



## Layer-Based City Point Cloud Completion for Aerial Multi-View Reconstruction

---

Haihan Zhang, Hisatoshi Toriya, Hidehiko Shishido and  
Itaru Kitahara

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

August 5, 2022

# 空撮映像に基づく建物群三次元復元と階層化点群補完

Haihan Zhang<sup>†</sup> 鳥屋 剛毅<sup>‡</sup> 宍戸 英彦<sup>‡</sup> 北原 格<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 筑波大学グローバル教育院

<sup>‡</sup> 秋田大学大学院国際資源研究科

<sup>‡</sup> 筑波大学計算科学研究センター

E-mail: <sup>†</sup> zhang.haihan@image.iit.tsukuba.ac.jp, <sup>‡</sup> toriya@gipc.akita-u.ac.jp,

<sup>‡</sup> shishido@ccs.tsukuba.ac.jp, <sup>‡</sup> kitahara@ccs.tsukuba.ac.jp

## あらまし

ドローンを使用して大規模なシーンを三次元復元する方法は、三次元都市モデリングで広く使われている方法である。具体的なプロセスは、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いて対象都市で空撮の多視点画像を取得し、特徴点のマッチングにより三次元都市点群モデルを復元するものである。このようにして取得した空撮多視点画像は、隣り合う画像間の十分なオーバーラップが必要である。オクルージョンなどの影響を減らすために、できるだけ多くのシーン情報を取り込むように UAV を飛行させる必要があるため、大規模な都市モデリングには非常に時間と労力を要する。本論文では、少数の空撮オルソモザイクビューのみを用いて、都市建物の形状を抽出し、壁などのオクルージョンが存在するシーンを補完できる階層的点群補完手法を提案する。補完結果は、仮想現実空間で取得した都市モデルによって精度を検証した。

## 1. はじめに

視覚に基づく三次元復元技術は、デジタル都市を構築するための重要なツールである。三次元都市モデリングにおいて、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた大規模なシーンの三次元復元は、最も効率的な手法である。従来の UAV を用いた三次元復元手法は、画像と画像の間の特徴点のマッチングに基づくものであった。エピポーラアルゴリズムを用いて、カメラの姿勢変化を計算し、特徴点を三次元空間に投影して、三次元シーンモデルを復元する[1][2][3]。この処理を行うには、シーン情報をカバーするために十分な量の画像データが必要である。そのために空中からの撮影が考えられるが、空中から大規模なシーンの画像を取得する場合、建物と建物の間にオクルージョンが発生しやすく、図 1 に示すように、建物の壁などの情報が欠落することがある。本論文では、この問題を解決するために、階層化補完の原理を適用して、建物の幾何学的特徴に応じて建物壁の三次元点群を補完し、UAV による三次元復元の精度を向上させるシステムを提案する。

