



航空画像を用いた都市部における地震災害後の道路閉塞状況解析

河合荘景¹⁾、佐治齊²⁾

1) 学生非会員 静岡大学大学院情報学研究科

e-mail : gs07018@s.inf.shizuoka.ac.jp

2) 正会員 静岡大学創造科学技術大学院、教授 博(理)

e-mail : saji@inf.shizuoka.ac.jp

要 約

大規模な地震災害直後に被災地において救助・支援活動を行うためには、車両の移動経路を確立することが必要となる。そのためには広域道路情報を早期に迅速に把握することが必要となる。この目的のため、撮影時に災害による影響を受けにくく、広域に渡り早期に情報を得られる航空画像を用いることは有効である。本研究では、地震災害発生後に撮影された航空画像とデジタル地図を用いて、都市部における建物倒壊による道路閉塞領域を抽出する手法を提案する。具体的には、エッジや色情報を用い、道路被害や建物倒壊が発生している場所を抽出し、それらの隣接関係を用いることにより高精度に道路閉塞状況を抽出するものである。提案手法に基づき計算機上にソフトウェアを作成して実際の航空画像を解析し、手法の有効性を示した。

キーワード： 地震、航空画像、道路閉塞、都市部

1. はじめに

大規模地震災害が生じた場合、広域にわたって建築物の倒壊が起こり大きな被害が発生する。このような状況に対し、迅速に救助活動を行うため、早期に広域に渡る被災状況の把握を行うことが重要である。この目的のため、広域における被災情報を一括して得ることができる航空画像を用いることは非常に有効である。これまでも実際に、航空画像から建物被害の目視判読を行う研究[1]、航空画像を用いて建物の倒壊状況を把握する研究[2、3]、災害後に撮影された航空画像を用いて被害建物を抽出する研究[4]、及び斜面災害地域の抽出を行う研究[5]などが行われてきた。

また、災害時には緊急のヘリコプタによる空輸も行われるが、ヘリコプタは数が制限されていること、都市部では大型ヘリの離着陸が可能な拠点が少ないなどの問題がある。そのため、災害発生直後の支援・救助活動を行うための物資や人員などは、主に車両を用いて輸送され、救急車両や物資輸送車両などの移動経路を確立することが重要となる。しかし、災害発生時には、建物の瓦礫がなだれ込むことによる道路の閉塞、陥没、及び亀裂などにより車両の通行が不可能な箇所が発生する。したがって、移動経路の確立のためには、被災地域における道路の被害状況を早期に把握することが必要となる。また、救助活動を行うためには、幹線道路の被害状況の把握と同時に、細街路の被害状況の把握も重要となる。実際の救助活動の現場では、ノード単位の通行可否情報に加えて、車両がどこまで入っていくことができるかという細かな情報も必要であり、そのためには細街路の被害状況も把握しておくことが必要となるためである。

道路閉塞に関する研究としては、防災街づくりのために、地震震度や道路幅員、建物の老朽度などを用いて種々のシミュレーションを行う研究[6][7]や、走行車情報を用いることにより災害時道路情報共有化を行う研究[8]などがなされている。また、災害後に撮影された航空画像を用い道路閉塞領域を目視で判読し街路網の機能的障害を解析する研究[9]や、道路閉塞領域自身を自動抽出する手法[10]も提案されている。解析結果を救助活動に活用するためには、航空画像からの道路閉塞領域の自動抽出による早期解析が必要となるが、後者の手法においては、車両や樹木といった道路上に存在しうる要素についての考慮がなされていないという問題がある。また、救助支援活動の初動段階において、道路閉塞の情報を有効に活用するためには、より処理時間を短縮し、迅速に情報を提供できなければならない。

本稿では、災害後に撮影された航空画像とデジタル地図を用いて、道路領域、建物領域、及び道路境界領域から災害による変化を受けた可能性の高い領域を抽出する。そして、それらの隣接関係を用いることにより、建物の倒壊によって流出した瓦礫による道路閉塞領域の自動抽出を行う方法を提案する。本提案手法は、建築物が多くデジタル地図が整備されている都市部において地震災害直後に撮影された1枚の航空画像を用い、種々の画像処理手法を適用することで、画像内の個々の画素値の変化だけでは判別できない道路閉塞の状況把握を実現するものである。

2. 提案手法

2.1 手法の概要

本手法では、航空画像とデジタル地図を用い、道路上の瓦礫や建物倒壊などをそれぞれ抽出し、それらの隣接関係を用いることで道路閉塞領域の抽出を行う。提案手法における処理の流れを図1に示す。まず航空画像とデジタル地図からエッジ抽出を行う。また、航空画像とデジタル地図の位置を合わせることで航空画像を道路領域と建物領域に分割する。さらに、道路領域と建物領域の境界を道路境界領域として抽出する。その後、道路領域、建物領域、及び道路境界領域それぞれに対してエッジや色情報などを用いた処理を適用することで、建物瓦礫領域、道路瓦礫候補領域などを抽出する。最後に、それらの領域の位置関係を用いることで道路閉塞領域の抽出を行う。

