高分解能衛星シミュレーション画像を用いた建物閉領域の 自動抽出手法に関する研究

A Study on Closed Region Extraction for building extraction from Simulated High Resolution Satellite Imagery

史 中 超*・柴 崎 亮 介*

Zhongchao SHI and Ryosuke SHIBASAKI

Abstract: Up to now, aerial photographs have almost been the unique data sources to be used for the purpose of urban spatial data acquisition. Recently, great attention has been paid to the emergence of high resolution satellite imagery (resolution around 1 meter). Huge benefits may be reached if the so-called high resolution satellite data can be used as the data source for urban spatial data acquisition, especially for building related information collection. In this paper, the characteristics of high resolution satellite imagery are analyzed at first. Two practical building extraction methods are then proposed. One method aims to extract buildings with image features (edges and corners) extracted from high resolution satellite images, while the other tries to extract buildings with region growing algorithm. Experiments are carried out for testing the efficiencies of proposed two building extraction methods. Since high resolution satellite images are still not available at the moment, three different types of simulation images with different resolutions (0.5m, 1m and 3m, respectively) made from aerial photographs are used in experiments.

1. はじめに

建物は様々な分野で用いられる非常に重要な地物であり、高効率かつ高精度の建物自動抽出手法の開発は都市空間データベースの構築・更新の鍵となっている。これまで建物抽出に利用されるデータソースのほとんどは航空写真であったが、費用などの制約から、頻繁に取得することは困難であった。一方、光学センサによる衛星画像は比較的安価で観測頻度も高いが、これまでは解像度が十分でなかったことから、建物抽出に利用することがほぼ不可能であった。

しかし、1 m 程度の高分解能センサを搭載した衛星が米国のスペースイメーシング社などの3社により、近々打ち上げられることから、高分解能衛星データを用いた都市空間データベースの構築や更新、特に建物の自動抽出・計測が非常に注目を浴びている。

本研究は、解像度の異なる高分解能シミュレーション衛星画像から建物を自動抽出する方法を開発し、建物の検出率を検証することを最終目的としている。地上分解能が10cm オーダーのディジタル航空写真画像を利用した建物の自動抽出方法はすでに著者らにより提案されている¹⁾。その手法は、ウェーブレット変換による航空写真画像からの特徴抽出と、ステレオマッチングによる建物の自動抽出の二段階からなっている。実験によると、単写真の航空写真画像から特徴抽出する際に、建物候補を閉領域（ポリゴン）として抽出することができれば、ステレオマッチングによる高さ計測を組み合わせることで、建物をおおむね正しく抽出できることがわかっている。すなわち、単写真から建物候補として抽出される閉領域には、地表面上の建物の影、車両など建物以外のものが含まれるが、それらの標高を地表面と比較することで、建物を比較的容易に識別できる。結局、単写真画像の解析時にどの程度の確率で建物を含む候補を閉領域（本論文では建物閉領域と呼ぶ）として抽出できるかが精度向上の鍵となる。

そこで、本論文では、第一段階としてシミュレーション

*東京大学空間情報科学研究センター

港区六本木7-22-1

TEL 03-3402-6231 内2592 FAX 03-3408-8268

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 37, NO. 5, 1998

ン単画像を利用した建物抽出手法の開発と精度検証を行う。特に、建物を閉領域として抽出する精度の向上という観点から、ウェーブレット変換による特徴に基づく手法と領域拡張法による閉領域抽出法を比較する。同時に高分解能衛星画像の地上解像度は1 mから3 m程度までバラエティがあることから、建物の大きさや密度との関連において抽出確率に解像度が与える影響を定量的に明らかにする。これらは実際のプログラム開発において、対象となる画像の解像度や地域特性に合わせてチューニングを施す際の目安となると考える。

