

# ピクセルフリーな画像解析による変形計測

Deformation observation using pixel free image analysis

上野 勝利

徳島大学大学院 准教授

## 1. はじめに

地盤の破壊メカニズムの解明や土の力学モデルの構築には、変形性状の精密な把握が第一歩である。そこで模型実験では色砂や素麺を用いて縞模様をつける、多数の標点を埋設するなど、様々な工夫がなされてきた。デジタルカメラの普及も久しく、近年では画像解析により地盤の変形を計測することも珍しくはなくなった。特に模型実験による、数値解析の手法やパラメタの検証に有効である（口絵1<sup>1)</sup>）。一方、画像の品質によっては計測ができない場合も少なくない。本稿ではピクセルフリーな画像解析による変形計測について紹介するとともに、良好な計測結果を得るための注意点について説明する。

## 2. 画像解析方法

図1は、画像解析による変形計測の流れについて示したものである。便宜上筆者らが開発している画像解析プログラム TN-SKIP<sup>2)</sup>を例に説明する。なお SKIP という名称は、Surface Kinematometry by Image Processing, あるいは Subpixel Kinematometry using Interpolated Pixel data を意味している。

TN-SKIP では、変形前の画像からテンプレートと呼ばれる小画像を抜き出し、変形後の画像に重ね合わせ、最も一致度の高い箇所を探索している。この操作はテンプレートマッチングと呼ばれる。SKIP では一致度の判定に式(1)に示す相互相関係数を用いている。式中の  $v_{1i}$ ,  $v_{2i}$  はそれぞれ変形前後の小画像の輝度データをベクトル化したものである。小画像は着目点を中心に、 $(2n+1)^2$  の大きさとしている。なお画像データの前処理として、輝度データの移動平均をあらかじめ求めておき、 $v_{1i}$ ,  $v_{2i}$  から差し引いておくと、輝度変化の乏しい画像のマッチングに効果がある。

$$R_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i} \cdot v_{2i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{1i}^2 \sum_{i=1}^{(2n+1)^2} v_{2i}^2}} \dots\dots\dots (1)$$

画像データは平面的に離散化された輝度データの集まりである。長さの最小単位が画素サイズによって規定さ

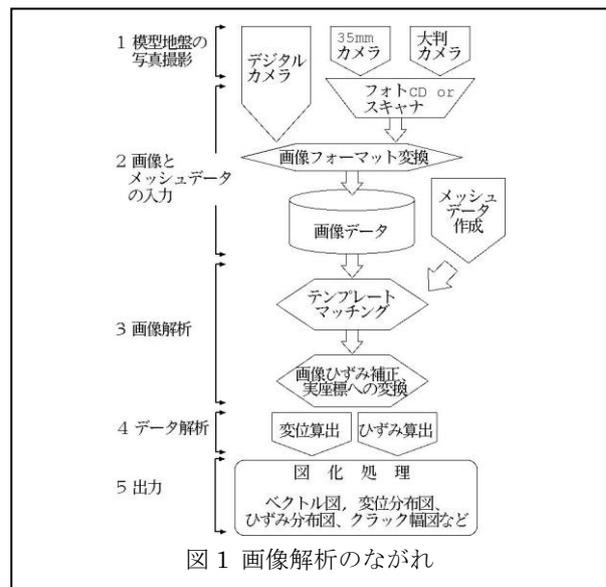


図1 画像解析のながれ

れるため、変位計測には都合が悪い。大きな変形に対応するには、逐次的に複数回画像を撮影し解析を行う必要がある。画素刻みの相関係数を求め、相関係数を補間して最大値を求める従来の方法では、開始点が画素によって規定されるため、解析のステップが進むと誤差の累積が大きくなる。より正確な計測のためには、補間によって任意点の輝度データを生成し、pixel free な解析を行う必要がある。TN-SKIP では、勾配法<sup>3)</sup>を工夫した探索アルゴリズムにより、現実的な解析時間で相関係数の最大値を与える点を決定している。

テンプレートマッチングが終わった段階で得られる結果は、画像上の座標であるので、実物の座標に変換する必要がある。画像上の座標と実座標を関連付けるために、画像の中に実座標が明らかな基準点を4点設ける必要がある。実座標への変換の過程で、カメラの傾きやブレなどによる画像のゆがみの補正を行っている。基準点に対しても画像間でのテンプレートマッチングを行うことにより、変形前後の画像でカメラの位置が多少ずれても対応できるようにしている。

変形前の画像から抜き出したテンプレートの中心点と、変形後の画像の一致点の実座標上の差が、画像の撮影段階での変位増分となる。有限要素法と同じように、要素と節点を関係づけたメッシュデータを用意して、各節点

について変位を計測すれば、変位分布に加えてひずみの分布も算出することができる。画像解析と有限要素法で同じメッシュを用いると、解析の検証やパラメタの決定に便利であるため、市販の FEM 用プレポストで作成したメッシュデータを読み込めるよう、最近改良を加えた。

少し珍しい図化出力として、要素内の節点間の最小主ひずみ  $\varepsilon_3$  方向の相対変位を算出し、その大きさ毎に色分けをしてクラック幅図として出力している。口絵-2 は繰返し組合せ荷重を受ける RC 壁体の変形計測結果の一例で、荷重に伴って開閉するせん断クラックが検知されている<sup>4)</sup>。

