

建物モデルの属性データ生成における 近接写真測量を用いた建物開口部の抽出

須崎 純一¹・黒川 雄太²

¹正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-1-206) E-mail: susaki.junichi.3r@kyoto-u.ac.jp

²非会員 近畿日本鉄道株式会社 (〒543-8585 大阪市天王寺区上本町6-1-55)
E-mail: kurokawa.yuta.73m@st.kyoto-u.ac.jp

航空機等の上空からの計測データを用いた建物モデリングは効率的である反面、建物側面の属性データが得られず、精緻なモデリングのためには地上からの計測が不可欠である。本論文では、3次元建物モデルにおける、近接写真測量を用いた効率的な建物開口部データ生成手法を提案する。まず *scale invariant feature transform (SIFT)* を用いたバスポイント選定の高速化と誤抽出の低減のために、重複撮影された画像間のずれ幅を利用して対応点探索の範囲に制限を設ける。次に、建物開口部領域内部に手動で与えた1点の位置を手掛かりに開口部の輪郭を推定する。最後に、単写真におけるモデル座標計算を通じて開口部端点の3次元座標や開口部面積を推定する。京都市東山区で計測した写真群に適用し検証した結果、バスポイントの選定時間を大幅に短縮し、開口部の3次元座標のRMSEは約10 cmで、防災分野で利用できる妥当な結果が得られた。

Key Words : 3D modeling, close-range photogrammetry, extraction of building attribute, building openings

1. 序論

伝統的建造物群保存地区では歴史的に価値の高い木造建造物が密集しており、地震火災による消失の危険性にさらされている。その対策として、例えば京都市東山区の清水寺・法観寺を含む地区では、地下水槽や消火栓等を設置するだけでなく、延焼シミュレーションを行い、危険性を評価している^{1,2)}。その延焼シミュレーションにおいては戸別の建物モデルが必要とされている。

建物の3次元モデリングにおいては、広範囲や建物全体の計測という観点で上空からの計測が有効で、上空からの計測データと既存の2次元デジタル地図データの組み合わせが一般的である^{3,4)}。特に、±15 cm程度の高さ方向の精度を有する航空機LiDAR (Light Detection and Ranging) 計測が効果的である反面、建物側面データが欠損するという欠点を有する。防災分野において建物モデルを延焼シミュレーションに利用する場合、建物内部の火災性状は開口部の面積によって大きく左右される¹⁾。延焼シミュレーションの精度向上のため、建物モデルに対しては単純な外形データに加えて、開口部の面積という属性データの生成が求められている。

地上からの計測では、建物の屋根等計測不可能な箇所が発生する欠点があるものの、建物側面の属性データが得られるという利点を有する。地上からの効率のよい計測手法として地上型LiDAR と近接写真測量が挙げられるが、近接写真測量の方が機器の安価さ、現場作業の簡便さという点で、適した計測方法であるといえる。近接写真測量は長年の理論の蓄積があり、また近年ではコンピュータビジョンの分野でも、近接写真測量を用いた特定の地物の自動抽出が盛んに研究されている^{5,6,7)}。しかしながら、室内の安定した環境下で撮影した写真からの地物の自動抽出に関する研究事例が多く、本研究で対象とするような建物の属性データの自動抽出は日照条件の変化により困難であり、有効な手法が確立されていない。

筆者らは既に航空機LiDARと航空写真を併用した3次元建物モデリング手法を提案しており、京都市東山区の密集市街地であっても自動的に切妻屋根・寄棟屋根・平屋根・片流れ屋根の建物モデルを生成できることを確認している⁸⁾。本研究では、既に生成された簡略な3次元建物モデルに開口部の面積データを効率的に付与することを念頭に置いて、近接写真測量を用いた低コストで簡便な開口部データ計測手法を提案する。

2. 対象地域と撮影方法

本研究における計測対象は、京都市東山区の高台寺周辺の木造建造物群とした。当地区は、八坂ノ塔（法観寺）、高台寺などの由緒ある社寺建造物、産寧坂、二年坂の石段と折れ曲がった石畳の坂道、そしてこの道に沿って建ち並ぶ江戸時代末期から大正時代にかけての町家などが一体となつてすぐれた歴史的風致を形成している。京都市の定める産寧坂伝統的建造物群保存地区保存計画によると、当地区内の建造物のうち伝統的建造物は約65%であり、そのほとんどが木造家屋である⁹⁾。そのため、地震やそれに伴う火災に対して脆弱であるため、モデル化による景観保存や延焼予測への期待が高まっている。

撮影には Canon 製デジタル一眼レフカメラ Eos Kiss X3 を用いた。レンズの焦点距離は最も広角である 18 mm、画素数は 2800×1867 画素に設定した。建物に対して正面から撮影し、撮影位置を建物の並びと平行に移動していき、9 棟の家屋を 14 枚の連続画像に収めた (図-1)。撮影距離は約 8 m、カメラ間の距離は約 2 m であった。連続する 2 枚の画像から構成される 13 ペアを本研究では使用した。また Topcon 製のソフトウェア Image Master Calib を用いて、キャリブレーションを行った。算出された内部標定要素を表-1 に示す。

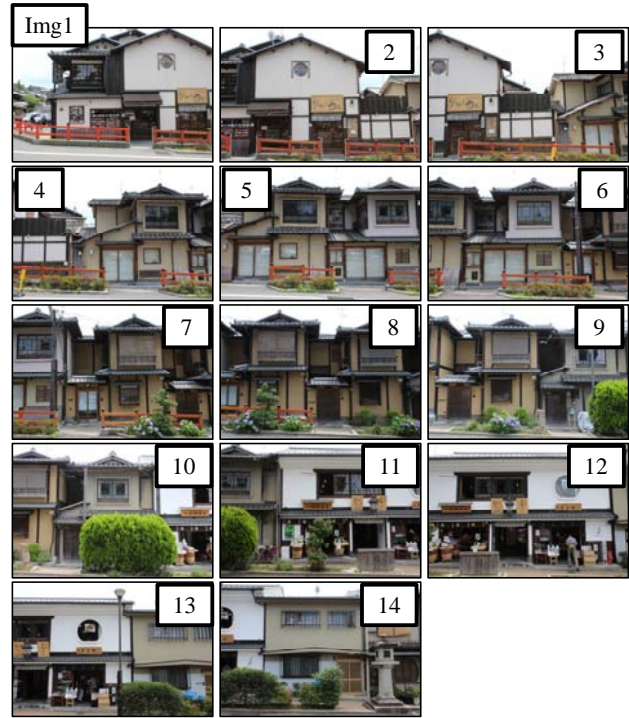


図-1 対象地域での撮影画像

表-1 内部標定要素

焦点距離(mm)	18.0640
主点位置(mm)(x_{pp} , y_{pp})	10.7327, 7.2971
接線方向歪み補正係数(k_1 , k_2)	5.6997×10^{-4} , -1.4283×10^{-6}
放射方向歪み補正係数(p_1 , p_2)	-3.1996×10^{-5} , 3.4988×10^{-5}
画像分解能(mm/画素)	0.0076

3. 標定計算の効率化と高速化

本研究では、隣接画像間に共通して写っているパスポイントの自動抽出に scale invariant feature transform (SIFT)¹⁰⁾ を利用する。処理時間の短縮、誤抽出の低減を目指すため、隣接画像間におけるオーバーラップから画像間のずれ幅を計算し、対応点探索時に探索範囲を制限することで、パスポイント自動抽出処理の高速化と誤抽出の除去を試みた。なお 3 枚の画像に共通して写っているタイポポイントは、対応点探索後に選択する。最終的に、バンドル調整計算時の計算負荷を軽減するため、対応点の絞り込みを行いパスポイントとする。