2. 高分解能衛星画像の建物判読可能性の評価

現在、高分解能画像はまだ入手できないため、本研究では航空写真ををもとに解像度がそれぞれ0.5m, 1 m, 3 mのシミュレーション衛星画像を生成して比較検討を行う。そのように作ったシミュレーション衛星画像はS/N比やばけなどが実際の高分解能衛星画像と多少異なると想像される。しかし、画像のS/N比やばけが同じである場合、建物などの地物の抽出・判読

可能性は解像度によりほとんど支配されると考えられるため、まずこれらのシミュレーション画像を用いて、建物などの地物の目視による判読可能性を定性的に評価し、画像の特性として整理する。

図1は、同じ地域のそれぞれ0.5m, 1 m, 3 m解像度のシミュレーション画像を示している。図中白い丸で示された場所Aにある建物の幅は約9 mで、場所Bの周辺建物の幅は5 m前後である。このシミュレーション画像によると、0.5mと1 mの画像の場合、幅が5 mより大きい建物のほとんどが人間の目で判読できることが分かる。一方、3 m分解能画像の場合、幅が9 mより大きい建物を人間の目で大体判読できるが、幅が9 mより小さい建物を判読することがほぼ不可能である。

図2に建物だけではなく車も多数含まれる場所のシミュレーション画像を示す。本例では、0.5mの画像の場合、幅が2 mに満たない車まで認識できることが明らかに分かる。1 mの画像の場合、車が存在することをある程度推定できるが、計測などの作業は不可能であった。また、任意の方向で並んだ建物の屋根の各辺にジャギーが顕著に表れることが分かった。一方、3 mの画像の場合、車はもちろん、左下の幅が7 m程度

図1 高分解能シミュレーション衛星画像の例(1)

図2 高分解能シミュレーション衛星画像の例(2)

の建物の判読も困難となっている。それは、その建物の向きが画像の水平軸方向と30度ぐらい傾いているため、屋根の辺が特にはっきり見えないからである。一方、図1のケースでは、ラインに平行あるいは垂直になっている建物は若干、判別が容易である。このように、建物が認識できるかどうかは建物のサイズやその向き（ライン方向との相対的な向き）に関連することがわかった。さらに、建物の自動抽出精度に影響を与える特徴には以下のようなものがある。

まず、図2のAに示すように多くの山脊型の屋根は、その一部分の画素値が特に高い(明るい)。これは、コンピュータによる建物の自動認識に大変不利な要素を与えている。

さらに、建物が判読できるかどうかは実は建物のサイズだけではなく、建物の密度とかなり関係がある。例えば、図1のB地点では、0.5mの画像の場合、建物から隣接の建物を分離することがそれほど難しくない。しかし、1 mの画像では同場所の建物の一部は隣接の建物とくっついたように見え、建物から隣接の建物を分離することが難しくなっている。さらに、3 mの画像の場合、同場所の建物の姿が完全に消えている。一方、密度の小さいA地点では、もちろん建物が比較的大きいこともあるが、三つの解像度の画像のいずれから建物の姿をはっきりと確認できる。

3. 単写真画像からの建物閉領域の自動抽出手法

ステレオ航空写真からの建物の自動認識手法は既に著者らにより検討されている^{1,3)}。それらの研究では、建物抽出の可能性は、単写真画像からのエッジ抽出の段階において建物候補をどの程度明確に抽出できるかに基本的に依存している。しかし、前節で示したように、高分解能衛星画像は航空写真に比較して、主に分解能の低さに起因するいくつかの特徴を持っている。そのため、航空写真をベースにして開発した手法はそのままでは高分解能衛星画像に適用するのは適当でない可能性がある。特に単写真画像から閉じた領域（ポリゴン）として建物候補を抽出する手法は、画像の解像度の影響を受けやすいことから、建物候補の抽出可能性を対象として手法の検討を行った。

画像から閉領域を抽出する手法として、本論文では次の二つの基本手法を取り上げた。一つはエッジなど

の特徴 (feature) をもとにその連結関係を調べることによりポリゴンを抽出し、建物候補とする方法である (特徴に基づく方法)。もう一つは屋根の画素値の局所的な同一性を利用して、領域内の一点から次第に領域を拡張する方法により建物候補を領域として抽出する方法である (領域拡張による方法)。文献^{1,3)}の方法は前者に属する。後者ではエッジにギャップがある場合でも画素値に局所的な差があれば、領域として認識できることから精度の向上が期待される。

