

3D都市モデルを対象とした点群データによる 大まかな建築群復元手法の検討と評価

原田 歩¹ 廣森 聡仁² 山口 弘純¹

概要: 住居や店舗などの建造物の位置や大きさを把握するため、建造物の三次元構造を把握する取組が多数為されている。これらの取組においては、カメラやLiDARなど、遠隔から対象物を観測可能なセンサにより、対象物を多方向から観測し、これらの観測結果をオフラインにて統合することにより、建造物の三次元構造を詳細に復元し、その特性を把握している。本取組では、既存の取組で取得しているような詳細な三次元点群データではなく、直線的に移動するドローンに搭載されたLiDARによって観測された三次元点群データから、建造物の三次元構造を大まかに復元する手法を提案する。提案手法においては、対象物を建築構造物に限定し、建築構造物を構成する側面同士のなす角が概ね90度であること、鉛直方向に形状が変わらないことなど、建築構造物が有する一般的な幾何学的特性を仮定することで、その三次元構造を効率的に復元している。評価実験では、株式会社ZENRINが公開している3D都市モデルにおける、様々な形状及び大きさの建造物に対して、センサにより観測される範囲を限定して観測された三次元点群に対し、提案手法により三次元構造を復元した。建造物を基準に150度の範囲で観測した際、上記の特性を満たす建造物のうち、提案手法により、7割程度の建造物の三次元構造を復元が可能であり、単純な移動により観測された三次元点群からでも、多くの建造物の形状を把握できることを示した。

1. はじめに

ドローンは元々軍用目的で用いられていたが、近年の技術発展により飛行精度の向上や小型化が進んだことから、様々な分野での導入がすすんでおり、更なる分野拡大が期待されている。例えば、米国アマゾンではドローンを使った配送サービス Amazon Prime Air の実用化に向け、米連邦航空局 (FAA) から必要な認可を受けており、また、楽天はドローン物流サービス「そら楽」を進めている。現状、このような配送サービスの実現においては、飛行実績を有する操縦者による目視外飛行が欠かせないが、膨大な配送需要に対して、十分な操縦者が育成できるかは不明確であり、ドローン自体を自律的に飛行させることが求められる。ドローンが自律飛行を行う際には、障害物を避けつつ目的地まで向かえるような経路が必要となるが、そのためには、ドローンが飛行する周辺の状態を逐次的に把握する必要がある。ドローンに対して障害物となる建造物の存在やその構造を把握する既存の手法の多くは、カメラやLiDARにより、建造物を多方向から観測した観測結果をもとに行われているため、飛行中のドローンからの観測に必ずしも適しているものではない。

本取組では、単純な移動をするドローンに搭載されたLiDARによって観測された建築群の三次元点群データから建造物の三次元構造を大まかに復元する手法を提案する。提案手法では対象物を建築構造物に限定し、建築構造物を構成する側面同士のなす角が概ね90度であること、鉛直方向に見た時にその輪郭が変化しないことなど一般的な建築構造物の特性を仮定することで、その三次元構造を効率的に復元している。提案する手法では、まず、三次元点群を地表面上に投影し、建造物の外壁にあたる線分をRANSACを用いて検出し、得られた線分群のうち直交し、端点同士が近傍に存在するような線分の組を抽出することで、それらの交点を建造物を構成する柱であると推定する。限られた動きの中では建造物の全ての面、柱を点群として捉えられないため、捉えられなかった部分に関しては前述の建築構造物を構成する側面同士のなす角が概ね90度であるという仮定を用いて推定する。これらによって得られた柱の位置と、観測された三次元点群から推定されるそれらの高さをもって建造物の三次元構造を把握する。

評価実験では、株式会社ZENRINが公開している3D都市モデルにおける様々な形状及び大きさの建造物に対して、LiDARセンサによって観測の行える範囲を限定して得られた三次元点群をもとに建造物の三次元構造を復元した。建造物を基準に150度の範囲で観測を行った際、上記

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 大阪大学大学院情報科学研究科/JST さきがけ

で仮定した建築構造物の特性を満たしているもののうち7割程度の構造物の復元が可能であり、単純な移動によって観測された三次元点群からでも多くの構造物の三次元構造を把握できることを示した。

2. 関連研究

三次元物体の形状を復元する手法として、多方向からの観測に得られた画像に基づく手法が数多く研究されている [1]。これらの手法においては、複数の視点から観測された異なる画像において、対象物表面上で同一の点を関連付け、画像上におけるそれらの点の座標を基に三角測量の原理に基づき、対象物表面の三次元上の座標を導出することで、対象物の構造を復元している。その際、複数の画像内の対象物表面の点が同一であるかを判定する基準として、色や明るさ、形状などの特徴量が用いられている。このような多数の画像に基づき構造物の形状を復元する手法として、Structure from Motion (SfM) [2]、Multi View Stereo (MVS) [3] が挙げられる。SfM は複数の画像からカメラの位置と姿勢、ある三次元上の点がどのカメラから見えているかを表す対応関係、撮影された対象物体の三次元点群を推定する手法である [4]。ある空間上の点が複数の画像において共通であることを判定するために、エッジ情報 [5] や輝度勾配 [6] が特徴量が用いられている。これらの特徴量は、ビデオ映像などの連続フレーム間の画像といった各画像間におけるカメラ運動が非常に小さい環境において有効である。さらに、各画像のある画素を通る光線が三次元空間で交わるという幾何学的拘束条件であるエピソード拘束 [7] に基づいてカメラの位置と姿勢及び三次元上の点が推定されている。以上のアルゴリズムを用いて、隣接する箇所では撮影した二枚の画像から開始し、少し異なる位置で撮影した画像を一枚ずつ追加して処理することで、対象物の三次元点群を構築している。また、用いられた特徴点と推定された三次元点群を画像平面に再投影した点の間にはカメラの内部パラメータなどの影響により生じてしまう誤差を最小化するために、全ての未知数(カメラの内部、外部パラメータ、及び三次元点群)を探索するバンドル調整という技術も用いられる [8] など、様々な処理を経て、三次元点群が復元される。SfM で推定したカメラの位置と姿勢情報及び対象物の三次元点群を用いて、より密な三次元点群を求める手法として、Multi View Stereo (MVS) [9], [10] が提案されている。MVS では、SfM によりカメラの位置や姿勢についての情報は得られているものとして、ステレオ視の原理を用いて、より密な点群を得ている。この手法は、ある三次元上の点を複数の視点から観測し、それぞれカメラからの深度を推定し、三次元上の点についての深度を深度分布にまとめている。この深度分布を新たなフレーム、つまり新たな入力画像が入力されるたびに更新し、より適している深度を計算することで