提案手法で得られたパスポイントを利用し、Topcon製 Image Master を用いてバンドル調整計算を行う。その際、現地で計測した基準点の位置座標データを加えることで、地上座標における外部標定要素を求めることができる (図-2)。

(1) SIFTを用いた対応点探索

SIFT では、画像の回転やスケール・照明の変化等に

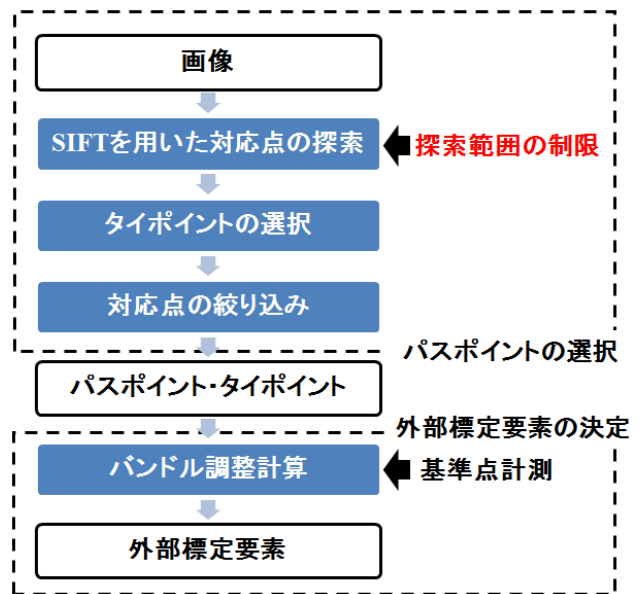


図-2 本研究における標定計算の流れ

頑健な特徴量を記述する。異なる画像間で算出された各特徴点の特徴量を利用することで、画像間の対応点の自

動抽出が可能となる。しかし取得した対応点の中には、異なった点同士を対応させている誤抽出が含まれる。また SIFT を用いた処理は比較的時間を要するが、これはある特徴点に対し全ての特徴点を対象に特徴量間距離を計算しているためだと考えられる。そこで、計算の対象となる点の数を絞り込むことで、誤抽出を軽減すると共に、計算処理時間の短縮を図る方法を検討する。

(2) 対応点探索範囲の制限

本研究では、連続した画像において、画像間のオーバーラップが、平行移動した形で現れる。オーバーラップ部分が判明すれば、計算の対象となる点が存在すべき位置範囲が判明する。これによって、候補点を絞り込むことができる。オーバーラップの算出には、画像輝度値の RGB 情報3バンドを2組の数値データとした相関係数 (correlation coefficient) を利用した。2組の数値からなるデータ列 $(x, y) = \{(x_i, y_i) \mid (i = 1, 2, \dots, n)\}$ が与えられたとき、相関係数は式(1)で求められる。

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ただし、 \bar{x} , \bar{y} はそれぞれデータ $x = \{x_i\}$, $y = \{y_i\}$ の相加平均である。

オーバーラップの検出により、決定されたずれ幅 \hat{u}, \hat{v} を利用して、パスポイント候補点の存在すべき範囲を設定する。図-3のように、右画像の特徴点 $P(i, j)$ は、左画像の位置 $(\hat{u} + i, \hat{v} + j)$ に対応するはずである。そこで、ずれ幅 \hat{u}, \hat{v} の誤差を考慮した上で、特徴点 P に対して、左画像の x 方向について $\hat{u} + i - k$ から $\hat{u} + i + k$ の位置範囲を設定 (y 方向も同様に設定) し、窓幅 $2k - 1$ となる範囲内に含まれる左画像の特徴点のみを対象に、特徴量間距離の計算を行う。本研究では、画像の画素数、画像上での開口部の平均的な大きさを踏まえて $k = 50$ (画素) と設定した。

(3) バンドル調整計算

前節までの過程で、多数の対応点を高速に自動取得することができた。しかし、このままバンドル調整計算を行えば、非常に時間がかかってしまう。そこで対応点をさらに絞り込み、パスポイントとしてバンドル調整計算を行う。その際、SIFT で算出される特徴量距離が小さいものから順に選択していき、10~20 点前後に絞り込む。同様にして、タイポイントも 1 点、絞り込んでおく。Image Master によりバンドル調整計算を行い、地上座標における外部標定要素を算出する。その際に必要となる基準点座標は、SOKKIA 製 Total Station (TS) SET350RX を用いて、ノンプリズムモードで計測済みであるとする。

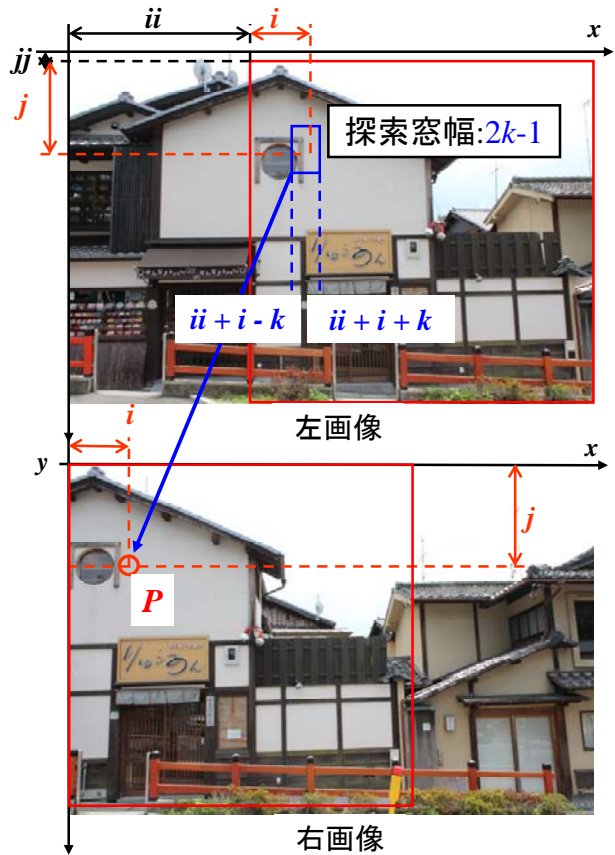


図-3 相関係数を用いた対応点の探索範囲

今回の計算後における画像ペア毎の残存縦視差の RMSE をは 0.87 画素となった。

(4) 考察

相関係数を用いたオーバーラップの検出により、ステレオペア間のずれ幅を算出し、SIFT による対応点探索範囲を制限することで処理の高速化を試みた。SIFT による探索時に残っていた、異なる建物上の誤抽出対応点を除去することができた (図-4)。誤抽出を多数低減できた一方で、側面では誤抽出がみられた。このように、画像全体で統一したずれ幅による探索範囲の設定では、側面を含む領域の誤抽出をすべて除去することができないため、特徴点の位置によってずれ幅や窓幅を可変にするか、別の制約条件を加えることが必要になる。

処理時間については全13ペアに対し2分7秒となり、元々の34分57秒に比べて大幅に短縮することができた。全体の標定精度に関しては、残存縦視差のRMSEが0.87画素となり、標定時の目安となる1画素以下の基準を満たすことができた。今後は誤抽出をさらに除去することで精度の向上を図る必要があると考えられる。