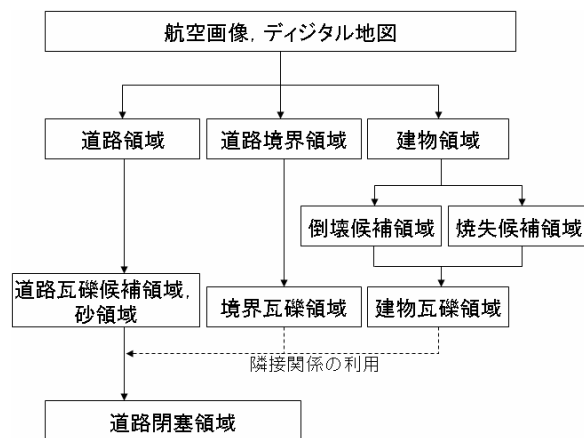


図1. 処理の流れ

2.2 エッジ抽出処理

本手法では、Kirschのオペレータ[11]を用いることで航空画像とデジタル地図からエッジの抽出を行う。さらに、エッジの強度に関する閾値処理を行うことにより、閾値以下の強度のエッジを持つ画素をエッジを持たない画素とした。ここで用いるKirschのオペレータはテンプレート型のエッジ抽出手法であり、エッジ角度は45度刻みで得られる。他のエッジ抽出を行うオペレータとしては差分型のオペレータであるPrewittのオペレータ[12]などが存在する。しかし、エッジの方向性に関する情報

は、テンプレート型のオペレータのほうが正確に抽出可能であり、本手法においては45度刻みの角度抽出で十分であるためKirschのオペレータを用いた。また、抽出したエッジには、被写体の形状とは無関係なノイズの影響によるエッジが含まれる。そのため、エッジの局所連結性を利用したノイズ除去も行う。具体的には、エッジ強度による閾値処理を行った後に残った各エッジ画素に注目し、そのエッジ角度に垂直な2方向に隣接している2画素を調べ、注目エッジ画素のエッジ角度との角度差45度以内のエッジが隣接2画素のどちらにも存在しない場合、注目エッジ画素のエッジを削除し、エッジを持たない画素とするものである。これは、ノイズ箇所であれば、隣接したエッジが異なる方向を向く可能性が高いという特徴を利用したものである。

2.3 航空画像の領域分割

航空画像とデジタル地図の位置を合わせ、地図内の情報を用いることで、航空画像を道路領域と建物領域に分割する。位置合わせには射影変換を用い、デジタル画像化された航空画像とデジタル地図の双方から4組の対応点を目視で選択することで得られた射影変換パラメータを利用する。また、この変換においての画像の補間にはバイキュービック補間を用いる。位置合わせの結果、デジタル地図の道路領域と一致した航空画像内の領域を道路領域とし、航空画像内の道路領域以外の部分を建物領域とする。さらに、図2に示したように、航空画像内で求められた道路領域と建物領域の境界に隣接する2画素幅内の領域を道路境界領域とする。

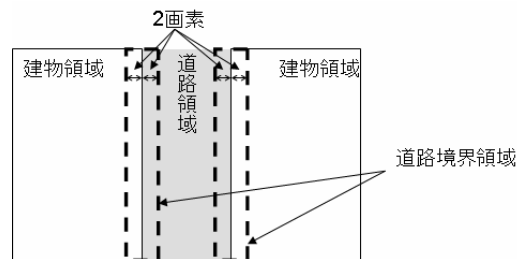


図2. 道路境界領域

2.4 建物領域からの建物瓦礫領域抽出

2.4.1 倒壊候補領域の抽出

建物の倒壊が発生している場合、その場所と周辺において瓦礫が多く存在することとなる。また、瓦礫が存在する場所においては、エッジの向きが分散するという特徴がある。逆に建物などの人工物がそのまま残存している場合には、エッジは規則的になりその向きも同じ方向に集中するという特徴がある。また、瓦礫が多く存在する領域においてはRGBの画素値の中でもRの画素値が高くなるという特徴がある。以上を踏まえ、倒壊候補領域を抽出するためには、エッジの分散と比演算を用いる。まず、各画素においてエッジ角度の分散値を求める。各画素の周辺 $2m \times 2m$ (25cm解像度画像であれば11画素 \times 11画素)の領域においてエッジ角度ヒストグラムを作成し、頻度値が1以上となる角度の出現数をエッジの分散値 $V(x, y)$ とした。なお、この周辺領域の大きさは実験的に求めた。ここで、エッジ角度ヒストグラムはエッジ角度をKirschのオペレータにもとづき8つの値に分類して作成した。次に、建物領域の各画素に対して式(1)-(3)から比演算の値 $Z(x, y)$ を求める。ここで I_R 、 I_G 、 I_B は注目画素におけるRGBそれぞれの画素値である。

以上の計算をもとに、 $V(x, y)$ と $Z(x, y)$ がともに閾値以上となる画素を抽出する。ここで、分散の閾値は4とした。これは、建物が崩れていない場合、局所領域内($2m \times 2m$ 程度)には建物の一辺またはコーナーが含まれるだけとなり、分散値(角度の出現数)は3以下となるためである。また、比演算の閾値は実験的に求めたものを用いた。ここでは、画像ごとに比演算値 $Z(x, y)$ の最大値を求め、それを8.5で割った値を閾値とした。また、倒壊が発生した場合に瓦礫はある程度広い範囲にわたって発生すると考えられるため、面積が約 $3m^2$ 以下となる小領域はノイズとして削除した。

$$Z_1(x, y) = \frac{I_R(x, y) - I_G(x, y)}{I_R(x, y) + I_G(x, y)} \quad (1)$$

$$Z_2(x, y) = \frac{I_R(x, y) - I_B(x, y)}{I_R(x, y) + I_B(x, y)} \quad (2)$$

$$Z(x, y) = \begin{cases} Z_1(x, y), & \text{if } Z_1(x, y) > Z_2(x, y) \\ Z_2(x, y), & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