密な三次元点群を求めており、1秒間に1500万個の分布を更新することが可能である。文献 [11] では、高さ0.92mの花瓶 [12] を1920×1080pxで撮影された66枚の画像から復元した結果について、SfM と MVS のそれぞれにおいて、COLMAP[13][14]、OpenMVG[15]、Theia[16]、VisualSfM[17] を実行した時の復元結果及び実行時間が評価されている。構造物の形状を数センチの誤差で復元できている一方、個々の構造物の復元について、10分から30分要しており、また、メモリ使用量も大きく、負荷の高い処理となっている。これらの手法は、対象物の形状を高精度に復元できる一方、復元に要する処理時間が長くなる傾向がある。また、対象の物体に対して取り囲むような画像や、連続的な動きの中で撮影された画像を必要とするなど、入力として利用する画像に対する制約が少なからず存在する [18]。また、文献 [19] においては ALS(Airborne Laser Scanning) と呼ばれる、航空機に搭載した LiDAR によって観測されたデジタル標高モデルによって建築群の3Dモデルを作成している。この手法では上空からの一方的な観測になるため、急勾配やオーバーハングする建築物などの復元は困難である。

文献 [20] ではあらゆる方向から観測された大規模で密な三次元点群データから建築物の体積的構造を把握している。地表面に対して鉛直方向に沿った一連の点群データ中の断面の輪郭の基本的構造を抽出する。断面の輪郭の基本的構造とは直線のことを指し、RANSAC に比べてよりノイズや外れ値に強く、構造物の輪郭における直線検出に特化したアルゴリズムを考案している。全ての輪郭をもとに押し出しなどの3Dモデリング操作を行い、建築物の三次元構造を生成する。都市建築物の体積的構造を高精度で把握できるという点で提案手法の目的に合致しているが、それぞれの建築物を多方向から観測した密な三次元点群を入力とし、複数の建築物に対しては数十分という処理時間がかかる。

3. 提案手法

2章で述べたように、既存の手法ではあらゆる方向から撮影された画像を利用することで、精密な対象物の復元が実現されている。一方、本取組においては、高速に移動するドローンに搭載された、対象物までの距離を計測する LiDAR から得られた、疎な三次元点群データに基づき、対象物の大まかな三次元形状を復元する手法を考案する。ドローンが対象領域を直線移動するとした際、この移動中に得られた三次元点群は、ドローンの移動速度、LiDAR の観測周波数、LiDAR から対象物までの距離、LiDAR の分解能に依存する。そのため、対象領域全体を短時間で計測できるよう、ドローンが高速に移動する際には、観測周期毎の移動距離が大きくなるため、得られる点群の密度は低下する。このように、高速に移動するドローンにより得ら

