

航空写真の画像解析による墓石転倒率の推定のための基礎的検討

Fundamental study on the estimation of overturning ratio of tombstones
by image analysis of aerial photographs

日塔 哲広¹, 山崎 文雄²

Tetsuhiro NITTO¹ and Fumio YAMAZAKI²

¹ 千葉大学大学院 自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology, Chiba University

² 千葉大学 都市環境システム学科

Department of Urban Environment Systems, Chiba University

As a method to estimate seismic intensity, the overturning ratio of tombstones in a cemetery has been used widely in Japan. In this study, the overturning ratio of tombstones due to an earthquake is estimated based on an image analysis of aerial photographs. It is possible to extract only notable edges from an image by removing noise. Then the displaced tombstones can be detected through the distribution of edge direction. In order to establish an estimation formula for the overturning ratio of tombstones, the direction of sunlight and the resolution of the photograph should be considered properly in a future research.

Key Words: aerial photograph, edge direction, image processing, tombstones, earthquake

1. はじめに

近年リモートセンシングの技術は、防災の分野においても幅広く利用されてきている。とくに航空写真は、その画像解像度の高さ（地上解像度：約10cm～50cm）と航空機の機動性・即時性から、自然災害発生直後の早期被害把握に役立てられている。1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震の地震発生直後には、数多くの航空写真が撮影され、建物被害¹⁾、道路被害、地盤災害などの把握に利用されている。

また日本において強震計がなかった時代には、「墓石の転倒率」は被災地の地震動強さを推定するための重要な指標であった²⁾。強震計が多数存在する今日でさえも、強い地震が発生すると専門家により墓石転倒率の調査が行われている³⁾⁴⁾。墓石転倒率から地震動の強さを推定するのは、地盤や地震動の特性の違いなどから精度が低いという指摘もあるが、大まかな地震動の強さを把握するには非常に有効な手段である。

そこで本研究では、新潟県中越地震の発生直後に国土地理院により撮影された被災地域の航空写真画像を用いて、画像解析により墓石転倒率を推定することを試みた。都市域を除けば、墓地は各集落に必然的に存在し強震計よりも圧倒的に数多く分布している。よって地震発生直後の空撮画像から墓石転倒率を把握できれば、より広範囲で密な地震動強さの推定に利用され、またその推定精度を高めることができれば、現地で墓石転倒率を調査しなくても地震動強さの推定に利用できる。

目視判読では、墓石について「直立」と「転倒」を分類することは比較的容易であるが、客観性が乏しいことと正確を期するには時間を要する。一方画像解析は、墓石の周

囲の瓦礫や影の位置・長さなどの複数の空間情報を考慮しななければならないという課題も残っているが、墓石転倒状況を定量的かつ客観的に把握し、将来、地震動強さの推定に利用できる可能性が高い。

2. 画像解析によるエッジ検出方法

(1)空間的特徴

線画のように人間は無意識に物体・対象の特徴的な輪郭を選び出している⁵⁾。デジタル画像処理においても、物体の認識や画像解析を行うために、線・輪郭を抽出することは重要な手法である。本研究では「エッジ」とよばれる明るさが急激に変化し濃淡パターンが連続している部分に着目した。このように画像中に含まれる対象物の大きさ、エッジなどの空間的特徴を抽出・解析する手法をフィルタリング（空間的特徴解析）といい、様々な計算方法によって空間的特徴を導き出すことができる⁵⁾。

画像処理において自動でエッジを検出する方法として、重み係数による局所積和演算のオペレータを用いる。このオペレータによってエッジの「強度」と「方向」が算出され、この2つのパラメータを用いて検討を進める。

(2)基本処理

一般にカラー航空写真は、RGB空間の画像であるが、これらを三属性（色相・彩度・明度）の空間に変換し、そこから明度の情報（輝度値）だけを取り出したグレースケール画像をエッジ抽出には用いる。また画像処理を容易にするために、輝度値は8bitに変換し、この画像にエッジ検出オペレータを適用させた。

