

선형을 이용한 쿼터니언 기반의 3차원 점군 데이터 등록 Registration of Three-Dimensional Point Clouds Based on Quaternions Using Linear Features

김의명¹⁾ · 서홍덕²⁾

Kim, Eui Myoung · Seo, Hong Deok

Abstract

Three-dimensional registration is a process of matching data with or without a coordinate system to a reference coordinate system, which is used in various fields such as the absolute orientation of photogrammetry and data combining for producing precise road maps. Three-dimensional registration is divided into a method using points and a method using linear features. In the case of using points, it is difficult to find the same conjugate point when having different spatial resolutions. On the other hand, the use of linear feature has the advantage that the three-dimensional registration is possible by using not only the case where the spatial resolution is different but also the conjugate linear feature that is not the same starting point and ending point in point cloud type data. In this study, we proposed a method to determine the scale and the three-dimensional translation after determining the three-dimensional rotation angle between two data using quaternion to perform three-dimensional registration using linear features. For the verification of the proposed method, three-dimensional registration was performed using the linear features constructed an indoor and the linear features acquired through the terrestrial mobile mapping system in an outdoor environment. The experimental results showed that the mean square root error was 0.001054m and 0.000936m, respectively, when the scale was fixed and if not fixed, using indoor data. The results of the three-dimensional transformation in the 500m section using outdoor data showed that the mean square root error was 0.09412m when the six linear features were used, and the accuracy for producing precision maps was satisfied. In addition, in the experiment where the number of linear features was changed, it was found that nine linear features were sufficient for high-precision 3D transformation through almost no change in the root mean square error even when nine linear features or more linear features were used.

Keywords : Three-dimensional Transformation, Linear Feature, Quaternion, Terrestrial Mobile Mapping System, Absolute orientation, Precise Road Map

초 록

3차원 등록은 서로 다른 좌표계를 갖거나 좌표계가 없는 데이터를 기준 좌표계로 일치시키는 과정으로 사진측량의 절대표정, 정밀도로지도 제작을 위한 데이터 결합 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 3차원 등록은 점을 이용하는 방법과 선형을 이용하는 방법으로 구분이 된다. 점을 이용할 경우 서로 다른 공간해상도를 갖는 경우 동일한 공역점을 찾기 어려운 문제가 있다. 이에 반해 선형을 이용할 경우 공간해상도가 다른 경우 뿐만 아니라 점군 형태의 데이터에서 시작점과 끝점이 같지 않은 공역의 선형을 이용하여 3차원 등록이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 선형을 이용하여 3차원 등록을 수행하기 위해서 쿼터니언을 이용하여 두 데이터 간의 3차원 회전각을 결정한 후 축척과 3차원 이동량을 결정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 검증에 위해 실내에서 구축한 선형과 실외 환경의 지상 모바일매핑시스템을 통해 취득한 선형을 이용하여 3차원 등록을 각각 수행하였다. 실험결과, 실내 데이터를 이용한 경우 축척을 고정한 경우와 고정하지 않은 경우 평균제곱근오차는 각각 0.001054m와 0.000936m로 나타났다. 실외 데이터를 이용하여 500m 구간에서 3차원 변환을 수행한 결과 6개의 선형을 이용하였을 경우 평균제곱근오차는 0.09412m로 나타났으며 정밀도로지도 제작을 위한 정확도를 만족하는 것을 알 수 있었다. 또한, 선형의 개수를 변화시킨 실험에서 9개 이상의 선형을 이용할 경우도 평균제곱근오차의 변화가 크지 않은 것을 통해 높은 정확도의 3차원 변환을 위해 9개의 선형으로도 충분한 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 3차원 변환, 선형, 쿼터니언, 지상 모바일매핑시스템, 절대표정, 정밀 도로지도

Received 2020. 03. 04, Revised 2020. 04. 07, Accepted 2020. 04. 18

1) Corresponding Author, Member, Department of Spatial Information Engineering, Professor, Namseoul University (E-mail: kemyoung@nsu.ac.kr)

2) Member, Department of Spatial Information Engineering, M.S. Student, Namseoul University (E-mail: seong23@gmail.com)

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

지상 모바일매핑시스템(MMS: Mobile Mapping System)을 이용한 정밀도로지도 구축과 이 기준 센서를 이용한 3차원 데이터 생성 등의 과정에서 서로 다른 좌표계에서 생성한 데이터를 동일한 좌표계로 일치시키기 위해 절대표정(absolute orientation) 또는 일종의 3차원 데이터 등록(registration)을 수행해야 한다. 3차원 데이터의 등록방법은 크게 점을 이용하는 방법과 선형을 이용하는 방법이 주로 사용된다.

점을 이용하여 3차원 데이터를 등록하는 대표적인 방법인 ICP (Iterative Closest Point) 알고리즘은 두 점군 집합에서 점들 간의 거리를 최소화하는 조건으로 정합 쌍을 찾은 다음 공분산 행렬을 계산하여 3차원 등록을 위한 이동량과 회전각을 알아내는 방법이다(Besl and McKay, 1992). 이와 관련된 연구에는 노이즈가 있는 점을 등록하기 위한 ICP 알고리즘 제안 연구 (Du *et al.*, 2015), 특징점 기반의 ICP 알고리즘을 이용한 2차원 격자지도를 보정하는 연구(Hwang *et al.*, 2015), 3D 레이저 스캐너를 통해 취득되는 점군 데이터를 ICP와 형상정합을 수행하여 정확도를 분석하는 연구(Park and Um, 2020), GPS (Global Positioning System)와 IMU (Inertial Measurement Unit) 정보를 활용하여 초기 정합을 수행한 후, ICP를 이용한 정밀정합을 수행하는 연구(Lee and Ko, 2018), 필터링된 점군 데이터를 이용하여 kd-tree와 ICP를 통해 정합을 수행하는 연구(Shi *et al.*, 2020), 점군의 곡률, 밀도와 같은 기하학적 특징을 이용한 정합 연구 등이 있었다(He *et al.*, 2017).