2.4.2 焼失候補領域の抽出

色情報を用いた焼失候補領域の抽出を行う。まず、焼失候補領域として、黒い画素を抽出する。ここで、単純に明度の低い画素を抽出するだけでは、樹木領域も抽出してしまう。樹木領域は、全体に明度が低くだけでなく、Gの画素値がRの画素値よりも高くなるという特徴がある。そこで、RGBの画素値の合計値と、GとRの画素値の差を用いることで樹木領域を取り除いた焼失候補領域を抽出する。そのため式(4)と(5)を用いる。

$$I_G(x, y) - I_R(x, y) < \alpha \quad (4)$$

$$I_R(x, y) + I_G(x, y) + I_B(x, y) < \beta \quad (5)$$

ここで、 α と β は閾値、 I_R 、 I_G 、 I_B は注目画素におけるRGBそれぞれの画素値とする。閾値 α と β は、用いた航空画像から樹木と焼失に相当する領域を抽出し、RGBそれぞれの画素値の分布を求めることにより決定した。ここでは $\alpha=5$ 、 $\beta=150$ と設定した。この閾値については、ほぼ同じ明度や色合いの画像ならば同じ値の利用が可能となる。次に、抽出された画素を統合して得られた領域から小領域を削除する。なお、ここではオープニング処理を行うことで小領域を削除する。オープニング処理における収縮・膨張の回数は、実距離で1m程度の幅の領域が削除されるように設定する。これは、小さな陰影領域を焼失候補領域から除去するために行う。これ以上の大きさを持つ陰影領域については、倒壊していない建物が隣接している可能性が高いと考えられるため、その特徴を利用して、2.4.3において除去を行う。

2.4.3 建物瓦礫領域の抽出

倒壊候補領域と焼失候補領域を用いて、建物領域における瓦礫領域の抽出を行う。焼失候補領域として抽出された領域のうち、倒壊候補領域と隣接していない領域については、建物の焼失とは無関係に誤って抽出された領域である可能性が高い。特に、2.4.2の小領域の除去で焼失候補領域から除去されなかった大きな陰影領域については、隣接する位置に建物が倒壊せずに残っていると考えられる。そのために、焼失候補領域として抽出された各領域の輪郭線上に位置する画素についてそれぞれ周辺8近傍を探索し、そのいずれにも倒壊候補領域が存在していない領域を抽出し削除を行う。そして、残った焼失候補領域と倒壊候補領域を併せたものを建物瓦礫領域として抽出する。

2.5 道路境界領域からの境界瓦礫領域抽出

建物倒壊により道路閉塞が生じている領域では、建物の倒壊によって瓦礫が流出し、道路境界上のエッジが崩れているという特徴がある。そこで、デジタル地図のエッジを利用することで、境界領域において連続性のあるエッジが保存されているかどうかを調べ、保存されていない領域を抽出する。

そのため、まず航空画像のエッジに対して、収縮後に膨張をするオープニング処理と膨張後に収縮をするクロージング処理を適用することで、エッジの連結と短いエッジの削除を行う。このとき、オープニング処理やクロージング処理の中で行われる収縮処理や膨張処理では、それぞれの注目画素の

周囲8近傍の中から注目画素のエッジ角度に対して垂直な方向に存在する2画素のみを対象とする。エッジはエッジ強度を用いた閾値処理により1画素から4画素程度の幅になっているものが多い。そこで、もともと1または2画素幅しかないエッジ画素が収縮処理で消えてしまうことを防ぐために、収縮時の対象画素をエッジ角度に対して垂直方向に存在する2画素に限定するのである。また、同じ物体から検出された隣接するエッジは同じ角度を持っている場合が多いが、閾値処理により途切れる場合がある。それを連結させるために8近傍の画素全てに膨張させた場合、もともと異なる物体から抽出された無関係なエッジ画素同士も連結される可能性が高くなる。そこで、膨張処理の対象とする画素を注目画素のエッジ角度に対し垂直方向の2画素に限定することで、無関係なエッジ同士が連結されることを防ぎ、関連性の高いエッジのみの連結を実現するのである。

