

(28) 点群の3次元分布を考慮した レーザスキャナとSFMのレジストレーション

藤里 和樹¹・檀 寛成²・安室 喜弘³

¹非会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail:k434014@kansai-u.ac.jp

²非会員 ³正会員 関西大学教授 環境都市工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

災害現場などの記録用途において、地上型レーザスキャナや、空撮画像を用いた SFM (Structure from Motion) が普及しているが、レーザスキャナは足場の制約などから網羅的な計測が難しく、SFM だけでは実寸スケールが得られない。本研究では両者を相補的に統合する手法を提案する。レーザスキャナ併設の校正済みカメラで撮影した画像と空撮画像群を併せて SFM を行い、スキャナ視点位置と被写体とを同時に3次元復元する。被写体の3次元データは、スキャナ画像に投影することでスキャン点群と明確に対応づけられる。これにより、データ統合のための座標変換を陽解法で求められる。レーザスキャナ (Riegl LMS-Z420i) とドローン (DJI phantom 4) による空撮による実験より、本手法の有効性を検証した。

Key Words: SFM(Structure from Motion), point cloud, laser scanning, registration, photogrammetry

1. はじめに

災害現場や文化財の記録では、レーザスキャナやドローンによる空撮などを用いた多視点画像による SFM (Structure from Motion) ¹⁾が利用されている。レーザスキャナは物体表面の形状情報を点群として取得できる3次元計測システムであり、広い範囲にわたる幾何学的情報の取得に適している。地すべり災害発生時においては、現場状況の把握や救助活動の方針決定等のために、定量的な計測による3次元モデルの構築は有益である²⁾。また、地質・地形的特徴の正確な把握により、同種災害への対策検討が期待できる。しかし、計測時には三脚を設置するための安定した足場の確保が必要とされ、またオクルージョンによるデータ欠損が容易に起こるために計測箇所を多めにとると、時間と労力が増加してしまう。一方で、近年ではドローンを用いた空撮によるデータ収集が利用されており、足場が悪い場所や立ち入りが困難な場所においても網羅的に撮影することができ、撮影した画像に SFM 処理を施すことで3次元情報を取得できる。起伏が多く立ち入りが困難な地形に対しても、人がリスクを負うことなく、植生や地形を把握できるため、断層調査³⁾などにも利用される。ただし、原理的に復元結果のスケールは不定であるため、別途何らかの方法で実寸と整合させる必要がある。

2. 従来の3次元点群の統合手法

多くの既存の点群データ処理ソフトでは、形状フィッティングによって異なる点群データ間での位置合わせを行う。これはICP (Iterative Closest Point) 法⁴⁾に基づいており、点群間で点どうしの対応関係と相対的な位置姿勢を更新しながら、繰り返し計算により、対応点間の距離の総和を最小にする。点群の各点あるいはメッシュの頂点どうしの対応関係は曖昧であるため、ユーザが初期位置を決め、制約なし非線形最適化問題として位置合わせを行う。標準的なICP法では、最近傍点による対応づけと幾何変換の2つの処理を交互に行っている。これらの内、最近傍点による対応づけが、最も計算量を必要とする処理であり、しかも点群間の位置や姿勢の初期状態によっては、正確な収束結果を得ることが困難となる。本研究では、レーザスキャナとSFMにより得られる異種の点群データ間で、適切な対応点の組合せを与えることにより、安定かつ正確な位置合わせ手法を提案する。

3. 提案手法

本研究では、図-1 に示すようにレーザスキャナに併設されている校正済みカメラで撮影された画像を積極的

に用いて、レーザスキャンから得られる3次元点群データと SFM で復元される3次元メッシュを統合する手法を提案する。レーザスキャナは、レーザパルスの照射により計測対象の3次元点群を取得する。このとき、色情報はレーザスキャナに付設されたカメラで取得する。このカメラで撮影した画像の各画素にはレーザスキャナで得た3次元座標が事前の校正により座標系 O で対応付けられており、1画素単位で点群との対応付けがなされている。ドローンで撮影した画像群に対して SFM 処理を実施する際に、スキャナ併設カメラの画像を含めることで、SFM の結果において自ずとスキャナ併設カメラの画像が統合され、レーザスキャナでの計測位置が座標系 O で復元される。

