

地理情報システムと画像解析を利用した 構造物地震被害判定手法の高度化

海野伸太郎¹・堀宗朗²

¹学生会員 東京大学地震研究所 修士 1 年 (〒 113-0032 東京都文京区弥生一丁目 1-1)
E-mail: umino@eri.u-tokyo.ac.jp

²正会員 Ph.D 東京大学地震研究所 教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生一丁目 1-1)
E-mail: hori@eri.u-tokyo.ac.jp

地理情報システムと画像解析を使い、地震前後の構造物の輪郭位置の変化を計測する地震被害判定手法が提案されている。本研究は、主に画像解析を高度化することで判定手法の高度化を行い、オブジェクト指向プログラミング技術を使い堅牢性と拡張性の高いコードを作成した。具体的な高度化の内容は、地理情報システムを使って画像内での輪郭位置を計算し、画像解析のアルゴリズムを工夫し、さらに RGB のピクセルデータを有効利用するものである。従来よりも高い精度で輪郭位置を計測できることを確認し、輪郭位置の変化を計測する精度も検討した。

Key Words : damage diagnosis, GIS, image analysis, sub-pixel accuracy

1. はじめに

広域を襲う大地震発生時、被害判定¹⁾が災害対応の初動を決め、迅速かつ正確な判定が望まれる。一見して甚大な被害が生じた場合はともかく、相当数の構造物が中程度の被害を被った場合、各構造物の損傷を定量的に見極めない限り迅速かつ正確な判定は難しい。特に、耐震性の高い新設構造物や耐震補強を受けた構造物が増える傾向にある都市部では、被害は甚大というより中程度となる可能性は高く、このような被害を迅速かつ正確に判定できる手法が必要である。

広域の地震被害判定を目的として、航空写真や衛星画像を使った手法^{2),3),4),5)}が研究されている。地震前後での画像パターンの変化から被害の度合いを推定するものである。しかし画像に撮影された多数の構造物を自動的に認識することは難しく、画像パターンの変化から構造物の被害の度合いを定量的に測定することは難問である。

上記を背景として、Huang^{6),7)}は、都市内に設置された複数の監視カメラの画像を使って地震前後の輪郭位置の変化を計測し、この変化から構造物被害を定量的に判定する方法を提案している(図 1 参照)。画像解析を適用して輪郭位置を正確に計測することが原理である。輪郭位置計測の画像解析は計算負荷が高い。そこで、Huang は、構造物の形状データを持つ地理情報システム (Geographic Information System, GIS) を利用し、輪郭付近に絞って画像解析を適用することを提

案している。画像解析の対象が狭い領域となるため計算負荷が下がる。また画像内の構造物の自動認識の問題も解決する。

本研究は Huang の方法を高度化させることを目的とする。後述するように、Huang の方法には輪郭位置の計算や輪郭位置の計測に課題がある。この課題を解決することが高度化の方向である。プロトタイプであるため Huang の方法はシステム化されていない。堅牢性と拡張性が向上するよう、被害判定手法を統一的にコード化する。

2. Huang の判定手法と改良

本研究で高度化する被害判定手法には二つのポイントがある。第一のポイントは GIS を利用してカメラ画像内の構造物輪郭位置を計算することである。構造物の自動認識の問題を解決する他、輪郭を含む狭い領域が画像解析の対象となるため負荷がかかる画像解析が適用できるようになる。第二のポイントは構造物の輪郭位置を高精度で計測する画像解析を適用することである。サブピクセルの精度で輪郭位置を計測することが目標となる。

(1) Huang の方法

地震被害判定手法の主要な開発項目は、GIS を使ったカメラ画像内の輪郭位置計算と輪郭位置計測の画像解析である。この二項目に対し Huang は次の方法を考案した。

