

最近の地震災害の空撮画像を用いた 建物被害地域の自動抽出の試み

三富 創¹・松岡 昌志²・山崎 文雄³

¹正会員 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市福井三木山2465-1)

E-mail: mitomi@edm.bosai.go.jp

²博士 (工学) 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (同 上)

³正会員 工博 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター (同 上)

1999年トルコ・コジャエリ地震, 1999年台湾・集集地震, 2001年インド・グジャラート地震の後に撮影された空撮映像の静止画像を用いて建物被害地域の自動抽出を試みた。本研究で適用するマルチレベルスライスは倒壊建物を色相, 彩度, 明度, エッジ強度, エッジ強度の分散, エッジ方向の最頻度で特徴づけて閾値を設定し, これらの閾値の全てを満たす画素を被害建物とみなすものである。その後テクスチャ解析を行い, 建物被害の表現を画素レベルから建物1棟レベルに変換した。建物被害の特徴はそれぞれの地震災害によって異なることから, 他の地震災害画像によって設定された閾値を用いるよりも, 対象とする地震災害ごとに閾値を設定した方が実際の建物被害分布に近い結果が得られることがわかった。

Key Words : *automated detection, building damage, the 1999 Kocaeli (Turkey) earthquake, the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, the 2001 Gujarat (India) earthquake*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では地震発生直後の国や自治体の初期対応の遅れが指摘された。この原因の一つとして発災直後の被害状況がほとんど得られなかったことが挙げられる。国や自治体などが整備を進めているリアルタイム地震防災システムでは, あらかじめ準備した地震計ネットワークによる地震動モニタリングと地盤情報や都市基盤情報等のデータベースを有する地理情報システム(GIS)を組み合わせて早期被害推定が行われる^{1), 2)}。しかし, この推定結果はあくまで推定であって, 高い精度を期待することは難しい。これに対して航空機や人工衛星などのプラットフォームによるリモートセンシングは, 同一時刻の広範な情報を取得することができることから, 災害把握のための高度利用が期待されている。例えば建設省(現国土交通省)は, 平成11年度から開始した総合技術開発プロジェクトの中で, 土木施設管理だけでなく災害状況把握のためのGISや高解像度人工衛星画像・空撮画像を用いたリモートセンシング技術の高度利用について検討を進めている^{3), 4)}。また, 自治省(現総務省)消防庁は, 消防防災ヘリコプターから取得される映像の自動解析処理とGISと

の併用により, 被害状況の定量的把握を含めた緊急支援情報システムの構築に着手している⁵⁾。

火山災害, 土砂災害, 洪水, 林野火災などの自然災害や重油流出などの特殊災害については, 現在利用可能な地球観測衛星の地上解像度で状況把握が可能であることから, リモートセンシングは今までもその役割を果たしてきている^{6) - 8)}。一方, 地震災害に関しては, 発生頻度が低いことなどの理由で適用事例が少なかったが, とくに兵庫県南部地震以降, 人工衛星画像を用いた地震被害検出^{9) - 12)}, 航空機搭載マルチスペクトルスキャナによって取得された画像による液状化と延焼地域の把握¹³⁾, 断層やリニアメントの検出¹⁴⁾, 地震被害の航空写真判読¹⁵⁾等の様々な調査・研究が行われ, リモートセンシング技術の地震災害への適用性が検討された。その中で長谷川ら¹⁶⁾は地震の10日後に撮影されたNHKハイビジョン映像を用いて, 小川・山崎¹⁷⁾は地震直後から4日後までに撮影された航空写真を用いて, 目視による建物1棟レベルでの被害判読を行った。その結果, 大きな被害を受けた木造建物の8割以上は判読可能であることを示している。しかし目視判読には時間を要するため, 画像取得の即時性を有効に生かすことができない。そこで青木ら¹⁸⁾は災害後に取得され



(a) トルコ・ギョルジュク



(b) 台湾・中寮



(c) インド・パチャウ

図-1 空撮画像の例

た空撮画像の色彩情報とエッジ情報を用いて、地震による建物被害の自動抽出を試みた。推定した建物被害分布は地上調査や目視判読の結果と調和的であった。なお、この研究で使用した空撮画像は、ヘリコプターから斜めに撮影したNHK空撮ハイビジョン画像と、航空機から鉛直下方に向けて撮影した航空写真であり、デジタル化後の地上解像度は前者が9cm~17cm/pixel、後者が23cm/pixelであった。

このような空撮映像を用いた画像処理による被害抽出技術は、前述の緊急支援情報システムの構築・発展につながる要素技術である。また航空写真に迫る地上解像度を有する人工衛星IKONOSの画像の供

用が1999年末から開始されたことをはじめ¹⁹⁾、2001年打ち上げ予定のQuickBirdやOrbView、2003年打ち上げ予定の陸域観測技術衛星ALOSなど、今後は地球観測衛星の地上解像度の向上、高スペクトル化、多頻度観測が進むものと思われる²⁰⁾。近い将来、これらの高解像度衛星による画像を用いて、このような建物被害の自動抽出方法から地震被害を推定することも可能と思われる。そこで本研究では、1999年トルコ・コジャエリ地震、1999年台湾・集集地震、2001年インド・グジャラート地震の空撮画像に、青木ら¹⁸⁾が提案した建物被害の自動抽出方法を適用するとともに、その実用性について考察する。

2. 空撮画像

(1) 1999年トルコ・コジャエリ地震

1999年8月17日、トルコ西部でトルコ・コジャエリ地震(以下「トルコ地震」)が発生した。(社)地盤工学会は地震発生から2~3週間後に被災地の調査を実施し²¹⁾、その中でデジタルビデオカメラを用いてヘリコプターから被災地の状況を撮影した。本研究では、建物の被害が著しかったギョルジュク(Golcuk)およびアダバザール(Adapazari)の画像を用いた。ギョルジュクの空撮画像を図-1(a)に示す。撮影の目的が被災状況の概略把握調査であったことから、飛行高度、撮影角度は一定でなく、地上解像度は画像により異なる。本研究で使用した画像の地上解像度は、いずれも約50cm/pixelであった。

