

航空写真と航空機LiDARを用いた 密集市街地の建物境界線の自動抽出

須崎 純一¹

¹正会員 京都大学准教授 工学研究科 (〒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

本論文では、航空写真と航空機レーザ (light detection and ranging: LiDAR) データから建物境界線を自動推定する手法を提案する。提案手法では、航空写真に領域分割を行い初期の領域分割結果を得る。次に、航空機LiDARデータの3次元座標点群に対しフィルタリング処理を実施し、地盤面と非地盤面データに分離する。そして非地盤面データの各点に対し、近傍の点を含めて平面の法線を計算する。この法線を領域ごとに集計した領域の法線データを活用して、対となる領域のベアを生成し、領域を建物単位で捉え直す。最後に各々の建物単位で2次元の境界線を生成する。京都市東山区の密集市街地に提案手法を適用した結果、細い路地に囲まれた街区に建物が隣接し、陰影が多数発生する密集市街地であっても、提案手法は良好な境界線データを生成できることが判明した。

Key Words : building boundaries, dense urban areas, segmentation, aerial images, airborne LiDAR

1. 序論

被災直後の被害状況を把握するために、人工衛星や航空機を使って上空から広範囲の計測が行われる。衛星画像を使って被災状況を把握する場合、被災前後に取得された光学画像や合成開口レーダ (synthetic aperture radar: SAR) 画像を組み合わせる手法が報告されている。衛星多偏波SARが普及する以前は、被災前後の単偏波 (HH) データを用いて、後方散乱強度の変化や被災前後の相関係数を手掛かりに被災地区を推定することが多かった。近年、衛星搭載型多偏波SARの普及に伴い、四成分分解手法で得られた2回反射、体積散乱、表面散乱の散乱成分^{1) 2) 3)}を利用したり、散乱体とレーダがなす相対的な方位角を表すPOA (polarization orientation angle) の分散¹⁾を利用したりする方法が報告されている。宮城県石巻市で被災前後に取得されたALOS/PALSAR画像を用いて、筆者も同様の解析を試みた。しかしながら、被災前後で有意な変化が確認できた指標や地域があったものの必ずしも被災状況と一致しておらず、多偏波SARからは街区レベルであっても被災状況の推定は困難であると判断した。

推定精度に加えて、街区単位だけでなく建物単位での解析という観点でも光学画像・航空写真の方がSAR画像よりも被災状況を把握しやすく、実利用に適している。その半面、航空写真を用いた被災街区や建物の特定にお

いては目視による手作業が多く、処理速度や広域展開の点で課題が残っている。被災直後に迅速にステレオ航空写真から被災建物を抽出する手法も多数報告されているが、その多くは建物面積である。事前に建物の境界線のデータが存在していれば、被災建物数の推定は難しくない。しかし建物境界線データがない中では、特に建物間隔が狭い密集市街地では個別建物の認識自体が困難になり、それに伴い建物数の推定も困難になる。地震工学者の話では、被災状況の推定では建物面積よりも建物数の推定が重要であるため、被災直後に迅速に被災建物数を推定する技術の確立が望まれる。

本研究の全体的な枠組みでは、被災前の航空写真に対し建物の境界線を推定し、被災後の航空写真を用いて被災棟数を推定する2段階の処理を想定している。本論文では、その前段階の処理として、特に密集市街地でも適用可能な2次元建物境界線の自動生成手法を提案する。提案手法では2次元の航空写真に加えて、建物境界線の抽出精度向上のために高さデータを使用する。データには比較的計測精度の高い航空機レーザ (light detection and ranging: LiDAR) データの使用を想定するものとする。

2. 対象地域

本研究では代表的な密集市街地として京都市東山区の住宅地を研究対象地域として選定した。図-1 に対象地域の一部の航空写真と航空機 LiDAR データを示す。道路の幅員が約 4 m 程度の細い路地で囲まれた街区内に、多数の住宅が隣接して立ち並んでいる。

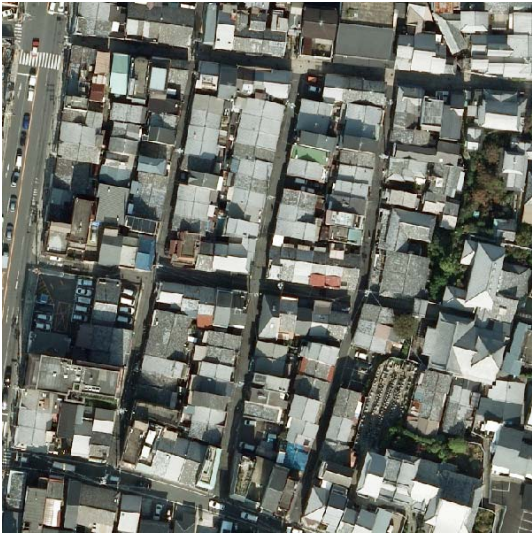
航空写真は Ultra CamX (UCX) で撮影され、元々 15 cm の地上解像度であったが、オルソ投影に変換した後に 25 cm の地上解像度の写真を解析に用いた。航空写真の諸元を表-1 に、航空機 LiDAR データの諸元を表-2 に示す。航空写真と航空機 LiDAR データの撮影日の間には約 5 年の違いがあるものの、両データを確認しながら極力建物分布に変化が発生していない地域を選んだ。また、両データとも平面直角座標系に投影されているものの、両データ間で最大数十 cm 程度の水平方向のずれが確認できた。しかしながら、本研究では建物単位での境界線抽出を目標にしており、数 m 以上の長さを有する建物群に対しこの位置ずれは十分に許容できるとして処理を進めた。

