

デジタル画像計測法による変位計測

四国職業能力開発大学校 秋 本 圭 一

Displacement Measurement by Vision Metrology

Keiichi AKIMOTO

要約 デジタル画像計測法とは、デジタルカメラで対象物を撮影し、その画像から対象物の3次元形状を計測する方法である。今回この方法を物体の変位計測に適用した。変形前後の座標を計り、その差を取るのだが、基準点のない計測では計測ごとに座標系が異なるという問題がある。そこで変形後の座標系を変形前の座標系に変換する。実測例として、コンクリート柱の荷重試験とアラミドロッドの引張試験を示した。前者では $20\mu\text{m}$ の、後者では $11\mu\text{m}$ の精度で変位が測定できた。本方法は、多数の点の変位を簡易かつ安価に精度よく計れるという利点があり、さまざまな場面で応用することができる。

I はじめに

画像計測法とは、デジタルカメラで対象物を撮影し、その画像から対象物の3次元形状を計測する方法である⁽¹⁾⁽²⁾。著者らはこれまでこの方法を開発してきたが、計測対象としては、橋やトンネルなど比較的大型の構造物が主であった⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの対象には他の計測方法が少なく、簡易で高精度な手法の要求が高かったからである。

一方、画像計測の特長のひとつに、多数の点の座標を同時に計測できることがある。今回はこの特長を活かして、従来よりは小規模の対象の変位・変形を計測する実験をおこなった。その結果、十分実用的な精度で計ることができたので報告する。計測上の工夫についても述べる。

変位計測は、金属やコンクリート等の材料の試験、機械やプラント設備の保守管理、土木建築分野での変位監視など広い分野で高い需要がある。

現在この種の変位・変形計測にはダイヤルゲージ、差動トランス、光学式変位センサーなどが用いられている。このとき多数の点を計ろうとすると設置や配線などの手間が大変であった。本方法を用いると安価かつ容易に目的を達することができる。

まず第2章で変位計測手法を説明する。次に第3章ではコンクリートの変位を、第4章ではアラミドロッドの伸び量を計測した実例を示す。

II 画像計測法とそれによる変位計測

1 画像計測法の原理

この章では画像計測法の原理を説明する⁽⁵⁾。図1に示すように、対象物をいろいろな方向からデジタルカメラで撮影する。すると、対象物上の点は複数の写真に写る。

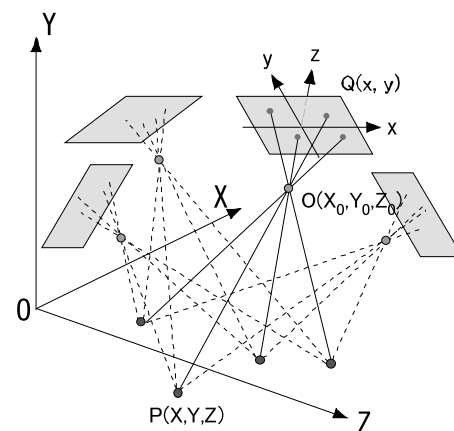


図1 画像計測法の原理

ここでX-Y-Zは対象空間座標系であり、x-y-zはカメラ座標系である。P(X,Y,Z)は対象物上の任意の1点である。カメラ座標系の原点O(X₀,Y₀,Z₀)はレンズの中心であり、PからOに向かう方向にz軸をとる。そしてx軸はCCD面の横方向に、y軸はCCD面の縦方向に取る。OとCCD面との距離をc(これはレンズの焦点距離と等しい)とすると、CCD面上に得られた点Pの像Qはカメラ座標系で(x,y,-c)と表される。以下の説明では厳密には第j写真の第i点の像座標を表すためにx_{ij}のように表記すべきであるが、添字i,jは煩雑になるため省略する。