4. 建物開口部の3次元座標の推定

前章で求めた外部標定要素を用いて、画像に写り込んでいる建物開口部のモデリングを行う。外部標定要素が決定すれば、ステレオペアにおける任意の対応点で、モデルを形成するための3次元座標（モデル座標）を求めることができる。しかしながら、市街地で撮影された画像には、前景障害物等が含まれることにより、必ずしも2枚の画像ともに求めたい対象が写っているとは限らない。このことから、ステレオペア毎にモデル座標を求めるよりも、単画像毎に対象のモデル座標を求める方が、利用価値が高いと考えた。単写真における投影中心・写真上の像・対象物の間に成り立つ共線条件と、開口部が属する平面の情報を利用して、モデル座標の計算を行う方法を提案する。まず、ステレオ画像中における開口部の領域を抽出する（図-5）。次に、外部標定要素推定の過程で算出されたパスポイントの3次元座標等を利用して、開口部の属する平面を推定する。最後に、共線条件に基づき、開口部のモデル座標を算出する（図-6）。

(1) ステレオ画像における開口部領域の抽出

建物に存在する多くの開口部の幾何学的要素は長方形成分であり、画像中から長方形を高速・高精度に検出する手法を画像認識技術の組み合わせにより実現することが必要となる。既往の長方形成分の検出方法としては、大きく分けて、(i)あらかじめ得た線分や交点等の複数の要素を組み合わせたものを長方形として検出する方法¹¹⁾と、(ii)直線成分検出手法としてよく知られるハフ変換⁹⁾を拡張した方法、(iii)画像内に存在し得るすべての長方形を探索する全探索手法¹²⁾の3種類が存在する。(i)の方法においては、輝度勾配から線分や交点候補を求めて輪郭線を抽出もしくは追跡する方法¹³⁾が存在するが、輝度値のみを頼りに、開口部と開口部以外の輪郭を分類するのは難しい。また、木造建造物には開口部以外にも長方形要素が多く含まれるほか、京都のような市街地では、植え込みや瓦屋根など、エッジが複雑となる要素も多く含まれる。そのため、あらゆる可能性を計算する(ii)(iii)の方法では、大きなメモリーサイズを要することや、計算時間も長くなってしまうことが問題となる。そこで本研究では、写真に写る開口部の位置情報を手動で加えることで、開口部の長方形領域を抽出する方法を試みた。

はじめに、画像輝度値を利用してエッジを抽出し、2値化した画像から建物の垂直方向を推定する。次に、垂直方向のエッジから開口部辺のエッジ候補を抽出する。最後に、既知として与えられた開口部上の1点を利用し、開口部辺を選択する。これにより、開口部端点の写真座標が得られる。以下に処理の詳細を示すが、処理に使われた閾値は対象とした建物と、撮影距離や日照条件が反

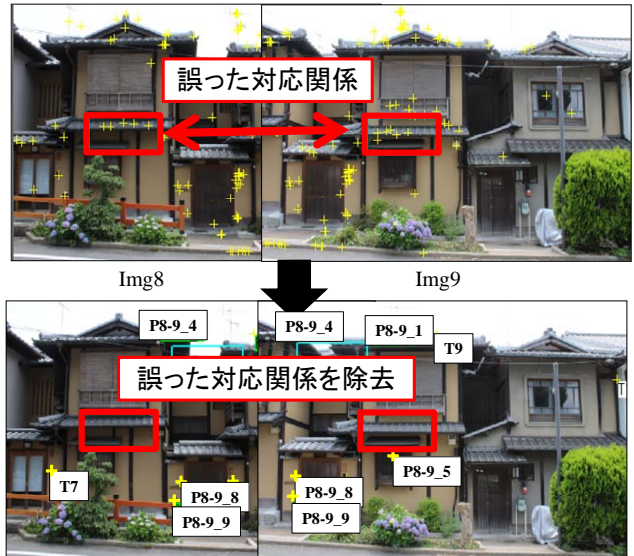


図-4 誤抽出の低減例 (Pair8)

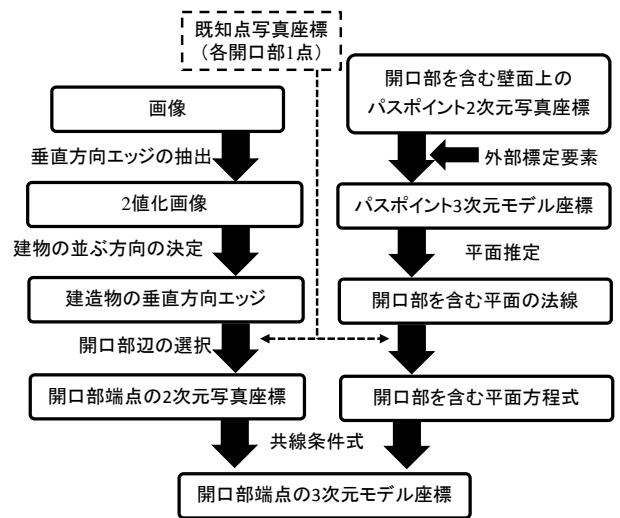


図-5 本研究における開口部端点の3次元モデル座標推定の流れ

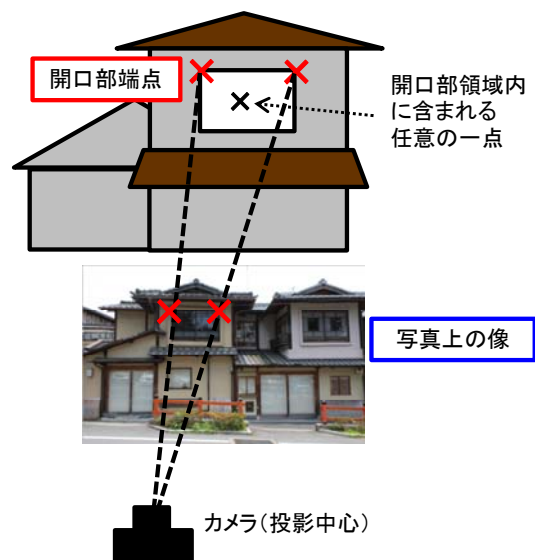


図-6 投影中心・写真上の像・対象物と平面の位置関係

映されている撮影画像に依存するもので、経験的に決定したことを断っておく。

a) 建物の並ぶ方向の決定

撮影された建物群について、その垂直方向を推定する。まず、撮影画像に対して、画像水平方向の隣接画素間における輝度値 RGB の差分をとり、差分が閾値を超える場合にエッジ画素として抽出する。今回は輝度値 RGB の差分のいずれかが 30 を超える画素をエッジ画素とした。

次に、検出される垂直方向のエッジの画素数が最大となるような画像の回転角度を求める。最初に主軸を適当な単位で回転させながら (図-7)、各回転角度に対して、主軸上の各画素を通る、主軸に垂直な直線上に存在するエッジ点数を求め、ヒストグラムを作成する (図-8)。ヒストグラムにおける最大値から 3 番目に大きな値までの和を求めておく。その和が最大となる場合の角度を主軸の回転角度と考え、その際の主軸の方向を建物が並ぶ方向と定める。画像中に長方形要素が多数含まれている場合、その辺の部分でヒストグラムの値が大きくなるため、長方形の辺の方向と一致する回転軸を探すことで回転角度を割り出すことができる。筋交い成分などが含まれていると、ヒストグラムの最大値は長方形の辺ではなく斜成分に対して現れることがありえるが、上述のように複数のピーク値 (3 番目までに大きな値) を合計することで、このような場合にも正しく主軸方向を求めることができる。

