

# 다중 2D 레이저 스캐너 시스템의 외부 표정요소 캘리브레이션을 위한 시뮬레이션 기반 표적 배치 결정 기법

## Simulation based Target Geometry Determination Method for Extrinsic Calibration of Multiple 2D Laser Scanning System

주성하<sup>1)</sup> · 윤상현<sup>2)</sup> · 박상윤<sup>3)</sup> · 허준<sup>4)</sup>

Ju, Sungha · Yoon, Sanghyun · Park, Sangyoon · Heo, Joon

### Abstract

Acquiring indoor point cloud, using SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) based mobile mapping system, is an element progress for development of as-built BIM (Building Information Model) for the maintenance of the building. In this research we proposed a simulation-based target geometry determination for extrinsic calibration of multiple 2D laser scanning mobile system. Four different types of calibration sites were designed: (1) circle type; (2) rectangle type; (3) double circle type; and (4) double rectangle type. Based on the measurement values obtained from each simulated calibration site geometry, least squares solution based extrinsic calibration was derived. As a result, the rectangle type geometry is most suitable for extrinsic calibration of this system. Also, correlation values between extrinsic calibration parameters were high, and calibration results were distinct according to the calibration sites.

Keywords : Extrinsic Calibration, 2D Laser Scanning System, Calibration Design, Simulation

### 초 록

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 기반 모바일 매핑 시스템을 활용한 실내 공간의 포인트 클라우드 취득은 건축물의 유지, 관리를 위한 as-built BIM (Building Information Model) 구축의 기초 공정이다. 본 연구에서는 다중 2D 레이저 스캐너로 구성된 모바일 매핑 시스템의 구축을 위한 시뮬레이션 기반 검정(calibration) 표적의 구조 결정 방법을 제안하였다. 2D 레이저 스캐너의 외부 표정요소 검정을 위해 (1) 원형, (2) 사각형, (3) 이중 원형, (4) 이중 사각형 형태의 표적을 구성하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 각 표적 관측 값을 토대로, 최소제곱법 기반의 외부 표정요소 검정을 수행하였다. 그 결과 사각형 형태의 표적 구조가 주어진 시스템의 검정에 가장 적합한 형태임을 확인하였다. 또한 외부 표정요소 간의 높은 상관성을 확인할 수 있었으며, 표적의 구조에 따른 외부 표정요소의 검정 결과가 상이한 것으로 나타났다.

핵심어 : 외부 표정요소 검정, 2D 레이저 스캐닝 시스템, 검정 설계, 시뮬레이션

Received 2018. 09. 12, Revised 2018. 10. 12, Accepted 2018. 11. 13

1) Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail: jsh4907@yonsei.ac.kr)

2) Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail: yoonssa@hotmail.com)

3) Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail: parksangyoon@naver.com)

4) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University (E-mail: jheo@yonsei.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 기 준공된 다양한 토목·건축 구조물의 생애주기 관리를 위해 준공 BIM (as-built BIM)이 각광받고 있다(Golparvar-Fard *et al.*, 2011; Carbonari *et al.*, 2015; Pătrăucean *et al.*, 2015). As-built BIM은 구조물의 3차원 데이터 취득, 유지·관리에 활용 가능한 모델 구축의 과정을 거쳐 제작되며 센서의 활용, 모델 구축 방식과 관련하여 다양한 연구가 진행되고 있다(Dore and Murphy, 2014; Hong *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016). 특히, 지상 레이저 스캐너(terrestrial laser scanner)는 높은 밀도의 3차원 데이터의 취득이 가능하므로 as-built BIM 구축에 많이 활용되고 있지만 (Hong *et al.*, 2012), 대규모 실내 공간에 대한 3차원 데이터 취득을 위해서는 장비의 이동과 데이터 정합과 같은 후처리 과정이 필요하다. 이러한 지상 레이저 스캐너의 한계를 극복하기 위해, 자신의 위치와 주변 환경에 대한 정보를 동시에 취득하는 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 기술을 활용한 레이저 스캐너 기반 모바일 매핑 시스템(MMS: Mobile Mapping System)이 연구되고 있다 (Jung *et al.*, 2015b; Wang *et al.*, 2014). 레이저 스캐너 기반 모바일 매핑 시스템 구축은 as-built BIM 구축에 필요한 고정밀 3차원 데이터를 취득하기 위하여, 다수의 레이저 스캐너 및 모바일 플랫폼 간의 검정(calibration) 과정이 필수적이다. 레이저 스캐너 검정은 내부 표정요소(intrinsic parameter)와 외부 표정요소(extrinsic parameter)의 검정으로 구분된다. 다중 레이저 스캐너를 활용한 시스템의 경우 센서 간 위치(lever-arm) 및 방향(boresight)에 대한 외부 표정요소의 검정이 필요하다. Choi *et al.* (2016) 은 두 대의 2D 레이저 스캐너가 직교한 평면들을 스캔하는 경우, 두 스캔 라인이 서로 같은 평면 위에 있거나 서로 직각이라는 조건을 이용하여 외부 표정요소의 검정을 수행하였다. Fernández-Moral *et al.* (2015) 은 세 대의 2D 레이저 스캐너가 동일 평면에 대한 데이터를 취득하였을 때, 각 스캔 라인들이 모두 같은 평면 위에 있다는 조건을 활용한 외부 표정요소 검정을 수행하였다. 그러나, 기존 연구들은 레이저 스캐너들이 같은 평면을 스캔 할 수 있을 때만 적용이 가능하다는 한계점이 존재하며, 센서 간 상대 위치 및 방향에 따른 외부 표정요소의 분석이 수행되지 않았다.