表-1 航空写真の諸元

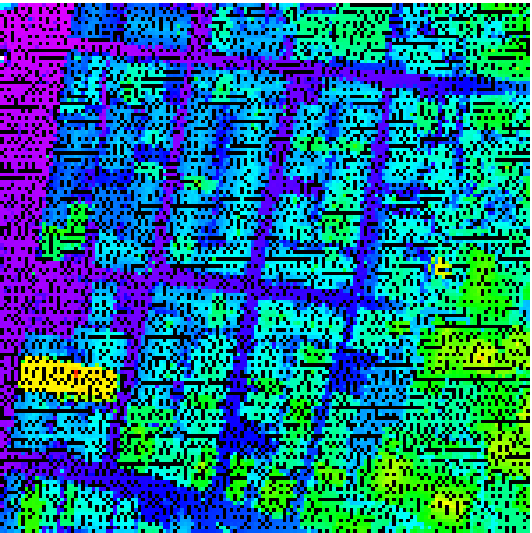
取得者	ウエスコ(株)
撮影日	2007 年 11 月 17 日
地上解像度	25 cm

表-2 航空機 LiDAR の諸元

取得者	朝日航洋(株)
取得日	2002 年 6 月～2003 年 2 月
公称取得点密度	1 点/m ²
実質取得点密度	約 1 点/m ² (1 m グリッド内に複数の点が存在しても 1 点とみなすと、約 0.7 点/m ²)
フットプリントのサイズ	0.21 m
レーザの波長	1.064 μ m



(a) 航空写真(150m×150m : 25 cm 解像度)



(b) 航空機 LiDAR データ(150m×150m). 1m 解像度で画像を生成。黒色は欠損データを表す。

図-1 対象地域の一例 (京都市東山区)

3. 方法

(1) 概要

図-2 に提案手法のフローチャートを示す。航空写真に領域分割を行い初期の領域分割結果を得る。次に、航空機 LiDAR データの 3 次元座標点群に対しフィルタリング処理を実施し、地盤面と非地盤面データに分離する。この非地盤面データの各点に対し、近傍の点を含めて平面の法線を計算する。この法線を領域ごとに集計した領域の法線データを活用して、対となる領域のペアを生成し、領域を建物単位で捉え直す。以下、処理の各段階を、

理解促進のために処理結果を交えながら説明する。

(2) 領域分割

これまでに多数の領域分割手法が提案されているが、本研究では影領域が存在しても頑健に機能するSusaki⁴⁾の手法を利用するものとする。以下、その概要を記す。輝度値の分散が大きいテクスチャを持つ屋根も抽出するため、輝度値を少数個の値に離散化した上で領域分割を試みる。離散化する輝度値の幅は、異なる分散の程度に対応するために複数用意する。複数の離散化幅値で生成された領域分割結果に対し、長方形に近い領域を優先的に抽出していく。領域分割で使用した各閾値は、文献⁴⁾に

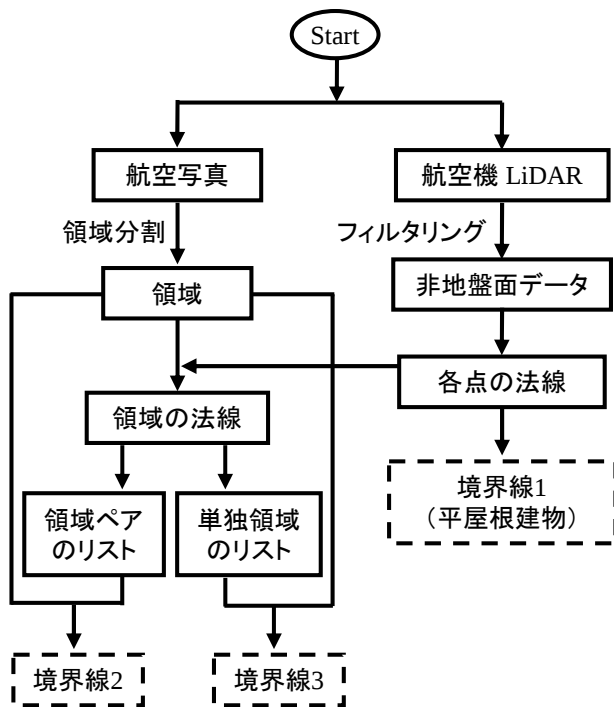


図2 提案手法のフローチャート

示されている値に従った。図-3に領域分割の結果を示す。

(3) フィルタリング

3(2)で得られた領域は建物以外の地物に相当するものも多数含まれており、特に道路や裸地等の地盤面データは建物境界線抽出においては不要である。LiDARデータの基本的な処理の一つに、地盤面データと非地盤面データを分離するフィルタリングが挙げられる。フィルタリングには局所的な傾斜に基づく手法^{5,6)}、一定区画内の最低標高値を利用する方法⁷⁾、クラスタリングに基づく方法⁸⁾等が提唱されている。本研究では、局所的な傾斜と一定区画内の最低標高値を利用しつつ、平坦な地形と急峻な地形が混在していても柔軟に対応可能なSusakiのアルゴリズム⁹⁾を利用した。1つのグリッドに複数の点が存在する場合には、最低標高値を持つ点の座標を当該グリッドの代表値として採用した。