기존의 연구사례를 통해 ICP 알고리즘을 이용할 경우 일정 패턴을 가진 지형일 경우 상호간의 공분산 계산하기 어렵기 때문에 왜곡이 발생할 수 있으며, 점군을 이용하여 3차원 데이터를 등록할 때 중복되는 점들로 인하여 잘못된 공액점을 추출하는 문제가 발생할 수 있다(Lee, 2015; Poreba and Goulette, 2015). 또한, 점군에 평면정보가 적거나 특이점 그리고 데이터의 누락이 있는 경우 알고리즘의 성능을 저하시킬 수 있다(Kim *et al.*, 2014; Qin *et al.*, 2015).

따라서, 본 연구에서는 지상 MMS와 같이 점군 형태로 취득된 데이터를 기준 좌표계로 변환할 때 동일한 공액점을 찾기 어려운 문제점을 해결하기 위해서 선형을 이용하여 3차원 데이터를 등록하는 방법을 제안하는 것을 목적으로 하였다.

2. 쿼터니언 기반의 선형을 이용한 3차원 등록

쿼터니언 기반의 선형을 이용한 3차원 등록 과정은 Fig. 1과 같다. 기준 데이터와 모델 데이터에서 서로 정합되는 선형

이 입력데이터로 들어오면 3차원 등록을 위한 매개변수의 초기값을 계산한다. 그리고 나서 쿼터니언을 이용하여 3차원 회전각을 계산하고 그 다음으로 축척과 3차원 이동량을 계산하는 순서로 이루어진다.

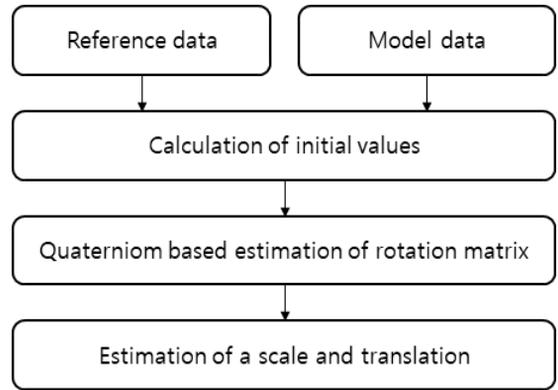


Fig. 1. Research flowchart

따라서, 2.1절에서 선형을 이용한 3차원 데이터 등록 및 초기값 계산, 2.2절에서 쿼터니언을 이용한 회전행렬의 추정에 대해 기술하였다. 또한, 2.3절에서는 축척계수와 3차원 이동량의 추정에 대해서 기술하였다.

2.1 선형을 이용한 3차원 등록식과 초기값

선형을 이용한 3차원 데이터 등록은 Fig. 2와 같이 모델(model) 선형을 기준(reference) 선형에 맞게 회전하고 이동시켰을 때 두 선형이 동일 벡터 선상에 존재한다는 것에 기초한다. 모델 선형을 나타내는 벡터와 기준 선형을 나타내는 벡터가 동일한 벡터 선상에 놓여 있다면 Fig. 2와 같이 좌표계가 일치하는 것을 알 수 있다.

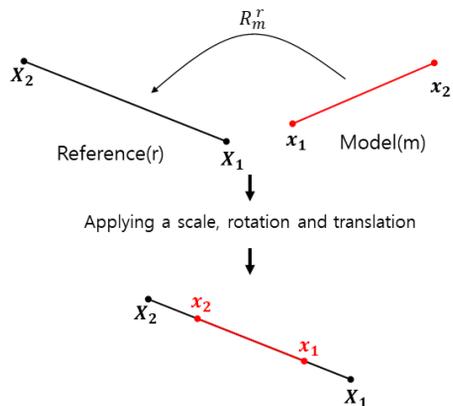


Fig. 2. Three-dimensional registration using linear features

Fig. 2에서 서로 다른 좌표계 상의 선형 데이터를 이용하여 좌표계를 일치시키기 위한 3차원 등록을 위한 일반식은 Eq. (1)과 같다(Habib *et al.*, 2005; He and Habib, 2016).

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + sR_m^r \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \lambda_1 \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + sR_m^r \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

where, $[X_T, Y_T, Z_T]^T$ is a translation vector between the origins of the model and reference coordinate system, s is a scale factor, R_m^r is a three-dimensional rotation matrix from the model coordinate system to the reference coordinate system, subscript 1 is the start point of a vector, subscript 2 is the end point of a vector, $[x, y, z]^T$ is a three-dimensional model coordinate, and $[X, Y, Z]^T$ is a three-dimensional reference coordinate.