3.1 特徴に基づく建物閉領域の抽出法

本手法は図3に示す①～④手順により建物の抽出を行う。

- 1) ウェーブレット変換による画像の多重解像度分解 (multi-resolution decomposition) : 多重解像度分解はコンピュータビジョンの分野でよく用いられている画像解析技術の一つで、ウェーブレット関数以外にガウシアン関数などの微分を利用して解像度が異なるピラミッド構造をもつ画像群を得る (文献^{1,4)}を参照) ことができる。
- 2) 特徴 (エッジとコーナー) の抽出 (feature extraction) : 特徴抽出はピラミッドの各段階

図3 特徴による建物抽出の流れ

において Gradient Operator により行う^{1,2)}。しかし、エッジなどの特徴を有効に抽出するため、ノイズなどの影響を除去しなければならない。通常、gradient 法による特徴抽出方法では、しきい値を利用して影響の軽減を行う。その場合、良好なエッジが抽出できるかどうかはしきい値と直接関係があり、より適切なエッジを抽出するため、画像全体に対していくつかのしきい値を利用したり、または画像の一部に対して局所的なしきい値を利用することが多い。

- 3) ポリゴンの抽出：エッジのギャップを埋めて連結させ、エッジのつながりを調べることで、ポリゴン（閉領域）を抽出する。基本的な手法は文献³⁾を参照されたい。
- 4) 建物の抽出率の算定：本研究では、検証地域において閉領域として抽出された建物の総数と地域内全ての建物の比を建物の抽出率とする。

3.2 領域拡張による建物閉領域の抽出法

本手法の手順は前述した手法のそれとほぼ同じであり、ステップ3だけが異なる。

領域拡張手法をまとめると、次のステップからなる。

- (1) 領域拡張のためのシード点を決める。シード点は領域を広げる場合の出発点であり、領域内部に存在しなければならない。本研究では、画像から抽出されたコーナーをシード点とする。著者らはウェーブレット変換とその特徴に関する詳しい検討を行い、メキシカンハットウェーブレットを利用して画像からコーナー点という特徴を抽出する手法を開発している^{2,3)}。メキシカンハットウェーブレットにより抽出したコーナー点にはマイナスのピークとプラスのピークがあり、それぞれ領域拡張のシード点として使えることがわかっている。
- (2) 全てのシード点に異なる番号を付けておく（例えば、シード点 A, B, C, …など）。また、全てのシード点番号と違った番号（予備番号）を作っておく。本稿では予備番号を X とする。
- (3) あるシード点（例えば番号 A）から領域を拡張する。拡張の方法は次の順番により行う。
 - ① シード点の画素値を領域の画素値 I_A とする。

図4 領域拡張による建物抽出の流れ

- ② シード点の8隣接で予備番号 A と X の付いてないピクセルの画素値を I_A と比較し、次の条件式 (1) を満たす隣接のピクセルに予備番号 X をつける。ここで、 I_j は 8 隣接ピクセルの画素値で、 T はしきい値である。
$$I_j - I_A < T, j = 1 \sim 8 \quad (1)$$
- ③ I_A とステップ②で番号 X のあたえられたピクセルの画素値の平均値を求め、それを領域 A の画素値 I_A とする。
- ④ 全て番号 X が付けられたピクセルをそれぞれシード点として、ステップ②③④を繰り返す。ここで、一つシード点の処理が終わったら、そのシード点の番号を X から A に変更する。
- (4) 番号 A が付けられたピクセルから構成された領域の境界を抽出する。
- (5) 全てのシード点によりステップ(3), (4)を繰り返す。