본 연구에서는 기 개발된 다중 2D 레이저 스캐너 기반 3차원 포인트 클라우드 취득 시스템 (Jung *et al.*, 2015b)의 외부 표정요소 결정을 위한 검정 표적의 최적 구조를 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 시뮬레이션을 통해 4가지의 검정 표적 구조를 구성하였고, 측지 네트워크의 관측 망 디자인 개념을 활용하였으며, 외부 표정요소 간의 상관성을 확인하고 최적의 표적 구조를 결정하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 3차원 포인트 클라우드 취득 시스템

본 연구진은 기존 연구인 Jung *et al.* (2015a), Jung *et al.* (2015b)를 통해 3대의 Hokuyo UTM-30LX 2D 레이저 스캐너와 모바일 플랫폼으로 구성된 3차원 포인트 클라우드 취득 시스템을 구축하였다. 기 개발된 시스템의 주행 성능 향상을 위하여 기존 모바일 플랫폼 보다 높은 동력을 가진 모바일 플랫폼으로의 교체를 진행하였으며, 상단 부 레이저 스캐너의 기하 구조는 기존의 형태를 유지하였다(Fig. 1). 레이저 스캐너는 시스템의 진행 방향과 수평으로 1대, 수직으로 2대 설치되어 있으며, 수평 방향 센서는 SLAM의 입력 데이터로, 수직 방향 센서는 3차원 포인트 클라우드의 구축에 활용된다. 각 센서 (H-수평 센서, L-좌측 수직 센서, R-우측 수직 센서)로부터 취득되는 포인트 (P)에 대한 센서 중심 좌표계 (s) 및 글로벌 좌표계 (g)로의 변환은 다음 Fig. 2와 Eqs. (1) and (2)와 같다(Jung *et al.*, 2015a).



Fig. 1. Laser scanning system for acquiring 3D point cloud

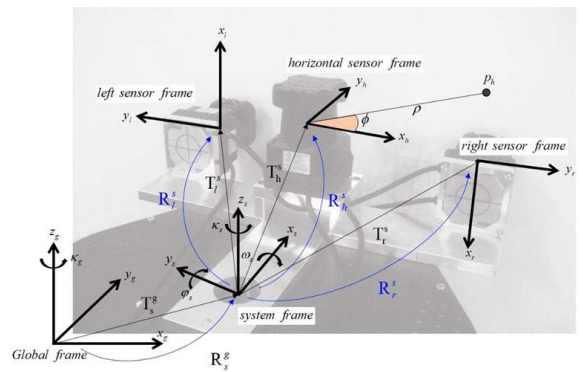


Fig. 2. Design for coordinate system of multiple 2D laser scanning system (Jung *et al.*, 2015a)

$$\begin{aligned}
 H : P_s &= R_h^s P_h + T_h^s \\
 L : P_s &= R_l^s P_l + T_l^s \\
 R : P_s &= R_r^s P_r + T_r^s
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{where } R_{h,l,r}^s = \begin{bmatrix} \cos \kappa_{h,l,r} & -\sin \kappa_{h,l,r} & 0 \\ \sin \kappa_{h,l,r} & \cos \kappa_{h,l,r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_{h,l,r} & 0 & \sin \phi_{h,l,r} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_{h,l,r} & 0 & \cos \phi_{h,l,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_{h,l,r} & -\sin \omega_{h,l,r} \\ 0 & \sin \omega_{h,l,r} & \cos \omega_{h,l,r} \end{bmatrix}$$

and  $R_{h,l,r}^s, T_{h,l,r}^s$  is rotation, translation vector from each sensors to center of the scanning system

$$\begin{aligned} H : P_g &= R_s^g P_{s_h} + T_s^g \\ L : P_g &= R_s^g P_{s_l} + T_s^g \\ R : P_g &= R_s^g P_{s_r} + T_s^g \end{aligned} \quad (2)$$

where  $R_s^g = \begin{bmatrix} \cos \kappa_s & -\sin \kappa_s & 0 \\ \sin \kappa_s & \cos \kappa_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  and  $T_s^g$  is translation vector from global frame to center of the scanning system

세 센서의 설치 형태를 기반으로 초기  $T_{h,l,r}^s, R_{h,l,r}^s$  를 정의하였으며, 스캐닝 시스템의 원점으로부터 각 센서의 위치 요소의 초기값은 H : [0.131, 0, 0.045], L : [0.216, 0.14, 0.04], R : [0.216, -0.14, 0.04]로, 각 센서의 방향 요소의 초기값은 H : [0, 0, 90°], L : [0, 90°, 0], R : [0, 90°, 180°]로 정의하였다.