3차원 등록을 위해서는 축척, 3차원 회전량, 3차원 이동량의 7개 매개변수가 필요하다. 이 중에서 축척계수의 초기값 (s_0)은 Eq. (2a)와 같이 기준 좌표계와 모델좌표계의 중심점을 각각 구한 후 중심점간의 비율을 이용하여 추정할 수 있고, 3차원 이동량의 초기값(X_T^0, Y_T^0, Z_T^0)은 Eq. (2b)와 같이 두 좌표계의 중심점의 거리 차를 이용하여 추정할 수 있다.

$$s_0 = \frac{\frac{X_c}{x_c} + \frac{Y_c}{y_c} + \frac{Z_c}{z_c}}{3} \quad (2a)$$

$$\begin{bmatrix} X_T^0 \\ Y_T^0 \\ Z_T^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2b)$$

where, $[X_c, Y_c, Z_c]^T$ is the center point of the reference line vector, $[x_c, y_c, z_c]^T$ is the center point of the model line vector, k is the number of points, s_0 is the initial value of a scale, and $[X_T^0, Y_T^0, Z_T^0]^T$ is the initial value of a translation.

2.2 쿼터니언을 이용한 회전행렬

쿼터니언은 초기값을 필요로 하지 않고 3차원 회전행렬을

결정하는 방법이다. 3차원 회전행렬을 결정하기 전에 Eq. (3)과 같이 각 선형의 시작점과 끝점으로 이루어진 3차원 좌표를 선형의 중심점을 이용하여 좌표값을 정규화한다(Michaels, 1999). 이러한 이유는 모델 데이터와 기준 데이터 간의 좌표 값이 매우 큰 값과 매우 작은 값이 공존할 경우 수치적 불안정성으로 인해 역행렬을 구하지 못하는 경우가 발생하기 때문이다.

$$r_n = \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, m_n = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

where, r_n is a normalized reference vector and m_n is a normalized model vector.

쿼터니언을 이용하여 3차원 회전행렬($R_{m_n}^{r_n}$)을 결정하기 위해 Eq. (3)에서 정규화된 모델좌표계를 3차원 회전하여 정규화된 기준좌표계로 변환하는 관계식을 Eq. (4a)와 같이 구성한 후, Eq. (4b)와 같이 잔차(v)에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$r_n = R_{m_n}^{r_n} m_n + v \quad (4a)$$

$$v = r_n - R_{m_n}^{r_n} m_n \quad (4b)$$

where, v represents a residual vector, $R_{m_n}^{r_n}$ represents a three-dimensional rotation matrix from the normalized model coordinate system to the normalized reference coordinate system.

Eq. (4b)와 같이 구성된 잔차에 관한 식을 통해 3차원 회전행렬($R_{m_n}^{r_n}$)을 구하기 위한 잔차를 최소화하는 프로베니우스 놈(frobenius norm)으로 구성하면 Eq. (5)와 같다.

$$\begin{aligned} & \min_{R_{m_n}^{r_n}} \sum_{i=1}^k v_i^T v_i \\ & = \min_{R_{m_n}^{r_n}} \sum_{i=1}^k (r_{n_i} - R_{m_n}^{r_n} m_{n_i})^T (r_{n_i} - R_{m_n}^{r_n} m_{n_i}) \\ & = \min_{R_{m_n}^{r_n}} \sum_{i=1}^k \left\{ (r_{n_i})^T r_{n_i} + (m_{n_i})^T m_{n_i} \right. \\ & \quad \left. - 2 \left\{ (m_{n_i})^T (R_{m_n}^{r_n})^T r_{n_i} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 $(r_{n_i})^T r_{n_i} + (m_{n_i})^T m_{n_i}$ 는 상수의 제곱으로 항상 양수이기 때문에 $(m_{n_i})^T (R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}})^T r_{n_i}$ 가 최대가 되어야 잔차제곱의 합이 최소가 된다. 따라서, Eq. (5)는 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 쿼터니언의 행렬 표현으로 나타내면 Eq. (7)과 같다(Kim, 2018).

$$\max_{R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}}} \sum_{i=1}^k \{ (m_{n_i})^T (R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}})^T r_{n_i} \} \quad (6)$$

$$\max_{\dot{q}} \dot{q}^T \left(\sum_{i=1}^n \bar{C}_{m_{n_i}}^T C_{r_{n_i}} \right) \dot{q} \quad (7)$$

$$\text{where, } \bar{C}_{m_{n_i}}^T = \begin{bmatrix} 0 & x_n & y_n & z_n \\ -x_n & 0 & -z_n & y_n \\ -y_n & z_n & 0 & -x_n \\ -z_n & -y_n & x_n & 0 \end{bmatrix}, C_{r_{n_i}} = \begin{bmatrix} 0 & -X_n & -Y_n & -Z_n \\ X_n & 0 & -Z_n & Y_n \\ Y_n & Z_n & 0 & -X_n \\ Z_n & -Y_n & X_n & 0 \end{bmatrix}$$

Eq. (7)에서 순쿼터니언 행렬 곱의 합으로 이루어진 행렬을 이용하여 모델좌표계에서 기준좌표계로의 3차원 회전행렬($R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}}$)을 구하기 위해서 고유값 분해(eigenvalue decomposition)를 통해 최대 고유값을 갖는 단위 쿼터니언을 이용하여 Eq. (8)을 통해 구할 수 있다(Kim and Choi, 2018).

$$\begin{bmatrix} q_0 & q_x & q_y & q_z \\ -q_x & q_0 & -q_z & q_y \\ -q_y & q_z & q_0 & -q_x \\ -q_z & -q_y & q_x & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 - q_x - q_y - q_z \\ q_x & q_0 & -q_z & q_y \\ q_y & q_z & q_0 & -q_x \\ q_z & -q_y & q_x & q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ 0 & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ 0 & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

where, $q = [q_0 \ q_x \ q_y \ q_z]^T$, $\|q\| = 1$ and q_0 is a real part, (q_x, q_y, q_z) is an imaginary part.