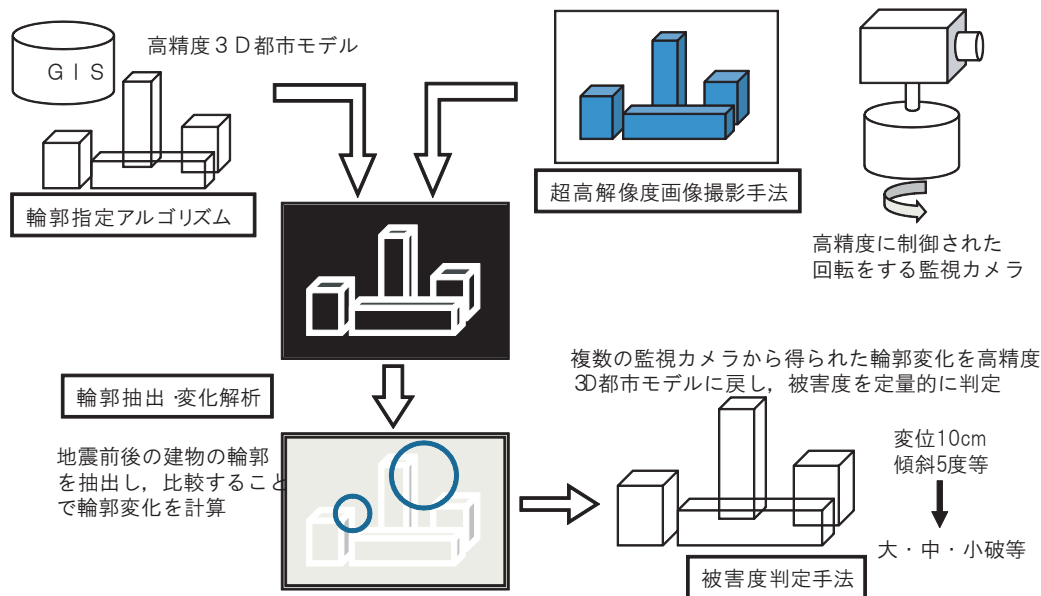


図-1 GIS と画像解析を利用した地震被害判定手法の概要。

- カメラ画像内の輪郭位置計算：GIS のデータから 3 次元都市モデルを構築する。実カメラと同一の位置と特性（向き，焦点距離等）を持つ仮想カメラを 3 次元都市モデル内に設置し，POV⁸⁾を使って BMP ファイルを作成する。この BMP ファイルにエッジ処理を施し，構造物輪郭に対応するエッジを見つける。
- 輪郭位置計測の画像解析：カメラ画像から構造物輪郭位置に対応する解析ウィンドウを抽出する。解析ウィンドウの全ピクセルの RGB データを Gray スケールに変換する。輪郭に直交する方向では Gray スケールのピクセルデータがエラー関数にしたがって分布することを利用して，ピクセルデータの分布に最も近いエラー関数を見つけ，輪郭位置をサブピクセル精度で解析する。

上記の開発項目を要素技術として Huang は地震被害判定手法のプロトタイプを構築した。しかし Huang のプロトタイプには次の問題点がある。

- 輪郭位置計算の非効率性：輪郭位置計算には POV が使われる。重なり合う構造物の陰線処理が簡単に行えるが，3 次元都市モデル内に仮想カメラを設置し，BMP ファイルを作成し，エッジ処理を行う，という手順は決して効率的ではない。
- 画像解析での計測データの不完全な利用：カメラ画像には RGB の 3 つのピクセルデータが含まれている。このピクセルデータを Gray スケールのピクセルデータに変換すると，画像解析の数値計算は簡単になる。しかし，Gray スケールへの変換は，計測データ全部ではなく，その一部のみを使うとも考えられる。

プロトタイプという性格上，被害推定の手順は確立されているものの，Huang の方法の堅牢性は低く，また，拡張性は全く考慮されていない。

(2) 改良点

構造物の輪郭位置計算を効率的に行うため，POV を使って作成される BMP ファイルを使わない計算方法を考案する。これは，カメラの位置と特性を基に，カメラ画像内に現れる輪郭位置を直接計算^{9),10)}する方法である。原理的には単純であり，実空間の座標からカメラが持つ座標系へ座標変換する計算と，3 次元の座標をカメラ画像という平面の 2 次元座標に投影する計算が必要である。