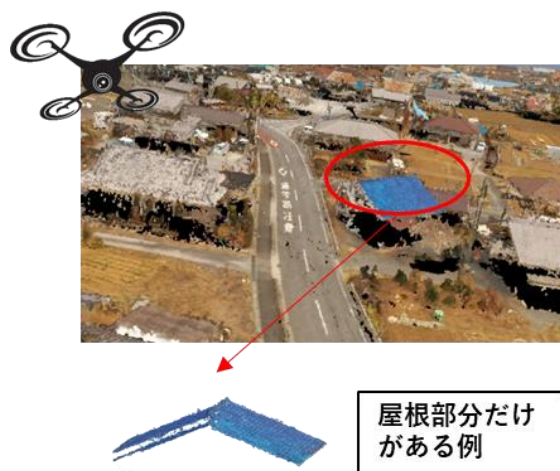


図 1 UAV を用いた 3D 再構成の際に、オクルージョンなどの情報欠落により 3D 点群が欠落する問題。

大規模シーンの三次元復元の問題を解決するために、今まで多くの手法が提案された。Bashar らは、Ultra High Definition (UHD) ビデオに基づく三次元都市モデリングを提案した[4]。UAV から取得した UHD ビデオを用いて三次元復元を行い、復元された点群の密度を HD ビデオで生成された結果と比較した。UHD ビデオは点群の品質を向上させるが、UAV からのオルソ撮影が原因のオクルージョンにより情報の欠落が生じる。Chen らは複数の UAV を用いた大規模シーンの三次元復元システムを提案し、複数のドローン追跡下での軌跡ドリフト問題を最適化した[5]。撮影画像の枚数を増やすことで、オクルージョン問題に由来する情報の欠落をある程度軽減することができた。しかし、複数台の UAV の運用にはより多くの労力と時間がかかるという問題がある。Omid らは、UAV の無線計測を利用して、都市の三次元復元を実現している[6]。非視覚センサを用いることで点群情報の欠損の問題は解決できるが、復元されたモデルには RGB 情報が含まれていないため、都市モデルの可読性に欠ける。そこで我々は、図 2 に示すように、UAV の正投影図にお



図 2 大規模なビジョンベースのシーンの復元と補完の全体的なプロセスを示す。まず、UAV で空中多視点画像を取得し、SfM で三次元シーンを復元する。次に、本論文で提案した壁面点群補完法により、広いシーンの点群地図を得ることができる。

けるオクルージョンによる建物の壁の欠損を補完するために、建物形状に基づく点群補完アルゴリズムを提案する。ビジョンセンサの RGB 情報は保持され、同時に生じるオクルージョンの問題も解決される。

## 2. 大規模三次元シーンの復元

### 3.1 Structure from Motion

多視点画像から三次元構造を復元する手法として、SfM[7]を用いる。UAV に搭載されたカメラの固有パラメータは、復元精度を向上させるために、事前にキャリブレーションによって求められているものとする。SfM の最も重要な処理ステップは、3次元復元を行うために最適な初期画像ペアを選択することである。まず、初期化された画像ペアをバンドル調整に使用し、その後、適切な画像がなくなるまで、新しい画像を追加して復元し、新しい点を三角測量する。そして、カメラの外部パラメータとシーンの形状情報を取得し、疎な三次元点群として表示する。最後に、密な点群復元によって疎な三次元点群を最適化し、大規模なシーンのより良い三次元モデルを得る。

### 2.2 壁の点群補完

UAV の視点とオンボードカメラの視点を融合するための重要な課題は、両視点に共通する情報を見つけることである。共通する点群のレジストレーションによって、車載カメラのカメラ座標から大規模シーンの世界座標への相対的な姿勢を算出することができる。UAV のオルソビューで広域シーンマップを生成する場合、多くの点群は主に建物の屋根に集中する。この屋根の点群は、地上からの視点からは得ることが困難である。また、UAV 搭載カメラで得られる情報は、主に建物の壁や道路の情報であるため、建物の幾何学的特徴に応じた壁面点群情報を生成する方法が必要である。以下、具体的な補完処理について詳細に説明する。  
レイヤーベースのセグメンテーション：図 3(a) に示

すように、建物形状に基づくレイヤーベースの点群補完方法を提案する。典型的な建物形状を仮定すると、建物の壁は軒先のエッジを伸ばすことで構造を得ることができることがわかる。そこで、3D マップを上から下への高さ (Z 軸方向) に応じて、異なるレイヤーに分割する。レイヤーの高さは画像のピクセルと解釈でき、レイヤーが密集するほど高い解像度を表し、これは再構成された三次元マップの精度が高いことを意味するが、同時に計算コストが大きくなることも示している。本論文では、計算量と高さ推定の精度のバランスをとり、層の高さを 4m とし、層 ( $h_i$ ) の壁面の各層は、前の層 ( $h_{i-1}$ ) の点群に基づいて検出し、地上層で反復が終了するまで繰り返す。そうして、最終的に、地図全体の壁面を推定することができる。