4. 実 験

近い将来、本格的に利用できる衛星画像は0.82m(スペース・イメージング社)や1 m(オービタル・イメージング社、アースウォッチ社)、3 m(アースウォッチ社)など解像度を有している。そこで、本研究では、縮尺約1/10000の航空写真を基に、それぞれ0.5m、1 m、3 m 解像度のシミュレーション衛星画像を作り、それらの画像を用いて第3章で紹介された二つの建物抽出方法により実験を行った。0.5m 解像度については、将来の衛星技術の進歩を想定して加えた。本実験では、第2章に示したように建物の抽出率は建物のサイズや密度と深い関連があるので、実験ではさまざまなケースを考慮しながら結果の比較・分析を行った。

4.1 特徴に基づく建物閉領域の抽出に関する実験結果

文献³⁾に述べたように、本手法による建物抽出の可能性はエッジ抽出の段階で、建物候補がどの程度明確に抽出できるかに依存している。本実験では、まずエッ

ジ抽出の可能性に関して解像度やエッジ抽出しきい値の影響を検討する。

4.1.1 エッジ抽出とノイズ除去のためのしきい値との関係に関する検証

本検証では、エッジの抽出は文献³⁾で紹介された方法により行う。筆者らの経験によれば、画像ノイズの多くはエッジを抽出するためのグラディエントのモジュラスの最大値の10分の1前後以下に含まれている。そこで、本研究では、そのモジュラスの最大値の10分の1(10パーセント)を基本しきい値とする。

まず、しきい値がどのような影響を与えているかをみよう。図5の(a)に示しているのは0.5mの画像である(画像サイズは250×170)。その画像を用いて、ウェーブレット変換などをかけて、計算したモジュラスの最大値が301であったため、基本しきい値を30とする。その基本しきい値(本例では30)と、20(基本しきい値から最大値の約3パーセントを引いた結果)と40(基本しきい値から最大値の約3パーセントを足した結果)を利用して、エッジ抽出を行った結果をそれぞれ図5の(b)、(c)、(d)に示す。この結果によると、しきい値が大きければ大きいほど、きれいなエッ

図5 異なるしきい値によるエッジ抽出結果の比較

ジ画像が得られるが、有用なエッジ情報をも失う可能性が高くなる。これは、一つの画像に対して唯一かつ最適なしきい値を見いだすことは非常に困難なことを示している。その問題点を解決するには、いくつかのしきい値を併用するか、または画像の一部に対して局所的しきい値を利用するかの二つの方法が考えられる。局所しきい値の決定には様々な要因を考慮する必要があるため、容易ではないため、本研究では、いくつかのしきい値を併用することにした。すなわち、いくつかのしきい値でそれぞれエッジを抽出して、それぞれのエッジ画像から前述した閉領域抽出方法により閉領域を抽出し、多重抽出のないように全ての閉領域を一つの結果にまとめる。多重抽出とは同じ画像に対して異なるしきい値により同じ建物を閉領域としてが多数抽出された場合をいう。例えば、図5の(b),(c),(d)を用いて、閉領域抽出方法により閉領域を抽出すると、同じ建物が3回ほど抽出される場合があり、エッジ画像が違うため、抽出された閉領域の形も多少異なると考えられる。その場合、どれかを選択し、残せば良い。経験的には基本しきい値から抽出された閉領域を優先に残したことが多い。

4.1.2 解像度が異なる場合の建物閉領域抽出率の変化に関する検証

第2章でも述べたように建物が抽出できるかどうかは建物のサイズと密度にも依存している。ここでは、建物サイズの指標として、建物を長方形で近似した際にもっとも短い辺長を「幅」と呼び、利用している。例えば、10cm 解像度の航空写真の場合、幅3 mと6 mの建物エッジから理論的にそれぞれ30と60ピクセルが抽出できる。一方、1 m 解像度の衛星画像の場合、幅3 mと6 mの建物エッジから理論的にそれぞれ3と6ピクセルが抽出できる。通常、解像度が低いほど情報量が少なくなるため、ノイズなどの影響が小さく