2.3 축척계수와 3차원 이동량

Eq. (8)에서 구한 3차원 회전행렬($R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}}$)을 모델좌표계에서 추출한 선형의 시작점($[x_1, y_1, z_1]^T$)과 끝점($[x_2, y_2, z_2]^T$)을 곱한 벡터의 각 원소를 U, V, W 로 나타내면 Eq. (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} = R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} = R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

where, $R_{m_{n_i}}^{r_{n_i}}$ represents a three-dimensional rotation matrix from the normalized model coordinate system to the normalized reference coordinate system.

Eq. (9)에서 기준 선형과 모델 선형 간의 축척계수와 이동량을 고려하여 기준 선형의 시작점과 끝점을 좌측 항에 두고 재정렬하면 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_1 \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T + s U_1 - X_1 \\ Y_T + s V_1 - Y_1 \\ Z_T + s W_1 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (10a)$$

$$\lambda_2 \begin{bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T + s U_2 - X_1 \\ Y_T + s V_2 - Y_1 \\ Z_T + s W_2 - Z_1 \end{bmatrix} \quad (10b)$$

Eq. (10)에서 축척계수(λ_1, λ_2)를 소거하기 위해 첫 번째, 두 번째 열을 세 번째 열로 나누어 정리하면 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 구하고자 하는 미지수는 축척계수(s)와 이동량(X_T, Y_T, Z_T)이 된다(Habib et al., 2005).

$$\frac{(X_T + s U_1 - X_1)}{(Z_T + s W_1 - Z_1)} = \frac{(X_T + s U_2 - X_1)}{(Z_T + s W_2 - Z_1)} \quad (11a)$$

$$\frac{(Y_T + s V_1 - Y_1)}{(Z_T + s W_1 - Z_1)} = \frac{(Y_T + s V_2 - Y_1)}{(Z_T + s W_2 - Z_1)} \quad (11b)$$

Eq. (11)에서 구하고자 하는 미지수를 중심으로 비선형방정식을 정리하면 Eq. (12)와 같다.

$$F_1 = (X_T + s U_1 - X_1)(Z_T + s W_2 - Z_1) - (Z_T + s W_1 - Z_1)(X_T + s U_2 - X_1) \quad (12a)$$

$$F_2 = (Y_T + s V_1 - Y_1)(Z_T + s W_2 - Z_1) - (Z_T + s W_1 - Z_1)(Y_T + s V_2 - Y_1) \quad (12b)$$

Eq. (12)의 비선형방정식을 관측방정식을 이용한 최소제곱법으로 나타내면 Eq. (13)과 같고, 매개변수행렬(B)과 조건계수벡터(f)는 Eq. (14)와 같다.

$$v + B\Delta = f \quad (13)$$

where, v is a residual vector, Δ is the vector of parameter corrections, B is a parameter matrix, f is the condition equations constant terms vector.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial s} & \frac{\partial F_1}{\partial X_T} & \frac{\partial F_1}{\partial Y_T} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial F_2}{\partial s} & \frac{\partial F_2}{\partial X_T} & \frac{\partial F_2}{\partial Y_T} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_T} \end{bmatrix} \quad (14a)$$

$$f = - \begin{bmatrix} (X_T + s U_1 - X_1)(Z_T + s W_2 - Z_1) \\ (Y_T + s V_1 - Y_1)(Z_T + s W_2 - Z_1) \\ -(Z_T + s W_1 - Z_1)(X_T + s U_2 - X_1) \\ -(Z_T + s W_1 - Z_1)(Y_T + s V_2 - Y_1) \end{bmatrix} \quad (14b)$$

Eq. (14a)에서 매개변수행렬에서 3차원 회전각에 대한 편미분이 없는 이유는 3차원 회전은 이미 쿼터니언을 이용하여 결정하였기 때문이다. 2.1절에서 기술한 축척계수와 이동량에 대한 초기값(s_0, X_T^0, Y_T^0, Z_T^0)을 이용하여 미지수인 축척계수(s)와 이동량(X_T, Y_T, Z_T)의 변화량을 고려하여 Eq. (15)와 같이 최소제곱법의 해를 구할 수 있다.

$$\Delta = \begin{bmatrix} s \\ X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} (B^T f) \quad (15)$$

where, Δ is the vector of parameter corrections, B is a parameter matrix, f is the condition equations constant terms vector.

3. 실험

2장에서 기술한 선형을 이용한 쿼터니언 기반 3차원 등록 알고리즘을 검증하기 위해 실내 환경에서 구축한 선형을 이용한 경우와 실외 환경의 지상 MMS 데이터에서 추출한 선형을 이용해서 실험을 수행하였다.

3.1 실내 환경에서 구축한 데이터

실내 환경에서 구축한 데이터를 이용한 실험은 물리적으로 동일한 기기를 이용하여 데이터를 취득한 후, 추정된 파라미터를 분석하였다. 실내 데이터는 Fig. 3과 같이 장비의 정밀도는 $\pm 3mm$ 인 토탈스테이션(SOKKIA FX-101)을 이용하여 선형의 좌표를 취득하였으며, 추출한 선형과 검사점 (CP: Check Points)의 분포는 Fig. 4와 같다(Kim and Hong, 2019).