## 2.2 검정 표적의 구조 및 가상 관측 값 생성

Jung *et al.* (2015a)에서는 사각형 형태의 표적 구조의 단점으로 인하여 원형 형태의 표적 구조를 고안하였으나, 이는 센서와 타겟 간의 거리가 일정하므로 취득 거리와 외부 표정 요소 간의 관계를 고려하지 못하였다는 단점이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 원형 형태, 사각형 형태의 시뮬레이션을 통하여 장비의 형태에 따른 효용성을 확인하고, 취득 거리가 상이한 이중 형태에 대한 시뮬레이션을 통해 취득 거리의 영향을 고려하고자 하였다. 수평방향의 센서와 수직방향의 센서에 대한 검정을 수행하기 위하여 모든 표적 구조는 수평방향과 수직방향으로 구현되었으며, 본 연구에서 생성한 검정 표적의 구조는 총 4가지이다(Fig. 3). Fig. 3(a)는 Jung *et al.* (2015a)의 원형 형태를 시뮬레이션으로 구현한 그림으로, 수

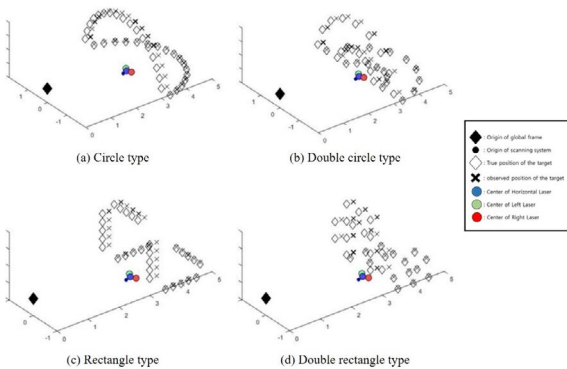


Fig. 3. Geometries of calibration sites simulation

평방향 센서를 위한 원형(반원 형태)과 수직방향 센서를 위한 원형(반원 형태)이 구현된 형태이다. Fig. 3(b)는 동일한 원형 형태를 유지한 상태에서 표적까지의 거리가 다르게 구성되어 있는, 즉 반지름이 상이한 원형이 두개가 존재하는 형태의 이중 원형 형태이다. Fig. 3(c)는 사각형 형태, Fig. 3(d)는 마찬가지로 사각형 형태를 유지한 상태에서 표적까지의 거리를 다르게 구성한 이중 사각형 형태의 표적 구조다.

글로벌 좌표계의 원점을 기준으로 스캐닝 시스템의 중심을 결정하였고, 정의된  $T_h^s, T_l^s, T_r^s$  을 통해 글로벌 좌표계에서의 각 센서의 위치를 결정하였다. 사각형 형태 구조의 표적은 스캐닝 시스템 중심 좌표를 기준으로 한 변의 길이가 2m 인 사각형을 구성하여 15개의 표적을 일정 거리마다 생성하였고, 원형 형태의 표적 배치는 사각형 형태 구조의 센서-표적 간 평균 거리(1.6351 m)를 반지름으로 하는 원을 구성하여 거리가 일정하도록 생성하였다. 각 센서의 위치로부터 표적까지의 거리를 통해 각 센서로부터 취득되는 가상의 관측 값을 생성하였다. 하나의 표적 당 20개의 관측 값을 생성하고, 센서 측정 정밀도 반영을 위하여 Hokuyo UTM-30LX 2D센서가 가진 오차 ( $e \sim (\mu, \sigma) = (0, 3mm)$ )를 노이즈로 추가하였다.

## 2.3 최소제곱법을 통한 외부 표정요소 도출

가상 관측 값과 정의된 표적의 위치는 Eq. (2)로 나타낼 수 있으며, 각 레이저 스캐너에서 취득한 관측 값과 센서의 외부 표정요소 및 글로벌 좌표계 간의 관계는 Eq. (2)의 행렬식으로부터 Eq. (3)과 같은 비선형 관계식으로 도출할 수 있다 (Jung *et al.*, 2015a).

$$\begin{aligned} P_x &= x_g + \cos \kappa_x (\cos \phi_x \cos \kappa_x x_i - \cos \phi_x \sin \kappa_x y_i + x_i + v_{offset}) \\ &\quad - \sin \kappa_x (\cos \phi_x \sin \kappa_x x_i + \sin \phi_x \sin \phi_x \cos \kappa_x x_i + \cos \phi_x \cos \kappa_x y_i - \sin \phi_x \sin \phi_x \sin \kappa_x y_i + y_i) \\ P_y &= y_g + \sin \kappa_x (\cos \phi_x \cos \kappa_x x_i - \cos \phi_x \sin \kappa_x y_i + x_i + v_{offset}) \\ &\quad + \cos \kappa_x (\cos \phi_x \sin \kappa_x x_i + \sin \phi_x \sin \phi_x \cos \kappa_x x_i + \cos \phi_x \cos \kappa_x y_i - \sin \phi_x \sin \phi_x \sin \kappa_x y_i + y_i) \\ P_z &= z_g + \sin \phi_x \sin \kappa_x x_i - \cos \phi_x \sin \phi_x \cos \kappa_x x_i + \sin \phi_x \cos \kappa_x y_i + \cos \phi_x \sin \phi_x \sin \kappa_x y_i + y_i + h_{offset} \end{aligned} \quad (3)$$