図1においてP、QおよびOの3点は直線上にある。よってλを定数として

$$\vec{OQ} = \lambda \cdot \vec{OP} \quad (1)$$

と書ける。X-Y-Z座標系のx-y-z座標系に対する回転行列をM=(m_{kl}),(k,l=1,2,3)とにおいて、式(1)を座標成分で表示すると

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = \lambda M \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。回転行列Mは図2に示すような3つの角度、すなわち水平角θ、鉛直角φ、および回転角κによって表現される。

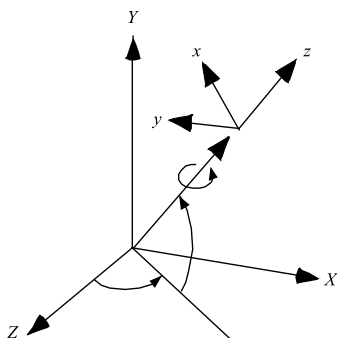


図2 回転角を示す図

式(2)を成分ごとに計算し、その結果得られた第3番目の成分を第1、第2番目の成分に代入してλを消去すると次の式を得る。

$$\left. \begin{aligned} x &= -c \cdot \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \\ y &= -c \cdot \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \right\} (3)$$

この式は共線方程式と呼ばれる。ここで像の座標(x,y)は実際に計ることができるので既知変数である。しかし残りの変数、すなわち対象点Pの座標(X,Y,Z)、

カメラ位置(X₀,Y₀,Z₀)およびカメラ回転角(θ,φ,κ)(m_{ij}という形で式の中に入っている)はいずれも未知である。

一例として50個の対象点を10枚の写真に写した場合を考えてみる。すべての点がすべての写真に写ったとすると、像の数は500であるから共線方程式の数は1000となる。これに対し未知数は、対象点の座標=50×3=150、カメラの位置・回転に関する未知数=10×6=60のあわせて210である。したがって基本的に、多数の像に対して方程式(3)を作れば、それらを解いてすべての未知数を知ることができる。

ここで二つの問題がある。ひとつはレンズひずみの問題であり、もうひとつは具体的に方程式(3)をどのように解くかという問題である。まずレンズひずみについて述べる。

ここで使用するカメラおよびレンズは一般用であり、測量専用のカメラではない。レンズひずみは大きいので、補正しなければならない。著者は次の式で表されるレンズひずみモデルを共線方程式(3)に組み込んでいる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -x_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_p) \\ &\quad + P_1 \{r^2 + 2(x - x_p)\} + 2P_2(x - x_p)(y - y_p) \\ \Delta y &= -y_p + (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_p) \\ &\quad + 2P_1(x - x_p)(y - y_p) + P_2 \{r^2 + 2(y - y_p)\} \end{aligned} \right\} (4)$$

ここでΔx,Δyはレンズひずみ補正量、x_p,y_pは主点位置(レンズの中心軸とCCD中心とのずれ)である。またr²=(x-x_p)²+(y-y_p)²であり、K₁,K₂,K₃は半径方向ひずみの係数、P₁,P₂は円周方向ひずみの係数である。式(3)の左辺xおよびyをそれぞれx+Δx、y+Δyに置き換えれば、CCD面上の像の座標が補正できる。ここで現れた未知パラメータは、次に述べるように、共線条件式(3)を最小二乗法で解くとき、他の未知数とともに決定される。すなわちレンズひずみモデルは解を得る過程で自動的に決定されるので、この方法は自己校正法と呼ばれている。

つぎに方程式の解法について述べる。式(3)および式(4)は未知パラメータについて非線形であるため、これを初期値の周りでテーラー展開して線形化する。

各写真、レンズひずみ、および対象点座標に関する補正パラメータベクトルをそれぞれx₁,x₂,x₃とおく。すなわちiを対象点番号、jを写真番号として

$$\begin{aligned} x_1 &= [\dots \Delta X_{0j} \Delta Y_{0j} \Delta Z_{0j} \Delta \theta_j \Delta \varphi_j \Delta \kappa_j \dots]^T \\ x_2 &= [\Delta c \Delta x_p \Delta y_p \Delta K_1 \Delta K_2 \Delta K_3 \Delta P_1 \Delta P_2]^T \\ x_3 &= [\dots \Delta X_i \Delta Y_i \Delta Z_i \dots]^T \end{aligned}$$