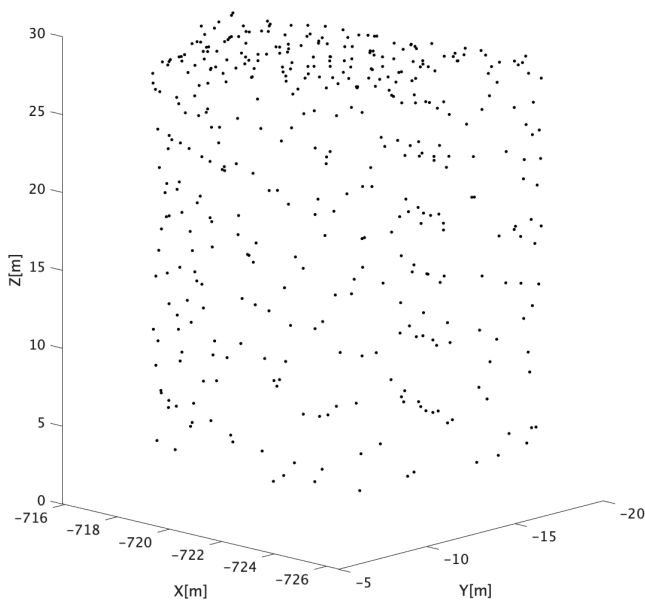


図 1 観測された三次元点群の例

れる三次元点群の一例を、図 1 に示す。この図に示される点群の密度はおよそ $1.3 \text{ 点}/\text{m}^2$ となっている。また、対象とする物体を建築構造物に限定し、その幾何学的な特性を利用することで復元に関わる処理を簡略化し、リアルタイムな形状復元を実現する。仮定する特性として、建築構造物を構成する側面同士のなす角が概ね 90 度であること、建築構造物を地表面に対して鉛直方向に捉えた際、同じ形状が続いていることの二つを利用する。本取組では、上記に示したような点群から、対象物の存在を把握するとともに、鉛直方向に同じ形状が続いているという建築構造物の特性を用いて、柱の位置及び高さのみを推定し、構造物の大まかな形状を復元する。直線移動のように、制限された動きから、対象物を観測する際には、対象物全体を観測できるわけではなく、構造物を構成する柱の一部のみが点群に示されることとなる。提案手法では、まず、観測によって得られた点群から直接柱の存在を把握するとともに、構造物の特性に基づき、その構造物の他の柱を推定する。ある構造物について、点群から柱を一本推定できた場合は、構造物が直方体であると仮定し、直方体の図形的性質である点对称性を用いて、その構造物の他の柱の存在を推定する。また、二本以上の柱が検出された場合は、建築構造物を構成する側面同士の角度は概ね 90 度であるという仮定に基づき、点群からは直接観測することのできない、構造物の裏側の柱の存在を補完し、構造物の形状を把握する。

3.1 構造物に関する幾何学的な特性

本取組では、建築群の大まかな形状復元を行うため、構造物表面上の細かな凹凸などは考慮せず、構造物を構成する面や辺といった基本的な構造のみを、構造物を特徴づける特性として取り上げる。株式会社 ZENRIN が公開している秋葉原の 3D 都市モデルデータ [21] を対象に都市部の

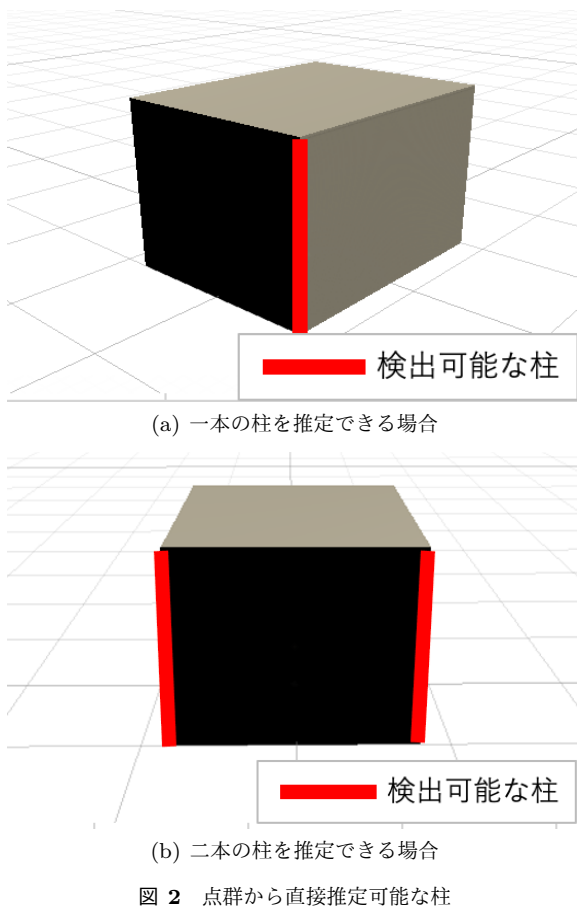
構造物の形状の特性を調査した。このデータセットには高さ 4m のものから 100m を超えるもの、敷地面積 10m^2 から 500m^2 以上のもの、直方体のものから複雑な形のものまで 1068 の構造物が含まれている。提案手法において仮定する建築構造物として幾何学的な特性の一つである、建築構造物を構成する側面同士のなす角について調査した結果、全ての角が概ね 90 度で構成されている建築構造物は全体の 87.7% であった。もう一つの特性は、建築構造物を地表面に対して鉛直方向に見た時、その二次元上の輪郭が高さごとに変化するかどうかであるが、鉛直方向に形状が変わらなかった構造物は全体の 84.6% を占めていた。以上の調査からこれらの特性は多くの一般的な建築構造物にも共通する特性であると考えられる。

3.2 クラスタリングによる対象物の分割

まず、対象物の存在を把握するために、ユークリッド距離に基づくクラスタリングにより、観測された疎な点群から、個々の構造物を抽出する。具体的には、観測された三次元点群に含まれる全ての点間の距離を計算し、それらの点間の距離がある閾値以下のとなる点群を集約し、分割することで、個々の構造物の存在を把握する。本手法において、観測に用いる LiDAR の分解能、観測周波数、LiDAR と観測者のおおよその距離、また、観測者の移動速度によって得られる点群の密度が変化するため、この閾値はある固定のものではなく、それらのパラメータによって変化させる。LiDAR の分解能を α 度、観測者から対象物までのおおよその距離を l とすると、対象物表面上における LiDAR から同時に照射され、隣接するレーザによる到達点間の距離は $2l\sin(\frac{\alpha}{2})$ と表される。実際は移動しながら複数箇所から観測を行うため、この距離よりも近い距離で点群は生成される。同一対象物表面上の点はこの距離以下となるため、クラスタリングで使用する閾値をおおよそこの値にすることで、対象物毎のクラスタリングが実現される。

