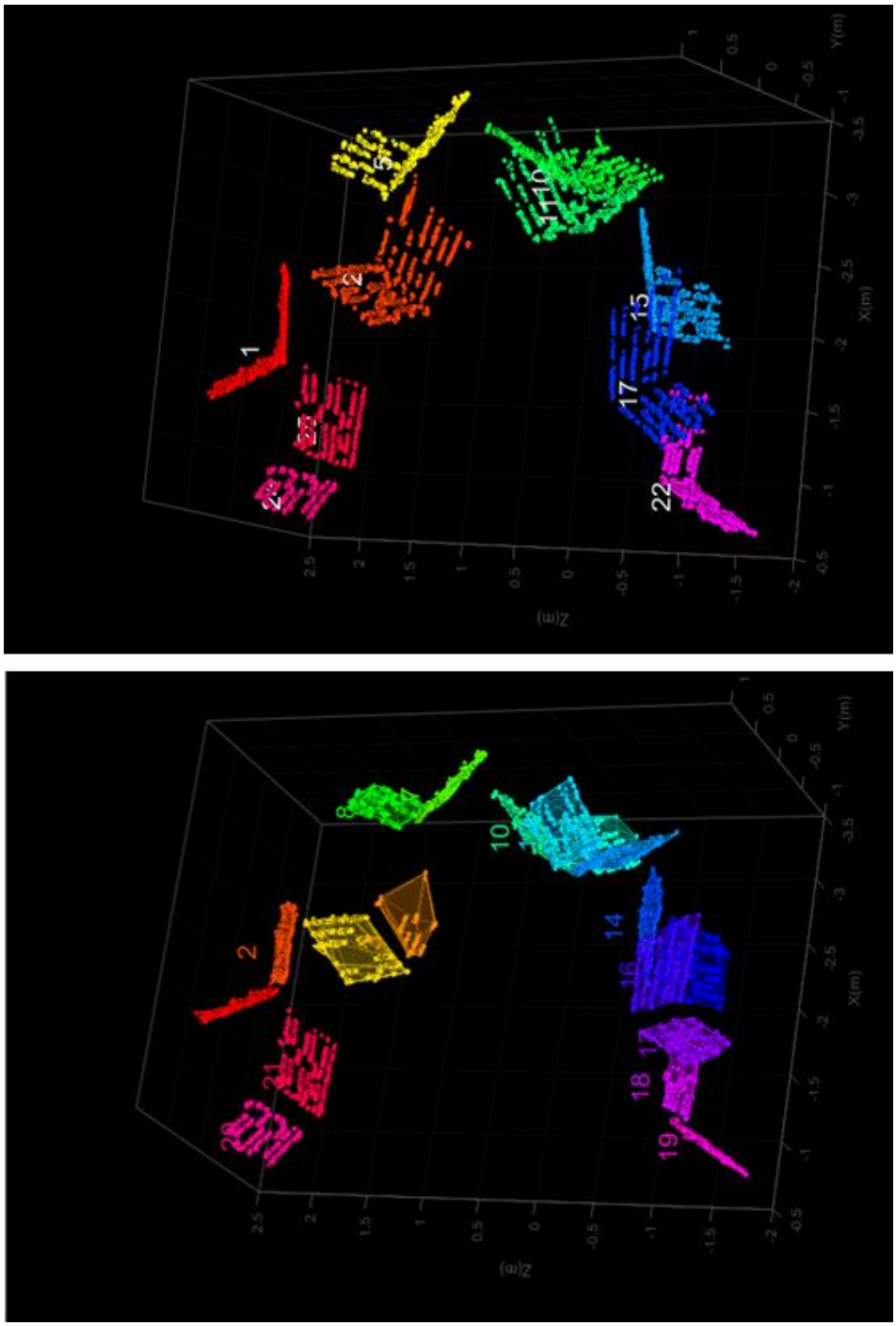
[그림 4-20] 시스템 캘리브레이션 데이터가 획득된 위치와 방향

[그림 4-21] 시스템 캘리브레이션용 데이터 획득

획득된 어안 렌즈 카메라 및 라이다 데이터는 각각 영상 기준점 획득, 평면 추출 등의 전처리 과정을 거치게 된다. 먼저 [그림 4-22]는 어안 렌즈 카메라 영상 및 영상 기준점을 보여준다. 각 영상 기준점은 매칭되는 라이다 평면과 동일한 ID가 부여되었다. [그림 4-23]은 라이다 데이터와 데이터에서 추출된 평면 정보를 보여준다. 추출된 각 평면에서는 지상 기준점의 초기값과 평면의 방정식이 계산되었다.



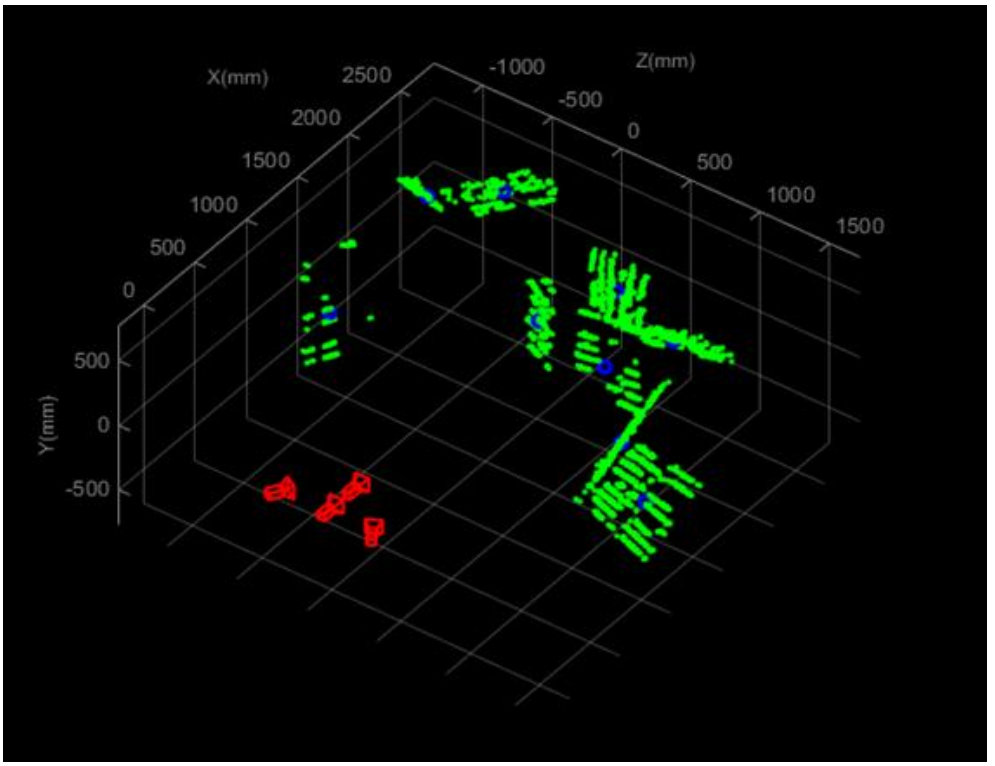
[그림 4-22] 어안 렌즈 카메라 영상(위) 및 영상 기준점(아래)



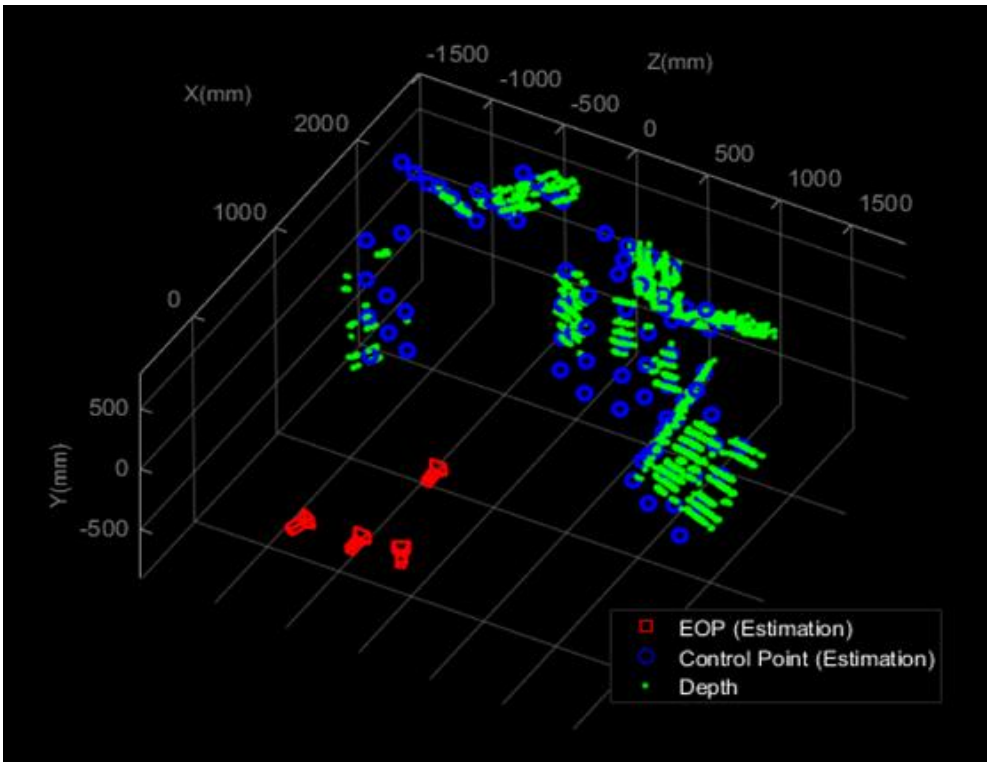
[그림 4-23] 라이다 데이터(위)와 데이터에서 추출된 평면(아래)

4.4.2 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 결과 분석

[그림 4-24]는 시스템 캘리브레이션(어안 렌즈 카메라1-라이다1) 초기값 설정을 보여주며, [그림 4-25]는 캘리브레이션 완료 후의 각 어안 렌즈 카메라의 위치(빨간색 점), 지상 기준점의 위치(파란색 원), 그리고 라이다 점군 데이터(녹색 점)의 위치를 보여준다. 그림을 통하여 각 지상 기준점이 초기 위치에서 조정되어 실제 위치로 이동된 것을 확인할 수 있다. 어안 렌즈 카메라1과 라이다1 이외의 다른 조합의 경우에도 지상 기준점의 위치가 정상적으로 조정되었으며, 이는 부록 A.3에서 확인할 수 있다.



[그림 4-24] 시스템 캘리브레이션 전
외부표정요소와 지상 기준점의 초기 위치



[그림 4-25] 시스템 캘리브레이션 후
조정된 외부표정요소 및 지상 기준점의 위치

계산된 각 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소는 [표 4-8]과 같으며 그 정확도는 [표 4-9]부터 [4-11]을 통하여 확인할 수 있다. [표 4-9]는 각 경우에 해당되는 상대표정요소의 편차를 보여준다. 변위(X0, Y0, Z0)의 경우 5mm 미만의 편차를 나타내었으며, 회전 성분(ω, ϕ, κ)은 최대 42초(약 0.01도)의 편차를 나타내었다. [표 4-10]은 영상 기준점의 잔차를 보여준다. 시스템 캘리브레이션의 영상 기준점 잔차는 RMSE 기준 1픽셀 이내의 값인 0.68에서 0.79 픽셀로 나타났으며, 이는 시스템 캘리브레이션이 높은 정확도로 도출되었다는 것을 의미한다. 표정요소 간의 상관관계는 전반적으로 낮은 수치로 나타났다([표 4-11]). 가장 높은 상관관계는 ROP1 Y0와 ω간에 나타

났으나(0.95), 시스템 캘리브레이션의 정확도에 큰 영향을 주는 수준은 아니였다.

[표 4-8] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소

	X0 (mm)	Y0 (mm)	Z0 (mm)	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
ROP1	-232.89	-121.40	-16.28	89.28	79.66	-87.85
ROP2	-226.61	-281.42	-406.70	-157.07	100.42	97.56
ROP3	210.83	-122.16	-18.32	273.90	-100.73	274.78
ROP4	214.32	-281.23	-404.43	36.17	-80.89	98.75

[표 4-9] 상대표정요소(ROP) 편차

	X0 (mm)	Y0 (mm)	Z0 (mm)	ω (second)	ϕ (second)	κ (second)
ROP1	2.25	3.67	2.57	12''	4''	12''
ROP2	0.77	1.50	2.28	21''	3''	21''
ROP3	2.78	4.55	4.11	32''	7''	29''
ROP4	4.95	4.86	4.89	42''	3''	43''

[표 4-10] 영상 기준점의 잔차
(시스템 캘리브레이션)

	RMSE (pixel)
ROP1	0.76
ROP2	0.68
ROP3	0.79
ROP4	0.75

[표 4-11] 상대표정요소(ROP) 간 상관관계

		X0	Y0	Z0	ω	ϕ	κ
ROP1	X0		-0.27	0.08	-0.28	0.79	0.21
	Y0	-0.27		-0.15	0.95	0.10	-0.84
	Z0	0.08	-0.15		-0.20	0.36	-0.02
	ω	-0.28	0.95	-0.20		0.06	-0.79
	ϕ	0.79	0.10	0.36	0.06		-0.20
	κ	0.21	-0.84	-0.02	-0.79	-0.20	
ROP2	X0		0.19	0.17	-0.26	0.02	0.28
	Y0	0.19		-0.08	-0.86	-0.42	0.87
	Z0	0.17	-0.08		-0.37	0.92	0.37
	ω	-0.26	-0.86	-0.37		-0.02	-0.79
	ϕ	0.02	-0.42	0.92	-0.02		0.01
	κ	0.28	0.87	0.37	-0.79	0.01	
ROP3	X0		0.03	-0.05	0.23	-0.01	0.23
	Y0	0.03		0.21	0.01	0.90	-0.08
	Z0	-0.05	0.21		-0.89	0.21	-0.91
	ω	0.23	0.01	-0.89		-0.01	0.78
	ϕ	-0.01	0.90	0.21	-0.01		-0.07
	κ	0.23	-0.08	-0.91	0.78	-0.07	
ROP4	X0		-0.01	0.02	0.02	0.08	0.02
	Y0	-0.01		0.00	-0.55	-0.10	-0.54
	Z0	0.02	0.00		-0.08	0.51	-0.07
	ω	0.02	-0.55	-0.08		-0.05	0.78
	ϕ	0.08	-0.10	0.51	-0.05		-0.05
	κ	0.02	-0.54	-0.07	0.78	-0.05	

본 연구에서는 영상 기준점 잔차, 상대표정요소의 편차, 그리고 상관관계 분석을 통하여 점 대 면 시스템 캘리브레이션이 높은 정확도로 수행되었다고 판단하였다. 따라서 계산된 상대표정요소와 상대표정요소의 편차를 이용하여 전역 최적화를 수행하고, 라이다 간의 상대표정요소를 계산하였다.

[표 4-12]는 전역 최적화를 통하여 계산된 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소 보정값이다. 변위 성분의 경우 최대 -4mm 수준의 보정이 이루어졌으며, 회전성분은 최대 -6.25초의 보정이 나타났다. 최종적으로 라이다 간 상대표정요소(ROP5) 및 조정된 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소는 [표 4-13]과 같이 계산되었다.

[표 4-12] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 상대표정요소 보정값

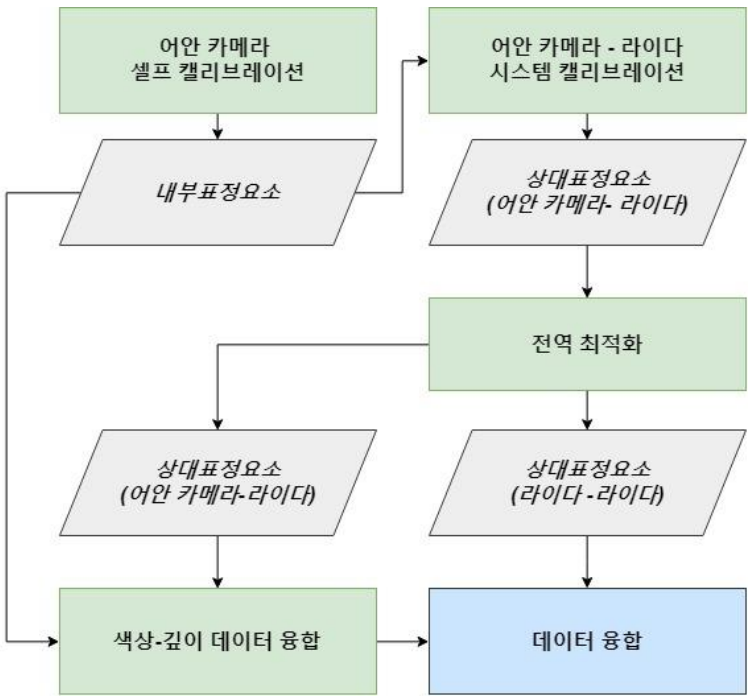
	X0 (mm)	Y0 (mm)	Z0 (mm)	ω (second)	ϕ (second)	κ (second)
ROP1	-0.08	0.48	-0.16	1.60''	-0.29''	1.86''
ROP2	0.02	-0.01	0.13	-0.69''	-0.06''	0.77''
ROP3	0.32	-1.07	0.34	2.05''	-0.60''	-1.43''
ROP4	-2.34	0.66	-4.08	-6.25''	-0.07''	5.89''

[표 4-13] 멀티 센서 시스템의 상대표정요소

	X0 (mm)	Y0 (mm)	Z0 (mm)	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
ROP1	-232.81	-121.88	-16.13	89.28	79.66	-87.85
ROP2	-226.62	-281.41	-406.83	-157.07	100.42	97.56
ROP3	210.51	-121.09	-18.66	273.90	-100.73	274.78
ROP4	216.66	-281.89	-400.36	36.18	-80.89	98.75
ROP5	2.49	-340.55	422.79	61.28	1.05	-0.26

5. 멀티 센서 데이터 융합

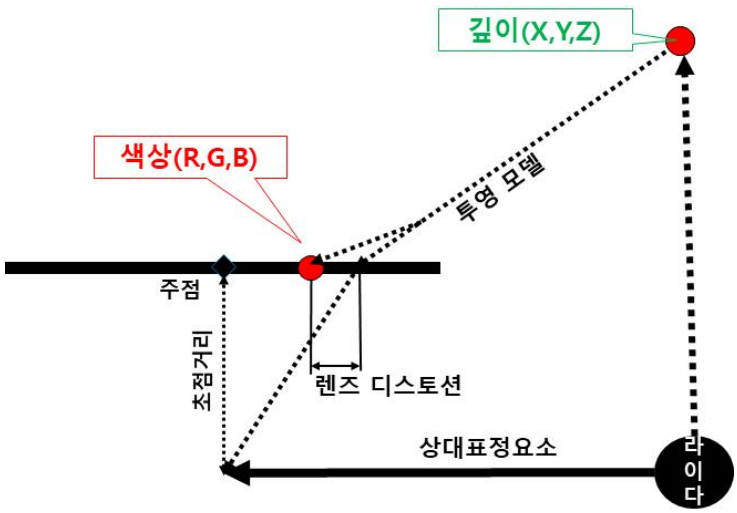
색상 및 깊이 데이터 간 융합은 셀프 캘리브레이션과 시스템 캘리브레이션의 과정을 통하여 얻어진 각 센서의 내부표정요소와 상대표정요소를 사용하여 이루어진다. [그림 5-1]은 3장과 4장에서 설명했던 셀프·시스템 캘리브레이션을 포함한 본 연구의 데이터 융합 과정 전체를 보여준다.



[그림 5-1] 멀티 센서 시스템 데이터 융합의 흐름도

5.1 데이터 융합의 수학적 모델

[그림 5-2]는 어안 렌즈 카메라의 색상 정보와 라이다 데이터의 깊이 정보 간 융합의 개념을 보여준다. 이를 통하여 어안 렌즈 카메라의 내부표정요소와 센서 간 상대표정요소를 이용하여 깊이 정보에 대응되는 색상 정보를 정확히 찾아낼 수 있음을 알 수 있다.



[그림 5-2] 어안 렌즈 카메라와 라이다 데이터 융합의 개념도

데이터 융합의 수학적 모델은 수식 (5-1)부터 (5-3)과 같다. 이때 X_f, Y_f, 그리고 Z_f는 어안 렌즈 카메라 좌표계로 표현된 대상물의 좌표이며, X, Y, Z는 라이다 좌표계로 표시된 대상물의 좌표, 즉 깊이 정보이다. 한편 T_{rop}는 상대표정요소의 변위 성분, R_{rop}는 상대표정요소로 결정된 좌표계 간 회전행렬이다. 수식 (5-2)와 (5-3)의 r은 수식 (3-8)부터 (3-12)를 통하여 확인할 수 있듯, 초점 거리(f)의 함수이며, Δx와 Δy는 셀프 캘리브레이션에서 계산된 디스토션 파라미터로 결정된다. 그러므로 수식 (5-1)부터 (5-3)으로 깊이 정보(X, Y, 그리고 Z)

에 매칭되는 영상좌표 x, y를 계산할 수 있으며 각 영상좌표는 색상 정보를 포함한다.