使用データは1 m²に複数の点が存在しても1点とみなすと、約0.7点/m²の点密度に過ぎなかった。図-1に示すように、データが欠損しているグリッドが多数存在することが分かる。しかしながら欠損グリッド数を減らすために1 m²よりも解像度を落とすと、1つのグリッド内に複数の地物が混在する可能性が高まる。上述のように、グリッドの標高値はそのグリッド内の最低標高値で定められるとすると、例えば緩やかな傾斜のある坂道でもグリッドの解像度を落とすことで不連続な標高値が発生しやすくなる。その結果、法線の推定精度が大きく低下すると考えられる。欠損データと法線の推定精度を考慮し

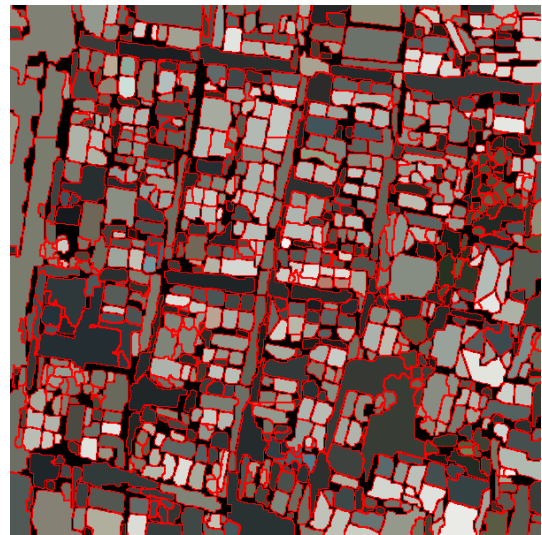


図3 領域分割結果

た結果、1 m²の解像度で処理を進めた。図-4にフィルタリングの結果を示す。このフィルタリングにおいても、必要とされる閾値は文献⁹⁾に示されている値に従った。

(4) 法線の計算

研究対象地域に限らず、日本国内の密集市街地では切妻屋根や寄棟屋根の建物が多数存在する。そのような建物では、対となる屋根の法線は鉛直軸に対し線対称とみなせる特徴を有する。このような特徴を利用して複数領域を建物単位で統合するために、各領域の法線を計算していく。これ以降は対象地域で得た閾値を交えて説明していく。対象地域は約5 mの狭い間口を持つ切妻屋根型の建物も多く、そのような建物を抽出できるようにパラメータを設定した。

領域の法線の計算の前に、まず点群の各点において法線を計算する。ある点を中心とする一辺の長さが r の正方形領域に存在する点数が一定数以上であれば、計算の対象とした。研究対象地域では道路の幅員が約4.0 mの狭い道路も多数存在したことから、 $r = 4.0$ mとした。平面の方程式を式(1)で表す。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

ここで、 a, b, c, d は係数を表し、 $N=(a, b, c)$ が求めたい法線ベクトルである($a^2 + b^2 + c^2 = 1$)。式(1)の未知数は3点を与えられると確定するが、計測データには誤差を含むことからより多くの点数を用いて推定することが望ましい。本研究では計算の対象とする際の、正方形領域に存在する点の最低数を6とした。

N を求めるには、計算対象である点群の3次元座標を使って式(2)で表される分散・共分散行列を求め、その最小固有値に相当する固有ベクトルを計算する。

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 & \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z}) & \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z}) & \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ はそれぞれ正方形領域内に存在するデータの x, y, z 座標の平均値を表す。法線計算の際に使用した各点から推定平面までの距離の2乗和の平方根が閾値(0.1m)以下であれば、有効な法線として採用した。

このようにして得られた点単位の法線を領域単位で集計する。各法線の鉛直成分が閾値(0.9)以上であれば鉛直方向として除外し、それ以外の法線に対し、方位角ごとに法線の発生頻度を記録する。ここでは大まかな方位角の分布が把握できれば十分であるので、本研究ではヒストグラムの階級の幅を 3° とした。そのヒストグラムでの最大頻度を占める方位角をその領域の方位角とする。法線を鉛直方向と東西南北の5グループに分類した結果を図-5に示す。

(5) 法線の分布に基づく領域ペアの探索と領域の分割

3(2)で得られた領域は、同一の建物であっても屋根単位で分割されたり、あるいは影によって屋根や建物自体が更に複数の領域に分割されたりしている。これらの領域を法線を使って統合することを考える。

例えば、図-6(a)に示すように、同一建物から2つの領域 α と β が抽出され、他の領域(領域 γ や δ)と誤って統合することなく2つの領域を統合することを考える。影の影響にせよ、領域 α と β のテクスチャの違いにせよ、このような事態は多々発生する。

今、領域 α に着目して考えると、領域 α 周辺に存在する領域を探索し、領域 α の法線と最も対をなす法線を持つ領域を検出したい。そのような領域 β が見つければ、両者を一つの領域1に統合する。同様に、領域 γ と領域 δ も法線を手掛かりに領域2に統合する。

他方、図-6(b)に示すように、建物が2棟存在し対となる屋根が2組存在するものの、領域分割が十分に機能せず隣接する建物の屋根が統合されて、領域 γ として抽出されることも発生する。この場合には以下の処置を行う。法線が対となる領域の組合せを調べて置く。領域 γ が領域 α 、領域 β と2つの領域の組合せに現れることが確認できれば、領域 γ を2つに分割し、2つの対となる領域を生成する。その結果、領域1と領域2が生成される。