3.3 構造物を構成する柱の推定

本手法では、対象物の形状をその対象物を構成する柱から把握するが、まず、点群のみに基づき柱の存在を把握した後、対象物に対する形状の仮定を活用し、それらの柱の位置から、点群からは直接観測できない柱の存在を推定する。点群として観測可能な柱であるか否かは、構造物に対する観測者の位置により定まる。例えば、図 2 (a) に示されるような視点から、左右に移動し対象物を観測する際には、点群からは対象物の二つの面の存在を把握できるため、赤の線で示す柱を観測することができる。一方、2(b) に示される視点から、左右に移動し対象物を観測する際には、対象物の三つの面の存在を把握できるため、二本の柱を観測することができる。このように、観測を開始した始点から終点までの各観測点において、観測できる対象物の面の



数は変化する。対象物を直方体とし、また、観測者が直線移動する場合には、点群として観測される面は高々三つであるため、点群から直接観測できる柱の本数は二本以下となる。

個々の対象物の点群が得られた後、その点群から、構造物を構成する柱となる部分を推定する。構造物が直方体であれば、その形状を把握することは、その構造物を構成する四本の柱の位置と高さを導出することを意味する。構造物の柱は概ね鉛直方向に直線状に伸びているものと仮定した際、対象物を地表面に投影することで、辺と辺が交わった部分を柱として把握することができる。観測された三次元点群を地表面へ投影したものを図 3 に示す。

二次元投影された点群に対し、RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS)[22] を用いて線分を検出し、線分が交差する点を柱として推定する。推定すべき線分が一本のみである場合は、最小二乗法を用いて線分を推定する手法も提案されているが、今回のように複数の線分を求める場合は外れ値を含まないようなデータであったとしても、それぞれの線分がその他の線分に対して外れ値のような影響を及ぼす可能性があるため、複数の線分を検出するために RANSAC を利用している。図 4 に、観測された点群に対して、線分を検出した一例を示す。検出された線分上にある点は除外し再び線分検出を行い、全ての点がいずれかの線分に属すまで同様の処理を繰り返す。RANSAC により

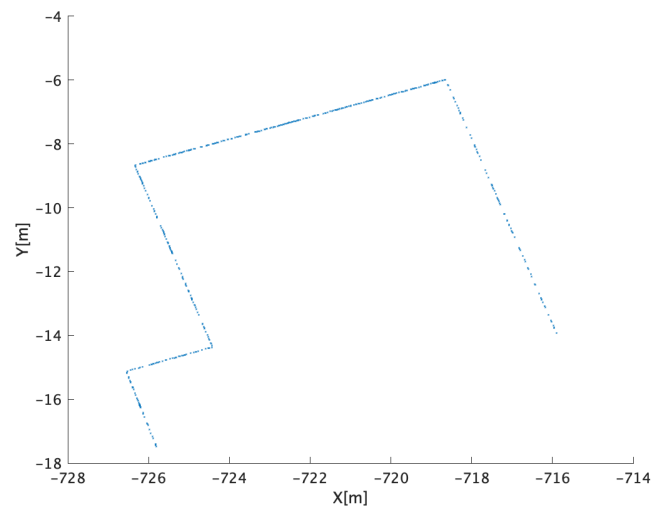


図 3 地表面への三次元点群の投影

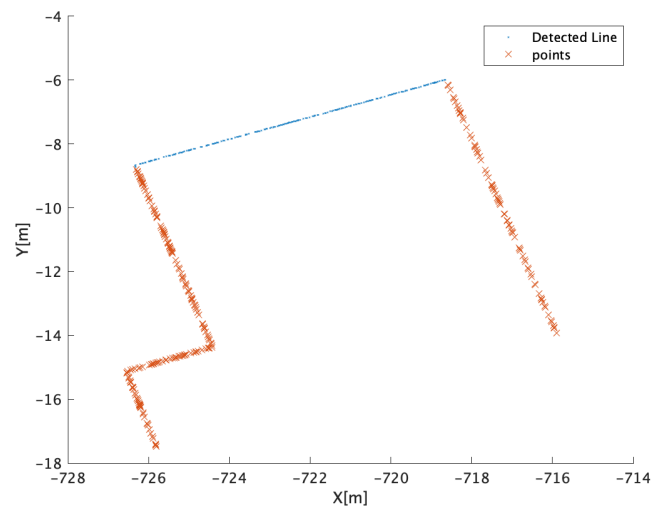


図 4 RANSAC による線分検出の一例

導出された二つの線分の端点が近い位置にあり、また、それらの線分が 90 度に近い形で交差している場合、線分が交差している位置を柱として推定する。図 5 において、四角で囲まれている部分が、点群に基づき推定できた柱の位置を示している。

3.3.1 直方体を対象とした柱推定方法

点群から柱が一本しか推定できなかった場合、対象物に関するそれ以上の情報が得られないため、その対象物の形状を直方体であると仮定し、直方体の図形的性質である点対称を用いて、残りの三本の柱の位置を推定する。柱が一本認識されているということは、図 6 に示されるように、線分が二本以上推定されていることを意味する。このように柱を構成する二本の線分について、柱ではない方の端点をそれぞれ別の柱とし、直方体の点対称という図形的性質を用いて、四本目の柱の位置を推定することで、直方体全体の構造を推定することができる。