관측 값 생성 과정에서의 표적의 기하와 센서 중심 사이의 수평, 수직 방향의 이격 정도 ( $v_{offset}, h_{offset}$ )가 결정되고, Eq. (3)으로부터 비선형 최소제곱법을 통하여 외부 표정요소 ( $T_h^s, T_l^s, T_r^s, R_h^s, R_l^s, R_r^s, R_{h,l,r}^s$ ) 를 계산할 수 있으며, 선형화를 통하여 Eq. (4)와 같은 형태의 자코비안 행렬(Jacobian matrix)을 포함한 시스템 방정식이 도출된다. Eq. (4)를 기반으로 최소제곱법에 의한 조정을 수행함으로써 모든 센서에 대해 총 9개의 표정요소를 도출할 수 있었다.

$$J \xi = Y + v \quad (4)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \beta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \phi_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \kappa_1} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \beta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \phi_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \kappa_1} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \beta_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \phi_1} & \frac{\partial P_3}{\partial \kappa_1} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \beta_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \phi_1} & \frac{\partial P_4}{\partial \kappa_1} \\ \frac{\partial P_5}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \beta_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \gamma_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \omega_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \phi_1} & \frac{\partial P_5}{\partial \kappa_1} \\ \frac{\partial P_6}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial P_6}{\partial \beta_2} & \frac{\partial P_6}{\partial \gamma_2} & \frac{\partial P_6}{\partial \omega_2} & \frac{\partial P_6}{\partial \phi_2} & \frac{\partial P_6}{\partial \kappa_2} \\ \frac{\partial P_7}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \beta_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \gamma_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \omega_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \phi_2} & \frac{\partial P_7}{\partial \kappa_2} \\ \frac{\partial P_8}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial P_8}{\partial \beta_2} & \frac{\partial P_8}{\partial \gamma_2} & \frac{\partial P_8}{\partial \omega_2} & \frac{\partial P_8}{\partial \phi_2} & \frac{\partial P_8}{\partial \kappa_2} \\ \frac{\partial P_9}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial P_9}{\partial \beta_2} & \frac{\partial P_9}{\partial \gamma_2} & \frac{\partial P_9}{\partial \omega_2} & \frac{\partial P_9}{\partial \phi_2} & \frac{\partial P_9}{\partial \kappa_2} \\ \frac{\partial P_{10}}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial P_{10}}{\partial \beta_2} & \frac{\partial P_{10}}{\partial \gamma_2} & \frac{\partial P_{10}}{\partial \omega_2} & \frac{\partial P_{10}}{\partial \phi_2} & \frac{\partial P_{10}}{\partial \kappa_2} \\ \frac{\partial P_{11}}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial P_{11}}{\partial \beta_3} & \frac{\partial P_{11}}{\partial \gamma_3} & \frac{\partial P_{11}}{\partial \omega_3} & \frac{\partial P_{11}}{\partial \phi_3} & \frac{\partial P_{11}}{\partial \kappa_3} \\ \frac{\partial P_{12}}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \beta_3} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \gamma_3} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \omega_3} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \phi_3} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \kappa_3} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \beta_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \gamma_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \omega_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \phi_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \kappa_3} \\ \frac{\partial P_{14}}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial P_{14}}{\partial \beta_3} & \frac{\partial P_{14}}{\partial \gamma_3} & \frac{\partial P_{14}}{\partial \omega_3} & \frac{\partial P_{14}}{\partial \phi_3} & \frac{\partial P_{14}}{\partial \kappa_3} \\ \frac{\partial P_{15}}{\partial \alpha_3} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \beta_3} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \gamma_3} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \omega_3} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \phi_3} & \frac{\partial P_{15}}{\partial \kappa_3} \end{bmatrix}$$

where  $\xi$  is approximated correction of boresight parameters,  $Y$  is difference between the computational value of the model and observation, and  $v$  is residual.

2.4 공분산 행렬 및 상관계수 분석

본 연구에서는 측지 네트워크 디자인 방법론을 적용하여 검정 표적 구조를 평가하고자 하였다. 측지 네트워크 최적화를 위한 네트워크 디자인은 측지학 분야의 고전적인 문제 중 하나이며 (Berné and Baselga, 2004), 측지 네트워크의 최적화 문제를 Grafarend (1974)는 4단계로 구분하여 정의하였다. ZOD (Zero-Order Design)는 전체 측지 네트워크의 오류를 최소화할 수 있는 기준점을 정의하고, FOD (First-Order Design)은 네트워크의 구성에 대한 디자인으로, 관측지점의 위치와 관측 값에 대한 최적화를 수행한다. SOD (Second-Order Design)은 관측 값의 가중치 행렬(weight matrix)에 대한 디자인이며, TOD (Third-Order Design)는 주어진 네트워크에서 관측지점 및 관측 값을 추가하여 최적 네트워크 밀도를 구성한다. 이 중 FOD는 관측지점의 네트워크 구성에 대한 디자인으로, 주어진 조건 하에서 관측지점의 최적화된 구조를 구성하고자 하는 방법론이다 (Amiri-Simkooei et al., 2012). 본 연구에서는 공분산 행렬을 통해 관측지점의 네트워크 구조를 평가하는 FOD를 적용하여, 검정을 위한 표적의 구조를 평가하였다.