壁面補完アルゴリズム：建物レイヤーの壁情報を補完するために、壁のエッジ検出アルゴリズムを提案する。具体的なアルゴリズムは以下の通りである。まず、セグメンテーション後の屋根を頂点とする三次元階層点群を Z 軸方向に従って二次元平面に圧縮し、図 3 (b) のような二次元点群マップを取得する。各点群の端は二次元の軒先であり、建物の壁として張ることができる点であると見なすことができる。壁の (x, y) 座標情報を得た後、二次元点群から抽出したエッジ点を符号化し、元の三次元点群に従って照会し、高さ情報を得ることができる。各二次元点群における点の半径  $r$  以内の最近傍点を kNN で問い合わせる。そして、図 3(c) に示すように、最近傍点間の角度が閾値より大きい点をエッジ点として設定する。この手法は、Angle Criterion[8]の点群エッジ検出法における三次元点群の処理手段を改良したものである。次に、検出された三次元壁面のエッジ点を Z 軸方向に伸縮させ、この階層の壁面点群を生成する。

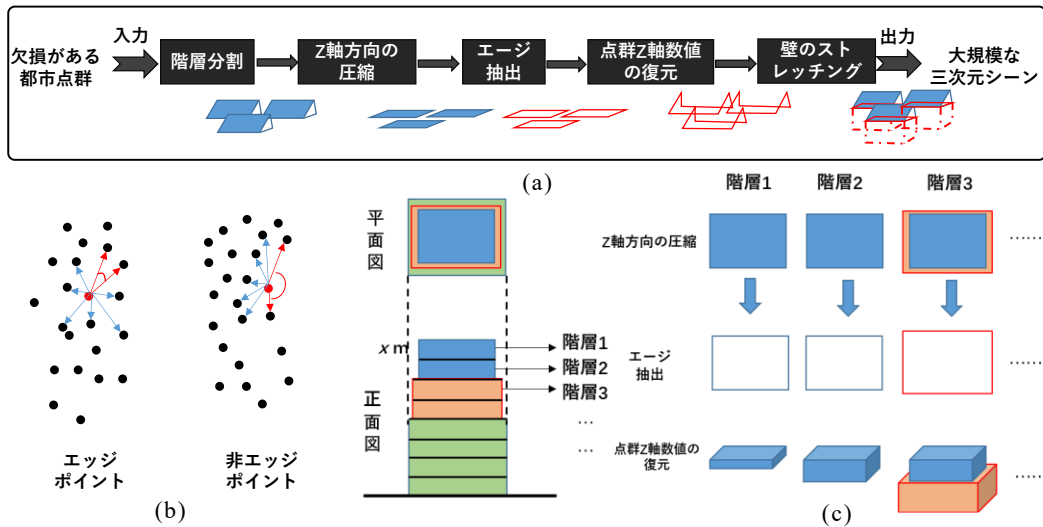


図 3 階層ベースの建築壁面補完アルゴリズムの処理フロー。(a)は壁面補完アルゴリズムの処理流れ。(b)はエッジ抽出アルゴリズムにおけるエッジ点の定義手法。(c)は階層化セグメンテーションの模式図。

### 3. データセットの生成

大規模なシーンモデルや移動する点群のグラントゥールスを生成することは困難であるため、アルゴリズムの妥当性を評価するために、仮想現実空間を使用して現実世界のシーンをシミュレーションする。Unreal Engine 4 を利用して、道路、建物、道路標識、樹木などの一般的な街並みが含まれる商店街のシーンをシミュレートする。さらに現実に近いように、光もレンダリングされている。シーン全体を図 4 に示す。