(2) 1999年台湾・集集地震

1999年9月21日、台湾中部で台湾・集集地震(以下「台湾地震」)が発生した。NHKは地震発生から2日後(9月23日)と4日後(9月25日)、ヘリコプター搭載ハイビジョン空撮システムにより被災地の状況を撮影した。撮影の主たる目的は報道に使用する被害映像を収集することであったため、飛行高度、撮影角度は一定していなかった。ヘリコプターの飛行ルートは9月23日が大坑~大里~霧峰郷~草屯~南投市~集集、9月25日が中寮~中興新村~台中であった。本研究ではその中から建物被害が著しかった中寮(Chungliao)と集集(Chi-Chi)の画像を用いた。中寮の空撮画像を図-1(b)に示す。この画像の地上解像度は約5~10cm/pixelであった。

(3) 2001年インド・グジャラート地震

2001年1月26日、インド西部を震源とするインド・グジャラート地震(以下「インド地震」)が発生

し、パキスタンとの国境に近いグジャラート州は人的・物的に甚大な被害を被った。地震防災フロンティア研究センターとインド工科大学は合同で2月10日から15日まで被災調査を実施した²²⁾。その間の2月11日、グジャラート州における主な都市の被災状況を小型飛行機からデジタルビデオカメラで撮影した。グジャラート州最大の都市であるアーマダーバード(Ahmedabad)を出発してガンディーダム(Gandhi Dham)～アンジャール(Anjar)を經由し約400km西方のブージ(Bhuj)へ向かった後、そこから南東のラージコート(Rajkot)で給油し、ブージからバチャウ(Bhachau)を經由してアーマダーバードに戻った。本研究では、建物の被害が著しかったアンジャールとバチャウおよび被害が比較的少なかったブージの新市街における空撮ビデオ画像を使用した。アンジャールの画像は地上の様子をズームアップして撮影しているため10cm/pixel程度の地上解像度を有するが、バチャウとブージの空撮画像は約50cm/pixelであった。バチャウの空撮画像を図-1(c)に示す。

3. 建物被害の抽出方法

(1) 色彩

一般にデジタルカラー画像の表示や保存にはRGB表色系が用いられている。カラーテレビジョンの受像機は、赤、緑、青に発光する3種類の蛍光体によって色を作り出している。日本やアメリカで用いられているNTSC(National Television System Committee)方式では、この蛍光体が発する3原色の色度を規定している²³⁾。NTSC方式によるカラーテレビジョン映像では、明るいところではR, G, Bがいずれも大きくなることが多い。つまりR, G, Bは一般に独立ではなく互いに強い相関がある²³⁾。

一方、人の感覚になじむといわれる顕色系では、色をできるだけ定量的に表現するために、色の種類を表す色相(Hue)、色の濃さを表す彩度(Saturation)、明いか暗いかの指標である明度(Intensity)の3要素が扱われる。これらは互いに独立な色要素として規定されていることから、被害抽出にあたりRGBよりも適切な色情報であると考えられる。しかしR, G, Bのそれぞれの値に対する色相、彩度、明度との関係が明らかでない。そこで青木ら¹⁸⁾は、NTSC方式のカラーテレビジョンの映像伝送に用いられる信号変換の方法を用いて、表色系RGBを顕色系HSIに変換した²⁴⁾。この方法は色相H、彩度S、明度Iの座標のとり方に図-2で表される図形を仮定したものである。信号の伝送の際は、以下に示すようにRGB映像信号

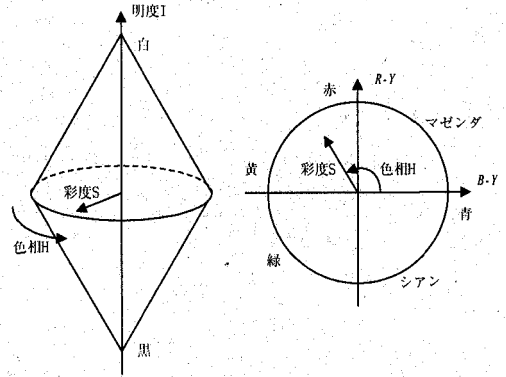


図-2 NTSC方式の色情報RGBをHSIに変換する際に仮定される色立体と色相環²⁴⁾

を輝度信号Yと色差信号C₁, C₂に分解して伝送する。

$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B \quad (1)$$

$$C_1 = R - Y = 0.7R - 0.59G - 0.11B \quad (2)$$

$$C_2 = B - Y = -0.3R - 0.59G + 0.89B \quad (3)$$

ここで、輝度信号Yは明度Iを表す。色相Hは色の種類を円で表した色相環で表されるものであり、色差信号C₂を基準とした軸からどのくらい回転しているかを表す。色相環の0度はおおよそ青紫、90度は桃から赤、180度は黄緑、270度は緑青に相当する。彩度Sは軸の原点、つまり色相環がつくる円の中心からどのくらい離れているかを表し、円の中心に近いと無彩色、円の中心から遠いと有彩色となる。すなわち、これら3つの指標は、以下の式で定義される。

$$I = Y \quad (4)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (5)$$

$$S = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad (6)$$

既往の研究¹⁸⁾では、前処理として画像全体の色調補正を98%の線形濃度変換により実施した。この方法は、画素数が多い順に輝度値を並べ、累積画素数が画像全体の98%に達したときの輝度値最大と最小を8ビット(0から255の整数値)に振り分ける方法である。これにより、画像全体の色調をバランスよく表示することができる。次に地物への太陽光の当たり方の影響を除去するため、上述の輝度信号Yすなわち明度で各R, G, Bの値を除する比演算処理を施し