공분산 행렬은 네트워크의 오차를 표현하는 오차 타원의 부피와 관계되므로, FOD에서는 주로 공분산 행렬의 대각합(trace), 행렬식(determinant), 그리고 고유값(eigenvalue) 등의 최소화를 통하여 네트워크 구성의 최적화를 수행한다 (Berné and Baselga, 2004; Amiri-Simkooei et al., 2012). 따라서, 본 연구에서는 각 검정 표적의 구조로부터 최적의 외부 표정요소를 도출하기 위해 최소제곱법 모델의 공분산 행렬의 대각합과 고유값을 기반으로 구조를 평가하였다. 또한, 표정요소 간 상관성 분석을 위해 가상의 관측값에 대한 reference variance( $S_0^2$ )를 1로 설정하고, 상관계수 행렬을 도출하였다(Eq. (5)).

$$S^2 = S_0^2 (J^T J)^{-1} \tag{5}$$

3. 실험 결과 및 분석

3.1 외부 표정요소의 상관성 분석

4가지 구조의 시뮬레이션 검정을 통해 도출된 공분산 행렬의 대각합과 최대 고유값은 Table 1과 같으며, 공분산 행렬로부터 도출된 상관계수 행렬을 Fig. 4로 도식화 하였다. Fig. 4는 상관계수 행렬을 도식화 한 그림으로써, 각 요소 별 상관 계수가 0에 가까울수록 어둡게, 상관계수가 1 또는 -1에 가까울수록 밝게 표현 되어 각 요소 간의 상관성을 쉽게 파악할 수 있다.

Table 1. Trace and largest eigenvalue of covariance matrix

Simulations	Trace	Largest eigenvalue
Circle	93.76	93.51
Double Circle	82.34	82.17
Rectangle	78.23	78.06
Double Rectangle	111.51	111.31

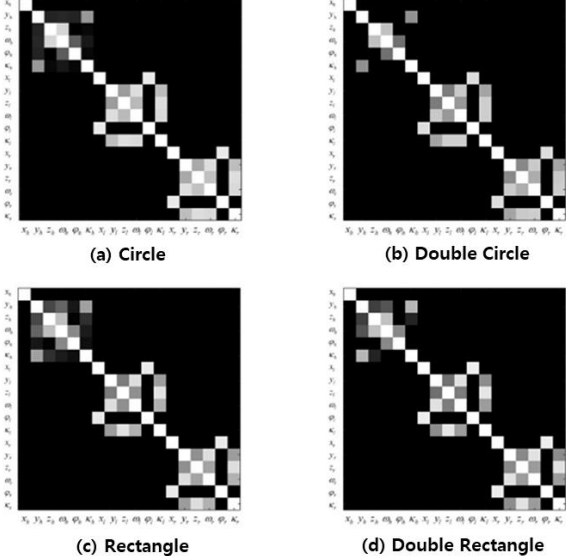


Fig. 4. Correlation matrices of simulation

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 수평 방향 센서의 외부 표정요소 간 상관성은  $z_h$ 와  $\omega_h$ 가 가장 높은 것으로 나타났으며, 특히 센서의 방향을 나타내는 표정요소에 대한 상관성이 높게 나타났다. 이는 수평 방향 센서의 검정에서 사용되는 수평 방향 표적들이 서로 같은 높이에 존재하므로, 수평 방향 센서에 대하여 편중된

기하 구조를 가진 관측값이 외부 표정요소 표정에 사용되기 때 문이라고 해석할 수 있다. 수직 방향 센서의 경우  $x_{l,r}$ 와  $\varphi_{l,r}$ 가 가장 상관성이 높으며,  $\kappa_{l,r}$ 와  $\omega_{l,r}$ 는 서로 다른 3개의 표정요소 와 상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 수직 방향 표적의 경우 X축에 대한 관측 값이 거의 동일하게 관측되므로 이에 따른 영 향일 것으로 해석이 가능하다. 한편 원형 구조에 비해 사각형 구 조에서 수평 방향 센서의  $y$ ,  $z$ 와 다른 표정요소들 간에 높은 상 관성을 나타냈으며, 이는 수평 방향 센서의 위치와 방향 표정요 소 간의 상관성에 대해 원형 형태가 유리함을 의미한다. 그러나 사각형 형태에 비하여 원형 형태의 구조가 전체적으로 상관계수 가 높게 나타났기 때문에 원형 형태가 외부 표정요소를 도출하 는 데에 있어 적합하다고 볼 수는 없다.

Table 1을 통해 모든 구조의 공분산 행렬의 대각합과 최대 고 유값의 크기가 거의 같으며, 대각합의 크기가 약간 큰 것을 확인 할 수 있었다. 기존 공분산 행렬은 대각합의 값이 가장 큰 고유값 보다 크다는 성질을 가지고 있으나, Table 1에서는 그 크기가 거 의 같으므로 특정 표정요소들에 의한 높은 상관성으로 인한 결 과로 보여 진다. 또한, 시뮬레이션 과정에서 표적의 관측 값에 대 한 오차를 부여하였는데, 공분산을 구성하는 행렬의 값이 관측 오차에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 이러한 문제는 시스 템 방정식의 랭크부족(rank-deficient) 또는 ill-posed problem으 로써 외부 표정요소 간 높은 상관성으로 인한 결과로 볼 수 있다.