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{bmatrix} = T_{rop} + R_{rop}^{T} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{5-1}$$

$$x = x_p - \frac{r}{\sqrt{X_f^2 + Y_f^2}} X_f + \triangle x \tag{5-2}$$

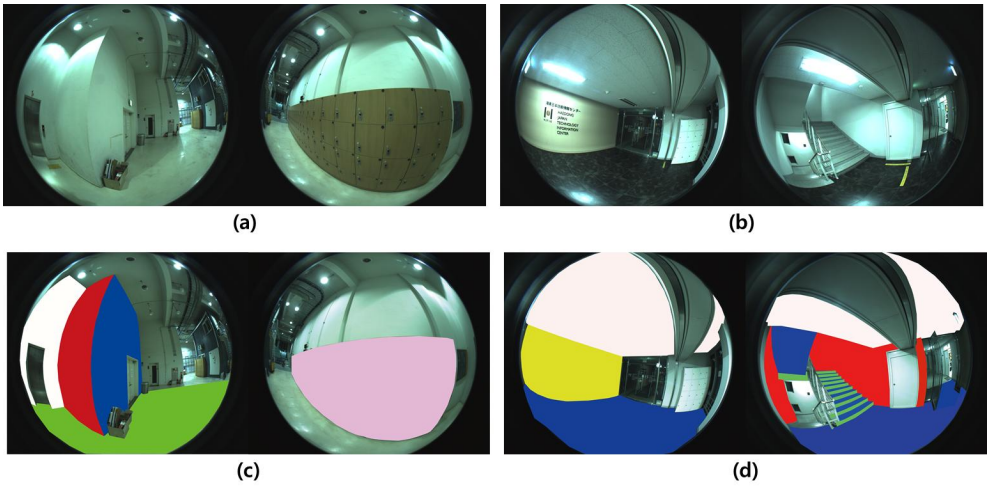
$$y = y_p - \frac{r}{\sqrt{X_f^2 + Y_f^2}} Y_f + \triangle y \tag{5-3}$$

5.2 데이터 융합 정확도 평가

본 연구에서는 데이터 융합의 수학 모델식을 이용하여 어안 카메라 1과 2 그리고 라이다 1과 2 데이터를 융합하고, 이에 대한 정확도를 분석하였다. 정확도 평가는 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합의 정확도와 라이다 데이터 간 융합의 정확도 2가지 측면에서 평가되었다. 어안 렌즈 카메라와 라이다 데이터 간 융합 정확도는 깊이 데이터에 정확한 색상 정보가 부여되었는지를 기준으로 판단하였다. 다음으로 라이다 데이터 간 융합 정확도는 서로 다른 라이다가 촬영한 동일한 평면이 융합 데이터에서 하나의 평면을 구성하는 지를 기준으로 판단하였다.

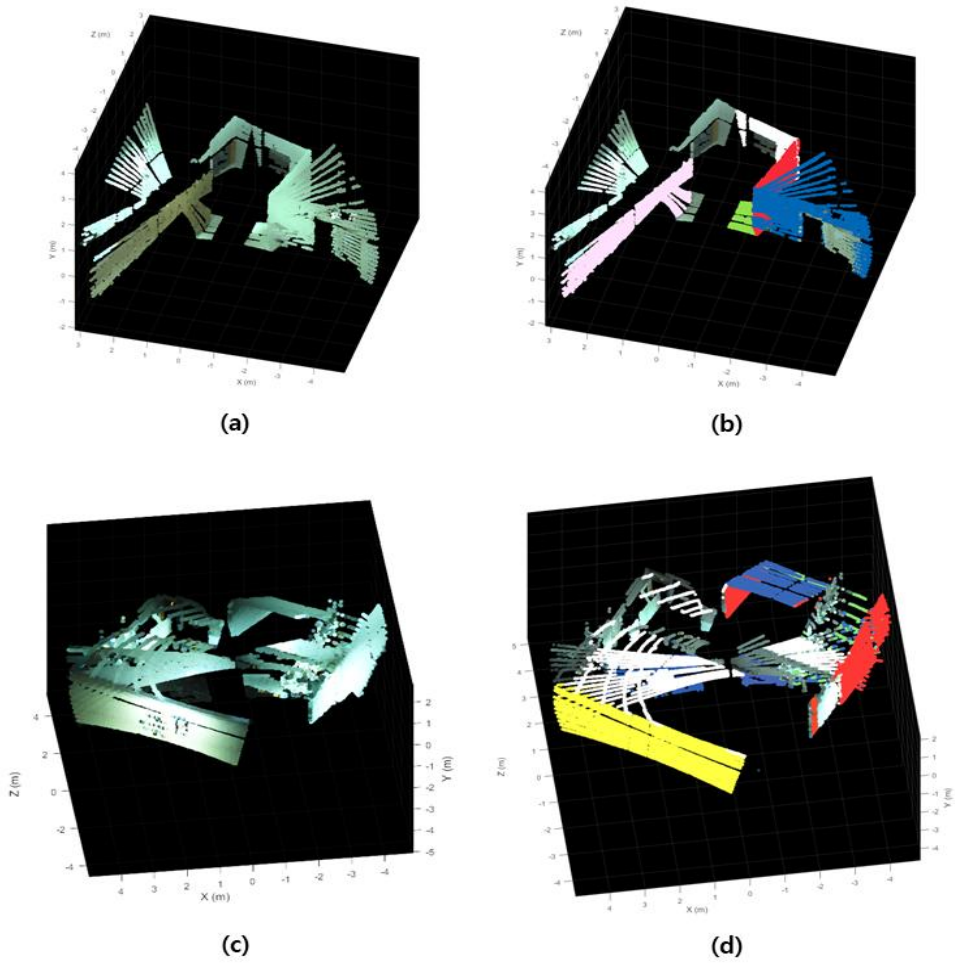
5.2.1 어안 렌즈 카메라와 라이다 데이터 간 융합 정확도

데이터 융합의 정확도에 사용된 어안 렌즈 카메라 영상은 [그림 5-3]과 같다. 본 연구에서는 색상과 깊이 데이터 간 융합의 정확도를 보다 명확히 판단하고자, 각 어안 영상의 중요 평면에 육안 식별에 용이한 색상을 부여 하고, 각 평면이 만나는 모서리 부분의 융합 정확도를 판단하였다. [그림 5-3]의 (a)와 (c)는 각각 검증지 1에서 촬영된 영상 원본과 새로운 색상이 부여된 어안 영상이며, (b)와 (d)는 검증지2에서 촬영된 영상 원본과 새로운 색상이 부여된 어안 영상이다.



[그림 5-3] 데이터 융합 정확도 판단을 위한 색상 부여
(a) 검증지1, 원본 영상 (b) 검증지2, 원본 영상
(c) 검증지1, 색상 부여 영상 (d) 검증지2, 색상 부여 영상

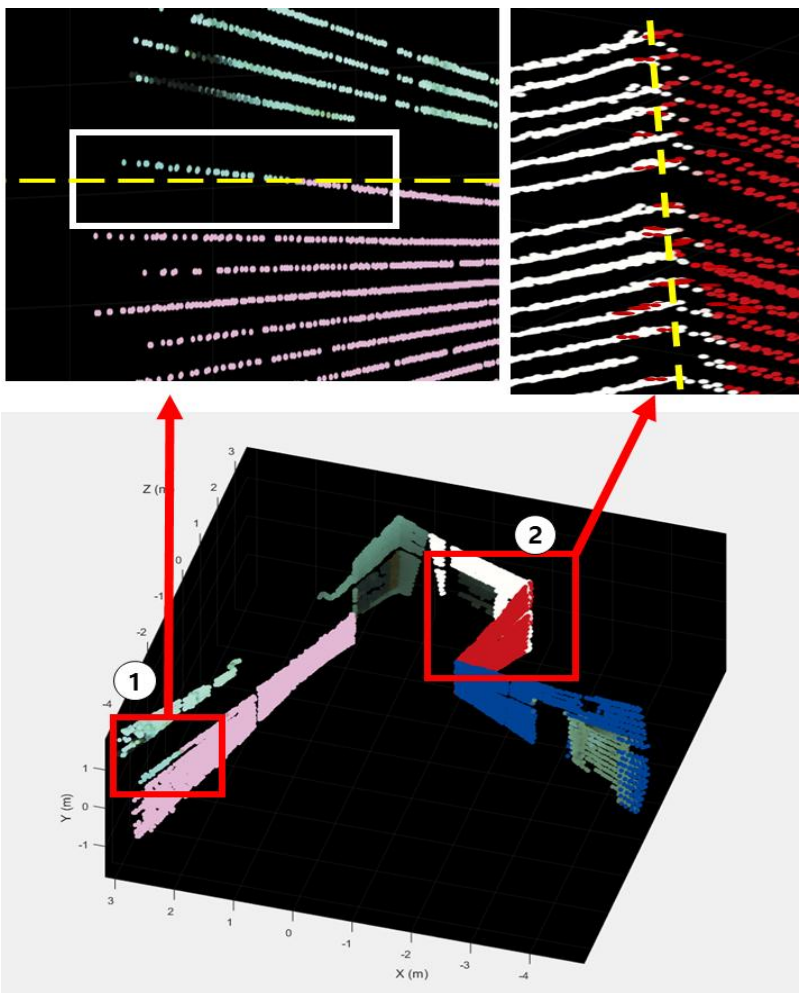
[그림 5-4]는 검증지1과 검증지2에서의 융합 데이터를 보여준다. [그림 5-4]의 (a)와 (c)는 원본 영상으로 제작된 결과이며, (b)와 (d)는 새로운 색상이 부여된 어안 렌즈 카메라 영상으로 제작된 결과이다.



[그림 5-4] 멀티 센서 데이터 융합 영상
(a) 검증지1, 원본 영상 (b) 검증지1, 색상 부여 영상
(c) 검증지2, 원본 영상 (d) 검증지2, 색상 부여 영상

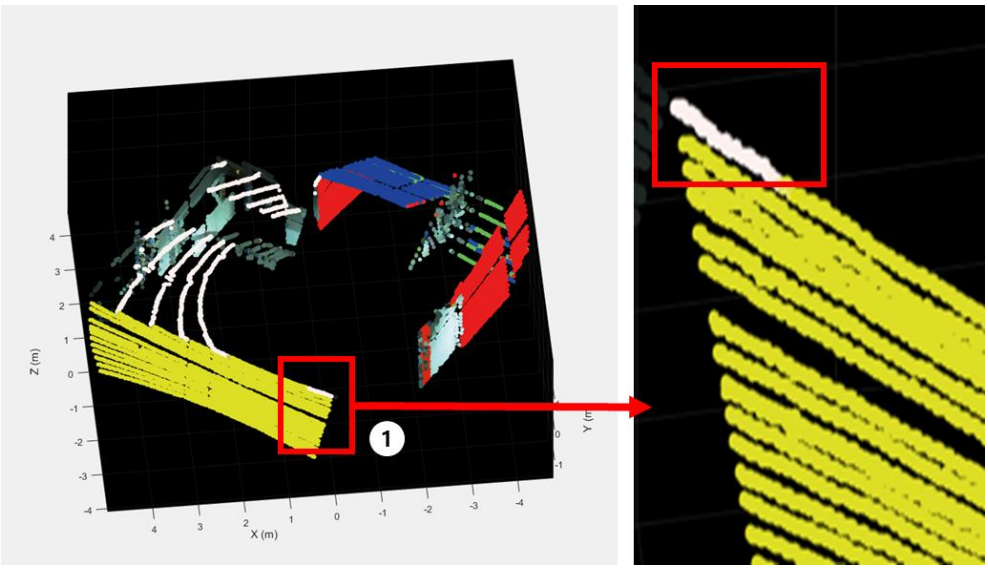
[그림 5-5]는 검증지1에서 촬영된 어안 렌즈 카메라와 라이다1 간의 융합 결과를 보여주며, 1번 및 2번 위치를 제외하면 색상과 깊이 데이터 간의 융합이 정확히 이루어졌음을 확인할 수 있다. 융합 오차가 나타났던 1번과 2번 위치에 대한 분석은 다음과 같다. 먼저 1번 위치는 노란색 점선(분홍색 평면의 모서리)을 기준으로 위쪽의 일부

라이다 점군에 잘못된 색상이 부여되었으며, 오차는 5m 거리 기준 약 2cm 수준으로 나타났다. 다음으로 2번 위치의 경우 오목한 모서리 구간에서 나타난 오차이다. 이는 실제 모서리(노란색 점선)을 기준으로 양쪽 모두에 흰색, 빨간색 점이 나타나는 것으로 판단할 때, 라이다 데이터의 멀티 패스 효과에 따른 오차로 판단된다.



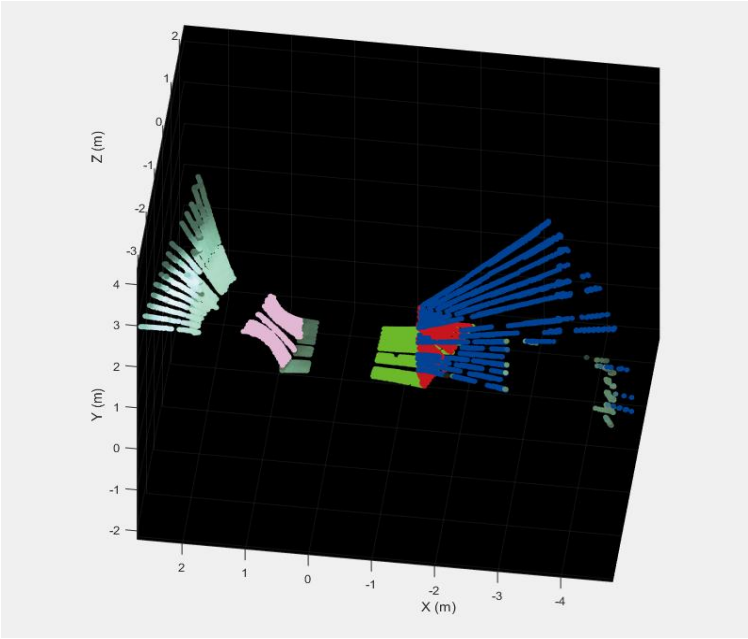
[그림 5-5] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지1, 라이다1)

[그림 5-6]은 검증지2에서 촬영된 라이다1 데이터와 어안 렌즈 카메라 영상 간 융합 결과이다. 검증지2에서는 1번 위치에서 일부 융합 오차가 확인되었다. [그림 5-6]의 1번 위치는 천정과 벽면이 만나는 곳으로, 4m 거리 기준 약 1.5cm 수준의 오차가 나타났다. 해당 위치는 i) 라이다의 멀티 패스가 나타나기 쉬운 모서리 부분이며, ii) 흰색과 노란색의 경계 위라는 것을 감안할 때, 데이터 융합 전체 정확도 판단에 큰 영향을 주지 못할 것으로 판단된다.

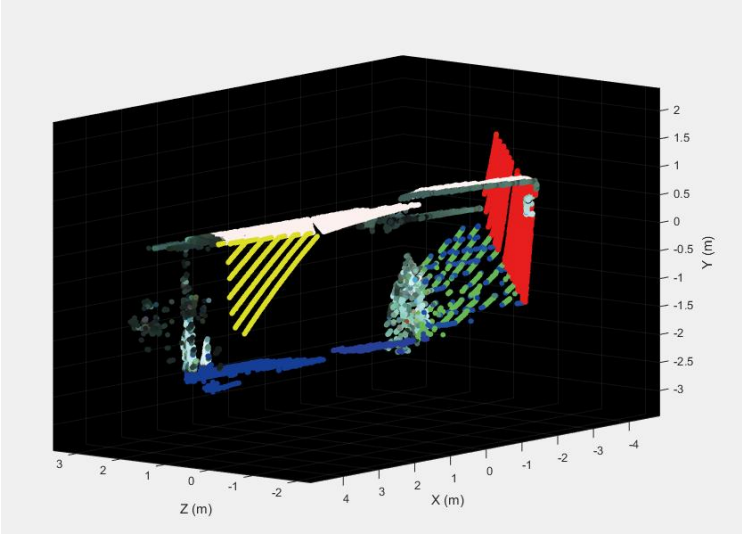


[그림 5-6] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도
(검증지2, 라이다1)

[그림 5-7]과 [그림 5-8]은 각각 검증지1과 검증지2에서의 어안 렌즈 카메라와 라이다2 융합 데이터를 보여준다. [그림 5-8]의 경우 계단 및 계단 난간 지역이 정확히 표현되지 않는 현상이 나타났지만, 이는 캘리브레이션의 정확도가 아닌, 라이다의 해상도 및 산란 효과로 판단된다.



[그림 5-7] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지1, 라이다2)



[그림 5-8] 어안 렌즈 카메라와 라이다 간 데이터 융합 정확도 (검증지2, 라이다2)

5.2.2 라이다 데이터 간 융합 정확도

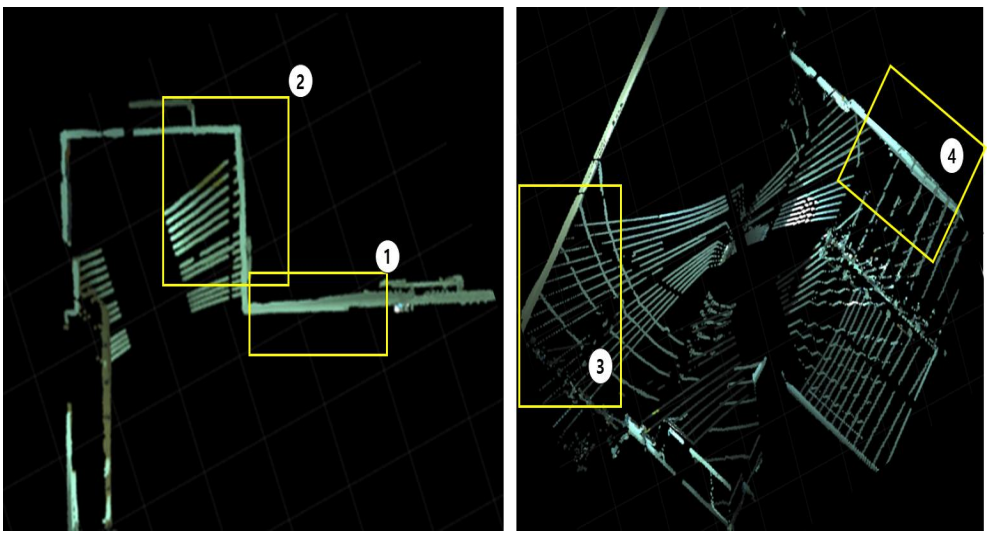
라이다 데이터 간 융합은 총 4가지의 상대표정요소로 계산되었다. 먼저 멀티 센서 시스템 설계 당시에 설정된 명목값(이하 명목값)이 사용되었으며, ICP방법으로 계산된 상대표정요소(이하 ICP값)가 사용되었다. ICP방법의 경우 지역 최적해 문제를 최소화하기 위하여 명목값을 초기값으로 입력하여 계산되었다. 다음으로 ROP1과 ROP2를 이용하여 계산된 ROP5와, ROP3과 ROP4 간의 폐합 조건을 사용하여 계산된 ROP5의 평균값(이하 평균값)이 사용되었다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 전역 최적화를 통하여 계산된 상대표정요소가 사용되었다. 각 상대표정요소의 값은 [표 5-1]과 같다.