3.3.2 多角柱を対象とした柱推定方法

図 5 に示すように、点群から二本以上の柱を推定でき

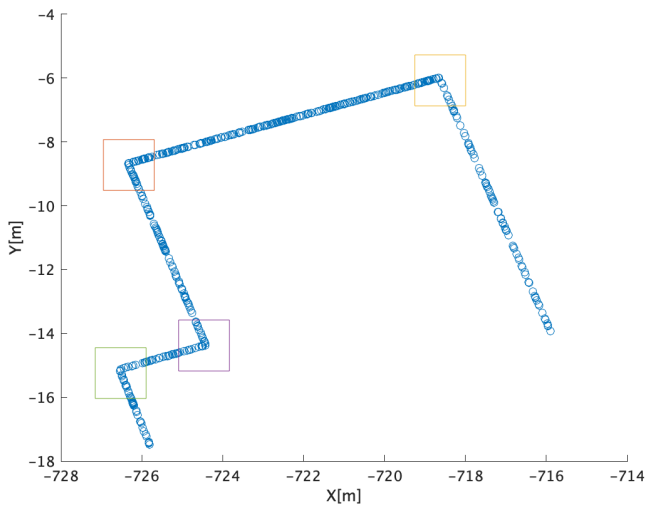


図 5 点群に基づき推定された柱の位置

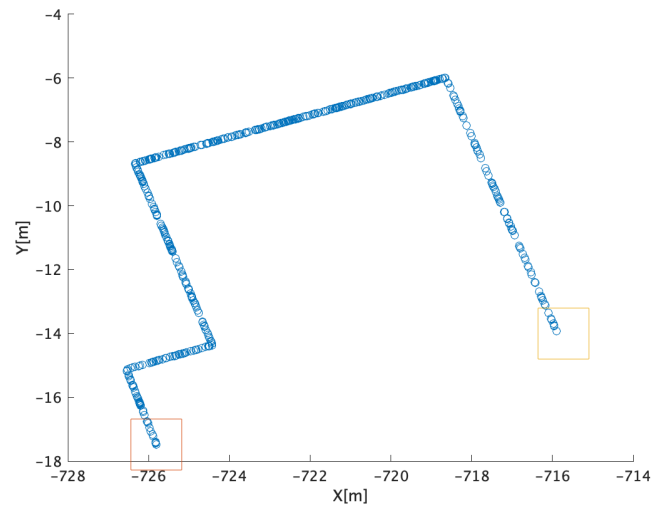


図 7 点群から直接推定できない柱の推定

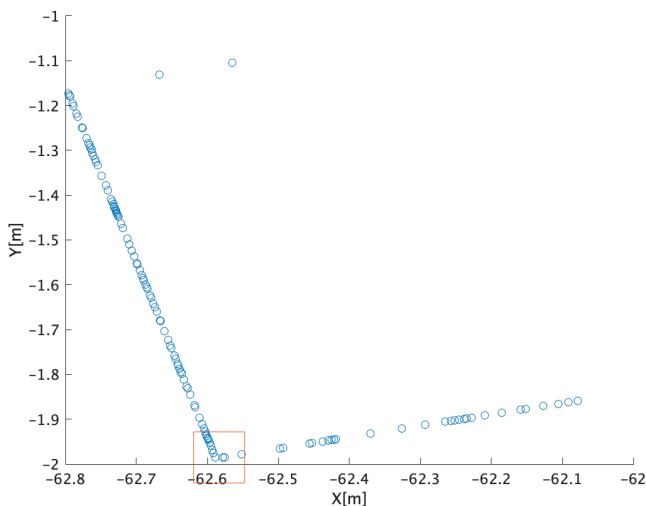


図 6 点群から柱が一本のみ推定された場合

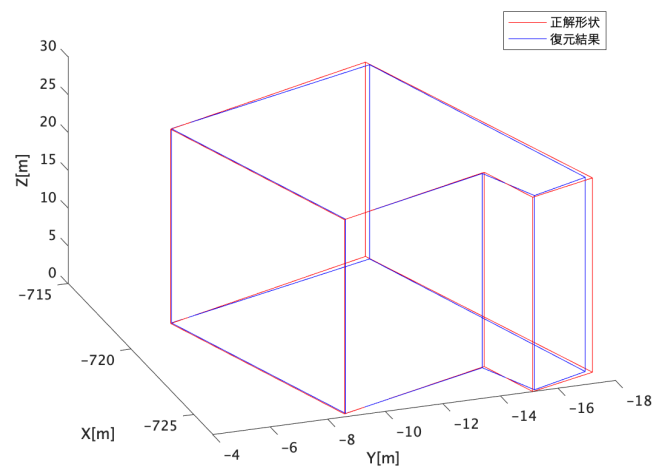


図 8 三次元復元の一例

た場合においても、多角柱を構成される全ての柱を点群から推定できるものではなく、 $(x, y) = (-726, -18)$ から $(-716, -14)$ の部分に関しては点群が得られていないため、観測できている部分の情報をもとに推定によって柱の位置を把握することが求められる。この場合、検出された線分のうち片方の端点のみが柱として認識されているものが、 $(x, y) = (-726, -18)$ から $(-726, -16)$ と $(x, y) = (-718, -6)$ から $(-726, -16)$ として二本存在している。この手法では、多角柱を構成する辺同士は 90 度の角度を成すものとし、この内の一本の線分に直交するように面が存在するものとする。そのため、一つの柱は線分の端点となり、別の線分については、その線分を伸ばし、面と交差する部分を柱とすることで、二つの柱を推定する。図 7 に本手法を用いて推定された柱を示す。