(3)エッジ検出オペレータ

本研究では2つのエッジ検出オペレータを使用する。Prewittのテンプレート・マッチング型オペレータでは、図1に示す8方向(0, 45, ..., 315°)のエッジに相当する8個の3×3のテンプレートを用いて、注目画素に対して重み係数の局所積和演算を行い、各テンプレートの出力結果において最大出力が得られたテンプレートの方向をエッジ方向とし、その時の出力値をエッジの強度とする。

もう1つのSobelの2方向差分型オペレータでは、図2に示す3×3のテンプレートを適用させることにより、x方向(→)、y方向(↓)それぞれの微分値(f_x, f_y)が求められる。座標(x, y)における微分値を

$$G(x, y) = (f_x, f_y) \dots \dots \dots [1]$$

と表現するならば、エッジの強度は次式で求められ、本検討では最大値を1.0に基準化した。

$$|G(x, y)| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \dots \dots \dots [2]$$

さらにエッジ方向は次式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1}(f_x / f_y) \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \dots \dots \dots [3]$$

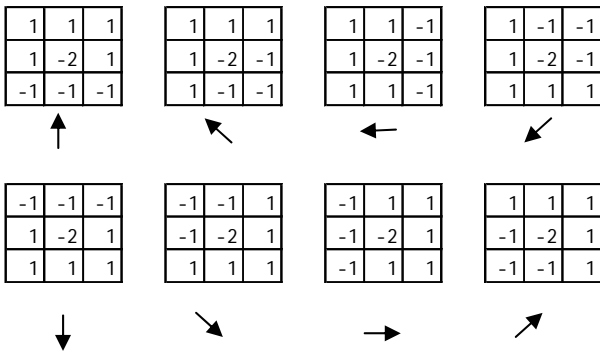


図1 Prewittの3×3のテンプレートとエッジ方向

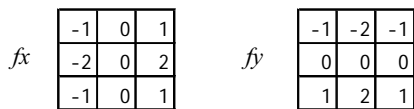


図2 Sobelの3×3のテンプレート

(4)エッジ方向のばらつきへの着目

一般的に各墓石は直方体に加工された石を基本に構成され、正面に対して水平に一定のラインで規則正しく並んでいる。つまり墓地の平面において墓石の正面に平行な方向をx方向、奥行き方向をy方向とすれば、正常な墓石の画像のエッジには多くのx, y方向の成分が含まれ、転倒ないし移動している場合は、x軸, y軸に対してある角度をもつ斜めのエッジ成分が多く含まれることが想定できる。そこで地震後の航空写真の墓石部分から得られるエッジ方向のばらつきから、墓石の転倒状況を推定できないかと考えた。本研究では、模型を用いた実験に基づく検討を重ねながら、航空写真画像への適用という流れで検討を進めていく。

3. 予備実験によるエッジ方向のばらつきの検討

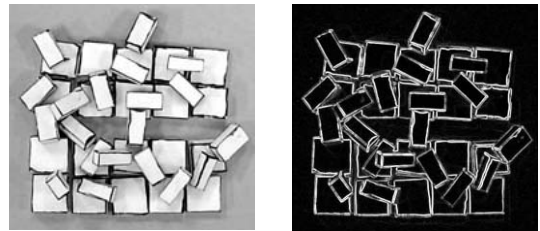
(1)エッジ方向の縦横・斜め比率

前述したように、テンプレート・マッチング型では8方向のエッジ方向について検討できることから、検出されたエッジ方向成分を縦横(0, 90, 180, 270°)と斜め(45, 135, 225, 315°)に分類し、この比率を「縦横・斜め比率」と呼ぶことにし、この比率をもとにエッジ方向のばらつきの検討を行った。予備実験では、墓石の転倒によりエッジ方向にばらつきが生じるという確認作業を行うために、大まかに縦横と斜めの分類が可能なPrewittのテンプレート・マッチング型エッジ検出オペレータを用いた。