次に、建物の瓦礫が道路になだれ込んでいる可能性の高い箇所の抽出を行う。瓦礫が道路になだれ込んでおらず道路と建物の境界が保存されている場合は、境界に沿った方向のエッジが存在する。逆に、瓦礫がなだれ込んでいる場合は、境界上のエッジが保存されない。これを踏まえ、境界のエッジが保存されていない領域を抽出する。そのため、まず2.3節で行った位置合わせの結果から、道路境界領域内の座標 (x, y) の画素に対応するデジタル地図上の座標 (X, Y) を求め、 (X, Y) に最も近い位置にあるデジタル地図上のエッジ $E_d(X, Y)$ を求める。そして航空画像上の注目画素 (x, y) におけるエッジ $E_a(x, y)$ とエッジ角度の比較を行い、角度差が 0° または 180° のどちらでもなかった場合に注目画素を抽出する。また、注目画素 (x, y) がエッジを持たない場合も抽出を行う。ここでエッジを持たない画素とは、2.2節でエッジを抽出した際にエッジ強度を用いた閾値処理によって削除された画素である。以上の処理を道路境界上の各画素について行い、抽出された画素領域の統合をすることで、道路と建物の境界における境界瓦礫領域を抽出する。

2.6 道路領域からの閉塞候補領域抽出

2.6.1 白線・直線画素の抽出

道路上に存在する白線や車両は道路閉塞領域の抽出に大きな影響を与える。また、車両などの人工物は、直線的な形状を持つものが多い。そこで、道路領域から瓦礫とは無関係な白線画素と白線以外の人工物の境界と思われる直線画素の抽出を行う。図3に示したように、白線領域の両境界線上には逆方向のエッジが連続して存在する。そのため、図4(a)に示すように、まず道路領域内の各エッジ画素に注目し、そのエッジ角度と同じ方向と逆方向（すなわち白線における幅方向）を調べ、どちらかに注目エッジ画素のエッジと逆方向のエッジを持つ画素が閾値以上の数存在する画素を抽出する。次に、ここで抽出した画素に対し、図4(b)に示すように、そのエッジ角度に垂直な2方向（白線における長さ方向）をそれぞれ調べ、どちらかに注目エッジ画素のエッジと同じ方向のエッジを持つ画素が閾値以上の数存在する場合は、その画素を白線画素とする。なお、ここでの閾値は実験的に求めたものを用いた。白線の場合、注目エッジ画素のエッジ角度と同じ方向または逆方向に白線の幅分離した領域において、注目エッジ画素のエッジと逆方向のエッジを持つ画素が連続して複数存在すると考え、図4(a)の探索範囲において逆方向の角度を持つエッジ画素が3画素以上存在する場合に抽出を行った。注目エッジ画素のエッジ角度に垂直な2方向については、図4(b)の探索範囲において1画素以上存在する場合に抽出を行った。以上の探索範囲については画像の解像度に応じて決定した。解像度から画像上における白線幅の画素数を求め、注目画素からその画素数分離した範囲を探索範囲とする。なお、図4(a)と(b)に示した7画素×7画素の探索範囲は25cm解像度画像におけるものであり、解像度の異なる画像に対して本手法を適用する場合は、解像度に応じて探索範囲の拡大・縮小や閾値の設定を行う。本手法において、エッジはKirschのオペレータを用いて抽出されているので、エッジ角度は45度刻みとなるが誤差を含んでいる。そのため、その誤差を許容できるよう図4(a)と(b)に示したように幅を持たせた探索範囲の設定を行う。

次に、白線画素として抽出されなかった各エッジ画素について、そのエッジ角度と垂直な2方向について白線画素抽出と同じ範囲を探索し、両方向に、注目エッジ画素のエッジと同じ方向のエッジを持

つ画素が1画素以上存在した場合、注目エッジ画素が連続した直線の一部であると判断し、直線画素として抽出した。

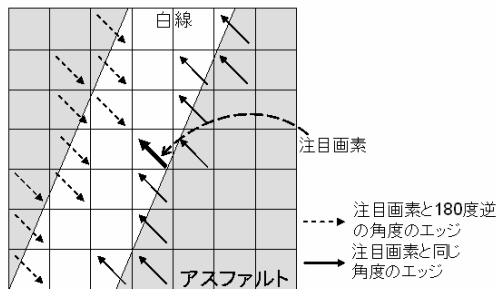
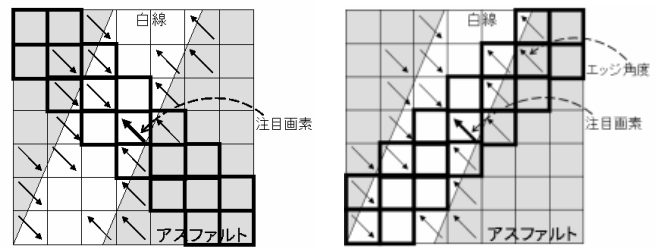


図3. 白線周辺のエッジ



(a) エッジ角度の方向 (b) エッジ角度の垂直方向

図4. 白線抽出における探索方向
(黒枠内が探索領域)

2.6.2 道路瓦礫候補領域の抽出

まず、道路領域に存在するエッジ画素のうち、白線画素と直線画素のいずれにも属さないエッジ画素を対象として瓦礫画素抽出を行う。瓦礫が多く存在する領域では、エッジ角度がばらつき分散が高くなるだけでなく、局所領域内におけるエッジの密度も高くなる。また、樹木など瓦礫とは無関係な領域ではエッジの密度が低くなる(図5)。そのため、まず注目画素 $I(x, y)$ の周辺領域におけるエッジの分散 $V(x, y)$ とエッジの密度 $D(x, y)$ を求める。ここで、エッジの分散は建物領域における倒壊候補領域の抽出に用いたものと同じものを用いる。また、エッジの密度はエッジの分散を求めた際と同じ大きさの周辺領域内に存在するエッジ画素の数とする。そして、 $V(x, y)D(x, y) > \alpha$ を満たす場合に、注目画素 $I(x, y)$ を瓦礫画素とする。 α は閾値であり、ここでは、 $V(x, y)D(x, y)$ の最大値を0.2倍したものとした。