対象地域で撮影された画像には、木造建造物の瓦屋根や前景障害物にあたる柵等、建物開口部に平行な方向以外にも、水平方向のエッジが多く含まれた。こうしたエッジの影響をうけるのを防ぐため、本手法では、垂直方向のエッジのみを用いて推定を行う。

b) 開口部辺の抽出

建物が並ぶ方向軸上の各画素に対して、垂直な直線 l_k 上にあるエッジ点数 N_k のヒストグラムを再度求める。ヒストグラムの最大値 N_{max} に対して、 $N_k \geq 0.25 \times N_{max}$ を満たす場合、直線 l_k 上におけるエッジ点をすべて抽出した (図-9)。次に、これらのエッジ点群のうち、点群が垂直方向に連なっているものを開口部辺候補として検出する。ここで、連なる点群の垂直方向の長さを L_n として、 $L_n \geq (\text{画像高さ}) / 10$ を満たす点群を、開口部辺候補とみなした。

開口部辺候補として抽出した点群のうち、既知として与えられた開口部上の 1 点から、最短距離にあるエッジ点群を開口部辺として抽出する。既知点からエッジ点群までの距離は、既知点 (x,y) とエッジ点群から形成される近似直線との距離で算出した。今回、近似直線は、既知

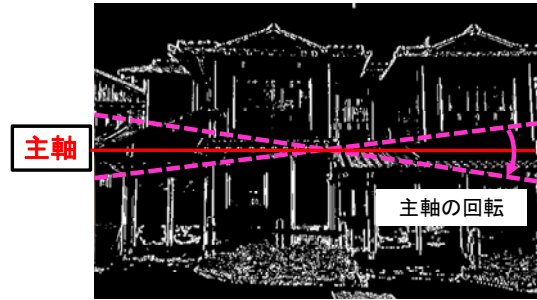


図-7 2値化画像と主軸の回転

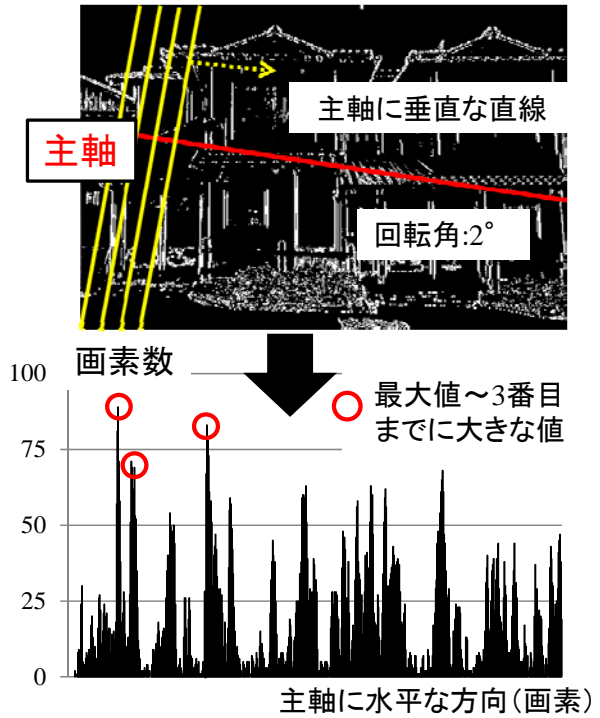


図-8 主軸回転時のエッジ点数ヒストグラムの作成例

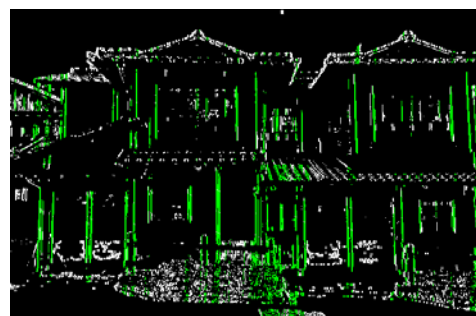


図-9 垂直方向エッジの抽出例 (Img5)

点を通る主軸よりも上部に存在するエッジ点群の重心と、下部に存在するエッジ点群の重心の 2 点を通る直線として求めた (図-10)。既知点から左右それぞれの側に対して、最短距離を取るエッジ点群を開口部辺として抽出した。

ここで、既知の点は開口部のおおよそ中心に位置して

いることから、左右どちらか側の開口部辺までの距離が極端に長い場合は、短い方に合わせて補正を行う。今回は、左側の開口部辺までの距離を l_L 、右側の開口部辺までの距離を l_R とおくと、 $l_L \geq 1.5 \times l_R$ ならば、 $l_L \rightarrow l_R$ 、 $l_R \geq 1.5 \times l_L$ ならば、 $l_R \rightarrow l_L$ のように補正を行った (図-11)。

c) 誤抽出された開口部辺の除去と再抽出

以上の過程で、開口部辺が抽出されるが、実際の開口部よりも領域が小さく、縦長な開口部として抽出してしまうものが多く見られた。そこで抽出された開口部辺の縦横比から、開口部らしくないものを除去 (処理 1) し、既知点からの次に近いエッジ点群を選択する (処理 2)。処理 1・2 を一定回数繰り返しても、開口部辺が安定しない場合は、画像を平滑化した上で再抽出を試みる。今回は処理 1・2 を 10 回繰り返した。ここで、縦横比は抽出済みの開口部辺の高さ h (主軸に垂直な方向)、幅 d (主軸に平行な方向) を用いて、 h/d で表す。再抽出の対象となる開口部辺は、 $h/d > 4$ を満たすものとした。

再抽出の際に行う平滑化処理としては、メディアンフィルタを用いた平滑化を行う。メディアンフィルタでは周辺輝度値の大きさを順に並べ、メディアン (中央値) を注目画素に置き換えた。特に周辺画素の輝度値よりも大きく異なる輝度値を持つ画素を除去するのに効果的である。この平滑化を繰り返すことで、図-12のように格子の隙間やガラスの反射等による不必要なエッジ点群を検出しなくて済む。

以上の処理で得られた結果を図-13に示す。円形の開口部もあったが、今回は鉛直方向のエッジを利用したため、それらについても長方形に近似した。面積誤差が 10% 以内の抽出を適切評価、推定面積が画像面積の 10% 以上の抽出を過大評価、10% 以下の抽出を過小評価として、抽出開口部の面積を検証した結果を表-2に示す。また、手前壁面上に存在する開口部についての抽出数、また、重複して存在する開口部について、重複しないように選択し、抽出数を数えた結果も示す。

(2) 開口部が存在する平面の推定

開口部の3次元座標を計算するには、開口部の写真座標の他に、開口部の存在する平面の方程式が必要となる。まず、前章で得られたパスポイントの3次元座標を用いて、開口部平面の法線ベクトルを推定しておく。次に、ステレオペア毎に、対応する各開口部領域内で対応点を1点以上抽出する。外部標定要素が既知であれば、抽出した対応点の3次元座標を計算できる。開口部平面は、これらの対応点を通るため、法線ベクトル値と合わせて、平面の方程式を決定することができる。

