

# 道路測量設計のための SfM の活用

1160089 高橋奈恵

高知工科大学システム工学群建築・都市デザイン専攻

SfMを用いた道路測量を試みた。SfMとは、動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する要素技術の1つである。本研究では、対象範囲の地上写真用い、SfMを用いて取得した点群データから道路設計のための断面図作成、土量推定を目的としている。SfMの精度検証のため、地上型LiDARを用いた。結果、断面図の作成は達成したが、構造物や樹木などのノイズ除去の完全な自動化は困難であった。しかし、土量推定結果から地上SfMの3次元モデルと検証用のLiDARによる三次元モデルは残差が0.033 m<sup>3</sup>と良好な結果を得た。今後は実践的に取り入れることで利用可能性を検討する必要がある。

**Key Words :** SfM, 道路設計, 土量推定, 断面図

## 1. はじめに

従来の地形測量は、広範囲の現場になると膨大な時間と費用がかかるため、容易に測量する手法が必要である。そういった場面でも簡易的で安価に三次元の点群データを取得することができるSfM(Structure from Motion)は広範囲の計測に適している。SfMとは、動画や静止画からカメラ撮影位置を推定し、三次元形状を復元する要素技術の1つである。

国土防災技術(株)<sup>3)</sup>は、UAV(Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機)とSfMで構築した地形モデルから広範囲の土量を推定している。しかし、UAVは離着陸のための空き地が必要であり、操作の難易度が高いことが欠点である。

そこで本研究では、土量推定のため、地上からの写真を用いる(以下「地上SfM」)。

本研究は、SfMが実際の測量現場で活用できるかを検証するため、道路設計時における土量の推定を行う。土量推定のためには、構造物や樹木の情報であるノイズのない地表面のデータが必要である。そこで、ノイズの除去を行い、地表面のみのデータを断面図化し、盛土、切土の量を推定する手法を開発する。

地上SfMで取得したデータの精度検証のために同日に計測した地上型LiDAR(Light Detection and Ranging)のデータを使用する。

対象範囲は高知工科大学グラウンド東側の斜面である(図-1)。

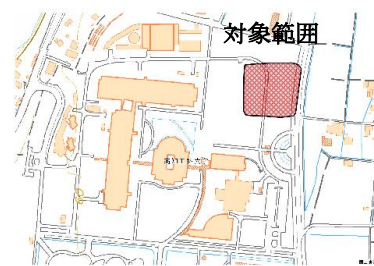


図-1 対象範囲

## 2. 使用機材

本研究で使用した地上SfM用カメラは、PENTAX社製のk-30である。レンズもPENTAX社製の「smc PENTAX FAJ Zoom」を使用し、焦点距離は18mmで撮影をした。k-30の外観を図-2に示す。SfMソフトウェアは、Agisoft PhotoScanを使用した。



図-2 地上SfM用カメラ



図-3 地上型LiDAR

精度検証用である地上型LiDARは、TOPCON社製の「GLS-1500」を使用した。LiDAR計測の特徴は、計測対象物にレーザーを照射し、その反射光を計測することで対象物までの距離、3次元座標などを計測することができる。GLS-1500の外観を図-3に示す。

今回は地上 SfM と LiDAR の座標系統一のための幾何補正用基準点を 7 点設置した。基準点測量に使用したトータルステーション(以下「TS」)は、SOKKIA 製レーザー測距機 SET4110R である。プリズムは同社 SOKKIA 製の APS12 を使用した。SET4110R の仕様を表 2-1 に示す。

表-4 SET4110R の仕様

測角精度	5"
測距精度	±(5+3ppm×D)mm

### 3. データの取得・ノイズ除去・グリッド化

#### (1) 点群データの幾何補正

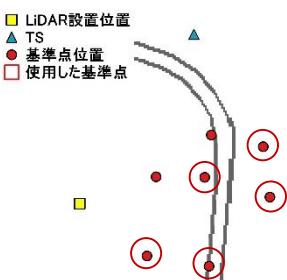


図-5 基準点位置図

地上 SfM データと LiDAR データは、それぞれ独自の座標系であるローカル座標になっているため、座標軸が異なる。そのため幾何補正し、座標系の統一を行う必要がある。