したがって、SFM で復元された3次元メッシュをスキャナ視点から眺めてスキャナ画像上に投影すれば、スキャナ画像を介して重畳させ、レーザスキャナの点群との対応づけが可能となる。SFM により生成される点群は比較的疎で不均一であるが、MVS (Multi-View-Stereo) 法を併用して密なメッシュを生成することで、スキャナ併設カメラ画像上に撮影された任意の画素とメッシュ上の3次元位置とを対応付けることが可能となる。

スキャナ併設カメラの画像を介して、SFM で生成した3次元メッシュとレーザスキャナの3次元点群との間で、3点以上の対応付けを行い、両者を一致させるための変換パラメータを計算する。この計算は、陽解法で実施可能であり、ICP のような収束計算を必要としない⁷⁾。

SFM による3次元メッシュをスキャナ点群の座標系に変換することにより、全体として実寸スケールに統一され、レーザで走査できなかった箇所も SFM のモデルにより形状が補間された3次元メッシュが得られる。

関連する研究例として、レーザスキャンデータの統合に SFM を用いるもの⁹⁾があるが、本手法はスキャナと SFM との異種データ間での相補的なデータ統合を実現する点でユニークであり、迅速で正確な3次元点群の構築が可能となる。

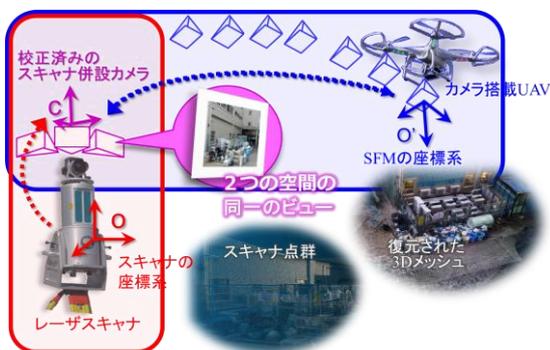


図-1 スキャナ併設のカメラ画像を用いた座標系の統合

4. 実装実験

(1) 実験環境と使用機材

本研究では、関西大学構内の廃材置き場を対象として実験を行った。この場所は、廃棄物が乱雑に積み上げられているため、足場が悪く、またオクルージョンが生じやすい複雑な形状を有するという特徴に着目して、災害現場に見立てた。今回は地上型レーザスキャナとして LMS-Z420i (RIEGL 社製)、空撮機材として Phantom 4 (DJI 社製) を使用した。レーザスキャナにより廃材置き場の2箇所から計測を行い(図-2)、それぞれ149万点、140万点を取得し、合わせて290万点の点群を取得した。一方でドローンを用いて地上からは視認が困難である箇所を上空から網羅的に撮影した(図-3)。

スキャナ併設のカメラ画像とドローン併設のカメラから撮影した画像、総数83枚を合わせて Visual SFM⁷⁾により SFM を適用し、3次元点群情報と各撮影位置のカメラパラメータを取得した。Visual SFM は、GPU による高速化を備えた SFM による3次元再構成のためのフリーソフトウェアである⁷⁾。

次に、SFM によって取得したカメラパラメータと画像に Patch-based Multi-View Stereo (PMVS)⁸⁾ を適用してメッシュ化を行った。PMVS は、SFM により推定されたカ