[표 5-1] 데이터 융합에 사용된 라이다 간의 상대표정요소

	X0 (m)	Y0 (m)	Z0 (m)	ω (°)	ϕ (°)	κ (°)
명목값	0	-0.35	0.40	60	0	0
ICP값	0.0105	-0.341	0.415	59.10	1.49	-1.15
평균값 (폐합 조건만 사용)	0.0042	-0.3458	0.4230	61.34	1.10	-0.25
전역 최적값	0.0025	-0.3406	0.4228	61.28	1.05	-0.26

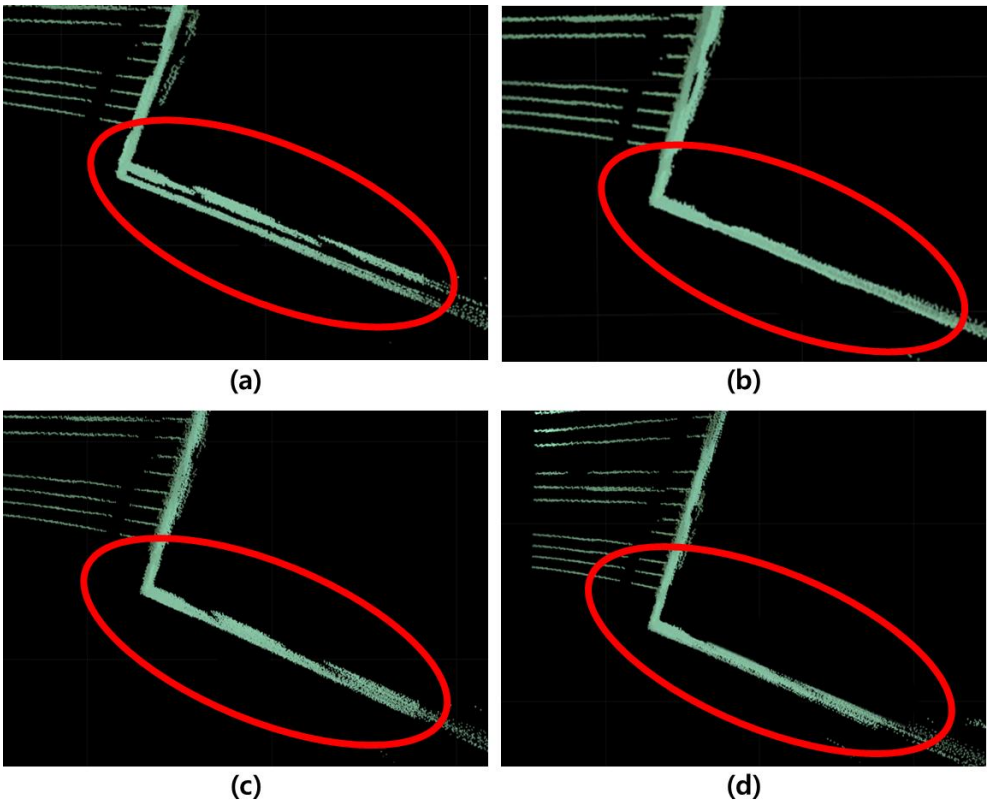
라이다 데이터 간 융합 정확도는 라이다1과 라이다2 모두에서 획득된 평면을 이용하여 판단하였다. 라이다 간의 상대표정요소가 정확할수록 두 라이다가 동시에 스캔한 평면은 융합을 통하여 동일한 평면으로 구성될 것이며, 상대표정요소의 정확도가 낮을 경우 각 평면

은 서로 다른 평면의 형태를 나타낸다. [그림 5-9]는 정확도 평가 위치를 보여주며, 그림의 1번부터 4번까지의 위치는 두 라이다 데이터 간의 중첩이 나타나는 곳이다.



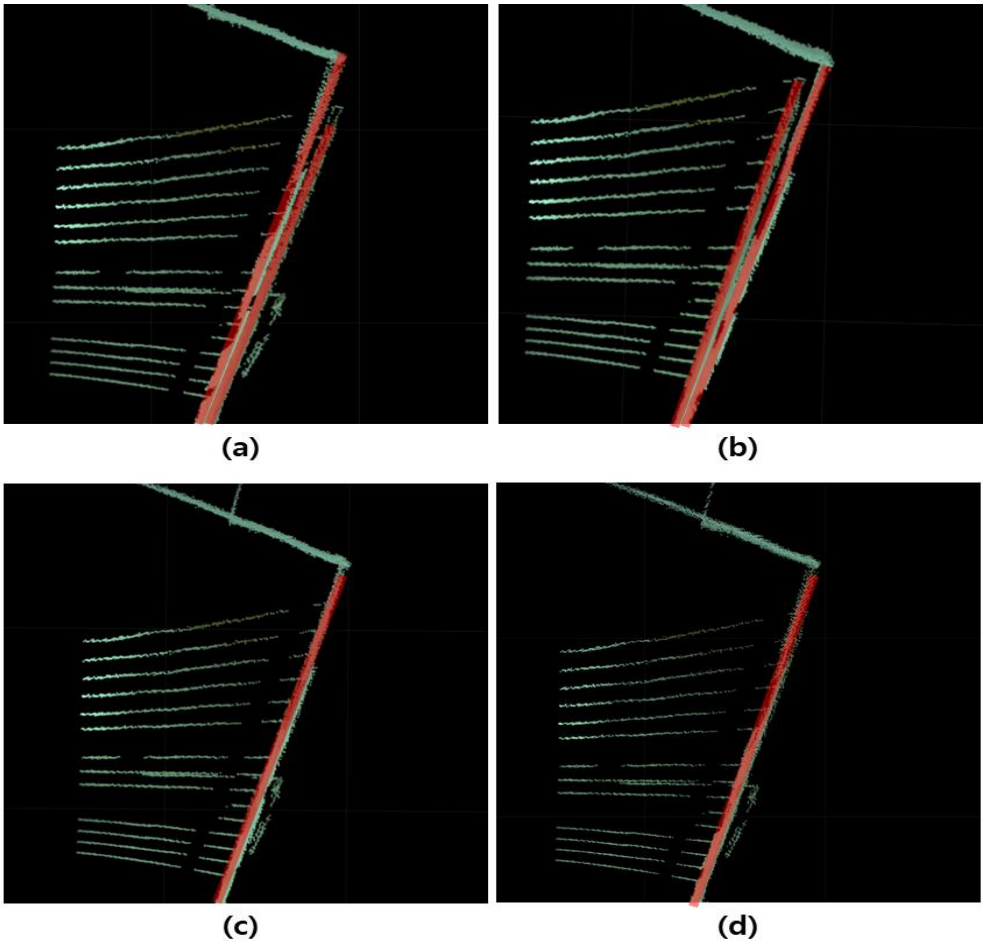
[그림 5-9] 라이다 데이터 간 융합 정확도 평가 위치

[그림 5-10]은 [그림 5-9]의 1번 위치를 확대한 그림이다. [그림 5-9]의 (a)는 명목값, (b)는 ICP값, (c)는 평균값, 그리고 (d)는 전역 최적값으로 계산된 융합 데이터이다. 가장 큰 융합 오차는 명목값으로 데이터 융합을 했던 경우에 나타났으며, 각 라이다의 평면이 서로 다른 2개의 평면의 형태를 나타내었다. 명목값 이외의 경우는 모두 하나의 평면과 유사하게 구성되었으나, 상대적으로 ICP값을 사용하거나 전역 최적값을 사용한 경우의 정확도가 높게 나타났다.



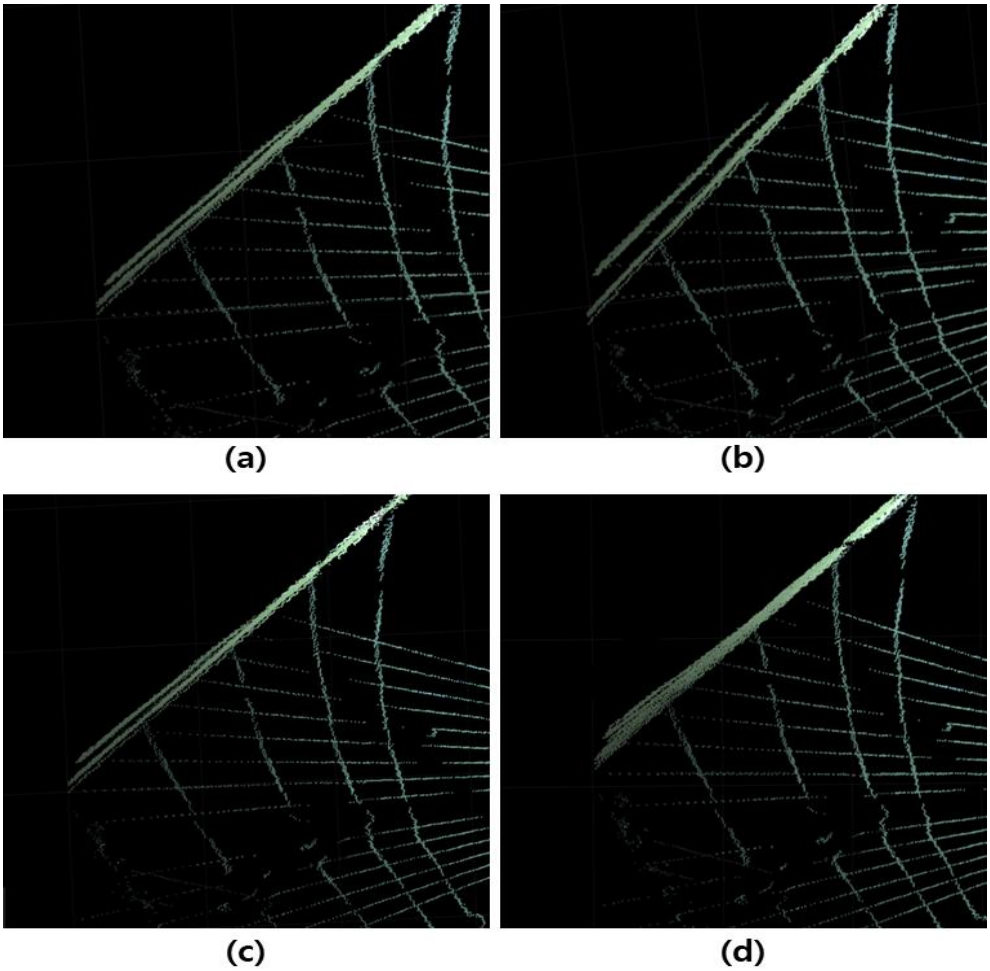
[그림 5-10] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (1번)
(a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값

[그림 5-11]은 2번 위치에서의 정확도이다. 그림을 통하여 전역 최적값, 평균값 순서로 높은 정확도가 나타남을 확인할 수 있다. 1번 위치에서 평면 간 융합이 적절히 이루어 졌던 ICP의 경우 2번 위치에서는 매우 부정확한 융합을 보여주었다. 즉 각 라이다 데이터의 두 평면은 융합되지 못하고 서로 다른 평면과 같은 형태를 보였다. 명목값을 사용한 경우에도 이와 동일한 경향이 나타났다.



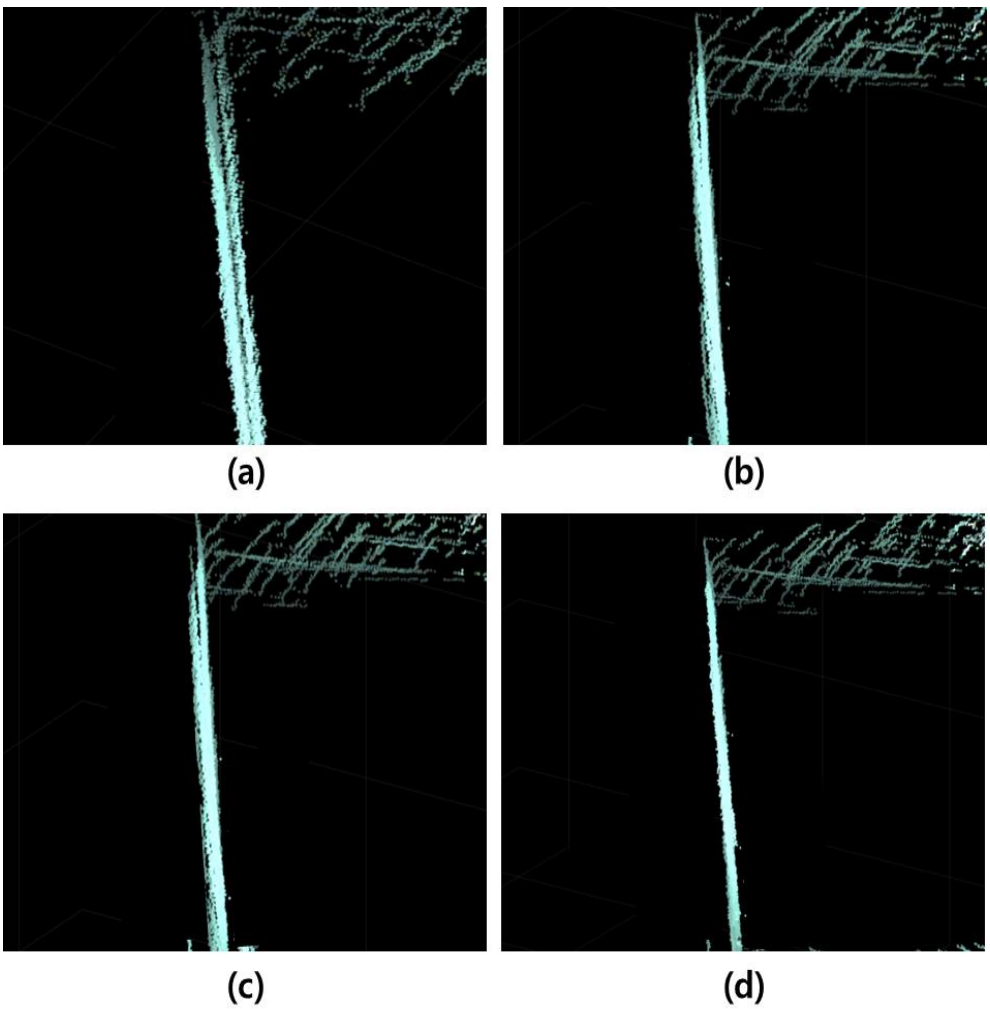
[그림 5-11] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (2번)
(a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값

3번 위치 역시 2번 위치와 유사한 결과를 나타내었다. 전역 최적값을 이용한 경우에 데이터 융합의 정확도가 가장 높게 나타났으며, ICP값을 사용했을 경우가 가장 낮은 정확도를 보였다. [그림 5-12]를 통하여 ICP값을 이용한 경우에는 라이다 평면이 완전히 분리된 상태임을 확인할 수 있으며, 명목값과 평균값의 경우에도 하나의 평면으로 구성되지 못하고 있음을 확인할 수 있다.



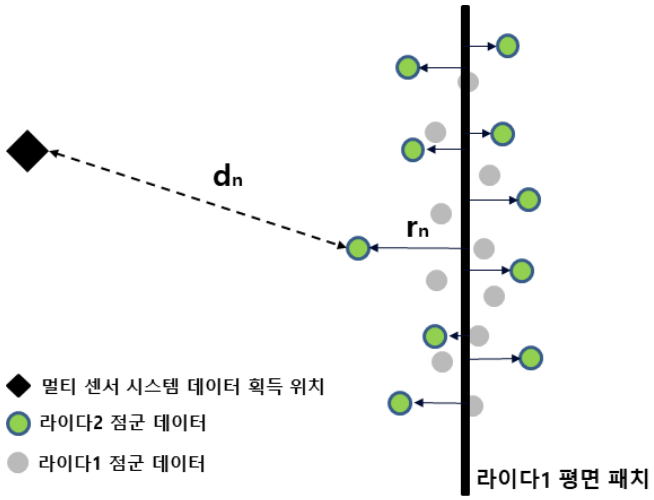
[그림 5-12] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (3번)
(a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값

한편 4번 위치 역시 동일한 결과를 나타낸다([그림 5-13]). 가장 높은 정확도는 전역 최적값의 경우에 나타났으며, 명목값의 경우 두 평면이 완전히 서로 다른 두개의 평면으로 구성됨을 확인할 수 있다.



[그림 5-13] 라이다 데이터 간 융합 정확도 (4번)
(a) 명목값 (b) ICP값 (c) 평균값 (d) 전역 최적값

각 위치에서의 라이다 데이터 융합의 오차는 [그림 5-14]와 같이 계산되었다. [그림 5-14]의 회색 원과 녹색 원은 각각 라이다 1과 라이다 2의 점군 데이터이며, 라이다 1의 평면 패치는 라이다 1점군 데이터로 부터 계산되었다. r_n은 라이다 1 평면 패치로 부터 라이다 2의 n번째 점까지의 거리를 의미하며, 수직으로 세워진 평면 패치를 기준으로 좌측과 우측이 서로 다른 부호를 나타낸다. d_n은 데이터 획득 위치로 부터 라이다 2의 n번째 점까지의 거리이다. 라이다 간의 융합 오차는 i) r_n과 ii) r_n을 d_n으로 나눈 값(이하 r/d) 각각의 평균(MBE), 절대값 평균(MAE), 그리고 평균 제곱근(RMSE)으로 계산되었다. 이때 r/d는 1m 거리를 기준으로 몇 mm의 라이다 융합 오차가 나타나는지를 판단하기 위하여 계산되었다.



[그림 5-14] 라이다 데이터 간 융합 정확도 계산 방법

[표 5-2]는 각 위치에서 계산된 라이다 데이터 간 융합 오차를 보여준다. 표를 통하여 정확도 평가 위치에 상관없이 본 연구에서 제안된 전역 최적값을 이용할 경우에 가장 낮은 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 위치별 오차는 사용된 상대표정요소의 종류에 상관없

이 3번 위치에서 가장 높게 나타났다. 이는 3번 위치가 데이터 획득 위치를 기준으로 가장 멀리 떨어진 곳이며, 멀티 패스 현상이 나타날 수 있는 모서리를 일부 포함하는 구간이기 때문으로 판단된다. 1m 거리를 기준으로 계산된 오차인 r/d의 경우, 3번 위치의 거리 차이에 따른 오차차가 일정 부분 보정되어 다른 위치와의 오차 수준 차이가 크게 감소되었음을 확인할 수 있다.

[표 5-2] 라이다 데이터 간 융합 정확도

상대 표정 요소	위치	MBE (mm)		MAE (mm)		RMSE (mm)	
		r	r/d	r	r/d	r	r/d
명목값	1번 위치	46.43	22.11	46.44	22.11	50.34	23.97
	2번 위치	20.24	13.49	23	15.33	28.61	19.07
	3번 위치	49.81	11.86	49.81	11.86	50.68	12.07
	4번 위치	26.78	8.64	28.86	9.31	34.04	10.98
	전체	**34.30**	**14.02**	**35.68**	**14.65**	**39.57**	**16.52**
ICP값	1번 위치	-20.18	-9.61	20.33	9.68	23.37	11.13
	2번 위치	-34.43	-22.95	34.43	22.95	35.94	23.96
	3번 위치	117.44	27.96	117.44	27.96	119.00	28.33
	4번 위치	-30.87	-9.95	30.90	9.97	32.80	10.58
	전체	**12.01**	**-3.64**	**55.12**	**17.64**	**56.98**	**18.50**
평균값	1번 위치	-14.11	-6.72	32.64	15.54	41.2	19.62
	2번 위치	-5.05	-3.37	12.86	8.57	15.94	10.63
	3번 위치	42.66	10.15	42.92	10.22	48.40	11.52
	4번 위치	-7.31	-2.36	17.80	5.74	22.25	7.18
	전체	**6.64**	**-0.57**	**25.69**	**10.02**	**30.63**	**12.24**
전역 최적값	1번 위치	-3.11	-1.48	29.08	13.85	34.82	16.58
	2번 위치	-1.23	-0.82	12.17	8.11	15.32	10.21
	3번 위치	18.80	4.47	18.87	4.49	20.12	4.79
	4번 위치	-1.7	-0.55	16.40	5.29	20.19	6.51
	전체	**4.10**	**0.405**	**17.71**	**7.94**	**20.87**	**9.52**

6. 결 론

본 연구는 멀티 센서 시스템 데이터 융합을 위하여 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션의 정밀도와 정확도를 향상시킬 수 있는 방법을 제시하는 것에 목적을 두고 있다. 이와 같은 목표를 위하여 본 연구에서는 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 방법과 멀티 센서 시스템 캘리브레이션 방법을 제안하고 이에 대한 검증을 수행하였다.

어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션 방법에 대한 연구는 어안 렌즈 카메라의 수학 모델식 분석을 기반으로 진행되었다. 본 연구에서는 투영 모델식과 편미분 식을 이용한 시뮬레이션 실험을 통하여, 어안 렌즈 카메라와 일반 광학 카메라는 서로 다른 상관관계 경향을 나타남을 확인하였다. 이와 같은 분석을 바탕으로 본 연구에는 보완된 A 형태의 검정 대상지를 이용한 어안 렌즈 카메라 캘리브레이션을 제안하였다. 보완된 A형태의 검정 대상지는 셀프 캘리브레이션 정확도 확보에 중요 요건인 i) 내부표정요소와 외부표정요소 간의 상관관계 해소와 ii) 영상 기준점의 고른 분포 두 가지 부분을 모두 만족시킬 수 있었으며, 이는 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 검증되었다.

시스템 캘리브레이션 방법에 대한 연구는 다음과 같이 진행되었다. 먼저 항공 라이다와 영상 간 등록에 사용되는 기존의 점 대 면 방법을 사용하여, 광학 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있음을 확인하였다. 가중치 조절을 이용한 점 대 면 시스템 캘리브레이션은 i) 지상 기준점의 좌표를 따로 획득할 필요가 없으며, ii) 한 평면 일부에 대한 라이다 정보만으로도 해당 평면 위의 모든 영상 기준점을 해석할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 점 대 면 등록 방법의 적용 가능성 평가를 위하여 정밀하게 설계된 시뮬레이션을 수행하고 정확도를 평가하였다. 라이다 간 시스템 캘리브레이

션은 전역 최적화 방법을 이용하여 진행되었다. 전역 최적화 방법은 광학 카메라와 라이다 간의 시스템 캘리브레이션 결과와 정확도를 이용하여, 라이다 간의 상대표정요소를 구하는 동시에 계산된 광학과 라이다 간 상대표정요소를 다시 조정하는 방법이다. 제안된 방법은 센서 간 기하학적 위치와 관련된 제한 조건 설정과 전역 최적화 과정 추가만으로, 시스템을 구성하는 모든 센서 간의 상대표정요소를 보다 정밀하게 구할 수 있다는 장점이 있다. 한편 제안된 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션의 정확도는 융합된 센서 데이터의 정확도 평가를 통하여 추가 검증되었으며, 제안된 방법으로 융합된 색상-깊이 데이터는 기존 방법에 비하여 상대적으로 높은 정확도를 보여주었다.