(2)消しゴムモデル画像への適用

墓石に見たてた消しゴムによるモデルを作成し、墓石の転倒率とエッジ方向のばらつきについて検討した。消しゴムモデルは、竿石と下石台だけのシンプルな構成とした。このモデルを20個用意し、無作為に4個ずつ転倒させ(転倒率を20%ずつ増加させ)、それぞれについて真上からデジタルカメラで撮影した画像を用いて、縦横・斜め比率を求めた(図3, 表1)。

この検討から、全体として転倒率の増加とともにエッジの斜め方向成分が増加することが確認された。しかし墓石の転倒の仕方によっては、縦横成分が増加した場合も見られた。



(a)グレースケール(GS)画像 (b)エッジ強度(EI)画像

図3 消しゴムによる墓石模型とエッジ強度

表1 消しゴム墓石模型の転倒率と縦横・斜め比率

転倒率(%)	0	20	40	60	80	100
縦横(%)	66.2	63.8	62.7	60.1	60.7	58.5
斜め(%)	33.8	36.2	37.3	39.9	39.3	41.5

(3)地震前後における航空写真の墓地画像への適用

国土地理院により新潟県中越地震の発生翌日に撮影された旧堀之内町付近(震度6弱)の航空写真と、同じ地域を撮影した地震前の航空写真を入手できた。この墓地の墓石転倒率はかなり高く、90%以上が転倒していると目視からも判読できた。図4に示すように、この地域における2時期の墓地画像を用いて、エッジ方向の縦横・斜め比率をとった。



(a)被害前GS (b)被害前EI (c)被害後GS (d)被害後EI

図4 被害前後における墓地の航空写真とエッジ画像

航空写真は人工衛星画像と違い一定の地域を定期的に撮影されず、必ずしも被害前の航空写真が撮影されているとは限らない。したがって本来ならば、地震後のみの画像を利用するのが現実的である⁶⁾。さらに今回入手した被害前の航空写真は、撮影高度の違いから被害後の航空写真とは画像の解像度や鮮明さが異なるために、画像解析をする際に2つの墓地画像のピクセル数はほぼ同じになるように調節し予備実験として比較した。

この検討の結果、地震前の墓地画像から得られたエッジ方向の縦横成分が68.2%に対し、地震後では61.4%であった。画像の条件が異なるものの、地震後においてエッジの斜め方向成分が増加するという結果が得られた。

(4) 予備実験の結果のまとめ

これまでのテンプレート・マッチング型エッジ検出オペレータによるエッジ方向の縦横・斜め比率の検討から、墓石の転倒がエッジ方向のばらつきに影響を与えることが分かった。また、墓石の転倒の仕方、太陽の高度の違いによる影の影響、画像解像度の違いなどの条件を考慮して、詳細な検討を行う必要があることが示唆された。

4. 室内実験による弱エッジの除去と航空写真への適用

(1) エッジ方向の縦横成分比

この室内実験では、墓石の転倒方向や影の方向を考慮した検討を行うために、エッジ方向を $-90 \sim 90^\circ$ の範囲で検出できるSobelの2方向差分型オペレータを用いた。このオペレータを用いてエッジ方向のばらつきを検討する際に、 $-90 \sim -75^\circ$ 、 $-15 \sim 15^\circ$ 、 $75 \sim 90^\circ$ の範囲をエッジ方向の「縦横成分」とした。

(2) 室内実験による強度の弱いエッジの除去

エッジ強度画像には抽出すべき墓石の輪郭のエッジ、つまりエッジ強度の強いエッジ(強エッジ)の他に、ノイズのような強度の弱いエッジ(弱エッジ)が分布している。この弱エッジがエッジ方向に与える影響を検討するために、シンプルな直方体の発砲スチロールの画像(水平方向から45度回転してある)を用いたところ、表2のように抽出したい強エッジの方向成分は全体の18.2%に過ぎず、弱エッジが大きく影響を与えていることが分かった。そこで図5のようにエッジ強度の頻度分布図を作成し、除去するエッジ強度の閾値を数個選び検討を行ったところ、図のように弱エッジが卓越している箇所に適切な閾値を設定す