### 3.2 제약 최소제곱법(constrained LEASS: constrained Least Squares Solution)을 통한 검정

본 연구에서의 시스템 방정식은 랭크 부족 문제로 인하여 일 반 최소제곱법으로는 해가 정상적으로 수렴하지 않았다(Jung *et al.*, 2015a). Lichti and Chow (2013)는 이러한 문제에 대한 해결 방법으로 3차원 공간상의 비선형 관계를 가지는 3개의 고정 타 겿 좌표의 취득 또는 일부 외부표정 요소의 고정, 또는 상호 직 교 관계의 3개 평면의 매개 변수를 통한 표정 요소 고정 방법을 제시하였다. 본 레이저 스캐닝 시스템은 2D 레이저 스캐너의 수 직, 수평 방향의 직교 조합으로 이루어져 있어 비선형 좌표 취득 에 한계가 있다.

일부 외부표정 요소의 고정 방법은 조정 시 표정 요소의 변

화 폭이 크지 않을 경우 사용할 수 있으며(Papo and Perelmuter, 1980; Dermanis, 1994), 레이저 스캐너의 조정 시에도 랭크부족 문제 해결을 위해 사용된다 (Gielsdorf *et al.*, 2008). 본 연구에서 각 스캐너의 물리적 위치와 방향은 전체 시스템 위에 고정되어 있으며 조정 시 표정요소 값의 변화가 크지 않으므로, 상관성 분 석을 통해 높은 상관성을 보이는 일부 표정요소를 고정하여 시 스템 방정식의 해를 구할 수 있는 방식인 제약 최소제곱법 기반 검정을 수행하였다.

수평 방향 센서의 경우 외부 표정요소 중 가장 상관성이 높은 것으로 확인되었던  $\omega_h$ 를 고정하였으며, 수직 방향 센서의 경우 다른 세 표정요소와 상관성을 보였었던  $\kappa_l$ ,  $\kappa_r$ 를 고정하였다. 세가지 표정요소를 고정된 상태로 수행되는 제약 최소제곱법에 의한 검정 결과는 Tables 2 and 3과 같다.

본 비선형 제약 최소제곱법의 해를 도출하기 위한 반복적 선 형화 과정에서 10번의 반복 횟수 내에, 현재 반복에서의 조정 값 의 증분과 이전 반복에서의 조정 값의 증분의 차이가  $10^{-6}$  이내 인 경우를 수렴 조건으로 설정하였으며, 4가지 표적 구조 방식 모두에 대하여 수렴 조건을 만족하였다. Tables 2 and 3의 초기 값과 조정 값을 통하여 각 경우에 대한 조정 전후의 외부 표정요 소의 차이를 확인할 수 있다. Table 2의 결과에서, 일부 위치 관 련 표정요소는 약  $\pm 1.5$  mm 가량의 조정이 이루어졌으며 4가지 시뮬레이션 모두 그 값과 방향이 일정하였다. 또한, Table 3의 결 과에서도 아주 작은 값으로 일부 표정요소들의 조정이 이루어 진 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 3차원 수직, 수평 센서 의 위치 ( $x_{h,l,r}$ ,  $y_{h,l,r}$ ,  $z_{h,l,r}$ )와 방향 ( $\omega_{h,l,r}$ ,  $\varphi_{h,l,r}$ ,  $\kappa_{h,l,r}$ )에 대한, 총 18개 모든 외부 표정요소에 대한 조정을 수행하여 Jung *et al.* (2015a)와 차별성을 두었다.

또한 공분산 및 상관계수 행렬을 도출하여 수직, 수평 센서가 가지는 외부 표정요소 간의 상관관계 분석을 수행하였다. Fig. 5 는 제약 최소제곱법의 상관계수 행렬로, 고정된 표정요소 ( $\omega_h$ ,  $\kappa_l$ ,  $\kappa_r$ )를 제외한 15개 표정요소들 간의 상관성을 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯, 표정요소의 고정을 통해 수평 방향에서 는  $y_h - \kappa_h$ ,  $z_h - \varphi_h$  간의 상관성을 제외한 다른 표정요소 간 상 관성이 사라졌으며, 수직 방향에서는  $x_{l,r} - \varphi_{l,r}$ ,  $y_{l,r} - \omega_{l,r}$  간의 상관성을 제외한 대부분의 상관성이 사라진 것으로 나타났다.