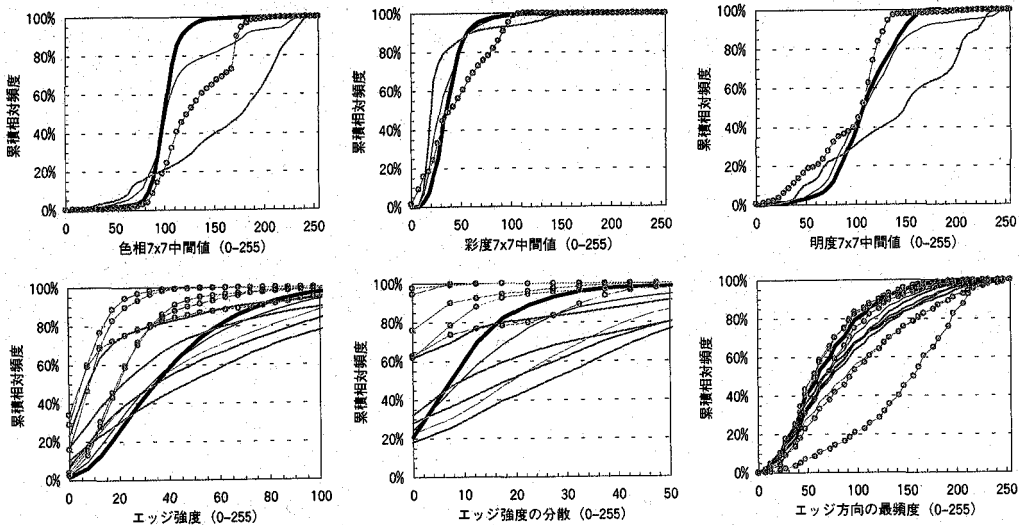


図-3 兵庫県南部地震の空撮画像から設定したトレーニングデータの各指標に対する累積相対頻度分布¹⁸⁾。黒太線：倒壊建物，黒線：全壊建物，灰線：無被害建物，○付き灰線：その他（建物以外・グラウンド等）

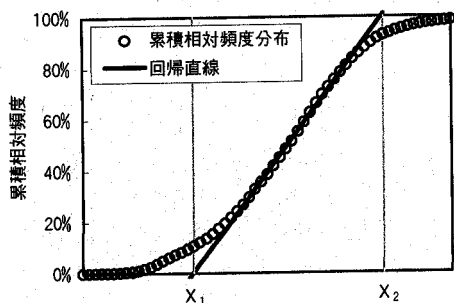


図-4 閾値の決め方の模式図。倒壊建物の累積 20% から 80% のデータで求めた回帰直線が累積 0% と 100% で交わる X_1 から X_2 を閾値とした。

た後、色差信号 C_1 、 C_2 を介して色相、彩度を求めた。なお色相、彩度、明度の値には、近接画素の輝度値変化が比較的緩やかなことを考慮した 7×7 画素の領域において平均値、中間値、最頻度を検討した結果、中間値が被害建物を特徴づけるものとして最適であると確認した上で、 7×7 ウィンドウにおける中間値を採用した。これらの特徴を 8 ビットの画像として表し、被害建物に特徴的な輝度値の範囲を閾値とすることによって、被害建物の抽出を試みた。具体的には被害の地上調査の結果を参考にして、倒壊建物、全壊建物、無被害建物、その他の画像対象物の中からトレーニングデータを設定し、色相、彩度、明度の 7×7 中間値における各トレーニングデータの累積相対頻度分布を図-3 のように描く。ここで、全壊建

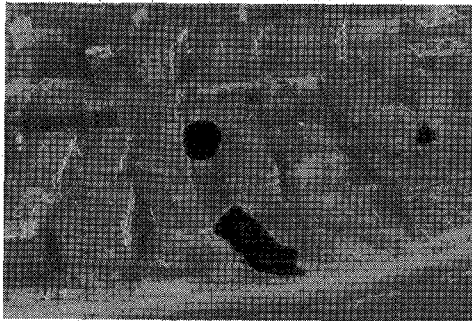
物の累積曲線の傾きを直線近似したとき、この近似線が累積 0% と 100% を横切る輝度値の範囲を被害建物が有する閾値と定める。閾値設定の模式図を図-4 に示す。兵庫県南部地震における西宮市 1 地区の空撮画像の色相、彩度、明度の 7×7 中間値画像から得た閾値を表-1 に示す。この操作により、色相 60~140、彩度 10~70、明度 60~160 が閾値となった¹⁸⁾。これらの閾値を組み合わせたマルチレベルスライス法により倒壊建物と全壊建物が分布する地域を抽出できたが、それとあわせて非木造建物の屋上部、建物輪郭部、学校グラウンド、鉄道の軌道などの一部が建物被害として誤って抽出されることがわかった。

(2) エッジ

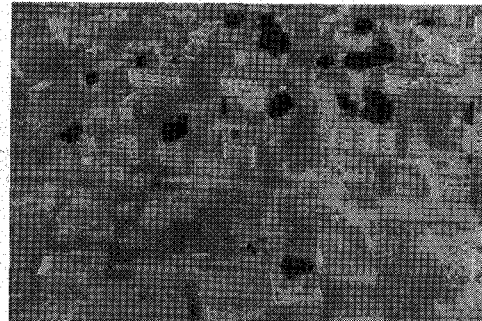
エッジとは画像を特徴づける線や輪郭の要素であり、近接画素の輝度値変化を表す。エッジ強度は、テンプレートなどで表されるエッジ検出フィルタと画素の輝度値の局所積和演算から求まる微分値である。ここでは既往の研究¹⁸⁾にならい、Prewitt の 3×3 テンプレート型エッジ検出オペレーター²⁵⁾ を 7×7 の領域に拡張した。これは、テレビジョン映像では NTSC 方式で規定された色しか表現できない、例えば鮮やかな青から緑が表示できないといった表現色の制約があるため、近接画素の輝度値変化が比較的緩やかになることを考慮したものである。なお、このオペレーターは、注目画素からみて 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度、225 度、270 度、315 度の 8 方向についてエッジを検討できる。そこで各方向のテン

表-1 各地震災害において建物被害を特徴づける指標の閾値一覧

指標	兵庫県南部	トルコ	台湾	インド
色相	60 - 140	74 - 148 192 - 230	75 - 100	60 - 160
彩度	10 - 70	13 - 73	20 - 90	5 - 35
明度	60 - 160	57 - 153	60 - 130	60 - 165
エッジ強度	25 - 110	4 - 60	0 - 60	20 - 70
エッジ強度の分散	0 - 30	0 - 16	0 - 15	3 - 20
エッジ方向の最頻度	0 - 128	8 - 113	10 - 130	5 - 140



(a) ギョルジュク



(b) アダバザール

図-5 トルコ地震の空撮画像に対して兵庫県南部地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果。テクスチャ解析の際、(a)ギョルジュクでは画像上部の57x57画素から下部の83x83画素まで、(b)アダバザールでは画像上部の31x31画素から下部の57x57画素までウィンドウを線形的に変化させた。

プレートを用いてエッジ強度を計算し、最も大きい値を注目画素のエッジ強度の値としている。

エッジ強度の分散は、エッジ領域が集中して分布するか否かを表す。つまり輝度値が変化する領域のコントラストを表す。したがって無被害建物の輪郭のように明瞭なエッジ領域が現れるところでは大きな値を有する傾向がある。