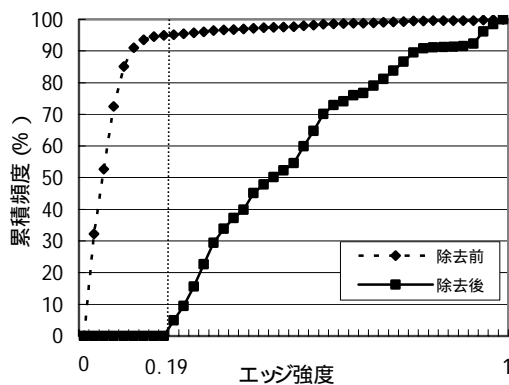


図5 エッジ強度頻度分布と弱エッジの閾値 (室内実験)

ることで、図6のようにエッジ強度画像からノイズを取り除き、抽出したいエッジ比率が77.2%と向上し、精度の高いエッジ方向の情報を得ることができた(表2)。

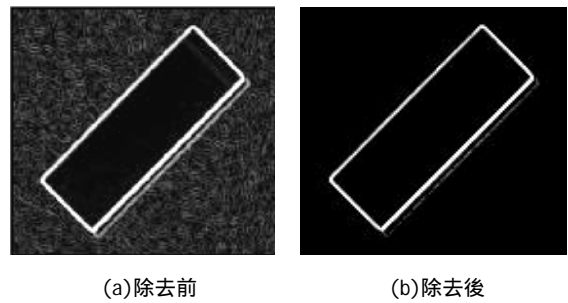


図6 弱エッジ除去によるエッジ強度画像の比較

表2 弱エッジ除去によるエッジ方向比率の変化

弱エッジ除去	前 (%)	後 (%)
$-50^\circ < \theta < -40^\circ$	7.4	13.9
$40^\circ < \theta < 50^\circ$	10.8	63.3
計	18.2	77.2

(3) 航空写真への適用

以上の検討を踏まえて、新潟県中越地震の直後に撮影された旧堀之内町の墓地画像を用いて、弱エッジの除去とそれともなうエッジ方向の影響を検討した。

図8の(a)に示すように、墓地画像において目視によって十分に墓石が直立している部分(実線、破線)と転倒している部分(点線)を抜き出し、エッジ方向の縦横成分をとったところ、ノイズを除去する前のオリジナルの画像では直立と転倒の大きな差はみられなかった。しかし前例にならない、弱エッジの卓越している箇所を図7のように閾値として設定し除去することにより、直立と転倒の差を差別化することができた(表3)。したがって弱エッジの除去は、航空写真画像において抽出すべき強エッジ方向を得るために、必要な前処理といえよう。

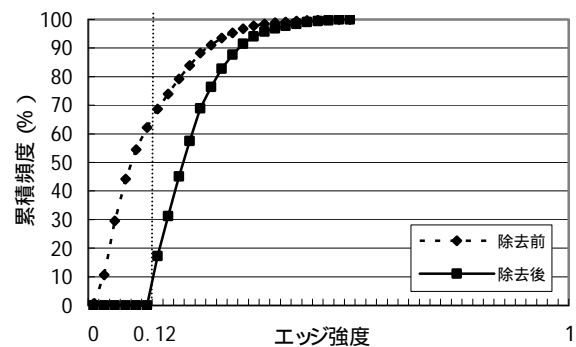
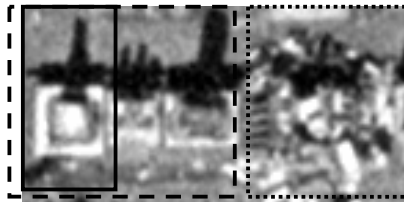


図7 エッジ強度頻度分布と弱エッジの閾値 (航空写真)