幾何補正を行うには 5 点以上の基準点が必要であるため、7 点の基準点を設置したが、地上 SfM の作成された三次元点群データには、5 点の基準点が存在した。基準点は TS を使用し、ローカル座標情報を得た。基準点位置と TS 設置位置を図-5 に示す。幾何補正のための座標系は、平面直角座標 IV 系に統一した。幾何補正には、3 次元 affine 変換<sup>1)</sup>(高木研究室, 既存 Python プログラム)を使用した。以下に 3 次元 affine 変換式と地上 SfM 変換時の RMSE を表-6 に示す。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & p_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_{10} \\ p_{11} \end{pmatrix} \cdots (a)$$

$(x_i, y_i, z_i)$  : 地上座標

$(u_i, v_i, w_i)$  : ローカル座標

$(p_0 \dots p_{12})$  : 変換係数

表-6 地上 SfM の幾何補正時の RMSE (単位: m)

X	Y	Z
0.0101	0.0174	0.0069

#### (2) ノイズ除去

断面図から土量を推定するためには、構造物や樹木などのノイズがない地表面のみの点群データが必要となる。

そこで、点群データを 0.5m×0.5m サイズのグリッドに区切り、各グリッド内の Z の最小値を抽出する。抽出された各点は、グリッド化することによって行番号と列番号を持つ。図-7 は、ある 1 行の全ての列を抜き出した場合の概念図である。列番号は左から小さい順に並んでおり、隣り合っている 2 つの点の Z 値を比較する。差が指定した値以上であれば、列番号の大きい方の点を除去する。このとき、図-7 で示しているように地面とノイズ(樹木等)が切り替わる部分の点が除去される。

さらに各行内で列番号が連続している点群をグループ化する。隣り合うグループの最近隣の点の Z 値を比較し、指定した値以上である場合は、比較した点の列番号が大きい方のグループを除去する。これを全ての行で行うことで、ノイズが除去された地表面のみの点群データとなる。

ここで、点ごとの比較とグループごとの比較で指定した値は、点ごとは 0.05m, 0.1m, 0.3m, 0.5m で、グループごとは 0.5m, 1m, 1.5m, 2m のそれぞれの組み合わせで比較し、検討を行った。その結果今回の対象範囲では、0.3m と 1m 組み合わせが最適であると判断した。

しかし、対象範囲のグラウンドと斜面の段差部のノイズ除去が失敗したため、今回は段差部のみノイズ除去前のデータと結合しデータを補った。

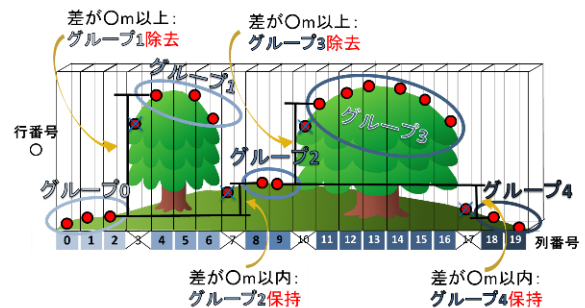


図-7 ある 1 行のノイズ除去の概念図

#### (3) グリッド化

ノイズが除去された点群データはランダムな並びの点群データであるため、グリッド化し、空間的に均質な点群データに変換する。

点群データのグリッド化は、まず QGIS のデータ補間機能で、TIN (Triangulated Irregular Network: 点群データを三角形の格子状に結合したデータ) 化させ(図-8 左)、次に 0.1m×0.1m サイズのグリッドに区切り、グリッドの中心点の標高の抽出をする(図-8 右)。以下、抽出されたデータを「グリッドデータ」という。

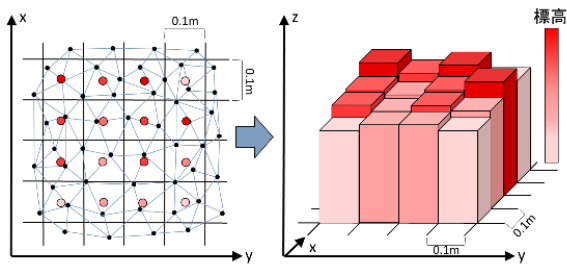


図-8 グリッド化概念図

#### 4. 断面図作成

断面図作成 Python プログラムは、稲田<sup>2)</sup>の 2008 年度学士論文を参考に作成した。断面図作成の Python プログラムのフローチャートを図-9 に示す。