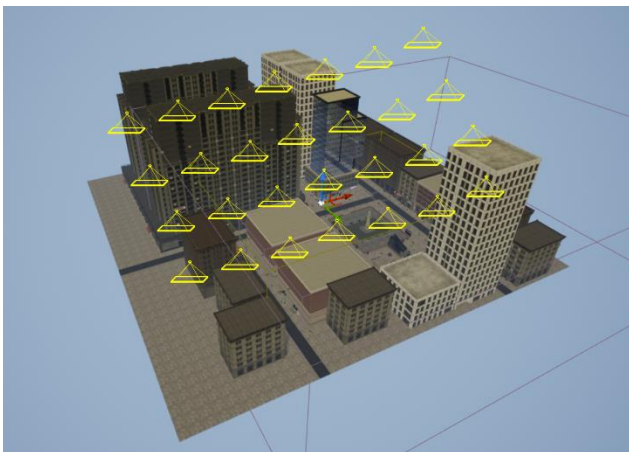


図 4 データセットの生成ため、都市モデルとドローンの飛行するルート。

また、UAV は AirSim[9]でシミュレーションし、UAV の下部に解像度  $2704 \times 1520$  の RGB カメラを設置した。空中からオルソ多視点画像を取得するため、ドローンを高度 120m に設定し、格子状に移動させて撮影を行った。120m という高さは、日本の航空法で認められて

いる UAV の最大飛行高さが 150m であるため、150m の高さより少し低い一般的な高さとして設定した。大規模シーンモデルのグラントゥールスには、仮想現実空間におけるシーン全体の三次元モデルを出力して、三角メッシュをグリッドとしてモデルをサンプリングした  $0.01 \text{ m}^3$  ボクセルの密度にしたがってメッシュデータから点群をサンプリングしている。

### 4. 実験

壁面補完アルゴリズムの有効性を検証するため、大規模三次元シーンの点群を壁面補完アルゴリズム使用前と使用後で比較した。評価尺度として、点群復元の完全性と補完精度の両方を計測した。図 5 に示すように、CloudCompare ソフトウェアを使用して、復元された点群とグラントゥールスの点群をレジストレーションして、その点の間の距離を算出して精度を評価した。復元前後で誤差範囲が 5m 以下のポイントに大きな改善が見られることがわかる。建物の形状に合わせて復元された点は信頼性が高い。

これに加えて、図 6 に示すように、点間距離のヒートマップを作成し、復元された点群の完成度を表現した。この場合、点間距離は赤から青へ、大きいものから小さいものへとグラデーションで表示される。距離が小さいほど、ヒートマップは青色に向かって着色される。図 6 上の建物の前の壁面部分には点群がないため、誤差が非常に大きくなっていることがわかる。建物の壁部分の相対誤差は補完後(図 6 下)には小さくなっており、補完アルゴリズムによって広いシーンの三次元復元の整合性が向上したことがわかる。



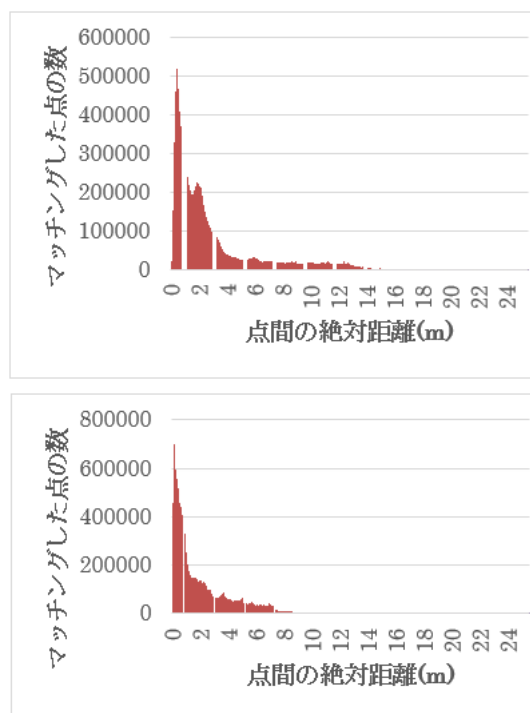


図 5 グラントゥールズから算出された点間距離のヒストグラム。x 軸はマッチしたペアの点間距離、y 軸は存在する点の数。上が補完手法適用前の結果、下が補完手法適用後の結果。