(6) 建物境界線の生成

以上の処理を踏まえて、建物境界線を生成していく。まず、平屋根の境界線は航空写真の領域分割結果を使用

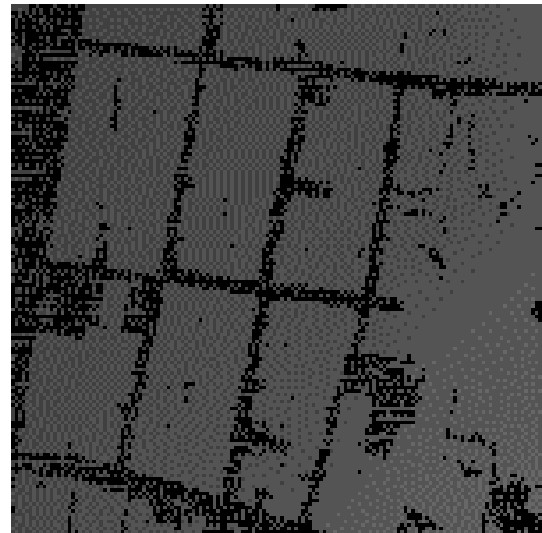


図-4 フィルタリング結果。黒色は地盤面を表す。

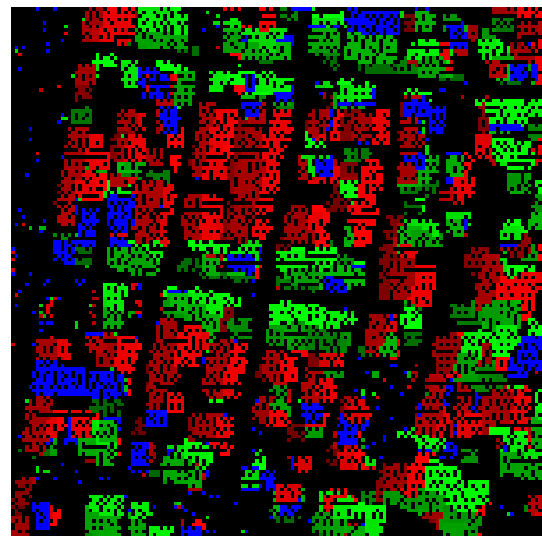


図-5 各点の法線。青色は鉛直方向、赤色は東西方向、緑色は南北方向の法線、黒色は地盤面または欠損データを表す。

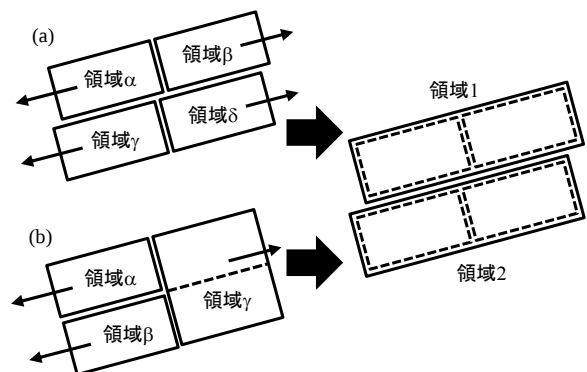


図-6 領域の統合

せずに、航空機LiDARデータのみを使用して生成していく。平屋根の建物（一般的に直方体型の建物）に領域分割を適用すると、エアコンの室外機や水道タンク等屋上に設置してある地物に影響を受けて、一つの建物が細かく分割されることが多い。そのため平屋根建物に対しては以下に述べる手順で先行して分離する。まず、水平距離、鉛直距離の閾値（2.0 m, 1.0 m）を航空機LiDARデータに適用して、点群グループに分離した。3(4)で得られた法線を点群グループで集計し、鉛直方向を向く法線が支配的で、かつ点数が一定数以上（50点：点密度が0.7点/m²であるため約70 m²の面積に相当）であれば平屋根建物として判定する。平屋根建物の場合には大型で形状が複雑な建物が含まれることが多く、抽出した境界線をそのまま採用する。

次に3(5)で述べたように、対となる領域が存在する場合には統合した領域の境界線を生成する。対となる領域が存在しない単独領域はその境界線を生成する。ここで抽出される境界線は長方形で近似するものとする。長方形の向きを単純に領域の法線の方位角に従って決定すると、LiDARデータに含まれるノイズのために法線の向きが安定せず、そのために整然としない建物境界線が記述される。街区毎にはほぼ一定の向きに従って建物が配置されている密集市街地では、特にその傾向が強まる。そのため、まず水平距離、鉛直距離の閾値（3.0 m, 3.0 m）を用いて、点群を街区単位に分ける。ここでの閾値は街区全体を一つの集合として分離するために、平屋根建物抽出用の閾値よりは大きい値とした。次に、街区毎に法線の方位角を集計し、支配的な方位角を決定する。最後にこの街区における方位角に従って、建物境界線を表す長方形の向きを決定する。不十分な領域分割で過小に屋根や建物が抽出されることも考えて、5 m²以上の領域を処理の対象とした。

地上投影面積の大きな建物から順次、建物境界線を生成していく。密集市街地を対象に処理を行うと、生成した境界線が干渉してしまう。そのため、生成する境界線が既に存在している境界線に干渉しないか確認し、干渉する場合には干渉しないように縮小する。図-7に、4つの地域に対し抽出した建物境界線を航空写真に重ねた結果を示す。4つの地域には低層住宅が密集している2地域、低層住宅の中に高層建物が混在している2地域を選んだ。

3. 検証

文献¹⁰⁾では画素単位の評価と地物単位の評価と2種類報告されているが、本研究では最終的に被災建物数の推定に応用することを念頭に置いて、地物単位の評価を採用した。具体的には、抽出された境界線から見た評価