先に述べたように、Prewittのテンプレート型オペレーターは線要素や輪郭などのエッジ領域の方向性を考慮できる。したがって、エッジ強度算出時に強度値を採用したエッジの方向を控えておけば、任意領域においてどの方向のエッジが卓越するかを把握することができる。ここでは、これらのエッジ要素画像を色彩画像と同じように8ビットの画像として表し、被害建物に特徴的な輝度値の範囲を閾値として被害建物の抽出を行った。

エッジ強度においても色彩情報と同様に、被害建物の閾値をトレーニングデータが示す累積相対頻度分布の傾きより得た。このような操作により、兵庫県南部地震における西宮市1地区の空撮画像に対してエッジ強度25~110、エッジ強度の分散0~30、エッジ方向の最頻度0~128の閾値を得た¹⁸⁾。これによ

り、色彩情報で被害建物と分離できなかった学校グラウンド、鉄道の軌道、非木造建物の建物輪郭部などを被害建物と区別できるようになった。図-3と表-1にエッジ強度、エッジ強度の分散、エッジ方向の最頻度における各トレーニングデータの累積相対頻度分布と閾値の範囲をそれぞれ示す。

4. 兵庫県南部地震の空撮画像に基づく閾値の他の地震災害への適用

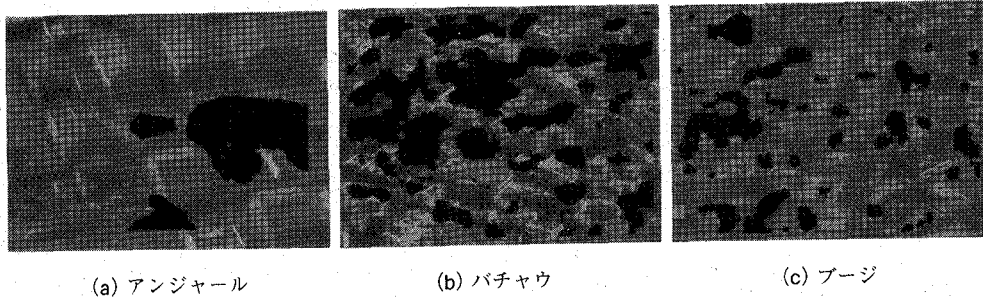
表-1左欄に示した兵庫県南部地震の空撮画像による閾値を他の地震災害画像に適用し、建物被害の抽出を試みた。その際、画素レベルの被害抽出結果を建物1棟サイズの表現に置き換えるため、建物倒壊領域か否かを判断するためのテクスチャ解析を行った。具体的には、建物1棟を矩形ウィンドウで近似し、このウィンドウ内における抽出画素の割合(Rpx)が20%以上の場合、矩形ウィンドウの中心画素を被害とみなした。このようなテクスチャ解析の結果を、トルコ地震について図-5、台湾地震について図-6、インド地震について図-7にそれぞれ示す。



(a) 中寮

(b) 集集

図-6 台湾地震の空撮画像に対して、兵庫県南部地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果。テクスチャ解析の際、(a)中寮、(b)集集ともに画像全体にわたって83x83画素のウィンドウを用いた。



(a) アンジャール

(b) パチャウ

(c) ブージ

図-7 インド地震の空撮画像に対して、兵庫県南部地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果。テクスチャ解析の際、画像全体にわたって(a)アンジャールは83x83画素、(b)パチャウと(c)ブージは31x31画素のウィンドウを用いた。

壊滅的な被害を受けたインド地震のアンジャールとパチャウでは建物被害地域をとらえることができたが、それ以外の画像では実際の被害状況を説明するような結果は得られなかった。とくにトルコ・アダバザールとインド・ブージでは、倒壊建物とは関係のない空地や無被害建物の屋根などを誤って抽出した。この理由としては、空撮映像の撮影条件や気候条件が一定でないこと、建築環境が地域によって異なることなどが考えられる。したがって、建物被害抽出のための色彩やエッジなどの閾値は、ほぼ同様の建築環境や被害パターンごとに設定する必要があるものと思われる。

5. 地震災害ごとの画像に基づく建物被害地域の抽出

(1) トレーニングデータと閾値の設定

前章の結果を受け、色相、彩度、明度、エッジ強度、エッジ強度の分散、エッジ方向の最頻度で表される6指標の閾値を各地震災害画像ごとに設定することとした。トルコ地震の場合には、ギョルジュクの

空撮画像から完全に瓦礫化した建物(C1, C2), 外見上建物の形状が残っており無被害にみえる建物(N1, N2, N3), 道路(R1)のトレーニングデータを図-8(a)のように選び、図-9に示す累積相対頻度分布を描いた。台湾地震の場合は、中寮の空撮画像から完全に瓦礫化した倒壊建物(C1, C2, C3), 被害建物(D1), 外見上建物の形状が残っており無被害にみえる建物(N1, N2, N3), 植生(V1)をトレーニングデータとして図-8(b)のように選び、図-10に示す累積相対頻度分布を描いた。インド地震の場合は、アンジャールの空撮画像から完全に瓦礫化した倒壊建物(C1, C2, C3, C4), 被害建物(D1), 無被害建物(N1, N2), 道路などのその他の対象物(R1)のトレーニングデータを図-8(c)のように選び、図-11に示す累積相対頻度分布を描いた。被害建物の特徴づける各6指標の閾値は、倒壊建物(C)のトレーニングデータが示す累積相対頻度分布を、累積20%から80%の間のデータで直線近似したときの近似直線が累積0%と100%を横切る範囲とした。トルコ地震の場合、倒壊建物のトレーニングデータC1とC2の色相画像において、累積相対頻度分布の傾向が明らかに異なる。C1は90付近(赤みの橙), C2は210付近(緑青)で

特徴的なピークをもつ。そこでトルコ地震の色相の閾値はC1の累積20~40%、C2の累積20~80%のデータで直線近似したときの累積0%と100%を横切る74~148(赤・黄)と192~230(緑・青)の2区間とした。