3.4 各柱に関する高さ推定

3.3 節で述べたように、構造物を復元することは、柱の位置及び高さを決定するを意味する。点群から直接観測さ

れる柱については、観測の段階で十分にその近傍の三次元点群情報を得られることから、柱の位置の鉛直方向に存在する点群を抽出し、外れ値を除去した後、十分信頼できるほどの点が存在する範囲をその柱の高さとする。一方、構造物に対する仮定に基づき、その存在を把握した柱については、三次元点群が得られていないため、上記により得られた柱の高さ情報を平均したものを、柱の高さとする。図 8 にこれまでの一連の処理を実行し、得られた三次元復元結果の一例を示す。

4. 評価実験

4.1 概要

提案手法を評価するために、前述の株式会社 ZENRIN が公開している秋葉原の 3D 都市モデルデータを Unity[23] に取り込み、シミュレーションにより評価実験を実施した。本取組では、建築群に対して観測を行うことを想定しているため、観測者の移動経路やその他の構造物による遮蔽などを考慮する必要があり、各構造物を観測できる範囲には制約がある。提案手法により各構造物に対してどれほどの

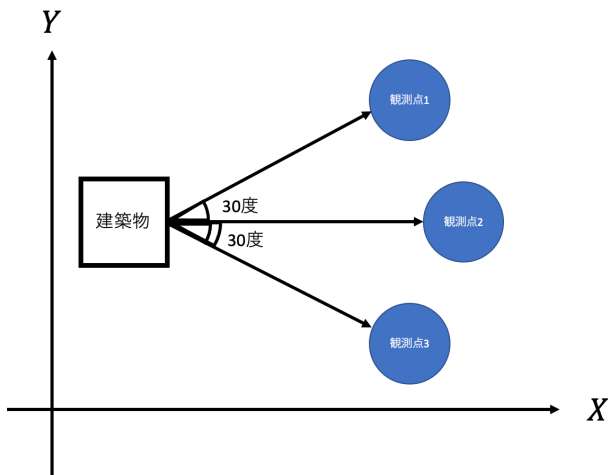


図 9 角度間隔と角度範囲の例

観測を行えば復元が可能であるかを評価するために、各構造物に対してシミュレーション空間上にその構造物のみが存在する状況を作り出し、複数の観測点から観測を行い、その観測に基づき復元を行った。

観測の程度の指標として構造物から見た複数の観測点の範囲を定義する。構造物及び全観測点をそれらの高さにあたる z 座標を無視した $x-y$ 平面に投影する。ある任意の観測点を定め、構造物からその観測点へのベクトルを v とする。 n 点ある観測点それぞれにおいても同様にベクトル v_1, v_2, \dots, v_n とする。各ベクトルのベクトル v からの回転角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ ($-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) を求める。求めた θ の中で最大のものを θ_{max} 、最小のものを θ_{min} として、 $\theta_{max} - \theta_{min}$ で求まる角度を観測の角度範囲とする。観測は3点以上で行うことが多いため、隣接した二つの観測点間におけるこの角度を角度間隔、全ての観測点におけるこの角度を角度範囲として観測を表現する。図9に角度間隔30度、角度範囲60度の観測の例を示す。

観測を行う際には観測に関して様々なパラメータを設定する必要がある。観測に用いるLiDARセンサはレーザを照射しそれが構造物表面上に当たって跳ね返ってくるまでの時間を計測することで観測者とその点までの距離を計測するものであり、そのレーザの照射できる角度的範囲及び距離には限界がある。角度的限界の影響により構造物全体をその視野角に収めるためには構造物より高い高度から見下ろして観測を行う必要がある。今回用いるデータセットに含まれている構造物の99.4%は高さ80m以下であるため、観測者の高度は100mとした。また、観測者と構造物の距離については一般的なLiDARの性能を考慮し、約140mとした。レーザの照射する角度範囲は今回設定した観測者の高さ及び構造物の高さを考慮して45度の範囲とした。本実験ではシミュレーション上で構造物、観測者、観測に用いるLiDARを作成した。

4.2 評価指標

構造物の復元を行って出力されるデータは、構造物を構成する床面の頂点及び辺、そしてそれぞれの頂点における高さである。本取組では構造物の存在そのものとその大きさ、位置をある程度把握することが目的であるため、復元した構造物と本来の構造物を大まかに比較する。そこで物体検出などでも用いられるIoU(Intersection over Union)という評価指標を用いる。IoUは二次元上で二つの領域がどれほど重なっているかを表す指標となっている。計算方法としては二つの領域の共通部分面積を和集合面積で割ったものとなり、完全に一致した場合は1、全く重なっていない場合は0となる。同じ正方形を斜めに1/9だけずらした場合に約0.65となる。構造物の大まかな存在と位置を把握するためにはこの程度のIoUの値が必要であるとし、復元が成功する基準値を0.7と設定する。また、構造物の大きさに関しては構造物の高さにも依存する。そこで本来の構造物の高さと復元によって得られた推定の高さの相対誤差も考える。この高さ誤差に関しては大まかな大きさの把握を目的としているため、20%の誤差を許容し、それを復元成功の基準値とする。図10にIoUと高さ誤差の異なる復元結果の例を示す。なお図8で示した復元においてはIoUが0.9702、高さ誤差が 3.8×10^{-4} であり、特に精度の高い復元と言える。

4.3 実験結果

表1にある角度範囲において角度間隔を変えた時の基準値以上の復元が成功した割合を示す。ある構造物のある角度範囲におけるある角度間隔での観測は、観測点を全て45度ずつ回転させた試行を合計8回行う。これによって一つの構造物に対しても様々な視点からの観測および復元結果を再現することができる。角度範囲が30度の時、角度間隔を10度と密にした場合においても約90%の試行では復元が行われず、もしくは行われた場合でも基準値を下回る結果となった。