図 2 に示すように点 P の座標変換を考える。実空間の座標を $[G] = [G_1, G_2, G_3]$ ，カメラの座標系での座標を $[L] = [L_1, L_2, L_3]$ とすると，座標変換は次の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \\ H_1 & H_2 & H_3 \\ U_1 & U_2 & U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 - O_1 \\ G_2 - O_2 \\ G_3 - O_3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ここで $[O]$ はカメラの位置ベクトル， $\{[N], [H], [U]\}$ はカメラの軸・水平・鉛直方向の単位ベクトルである。カメラに投影された 2 次元座標を $[I] = [I_1, I_2]$ とすると，このベクトルは $[L] = [L_1, L_2, L_3]$ を使って次のように計算される。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_h & 0 & 0 \\ 0 & M_v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

ここで M_h と M_v はカメラの焦点距離や歪度から決定

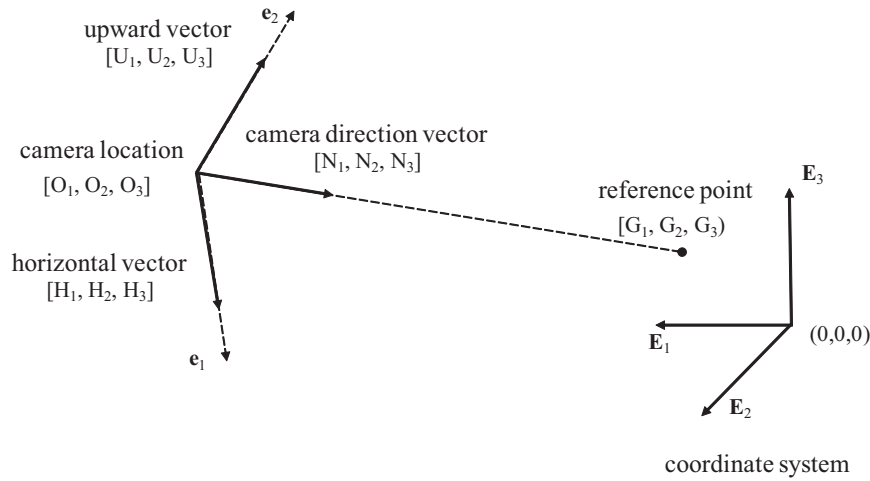


図-2 GIS 座標からカメラ座標への変換 .

される係数である .

Huang の方法によれば , 輪郭位置計測の画像解析は次のように設定される . カメラ画像から抽出された解析ウィンドウが持つ Gray スケールのピクセルデータはマトリクスを使って表す . すなわち i 行 j 列目のピクセルのデータをマトリクスの (i, j) 成分 X_{ij} とする . 輪郭が鉛直である場合 , 輪郭位置の画像解析は解析ウィンドウを水平方向に走査する . すなわち , i 行の成分に対し次の E を最小にする .

$$E = \sum_j (X_{ij} - (X_{min} + (X_{max} - X_{min})\text{Err}(\mu, \sigma)))^2 . \quad (3)$$

ここで Err は平均 μ と標準偏差 σ の誤差関数であり , X_{min} と X_{max} は i 行成分の最大値と最小値である . i 行目の輪郭位置が μ として解析される .

式 (3) の E は (μ, σ) の非線形関数であり , Huang はその勾配を数値計算し , E を最小化するよう増分 $(d\mu, d\sigma)$ を決めていた . すなわち ,

$$\begin{bmatrix} d\mu \\ d\sigma \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \mu} \\ \frac{\partial E}{\partial \sigma} \end{bmatrix} . \quad (4)$$

なお A は適当な定数である . 誤差関数の勾配やヘシアンは解析的に計算できる . さらに E の最小化は $\frac{\partial E}{\partial \mu} = 0$ と $\frac{\partial E}{\partial \sigma} = 0$ と等価であることを利用すると ,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial \mu^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial \mu \partial \sigma} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial \mu \partial \sigma} & \frac{\partial^2 E}{\partial \sigma^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mu \\ d\sigma \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \mu} \\ \frac{\partial E}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

を用いて増分 $(d\mu, d\sigma)$ を求めることもできる . 従来の式 (4) のアルゴリズムに , 式 (5) のアルゴリズムを組み合わせることでより良い (μ, σ) を数値計算することができる .