Fig. 3. Surveying of 3D points using total station

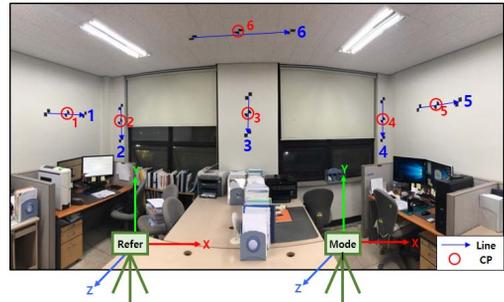


Fig. 4. Extracted lines and check points

취득한 기준 데이터의 선형은 Table 1, 모델 데이터의 선형은 Table 2와 같으며 측량한 CP는 Table 3과 같다. 취득한 데이터의 선형은 각 축에 평행하게 추출하였으며, X 축에 평행한 선형 1 쌍, Y 축에 평행한 선형 3 쌍, Z 축에 평행한 선형 2 쌍을 취득하였다.

Table 1. Linear features extracted from reference data using total station

	Reference					
	Start Point			End Point		
ID	X_1 (m)	Y_1 (m)	Z_1 (m)	X_2 (m)	Y_2 (m)	Z_2 (m)
L01	-2.612	0.495	-2.590	-2.752	0.509	-3.418
L02	-2.509	0.683	-4.194	-2.504	0.033	-4.195
L03	0.013	0.757	-4.628	-0.006	0.148	-4.621
L04	2.536	0.781	-5.050	2.542	0.029	-5.049
L05	2.848	0.576	-4.144	2.990	0.592	-3.314
L06	-0.441	1.286	-3.448	0.756	1.285	-3.578

Table 2. Linear features extracted from model data using total station

	Model					
	Start Point			End Point		
ID	$x_1 (m)$	$y_1 (m)$	$z_1 (m)$	$x_2 (m)$	$y_2 (m)$	$z_2 (m)$
L01	-3.139	0.446	-4.078	-2.998	0.461	-4.908
L02	-2.512	0.635	-5.559	-2.506	-0.016	-5.558
L03	0.013	0.708	-5.135	-0.007	0.099	-5.134
L04	2.534	0.733	-4.701	2.540	-0.020	-4.696
L05	2.529	0.527	-3.740	2.390	0.543	-2.910
L06	-0.805	1.237	-4.168	0.367	1.237	-3.897

Table 3. Check points using total station

	Reference			Model		
	$X_1 (m)$	$Y_1 (m)$	$Z_1 (m)$	$x_1 (m)$	$y_1 (m)$	$z_1 (m)$
CP01	-2.679	0.502	-2.995	-3.070	0.454	-4.484
CP02	-2.524	0.391	-4.192	-2.526	0.342	-5.561
CP03	0.000	0.478	-4.626	0.000	0.429	-5.137
CP04	2.545	0.400	-5.050	2.542	0.351	-4.696
CP05	2.918	0.585	-3.729	2.460	0.536	-3.326
CP06	0.152	1.286	-3.493	-0.231	1.237	-4.017

토탈스테이션을 사용하여 취득한 선형과 CP는 물리적으로 축척이 동일하므로 Table 4와 같이 축척을 1로 고정하여 추정 한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 매개변수를 추정하였다. 축척을 고정한 경우와 축척을 고정하지 않은 경우 모두 3차원 회전각은 동일하게 결정되었으며 축척의 변화에 의해 3차원 이동량에서 약간의 차이가 나타났다.

Table 4. 3D registration parameters of indoor environment

	Fixed scale	Non-fixed scale
$\hat{\sigma}_0$	0.001095	0.000936
s	1.0	0.999544
$\omega(^{\circ})$	-0.026042	-0.026042
$\varphi(^{\circ})$	19.292909	19.292909
$\kappa(^{\circ})$	-0.002906	-0.002906
$X_T(m)$	1.697198	1.696457
$Y_T(m)$	0.050607	0.050856
$Z_T(m)$	0.222002	0.220068

Table 4에서 결정한 3차원 등록을 위한 매개변수에 대해 CP를 이용하여 Table 5와 같이 평균제곱근오차 (RMSE:

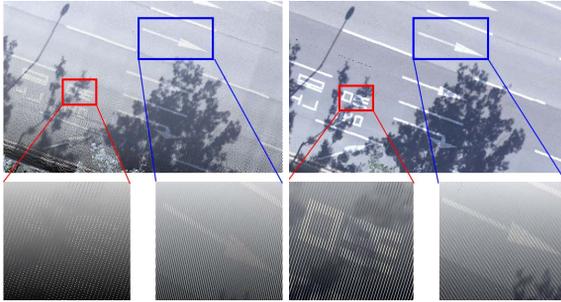
Root Mean Square Error), 기준 데이터의 CP와 매개변수를 고려한 모델 데이터의 CP의 3차원 거리 차이를 계산하였다. 분석결과 축척을 고정한 경우와 고정을 고정하지 않은 경우의 RMSE는 각각 0.001054m, 0.000886m로 축척을 고정하지 않은 경우의 RMSE가 다소 낮게 났으나 두 결과값에 큰 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다. 또한, 3차원 등록을 위해 결정된 7개의 매개변수를 이용하여 3차원 거리의 차이를 계산한 결과 축척을 고정한 경우와 축척을 고정하지 않은 경우의 차이는 0.088mm로 매우 낮게 나타났다.

Table 5. RMSE using check points for total station

	Fixed scale	Non-fixed scale
RMSE(m)	0.001054	0.000886
Error distance (m)	0.001486	0.001398

3.2 실외 환경의 지상 MMS 데이터

서로 다른 시기에 촬영된 점군 데이터에서 인위적으로 설치한 기준점용 타겟이 없는 경우 Fig. 5에 나타난 것과 같이 동일한 매칭점을 찾기는 매우 어렵기 때문에 점형 데이터를 이용하는 대신 선형정보를 이용하는 것이 효율적이다.