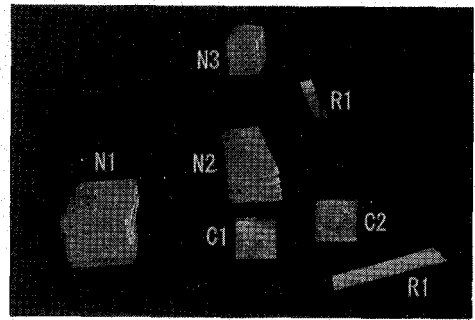
以上の検討をもとに各地震災害の画像から設定した閾値条件を表-1に示す。色相においてはトルコ地震で2種類設定されることと台湾地震の閾値帯が狭いことが特徴的である。またインド地震の彩度は、兵庫県南部地震を含めた他の3つの地震災害画像と比べて小さく、インド地震における倒壊建物はとりわけ無色彩的な傾向を呈すことがわかる。さらに、兵庫県南部地震の画像においては倒壊建物のエッジ強度に100を越える値までの範囲を閾値としているが、トルコ地震、台湾地震、インド地震においては閾値の上限が60~70である。このように色相、彩度、明度、エッジ強度、エッジ強度の分散、エッジ方向の最頻度が表す倒壊建物の特徴は、地震災害画像ごとに異なることがわかった。

(2) 建物被害を構成する画素の抽出

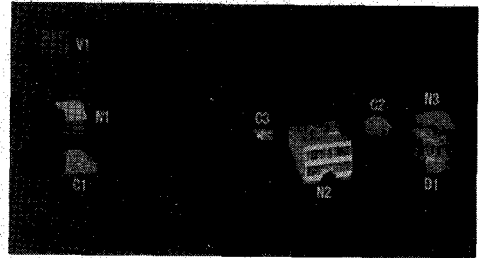
表-1の閾値を色相、彩度、明度、エッジ強度、エッジ強度の分散、エッジ方向の最頻度の順で組み合わせ、トレーニングデータを選択した画像から被害とみなされる画素を抽出する。トレーニングデータを構成する全画素数に対し、抽出された画素がどれくらい含まれるかを画素抽出率と呼ぶことにする。ここではトレーニングデータを選定したトルコ地震、台湾地震、インド地震の各地震災害画像に対し、画像ごとに設定した閾値の画素抽出効果について考察する。閾値条件を重ねたときの画素抽出率の変化を図-12に示す。

トルコ地震・ギョルジュクの場合、色相では各トレーニングデータの多くの画素が抽出されるため、被害とそれ以外の区別はできない。無被害建物は彩度、その他・道路は明度の条件により画素抽出率が大きく低下し、倒壊建物との区別が容易になった。いずれのトレーニングデータにおいても、閾値条件を重ね合わせるにつれて画素抽出率が下がった。最終的には倒壊建物のC1で36.4%、C2で45.5%、無被害建物で13.9%、その他・道路で2.4%となった。抽出画素の分布をみると、トレーニングデータC1、C2に代表される瓦礫の多くは抽出されたが、それとともに無被害建物の外壁を構成する画素も抽出された。これは無被害建物の中でも、とくに建物外壁が示す6指標の値が倒壊建物C2に類似していることによるものである。

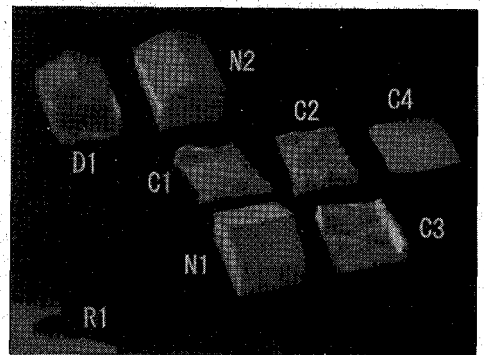
台湾地震・中寮の画像の場合、色相による区分がきわめて明瞭である。つまり倒壊建物の画素抽出率



(a) トルコ・ギョルジュク



(b) 台湾・中寮



(c) インド・アンジャール

図-8 本研究で選択したトレーニングデータ

は80%であるのに対し、それ以外のトレーニングデータではすでに25%以下の画素抽出率を呈した。その他・植生に至っては、建物とは明確に色相が異なるため、色相の閾値条件を用いた段階ですでに画素抽出率0.0%となった。その後はエッジ強度の閾値条件を重ねた時点で倒壊建物の抽出率が20%程度低下するものの、それ以外では大きな変化はなく、最終的に倒壊建物32.8%、被害建物5.7%、無被害建物1.5%、その他・植生0.0%となった。

インド地震・アンジャールの画像の場合、色相で建物の形状が残る被害建物、彩度で無被害建物、エッジ強度でその他・道路の画素抽出率が大きく低下

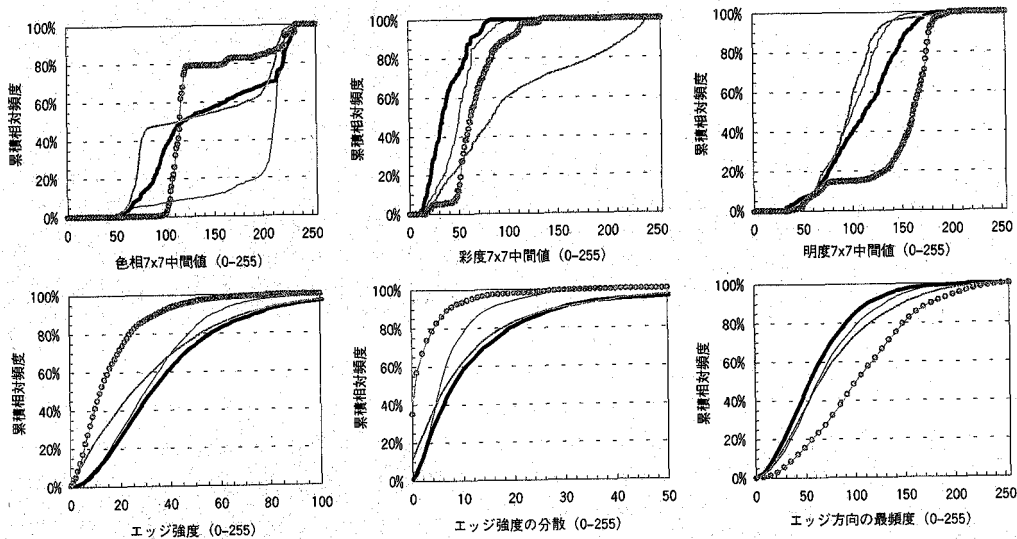


図-9 トルコ地震・ギョルジュクの画像から設定したトレーニングデータの各指標に対する累積相対頻度分布。黒太線：倒壊建物 1(C1), 黒線：倒壊建物 2(C2), 灰線：無被害建物(N), ○付き灰線：その他・道路