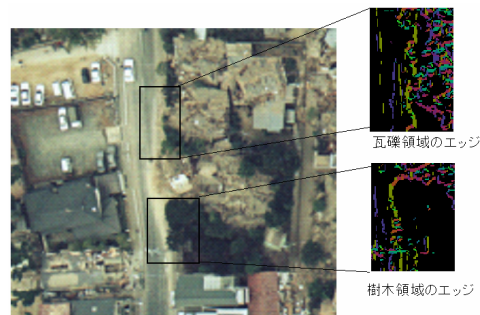


図5. 瓦礫領域周辺の特徴

その後、白線画素、直線画素、瓦礫画素のいずれでもない画素のうち周辺領域(局所領域1)内に白線、直線、及び瓦礫画素の総和が閾値以上の数存在する画素を抽出し、膨張対象画素とする。閾値は実験的に求めたものを用いた。ここでは局所領域1の面積(画素数)を0.2倍した値とした。そして、膨張対象画素、白線画素、直線画素、及び瓦礫画素のそれぞれに対し以下のように膨張処理を行う。まず、それぞれの注目画素の周辺領域(局所領域2)に存在する白線画素、直線画素、及び瓦礫画素の数をそれぞれ求める。そして最も数が多かったものに注目画素を分類する。ここで、局所領域1と局所領域2の大きさは、撮影対象の大きさを踏まえつつ実験的に求めたものを用いる。局所領域1は、エッジを抽出した際の白線のエッジの間隔をもとに大きさを決定した。例えば、25cm解像度では、白線は1画素から2画素の幅となる。そのため、エッジを抽出すると白線の幅方向の2本のエッジについては2画素から4画素程度の距離をおいて抽出される。そのため、注目画素の周辺2画素の距離、つまり周辺5画素×5画素を探索するものとした。また、局所領域2は、自動車の幅をもとに大きさを決定した。これは本手法

が自動車の通行が不可能な程度の道路閉塞の抽出を目的としているためである。例えば、25cm解像度では自動車は11画素程度の幅を持つため、周辺11画素×11画素を探索するものとした。この処理を一定回数繰り返した後、瓦礫画素となっている画素を領域統合し、オープニングとクロージングにより小領域を削除し穴埋めをすることで、道路瓦礫候補領域として抽出する。

2.6.3 道路領域からの砂領域抽出

道路領域内の画素の中で、前節で抽出した道路瓦礫候補領域、白線画素、及び直線画素のいずれにも属さない画素に対して砂領域抽出を行う。道路領域内で、白線、直線、及び瓦礫ではなく、かつRの画素値がG、Bの画素値と比較して高くなっている画素は砂が積もっている場所であると考えることができる。そこで、道路領域内の注目画素上で式(1)–(3)を用い、比演算値 $Z(x, y)$ が閾値以上となる場合に注目画素を砂画素として抽出し、さらに領域統合により砂領域を求める。なお、閾値は実験的に求めたものを用いた。ここでは、画像ごとに比演算値 $Z(x, y)$ の最大値を求め、それを8.5で割った値を閾値とした。

2.7 道路閉塞領域の抽出

道路瓦礫候補領域、砂領域、建物瓦礫領域、及び境界瓦礫領域の位置関係を用いて、道路閉塞領域の抽出を行う。まず、道路瓦礫候補領域として抽出された領域が、実際に瓦礫による道路閉塞領域であるか否かの判別を行う。道路が瓦礫によって閉塞されている場合の多くは隣接する建物が倒れている場合または完全に倒壊はしていても壁や塀などが崩れている場合である。そこで、図6に示したように道路瓦礫候補領域から建物瓦礫領域または境界瓦礫領域に隣接している領域のみを抽出し、道路閉塞領域とする。また、倒壊候補領域と境界瓦礫領域のどちらにも隣接していない場合は、誤って瓦礫候補として抽出された領域と考えられるので通行可能領域とする。

続いて、図7に示すように砂領域内の画素を道路閉塞領域に含めるか、通行可能とするかの判別を行う。砂領域に分類された画素それぞれの周囲5画素×5画素の領域に道路閉塞領域が存在していた場合、砂領域内の注目画素は通行不可能であるとし、道路閉塞領域に加えることで最終的な道路閉塞領域の決定を行う。なお、5画素×5画素という局所領域の大きさは実験的に求めたものである。