表3 弱エッジ除去による縦横成分比率の比較

縦横比率	実線領域	破線領域	点線領域
除去前 (%)	40.1	39.7	37.1
除去後 (%)	50.8	48.4	39.3



(a) グレースケール(GS)画像と比較範囲



(b) 除去後のエッジ強度(EI)画像

図8 航空写真のGS画像とEI画像

5. 墓石模型による様々な条件下のエッジ方向の検討と航空写真への適用

(1) 墓石模型と実験条件

発泡スチロールを用いてより詳細な墓石模型を制作し、様々な条件下におけるエッジ方向の検討を行った。日本における墓石の様式は和型と洋型に大別されるが、今回制作した墓石模型は、古くからなじみがあり現在も広く浸透している和型墓石をモデルとした。模型は竿石、上台、中台、下台、花立台から構成され、大きさは幅60cm、奥行き45cm、高さ55cmで、原寸の約1/3の大きさとした。なお、和型と洋型の墓石の形状と地震による転倒のメカニズムについては、既に研究がなされている⁷⁾。

この模型を用いて墓石の転倒の仕方、光源の高さ・方向の違いがもたらすエッジ方向の影響を検討した。さらに画像解像度を調節し、実際の航空写真の画像解像度に近づけた場合のエッジ情報の変化を検討した。

室内実験の撮影条件として、日没後の暗い部屋において、

太陽に見たてたスポットライトを使用した。墓石と光源のパターンは表4に示す6種類とした。なお以下に示す実験結果は、弱エッジを除去したものである。

(2) 墓石模型による室内実験

表4、図9のような様々な条件下でエッジ方向の縦横成分について検討した。条件の内容としては、墓石の状態(直立・転倒)、光源の高度(高・低)、さらに高度が低いものに関しては光源方向(縦方向・斜め方向)も区別した。

表4によると、まず非常に高い縦横成分比を示したのは(A)、(B)である。これは図9のEI画像からもわかるように、墓石と影のエッジがきちんと縦横方向に検出されたからだといえる。また(C)は墓石が直立しているにもかかわらず、墓石が転倒している(D)とほぼ同じ値を示した。これは(C)の斜め方向の影のエッジの影響であると考えられる。よって墓石の影のエッジは、エッジ方向の縦横成分比に大きく影響することが示された。

(3) 墓石模型による室内実験

次に、(2)の実験に用いた画像の解像度を下げ、実際の航空写真の解像度に近づけた後、図10に示すように、同様に縦横成分比をとった。実際の航空写真の地上解像度が10cmならば、平面における直立した墓石の竿石はおよそ30cm×30cmで構成されることから、画像中では3×3pixelsで構成されると考えられる。したがって、墓石模型においても、墓石の竿石が3×3pixelsで構成されるように画像解像度を調節し検討を行った。この画像解像度は、(2)における画像解像度の約1/10である。

解像度を下げることにより、ミクセル化(1つのピクセルに異なる要素が混在すること)が生じ、表4に示すように全体的に縦横成分比が低下した。その中で比較的高い値を示したのは(A)、(D)であり、これは光源高度が高く影の影響が少なかったからと考えられる。またその他の光源高度の低い(B)、(C)、(E)、(F)は(A)、(D)に比べ解像度の低下とともに、大幅に縦横成分比が低下した。さらに画像を比較すると、墓石のエッジに比べ影のエッジがくっきりと表れている。よって影の形状・方向を適切に評価する必要があることが指摘される。