第3章の方法で得られたパスポイントは建物壁面上のものがほとんどである。そこで、これらの点群から、建

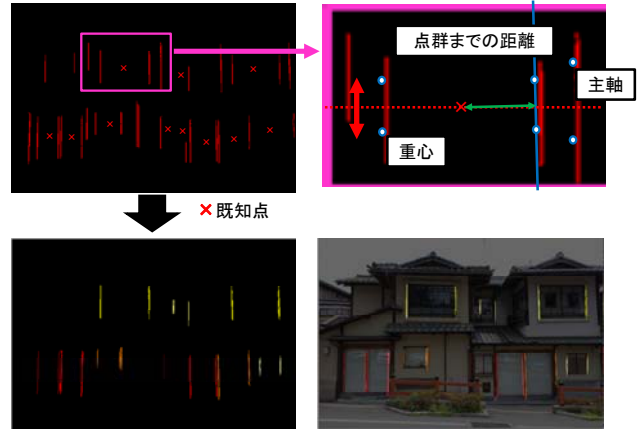


図-10 既知点とエッジ点群までの距離

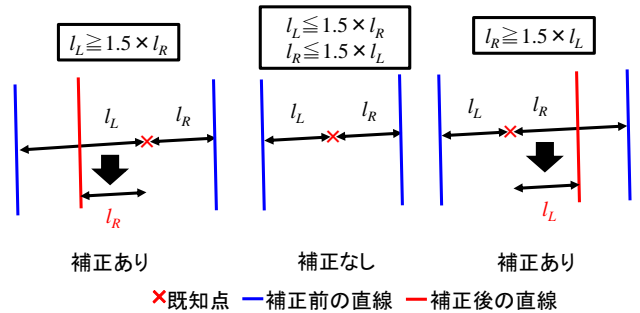


図-11 既知点から開口部辺までの距離による補正



図-12 メディアンフィルタによる平滑化画像例 (Img5)

物の壁面 (正面) に対しておおよそ平行である平面 (ここでは主平面と呼ぶ) を推定することが可能であると考えられる。一般的に、開口部は建物の壁面に対しておおよそ平行に存在するため、点群から推定される主平面の法線ベクトルを求めることは、開口部平面の法線ベクトルを求めることと同じである。パスポイントの3次元座標点群から主平面を推定するには Random Sample Consen-

sus (RANSAC) を利用する。

RANSAC とは、外れ値に対して頑健なパラメータ推定手法であり¹⁴⁾、今回のようにノイズデータ（建物以外の点群）が含まれる場合に用いられる。RANSAC では、ランダムに幾つかのサンプルを抽出し、最小二乗法に当てはめることを繰り返す。抽出したサンプルに外れ値が含まれなければ、より確からしい推定が得られ、且つ外れ値の数が全測定数に比べて少なければ、推定される誤差範囲内により多くの測定値が含まれる。このことから、もっとも多くの測定値が範囲内に含まれるときの推定を正しい推定とみなす。ランダムで取り出すサンプル数を m 個、取り出したデータがノイズデータでない確率を p 、繰り返し回数を k 回として、RANSAC 処理の信頼性、つまり正しいパラメータが推定される確率を z とすると、式(2)が成り立つ。

$$(1-z) = (1-p^m)^k \Leftrightarrow k = \frac{\ln(1-z)}{\ln(1-p^m)} \quad (2)$$

平面推定では未知のパラメータが3つであり、また誤差を含むデータを用いて平面を推定するため、 m を3より大きい値とすべきである。一方、 m が大きくなるほど k の値も大きくなる。計算量を極力抑えるために本研究では m を4とした。また標準的な設定として、 z を0.99、 p を0.5と定めた。このとき、式(2)より k は72となる。第3章で得られたパスポイント30点に対してRANSACを用いて主平面を推定し、その法線ベクトルを開口部平面の法線ベクトルとして得た。

(3) 建物開口部の3次元座標算出

抽出した開口部領域から各開口部の写真座標が得られる。今回は開口部四隅の4点の写真座標を利用した。また、推定した開口部の平面方程式を用いて、単写真におけるモデル座標計算を行うことで、開口部四隅の3次元座標が得られた。抽出された開口部と、前章で推定したカメラ座標とTSによる実測値の座標を図-14に示す。

TSで計測した実測値と、提案手法で算出した開口部の3次元座標値を比較した。3次元点群における位置座標の誤差の絶対値を各点で計算した結果を図-15(上)に示す。全ての点を用いた二乗平均平方根誤差(RMSE)は14.1 cmであり、特に精度の悪かった2点を除くと11.4 cmという結果であった。

また開口部辺長における26本の辺長実測値と推定値を比較した(図-15(下))。全辺長に対するRMSEは13.8 cmで、誤差の大きな2辺を除外した時のRMSEは9.6 cmであった。

(4) 考察



図-13 提案手法による開口部の抽出結果

a) 開口部領域の抽出

建物に対して鉛直方向のエッジから開口部辺候補を抽出し、既知点からの距離を考慮した開口部辺の選択により、障害物等によって部分的に隠れたものを含め、開口部の領域を抽出することができた(図-16)。また、縦横比を考慮した平滑化による再抽出処理により、格子間隔の狭い窓や扉、ガラス窓といった開口部の抽出に成功した。これらの開口部は、格子による縞やガラスによる光の反射・透過等により、不要なエッジが多く検出されやすく、画像輝度値に閾値を設けただけでは開口部辺を適切に選択できないため、本手法が有効であった。

しかしながら、格子間隔が広い場合、平滑化しても縞のエッジは強く残ってしまうため、上手く抽出できない箇所もみられた(図-17)。間隔の広い格子については、別途、エッジの連続性などから格子であることを判定したのちに、全体領域の抽出を行う必要がある。なお、平滑化処理により元画像を粗くする場合、撮影画像の解像度により、程度が異なると考えられる。つまり、今回より近接で撮影された画像においては、格子等のエッジが余計に検出されてしまうため、より解像度を下げようとする平滑化処理を行うことが必要になる。

今回の手法では、水平方向のエッジには屋根や柵など不要なエッジが現れやすいことから、鉛直方向のエッジのみを用いているが、その結果、鉛直エッジの過大・過小評価により、上下の開口部辺が本来の開口部領域からはみ出た位置・領域を分断する位置に推定されることがあった(図-18)。そのため、鉛直方向の開口部辺を決