と、既存の建物から見た評価を実施した。前者の評価では、本研究が建物単位の境界線抽出を目的としていることを踏まえて、抽出境界線が1戸だけを含む場合と2戸以上を含む場合を分けて集計した。また後者の評価では、1戸の建物が1つの境界線に対応する場合と2つ以上の境界線を含む場合に分けて集計した。航空機LiDARの計測時点では存在し、航空写真の撮影日には消滅した建物は対象外とした。図-7の4つの対象地域に対し、上記の4つの評価指標を算出した結果を表-3に示す。表-3中の(b)は2戸以上の建物を含む境界線の数を表している。厳密には完全に正しく建物の境界線を抽出できている訳ではないが、抽出漏れと断定するほどではない。表-3中の(a)(d)で評価すると抽出性能を過小評価することになると考えて、((a)+(b))/(d)であくまでも抽出境界線の抽出能力を示し、一方で建物から見た評価((e)+(f))/(h)と併せて検討することで提案手法の検証と位置付けた。

4. 考察

(1) 密集市街地における建物境界線抽出

図-8に図-7の一部を拡大した様子を示す。図-7及び図-8の提案手法の適用結果からは、実際の境界線とのずれは生じていても、密集市街地でも抽出漏れが少ないことが分かる。既存研究（例えば¹⁰⁾）を調べると、建物間の距離が十分にある比較的建物を個別に抽出しやすい市街地での事例であり、本研究のように建物が密集した地域での適用事例は筆者の知る限り見られなかった。表-3中の(b)欄が示すように、複数戸の建物が1つの建物として取り扱われて境界線が生成されている事例も存在するが、1戸の建物の推定数に比べて遥かに少なかった。また、表-3中の(c)欄はほとんど全てが植生を誤って抽出していることが判明した。本研究では一般的な航空写真を使用した。近赤外域を計測できる画像を使用すると、この誤りは大きく減少できると考えられる。

本提案手法の有効性を定量的に検討するために、文献¹⁰⁾で報告されている建物境界線抽出手法を実装しようと試みた。提案手法では、航空機LiDARデータから生成した2種類のマスクを用いて建物の中心位置を特定する。RGB高解像度画像（15 cm解像度）をYIQ画像に変換し、建物境界線に位置するエッジやコーナーを抽出し、補間処理を加えた上で境界線を推定する。図-9にYIQ画像から抽出したエッジとコーナーを示す。Matlabを用いて、Cannyのアルゴリズムでエッジを、Harrisのアルゴリズムでコーナーを抽出した。共に広く使用されているアルゴリズムである。

まずエッジ抽出は良好とはいえない結果となった。建物と陰影のある道路との境界線上のエッジや、隣接する



図-7 建物境界線抽出結果. (a)(b)低層住宅が密集している地域, (c)(d)低層住宅の中に高層建物が混在している地域 (いずれも京都市東山区の150m×150mの範囲). 紫色は抽出した境界線を表す.

表-3 抽出精度の検証結果

評価方法	(1) 境界線から見た評価					(2) 建物から見た評価				
	建物		(c) 非建物	(d) 計	((a)+(b))/ (d)	境界線あり		(g) 境界線 なし	(h) 計	((e)+(f))/ (h)
	(a) 1戸	(b) 2戸 以上				(e) 1つ	(f) 2つ 以上			
シーン a	185	22	20	227	91%	191	22	22	235	91%
シーン b	153	3	27	183	85%	146	7	15	168	91%
シーン c	179	14	17	210	92%	183	10	18	211	91%
シーン d	204	12	16	232	93%	168	28	16	212	92%
計	721	51	80	852	91%	688	67	71	826	91%

建物間のエッジの抽出漏れが多い。そのため、提案手法が想定している境界線の初期値を15%の延長したとしても、建物の周囲を閉じることは困難で境界線の抽出精度は大きく低下すると予想される。また図-9(a)中の楕円で示す墓地やその他の細かい地物のエッジが抽出されている。文献¹⁰⁾でも $\sigma=3$ 画素のガウスフィルタを適用して、不要なエッジを除去する処理が述べられているが、エッジ除去によって本来必要な境界線上のエッジも更に減少することになる。また図-9(d)に示すコーナーも本来の建物数を考えると大きく不足していると言える。建物が隣接し、密集市街地で多数の陰影が発生していることで、建物の境界線が鮮明でない箇所が多数発生し、エッジと同様にコーナーの抽出能力も低下していると考えられる。これらの結果を踏まえて、文献¹⁰⁾での手法で得られる境界線データは極めて不十分なレベルになると判断し、最終的な境界線データの生成を断念した。

図-9の比較手法の結果を検討すると、提案手法においては最終的な建物境界線データは領域分割の結果に大きく依存すると考えられる。既に文献⁴⁾で報告されているように、採用した領域分割は上述の墓地やトタン屋根のようなテクスチャ付きの屋根に対しても、境界線情報を保持しつつ輝度値のばらつきを緩和するために良好な領域分割結果を生成できる。また建物と道路との不明瞭な境界線も、複数の離散化輝度値を適用することで抽出できることが判明している。図-3に示す領域分割手法自体の優位性と、図-6(b)に示す不完全な領域分割結果からも建物単位で領域をまとめる処理によって、安定的に建物境界線を抽出できていると考えられる。