各々の RGB のピクセルデータ $(\{R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}\})$ を直接使った輪郭位置計算の画像解析は可能である . Gray スケールのピクセルデータ X_{ij} の代わりに R_{ij} ,

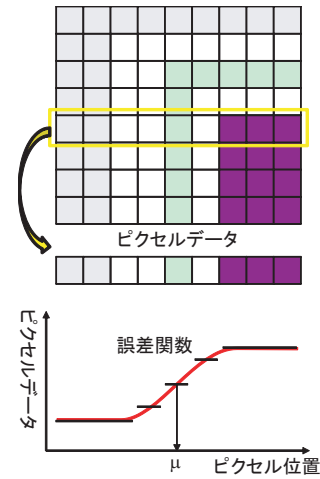


図-3 誤差関数を使った輪郭位置計測の画像解析 .

G_{ij} ないし B_{ij} を使う . 式 (3) を最小化する解を形式的に $\mu_i^X = \text{FindEdge}_j(\{X_{ij}\})$ と書くと , 例えば $\mu_i^R = \text{FindEdge}_j(\{R_{ij}\})$ が R のピクセルデータの画像解析の結果となる . そして $\mu_i^{R,G,B}$ の平均

$$\bar{\mu} = \frac{1}{3}(\mu_i^R + \mu_i^G + \mu_i^B) \quad (6)$$

が輪郭位置となる .

なお RGB のピクセルデータから Gray スケールのピクセルデータへの変換は次の線形変換である .

$$X = c_r R + c_g G + c_b B . \quad (7)$$

ここで $c_{r,b,g}$ は $c_r + c_g + c_b = 1$ を満たす係数である . したがって , この式は

$$\mu_i^X = \text{FindEdge}_j(\{c_r R_{ij} + c_g G_{ij} + c_b B_{ij}\}) . \quad (8)$$

となる . 式 (6) に重み付き平均を使うと

$$\bar{\mu}^l = c_r \mu_i^R + c_g \mu_i^G + c_b \mu_i^B \quad (9)$$

となる . すなわち , RGB のピクセルデータに対し , 重

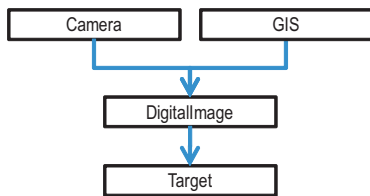


図-4 システム化によって導入されたクラス .

み付き平均を取ってから FindEdge を使うことが Huang の方法, 逆に FindEdge を使ってから重み付き平均を取ることが画像解析の改良である .

(3) システム化

堅牢性と拡張性を上げるため, Huang の方法をシステム化する . 具体的には, 手続き型言語を使ってコード化されている Huang の方法をオブジェクト型言語でコード化する . GIS, カメラ, デジタル画像, 構造物輪郭にそれぞれ固有のオブジェクトを定義し, カプセル化することで堅牢性を向上させる . 同時に, 各オブジェクトが独立してコード化されるため, 個々のオブジェクトを他と切り離して高度化することも容易である . この意味で拡張性も高くなる .

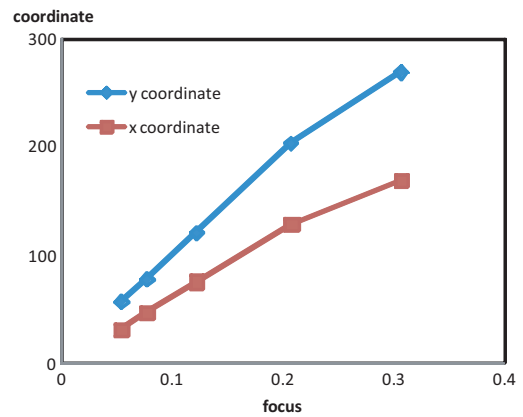
本研究は C++ を用いる . 実際に作成されたクラスは, GIS のファイルを示す GIS, カメラとデジタル画像を表す Camera と DigitalImage, 輪郭位置を図形として表現する Target である (図 4 参照) . 実際の GIS にはさまざまなフォーマットがあるが, GIS はこの GIS から構造物の形状データを共通のフォーマットで記述することで適用性を上げている . Camera は監視カメラの位置と焦点距離等の特性をデータとする . DigitalImage はカメラ画像のピクセルデータを格納し, GIS と Camera を利用して, 想定された構造物の輪郭位置付近の小領域を抽出する . この小領域のピクセルデータに誤差関数を使った画像解析が適用される . Target は, 画像内のサブピクセル単位で計測される輪郭位置である .