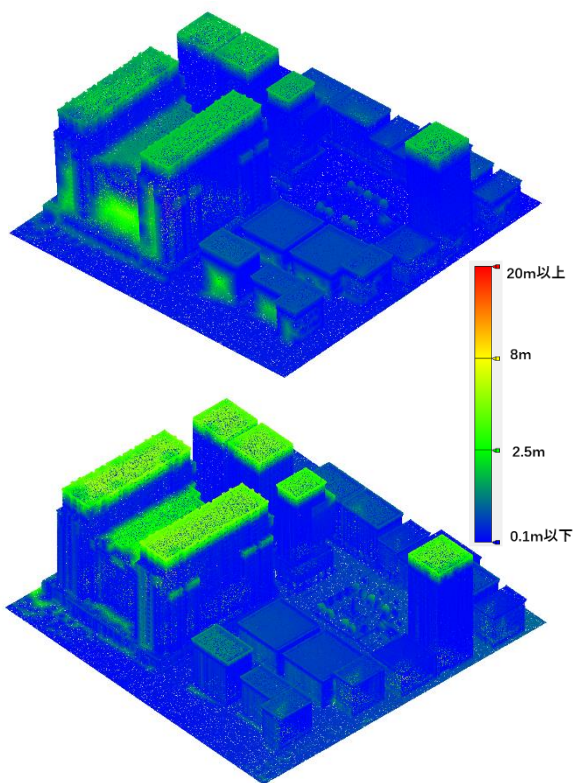


図 6 点間の絶対距離による、生成された点群モデルのヒットマップ図。上が補完手法適用前の三次元シーン、下が補完手法適用後の三次元シーン。

## 6.まとめ

本論文では、UAV による大規模シーンの三次元復元において、建物の壁の欠損に欠損が生じる問題を解決するために、階層的点群補完法を提案した。建物の幾何学的特徴を利用して既存の点群情報を拡張することで、広いシーンでの点群補完を実現した。このアルゴリズムは、仮想現実空間で生成されたドローンデータで検証された。点群補完前後の広いシーンの三次元モデルの精度は、点間距離の計算によって評価され、さらに補完前後の大規模シーン点群の整合性をヒットマップで評価した。実験結果により、本アルゴリズムの有効性が確認された。今後の課題は、このアルゴリズムを車両の自己位置姿勢推定に適用し、UAV と車の共通する情報を統一することで車両の自己位置姿勢推定の精度を向上させることである。

## 文 献

- [1] J. D. Renwick, L. J. Klein and H. F. Hamann, "Drone-based reconstruction for 3D geospatial data processing," 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 729-734, Dec.2016.
- [2] N. Mohd Noor, A. A. A. Abdullah, A. Abdullah, I. Ibrahim, and S. Sabeek, "3D CITY MODELING USING MULTIROTOR DRONE FOR CITY HERITAGE CONSERVATION", PM, vol. 17, no. 9, May 2019.
- [3] Di Zhang, Feng Xu, Chi-Man Pun, Yang Yang, Rushi Lan, Liejun Wang, Yujie Li, Hao Gao, "Virtual Reality Aided High-Quality 3D Reconstruction by Remote Drones", ACM Transactions on Internet Technology Volume 22 Issue 1, Article No.18, pp 1-20, Feb. 2022.
- [4] B. Alsadik and Y. H. Khalaf, "Potential Use of Drone Ultra-High-Definition Videos for Detailed 3D City Modeling," ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 11, no. 1, p. 34, Jan. 2022.
- [5] F. Chen, Y. Lu, B. Cai and X. Xie, "Multi-Drone Collaborative Trajectory Optimization for Large-Scale Aerial 3D Scanning," 2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct), pp. 121-126, Oct.2021.
- [6] O. Esrafilian and D. Gesbert, "3D City Map Reconstruction from UAV-Based Radio Measurements," GLOBECOM 2017, 2017 IEEE Global Communications Conference, pp. 1-6, Dec. 2017.
- [7] Johannes L. Schonberger, Jan-Michael Frahm, "Structure-From-Motion Revisited", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4104-4113, Jun. 2016.
- [8] Lawlor, G. The angle criterion, "The Angle Criterion" Invent Math 95, 437-446, 1989.
- [9] Shah, S., Dey, D., Lovett, C., Kapoor, A, "AirSim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles.", Springer Proceedings in Advanced Robotics, vol 5. Springer, Cham, 2018.