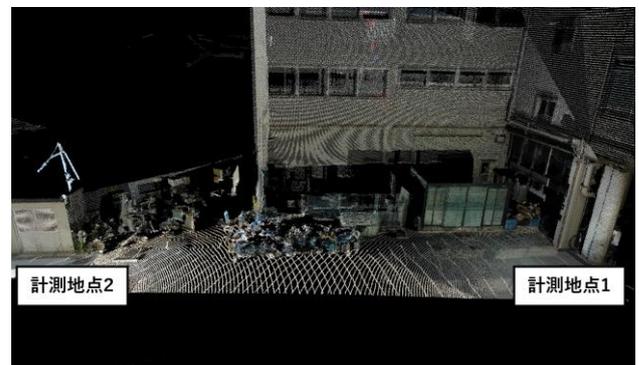


図-2 レーザスキャナによる計測



図-3 ドローンによる空撮で取得した画像群

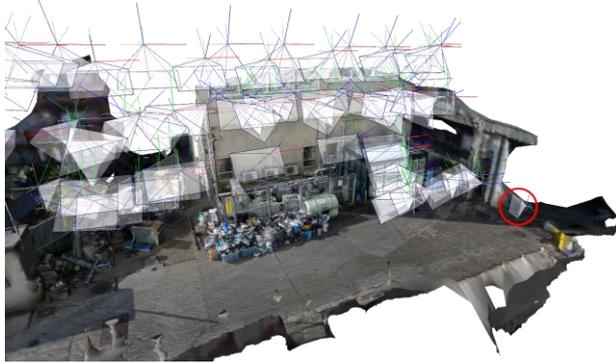


図-4 SFM 処理で取得した 3次元点群
(赤丸は復元されたスキャナ計測位置)

メラパラメータを基にして同じ画像群から密なメッシュを生成する Multi-View-Stereo ソフトウェアである。処理結果として 173 万頂点のメッシュを得た。(図-4)



図-4 スキャナによる点群データ (左)
と SFM による 3次元メッシュデータ (右)

(2) 画素の比較によるオブジェクト座標値取得

SFM 処理において、スキャナ併設のカメラ画像を混在させることで、スキャナ位置が復元される。図-7 中の上空に連なって存在している四角錐がドローンによる空撮位置であり、赤丸で囲まれた四角錐がスキャナの位置である。次に、スキャナ併設カメラ位置を視点として SFM による 3次元メッシュを描画し、スキャナ併設カメラ画像と重畳させる(図-4 (右))。この画像上で任意に画素を選択すると、SFM による 3次元メッシュ上で、対応する 3次元位置座標が一つ決まる。必ずしもメッシュの頂点座標と一致する画素を選択しなくても、3次元の対応が求められることも、この手法の利点である。このとき、選択したウィンドウ画素座標から、対応するレーザスキャナによる 3次元点群の座標を取得できる。

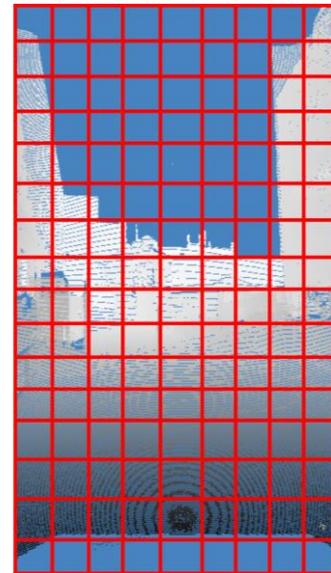


図-5 スキャナ点群のデプスマップをグリッドで分割

(3) グリッドを用いた点群分布を考慮した対応点選択

対応点選択時、同一平面上からの選択により、適切な変換行列を算出できない場合がある。そのため、点群分布を考慮して対応点を選択する必要がある。スキャナ点群のデプス情報をもとにデプスマップを作成する。次に、計測対象を縦・横・奥行き方向に対して $9 \times 16 \times 4$ の 576 の領域に分割し、点群密度の低い領域を除いた 84 領域を対応点選択の候補領域とする(図-5)。そして、乱数を生成して 30 領域を選び、さらに乱数を生成し 1 領域から 1 つの対応点を選び、変換行列の算出に使用する。

(4) 変換行列の算出

点群分布を考慮したグリッドを用いて 30 組の対応点を取得し、外れ値が含まれていることを想定し、RMS を最も小さくする 15 組の対応点を変換行列の算出に採

用した⁸⁾。算出した変換行列を SFM の 3次元メッシュの各頂点座標値に乗ずることでレーザスキャナの 3次元点群と統合した。統合結果を図-7 に示す。左がレーザスキャナの 3次元点群であり、右が統合結果である。レーザスキャンでの欠落部である容器の内部や廃材の上面などが補填されることが確認できる。また、レーザスキャンが周辺の地形情報なども取得しており当該スペースの周囲との位置関係なども確認できる。尚、統合処理結果として、対応点間での RMS は 0.04[m]であった。