본 연구의 위와 같은 결과는 다음과 같은 점에서 의의가 있다. 먼저 어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션에 사용되는 보완된 A형태의 검정 대상지는 구현이 용이하면서도, 높은 정확도의 내부표정요소를 계산할 수 있게 한다. 따라서 어안 렌즈 카메라가 사용되는 다양한 연구에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

다음으로 점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법은 i) 라이다 평면의 일부만으로 해당 평면에 매칭되는 모든 영상 기준점을 사용할 수 있기 때문에 높은 정확도로 상대표정요소를 계산할 수 있으며, ii) 지상기준점의 좌표를 획득할 필요가 없고 iii) 최소제곱-광속조정법에 가중치 조정을 추가시키는 것으로 시스템 캘리브레이션을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 이와 같이 점 대 면 시스템 캘리브레이션 방법은 정확도와 효율성을 동시에 확보할 수 있다. 따라서 해당 방법은 최근 개발되고 있는 다양한 다종 센서 시스템에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히 점 대 면 시스템 캘리브레이션은 지상 기준점 획득 과정이 불필요하기 때문에 실시간 또는 현장(In-situ) 캘리브레이션에 활용이 가능할 것으로 판단되며, 멀티 센서 시스템의 사용자의 경우

검정 대상지를 구성해야하는 부담 없이 센서 시스템을 이용한 정확한 3차원 모델링을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

전역 최적화를 통한 라이다 간 시스템 캘리브레이션 방법은 기존 방법들에 비하여 높은 정확도를 보여주었으며, 센서 시야각 중첩이 적은 다양한 센서 시스템의 캘리브레이션에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 마지막으로 본 연구에서 제안된 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션 방법은 기존의 방법에 대한 전반적 수정이 필요없기 때문에 구현이 용이하면서도 보다 높은 정확도를 기대할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 멀티 센서 시스템 데이터 간 정확한 융합을 위한 셀프 캘리브레이션 및 시스템 캘리브레이션을 방법을 제안하고, 높은 정확도의 융합 데이터를 생성하였다. 한편 3차원 모델링은 융합 데이터 간의 등록 과정이 추가적으로 수행되어야 한다. 따라서 향후, 융합 데이터의 색상 및 깊이 정보를 이용한 데이터 간 등록 방법에 대한 연구가 수행될 필요가 있다. 또한 활용성 높은 3차원 모델 제작을 위하여 열적외 및 초분광 센서를 이용한 멀티 센서 시스템 개발에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

Abraham, S. and W. Förstner, 2005, Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 59(5), pp. 278-288.

Atkinson, K. B., 1996, Close range photogrammetry and machine vision, Whittles Publ.

Bakstein, H. and T. Pajdla, 2002, Panoramic mosaicing with a 180/spl deg/field of view lens. Omnidirectional Vision, 2002. Proceedings. Third Workshop on, IEEE.

Basu, A. and S. Licardie, 1993, Modeling fish-eye lenses. Intelligent Robots and Systems' 93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.

Basu, A. and S. Licardie, 1995, Alternative models for fish-eye lenses. Pattern recognition letters 16(4), pp. 433-441.

Beyer, H. A., 1992, Accurate calibration of CCD-cameras. Computer Vision and Pattern Recognition, 1992. Proceedings CVPR'92., 1992 IEEE Computer Society Conference on, IEEE.

Beyer, H. A., 1992, Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system, ETH Zurich.

Bok, Y., D.-G. Choi and I. S. Kweon, 2014, Sensor fusion of cameras and a laser for city-scale 3D reconstruction. Sensors 14(11), pp. 20882-20909.

Bok, Y., Y. Jeong, D.-G. Choi and I. S. Kweon, 2011, Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor. International Journal of Computer Vision 94(1), pp. 36-53.

Borrmann, D., H. Afzal, J. Elseberg and A. Nüchter, 2012, Mutual calibration for 3D thermal mapping. IFAC Proceedings Volumes 45(22), pp. 605-610.

Brauer-Burchardt, C. and K. Voss, 2001, A new algorithm to correct fish-eye-and strong wide-angle-lens-distortion from single images. Image Processing, 2001. Proceedings. 2001 International Conference on, IEEE.

Brown, D. C., 1966, Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

Caruso, D., J. Engel and D. Cremers, 2015, Large-scale direct slam for omnidirectional cameras. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.

Chen, C., B. Yang and S. Song, 2016, LOW COST AND EFFICIENT 3D INDOOR MAPPING USING MULTIPLE CONSUMER RGB-D CAMERAS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 41.

Chow, J. C., D. D. Lichti, J. D. Hol, G. Bellusci and H. Luinge, 2014, Imu and multiple RGB-D camera fusion for assisting indoor stop-and-go 3D terrestrial laser scanning. Robotics 3(3), pp. 247-280.

Chung, M., C. Kim, K. Choi and Y. Kim Development of LiDAR Simulator for Backpack-mounted Mobile Indoor Mapping System.“

Chunyan, L., W. Li, L. Xin, C. Jihua and F. Shenghong, 2010, RESEARCHES ON HAZARD AVOIDANCE CAMERAS CALIBRATION OF LUNAR ROVER. International Conference on Space Optics.

Corso, N., 2013, Loop Closure Transformation Estimation and Verification Using 2D LiDAR Scanners. Technical Report No. UCB/EECS-2013-73.

Corso, N. and A. Zakhor, 2013, Indoor localization algorithms for an ambulatory human operated 3D mobile mapping system. Remote Sensing 5(12), pp. 6611-6646.

Cramer, J., 2014, Automatic generation of 3d thermal maps of building interiors. ASHRAE transactions 120: C1.

Choi, K., C. Kim and Y. Kim, 2018, Comprehensive Analysis of System Calibration between Optical Camera and Range Finder. ISPRS International Journal of Geo-Information 7(5), pp. 188.

Devernay, F. and O. Faugeras, 2001, Straight lines have to be straight. Machine vision and applications 13(1), pp. 14-24.

El-Hakim, S., J.-A. Beraldin and F. Blais, 2003, Critical factors and configurations for practical 3D image-based modeling. VI Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Citeseer.

Fitzgibbon, A. W., 2001, Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion. Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on, IEEE.

Fraser, C. S., 1997, Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing 52(4), pp. 149-159.

Fraser, C. S., 2013, Automatic camera calibration in close range photogrammetry. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 79(4), pp. 381-388.

Ghanma, M., 2006, Integration of Photogrammetry and LIDAR.“

Gruen, A. and H. A. Beyer, 2001, System calibration through self-calibration. Calibration and orientation of cameras in compute rvision, Springer, pp. 163-193.

Habib, A., M. Ghanma, M. Morgan and R. Al-Ruzouq, 2005, Photogrammetric and LiDAR data registration using linear features. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing

71(6), pp. 699-707.

Habib, A. and M. F. Morgan, 2003, Automatic calibration of low-cost digital cameras. Optical Engineering 42(4), pp. 948-956.

Hansard, M., G. Evangelidis, Q. Pelorson and R. Horaud, 2015, Cross-calibration of time-of-flight and colour cameras. Computer Vision and Image Understanding 134, pp. 105-115.

Herrera, D., J. Kannala and J. Heikkilä, 2012, Joint depth and color camera calibration with distortion correction. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 34(10), pp. 2058-2064.

Horaud, R., M. Hansard, G. Evangelidis and C. Ménier, 2016, An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies. Machine Vision and Applications 27(7), pp. 1005-1020.

Hughes, C., P. Denny, E. Jones and M. Glavin, 2010, Accuracy of fish-eye lens models. Applied optics 49(17), pp. 3338-3347.

Hughes, C., R. McFeely, P. Denny, M. Glavin and E. Jones, 2010, Equidistant (fΘ) fish-eye perspective with application in distortion centre estimation. Image and Vision Computing 28(3), pp. 538-551.

Kannala, J. and S. S. Brandt, 2006, A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye

lenses. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 28(8), pp. 1335-1340.

Kim, B. K., 2013, Indoor localization and point cloud generation for building interior modeling. RO-MAN, 2013 IEEE, IEEE.

Kuo, T.-Y., Y.-S. Wang, Y.-J. Cheng and K.-H. Wan, 2017, Fisheye calibration with wide-angle characteristics. Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 2017 IEEE International Conference on, IEEE.

Lauterbach, H. A., D. Borrmann, R. Heß, D. Eck, K. Schilling and A. Nüchter, 2015, Evaluation of a backpack-mounted 3D mobile scanning system. Remote Sensing 7(10), pp. 13753-13781.

Lee, K., S.-H. Ryu, S. Yeon, H. Cho, C. Jun, J. Kang, H. Choi, J. Hyeon, I. Baek and W. Jung, 2016, Accurate continuous sweeping framework in indoor spaces with backpack sensor system for applications to 3-D mapping. IEEE Robotics and Automation Letters 1(1), pp. 316-323.

Li, M. and J.-M. Lavest, 1996, Some aspects of zoom lens camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18(11), pp. 1105-1110.

Li, S., 2006, Full-view spherical image camera. Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on, IEEE.

Lindner, M., A. Kolb and K. Hartmann, 2007, Data-fusion of

PMD-based distance-information and high-resolution RGB-images. Signals, Circuits and Systems, 2007. ISSCS 2007. International Symposium on, IEEE.

Marcato Junior, J., M. V. A. d. Moraes and A. M. G. Tommaselli, 2015, Experimental assessment of techniques for fisheye camera calibration. Boletim de Ciências Geodésicas 21(3), pp. 637-651.

Marković, I., F. Chaumette and I. Petrović, 2014, Moving object detection, tracking and following using an omnidirectional camera on a mobile robot. Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on, IEEE.

Mei, C. and P. Rives, 2007, Single view point omnidirectional camera calibration from planar grids. Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, IEEE.

Mikhelson, I. V., P. G. Lee, A. V. Sahakian, Y. Wu and A. K. Katsaggelos, 2014, Automatic, fast, online calibration between depth and color cameras. Journal of Visual Communication and Image Representation 25(1), pp. 218-226.

Mirzaei, F. M., D. G. Kottas and S. I. Roumeliotis, 2012, 3D LIDAR - camera intrinsic and extrinsic calibration: Identifiability and analytical least-squares-based initialization. The International Journal of Robotics Research 31(4), pp. 452-467.

Miyamoto, K., 1964, Fish eye lens. JOSA 54(8), pp. 1060-1061.

Moghadam, P., M. Bosse and R. Zlot, 2013, Line-based extrinsic calibration of range and image sensors. Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, IEEE.

Munaro, M., F. Basso and E. Menegatti, 2016, OpenPTrack: Open source multi-camera calibration and people tracking for RGB-D camera networks. Robotics and Autonomous Systems 75, pp. 525-538.

Nair, R., K. Ruhl, F. Lenzen, S. Meister, H. Schäfer, C. S. Garbe, M. Eisemann, M. Magnor and D. Kondermann, 2013, A survey on time-of-flight stereo fusion. Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications, Springer. 8200, pp. 105-127.

Nüchter, A., D. Borrmann, P. Koch, M. Kühn and S. May, 2015, A MAN-PORTABLE, IMU-FREE MOBILE MAPPING SYSTEM. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 2.

Owens, J. L., P. R. Osteen and K. Daniilidis, 2015, MSG-cal: Multi-sensor graph-based calibration. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.

Pandey, G., J. R. McBride, S. Savarese and R. M. Eustice, 2015, Automatic extrinsic calibration of vision and lidar by maximizing mutual information. Journal of Field Robotics

32(5), pp. 696-722.

Paparoditis, N., J.-P. Papelard, B. Cannelle, A. Devaux, B. Soheilian, N. David and E. Houzay, 2012, Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. Revue française de photogrammétrie et de télédétection 200(1), pp. 69-79.

Park, Y., S. Yun, C. S. Won, K. Cho, K. Um and S. Sim, 2014, Calibration between color camera and 3D LIDAR instruments with a polygonal planar board. Sensors 14(3), pp. 5333-5353.

Perfetti, L., C. Polari and F. Fassi, 2017, Fisheye photogrammetry: tests and methodologies for the survey of narrow spaces. 3DArch.

Pless, R. and Q. Zhang, 2003, Extrinsic calibration of a camera and laser range finder.

Ray, S. F., 2002, Applied photographic optics: Lenses and optical systems for photography, film, video, electronic and digital imaging, Focal Press.

Remondino, F. and C. Fraser, 2006, Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36(5), pp. 266-272.

Sahin, C., 2016, Comparison and calibration of mobile phone fisheye

lens and regular fisheye lens via equidistant model. Journal of Sensors 2016.

Salinas, C., R. Fernández, H. Montes and M. Armada, 2015, A New Approach for Combining Time-of-Flight and RGB Cameras Based on Depth-Dependent Planar Projective Transformations. Sensors 15(9), pp. 24615-24643.

Sánchez, J. S., A. Gerhmann, P. Thevenon, P. Brocard, A. B. Afia and O. Julien, 2016, Use of a FishEye camera for GNSS NLOS exclusion and characterization in urban environments. ION ITM 2016, International Technical Meeting, ION.

Schiller, I., C. Beder and R. Koch, 2008, Calibration of a PMD-camera using a planar calibration pattern together with a multi-camera setup. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 21, pp. 297-302.

Schneider, D. and E. Schwalbe, 2008, Integrated processing of terrestrial laser scanner data and fisheye-camera image data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science 37, pp. 1037-1044.

Schneider, D., E. Schwalbe and H.-G. Maas, 2009, Validation of geometric models for fisheye lenses. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64(3), pp. 259-266.

Schöps, T., T. Sattler, C. Häne and M. Pollefeys, 2015, 3D modeling

on the go: Interactive 3D reconstruction of large-scale scenes on mobile devices. 3D Vision (3DV), 2015 International Conference on, IEEE.

Shim, H., R. Adelsberger, J. D. Kim, S.-M. Rhee, T. Rhee, J.-Y. Sim, M. Gross and C. Kim, 2012, Time-of-flight sensor and color camera calibration for multi-view acquisition. The Visual Computer 28(12), pp. 1139-1151.

Shin, Y.-D., J.-H. Park, J.-H. Bae and M.-H. Baeg, 2012, A study on reliability enhancement for laser and camera calibration. International Journal of Control, Automation and Systems 10(1), pp. 109-116.

Shortis, M., S. Robson and H. Beyer, 1998, Principal point behaviour and calibration parameter models for Kodak DCS cameras. The Photogrammetric Record 16(92), pp. 165-186.

Smith, E. R., 2012, Registration of combined range-intensity scans, Rensselaer Polytechnic Institute.

Song, H., W. Choi and H. Kim, 2016, Robust vision-based relative-localization approach using an RGB-depth camera and LiDAR sensor fusion. IEEE Transactions on Industrial Electronics 63(6), pp. 3725-3736.

Staranowicz, A. N., G. R. Brown, F. Morbidi and G.-L. Mariottini, 2015, Practical and accurate calibration of RGB-D cameras using spheres. Computer Vision and Image Understanding 137, pp. 102-114.

Taguchi, Y., Y.-D. Jian, S. Ramalingam and C. Feng, 2013, Point-plane SLAM for hand-held 3D sensors. Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, IEEE.

Taylor, Z., J. Nieto and D. Johnson, 2015, Multi Modal Sensor Calibration Using a Gradient Orientation Measure. Journal of Field Robotics 32(5), pp. 675-695.

Trevor, A. J., J. G. Rogers and H. I. Christensen, 2012, Planar surface SLAM with 3D and 2D sensors. Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on, IEEE.

Urban, S., J. Leitloff and S. Hinz, 2015, Improved wide-angle, fisheye and omnidirectional camera calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 108, pp. 72-79.

Van den Bergh, M. and L. Van Gool, 2011, Combining RGB and ToF cameras for real-time 3D hand gesture interaction. Applications of Computer Vision (WACV), 2011 IEEE Workshop on, IEEE.

Vidas, S., P. Moghadam and M. Bosse, 2013, 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on, IEEE.

Wang, W., T. Gee, J. Price and H. Qi, 2015, Real time multi-vehicle

tracking and counting at intersections from a fisheye camera. Applications of Computer Vision (WACV), 2015 IEEE Winter Conference on, IEEE.

Wang, W., K. Yamakawa, K. Hiroi, K. Kaji and N. Kawaguchi, 2015, A Mobile System for 3D Indoor Mapping Using LiDAR and Panoramic Camera. The Special Interest Group Technical Reports of IPSJ. 45th UBI 1, pp. 1-7.

Weingarten, J. and R. Siegwart, 2006, 3D SLAM using planar segments. Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, IEEE.

Wu, J., Y. Zhou, H. Yu and Z. Zhang, 2009, Improved 3D depth image estimation algorithm for visual camera. Image and Signal Processing, 2009. CISP'09. 2nd International Congress on, IEEE.

Xiong, X. and B.-J. Choi, 2011, Position estimation algorithm based on natural landmark and fish-eyes' lens for indoor mobile robot. Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on, IEEE.

Zhang, Y., C. Luo and J. Liu, 2012, Walk&sketch: Create floor plans with an RGB-D camera. Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing, ACM.

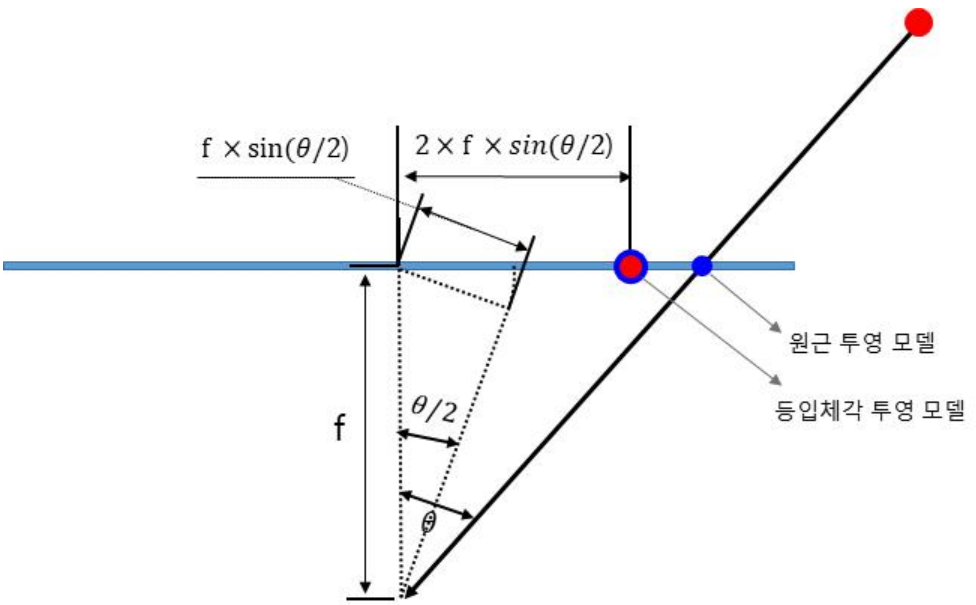
Zhu, J., L. Wang, R. Yang and J. E. Davis, 2011, Reliability fusion of time-of-flight depth and stereo geometry for high quality

depth maps. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 33(7), pp. 1400-1414.