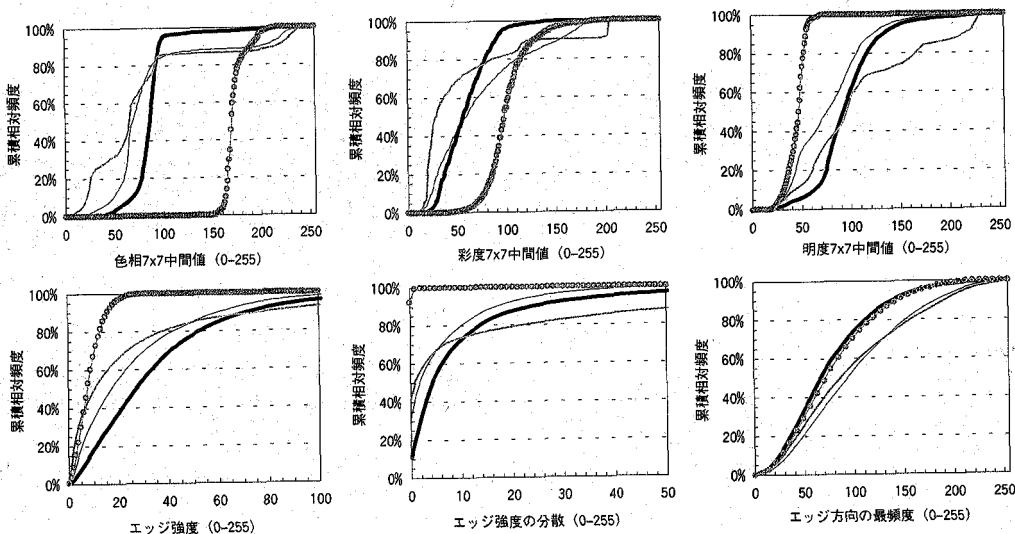


図-10 台湾地震・中寮の画像から設定したトレーニングデータの各指標に対する累積相対頻度分布。黒太線：倒壊建物(C), 黒線：被害建物(D), 灰線：無被害建物(N), ○付き灰線：その他・植生

する。倒壊建物もエッジ強度の段階で25%以上低下するが依然36.2%の画素を抽出しており、他3種類のトレーニングデータとは20%以上の差がある。エッジ方向の最頻度までの閾値条件を重ね合わせた結果、倒壊建物22.1%、被害建物3.0%、無被害建物2.8%、その他・道路1.7%となり、倒壊建物とそれ以外の差別化をある程度達成することができた。

以上の検討より、トルコ地震では彩度と明度、台湾地震では色相、インド地震では色相、彩度、明度、

エッジ強度が倒壊建物とそれ以外の画素抽出率の差を広げる主な要因となることがわかった。つまり倒壊建物とそれ以外を識別する主な指標は色彩情報であり、次いでエッジ強度が貢献する。それに対し、倒壊建物を構成する画素の抽出に際して、エッジ強度の分散やエッジ方向の最頻度の効果は小さい。しかし、これらのエッジ要素を用いることによって無被害建物の輪郭部や一定方向へ延びる道路の一部などの画素抽出が低減され、倒壊建物以外のトレーニ

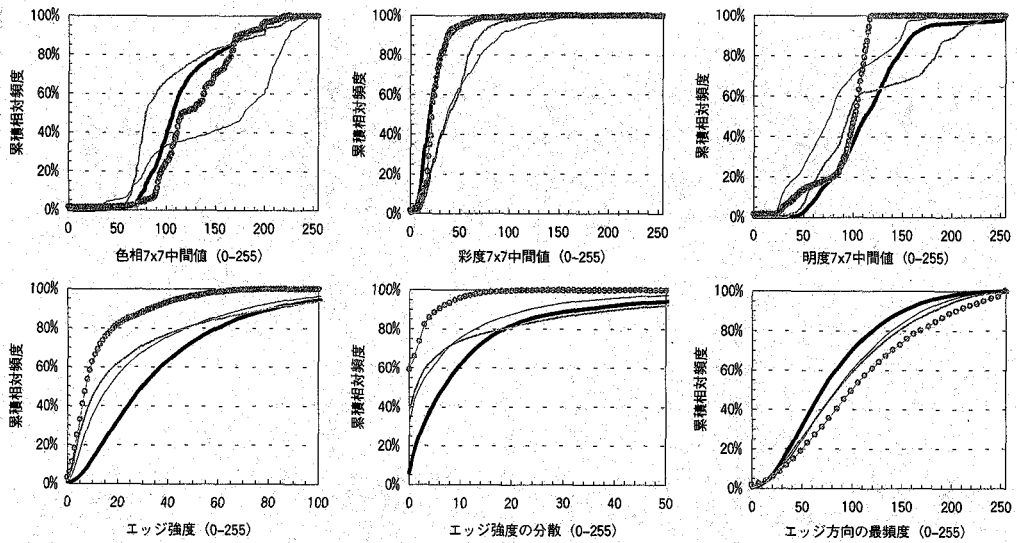


図-11 インド地震・アンジャールの画像から設定したトレーニングデータの各指標に対する累積相対頻度分布。黒太線：倒壊建物(C)，黒線：被害建物(D)，灰線：無被害建物(N)，○付き灰線：その他・道路

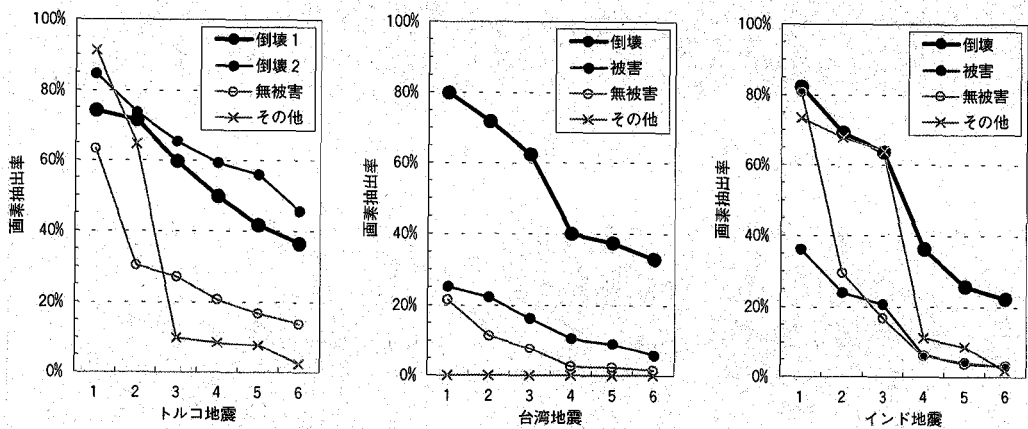


図-12 地震災害画像ごとに設定した閾値を用いた場合の画素抽出率の変化。1=色相，2=1+彩度，3=2+明度，4=3+エッジ強度，5=4+エッジ強度の分散，6=5+エッジ方向の最頻度。