図-7 スキャナの3次元点群 (左) と統合結果 (右)

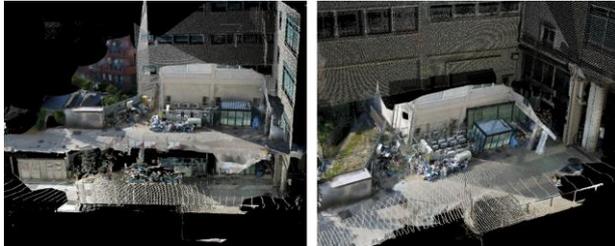


図-8 ICP適用前 (左) とICP適用後 (右) の結果

(5) ICP アルゴリズムとの比較

実験によって取得したレーザスキャナによる3次元点群とSfMによる3次元メッシュに対して、ICPアルゴリズムを用いた場合と提案手法を用いた場合の比較を行った。ICPを用いたスケール・位置合わせには、フリーの点群編集ソフトであるCloudCompareを使用した。図-8はICPを適用したスケール・位置合わせの結果である。図-8に示すように、下方にレーザスキャナの3次元点群、上方にSfMの3次元メッシュを、およそ向きと方向が合うように手動で配置して初期状態としているが、ICP処理実行時の初期段階で異なる壁面どうしが位置合わせされて局所解に陥ったため、適切に位置合わせが行われなかったと考えられる。一方、提案手法ではスキャナカメラ視点でそれぞれの点群データを整列した上で、同一画素を通るレーザと仮想的な視線とが、それぞれ物理的表面とSfMのメッシュにおいて最もデプスの小さい点を決定論的に対応付けられるという点で優位性があるといえる。

5. おわりに

本研究では、レーザスキャナとドローンによる空撮を用いたSfMにより作成されたモデルの統合手法を提案し、実証実験を行った。結果として、レーザスキャナでは計測が困難である箇所に対して空撮から復元された3次元メッシュで補間し、実寸で包括的な形状データを得ることができた。今後は、手動に依らず対応点を多数決定す

る方法を検討して統合精度の向上を図り、多くの事例に適用して精度の評価を行うことが課題として挙げられる。

謝辞：本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金 (15H02983, 16H05000, 15K02977) の助成による。

参考文献

- 1) Snavely, N. , Seitz, S. , Szeliski, R. : Photo tourism:exploring photo collections in 3D. *SIGGRAPH 2006*, pp. 835-846, 2006.
- 2) 新井場公德：フィリピン・レイテ島地すべり災害における救援活動の実態と応援技術の性能調査報告書，2007.
- 3) 内山庄一郎，中田高，井上公，熊原康博，杉田暁，井筒潤，後藤秀昭，福井弘道，鈴木比奈子，谷口薫：小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試みー根尾谷断層水鳥断層崖を例にー，*活断層研究* 40号，pp.35-42，2014.
- 4) Paul J. Besl : Method for registration of 3-D shapes, *IEEE T Pattern Anal*, pp.239-256, 1992.
- 5) Fujisato K. et al : Semi-Automatic Correlation for Integrating Data Produced by Laser Scanning and SfM, *CONVR 2016*, 2016.
- 6) Wassim Moussa, Dieter Fritsch : Automatic Registration of Non-overlapping Laser Scans Based on a Combination of Generated Images from Laser Data and Digital Images in One Bundle, *EuroMed 2014*, LNCS 8740, pp. 1-10, 2014.
- 7) Wu C. : Toward Linear-time Incremental Structure from Motion, *3DV 2013*, pp. 127-134, 2013.
- 8) Jancosek M. et al. : Multi-View Recon-struction Preserving Weakly-Supported Surfaces, *CVPR 2011*, pp.3121-3128, 2011.