(2) 領域の2次元形状に着目したアプローチ

筆者は、領域が持つ2次元の形状を指標化し、細分割された近接領域を統合した上で建物境界線を抽出する手法を検討した¹¹⁾。その概要を以下に記す。最初に2次元画像として航空写真から「長方形指数」を用いて初期の領域分割を試みる。この結果、建物の屋根だけでなく、道路や植樹等の地物が抽出される。次に、ステレオ写真から写真測量の処理を通じて3次元座標を持つ点群を生成する。続いて、3次元点群に対しフィルタリング処理を実施し、地盤面と非地盤面データに分離する。更に非地盤面データに対し、「長方形指数」と「正方形指数」を組み合わせ、同一建物に属すると推定される複数領域を統合する。最終的に影領域を除去する。

東日本大震災以前の2009年5月15日に撮影された宮城県名取市閑上地区の1 km × 0.75 kmの画像を対象に解析を行った。対象地域のうちの200 m × 150 m範囲に対し検証を行い、200画素未満の小領域は検証の対象外とした。建物境界線の抽出結果を図-10に示す。検証の結果、94棟の建物のうち、少なくとも1つ以上の領域を

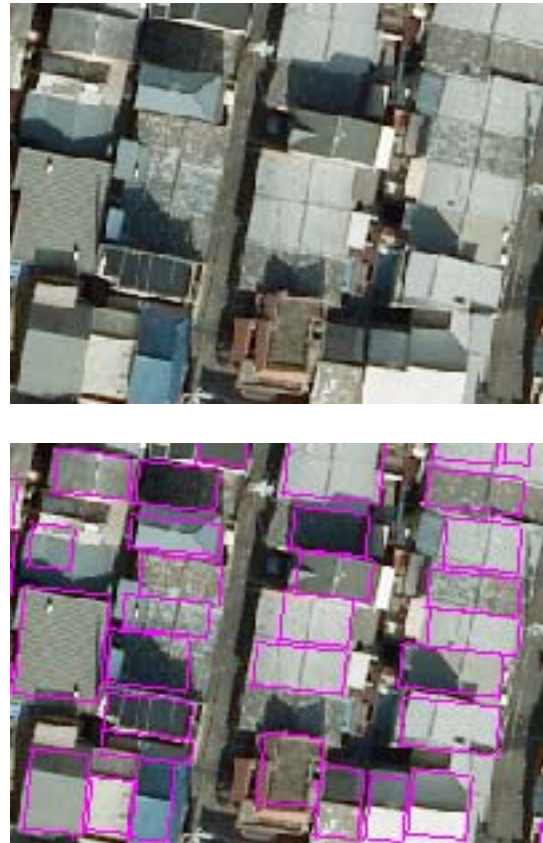


図-8 提案手法による境界線抽出結果の一例 (図-7(a)の50 m × 37.5 mの範囲)

含む建物が85棟、全く領域を含まない建物が9棟あった。また、抽出された領域は全部で146あり、そのうち建物に該当するものは107、それ以外のは39あった。建物の抽出漏れは少なかったものの、全体的に過剰推定していた。また、建物に該当してはいるものの統合されないままの領域も多数残っていることが判明した。やはり2次元の領域の形状を反映する指標に頼った統合には限界があり、本研究で提案しているように、3次元建物モデルを経由した上で建物境界線を抽出する手法の方が安定的な結果を生成できると言える。

(3) 航空写真単独からの建物境界線抽出

図-10の結果は、ステレオ航空写真から生成された航空写真digital surface model (DSM)を用いてフィルタリングした結果を含んでいる。初期の領域分割の結果(図-10(b))には、道路や河川、空き地等も含まれており、このような領域分割結果から建物だけを抽出することは困難である。したがって、領域統合の前に3次元点群に対しフィルタリングを適用した。1 km × 0.75 kmの対象地域全体に対してフィルタリングが良好であった。しかしながら、一部の橋梁や道路、特に建物に起因する道路