3.1節で述べたように提案手法は建築構造物を構成する側面同士のみならず角が概ね90度であること、建築構造物を鉛直方向に見た時に二次元上の輪郭が同形状であることを仮定している。そこで、表2にこれらの仮定を満たしているもののみを対象として表1同様に基準値以上の復元が成功した割合を示す。60度以上の角度範囲で観測を行った場合、約4%から8%の成功率の向上が見られ、提案手法がこれらの特性を満たしている構造物の復元に有効であることがわかる。

図11に構造物の高さごとに基準値以上の復元が行われたか、基準値以下の復元もしくはそもそも復元不可であったかを示す。この結果から高さが10mを境に復元結果が大きく変わっていることがわかる。これは観測者からの距離による影響であると考えられる。LiDARで用いられ

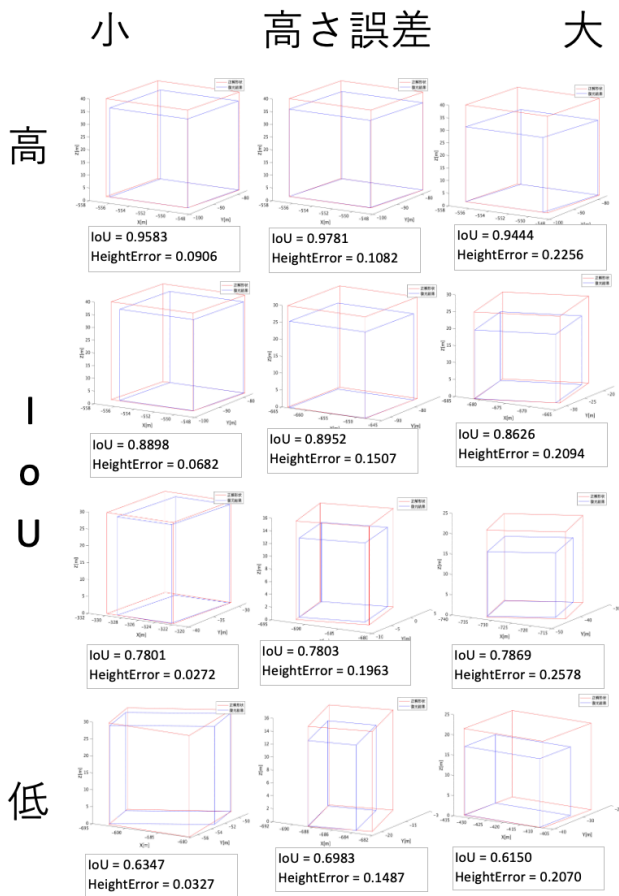


図 10 IoU と高さ誤差による復元結果の違い

表 1 各角度範囲において角度間隔を変化させた時の復元成功割合

角度範囲	角度間隔	
	30度	10度
30度	5.8%	11.2%
60度	45.5%	53.6%
90度	52.5%	57.9%
120度	57.3%	59.7%
150度	59.3%	60.7%

表 2 各角度範囲において角度間隔を変化させた時の復元成功割合 (構造物の特性を満たしているもののみを対象)

角度範囲	角度間隔	
	30度	10度
30度	5.2%	11.0%
60度	49.1%	59.9%
90度	57.7%	65.2%
120度	63.9%	67.5%
150度	66.0%	68.5%

るレーザは LiDAR のある 1 点の照射部から角度を変えて様々な方向へと照射している。隣接する 2 本のレーザを考えると LiDAR から近い位置で物体に当たった場合にはその物体表面上におけるレーザの距離はそれほど大きくないが、物体までの距離が遠ければ遠いほどその間隔は大きくなる。観測者の高度は 100m と一定であるため、どのよう

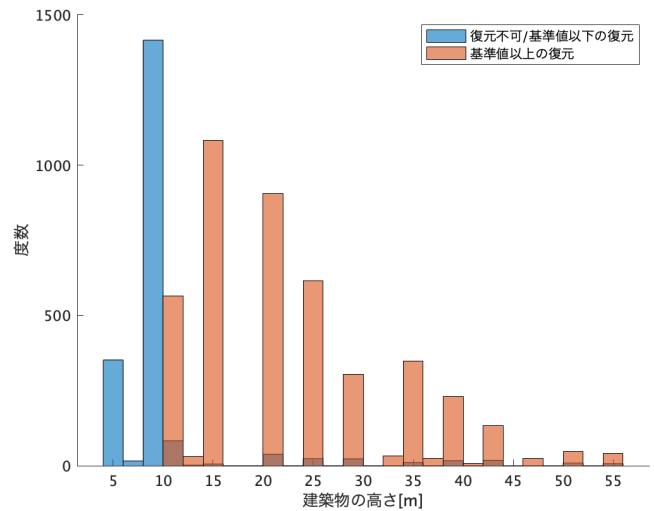


図 11 高さ毎の復元成功数

表 3 床面頂点数毎の復元成功数とその割合

床面頂点数	復元結果		
	成功	失敗/復元不可	成功割合
4	4334	2538	63.1%
5	170	158	51.8%
6	491	285	63.3%
7	43	37	53.8%
8	105	127	45.3%
9	1	15	0.06%
10	34	86	28.3%
11	0	8	0%
12	7	9	43.8%

な構造物においても高さの高い部分の方がより密な点群が得られる。高さの低い構造物に関しては得られる点群が疎な部分のみになることから、復元に十分な点群が得られずこのような結果になったと考えられる。