Table 2. Result of deducting extrinsic orientation parameters by constrained LEASS (lever-arm)

(unit: m)	Horizontal sensor (H)			Vertical sensor (L)			Vertical sensor (R)			Convergence
	$x_h$	$y_h$	$z_h$	$x_l$	$y_l$	$z_l$	$x_r$	$y_r$	$z_r$	
Initial value	0.1310	0	0.0450	0.2160	0.1400	0.0400	0.2160	-0.1400	0.0400	-
Circle	0.1295	0.0015	0.0450	0.2160	0.1385	0.0415	0.2160	-0.1385	0.0386	O
Double circle	0.1295	0.0015	0.0450	0.2160	0.1384	0.0415	0.2160	-0.1385	0.0385	O
Rectangle	0.1295	0.0014	0.0450	0.2160	0.1385	0.0416	0.2160	-0.1385	0.0384	O
Double rectangle	0.1295	0.0016	0.0450	0.2160	0.1387	0.0415	0.2160	-0.1384	0.0384	O

**Table 3. Result of deducting extrinsic orientation parameters by constrained LESS (Boresight)**

(unit: °)	Horizontal sensor (H)			Vertical sensor (L)			Vertical sensor (R)			Convergence
	$\omega_h^*$	$\varphi_h$	$\kappa_h$	$\omega_l$	$\varphi_l$	$\kappa_l^*$	$\omega_r$	$\varphi_r$	$\kappa_r^*$	
Initial value	0	0	-90	0	90	0	0	90	-180	-
Circle	0.0000	0.0000	-90.0041	-0.0044	90	0.0000	0.0012	90	-180	O
Double circle	0.0000	0.0000	-90.0010	0.0004	90	0.0000	0.0019	90	-180	O
Rectangle	0.0000	0.0000	-89.9967	-0.0035	90	0.0000	0.0039	90	-180	O
Double rectangle	0.0000	0.0000	-89.9996	0.0066	90	0.0000	0.0021	90	-180	O

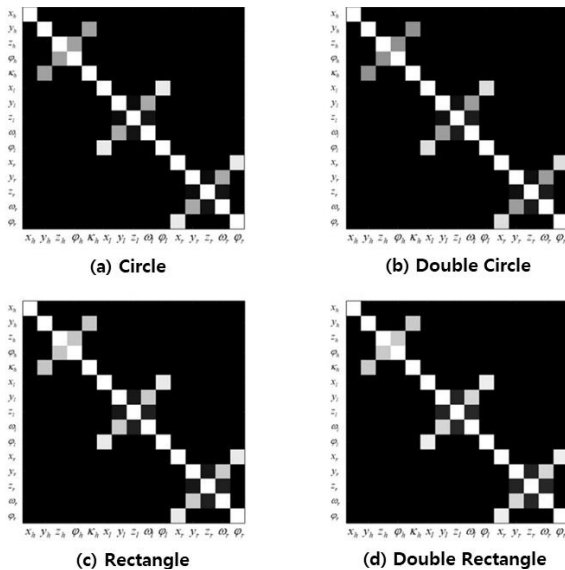
방향 관련 표정요소들 간의 상관성도 사라진 것으로 나타났는데, 이로 인하여 ill-posed problem이 해결되었으며 안정적인 해의 수렴이 나타난 것으로 볼 수 있다. 고정되지 않은 방향 관련 표정요소들과 일부 위치 관련 표정요소 간의 상관성이 남아 있으나, 조정 시 표정요소의 변화가 크지 않으며 기하적으로 고정된 시스템에서 일부 표정요소의 고정을 통하여 4가지 표적 구조 모두에게서 안정적으로 외부 표정요소를 도출 하였으므로 검정에 큰 영향이 없는 것으로 판단할 수 있다.

제약 최소제곱법의 공분산 행렬은 표적 노이즈의 크기로 설명이 가능한 수준의 값으로 나타났다. FOD에서 공분산 행렬의 대각합과 고유값의 최소화는 네트워크 시스템 방정식의 관측값에 대한 오차의 최소화를 뜻하므로 (Berné and Baselga, 2004; Amiri-Simkooei et al., 2012), 대각합과 고유값이 작은 검정 표적 구조가 최적화된 검정 결과를 도출할 것으로 판단된다. 이를 기반으로, 4가지 검정 표적 구조 중에서 일반 사각형 형태가 최적화된 외부 표정요소 검정의 표적 구조로 결정할 수 있었다.

**4. 결론**

본 연구는 연구진이 개발한 3차원 포인트 클라우드 취득 시스템의 외부 표정요소 도출을 위한 최적의 검정 표적 기하 구조를 위해 시뮬레이션 기반 분석을 수행하고 각 레이저 스캐너의 외부 표정요소들의 상관성과 검정 표적 기하 구조에 대한 비교를 수행하였다. 총 4가지 검정 표적 기하 구조를 구성하였으며, 가상의 관측값 기반 검정을 수행하였다. 또한, 구조 분석을 위하여 측지 네트워크 디자인의 FOD 개념을 활용하여 상대적인 비교를 수행하였으며, 공분산 행렬 및 상관계수 행렬을 활용하여 외부 표정요소에 대한 상관성을 확인하였다.