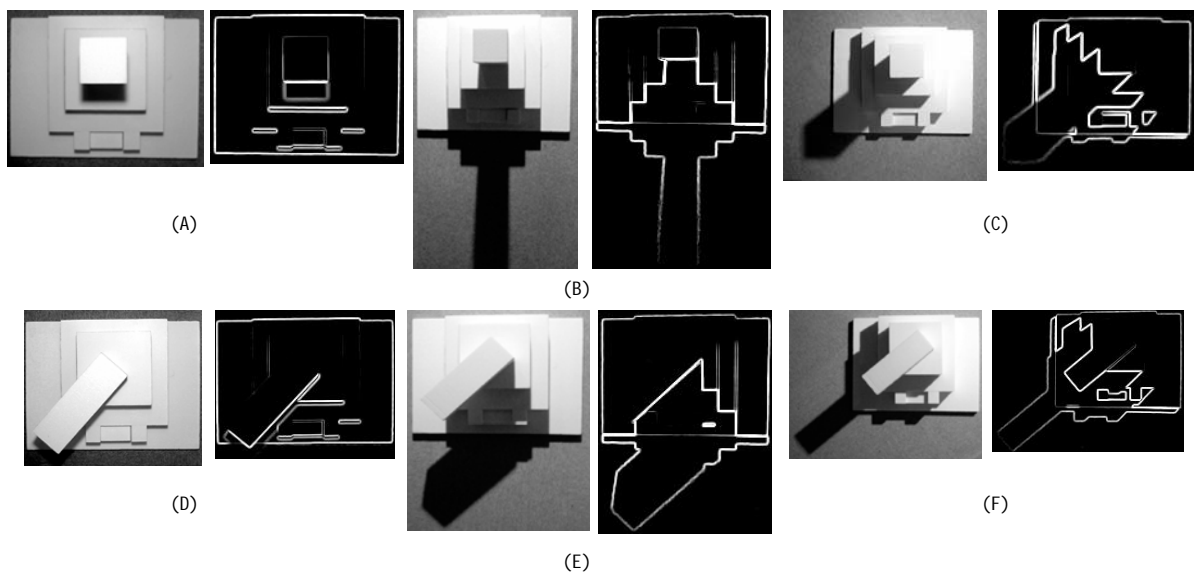


図9 発砲スチロール墓石模型による様々な条件下における検討(それぞれ左:GS,右:EI)

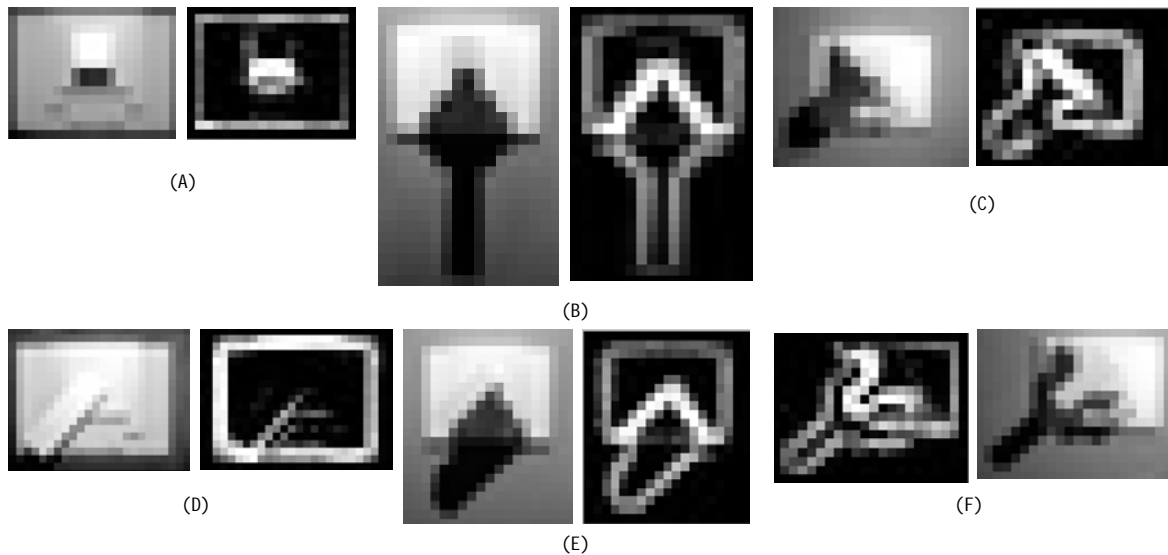


図10 発砲スチロール墓石模型による解像度を下げた画像による検討（それぞれ左：GS，右：EI）

表4 発砲スチロール墓石模型による様々な条件下での縦横成分比の比較

検討ケース	A	B	C	D	E	F
墓石の状態	直立	直立	直立	転倒	転倒	転倒
光源高度	高い(真上)	低い	低い	高い(真上)	低い	低い
光源方向	-	縦方向	斜め方向	-	縦方向	斜め方向
縦横成分(%) :高解像度(図9)	93.8	91.8	73.3	73.1	70.8	60.1
縦横成分(%) :低解像度(図10)	74.8	50.2	48.1	65.1	43.7	38.5