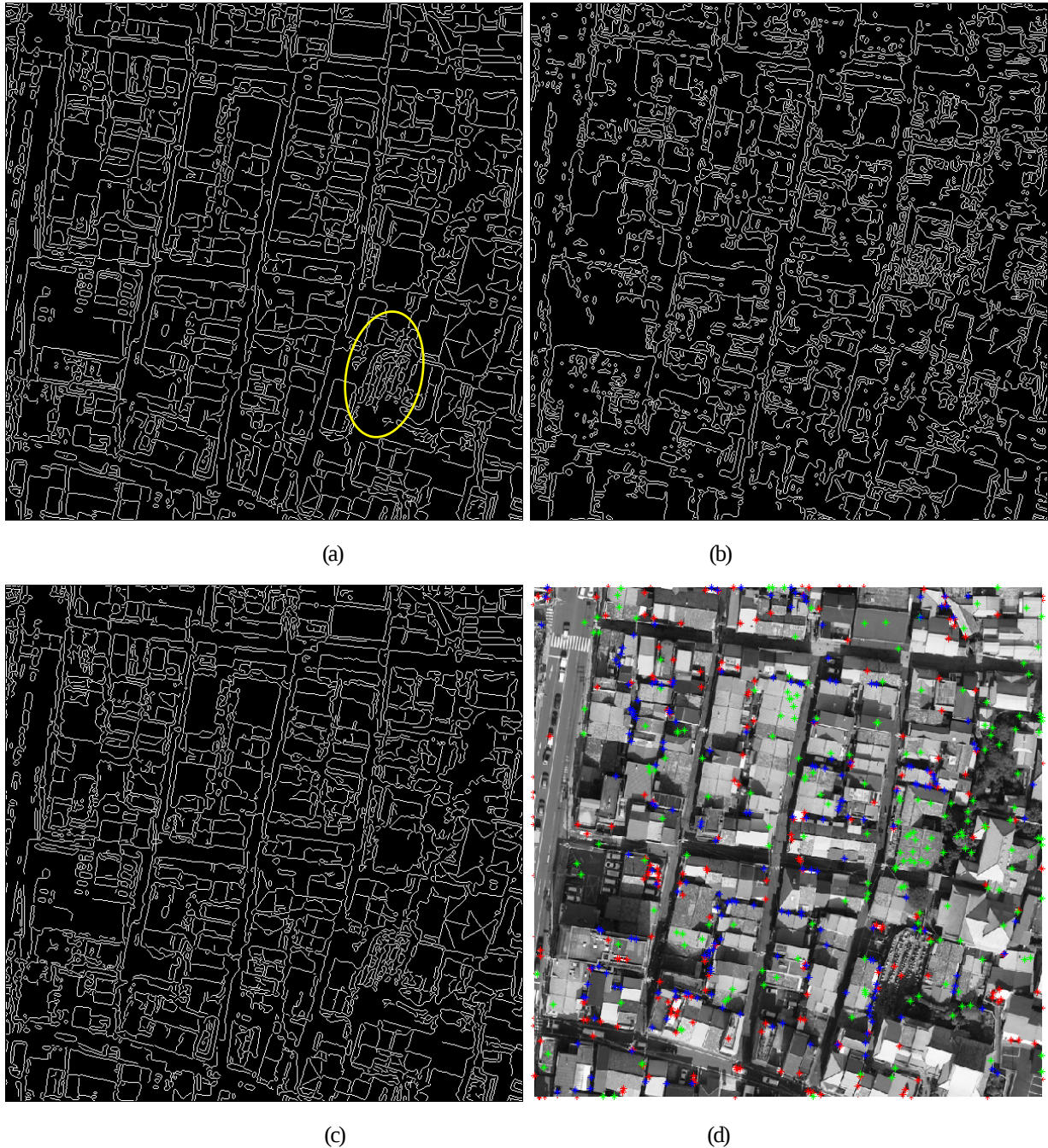


図-9 文献¹⁰⁾の手法で生成される境界線抽出に関する結果. (a)YIQ変換したY画像, (b)I画像, (c)Q画像からCannyのアルゴリズムで抽出したエッジ, (d)Harrisのアルゴリズムで抽出したコーナー. 赤色はY画像, 緑色はI画像, 青色はQ画像から抽出したコーナーを表す.

上の影が非地盤面領域として誤って残っていた. これらの領域が除去できなかったために, 建物数が過剰推定されている.

航空写真から生成されるDSMの鉛直方向の精度 (一般的に ± 50 cm) に影響を受けていると言える. 図-11に航空機LiDARのDSMと航空写真DSMを比較している. 一般的に航空機LiDAR (一般的に ± 15 cm) よりも鉛直方向の精度が悪く, 特に建物等の地物の境界線付近の精度が極端に悪いことが知られており, 図-11からもその

ことが容易に理解できる. 図-10のように比較的建物間の距離が離れている住宅地においてすら建物境界線の抽出精度は十分でなかった. 図-1のような密集市街地では細い道路が多く, 航空写真DSMでは更に鉛直方向の精度が悪化するため, 航空機LiDARデータの使用が不可欠と言える.

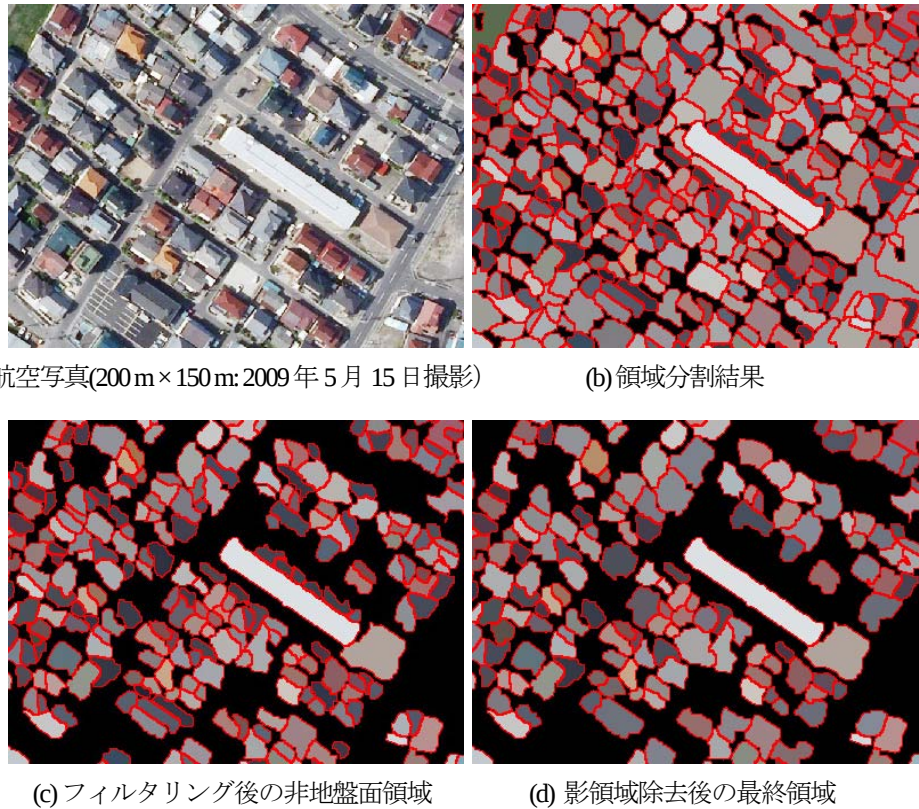


図-10 2次元の領域の形状を手掛かりに領域を統合した事例¹¹⁾ (宮城県名取市閑上地区)