3. 画像解析の高度化

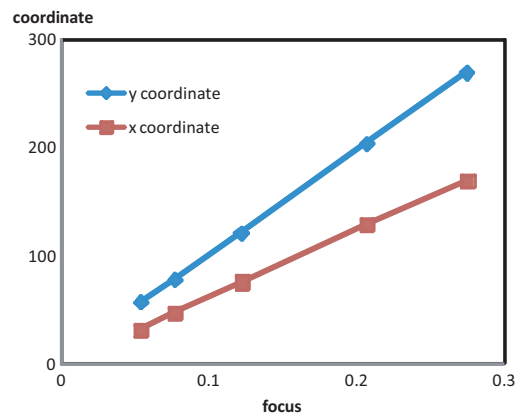
(1) カメラ画像内の輪郭位置計算

カメラ画像内に撮影される構造物の輪郭位置計算は原理的には簡単である . 式 (1) と式 (2) に示すように, カメラの位置 ($[O]$) と特性 (向き $\{[N], [H], [U]\}$, 焦点距離と歪度から決まる $\{M_h, M_v\}$) を決めれば計算ができる .

高精度の GPS を使うと, カメラの位置は, 水平方向に数センチ, 鉛直方向に 10 数センチの精度で決定される . カメラ画像の 1[pixel] が 10[cm] に対応する場合, この精度は十分高い . また, GIS や地図を使って 1メー



a) 焦点距離を補正しない場合



b) 焦点距離を補正した場合

図-5 焦点距離と画像内の位置の関係 .

トル程度の精度で位置を決定した場合, これはカメラ画像の 10[pixel] 程度に対応する . Huang によれば, カメラ位置が高精度で決まる場合, 画像解析用に使われる解析ウィンドウの大きさは走査する方向に 20[pixel] もあれば十分であるとされている . カメラ位置の精度が悪い場合, 例えば上記の場合は, 10[pixel] 程度, 大き目に解析ウィンドウを取れば良いことになる .

カメラ特性の向きの内, 通常, 鉛直方向の単位ベクトル $[U]$ は $[0, 0, 1]$ である . カメラの向きの単位ベクトル $[N]$ の決定は難しく, 精密なコンパスが必要である . $[N]$ が計測されれば $[H] = [N] \times [U]$ より計算できる . カメラ特性の内, 焦点距離 f , 撮像素子の長辺 h が与えられると, M_h は次のように計算される .

$$M_h = \frac{2f}{h} \quad (10)$$

M_v も同様に撮像素子の短辺 v を与えれば求めることができる . 自動フォーカスのカメラでは, カメラに表示される焦点距離が実際の焦点距離と異なる場合がある .

カメラの位置と特性を計測・設定し, GIS に蓄積された構造物の形状データを使い, カメラ画像内に撮影される構造物の輪郭位置を計算した . 一例として, 同一構造物に対し, 焦点距離を変えた場合の画像内の輪