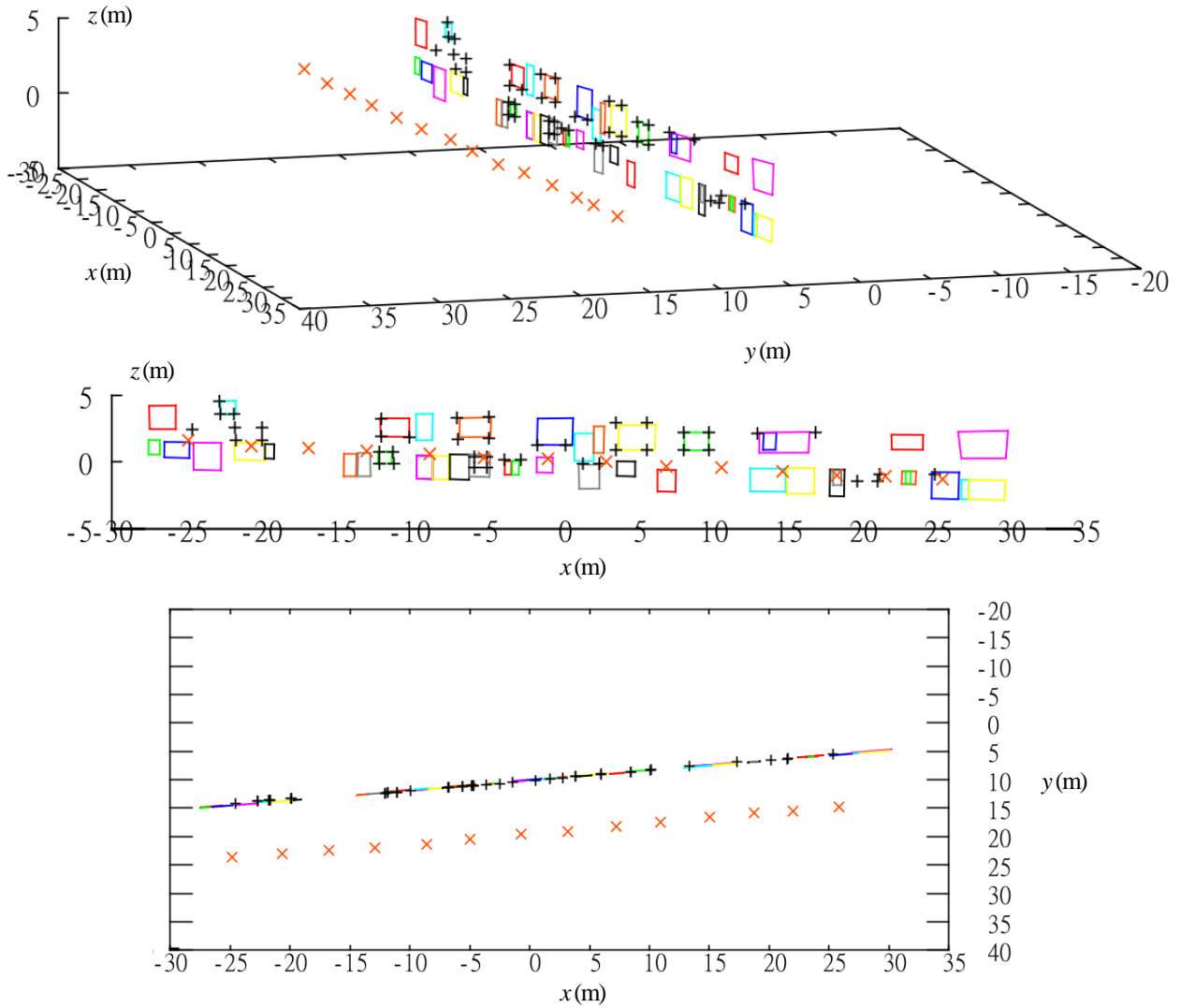


図-14 提案手法による開口部の、現地で設定した地上座標系での3次元座標推定結果。赤色×印は写真撮影時の中心投影の位置、黒色+印はTSで座標値を実測した点を表す。(上)斜め、(中)正面、(下)真上から見た抽出結果。

定したのちに、水平方向のエッジから開口部辺の探索を行うなどして、不要なエッジの影響を避け、正確な水平方向の開口部辺を抽出することが求められる。

全体の傾向として、表-2に示すとおり、比較的カメラまでの距離の大きい奥に存在する開口部を過大評価してしまう傾向があった(図-19)。これは、奥の開口部ほど建物によって生じる影で輝度値のコントラストが低下し、そのため開口部のエッジ境界が適切に抽出できなかったことが原因であると考えられる。奥に存在する開口部を除いた場合、全体の抽出数に対して、適切に抽出された開口部数の割合は高くなるため、本手法では、手前壁面上に存在する開口部に絞った抽出において、効果を発揮するものと考えられる。さらに、開口部が重複しないように選択し、手前の壁面上に存在する開口部のみに注目した場合、面積誤差が10%以内の精度で抽出された開口部の抽出率は約7割であった(表-2の「手前壁

表-2 抽出した開口部の推定面積の検証。

「適切」は面積誤差が10%以内の場合を指す。

対象開口部	適切	過大	過小	計
全て(延べ)	31	30	19	80
手前壁面上(延べ)	31	23	19	73
全て(重複なし)	24	10	6	40
手前壁面上(重複なし)	24	5	6	35

面上(重複なし)」における「適切」が占める割合)。概ね良好な結果が得られたが、今後、開口部辺の抽出精度をさらに向上させる必要があると考えられる。

b) 開口部が属する平面の推定

標定時のパスポイントを利用することで、主平面を決定し、開口部平面の法線ベクトルを推定することができた。開口部内に存在する3次元座標を新たに算出し、法

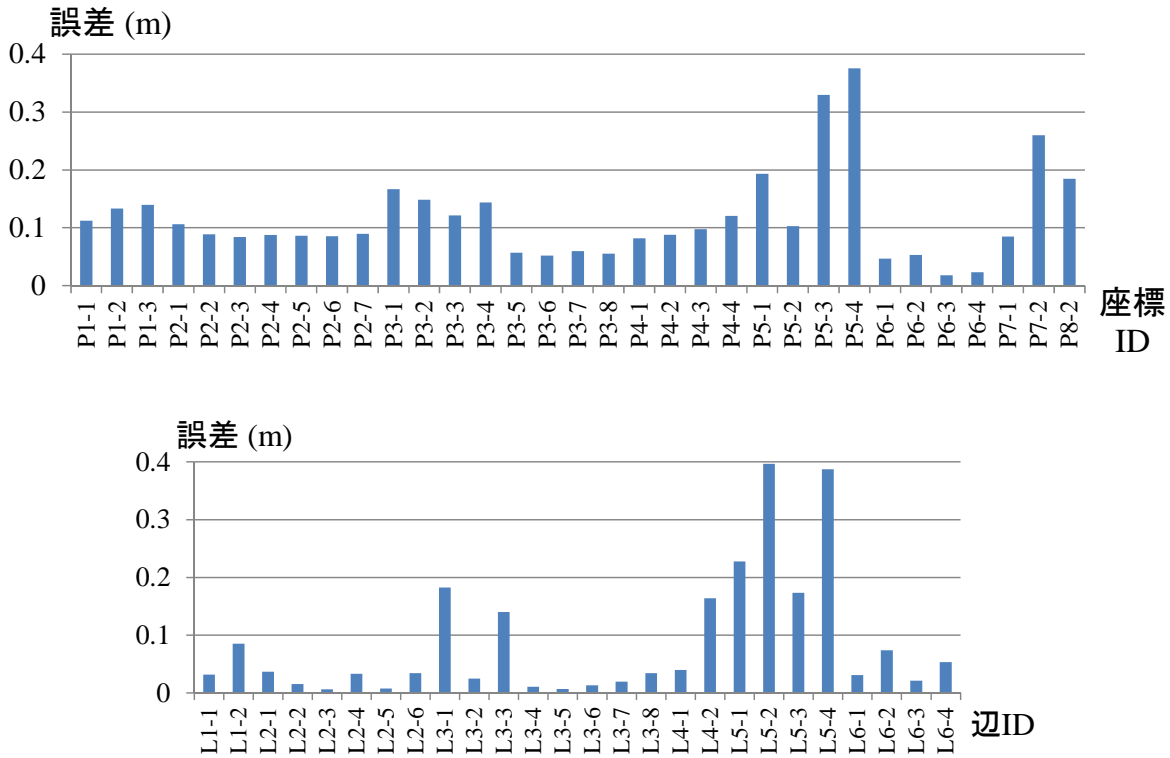


図-15 推定結果の検証。(上) 3次元座標の誤差の絶対値, (下) 辺長の誤差の絶対値。

線ベクトルを与えることで、開口部平面を決定した。この方法により、建物群の並びに対して平行であり、実際の開口部らしい平面を得ることができた。しかしながら、開口部内に存在する3次元座標の算出には、先に抽出した開口部領域内での対応点の抽出が必要であるため、対応点が取れない場合に正しい平面を推定できないことが課題となった。今回は、対応点が取れなかった場合、主平面を開口部平面とみなしたが、開口部は主平面よりも前景位置や後景位置に存在することもある。したがって、ステレオペア間でのSIFTによる対応点探索する手法以外に、開口部内に存在する3次元座標を取得する方法が必要となる。