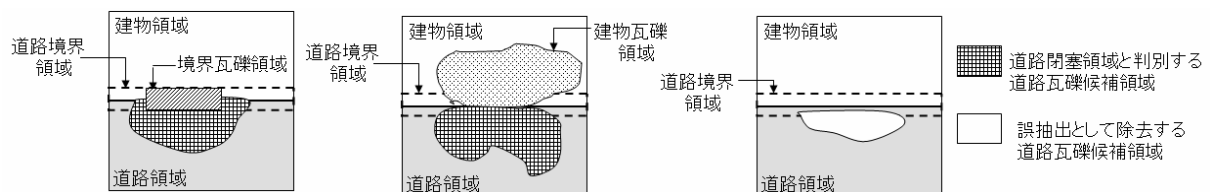


図6. 道路瓦礫候補領域の判別

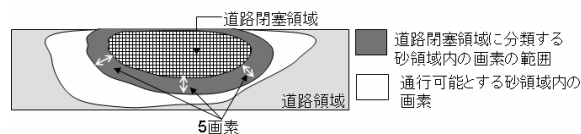


図7. 砂領域内の画素の判別

3. 実験

提案手法に基づき処理を実現するソフトウェアを作成し、実画像を用いた実験を行った。ここで用いた計算機のCPUはインテルCore2 Duo 2.66GHzで、メモリは2GByteである。航空画像としては、1995年に起きた兵庫県南部地震によって建物が倒壊し、道路被害が生じている神戸市を撮影したカラー画像(©パスコ、撮影高度600m、縮尺1/4000、撮影日時1995年1月18日14時30分前後)を、25cm解像度でRGB各8ビットのカラー画像にデジタル化したものを用いた。また、本実験ではもとの航空画像を1200画

素×1200画素(約300m×300m)の分割画像(図8、9)に分け、分割画像ごとに道路閉塞領域の抽出を行った。デジタル地図としては、神戸市の2500分の1地形図(図9、10)を用いた。本実験で用いたデジタル地図としては、道路幅員が再現され、道路領域がそれ以外の領域と分けられるものを用いた。



図8. 航空画像1



図9. 航空画像2

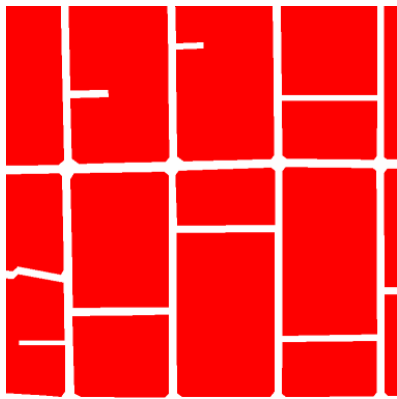


図10. デジタル地図1

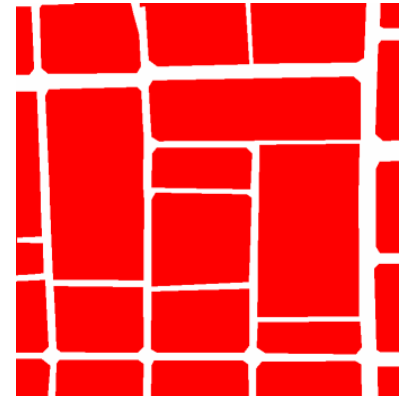


図11. デジタル地図2

図8と図9に示した画像を含め7枚の分割画像で実験を行った。図8と図10を用いて実験を行った結果を図12に示し、図9と図11を用いて実験を行った結果を図13に示す。また、目視により閉塞領域を抽出して作成した正解画像の例として、図12と図13の結果に対応する正解画像を、それぞれ図14と図15に示す。図12-15では閉塞領域を赤く塗りつぶして示した。本実験では、正解画像を正答と仮定し、提案手法で抽出した結果と比較することで精度評価を行った。また正解画像に含まれる道路閉塞領域それぞれに関して提案手法により抽出されている画素数を求め、50%以上の画素が抽出されている領域を抽出成功領域とし、正解画像中の全領域数に占める抽出成功領域数の割合を抽出率とした。また、本手法により抽出した閉塞領域のうち、正解画像中の閉塞領域に全く含まれていない領域数を誤抽出領域とし、提案手法により抽出した閉塞領域数に占める誤抽出領域数の割合を誤抽出率とした。その結果、図12に示した実験結果では抽出率は87.9%、誤抽出率は36.2%、図13に示した実験結果では抽出率は87.5%、誤抽出率は39.1%となった。また、図1に示したフロー全体での処理時間はそれぞれ11.8秒、11.2秒程度であった。なお、位置合わせにおいて対応点を目視で求める部分に関しては、ここでの処理時間に含んでいない。さらに、他の同様の5画像に対し、同様の実験を行った。計7枚の画像による実験結果を表1に示す。