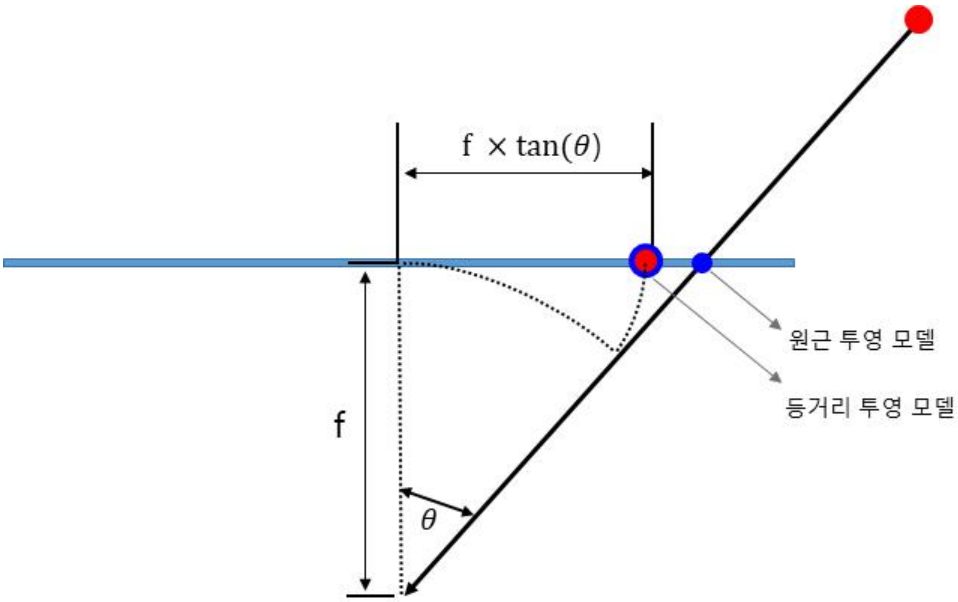
부 록

A.1. 어안 렌즈 카메라의 투영 모델

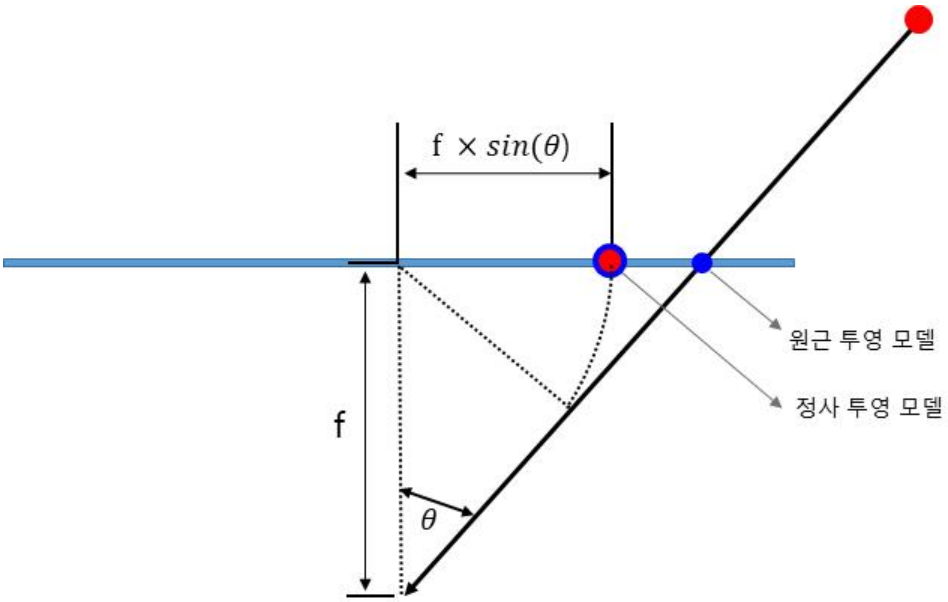
어안 렌즈 카메라의 대표적인 투영 모델인 등거리 투영, 등입체각 투영, 정사 투영, 그리고 스테레오 투영은 [그림 A.1-1] 부터 [그림 A.1-4]와 같은 방식으로 영상을 획득한다. 이때 f는 초점거리, Θ는 입사각이다. 각 그림과 같이 어안 렌즈 카메라는 일반 광학 카메라(원근 투영 모델)에 비하여 대상물의 상이 영상의 중앙부에 기록된다. 따라서 어안 렌즈 카메라 영상의 각 픽셀은 광학 카메라에 비하여 넓은 지역에 대한 정보를 포함하고 있다.



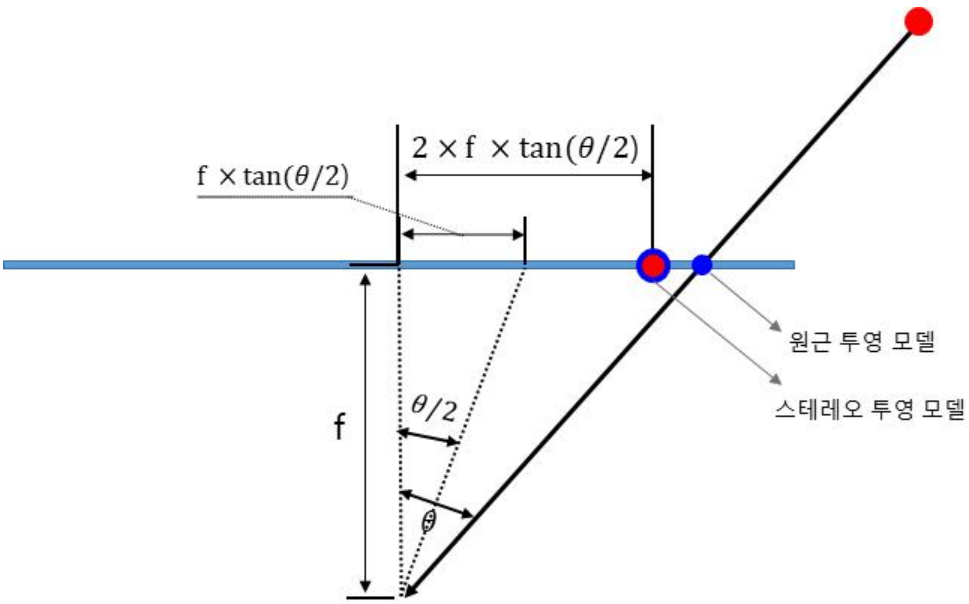
[그림 A.1-1] 등입체각 투영 모델의 개념



[그림 A.1-2] 등거리 투영 모델의 개념



[그림 A.1-3] 정사 투영 모델의 개념



[그림 A.1-4] 스테레오 투영 모델의 개념

A.2. 최소제곱-광속조정법

A2.1. 최소제곱법

최소제곱법은 측량분야에서 보편적으로 사용되는 오차 조정 방법으로, 동일한 중량으로 측정된 모든 측정값에 대하여 오차 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 것이다. 계산해야할 변수와 이에 관련된 관측방정식의 수가 많을 경우 최소제곱법을 행렬식으로 구성하여 효율적인 오차조정을 수행할 수 있다.

수식 (A.2-1)은 수식 (A.2-2)과 같이 행렬로 표시 될 수 있으며, 이때 a는 방정식의 계수, x는 변수이며, L은 관측값, 그리고 v는 잔차를 의미한다. 이때 최소제곱법은 수식 (A.2-3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_1x_1 + \ldots + a_nx_n &= L_1 + v_1 \\ b_1x_1 + \ldots + b_nx_n &= L_2 + v_2 \\ &\vdots \end{aligned} \tag{A.2-1}$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \ldots a_n \\ b_1 \ldots b_n \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad AX = L - v \tag{A.2-2}$$

$$v_1^2 + v_2^2 + \ldots = \begin{bmatrix} v_1 v_2 \ldots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = vv^T = \min \tag{A.2-3}$$

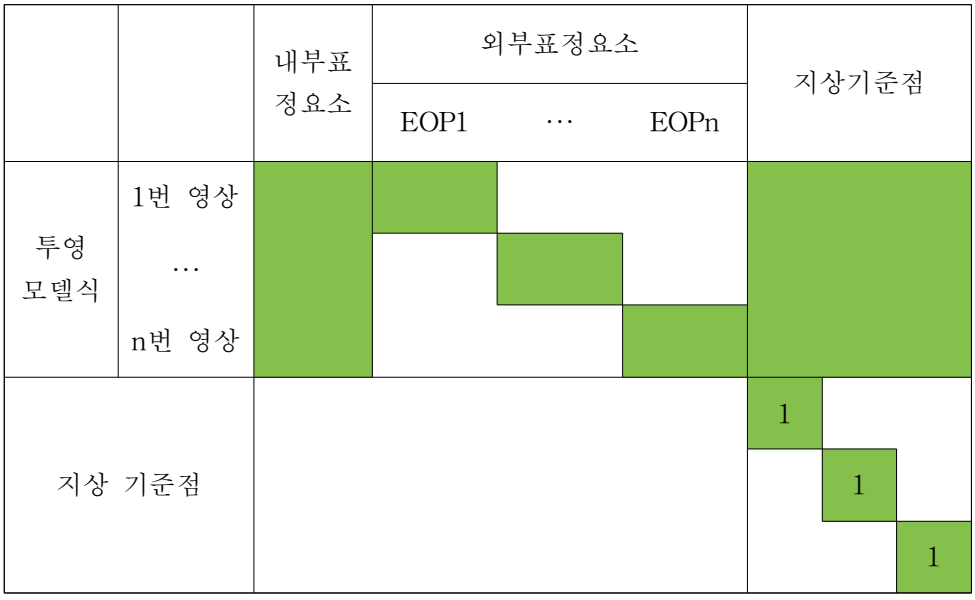
A.2.2. 광속조정법

광속조정법은 다수의 광속(bundle)을 동시에 사용하여, 표정요소를

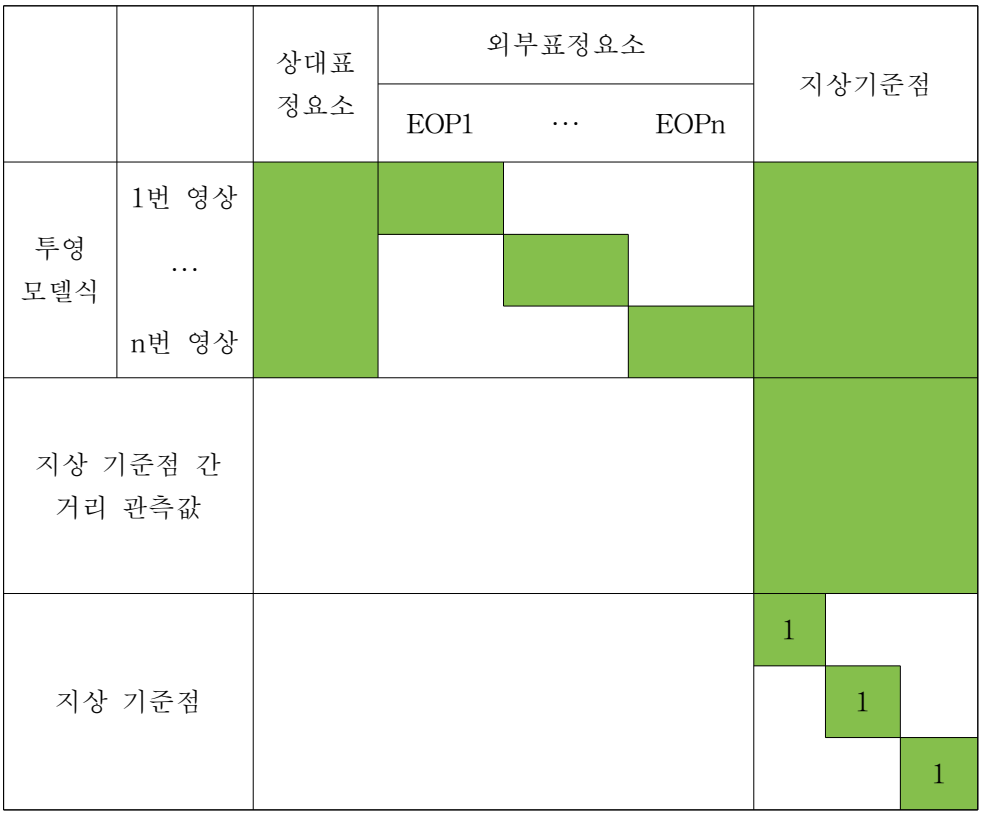
계산하는 방법으로 각 센서의 투영 모델식과 기하학적 제한 조건에 따른 수식 등으로 구성된다. 캘리브레이션에 사용되는 모델식은 비선형이기 때문에, 각 수식은 테일러 전개(Taylor's Expansion)를 통하여 선형화 되어야 한다.

본 연구에서 사용된 광속조정법은 셀프 캘리브레이션의 경우 내부표정요소, 외부표정요소, 그리고 지상 기준점의 좌표를 변수로 하여 구성되며, 시스템 캘리브레이션의 경우 외부표정요소, 상대표정요소, 그리고 지상 기준점의 좌표로 구성된다. 각 켈리브레이션에 해당되는 광속조정법의 행렬 구성은 [표 A.2-1] 및 [표 A.2-2]와 같다.

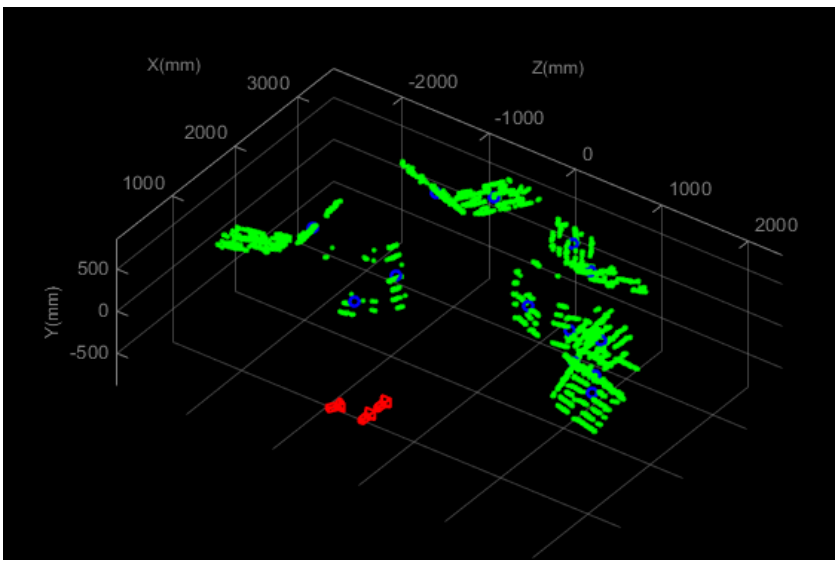
[표 A.2-1] 광속조정 행렬의 구성
(어안 렌즈 카메라 셀프 캘리브레이션)



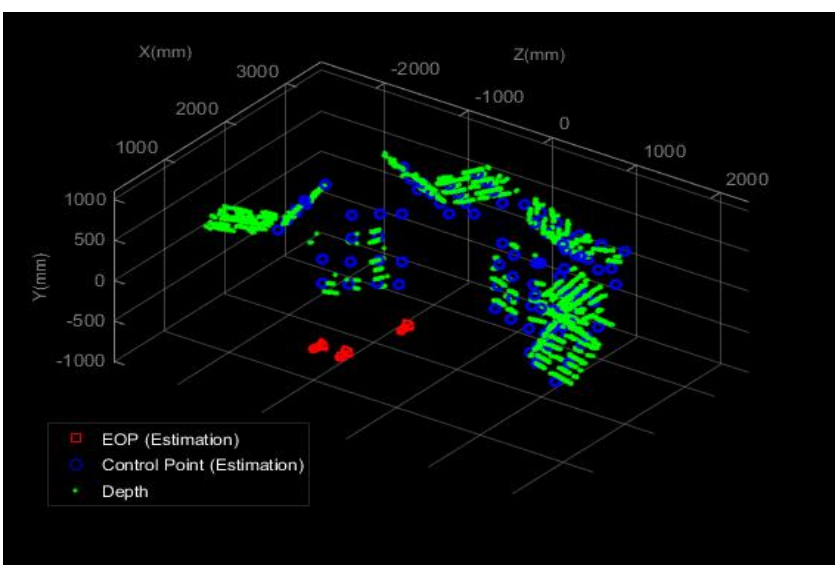
[표 A.2-2] 광속조정 행렬의 구성
(어안 렌즈 카메라와 라이다 간 시스템 캘리브레이션)



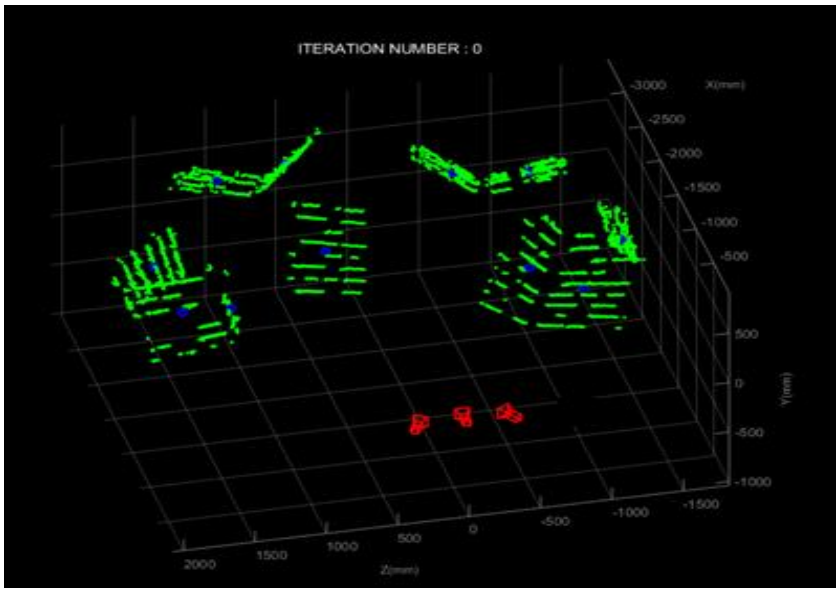
A.3. 어안 렌즈 카메라의 투영 모델



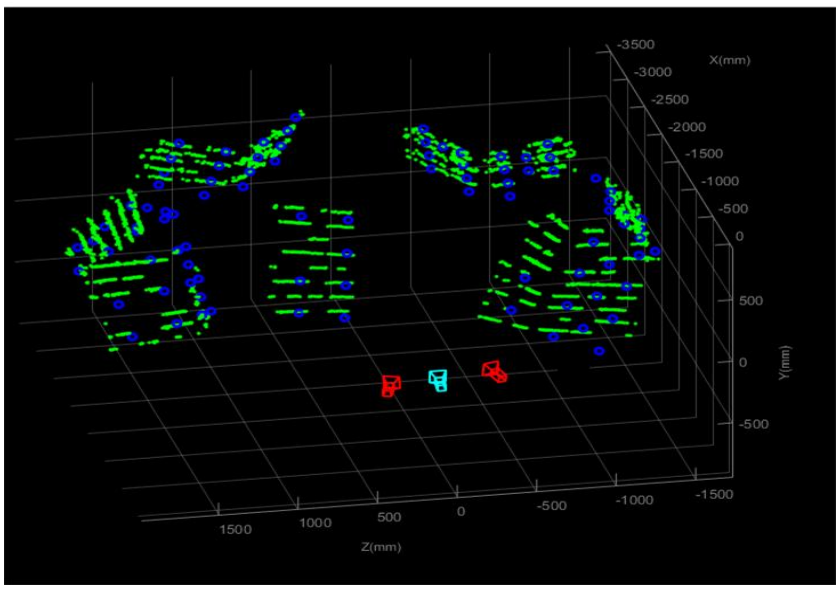
[그림 A.3-1] 시스템 캘리브레이션 전 외부표정요소와
지상 기준점의 초기 위치(어안 카메라1 - 라이다2)



[그림 A.3-2] 시스템 캘리브레이션 후 조정된
외부표정요소 및 지상 기준점(어안 카메라1 - 라이다2)



[그림 A.3-3] 시스템 캘리브레이션 전 외부표정요소와
지상 기준점의 초기 위치(어안 카메라2 - 라이다2)



[그림 A.3-4] 시스템 캘리브레이션 후 조정된
외부표정요소 및 지상 기준점(어안 카메라2 - 라이다2)

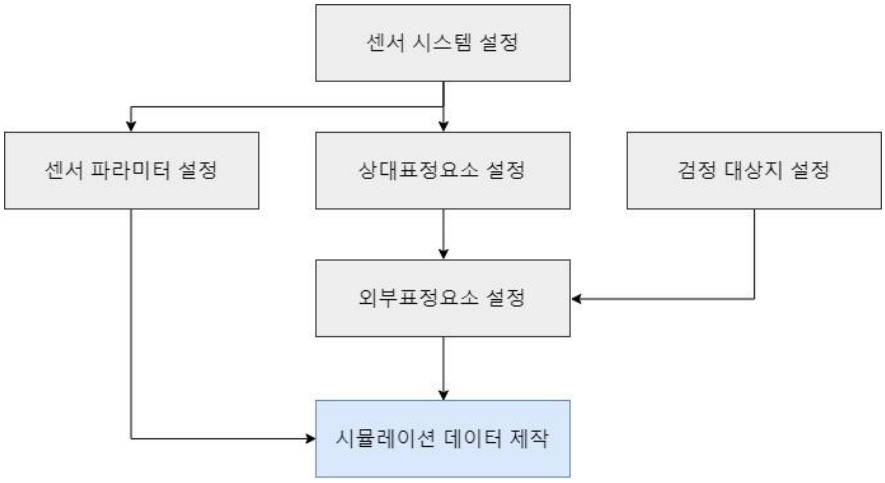
A.4. 캘리브레이션 소프트웨어

본 연구에서는 진행된 실험은 자체 개발한 소프트웨어를 기반으로 수행되었으며, 소프트웨어는 Matlab GUI를 기반으로 제작되었다. 소프트웨어는 크게 시뮬레이션 데이터 제작, 셀프 캘리브레이션, 그리고 시스템 캘리브레이션 부분으로 나뉜다.