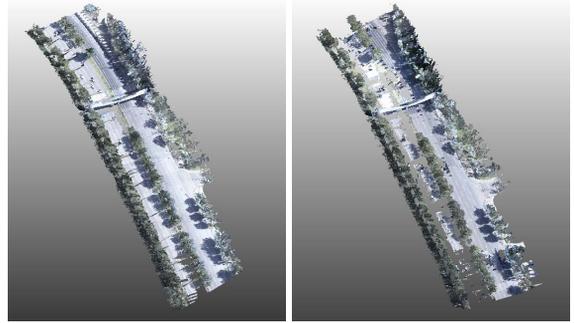


(a) reference data (b) model data

Fig. 5. Terrestrial MMS data taken at different times

따라서, 실외 환경의 지상 MMS 데이터에서 선형을 추출하여 선형 개수에 따라 추정된 파라미터를 분석하였다. 실외 환경의 실험 대상지는 대구광역시에 위치한 알파시티 일대로 Fig. 6과 같이 2019년 9월 17일에 지상 MMS를 UTM좌표계로 약 530m 구간을 다른 시간에 취득한 데이터이다.

Fig. 6(a)는 기준 데이터를 나타내고 평균 점간거리는 0.166m이며 점의 총개수는 18,801,678개이다. 또한, Fig. 6(b)는 모델 데이터를 나타내고 평균 점간거리는 0.104m이고 점의 총개수는 18,767,597이다.



(a) reference data

(b) model data

Fig. 6. Terrestrial MMS data

Fig. 6에서 기준 데이터와 모델 데이터에서 추출한 선형과 검사점의 분포는 Fig. 7과 같다. 선형을 이용한 3차원 등록은 최소 3개 이상의 선형이 필요하므로, 본 실험에서는 선형의 개수에 따른 3차원 등록을 위한 매개변수 및 RMSE를 분석하기 위해 15개의 선형을 추출하였으며, 추출된 선형은 시작과 끝점이 같은 공역선이 아닌 동일한 벡터선 상의 선형이다.

Table 6. Linear features extracted from reference data using terrestrial MMS data

	Reference					
	Start Point			End Point		
ID	$X_1 (m)$	$Y_1 (m)$	$Z_1 (m)$	$X_2 (m)$	$Y_2 (m)$	$Z_2 (m)$
L01	471347.432499	3966457.210510	97.552002	471349.434502	3966456.169495	97.602997
L02	471369.532501	3966429.286499	98.459000	471370.687500	3966432.741516	98.235001
L03	471385.335503	3966427.169495	98.514999	471385.259499	3966427.060486	108.068001
L04	471421.377502	3966427.358521	99.196999	471421.573502	3966427.930481	99.185997
L05	471288.628499	3966467.451477	100.635002	471288.653501	3966467.452515	100.606003
L06	471325.428499	3966462.753479	96.735001	471330.344500	3966461.043518	96.931000
L07	471379.328499	3966437.090515	98.315002	471384.056503	3966435.395508	98.422997
L08	471506.376495	3966402.901489	98.968002	471511.363495	3966401.835510	98.845001
L09	471293.166504	3966473.985474	95.441002	471288.295502	3966475.676514	95.242996
L10	471346.219498	3966453.559509	97.483002	471346.406509	3966454.078491	97.497002
L11	471358.656509	3966436.792480	97.905998	471357.560501	3966433.548523	98.045998
L12	471431.225494	3966413.340515	100.835999	471431.332504	3966413.598511	99.635002
L13	471481.370514	3966400.676514	99.885002	471481.557495	3966401.364502	99.837997
L14	471288.342499	3966475.813477	95.244003	471288.295502	3966475.676514	95.242996
L15	471376.856506	3966444.820496	98.329002	471372.473495	3966446.360474	98.230003

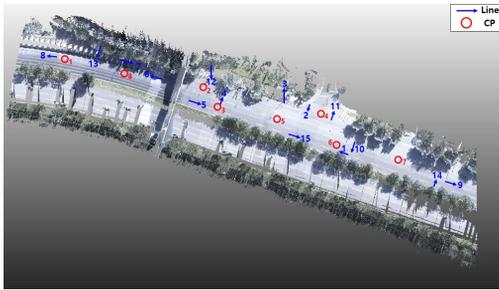


Fig. 7. Extracted linear features

기준 데이터와 모델 데이터에서 추출한 선형의 좌표는 각각 Table 6, Table 7과 같으며, CP는 Table 8과 같다.

선형의 개수에 따른 분석을 위해 Table 9와 같이 각 축에 평행한 선형을 배치하여 선형의 개수를 3, 6, 9, 12, 15개로 늘려가면서 실험을 수행하였다. 여기서 개수 별 사용된 선형은 Table 6, 7의 데이터를 순차적으로 사용하였다.