	Error	μ	σ
従来の方法	0.368644	11.9998	0.958037
新しい方法	0.114395	11.9924	0.166378

表-1 画像解析の精度の向上：最小化アルゴリズムの組み合わせ。

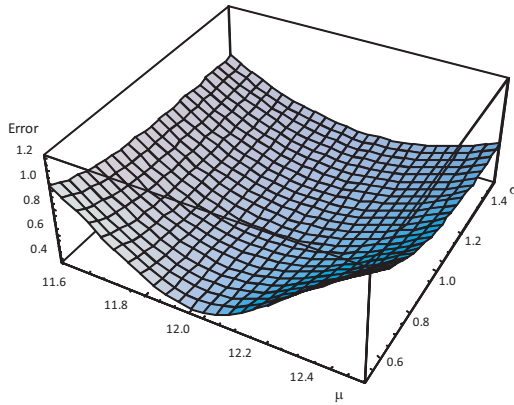


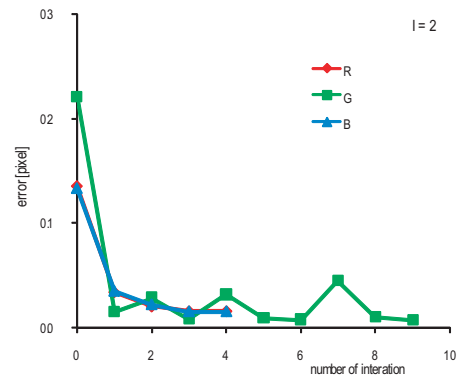
図-6 一つの走査線での $E(\mu, \sigma)$.

郭位置を図5に示す。原理通り，ほぼ線形の関係が得られている。一つ直線から外れた位置はカメラで表示される焦点距離に誤差があるためである。位置の x 座標の直線に乗るよう焦点距離を補正すると， y 座標も直線に乗るようになる。また補正された焦点距離を使うと，他の構造物の輪郭位置も焦点距離と直線関係が得られるようになる。

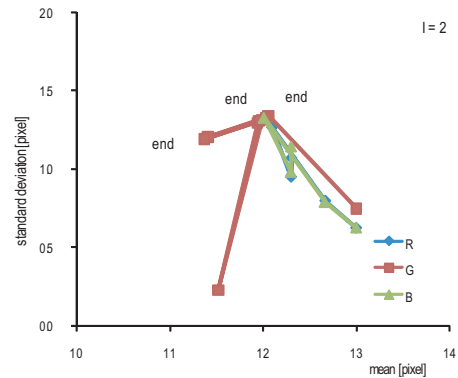
(2) 輪郭位置計測の画像解析

表1に，式(4)のアルゴリズムを使った画像解析の結果と，式(4)と式(5)のアルゴリズムを組み合わせた画像解析の結果を示す。 E が小さくなっている。図6に示すように最小化の対象となる E が (μ, σ) の比較的平坦な関数となっているため，このようなアルゴリズムの組み合わせがより良い最小解を見つけることに貢献する。

RGBのピクセルデータを直接利用した画像解析の結果を図7に示す。 $i = 2$ の走査線において，RGBの各々で $(\mu^{R,G,B}, \sigma^{R,G,B})$ の増分を計算すると次第に E の値が小さくなり，それに応じて $(\mu^{R,G,B}, \sigma^{R,G,B})$ が収束する様子が見える。なお E の値が増えた場合，アルゴリズムが交代する。各々の E の最小値はほぼ同じであり， $(\mu^{R,G,B}, \sigma^{R,G,B})$ はほぼ同様の値である。数値計算の手間は約3倍になるものの，同一の精度の計測を3度繰り返したと考えれば， $\bar{\mu}$ の精度は各 $\mu^{R,G,B}$ もしくは μ^X の $1/\sqrt{3}$ 程度に改善されることが示唆される。



a) 誤差



b) 解の軌跡

図-7 画像解析の精度の向上：RGBデータの利用。

4. 位置変化の計測精度

Huang は，地震被害推定手法のプロトタイプを使って，実構造物の輪郭位置を計測する精度を検証した。実地震が構造物に損傷を与え変形が起こる場合，構造物の輪郭の移動を測定する精度は，位置の精度と同程度であることは期待できる。この点を実証するため，構造物を動かす代わりに，撮影に使うカメラを精密に動かし，カメラ画像のずれからカメラの移動量を推定することを試みた。

撮影用のデジタルカメラをXYステージに設置し，カメラの軸方向と直角方向にカメラを移動させる。移動のたびごとに撮影を行う。ターゲットとなる構造物を定め，撮影された全てのカメラ画像に地震被害推定手法を適用して，構造物輪郭位置を計測する。2枚のカメラ画像を比較することで得られる輪郭の移動量はピクセル単位であり，Huangによればその精度はサブピクセルである。移動量を実空間の長さに変換し，画像解析のサブピクセルの精度が実空間ではどの精度になるかを確認する。

カメラ軸方向，約150[m]の距離にある構造物をターゲットとする。XYステージを使って0.005[m]単位で



図-8 画像解析が適用される輪郭付近の画像 .