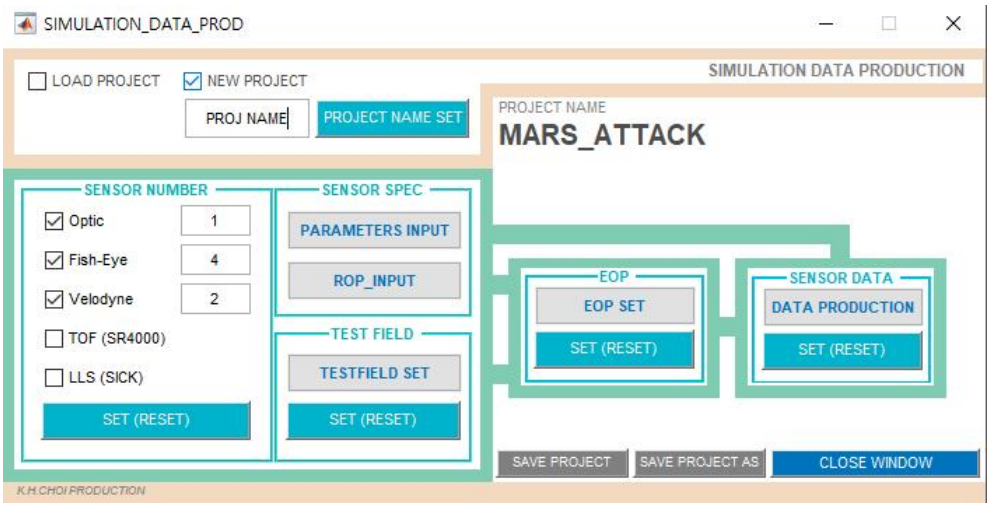
A4.1. 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어

소프트웨어는 [그림 A.4-1]과 같은 단계를 통하여 시뮬레이션 데이터를 제작한다. 각 단계의 구체적인 내용은 다음과 같다.

[그림 A.4-2]는 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어의 시작화면이다. 소프트웨어를 시작하면, 먼저 새로운 프로젝트를 진행할 것인지 기존에 수행했던 프로젝트를 불러올지를 선택한다. 만약 새로운 프로젝트를 진행하게 되면 시스템을 구성할 센서의 종류와 숫자를 먼저 결정한다.

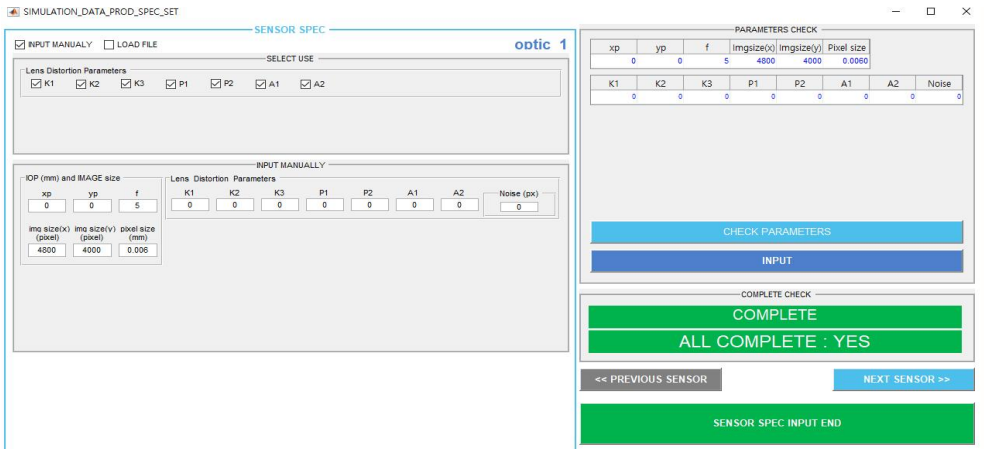


[그림 A.4-1] 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어의 흐름도



[그림 A.4-2] 시뮬레이션 데이터 제작 소프트웨어 시작 화면

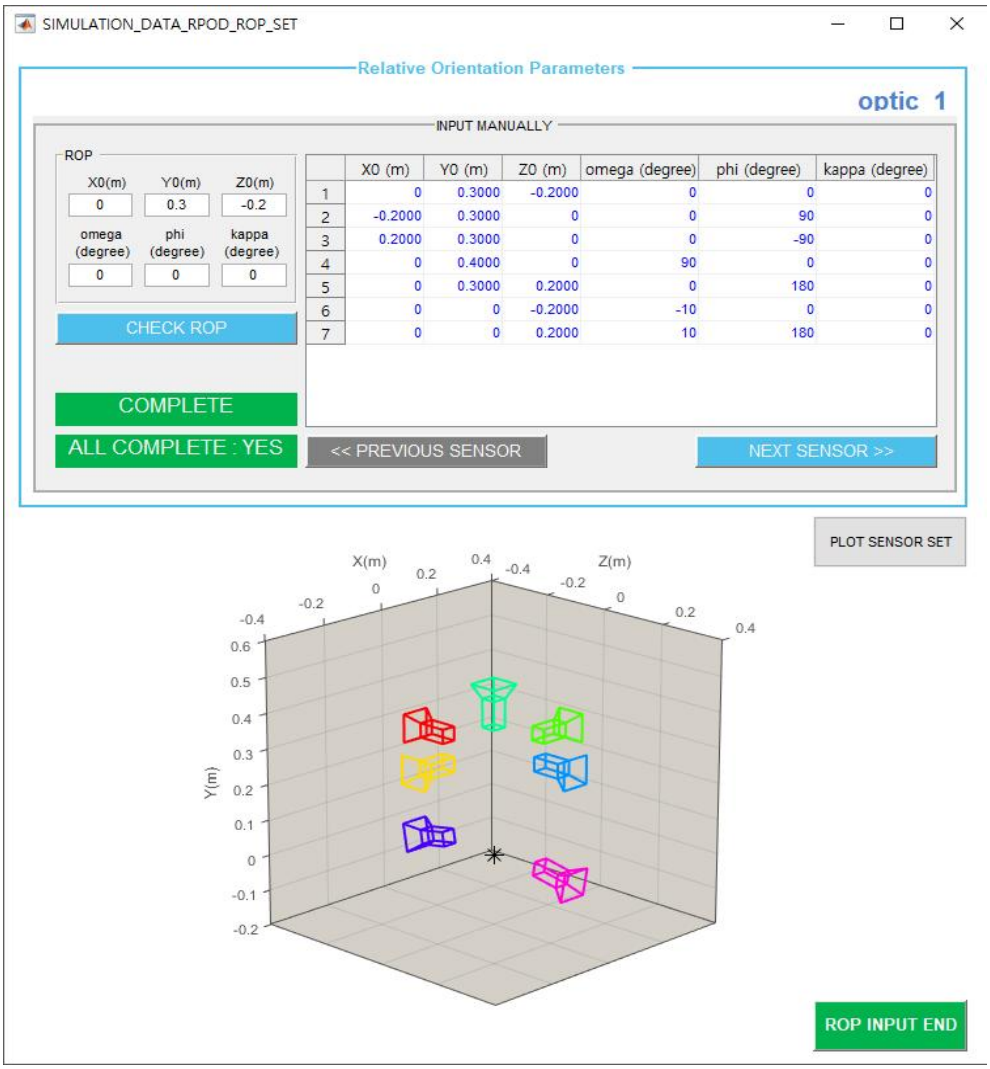
센서의 종류와 숫자를 결정하면 각 센서의 시뮬레이션 파라미터를 결정하게 된다([그림 A.4-3]). 센서의 특성을 설명할 내부표정요소, 영상의 크기, 디스토션 파라미터, 그리고 랜덤 오차의 수준 등은 이 단계를 통하여 결정된다.



[그림 A.4-3] 각 센서의 시뮬레이션 파라미터 설정 화면

센서 시스템을 구성하는 센서 간의 상대적인 위치, 즉 상대표정요

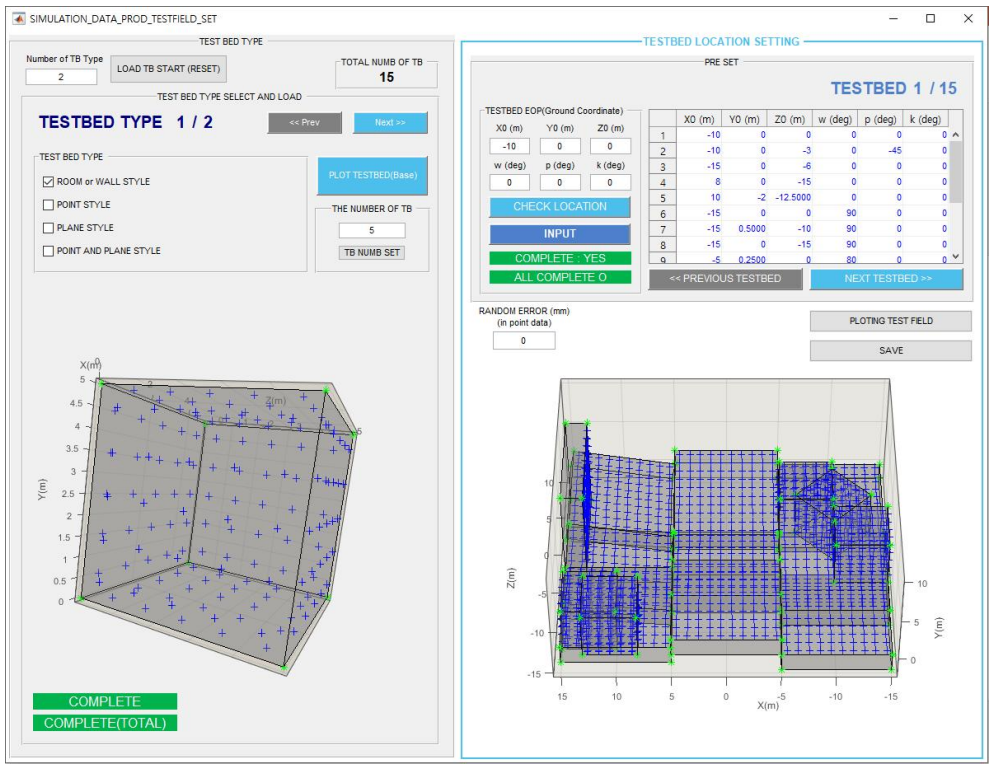
소는 [그림 A.4-4]과 같이 결정된다. 각 센서는 XYZ 좌표계를 기준으로 배치되고 이때 참고 센서의 상대표정요소는 모두 0으로 표기하게 된다.



	X0 (m)	Y0 (m)	Z0 (m)	omega (degree)	phi (degree)	kappa (degree)
1	0	0.3000	-0.2000	0	0	0
2	-0.2000	0.3000	0	0	90	0
3	0.2000	0.3000	0	0	-90	0
4	0	0.4000	0	90	0	0
5	0	0.3000	0.2000	0	180	0
6	0	0	-0.2000	-10	0	0
7	0	0	0.2000	10	180	0

[그림 A.4-4] 센서 시스템의 시뮬레이션 상대표정요소 설정 화면

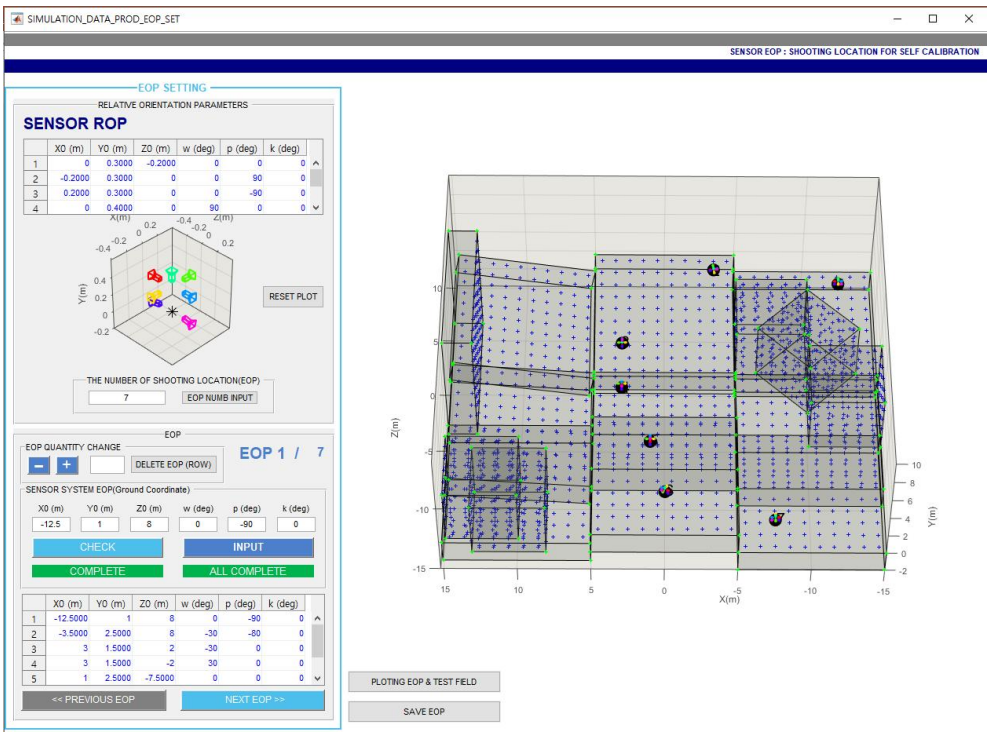
센서 시스템과 시스템을 구성하는 센서들의 내부 및 외부표정요소가 결정되면 캘리브레이션 타겟과 검정 대상지를 설정하게 된다. [그림 A.4-5]는 소프트웨어의 검정 대상지 설정 화면으로, 이를 통하여 검정 대상지 타겟을 다양한 크기와 형태로 설정할 수 있다. 타겟의 형태와 숫자를 결정하고 나면 이를 임의로 배치하여 검정 대상지 전체를 설계할 수 있다.



[그림 A.4-5] 시뮬레이션 타겟 및 검정 대상지 설정 화면

검정 대상지가 구성되면 센서 시스템이 촬영될 위치를 결정하게 된다. [그림 A.4-6]은 센서 시스템의 촬영위치 및 방향, 즉 외부표정요소 설정 기능을 보여준다. 소프트웨어는 외부표정요소가 결정되면 검정 대상지 내의 어떠한 위치에서 촬영이 이루어지게 될지 사전에

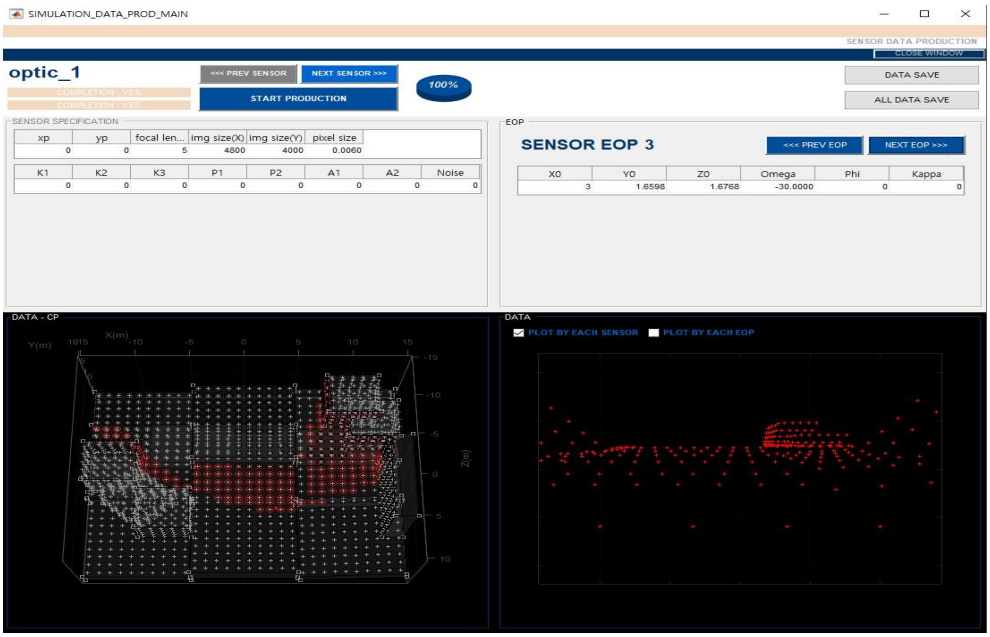
확인할 수 있도록 제작되었다.



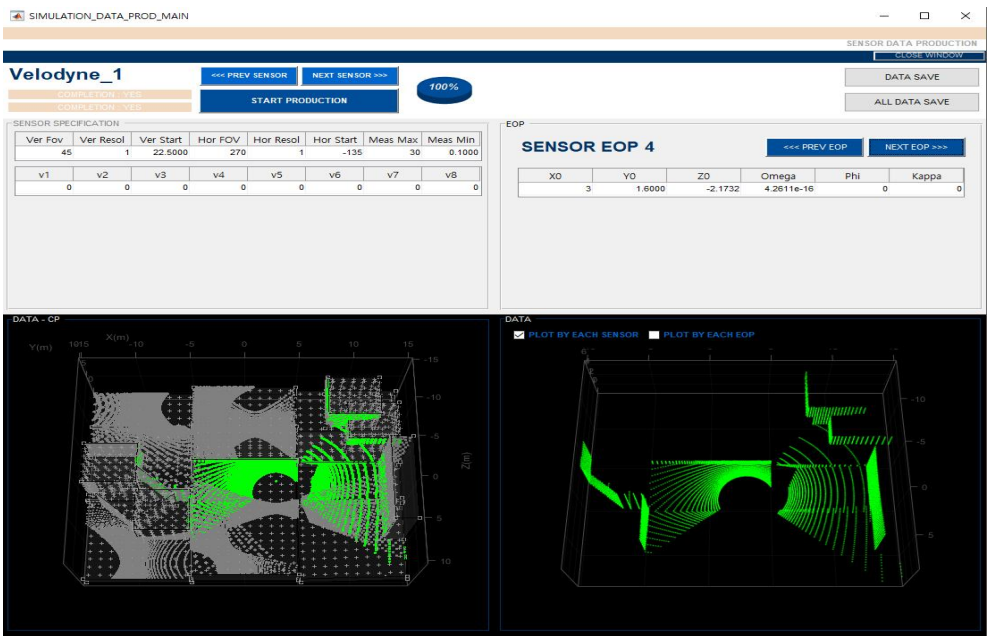
[그림 A.4-6] 시뮬레이션 센서 시스템의 외부표정요소 설정 화면

데이터 제작에 필요한 모든 설정이 완료되면 시뮬레이션 데이터를 제작하게 된다. 시뮬레이션 데이터 제작 화면은 [그림 A.4-7] 및 [그림 A.4-8]과 같으며, 각각은 제작된 광학 카메라와 라이다 시뮬레이션 데이터를 보여준다. 소프트웨어는 제작된 데이터와 해당 데이터의 획득 위치를 직관적으로 확인할 수 있도록 설계되었다.

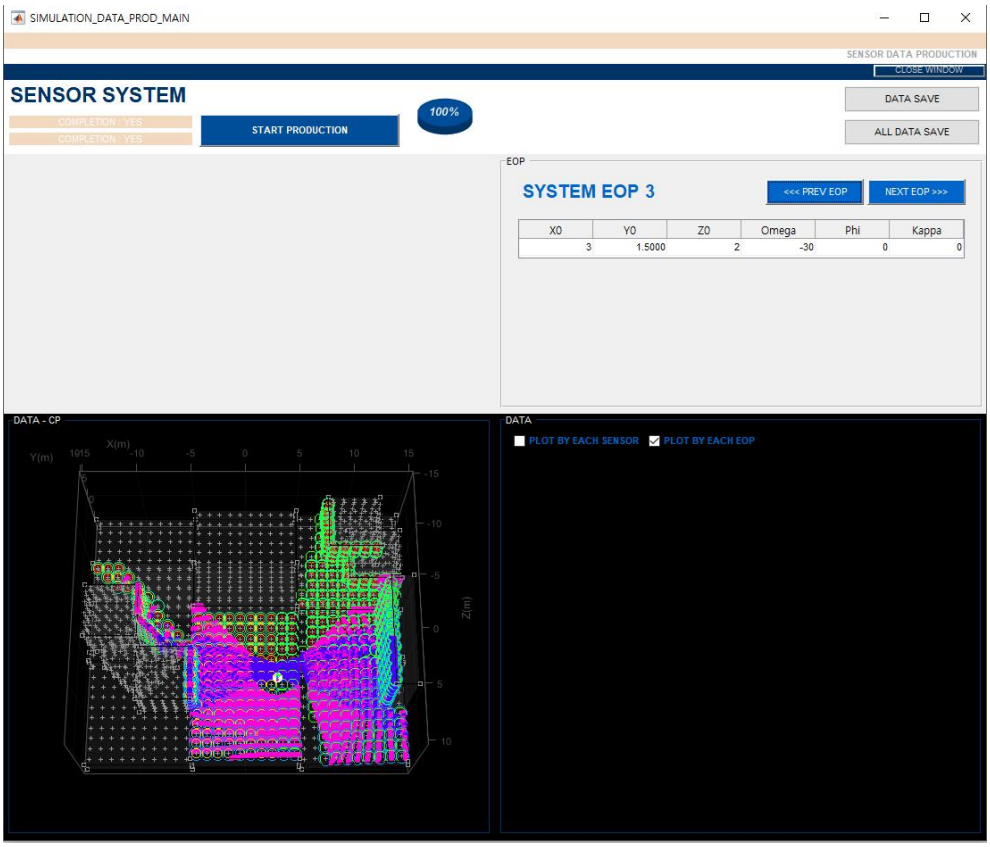
[그림 A.4-9]는 특정 위치에서 촬영된 모든 센서 데이터를 확인하는 화면이다. 이와 같은 기능은 센서 간 시야각 중첩 등의 정보를 확인할 수 있도록 해준다.