### 3. 計測誤差について

画像解析の失敗や計測誤差の原因の多くは、画像の獲得に起因している。今までの経験から注意点を説明する。

#### 3.1 画像に起因する問題

輝度や色の変化パターンから2つの画像の類似性を判別しているため、画像の撮影に当たっては、よりシャープなピントで、コントラストの高い、高画素の画像を得ることが必要である。露出はオーバーとなるよりは、アンダー気味のほうがよい結果を得やすい。観測面に色砂をごく薄く撒くなどして変化をつけると失敗が少ない。砂の着色には、マジックインクの補充液をお勧めする。

画像のフォーマットは非圧縮のもの、あるいは元の画像データを復元できる可逆変換のものがよい。RAW, TIFF, BMP などのフォーマットが該当する。デジカメで一般的な JPEG フォーマットは、元のデータが復元されない不可逆な圧縮フォーマットのため、可能ならば避けたほうが良い。

カメラの操作も精度に大きく影響する。設定は、マニュアル設定がよい。手ぶれ機能やオートフォーカス、自動露光などの自動機能は、一連の獲得画像の撮影条件を変える恐れがあるので、使用しないほうがよい。カメラは撮像面が観測面と平行になるよう、また軸の回転がないようにし、実験中にカメラと観測面との位置関係が変わらないように設置する。シャッターは手ぶれを防ぐため、リモコンやレリーズ式が必須である。

画像の撮影は可能な限り短い時間間隔で行う。特に崩壊などの過渡的な現象、動的変形問題、荷重制御の載荷試験など、変形の制御が難しいケースでは、動画から画像データを生成することも検討する。

画像は白黒でもカラーでも対応している。古い実験の写真を解析する場合は、イメージキャナ等を用いて TIFF などの画像データに変換すればよい。

画像の品質が良好であるにも関わらず、まったくマッチングができない場合は、画像のフォーマットが解析プログラムと合致していないか、探索範囲の指定が適切でない可能性が高い。

#### 3.2 テンプレートマッチングの誤差

画像のパターンが単調である場合や変形が大きな場合は、テンプレートマッチングの失敗や計測誤差が生じる。

人工的に変形を与えた画像を用いた検証から、平行移動の場合で0.05画素、30%以内のひずみが生じた場合で0.2画素以下の誤差が生じることを確認している<sup>2)</sup>。誤差はテンプレートの大きさにも依存し、平行移動ではテンプレートが大きいほど誤差が小さくなった。一方、変形を与えた場合には、 $21 \times 21 \text{ pixel}^2$  ないしは  $41 \times 41 \text{ pixel}^2$  程度の場合が、最も誤差が小さくなった。

#### 3.3 実座標への変換による誤差

撮影の際にカメラと観測面の平行が保たれていない場合や、焦点距離が短くレンズのひずみが大きな場合、座標変換を行っても、座標や変位にはある程度の誤差が生じる。ただし、一連の画像の撮影中にカメラの条件が変わらなければ、ひずみの測定値への影響は少ない。

図2は4号珪砂を詰めた砂箱を右方向に0.1mmずつ平行移動し、砂箱表面の297点について0mm~0.1mm、0.1mm~0.2mmと逐次的に変位計測した結果の分布を示している。用いた画像の画素サイズは0.143mm/画素であり、与えた変位増分の0.1mmより粗い。測定結果は±0.02mm程度のばらつきが見られるものの、画素サイズの影響を受けずに与えた変位増分を中心に分布している。要因毎の誤差割合はわからないが、実際の測定結果からピクセルフリーな計測が実現できていることがわかる。

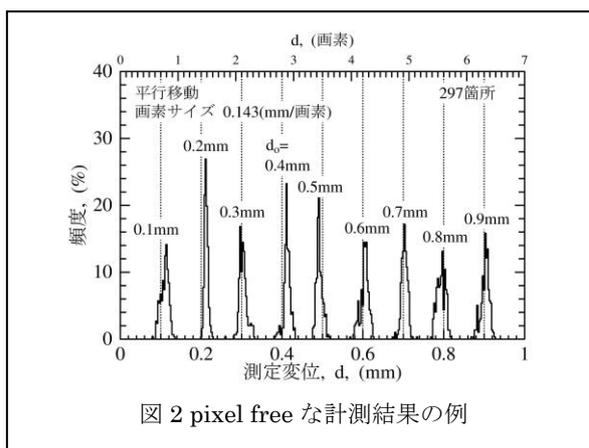


図2 pixel free な計測結果の例

#### 参考文献

- 1) Sreng, S., Y. Liu, A. Mochizuki and K. Ueno : Centrifugal loading tests of adjacent foundations and their FE-analysis using a new elasto-plastic model, ICPMG '06, Vol. 2, pp.1553-1558, 2006.
- 2) Ueno, K., Sreng, S., Kobayashi, K.: Surface Kinematometry by image processing for geotechnical model tests, ICPMG 2014, Vol. 1, pp. 337-343, 2014.
- 3) たとえば戸川隼人: シリーズ新しい応用の数学 17 共役勾配法, 教育出版, p. 32, 1977.
- 4) 徳島大学基礎工学研究室, 画像解析による地盤の変位場解析の模型実験への適用に関する研究, 西松建設株式会社受託研究平成 13 年度報告書, pp. 71-92, (財)災害科学研究所, 2002.