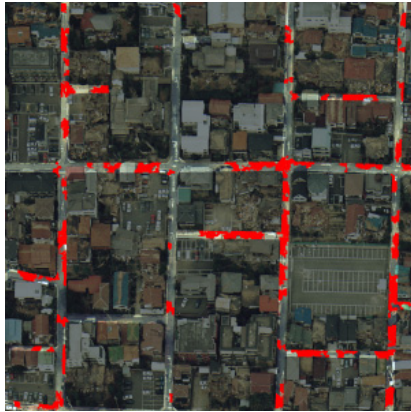


図 12. 道路閉塞領域抽出結果 1



図 13. 道路閉塞領域抽出結果 2

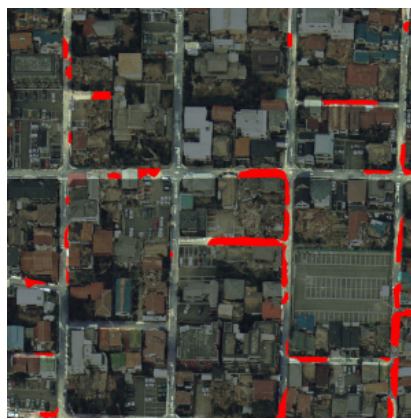


図 14. 正解画像 1



図 15. 正解画像 2

表 1. 実験結果

正解画像 領域数	抽出成功 領域数	抽出率	提案手法による抽出領域数	誤抽出領域数	誤抽出率
253	216	85.4%	472	208	44.1%

また、一例ではあるが同じ神戸市内において建物倒壊による道路被害が発生していない地域（図16、約300m×300m）を用い同様の実験を行った。その結果を図17に示す。この実験では、11秒の処理時間で、30箇所程度の領域が閉塞領域として誤抽出された。ただし、2ヶ所（図上黄枠で囲んだ領域）を除いてはいずれも道路の通行可否判定には影響のない程度の小領域であり、実用上の問題はない。問題があると考えられる2ヶ所は、斜投影された高層建築の影響を受けた箇所である。詳しくは後述する。

実験結果をまとめると、1200画素×1200画素（約300m×300m）の航空画像から約11秒の時間で、約85%以上の道路閉塞領域の抽出が可能であることを確認した。ただし、誤抽出率が40%程度であった。現状では、救助支援の状況を踏まえ、誤抽出率を下げることも抽出率を上げることを重視して閾値や局所領域の設定を行ったため、このような結果となった。（誤抽出が生じた箇所については、災害現場から他の手段での情報確認により情報を補正することができ、また、精細な地図に含まれる建物形状情報やラインセンサカメラ画像などの情報を統合利用することで、将来的には誤抽出を減らすことが可能になると考えたため、今回は抽出率の方を重視した。）



図16. 道路閉塞のない航空画像



図17. 道路閉塞のない地域での実験結果

本手法での誤抽出の主な原因の1つは、道路わきに存在している自動車である。本手法では、主にエッジを用いた処理を行っているため、建物のエッジと自動車のエッジが連続したエッジとして抽出されてしまった場合などに瓦礫として誤抽出されやすい。また、画像中の周辺部に位置し斜めに投影された高層建築も、道路を覆い隠すことで誤抽出の原因となる場合がある。倒壊していない建物により道路が隠れている場合、本手法ではその箇所を通常は通行可能と判断する。しかし、以下に示す条件下においては閉塞領域と誤抽出してしまう。その条件とは、高層建築の屋上部分が道路領域と建物領域にまたがっていること、かつその高層建築の屋上部分にエッジが検出されやすい物体が多数存在することである。図17の実験結果において問題のある2ヶ所は、いずれもこの状況に当てはまったものである。この2ヶ所以外で高層建築により道路が隠されている箇所は、通行可能領域として抽出されていることが図17から確認できる。以上の問題について、精細なデジタル地図の建物形状の情報やライセンサーで撮影された航空画像を利用することでの対応を、今後検討する予定である。

未抽出となりやすいものは、道路わきに存在する微小な瓦礫である。しかし、これらは道路の通行可能可否を判断する場合にはほとんど影響がなく、実用上の問題はないと考えられる。なお、2.4.2と2.4.3の処理において、完全に除去できなかった陰影領域が残る可能性があるが、このことが解析結果に与える影響は、今回の実験では確認されなかった。しかし、大きな面積の陰影が多く存在する航空画像を用いた場合には、領域抽出に影響を与える可能性があるため、陰影領域のみを画像からあらかじめ抽出する処理方法を今後検討する予定である。

処理時間については、およそ300m×300mの航空画像に対して11秒程度の処理時間がかかっている。この時間は、画像の大きさに比例するが、処理の並列化を行うことにより実用上支障のない時間内の処理が可能となる。

本手法では、いくつかの処理において閾値と局所領域を用いている。これらは閉塞領域の抽出率が最も妥当な結果となる値を実験的に求めて用いた。それぞれの局所領域の大きさについては、画像の解像度に比例した値を用いることで、様々な解像度の画像への適用が可能と考えられる。また、閾値については、本実験で用いた航空画像と同様の明度や色合いの航空画像を用いる場合は、同じ値を利用することが可能であり、明度や色合いが異なる場合には、それに応じた値を用いる必要がある。閾値の自動算出については今後の検討課題である。

航空画像としては、今回の実験では、全て25cm解像度のものを用いたが、解像度が25cmより小さい画像に対しては、本手法を適用することが困難になると思われる。なぜなら、本手法では道路上から道路閉塞の原因となる瓦礫を抽出する前に、道路上の白線や直線形状の人工物を抽出しているが、解像度が低くなるとこれらの判別が困難になるからである。具体的には、白線が1画素幅未満になるような解像度の画像においては、本手法を適用することは困難である。逆に高解像度の画像に適用する場合は、局所領域の大きさを変更することで適用が可能である。具体的には、2.4.1でエッジの分散を求める際に用いる局所領域、2.6.1で白線・直線を抽出する際に用いる局所領域、及び2.6.2で用いる2種