ングデータの画素抽出率が0%に近づくことから、これらの要素は倒壊建物以外のものを誤って抽出する危険性を弱める効果をもつといえる。

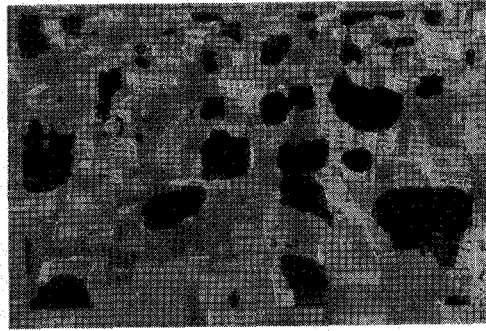
(3) 建物被害地域の推定

表-1に示したトルコ地震，台湾地震，インド地震の各閾値を用いて再度 $R_{px}20\%$ のテクスチャ解析を行い，画像ごとに建物被害領域を推定した。トルコ地震についての結果は図-13，台湾地震については図-14，インド地震については図-15にそれぞれ示す。地震災害画像ごとに設定した閾値を用いることで，トルコ地震の倒壊建物C2が抽出できるようになっ

た。また，トルコ地震と台湾地震の倒壊建物の画素抽出率が約10%高くなったことから，実際の被害状況を説明する建物倒壊地域の推定結果を得ることができた。さらに，インド・プージの画像では，図-7でみられた空地の誤抽出がなくなり，建物の大きな被害が少ないという実際の状況に近い結果を得ることができた。つまり，異なる画像であっても，同じような建築環境，撮影条件，被害の様相を持っていれば(すなわち，同じ地震災害について同じ条件で撮影した画像についていえることだが)，共通の閾値を用いて，建物倒壊地域を忠実に抽出できることがわかった。

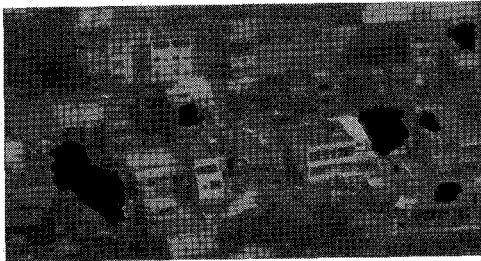


(a) ギョルジュク



(b) アダバザール

図-13 トルコ地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果

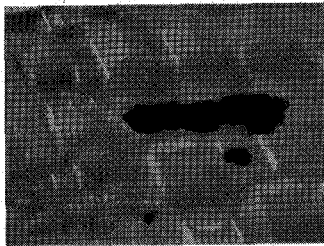


(a) 中 寮

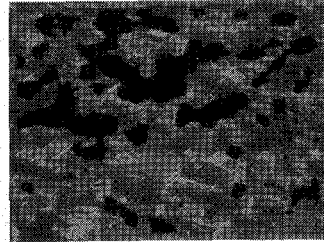


(b) 集 集

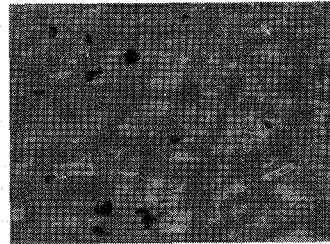
図-14 台湾地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果



(a) アンジャール



(b) パチャウ



(c) ブージ

図-15 インド地震の閾値を用いた場合の建物被害地域の推定結果

6. 空撮画像を用いた建物被害抽出方法の実用に関する考察

ヘリコプターや航空機をプラットフォームとしたリモートセンシングは、即時性と取得画像の解像度に優れているため、被災状況のモニタリングに適した方法であると考えられる。実被害情報は取得画像の目視判読や巡回調査によって得られるが、とくに地震の規模が大きく被害が広域にわたる場合には、情報の確認・収集に多大な時間が必要となる。能島ら^{26), 27)}は、地震動情報やフラジリティー関数などを

組み合わせた早期被害推定の結果を一次情報、リモートセンシングによって把握された被害地域の情報を二次情報、取得画像の目視判読や巡回調査による実被害情報を三次情報として、地震直後の混乱期における被害情報の逐次更新と、リアルタイム地震防災システムの統合処理について検討している。地震災害ごとに異なるトレーニングデータと閾値を用いた方がよいという本研究の成果は、このようなシステムにおいて、二次情報を提供するという位置づけが適当と考えられる。つまり、低高度リモートセンシングによって高精度な被害抽出を行うというより

も、画像取得の即時性を生かした被災地モニタリングと、被害の実情報をもとにした早期被害把握のために用いられるものと位置づけている。

しかしながら、空撮画像から精度よく建物被害地域が抽出できれば、後の応急・復旧対応に関する適切な意思決定を、三次情報を待たずに行うことができる可能性がある。このような方法を実現するためには、例えば、撮影条件や気候条件、建築環境等によらない首尾一貫した被害建物の指標を画像から抽出する技術の開発が必要である。これは今後の課題としたい。

7. 結論

本研究では、1999年トルコ・コジャエリ地震、1999年台湾・集集地震、2001年インド西部地震の後に撮影された空撮ビデオ映像の静止画像を用いて建物被害地域の自動抽出を試みた。被害建物を色相、彩度、明度、エッジ強度、エッジ強度の分散、エッジ方向の最頻度の閾値によって特徴づけ、これらを組み合わせたマルチレベルスライス法によって建物被害とみなす画素を抽出し、テクスチャ解析により画素抽出結果を建物1棟レベルの表現に置き換えた。