なると思われる。しかし、三つのピクセルしか持っていないエッジラインに対して、もし何かの原因（ノイズなど）でそのうちの一つピクセルが抽出できなかったら、そのエッジラインに対する影響は3分の1となる。一方、例の6, 30, 60などピクセルを持っているエッジラインに対して、一つのピクセルを失った場合、各エッジラインへの影響がそれぞれ6分の1, 30分1, 60分1となる。そのため、本実験では、建物のもっとも狭いエッジライン（幅）を建物サイズの指標とする。

図6はそれぞれ0.5m, 1 m, 3 mの衛星シミュレーション画像とそれらによるエッジ抽出・ポリゴン抽出の結果を示す（注：0.5mの画像に関しては、表示を見やすくするため、1 mの画像と同じサイズに縮小してある）。また、図6中に示すしきい値は各画像に対する基本しきい値である。実験の結果をまとめて表1に示す。

その結果では、図6の(a),(b)に示したように、建物の密度が低い場合（本例では、建物と建物の間の間隔が5 m以上ある）、0.5m, 1 mの画像から幅9 m以上の建物を100パーセント抽出できることが分かった（図6の(a),(b)を参照）。また、建物密度が高ければ高いほど、抽出率が低くなることも明らかに分かった。例えば、図6の(c)では、場所A、Bの建物のサイズがほぼ同じである。しかし、建物の抽出率が場所Bのほうが場所Aより高い。それは、建物屋根の形とも関係があるが、B場所の密度がA場所の密度より低いことも原因の一つと考えられる。一方、3 mの画像では、図6の(e)に示すように、建物の幅が9 mある場合でも（左上Cの内部および周辺の建物）、建物の抽出率がかなり低いことが示された（本例ではCあたりにある9軒の建物のうち1軒しか抽出されなかった）。

表1 特徴に基づく手法による建物候補抽出実験の結果

	解像度 (m)	画像サイズ (ピクセル)	建物の幅 (m)	建物の総数 (軒)	抽出された建物 閉領域	抽出率
(a)	0.5	250×225	9～15	9	9	9 / 9 (100%)
(b)	1	130×115	9～15	9	9	9 / 9 (100%)
(c)	0.5	250×255	3～8	63	33	33/63(53%)
(d)	1	128×127	3～8	63	12	12/63(19%)
(e)	3	127×116	3～15	178	6	6 / 178(3%)

表2 領域拡張法による建物抽出実験の結果

	解像度 (m)	画像サイズ (ピクセル)	建物の総数 (軒)	抽出された 建物閉領域	抽出率
(a)	0.5	460×370	104	21	21/104(21%)
(b)	1	229×184	104	19	19/104(18%)
(c)	3	77×62	104	9	9/104(8%)

4.2 領域拡張法による建物閉領域の抽出に関する実験結果

本手法を利用する場合、建物が抽出できるかどうかは基本的に建物の屋根の均一性や屋根とバックグラウンドのコントラスト、建物のサイズ・密度に依存している。図7は同場所の0.5m, 1 m, 3 m 画像とそれらの画像から領域拡張法により分割された領域の境界を示す。実験の結果によりまとめた結果を以下の表2に示す。実験では、エッジ抽出のしきい値はそれぞれモジュラス最大値の7, 10, 13パーセントを利用した。

その実験では、次の結果が得られた。

- (1) 図7の(a)と(b)を比較すると、領域拡張法を利用した場合、0.5m と 1 m 解像度の画像から建物抽出の可能性はあまり変わらないことが分かった。
- (2) 1 m の画像からでも幅が 4 m 以上であれば建物の抽出が可能であるが、建物が抽出できるかどうかは建物の密度とかなり関連している。密度が高い場合(例えば間隔< 1 m), 大きな建物でも抽出できなかったり、建物が互いに接続してしまったケースなどがある。(図7の(b)のAとB地点を参照)。
- (3) 3 m の画像を利用した場合でも、密度が小さければ(例えば間隔> 5 m), 幅が 9 m より大きい建物のほとんどが抽出できた。例えば、図7の(c)のC周辺の9軒の大きな建物の全てが抽出された。また、幅が 6 m より小さい建物の抽出はほぼ不可能であることも分かった(本例では0軒であった)。