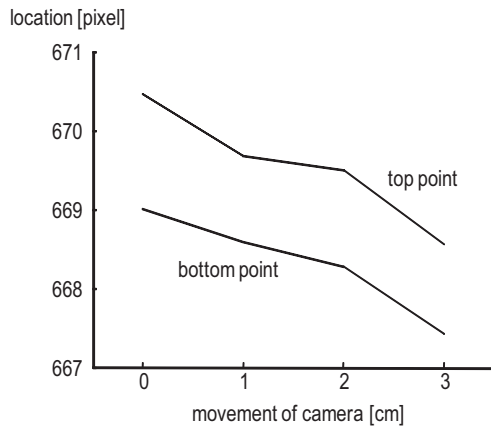


図-9 カメラの移動量と画像の移動量の関係 .

カメラを移動させて撮影する．輪郭位置付近の解析ウィンドウの画像を図 8 に示す．カメラの移動量と画像解析によって計測された輪郭位置の関係を図 9 に示す．輪郭の上端と下端とも，概ね直線に乗っていることがわかる．実際，直線からのずれはサブピクセルの単位である．焦点距離から計算される $1[\text{pixel}]$ は $1[\text{cm}]$ 程度であり，これは $0.005[\text{m}]$ の輪郭位置の移動を $\pm 0.0005[\text{m}]$ で計測したことを意味する．

5. おわりに

本研究は，Huang が考案した地震被害判定手法に対し，構造物の輪郭位置計算を効率化し，輪郭位置計測の画像解析を高精度化するという高度化を試みた．あわせてオブジェクト型言語を使った統一的なコードを作成した．Huang の方法がシステム化されていないため，効率化を定量的に図ることはできないが，計測の自動

化は実現され，効率性は大幅に向上した．また，RGB のピクセルデータを変換して得られる Gray スケールのピクセルデータを使わずに，直接 RGB のピクセルデータを使うことで約 $\sqrt{3}$ 倍の精度向上が見込まれている．

参考文献

- 1) C. S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, *Assessing and Managing Earthquake Risk*, Springer, 2006.
- 2) H. Hasegawa, F. Yamazaki, M. Matsuoka, and I. Sekimoto, Extraction of Building Damage due to the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake from Aerial HDTV Images, *Processing of Asian-Pacific Symposium on structural Reliability and its Application NCREE*, pp. 280–288, 1999.
- 3) A. Yamamoto, H. Hanaizumi, and S. Chino, A change detection method for remotely sensed multispectral and multitemporal image using 3-D segmentation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 39, pp. 976–985, 2001.
- 4) Y. Kosugi, M. Sakamoto, M. Fukumishi, W. Lu, T. Doihara and S. Kakumoto, Urban Change Detection Related to Earthquakes Using an Adaptive Nonlinear mapping of High-Resolution Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 1, No. 3, 2004.
- 5) S. Leprince, S. Barbot, F. Ayoub and J. Avouac, Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 6, June, 2007.
- 6) L. Huang, Development of automated structural damage estimation system based on GIS-aided edge detection of digital images, the Doctoral thesis, Department of Civil Engineering, the University of Tokyo, 2008.
- 7) L. Huang, K. Oguni and M. Hori, Preliminary Study on Digital Images for Automated Identification of Structural Damages by Edge Detection, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, Vol. 10, 2007.
- 8) POV Team, *POV-Ray Reference for POV-Ray Version 3.6.1* (Available on www.povray.org).
- 9) D. A. Forsyth and J. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall, 2003.
- 10) R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, 2006.

Improvement of seismic structure damage diagnosis method that uses highly-accurate image analysis

Shintaro UMINO and Muneo HORI

Huang has proposed a method of measuring movement of building configuration caused by an earthquake by making use of geographical information system and image analysis. This paper improves this method, mainly refining the image analysis and makes a code for the method using an object-orient programming language. The improvements are 1) the computation of configuration location in a digital image, 2) the application of sophisticated algorithm for the image analysis, and 3) the use of RGB pixel data instead of gray-scale data. It is shown that higher accuracy is obtained in measuring building configuration and the accuracy of measuring the movement is examined.