また、建物正面に平行な壁面上の開口部を前提としたが、写真には建物の側面に平行な開口部もいくつか存在する。したがって、主平面に垂直な平面の法線ベクトルを利用するなど、建物側面上の開口部平面にも対応した平面推定方法が今後は求められる。

c) 建物開口部の3次元座標算出

単写真におけるモデル座標計算方法により、開口部の3次元座標を算出することができた。開口部とカメラの位置関係、開口部の形状等、定性的にみて現実の開口部を再現する座標が得られたといえる。密集市街地においては、建物が敷地いっぱい建っていることが多く、各々の建物壁面が同一平面とみなせることが多いため、開口部を構成する点が同一平面上に存在し、また全体に

ついて主平面に平行な開口部平面を形成すると仮定して処理することは妥当といえる。

今回、図-20のように写真上で開口部領域の推定精度が低かった箇所では、座標 (P5-3, P5-4) ・辺長 (L5-1, L5-3) とともに誤差の値が大きくなった。これらの点を除く、全辺でのRMSEは9.6cmであった。延焼シミュレーションを行う際には概算値を入力していることを考えると、十分な精度で計測を行うことができたといえる。誤差の大きな結果については、開口部の3次元座標算出方法自体には問題なく、画像からの開口部領域抽出での誤差に起因していることが確認できた。したがって、今後画像からの開口部領域抽出精度を高めることで、開口部の3次元座標をより高精度で抽出可能になると考えられる。

ここで、重複する開口部の選択について考える。開口部の写真座標が、適切に抽出された画像3枚 (Img4~6) において、同一開口部の座標・辺長精度について比較を行った (図-21)。画像の端に存在する開口部ほど誤差が大きいのことがわかり、これは単写真による3次元座標推定計算の示す傾向であると考えられる。したがって、重複する開口部から結果を選択する際には、画像の中央部分に写されている開口部を選択するのが適切であるといえる。この選択の処理については、画像から手動で初期値を既知点を取得する際に、予め画像中央部より写る画像を選択することで対応可能である。



図-16 部分的に隠れた開口部の抽出例



図-17 格子間隔の広い格子窓での過小抽出例



図-18 開口部の過小抽出例

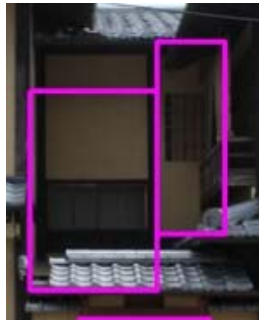


図-19 奥に存在する開口部の過大抽出例



図-20 3次元座標推定の誤差が大きかった2点

5. まとめ

本研究では、防災分野において利用されるような建物モデルの作成を目的として、京都の密集市街地を対象に近接写真測量を用いた低コストで簡便な開口部計測手法の構築に取り組んだ。具体的には、パスポイントの選定を含む標定作業の高速化、また、単写真から簡便に建物開口部の3次元座標を算出する方法を提案し、モデリング作業における座標推定の効率化に取り組んだ。以上の処理を組み合わせることで、近接写真測量を用いた3次元座標計算までの作業全体を1つの流れとした計測手法の提案を行った。

標定作業の高速化については、SIFTを用いた対応点自動探索アルゴリズムに、ステレオペア間のオーバーラップから算出した画像間のずれ幅を用いて推定した探索範囲の制限を設けることで、誤抽出の除去と高速化を実現できた。処理時間については探索範囲を設けない場合と比較して、約6%に短縮された。

建物開口部の抽出によるモデリング作業の効率化については、撮影画像から抽出した開口部領域と、パスポイント3次元座標から推定した開口部平面を、単写真におけるモデル座標計算に組み込むことで、現実の開口部を再現する開口部端点の3次元座標を簡便に算出すること

ができた。本手法のように単写真に写ってさえいけば、開口部の座標が得られることは、実際の計測に応用した場合に有効であるといえる。また、開口部辺がうまく推定できたものに関して、実測値の値と比較した定量的な精度はRMSEが10 cm以下となり、延焼シミュレーションを想定したモデリングへの応用が期待できることがわかった。

一方で、SIFTによる特徴点は局所的に集中するという性質がある。常に安定した標定結果を目指すためには、画像全体から偏りなく特徴点を抽出し、パスポイントの選択を行う必要がある。また、開口部の3次元座標計算では、撮影時に建物正面にあたる壁面上の開口部を対象としているため、側面の壁面上の開口部抽出には応用できない。したがって、主平面に垂直な側平面の抽出と、その結果を踏まえて画像中から側面の開口部領域を抽出する処理方法について検討しなければならない。

最後に、撮影距離の問題も検討すべき重要な問題である。特に密集市街地では道路の幅員が狭く、短い撮影距離の下で隣接画像が重複するように多数枚の画像を撮影する状況が発生する。画像枚数の増加は本提案手法の効率的な処理により大きな問題とならない。しかしながら、短い撮影距離の場合には同一建物を上下に分けて撮影することになる。建物上部はやや上方にカメラを向けて撮影するため、本研究で想定している平行撮影の前提が崩