(4) 航空写真への適用

室内実験の結果、影の形状・方向が画像全体におけるエッジ方向に大きな影響を与えられられるため、図11のような航空写真において、目視により直立していると思われる3つの画像について縦横成分を比較した。(a)は影が横方向に伸び、(b)と(c)は影が斜めに伸びているものとし比較すると、それぞれのエッジ方向の縦横成分は(a)55.9%、(b)44.0%、(c)46.2%であった。同じ直立した墓石にもかかわらず縦横成分比に大きな差ができてしまった。さらに(b)の影方向は -25° 、(c)は 65° とみなし、それぞれにおいて $-30 \sim -20^\circ$ 、 $60 \sim 70^\circ$ の範囲でエッジ方向成分比をとると(b)6.9%、(c)6.2%であり、影のエッジが影響していること

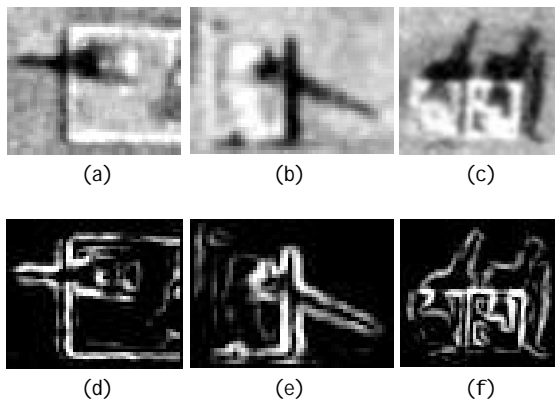


図11 影方向の縦横方向成分への影響
(a)～(c)はGS画像，(d)～(f)は上に対応するEI画像

が示された。したがって、航空写真において墓石の直立と転倒の区別をするには、単にエッジ方向の縦横成分比だけをもとにしたのでは不十分であり、影の方向や領域を考慮する必要があると考えられる。

6. 室内実験による墓石転倒率と航空写真への適用

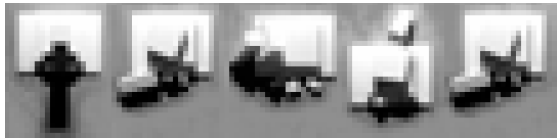
(1) 室内実験による墓石転倒率と縦横成分比

発砲スチロール墓石模型を用いて、直立した墓石と数種類の転倒した墓石画像を作成し、そこから5つの画像を画像加工により接合し、墓石転倒率とエッジ方向について検討した(図12)。つまり墓石が1つ倒れるにつれて転倒率は20%増加するということになる。まず第1段階として、影が縦方向に伸びている設定のもとで検討した。

表5に示す結果によると、転倒率の増加(墓石が1つずつ倒れる)とともに、縦横成分比が1%程度ずつ減少していく様子が見られた。しかし、この縦横成分比の変化は、期待したほど大きなものではなく、影の方向がほぼ墓石に垂直・平行という条件下においても、エッジ方向のみからの墓石転倒率の推定が容易でないことが推察される。