5. 結論

本論文では、航空写真と航空機 LiDAR データから建物境界線を自動推定する手法を提案した。提案手法では、航空写真から生成された領域分割結果と、フィルタリング処理後の航空機 LiDAR データから得た法線分布を組み合わせて、屋根単位で分割された建物を統合する処理を行う。建物単位で生成された2次元の境界線データを検証した結果、提案手法は密集市街地であっても良好な境界線データを生成できることが判明した。今後は、領域分割手法の改良と、使用 LiDAR データの点密度の向上を通して、更に抽出精度を向上させていく予定である。

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「航空写真を用いた迅速な被災建物自動抽出手法の開発」)を受けて実施した。

参考文献

- 1) Chen, S. W. and M. Sato : Tsunami damage investigation of built-up areas using multitemporal spaceborne full polarimetric SAR images, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, in press.
- 2) Yamaguchi Y. : Disaster monitoring by fully polarimetric SAR data acquired with ALOS-PALSAR, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 10, pp. 2851-2860, 2012.
- 3) Watanabe, M., Motohka, T., Miyagi, Y., Yonezawa, C. and Shimada, M. : Analysis of urban areas affected by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and Tsunami with L-band SAR full-polarimetric mode, *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters*, Vol. 9, No. 3, pp. 472-476, 2012.
- 4) Susaki, J. : Segmentation of shadowed buildings in dense urban areas from aerial photographs, *Remote Sensing*, vol. 4, pp. 911-933, 2012.
- 5) Vosselman, G. : Slope based filtering of laser altimetry data, *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 33 (B4), 935-942, 2000.
- 6) Sithole, G. : Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter, *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 34 (Pt. 3/W4), 203-210, 2001.
- 7) Wack, R. and Wimmer, A. : Digital terrain models from airborne laser scanner data—A grid based approach, *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 34 (Pt. 3B), 293-296, 2002.
- 8) Sithole, G. and Vosselman, G. : Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds, *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.*, 36 (Part 3/W19), 66-71, 2005.
- 9) Susaki, J. : Adaptive slope filtering of airborne LiDAR data in urban areas for digital terrain model (DTM) Generation, *Remote Sensing*, vol. 4, pp.1804-1819, 2012.
- 10) Mohammad Awrangzeb, M., Ravanbakhsh, M. and Fraser, C.S. : Automatic detection of residential buildings using LIDAR data and multi-spectral imagery, *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, 65, 457-467, 2010.
- 11) 須崎純一：航空写真からの建物数の自動推定，2014年度土木情報学シンポジウム講演集，39，109-112，2014.

(2014. 10. 25 受付)

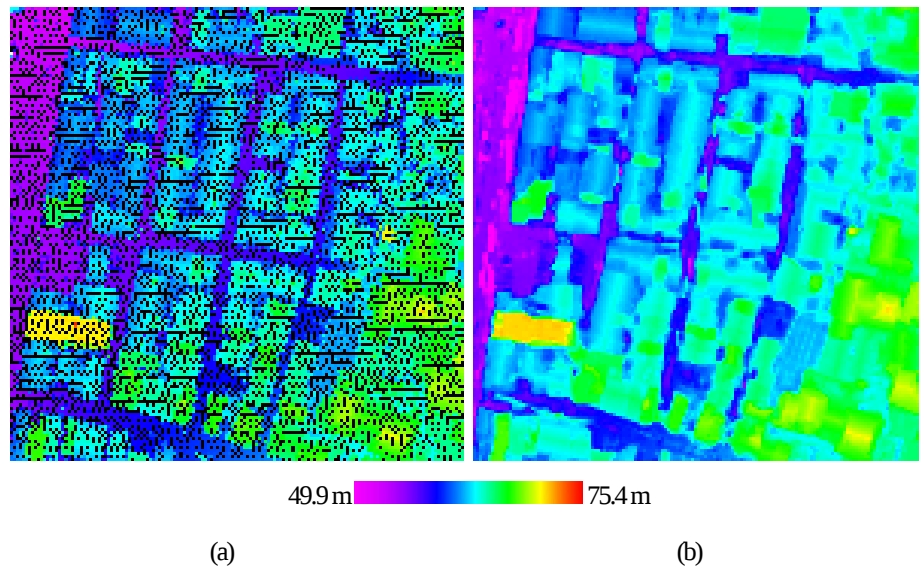


図-11 (a) 航空機 LiDAR DSM と (b) 航空写真 DSM. 1 m 解像度で画像を生成. 黒色は欠損データを表す.

AUTOMATIC EXTRACTION OF BUILDINGS IN DENSE URBAN AREAS USING AERIAL IMAGES AND AIRBORNE LIDAR DATA

Junichi SUSAKI

This paper presents a method that automatically extracts boundaries of buildings even in dense urban areas using aerial images and airborne light detection and ranging (LiDAR) data. First, the proposed method segments initial regions using aerial images. Next, point clouds of airborne LiDAR data are filtered into ground data and non-ground data. Then, normal of non-ground point is calculated by fitting a planar equation to the data including neighboring points. The normals are aggregated within a region, and then pairs of regions are searched by examining the normals. Finally, two-dimensional boundaries of buildings are delineated. The validation results show that the proposed method effectively extracted boundary data of buildings even in the dense urban areas.