トルコ、台湾、インドの各地震災害の空撮画像に兵庫県南部地震の空撮画像から決定した閾値を適用したところ、実際の被害分布を反映した結果を得ることができなかった。そこでトルコ・ギョルジュク、台湾・中寮、インド・アンジャールの空撮画像からトレーニングデータと閾値を設定し、建物被害地域の抽出を試みた。これより実際の被害状況を説明する抽出結果を得ることができた。なお、設定した閾値の範囲と画素抽出にあたり色彩の指標の効果が大きかったことから、大局的には地震災害による倒壊建物は赤・橙・黄の色相を持ち、無色彩的な傾向が強いことがわかった。ただしトルコ地震における倒壊建物の色相には、赤や黄の暖色系だけではなく青などの寒色系が含まれることがわかった。

以上から、色彩情報とエッジ情報を用いたマルチレベルスライス法による建物被害の自動抽出では、倒壊建物の閾値を適切に設定できれば良好な結果が得られることがわかった。またこの閾値は同じような条件下での地震災害画像ならば、共通に用いることができる可能性が示された。

今後は、空撮画像の撮影条件や気候条件などが一定でなくても建物被害地域が抽出できるような指標を検討するなど、今後とも災害発生後の画像のみを用いた被害地域抽出の高度化を進める予定である。

謝辞：トルコ・コジャエリ地震の空撮ビデオ画像は、佐藤工業(株)の吉田望博士より提供いただいた。台湾・集集地震の空撮ハイビジョン画像は、NHK衛星放送局より提供いただいた。岐阜大学の能島暢呂助教授には、リアルタイム地震防災システムにおける統合処理に関してご教示いただいた。インド・グジャラート地震による被災地の状況および考察については、地震防災フロンティア研究センターの新井洋、齋田淳の両研究員からの助言が参考になった。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.1-16, 1997.
- 2) 翠川三郎: リアルタイム地震防災システム, 地震ジャーナル, No.28, pp.52-65, (財)地震予知総合研究振興会, 1999.
- 3) 建設省: 先端技術を活用した国土管理技術の開発, 建設省総合技術開発プロジェクト, 1999.
- 4) 建設省: 災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究, 建設省総合技術開発プロジェクト, 1999.
- 5) 自治省消防庁防災情報室: 緊急支援情報システムの構築について, 近代消防, Vol.474, pp.52-57, 2000.
- 6) 地球環境観測委員会, 宇宙開発事業団, (財)リモートセンシング技術センター: 地球観測データによる災害解析事例集, 1995.
- 7) 宇宙開発事業団, 地球観測データ解析研究センター, ナホトカ号流出油観測緊急対策チーム: 人工衛星・航空機による漂流重油の観測・ナホトカ号重油流出事故衛星観測調査報告書, 1997.
- 8) 衛星リモートセンシング推進委員会, 宇宙開発事業団, (財)リモートセンシング技術センター: 有珠山噴火, 2000.
- 9) 吉江隆, 津宏治: 衛星データによる1995年兵庫県南部地震被災状況推定画像の作成—特に神戸市中央部の木造住宅の被災域と液化化発生地域について, 日本リモートセンシング学会第18回学術講演会論文集, pp.119-122, 1995.
- 10) 米澤千夏, 竹内章司: ERS-1/SAR強度画像を用いた兵庫県南部地震による建造物被害地域の抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol.37, No.4, pp.57-61, 1998.
- 11) 松岡昌志, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星SAR強度画像の特徴, 日本建築学会構造系論文集, No.546, pp.55-61, 2001.
- 12) 松岡昌志, 山崎文雄, 翠川三郎: 1995年兵庫県南部地震での被害地域における人工衛星光学センサ画像の特徴, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.177-185, 2001.
- 13) 見富恭, 竹内章司: 航空機MSSデータによる液化化および焼失地域のスペクトル特性の解析, 日本リモートセンシング学会第18回学術講演会論文集, pp.117-118, 1995.
- 14) 岩下篤, 中野良志, 多田孝, 下田陽久, 坂田俊文: リモートセンシングデータを用いた兵庫県南部地震後のリニアメント解析, 日本リモートセンシング学会第18回学術講演会論文集, pp.125-126, 1995.

- 15) 建設省国土地理院: 平成7年度兵庫県南部地震災害現況図, 1995.
- 16) 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, No.682/I-56, pp.257-265, 2001.
- 17) 小川直樹, 山崎文雄: 航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, Vol.2, pp.119-128, 2000.
- 18) 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, 写真測量とリモートセンシング, Vol.40, No.4, pp.27-36, 2001.
- 19) 田中總太郎, 杉村俊郎: 高分解能衛星リモートセンシング時代の幕開け, RESTEC, 44号, pp.2-20, 2000.
- 20) 根元正美, 安藤恵美, 柴田健一, 今井靖晃: ALOSシミュレーション画像の判読による地震災害状況の把握, 日本写真測量学会秋季学術講演会, pp.139-142, 2000.
- 21) 地盤工学会: 1999年トルコ・コジャエリ地震第1次調査団速報, 1999.
- 22) Indian Institute of Technology and Earthquake Disaster Mitigation Research Center: *The Bhuj Earthquake of January 26, 2001, Consequences and Future Challenges*, 2001.
- 23) 白井良明, 谷内田正彦: パターン情報処理, (株)オーム社, 1998.
- 24) 井上誠喜, 八木伸行, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人: C言語で学ぶ実践画像処理, (株)オーム社, 1999.
- 25) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
- 26) 能島暢呂, 杉戸真太, 金澤伸治: 被害情報の逐次処理による地震時緊急対応の意思決定支援モデル, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.129-142, 2001.
- 27) 能島暢呂, 杉戸真太: リアルタイム地震防災システムにおける被害情報の統合処理について, 第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集, pp.259, 2001.

(2001. 8. 1 受付)

ATTEMPT FOR AUTOMATED DETECTION OF BUILDING DAMAGE AREAS DUE TO RECENT EARTHQUAKES USING AERIAL TELEVISION IMAGES

Hajime MITOMI, Masashi MATSUOKA and Fumio YAMAZAKI

The characteristics of severely damaged buildings were examined by image processing of aerial television images taken after the 1999 Kocaeli, Turkey, the 1999 Chi-Chi, Taiwan and the 2001 Gujarat, India earthquakes. In image processing, color indices and edge elements calculated from the post event images were used. After pixels indicating damaged buildings were detected, the texture analysis of the image was attempted to identify the areas corresponding to the size of buildings. The extracted areas almost corresponded to the results of visual inspection. We found that the threshold values to judge damaged buildings should be determined for each image or for the images having similar built environment and damage pattern.