[그림 A.4-7] 광학 카메라 시뮬레이션 데이터 제작 화면



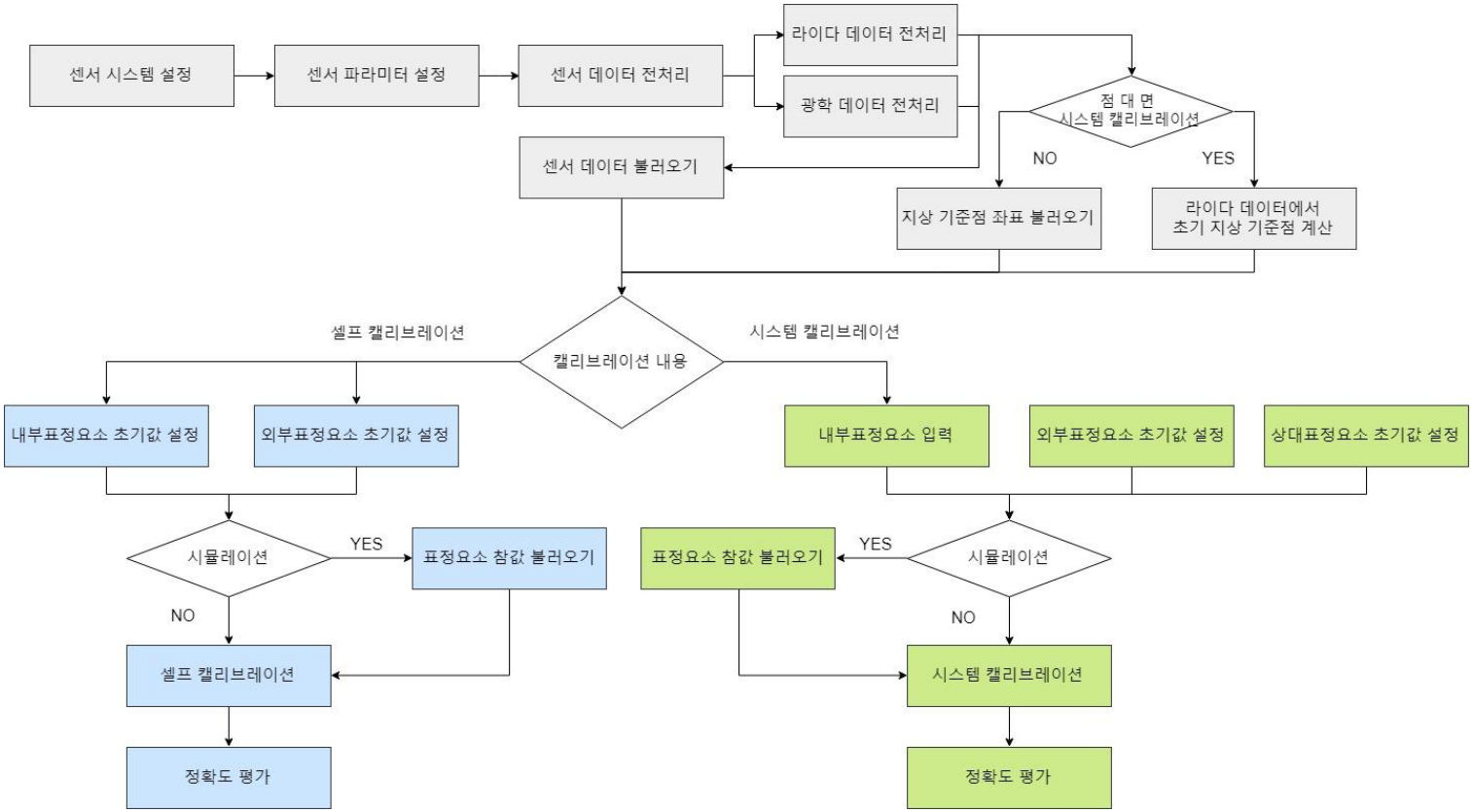
[그림 A.4-8] 라이다 시뮬레이션 데이터 제작 화면



[그림 A.4-9] 단일 위치에서 제작된 모든 센서의 시뮬레이션 데이터

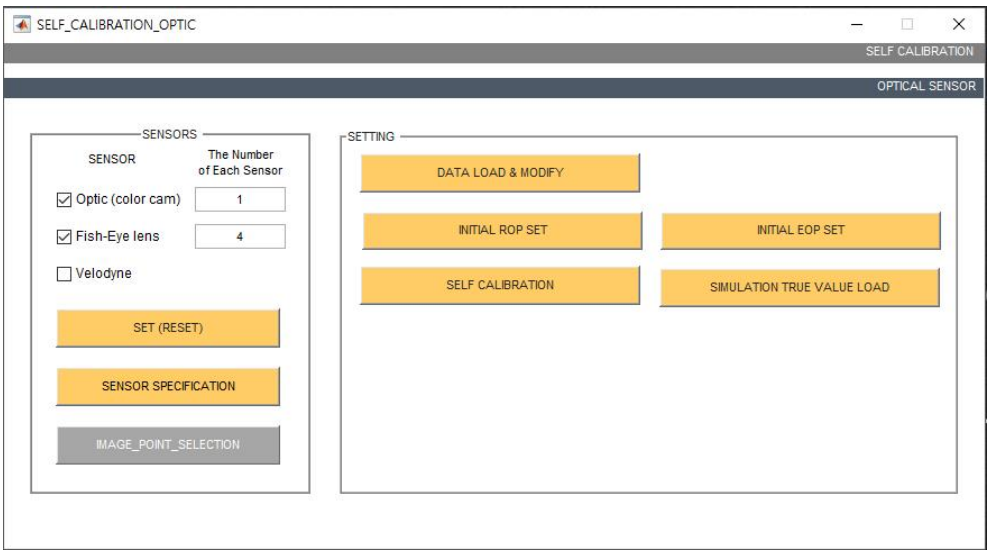
A4.2. 캘리브레이션 소프트웨어

캘리브레이션 소프트웨어는 [그림 A.4-10]과 같이 구성되어 있다. 소프트웨어의 구성은 크게 데이터 전처리 및 설정, 셀프 캘리브레이션, 그리고 시스템 캘리브레이션으로 나눌 수 있다.



[그림 A.4-10] 캘리브레이션 소프트웨어의 흐름도

[그림 A.4-11]은 소프트웨어의 실행 초기 화면을 보여준다. 초기 화면을 통하여 시스템을 구성하는 센서의 종류와 숫자가 설정되며, 데이터 전처리 및 캘리브레이션 기능의 실행은 초기화면에서 선택적으로 실행할 수 있도록 되어있다.

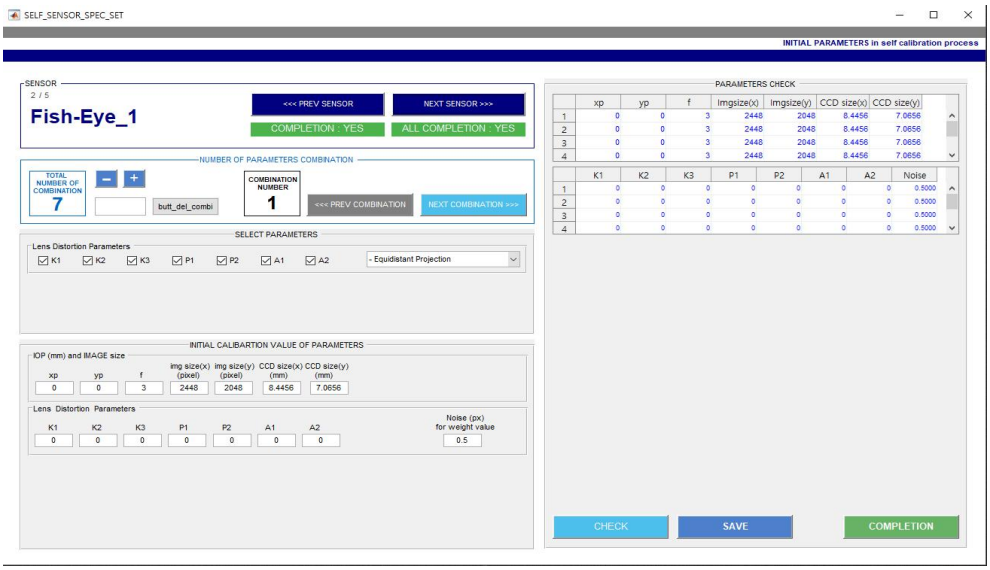


[그림 A.4-11] 캘리브레이션 소프트웨어 시작 화면

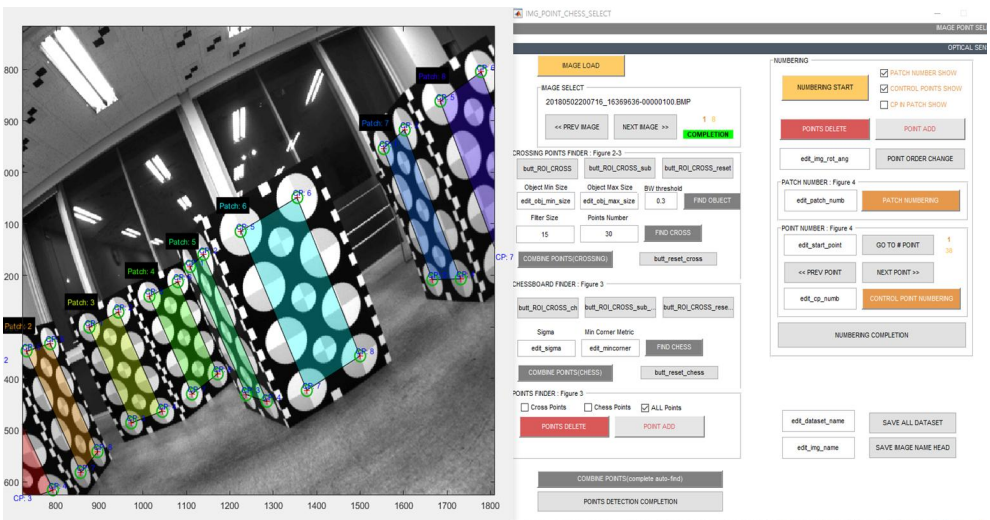
센서의 종류와 숫자가 결정되면 각 센서의 내부표정요소 및 디스토션 파라미터를 설정하게 된다([그림 A.4-12]). 셀프 캘리브레이션의 경우 설정된 파라미터 값은 캘리브레이션 초기값으로 사용되며, 시스템 캘리브레이션의 경우 관측값으로 입력된다.

각 센서의 데이터에 대한 전처리 과정은 [그림 A.4-13]과 [그림 A.4-14]를 통하여 확인할 수 있다. [그림 A.4-13]은 광학 영상 데이터에서 영상 기준점을 획득하는 장면을 보여준다. 제작된 소프트웨어는 영상 처리를 통하여 영상 기준점의 후보군을 추출해주며, 이후 사용자의 판단에 따라서 영상 기준점을 추가하거나 삭제할 수 있다. 최종 결정된 영상 기준점들은 소프트웨어를 통하여 패치 ID와 포인트 ID

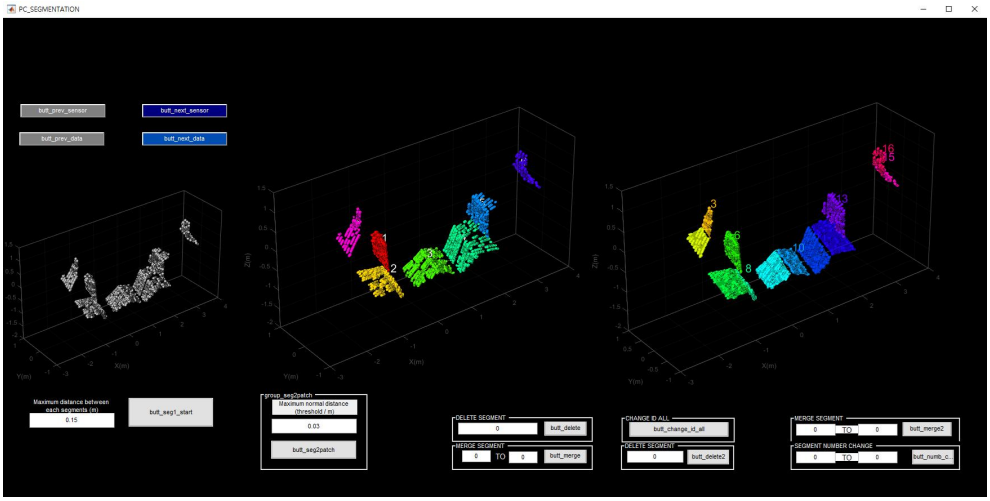
등이 부여된다. 라이다 데이터의 경우 소프트웨어를 통하여 평면 정보와 해당 평면의 방정식, 그리고 평면의 무게 중심점이 계산된다([그림 A.4-14]).



[그림 A.4-12] 센서 내부표정요소 및 파라미터 설정 화면



[그림 A.4-13] 광학 카메라 영상 기준점 획득 화면

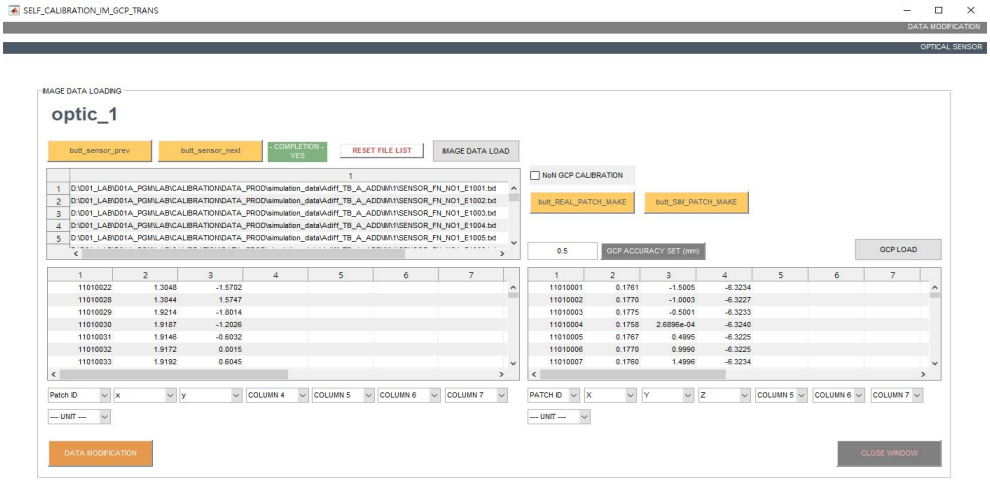


[그림 A.4-14] 라이다 데이터 평면 패치 획득 화면

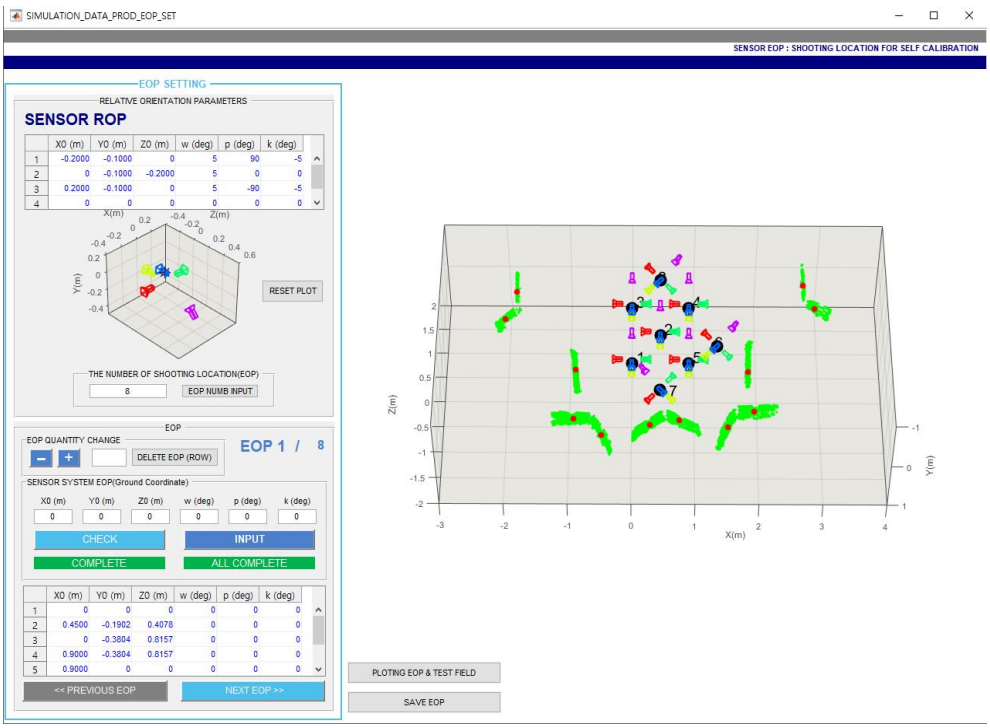
각 센서 데이터에 대한 전처리가 완료되면 해당 데이터들과 함께 지상 기준점의 좌표를 불러오게 된다. 이때 가중치 조절을 이용한 점대 면 시스템 캘리브레이션 방법을 선택하면, 지상 기준점의 좌표를 불러오는 대신, 라이다 데이터 전처리 과정에서 계산된 각 평면의 무게중심점을 지상 기준점 초기값으로 불러오게 된다([그림 A.4-15]).

캘리브레이션의 표정요소 초기값 설정은 캘리브레이션의 종류에 따라서 다음과 같이 설정된다. 셀프 캘리브레이션의 경우 외부표정요소의 초기값을 설정하게 되며, 시스템 캘리브레이션의 경우 외부표정요소 및 상대표정요소의 초기값을 설정하게 된다([그림 A.4-16]).

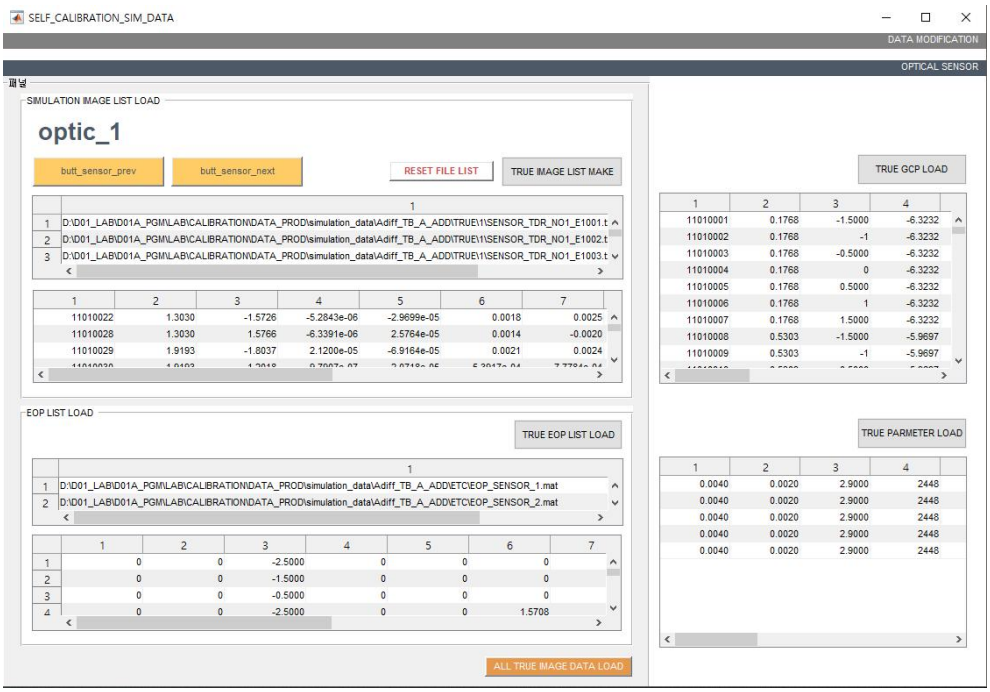
소프트웨어는 시뮬레이션 캘리브레이션의 정확도 판단을 위한 추가 기능을 [그림 A.4-17]과 같이 제공한다. 캘리브레이션이 시뮬레이션으로 진행될 경우, 시뮬레이션 데이터 단계에서 설정된 표정요소 및 파라미터의 참값을 불러들여 정확도 평가에 사용한다.