類の局所領域において、解像度に比例した局所領域の大きさの拡大を行うことで、25cm解像度よりも解像度の高い画像に対しての本手法の適用が可能となる。

デジタル地図としては、今回の実験では2500分の1地形図を利用し、道路領域とそれ以外の領域を色分けし画像化して用いた。デジタル地図には様々な種類のものが存在するが、本手法においては、道路幅員が再現されていて誤差が2m程度より小さい地図を用いる必要がある。これらは、航空画像を道路領域と建物領域に分割する処理の精度に直結するためである。

4. まとめ

本稿では、災害後に撮影された航空画像とデジタル地図を用いて、道路閉塞領域の抽出を行う手法を示した。変化した領域間の隣接関係や道路境界の崩れを抽出して利用し、1枚の航空画像から、画像内の個々の画素値の変化だけではわからない道路閉塞の状況把握を行う手法を提案した。実験により、1200画素×1200画素（約300m×300m）の航空画像から11秒程度の時間で約85%以上の道路閉塞領域の抽出が可能であることを確認した。ただし、自動車の存在や斜めに投影された高層建築の影響により、誤抽出箇所が見られた。今後は、自動車抽出については個別に手法を検討し、高層建築の影響については、デジタル地図の建物形状の利用やラインセンサカメラによる画像の利用などにより対処する予定である。なお、本手法では建物からの瓦礫の流出による道路閉塞を対象としているが、地域によっては道路自体の亀裂や避難車両による渋滞なども通行の妨げになると考えられる。そのため、今後は道路の亀裂の検知手法や渋滞情報の抽出手法も検討する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、財団法人日本交通管理技術協会のご協力をいただいた。また本研究の一部は、総務省消防庁消防防災科学技術研究推進制度の助成によるものである。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 長谷川弘忠、山崎文雄、松岡昌志：空撮ハイビジョン映像を用いた兵庫県南部地震による建物被害の目視判読、土木学会論文集、682/I-56、2001、pp. 257-265.
- 2) 石井真人、杉山岳人、阿部圭一：色情報とエッジ情報を利用した航空写真からの大局的な地震被害の把握、情報処理学会研究報告・CIVM、Vol. 2001、No. 36、2001、pp. 171-176.
- 3) 渡辺真太郎、宮島耕治、武川直樹：屋外光源モデルに基づく航空写真からの建造物の変化抽出、電気情報通信学会論文誌D-II、Vol. J83-D-II、2000、pp. 2554-2566.
- 4) 青木久、松岡昌志、山崎文雄：空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出、日本写真測量学会、Vol. 40、No. 4、2001、pp. 27-36.
- 5) 三浦弘之、翠川三郎：高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた2004年新潟中越地震での斜面崩壊地の検出、日本地震工学会論文集、第7巻、第5号、2007、pp. 1-14.
- 6) 今泉恭一、浅見泰司：震災時の道路閉塞推定に関する研究-防災街づくりのための密集住宅市街地整備方策の定量的比較分析-、日本建築学会計画系論文集、第529号、2000、pp. 225-231.
- 7) 赤倉康寛、高橋宏直、中本隆：大規模地震による街路閉塞予測シミュレーションの構築、土木学会論文集 IV 632巻、IV-45、1999、pp. 77-92.
- 8) 秦康範、小玉乃理子、鈴木猛康、末富岩雄、目黒公郎：走行車情報を用いた災害時道路情報共有化に関する研究、土木工学会論文集、vol. 29、2007、pp. 801-809.
- 9) 家田仁、上西周子、猪股隆行、鈴木忠徳：阪神・淡路大震災における「街路閉塞現象」に着目し街路網の機能的障害とその影響、土木学会論文集 IV、576巻、IV-37、1997、pp. 69-82.
- 10) 藤山忠弘、佐治斉：航空画像を用いた道路閉塞領域の抽出、第5回ITSシンポジウム2006 Proceedings、2006、pp. 229-235.

- 11) R. Kirsch : Computer determination of the constituent structure of biological images, *Comput. Biomed. Res.*, vol. 4, 1971, pp. 315-328.
- 12) J. M. S. Prewitt : Object enhancement and extraction, *Picture Processing and Psychopictorics*, New York : Academic Press, 1970, pp. 75-149.

(受理 : 2008年5月23日)
(掲載決定 : 2008年10月29日)

Analysis of Road Blockage in Urban Area after Earthquake Disaster Using Aerial Images

KAWAI Shokei ¹⁾ and SAJI Hitoshi ²⁾

1) Graduate School of Informatics, Shizuoka University.

2) Member, Professor, Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, Dr. Sci.

ABSTRACT

After a large-scale earthquake disaster, we must be able to determine the routes of vehicles for rescue operations. For this purpose, we must rapidly collect road information at an early stage over a wide area. To achieve this purpose, aerial images will be useful, because they enable us to rapidly collect information over a wide area and are unaffected by the disaster. We propose a method of extracting road blockage areas in an urban area using aerial images obtained after an earthquake disaster and a digital map. In this method, using edge and color information, we extract damaged areas of roads and areas of collapsed buildings. Then, we correctly extract road blockage areas using the positional relations between the damaged areas of roads and the areas of collapsed buildings. We developed software on the computer, based on the proposed method, and we analyzed actual aerial images and evaluated the effectiveness of our method.

Key Words: Earthquake, Aerial Image, Road Blockage, Urban Area