表 3 に構造物の床面の頂点数ごとに基準値以上の復元が行われたか、基準値以下の復元もしくは復元不可であったか、そしてその割合を示す。頂点数が増えるほどデータセットの母数が少なくなるため、単純な比較は難しいが、8 点を超えると成功割合が下がる傾向にあることがわかる。これは頂点数が増えることでより複雑な形状となり 90 度以外の角度で交わる場合が増えることによると考えられる。この点に関しては、より多くの形状を対象に、同様の評価実験を実施することで、この傾向がより明確になると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本取組では、直線的に移動するドローンに搭載した LiDAR によって観測された構造物の三次元点群から、建築構造物を構成する側面同士のなす角が概ね 90 度であることと、鉛直方向に見た時に輪郭が変化しないことなどの一般的な建築構造物に共通する特性に基づき、その三次元構造を大まかに把握する手法を提案した。評価実験では、株

式会社 ZENRIN が公開している 3D 都市モデルにおける様々な形状及び大きさの構造物に対して、それらの三次元構造を復元した結果、構造物を基準に 150 度の範囲で観測した際、7 割程度の構造物の三次元構造を復元が可能であり、単純な移動により観測された三次元点群からでも、多くの構造物の形状を把握できることを示した。

今後の課題として、仮定を満たさなかった構造物にも対応した復元手法の考案や、実環境における観測での実験などにより、より実用的な方法へと発展させることを検討している。

謝辞

本研究は、JST、さきがけ、JPMJPR2037 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 日本写真測量学会編：三次元画像計測の基礎，東京電機大学出版局 (2016).
- [2] Schonberger, J. L. and Frahm, J.-M.: Structure-From-Motion Revisited, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4104–4113 (2016).
- [3] Vogiatzis, G. and Hernández, C.: Video-based, real-time multi-view stereo, *Image and Vision Computing*, Vol. 29, No. 7, pp. 434–441 (2011).
- [4] 鳥居 秋彦, 岡谷 貴之, 延原章平: 多視点 3 次元復元の研究動向, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 研究会第 176 回研究発表会, 情報処理学会, pp. 1–22 (2011).
- [5] Harris, C. and Stephens, M.: A Combined Corner and Edge Detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conf., Manchester, U.K.* (1988).
- [6] Lucas, B. D. and Kanade, T.: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, Vol. 81, Morgan Kaufmann Publishers Inc., pp. 674–679 (1981).
- [7] Musialski, P., Wonka, P., Aliaga, D. G., Wimmer, M., Van Gool, L. and Purgathofer, W.: A Survey of Urban Reconstruction, *Computer Graphics Forum*, Vol. 32, No. 6, pp. 146–177 (online), DOI: 10.1111/cgf.12077 (2013).
- [8] 岩元 祐輝, 菅谷 保之, 金谷健一: 3 次元復元のためのバンドル調整の実装と評価, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 研究会第 175 回研究発表会, 情報処理学会, pp. 1–8 (2011).
- [9] Vogiatzis, G. and Hernández, C.: Video-based, real-time multi-view stereo, *Image and Vision Computing*, Vol. 29, No. 7, pp. 434 – 441 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2011.01.006> (2011).
- [10] Geiger, A., Ziegler, J. and Stiller, C.: StereoScan: Dense 3d Reconstruction in Real-time, *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 963–968 (online), DOI: 10.1109/IVS.2011.5940405 (2011).
- [11] Bianco, S., Ciocca, G. and Marelli, D.: Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines, *Journal of Imaging*, Vol. 4, No. 8 (2018).
- [12] geoffreymarchal: Empire vase. <https://blendswap.com/blend/20771> [Online; accessed 6th Feb. 2021].
- [13] Schönberger, J. L. and Frahm, J.-M.: Structure-from-Motion Revisited, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2016).
- [14] Schönberger, J. L., Zheng, E., Pollefeys, M. and Frahm, J.-M.: Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo, *European Conference on Computer Vision (ECCV)* (2016).
- [15] Moulon, P., Monasse, P., Perrot, R. and Marlet, R.: Openmvg: Open multiple view geometry, *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, Springer, pp. 60–74 (2016).
- [16] Sweeney, C.: Theia Multiview Geometry Library: Tutorial & Reference, <http://theia-sfm.org>[Online; accessed 10th May. 2021].
- [17] WU, C.: Towards linear-time incremental structure from motion., *Proceedings of the 2013 International conference on IEEE 3D Vision-3DV 2013, Seattle, WA, USA.*
- [18] AICam: SfM/MVS による画像からの 3D データ生成 . <https://aicam.jp/tech/sfm/mvs> [Online; accessed 28th Jan. 2021].
- [19] Mwangangi, K. K.: 3D building modelling using dense point clouds from UAV, Master's thesis, University of Twente (2019).
- [20] Yi, C., Zhang, Y., Wu, Q., Xu, Y., Oussama, R., Wei, M. and Wang, J.: Urban building reconstruction from raw LiDAR point data, *Computer-Aided Design*, Vol. 93, pp. 1–14 (2017).
- [21] ZENRIN CO., LTD. : ZENRIN City Asset Series Japanese Otaku City. <https://www.zenrin.co.jp/contents/product/service/3d/asset/index.html> [Online; accessed 10th Nov. 2021].
- [22] Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, p. 381–395 (online), DOI: 10.1145/358669.358692 (1981).
- [23] Unity Technologies: Unity. <https://unity.com/ja> [Online; accessed 10th May. 2021].