Table 9. Number of linear features parallel to each axis

Number of lines	X	Y	Z
3	1	1	1
6	2	2	2
9	4	3	2
12	6	4	2
15	7	6	2

Table 7. Linear features extracted from model data using terrestrial MMS data

ID	Model					
	Start Point			End Point		
	$x_1 (m)$	$y_1 (m)$	$z_1 (m)$	$x_2 (m)$	$y_2 (m)$	$z_2 (m)$
L1	471346.782501	3966456.282471	97.635002	471348.830502	3966455.214478	97.689003
L2	471368.913498	3966428.491516	98.538002	471370.055496	3966431.755493	98.320000
L3	471384.767502	3966426.327515	98.639999	471384.615501	3966426.173523	108.125000
L4	471420.889503	3966426.593506	99.278999	471421.088501	3966427.157471	99.268997
L5	471287.995500	3966466.546509	100.640999	471287.982499	3966466.525513	100.987999
L6	471324.756498	3966461.841492	96.810997	471329.692499	3966460.097473	97.008003
L7	471378.744499	3966436.257507	98.391998	471383.419502	3966434.602478	98.500999
L8	471506.375488	3966402.925476	99.031998	471511.401489	3966401.855469	98.907997
L9	471292.556503	3966473.046509	95.507004	471287.652504	3966474.747498	95.309998
L10	471345.570496	3966452.616516	97.559998	471345.751495	3966453.145508	97.577003
L11	471358.019501	3966435.940491	97.989998	471356.943497	3966432.650513	98.125000
L12	471430.805496	3966412.692505	100.902000	471430.912506	3966413.008484	99.709999
L13	471481.188507	3966400.413513	99.959000	471481.392517	3966401.086487	99.915001
L14	471287.697502	3966474.882507	95.311996	471287.656502	3966474.759521	95.309998
L15	471376.290497	3966443.924500	98.408997	471371.831497	3966445.483521	98.310997

Table 8. Check points using terrestrial MMS data

ID	Reference			Model		
	$X_1 (m)$	$Y_1 (m)$	$Z_1 (m)$	$x_1 (m)$	$y_1 (m)$	$z_1 (m)$
CP01	471431.858505	3966418.785522	99.487000	471431.408493	3966418.176514	99.557999
CP02	471424.554504	3966430.004517	99.195000	471423.987503	3966429.264526	99.278999
CP03	471389.828506	3966436.890503	98.589996	471389.251511	3966436.011475	98.666000
CP04	471363.016495	3966435.258484	98.031998	471362.354507	3966434.405518	98.113998
CP05	471353.362503	3966453.156494	97.711998	471352.756500	3966452.227478	97.794998
CP06	471319.799500	3966461.271484	96.499001	471319.094498	3966460.381470	96.570000
CP07	471485.923492	3966405.572510	99.519997	471485.277496	3966404.687505	99.598000
CP08	471315.033501	3966463.079468	96.308998	471314.389503	3966462.139526	96.383003

Table 10. 3D registration parameters according to the change of the number of lines

Number of lines	3	6	9	12	15
$\hat{\sigma}_0$	0.017820	0.152106	0.082623	0.065261	0.063381
s	0.986045	0.998964	0.998943	0.998981	0.999197
$\omega(^{\circ})$	-0.295482	-0.301734	-0.092330	-0.060879	-0.072065
$\varphi(^{\circ})$	0.072293	0.118529	0.033881	0.024594	0.031170
$\kappa(^{\circ})$	-0.377393	0.014625	-0.031673	-0.043599	-0.045949
$X_T(m)$	-19171.593077	1501.038106	-1691.551760	-2533.937566	-2798.971413
$Y_T(m)$	5855.685406	4048.803389	4458.680404	4406.064988	3569.162513
$Z_T(m)$	20773.922880	21839.301551	6664.363783	4413.288024	5242.338289

Table 11. RMSE using check points of terrestrial MMS data

Number of lines	3	6	9	12	15
RMSE(m)	0.631993	0.094122	0.076056	0.073480	0.070892
Error distance(m)	0.945427	0.153863	0.117386	0.110573	0.106769

지상 MMS를 이용하여 취득된 기준 데이터와 모델 데이터 간의 3차원 등록을 수행하여 추정된 매개변수는 Table 10과 같으며, 9개의 선형을 통해 추정된 매개변수와 모델 데이터를 이용하여 3차원 등록을 수행한 결과는 Fig. 8과 같다.

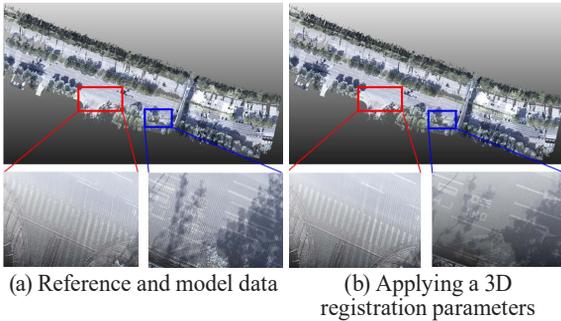


Fig. 8. Three-dimensional registration using 3D registration parameters and model data

추정된 매개변수를 분석하기 위해 실험 3.1과 같이 추정된 파라미터와 CP를 이용하여 평균제곱근오차, 3차원 거리 차이를 계산하였다. Table 11에서 알 수 있듯이 선형의 개수가 3개에서 6개로 증가할 경우 RMSE가 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 선형의 개수가 3개인 경우에는 3차원 등록을 위한 매개변수의 정확도가 높지 않은 것을 알 수 있었다. 선형의 개수가 6개에서 9개로 증가할 경우 RMSE는 0.094122m에서 RMSE가 0.076056m로 3차원 등록의 매개변수 정확도

가 높아지는 것을 알 수 있었으며, 선형의 개수를 9개에서 15개로 늘린 경우 RMSE에 큰 변화가 없는 것을 통해서 3차원 등록을 위해서 9개의 선형을 이용할 경우 높은 정확도의 3차원 등록을 수행할 수 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 국토지리정보원에서 구축하고 있는 정밀도로지도의 구축정확도가 $\pm 25\text{cm}$ 이내인 것을 고려할 때 6개의 선형만으로도 충분히 3차원 등록이 가능한 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 선형을 이용한 쿼터니언 기반의 3차원 등록에 대한 방법을 제시한 것으로 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 실내 환경에서 물리적으로 축척이 동일한 토탈스테이션을 통해 취득한 선형을 이용하여 축척을 고정할 경우와 고정하지 않은 경우에 결정된 3차원 등록 매개변수의 RMSE 값은 각각 0.001095m, 0.000936m로 두 결과값에는 큰 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다. 축척으로 인해 3차원 이동량에서 미세한 차이가 발생하였으나 회전각은 동일하게 나타났다.