상관계수 행렬과 공분산 행렬을 통하여 방향 관련 표정요소에 의한 높은 상관성이 존재하는 것을 확인하였으며, 표정요소 간 높은 상관성으로 인하여 표적 기하 구조의 비교가 불가능한 것을 확인하였고, 이에 따라 높은 상관성을 가지는 수평 방향 센서와 수직 방향 센서의 방향 관련 표정요소 3개를 고정된 제약 최소제곱법 기반 조정을 통해 안정적인 검정 결과를 도출하였다. 또한, 사각형 형태의 타겟 구조가 해당 시스템에 적합한 구조임을 확인할 수 있었다. 향후에는 표적의 기하 구조 뿐만 아니라 측정 횟수, 표적 개수 및 형태 등 복합적인 요소를 고려한 시뮬레이션 방법을 제안하고자 하며, 수평 방향 센서의 추가와 같이 다중 센서 자체의 구조에 대한 시뮬레이션을 통해 검정 측면에서의 다중 2D 레이저 스캐너의 최적 배치에 대한 분석까지 시도할 것이다.



**Fig. 5. Correlation matrices of simulation based on constrained LESS**

**Table 4. Trace and largest eigenvalue of covariance matrix based on constrained least square method**

	Trace	Largest eigenvalue
Circle	$8.47 \cdot 10^{-8}$	$2.98 \cdot 10^{-8}$
Double Circle	$8.50 \cdot 10^{-8}$	$2.93 \cdot 10^{-8}$
Rectangle	$6.28 \cdot 10^{-8}$	$1.61 \cdot 10^{-8}$
Double Rectangle	$7.24 \cdot 10^{-8}$	$1.81 \cdot 10^{-8}$

## 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1A2B2009160)

## References

- Amiri-Simkooei, A.R., Asgari, J., Zangeneh-Nejad, F., and Zaminpardaz, S. (2012), Basic concepts of optimization and design of geodetic networks, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 172-183.
- Berné, J.L. and Baselga, S. (2004), First-order design of geodetic networks using the simulated annealing method, *Journal of Geodesy*, Vol.78, No. 1-2, pp. 47-54.
- Carbonari, G., Stravoravdis, S., and Gausden, C. (2015), Building information model implementation for existing buildings for facilities management: a framework and two case studies, In: L. Mahdjoubi, C.A. Brebbia, and R. Laing (eds.), *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations*, WIT Press, Southampton, UK, pp. 149, 395-406.
- Choi, D.G., Bok, Y., Kim, J.S., and Kweon, I.S. (2016), Extrinsic calibration of 2-D lidars using two orthogonal planes, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 1, pp. 83-98.
- Dore, C. and Murphy, M. (2014), Semi-automatic generation of as-built BIM facade geometry from laser and image data, *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Vol. 19, No. 2, pp. 20-46.
- Dermanis, A. (1994), The photogrammetric inner constraints, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 1, pp. 25-39.
- Gielsdorf, F., Gründig, L., and Milev, I. (2008), Deformation analysis with 3D laser scanning, *In Proceedings of the 13th FIG Symposium*, 12-15 May, Lisbon, Spain, pp. 1-9.
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., and Savarese, S. (2011), Integrated sequential as-built and as-planned representation with D 4 AR tools in support of decision-making tasks in the AEC/FM industry, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 137, No. 12, pp. 1099-1116.
- Grafarend, E.W. (1974), Optimization of geodetic networks, *Bolletino di Geodesia a Science Affini*, Vol. 33, No. 4, pp. 351-406.
- Grafarend, E.W. and Sansò, F. (Eds.). (2012), *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Springer Science & Business Media, Berlin.
- Hong, S., Jung, J., Kim, S., Cho, H., Lee, J., and Heo, J. (2015), Semi-automated approach to indoor mapping for 3D as-built building information modeling, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 51, pp. 34-46.
- Hong, S., Park, I., Heo, J., and Choi, H. (2012), Indoor 3D Modeling Approach based on Terrestrial LiDAR, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5D, pp. 527-532. (in Korean with English abstract)
- Jung, J., Kim, J., Yoon, S., Kim, S., Cho, H., Kim, C., and Heo, J. (2015a), Bore-sight calibration of multiple laser range finders for kinematic 3D laser scanning systems, *Sensors*, Vol. 15, No. 5, pp. 10292-10314.
- Jung, J., Yoon, S., Ju, S., and Heo, J. (2015b), Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM, *Sensors*, Vol. 15, No. 10, pp. 26430-26456.
- Lichti, D.D. and Chow, J.C. (2013), Inner constraints for planar features, *The Photogrammetric Record*, Vol. 28, No. 141, pp. 74-85.
- Papo, H. and Perelmuter, A. (1980), Free net analysis of storage tank calibration, *In 14th International Congress of the ISPRS, Commission*, Vol. 1980, pp. 593-602.
- Pătrăucean, V., Armeni, I., Nahangi, M., Yeung, J., Brilakis, I., and Haas, C. (2015), State of research in automatic as-built modelling, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 29, No. 2, pp. 162-171.
- Wang, Y.K., Huo, J., and Wang, X.S. (2014), A real-time robotic indoor 3D mapping system using dual 2D laser range finders, *Chinese Control Conference - 2014*, 28-30 July, Nanjing, China, pp. 8542-8546.
- Yang, J., Shi, Z.K., and Wu, Z.Y. (2016), Towards automatic generation of as-built BIM: 3D building facade modeling and material recognition from images, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 13, No. 4, pp. 338-349.