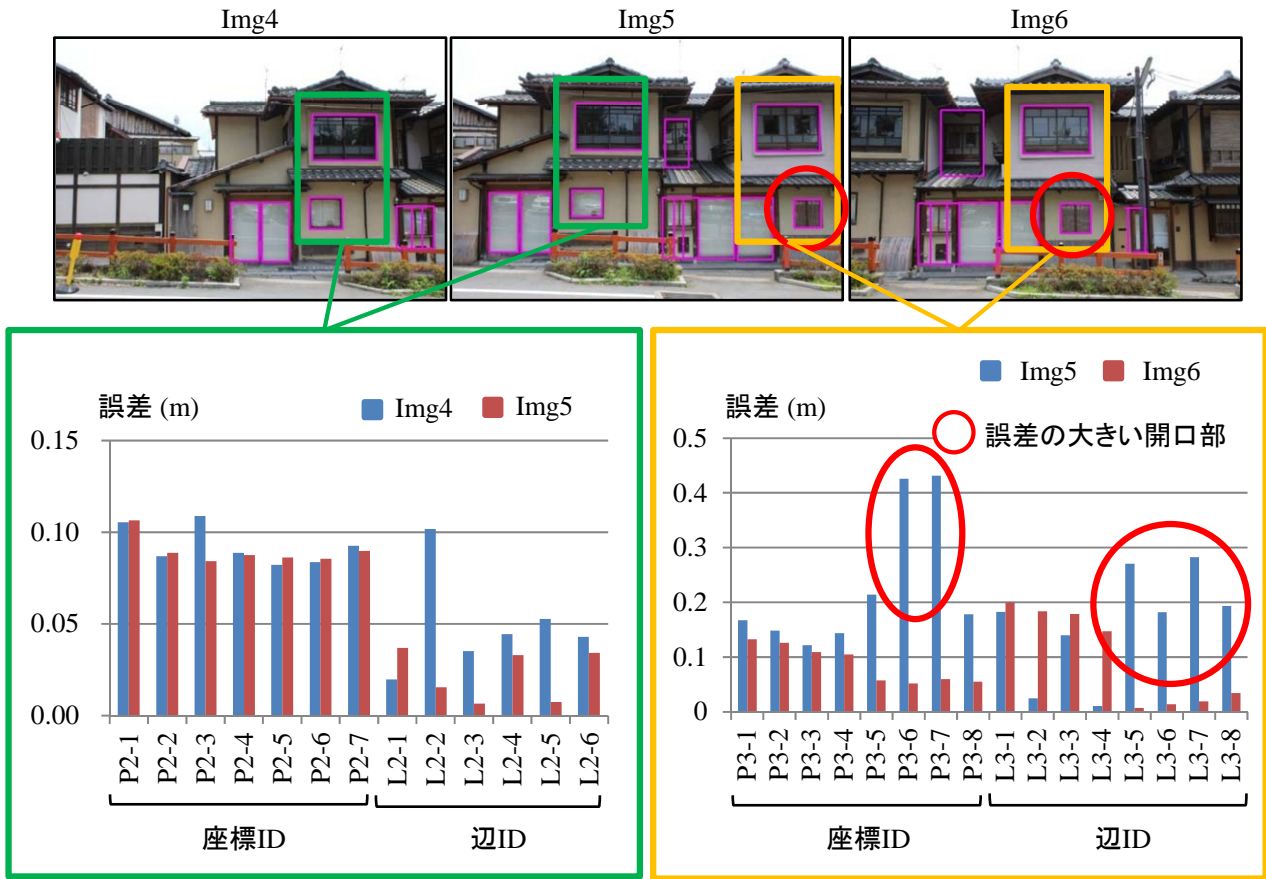


図-21 写真中の開口部の位置による誤差の偏り

れる。そのため、具体的には、開口部が存在する平面の推定では平行撮影した1階部分の画像を中心に用いて処理し、2階以上の部分を撮影した画像に対しては推定平面を補正する処理が必要になるとと思われる。

以上の課題を改善することで、さらなる高精度化とともに、より再現性の高い開口部モデルの作成が簡便に行えるものと考えられる。今後は、既に航空機LiDAR等を用いて生成された建物3次元モデル(図-22)⁹⁾に開口部属性データを付与していくことを検討している。

謝辞: 本研究は、(財)日本建設情報総合センターの研究助成(研究課題「写真測量を用いた密集市街地の3次元建造物モデリングのための自動標定システムの構築」)を受けて実施した。

参考文献

- 1) Himoto, K., Tanaka, T.: Development and validation of a physics-based urban fire spread model, *Fire Safety Journal*, vol. 43 (7), pp. 477-494, 2008.
- 2) Nishino, T., Tanaka, T., Hokugo, A.: An evaluation method for the urban post-earthquake fire risk considering multiple scenarios of fire spread and evacuation, *Fire Safety Journal*, vol. 54, pp. 167-180, 2012.

- 3) Sander, O. E.: Target graph matching for building reconstruction, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, 3/W8, pp. 49 - 54, 2009.
- 4) Steuer, H.: Height snakes: 3D building reconstruction from aerial image and laser scanner data, *Proceedings of 2011 Urban Remote Sensing Joint Event*, pp. 113-116, 2011.
- 5) 松山隆, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン技術評論と将来展望, *新技術コミュニケーションズ*, pp. 244-261, 1998.
- 6) Szeliski, R.: *Computer vision: Algorithms and applications*, Springer, pp. 505-541, 2010.
- 7) Forsyth, D.A. and Ponce, J. (大北 剛訳): コンピュータビジョン, 共立出版, pp. 263-282, 2007.
- 8) Susaki, J.: Knowledge-based modeling of buildings in dense urban areas by combining airborne LiDAR data and aerial images, *Remote Sensing*, Vol. 5, pp. 5944-5968, 2013.
- 9) 京都市: 産寧坂伝統的建造物群保存地区保存計画の制定, 昭和51年7月1日京都市告示第69号及び京都市教育委員会告示第1号, 1975. (<http://www.city.kyoto.lg.jp/tokei/page/0000015482.html> 2014年1月15日確認)
- 10) Lowe, D.G.: Object recognition from local scale-invariant features, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1150-1157, 1999.
- 11) Kim, Z.W., Huertas, A. and Nevatia, R.: Automatic description of building with complex rooftops from multiple

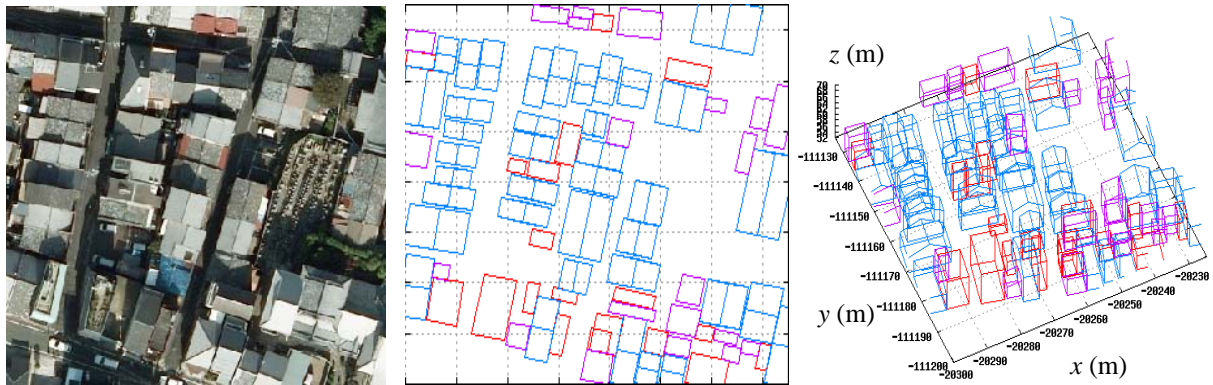


図-22 航空機LiDARと航空写真から自動生成した建物の3次元モデル例。(左)航空写真(75 m × 75 m), (中・右)生成された3次元モデル。青色は切妻屋根, 赤色は平屋根, 紫色は片流れ屋根のモデルを表す。

images, 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 272-279, 2001.

- 12) Asano, T., Katoh, N. and Tokuyama, T.: A unified scheme for detecting fundamental curves in binary edge images, *Computational Geometry and Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 73-93, 2001.
- 13) Gua, Y., Sawhney, H.S., Kumar, R. and Hsu, S.: Leaning-Based Building Outline Detection from Multiple Images,

2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 545-552, 2001.

- 14) Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Comm. of the ACM*, Vol. 24, pp. 381-395, 1981.

(2013. 9. 27 受付)

EXTRACTION OF BUILDING OPENINGS USING CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR GENERATION OF ATTRIBUTE DATA OF BUILDING MODELS

Junichi SUSAKI and Yuta KUROKAWA

While modeling using the data measured by airborne is effective, it cannot provide the attribute of building side and more detailed modeling requires ground measurement. This paper proposes a methodology to effectively generate building opening data using close-range photogrammetry for three-dimensional (3D) building modeling. First, to reduce computation time, it limits an area to select passpoints between a pair of images, that are obtained by using scales invariant feature transform (SIFT). Then, it estimates boundaries of building opening by referring to an initial point in a region given by manual selection. Finally, it calculates 3D coordinate values of vertices and area of the openings through an equation in photogrammetry. As a result of validation using the data measured in Higashiyama ward, Kyoto, the proposed methodology succeeded in drastically reducing the computation time for passpoint selection, and root mean squares of errors for 3D coordinate values of the estimated vertices was approximately 10 cm. It was found that the proposed methodology can generate the building opening data whose accuracy is acceptable in the field of disaster prevention.