表5 墓石転倒率と縦横成分

転倒率	0%	20%	40%
縦横成分	59.1	57.8	56.2
転倒率	60%	80%	100%
縦横成分	55.2	54.6	54.1



(a)グレースケール(GS)画像



(b)エッジ強度(EI)画像

図12 発泡スチロール模型画像を加工して作成した墓石群の画像

(2)航空写真への適用

実際の航空写真画像では、室内実験の墓石画像と比べ、地面の草や墓石の瓦礫、墓石の周りの様々な装飾や卒塔婆などのノイズが多く存在するために、表4,5のそれぞれの値よりも全体的に縦横成分比が減少することは、様々な航空写真への適用結果から確認している。これまでの検討から、航空写真において影が縦方向あるいは横方向に伸びている場合、直立している墓石の縦横成分比は50~55%、転倒している墓石は40%ほどであるという結果を得ており、さらに表5の検討を踏まえると墓石転倒率0%で縦横成分比が50%以上を示し、墓石の転倒とともに縦横成分比は減少していき、墓石転倒率100%で縦横成分比が40%以下を示すという仮定ができる。

実際の墓地の一部分を示す図13における縦横成分比は45.2%であることから、墓石転倒率は50%ほどではないかと推定できる。この推定値は、墓石の約半数が転倒しているという目視の結果とほぼ整合している。しかしながら、この墓石転倒率の推定は概略的なものであり、墓地の周辺環境、太陽高度、影の方向、航空写真の解像度などにより変化すると考えられる。



(a)グレースケール(GS)画像



(b)エッジ強度(EI)画像

図13 航空写真を用いた墓石転倒率の推定のためのエッジ検出の例

7. 結論と今後の課題

本研究では、航空写真からの画像解析による墓石転倒率の推定を試みた。検討の流れとして、墓石の転倒によりエッジ方向がばらつくようになると考え、室内実験による検討を行い、航空写真へと適用させていった。

まず、エッジ強度から適切な閾値を設定することで、画像中のノイズを取り除き、抽出すべき強エッジのみを抽出することが可能となった。しかし、理想的な条件の室内模型実験においても、光源の高さや方向によって生じる墓石の影が、エッジ方向の分布に大きな影響を与えることが分かった。実際の航空写真の解像度程度に解像度を下げると、影の条件の違いの影響はより深刻で、転倒した墓石と斜めに影が生じた場合において、エッジ方向の縦横成分比の差別化は困難であった。しかし、同じ光源の条件下では、墓石転倒率が増加するとエッジ方向の縦横成分比が低下することが示された。

さらに実際の航空写真を用いて、影が縦あるいは横方向である場合に限定して、墓石転倒率とエッジ方向の縦横成分比の関係を調べた。航空写真を用いた検討では垂直写真を対象としており、撮影高度により墓石が倒れこむように見える影響は無視できるものとした。その結果、同様の墓地環境と太陽高度のもとでは、エッジ方向の縦横成分比と墓石転倒率に関係があることが示された。

今後は影が墓石の方向に対して斜めの場合の検討を行い、さらにサンプルデータを増やすことによって、影の方向と墓地の環境条件をパラメータとする、エッジ方向の縦横成分比に基づいた墓石転倒率の推定式を提案したい。また現地調査のデータとの比較により推定式の精度を高め、広域における地震動強さの把握に役立てていきたいと考えている。またウィンドウサイズが拡張されたエッジ検出オペレータも種々提案されているので、それらを用いた墓石転倒率の推定精度についての検討も今後の課題である。

参考文献

- 1) 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, No. 2, pp.119-128, 2000.11.
- 2) 土岐憲三, 岡田恒男: 地震防災の事典, pp.148-149, 朝倉書店, 2000.
- 3) 大橋昭光, 岩崎敏男, 川島一彦: 墓石の転倒状況から推定した1978年伊豆大島近海地震の地震動強度, 土木技術資料20-11, pp.555-560, 1987.
- 4) 翠川三郎, 藤本一雄: 墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, pp.111-118, 1996.12.
- 5) 高木幹雄, 下田陽久: 新編 画像解析ハンドブック, pp.1228-1234, 東京大学出版会, 2004.
- 6) 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.
- 7) 古川愛子, 清野純史, 三輪滋: 物理シミュレーションによる兵庫県南部地震時の墓石の転倒メカニズムの解明, 地域安全学会論文集, No. 7, pp.221-230, 2005.11.

(原稿受付 2006.05.26)

(登載決定 2006.09.16)