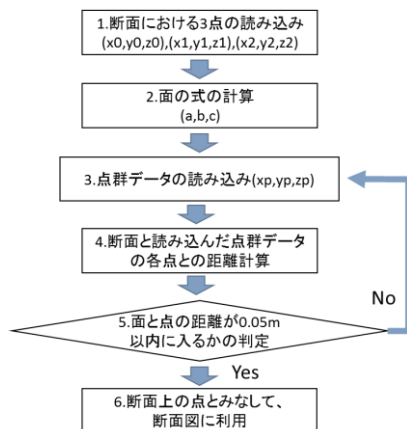


図-9 プログラム作成のフローチャート

断面図を作成するために、まず断面における空間平面の式を立てる必要がある。空間平面の式を立てるためには、図-10 に示しているように断面上の三点の座標が必要となる。その 3 点の条件を以下に示す。

- $(x_0, y_0, z_0)$ : 断面の始点の座標, グリッドデータ Z 最小値
- $(x_1, y_1, z_1)$ : 断面の終点の座標, グリッドデータ Z 最小値
- $(x_2, y_2, z_2)$ : 断面の始点の座標, グリッドデータ Z 最大値

$(x_2, y_2, z_2)$  は、面を作るためにグリッドデータの Z 最大値を指定している。

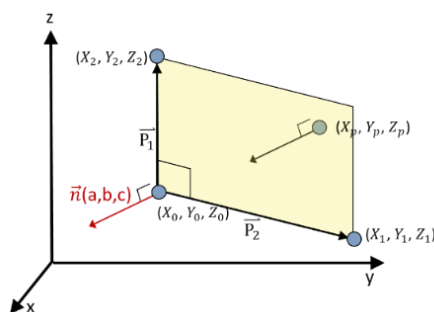


図-10 空間平面の概念図

空間平面とグリッドデータの各点の座標との最短距離を計算し、距離の近いものは、断面上の点として扱う。空間平面との最短距離は、空間平面の法線ベクトルを利用する。

$\vec{p}_1$  と  $\vec{p}_2$  の外積を計算することで、空間平面の法線ベクトル  $\vec{n}(a, b, c)$  を計算することができる。法線ベクトルの各要素は、次式により計算できる。

$$\begin{cases} a = (y_1 - y_0)(z_2 - z_0) - (z_1 - z_0)(y_2 - y_0) \\ b = (z_1 - z_0)(x_2 - x_0) - (x_1 - x_0)(z_2 - z_0) \cdots (b) \\ c = (x_1 - x_0)(y_2 - y_0) - (y_1 - y_0)(x_2 - x_0) \end{cases}$$

外積で求めた法線ベクトル  $\vec{n}(a, b, c)$  は、平面の式の法線ベクトルと方向は同じであるが、大きさは異なる。したがって、出発点  $(x_0, y_0, z_0)$  を方程式型の平面の式  $ax + by + cz = 1$  に代入して、外積で求めた法線ベクトル  $\vec{n}(a, b, c)$  の大きさを調整した。

点群データの点座標を通り、法線ベクトルと平行な空間直線を立てれば、その空間直線と空間平面との交点が求まる。

空間直線は、点群データの点座標を  $(x_q, y_q, z_q)$  とすると、次式で表わすことができる。

$$\begin{cases} x = x_p + at \\ y = y_p + bt \cdots (c) \\ z = z_p + ct \end{cases}$$

この時の  $t$  は媒介変数で、次式で求めることができる。

$$t = \frac{1 - ax_p - by_p - cz_p}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdots (d)$$

求めた  $t$  を式 (c) に代入すれば、空間平面との交点が求まる。

今回最短距離は、図-11 に示しているように 0.1m グリッドの中心までの最大距離 0.071m より小さいものは、断面上の点であるとみなし、断面図作成に利用した。

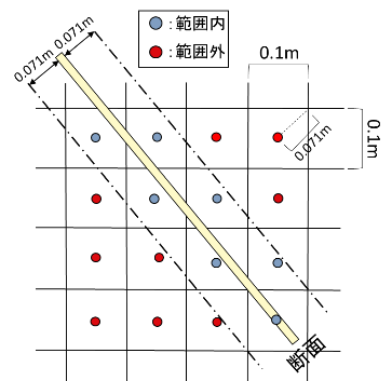


図-11 取得データ判定の概念図

## 5. 精度検証

地上 SfM の精度検証のため、基準点 7 点を使用し、地上 SfM と同じ手法で LiDAR の点群データの変換を行い、断面図を作成した。

幾何補正時の RMSE を表-12 に示す。LiDAR は地上 SfM より精度が良いことがわかる。

表-12 LiDAR の幾何補正時の RMSE (単位 : m)