5. 結 論

近い将来、1～3メートル程度の高精度衛星画像が本格的に利用可能となる。こうした航空写真に近い衛星画像がどのような分野で利用できるのか、特に都市

における地理・環境情報がどの程度抽出できるのかが非常に注目されている。本研究では、高分解能衛星画像が都市 GIS データベースの構築・更新の分野でどのように役に立つのか、特に建物がどの程度抽出できるのかを中心として検討した。まず、高分解能衛星画像の特徴を分析した上で、二つの建物抽出手法を提案した。次に、航空写真から生成した0.5m, 1 m, 3 m 解像度のシミュレーション画像を利用して、提案した二つの建物抽出手法の有効性を実験により比較・テストした。実験のから以下の結論が得られた。

- (1) 特徴に基づく手法は0.5m 以上の解像度の画像に対して相対的に有効であるが、1 m の解像度の画像から建物の抽出に関しては半分以下の抽出率となる。また、3 m の場合は、大きな建物(幅が 9 m 程度)につてもほとんど抽出できない。一方、領域拡張法は 3 m 解像度の画像からでも大きな建物(幅が 9 m 程度)の抽出が可能である。
- (2) 特徴に基づく手法と領域拡張法の両手法により建物を抽出する場合、建物が抽出可能かどうかは解像度や建物のサイズと関係が深いだけでなく、建物の密度にもかなり依存する。また、領域拡張法は特徴に基づく手法より密度からの影響が受けやすいことも実験より分かった。
- (3) 特徴に基づく手法と領域拡張法はそれぞれ有効な条件に違いがあるため、高分解能衛星画像から建物抽出の抽出率を向上させるために、二つの手法を併用するのが有効ではないかと考えられる。例えば、建物の密度が高い場合、実験の結果に示したように特徴に基づく手法が領域拡張法より有効なので、特徴に基づく手法を適用した方がよいと思われる。また、解像度が低い場合(例えば 3 m の解像度の場合)、密度が低い大型建物(例えば幅が 9 m より大きい場合)の抽出には領域拡張法が特徴に基づく手法よりもっと有効なので、領域拡張法を適用する。

しかし、本研究で提案した方法はあくまでも建物候補が閉領域として抽出できるかどうかを検討した段階であり、ステレオマッチングから得られる高さ情報などを用いて、建物と非建物を区別し、3次元建物として抽出した場合の精度などに関しては検討しなかつ

図6 異なる解像度の衛星画像から特徴に基づく手法による建物抽出の比較

図7 異なる解像度の衛星画像から領域拡張手法による建物抽出の実験

た。今後の課題としたい。また、建物大きさや密度、ライン方向に対する傾きなどの要因が交互作用として抽出確率に及ぼす影響に関しては、より厳しく条件がコントロールされた多数実験地域を選択して実験を行えば、定量かできる。影響のより定量化を進めることが必要であれば、こうした実験も課題となる。

(受付日1998.1.12, 受理日1998.9.14)

参考文献

- 1) 史中超, 柴崎亮介, “高さ情報を利用した航空写真からの建物の自動検出手法”, 写真測量とリモートセンシング, vol. 36, no. 2, 1997, pp.38-44.

- 2) 史中超, 柴崎亮介, “ウェーブレット解析の理論とその応用(その1, その2, その3)”, 写真測量とリモートセンシング, vol. 35, no. 2-no. 4, 1996.
- 3) 史中超, 柴崎亮介, “ウェーブレット変換による画像分割とステレオマッチングを利用した航空写真からの建物の自動検出の試み”, 写真測量とリモートセンシング, vol. 34, no. 5, 1995, pp.36-44.
- 4) Mallat, S.G., 1992, Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Trans. IT, vol. 38, pp.617-643.