[그림 A.4-15] 전처리가 완료된 센서 데이터 및 지상 기준점 좌표 불러오기

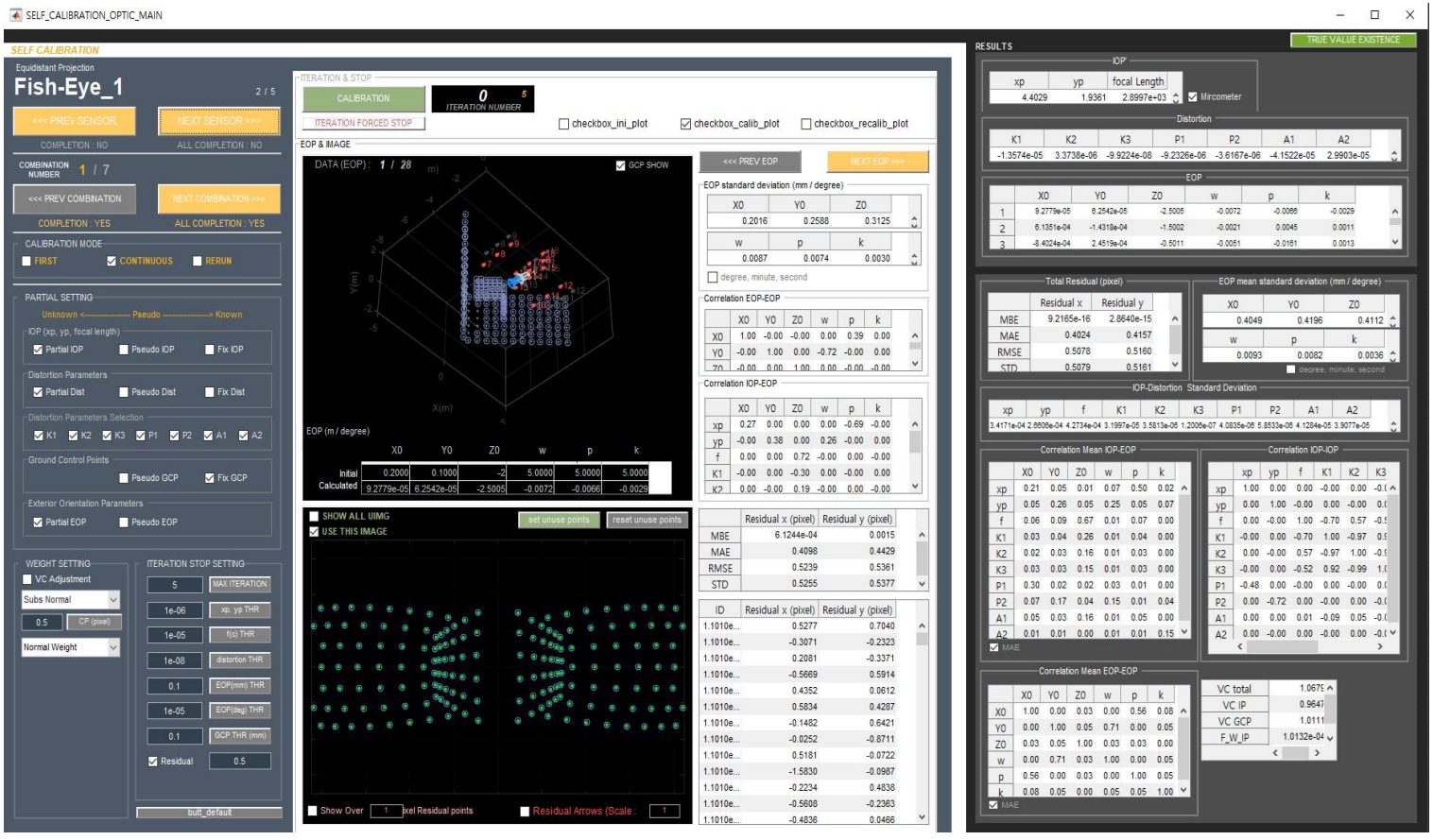


[그림 A.4-16] 상대표정요소 및 외부표정요소 초기값 설정 화면

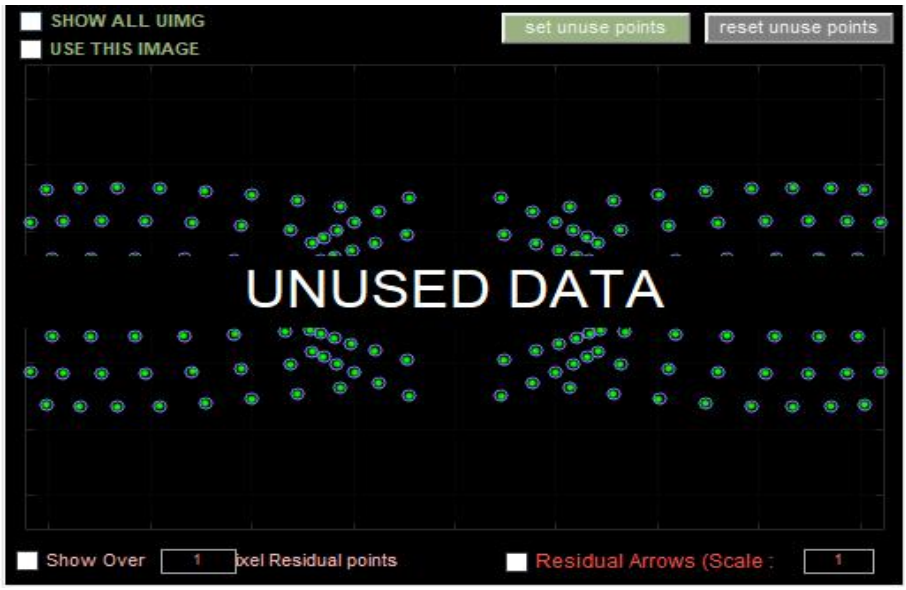


[그림 A.4-17] 시뮬레이션 표정요소 및 파라미터 설정값 불러오기

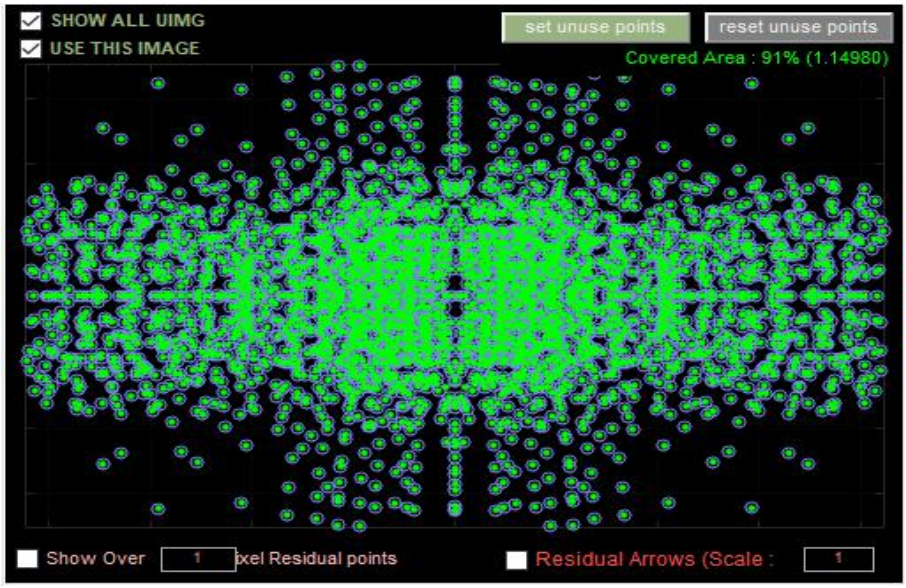
모든 설정이 완료되면 [그림 A.4-18]과 같이 캘리브레이션이 진행된다. 제작된 소프트웨어는 모든 표정요소 각각을 관측값, 변수, 그리고 수도(pseudo) 관측값으로 설정하는 기능을 제공한다. 또한 모든 표정요소, 영상 기준점, 그리고 지상 기준점에 대한 가중치 조정 기능을 제공한다. 또한 캘리브레이션의 정확도 향상을 위하여, 특정 영상이나 영상 기준점을 캘리브레이션에서 배재하는 기능과([그림 A.4-19]) 전체 영상 기준점의 배치와 면적 비율을 확인하는 기능을 제공 한다([그림 A.4-20]). 캘리브레이션이 완료되면 캘리브레이션 결과, 영상 기준점의 잔차, 표정요소의 편차, 그리고 상관관계 등은 [그림 A.4-18]의 화면에 표기되며, [그림 A.4-21]과 같이 영상 기준점 잔차의 크기와 방향을 확인할 수 있는 기능을 제공하여 정확도 분석을 보다 용이하게 진행할 수 있도록 하였다.



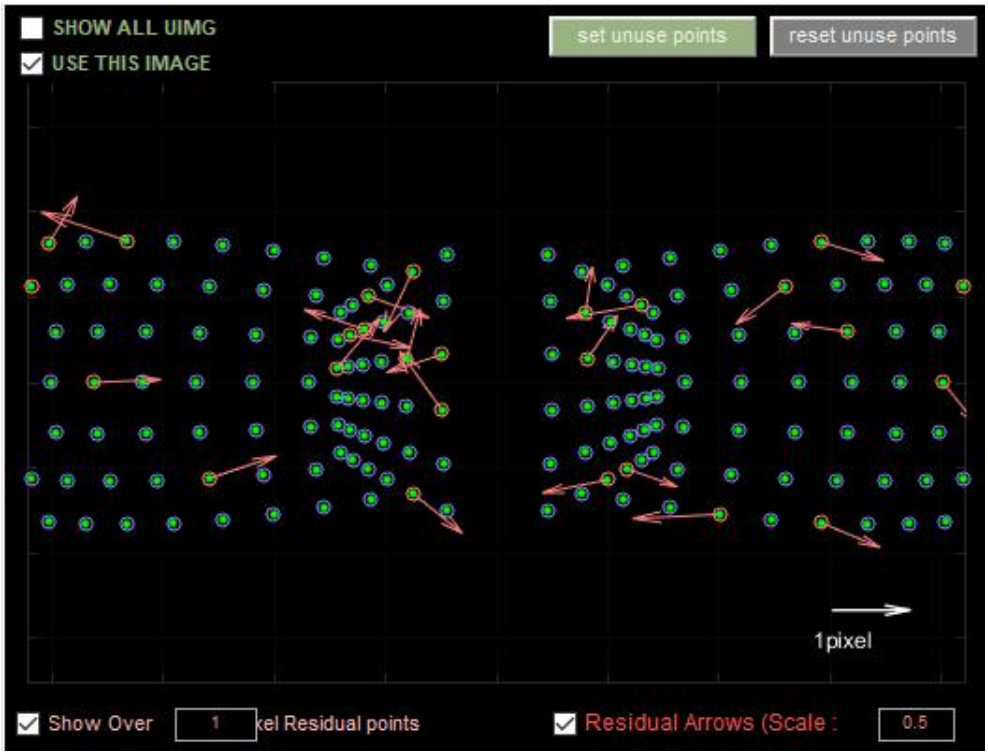
[그림 A.4-18] 캘리브레이션 수행 화면



[그림 A.4-19] 영상 또는 영상 기준점을 캘리브레이션에서 배재하는 기능

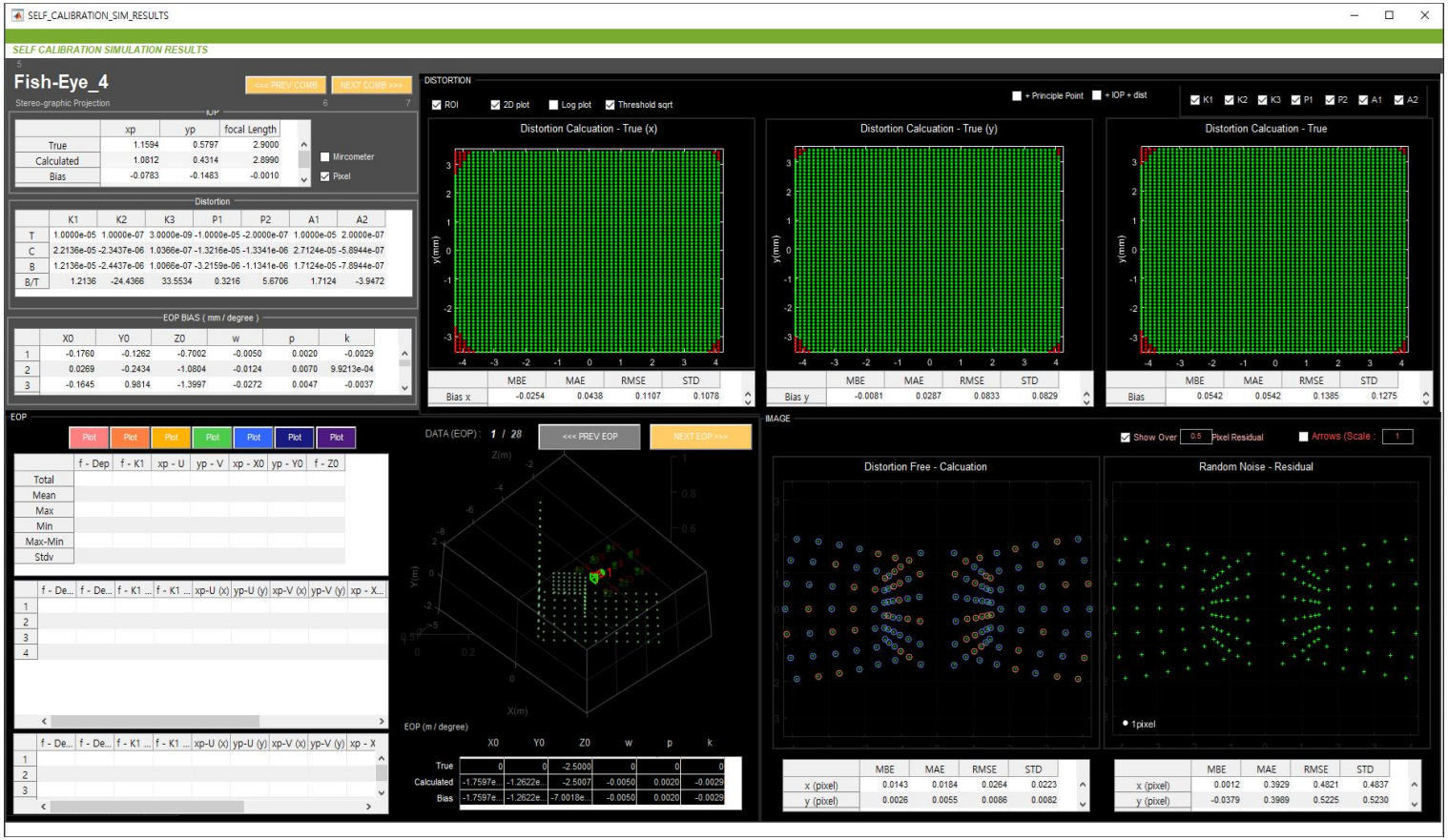


[그림 A.4-20] 영상 기준점 전체의 화면 배치 및 면적 비율 확인 기능

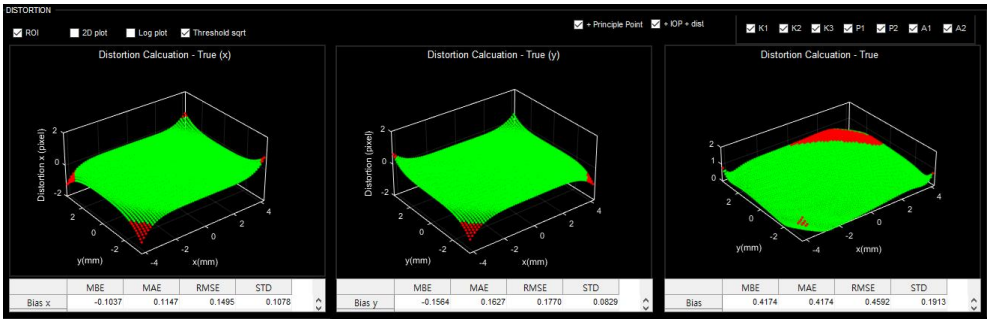


[그림 A.4-21] 영상 기준점의 잔차 확인 기능

캘리브레이션 시뮬레이션의 경우, 소프트웨어를 통하여, 사전에 설정되었던 각 표정요소 및 파라미터의 참값을 이용한 정확도 평가를 추가로 수행할 수 있도록 하였다. [그림 A.4-22]는 시뮬레이션 정확도 분석 화면으로, 참값과의 수치 비교, 디스토션 해석력 확인, 파라미터 간의 상관관계 확인, 그리고 영상 기준점의 잔차를 확인하여 심도 있는 정확도 분석이 가능하도록 하였다. [그림 A.4-23]은 영상을 통하여 내부표정요소 및 디스토션 파라미터의 정확도를 분석하는 기능을 보여준다. 제작된 소프트웨어는 개별 파라미터 및 전체 파라미터의 정확도를 2차원 영상 또는 3차원 영상으로 확인할 수 있도록 하였다.



[그림 A.4-22] 캘리브레이션 시뮬레이션 정확도 분석 기능



[그림 A.4-23] 내부표정요소 및 디스토션 파라미터 정확도 분석 기능

Multi-Sensor System Calibration for Lidar and Fish-eye Lens Camera Data Integration

Kanghyeok Choi

A DISSERTATION

Submitted to the Graduate School of Seoul National University
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Philosophy

Supervised by Professor
Yongil Kim

Department of Civil and Environmental Engineering
College of Engineering
Seoul National University

August 2018

Graduate School of Seoul National University

Abstract

Multi-Sensor System Calibration for Lidar and Fish-eye Lens Camera Data Integration

Kanghyeok Choi
Department of Civil and Environmental Engineering
The Graduate School
Seoul National University

In recent years, much attention has been paid to the applicability of three-dimensional (3D) modeling in various fields including surveying, location-based services, augmented reality, motion capture, and traffic management. In particular, 3D modeling using a multi-sensor system has an advantage that can model three-dimensionally various pieces of information such as depth, color, and temperature in surrounding environments depending on sensors implemented in the system. Thus, the need of research on development and utilization of a multi-sensor system has increased. As the development of multi-sensor systems based on various platforms such as backpack, robot, and drone have been underway, ensuring the efficiency and making sensor systems

lightweight has become the essential point in system operation. Thus, much attention has been paid to a multi-sensor system utilizing sensors whose data acquisition efficiency is high such as fisheye lens camera and 3D LiDAR.

3D modelling using data from the multi-sensor system, a relative position between sensors and a mathematical model equation of the sensors in the system should be calculated accurately. This problem can be solved by accurate self-calibration and system calibration. However, the following limitations are found in a recently developed multi-sensor system when conducting an accurate calibration. First, a fisheye lens camera that is widely used in sensor systems has a different projection model from that of general optical camera. Nonetheless, the same calibration method is performed in fisheye lens cameras based on the study results of general optical cameras. Thus, a study is needed to identify the characteristics of fisheye lens camera that are differentiated from those of general optical camera, thereby ensuring the accuracy of self-calibration of fisheye lens camera. Next, a study on calibration of multi-sensor system that is designed to minimize overlapping field of view (FOV) between sensors is needed to increase the efficiency of data acquisition. Since a multi-sensor system that minimizes overlapping FOV between sensors restricts the calibration execution significantly, it is necessary to have a system calibration method to overcome the restriction.

This study proposes a calibration method used in multi-sensor system whose overlapping FOV between sensors is low to overcome the limitations found in existing studies and facilitate the

accurate fusion of color and depth data. This study can be divided into two parts : self-calibration of fisheye lens camera, and calibration of multi-sensor system.

The proposed self-calibration method of fisheye lens camera revealed highly accurate results by lowering the correlation between orientation parameters efficiently.

This study verified that fisheye lens cameras exhibited a correlation between orientation parameters, which was different from that of general optical camera, through the correlation analysis between orientation parameters, and analysis on fisheye lens projection model. It also proposed a test bed design that can lower the correlation between orientation parameters of fisheye lens camera. The self-calibration of fisheye camera lens using the proposed test bed showed high accuracy of 0.56 and 0.67 pixels based on the root mean square error (RMSE) of image residual, and a correlation between orientation parameters showed a level of up to 0.75.

The proposed multi-sensor system calibration method was conducted in two-folds: first, system calibration between fisheye lens camera and LiDAR, and second, system calibration between LiDARs. In this study, the point-to-plane system calibration was proposed as a method to calculate a relative orientation parameters between fisheye lens camera and LiDAR. The point-to-plane system calibration method employs a geometric relationship between image control point and LiDAR's plane patch, which has the following advantages: i) it does not need a process that measures a ground control points coordinates, and ii) it can employ

all image control points over the corresponding plane in the calibration using only some of the LiDAR plane patch. The proposed system calibration method between LiDARs employs a deviation of orientation parameters and relative orientation parameters between fisheye lens camera and LiDAR, in which global optimization is performed using the system calibration results and accuracy between optical camera and LiDAR. The proposed method can calculate relative orientation parameters of all sensors in the system using only the setup of restriction conditions of location relationship between sensors. It is also easy to implement and it can expect high accuracy compared to existing methods. The accuracy of the proposed system calibration method was verified through various analyses, and it showed a accuracy between 0.68 and 0.79 pixels based on the root mean square error (RMSE) of image residual. The proposed self-calibration and system calibration results were finally used in data fusion, and the produced fusion data exhibited higher accuracy than that of existing methods.

This study proposed a self-calibration of fisheye lens camera and a calibration method of multi-sensor system whose overlapping FOV was low. It also conducted data fusion between sensors. The proposed method is valuable in a sense that it can be easily and efficiently implemented, and produce more accurate results than that of existing methods. The proposed calibration method is expected to be utilized in studies that require self-calibration of fisheye lens camera. It is also expected to be applicable to real-time and in-situ system calibration.

keywords : multi-sensor system, system calibration, fish-eye lens camera, self-calibration, data fusion, portable mobile mapping system
Student Number : 2013-30981