X	Y	Z
0.0014	0.0021	0.0008

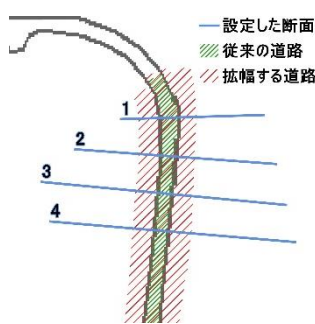


図-13 設定した断面と道路の位置

地上 SfM と LiDAR の各断面の重ね合っている範囲内の各グリッドの標高を比較した。図-13 に各断面の位置図を示している。

断面の各グリッドの標高平均差と標準偏差の算出結果を表-14 に示す。

表-14 各断面の標高平均差と標準偏差

断面	標高平均差 (m)	標準偏差 (m)
1	0.039	0.030
2	0.063	0.046
3	0.065	0.049
4	0.051	0.046

以上から、標準偏差のばらつきは小さい結果となった。図-15 に最も標準偏差が大きい断面 3 の断面図を示している。ほぼ重ね合っているが、所々一致していない部分が見られる。

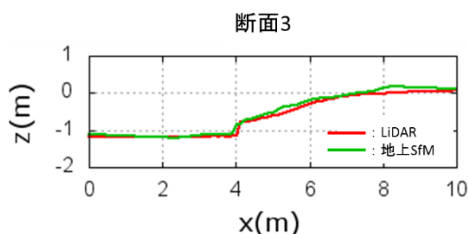


図-15 断面 3 の断面図

### (1) 道路設計に伴う土量計算

本研究で行う道路設計は、高知工科大学グラウン

ド東側にある歩行者用の道路の拡幅である。道路幅員は 15m に拡幅し、法面は盛土が 1:1.5, 切土が 1:1.0 の勾配で行うことを仮定した。道路の位置図を図 5-1 に、道路設計施工概念図を図-16 に示す。

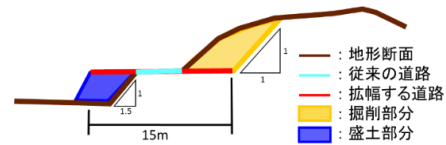


図-16 施工概念図

地上 SfM と LiDAR の各断面から盛土と切土の面積を算出し、標準偏差を求めた。その結果を表-17 に示している。

盛土と切土の面積の標準偏差から、地上 SfM の 3 次元モデルと LiDAR の三次元モデルは比較的正確に重なり合っているといえる。

表-17 断面積算出結果及び標準偏差

断面	盛土 (m <sup>2</sup> )		切土 (m <sup>2</sup> )	
	地上 SfM	LiDAR	地上 SfM	LiDAR
1	4.3655	4.3978	3.0438	2.9474
2	4.0130	4.0729	2.7072	2.6811
3	1.9757	2.1169	4.4893	4.4958
4	2.4519	2.5362	3.7695	3.7110
平均差 (m <sup>2</sup> )	0.079		0.047	
標準偏差 (m <sup>2</sup> )	0.040		0.035	

## 6. 考察

本研究の目的のひとつである、断面図の作成は達成した。しかし、構造物や樹木などのノイズ除去は、十分な結果とはならなかった。

しかし、土量推定結果から地上 SfM の 3 次元モデルと LiDAR の三次元モデルは比較的正確に重なり合っていることがわかったため、今後は実践的に取り入れることで、利用可能性を検討する必要がある。

謝辞：本研究の作成に当たり、ご指導頂いた建設技術公社小島様に深謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 高木方隆, 「国土を測る技術の基礎」
- 2) 稲田涼, 「レーザースキャナデータを用いた断面図作成プログラムの開発」, 高知工科大学 2008 年度学士論文
- 3) 山村充, 「UAV 空撮画像と SfM で構築した地形モデルの精度評価と適応事例」, 国土防災技術株式会社