둘째, 실외 환경의 지상 MMS 데이터를 통해 취득한 선형을 이용하여 3차원 등록을 수행하고 선형의 개수에 따른 분석을 수행한 결과 선형의 개수가 3개에서 6개로 증가할 때 RMSE가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 선형이 9개

이상일 경우 RMSE에 큰 변화가 없는 것을 통해 3차원 등록을 위해서 9개의 선형으로도 충분히 높은 정확도의 3차원 등록을 수행할 수 있는 것을 알 수 있었다.

셋째, 국토지리정보원에서 제공하는 정밀도로지도는 다시기에 취득한 데이터를 정확도 $\pm 25\text{cm}$ 이내로 생산한 데이터로서, 본 연구를 통해 약 500m 구간일 경우 6개의 선형만으로도 충분히 정밀도로지도 구축을 위한 정확도 이내의 3차원 등록을 수행할 수 있는 것을 알 수 있었다.

향후 선형을 이용하여 3차원 등록을 수행하기 위해서 선형 정보를 자동으로 추출하고 정합하는 연구가 수행될 필요가 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07045817).

References

- Alshawa, M. (2007), ICL: Iterative closest line a novel point cloud registration algorithm based on linear features, *Ekscentar*, Vol. 10, pp. 53-59.
- Besl, P.J. and McKay, N.D. (1992), Method for registration of 3-D shapes, In: *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*. International Society for Optics and Photonics, Vol. 1611, pp. 587-607.
- Choi, S.P., Lii, I.J., Park, B.W., and Kim, U.N. (2014), Error correction technique of terrestrial LiDAR data using plane equation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 24-25 April, Seoul, Korea, pp. 329-334.
- Du, S., Liu, J., Zhang, C., Zhu, J., and Li, K. (2015), Probability iterative closest point algorithm for m-D point set registration with noise, *Neurocomputing*, Vol. 157, pp. 187-198.
- Habib, A., Ghanma, M., Morgan, M., and Ruzouq, R. (2005), Photogrammetric and LiDAR data registration using linear features, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 71, No. 6, pp. 699-707.
- He, F. and Habib, A. (2016), A closed-form solution for coarse registration of point clouds using linear features, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 142, No. 3, pp. 1-14.
- He, Y., Liang, B., Yang, J., Li, S., and He, J. (2017), An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features, *Sensors*, Vol. 17, No. 8, pp. 1862-1877.
- Horn, B.K. (1987), Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 4, pp. 629-642.
- Hwang, Y.S., Lee, D.J., Yu, H.Y., and Lee, J.M. (2015), 2D grid map compensation using ICP algorithm based on feature points, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 21, No. 10, pp. 965-971.
- Kim, E.M. (2018), Semi-automatic camera calibration using quaternions, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 2, pp. 43-50. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M. and Choi, H.S. (2018), Analysis of the accuracy of quaternion-based spatial resection based on the layout of control points, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 255-262. (in Korean with English abstract)
- Kim, E.M. and Hong, S.P. (2019), Comparison of point-based algorithms for absolute orientation, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 25, No. 10, pp. 929-935.
- Kim, E.S., Choi, S.I., and Park, S.Y. (2014), Modified generalized ICP algorithm using color correlation. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 16-18 October, Jeju, Korea, pp. 417-418.
- Lee, H.S. (2015), Accuracy improvement of the ICP DEM matching, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 5, pp. 443-451. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H. and Ko, K.H. (2018), Utilization of GPS and IMU Sensors in the Initial Registration of Two Point Clouds, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 173-183.
- Li, Q. and Griffiths, J.G. (2000), Iterative closest geometric objects registration, *Computers and mathematics with applications*, Vol. 40, No. 10-11, pp. 1171-1188.
- Michaels, R.J. (1999), *A new closed-form approach to absolute orientation*, Master's thesis, Lehigh University,

- Bethlehem, USA, 106p.
- Park, J.K. and Um, D.Y. (2020), Accuracy evaluation by point cloud data registration method, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 38, No. 1, pp. 35-41. (in Korean with English abstract)
- Poreba, M. and Goulette, F. (2015), A robust linear feature-based procedure for automated registration of point clouds, *Sensors*, Vol. 15, No. 1, pp. 1435-1457.
- Qin, B., Li, X., Jia, S., Yang, A., and Qiu, H. (2015), Advanced absolute orientation algorithm based on unit quaternion on alignment. In *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, 8-10 August, Lijiang, China, pp. 499-503.
- Shen, Y.Z., Chen, Y., and Zheng, D.H. (2006), A quaternion-based geodetic datum transformation algorithm, *Journal of Geodesy*, Vol. 80, No. 5, pp. 233-239.
- Sheng, Q.H. and Zhang, B. (2017), Absolute orientation based on line coordinates, *The Photogrammetric Record*, Vol. 32, No. 157, pp. 12-32.
- Shi, X., Liu, T., and Han, X. (2020), Improved iterative closest point (ICP) 3D point cloud registration algorithm based on point cloud filtering and adaptive fireworks for coarse registration, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 41, No. 8, pp. 3197-3220.