である。ここで Δ はそれぞれの量の補正量を表し、 T は行列の転置を表す。写真の枚数を m 、対象点の数を n とすると x_1, x_2, x_3 のサイズはそれぞれ $6m, 8, 3n$ である。

線形化された方程式は

$$v + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 = e \quad (5)$$

と表される。ここで v は誤差ベクトル、 e は残差ベクトル、 A_1, A_2, A_3 はそれぞれ x_1, x_2, x_3 に対応する係数行列である。誤差ベクトル v の二乗和 $v^T v$ を最小にする解 \hat{x} は

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T e \quad (6)$$

と与えられる。ただしここで $A = [A_1 \ A_2 \ A_3]$ である。次にこの \hat{x} を初期値として再び式(3)を線形化し、次の最小二乗解を計算する。この操作を解が収束するまで繰り返す。この計算を調整計算と呼ぶ。

最終的に残った残差 e から、未知パラメータの分散共分散行列が次のように計算できる。

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sigma_0^2 (A^T A)^{-1} e \quad (7)$$

ここで σ_0^2 はCCD面上における誤差の分散である。本手法の精度は式(7)によって計算されたものである。 $\Sigma_{\hat{x}}$ は式(3)および式(4)をデータに当てはめたときの当てはめ誤差の分散である。

実際に方程式を解くとき、式(6)における逆行列は計算できない。なぜなら係数行列 A にはランク落ちが存在するからである。ランク落ちは、写真上の像の情報からだけでは、対象物の相対的位置関係だけしか定まらないことを意味する。この問題に対処する方法に関する数学的な議論はここでは省略する。しかし画像計測法の原理は以上でつくされている。

理論的な面の説明は以上で終わり、次に実際上の手順について説明する。

- (1) 対象物上に反射ターゲットを貼る。反射ターゲットは円形をしており、ストロボを用いて撮影したときその光を反射し、CCD面上に明瞭な円または楕円形の像を結ぶ。ターゲットを貼る労力が必要ではあるが、一方それによって精度の向上がもたらされている。
- (2) 基準尺を置く。基準尺とは両端にターゲットを貼った棒で、ターゲット間距離はあらかじめ正確に測定されている。対象物の近傍に置いて、それと同時に撮影する。調整計算の後、両端の像の距離を基準にして対象物の縮尺を決定する。
- (3) 対象物を撮影する。撮影の方向と写真枚数は、結

果の精度の影響する。図1に示したように P の像の数に等しい光線が P を通過している。これらの光線の交点の作る領域が P の空間座標を与える。光線の交わる角度に依存して P の存在範囲は大きくも小さくもなる。光線の角度を互いに分散させることが精度向上に役立つのは直感的に明らかであろう。

- (4) 写真面上の像の座標 (x, y) を求める。反射ターゲット像は周囲に比較して明度が高く、白く写る。画面上におけるこの像の重心位置は通常の画像処理技法によって容易に求めることができる。
- (5) ターゲット番号を認識する。異なる写真に写っている同一の像には同じ番号をつける。著者はこの作業を自動化している。ただしある特定の点の像が最初に現れたときには手動介入が必要である。手順は下記〈注1〉参照。
- (6) 連立方程式を解いて解を求める。このとき線形化のための初期値が必要である。著者は少数(少なくとも6個)のターゲットの概略座標を別途測定し、その情報から他の初期値を算出している。
- (7) 大誤差を除去する。ターゲット像の欠け、ストロボ光量の不足、番号のつけ間違いなどさまざまな原因で大誤差が発生するので、そのようなターゲット像を計算からはずし、再度調整する。大誤差がなくなるまで繰り返す。

〈注1〉ターゲットの自動認識

ターゲット像を認識する方法は次のとおりである。手順は前方交会と後方投影の二つからなる。

ステップ1：前方交会

あるひとつのターゲットについて、最初に現れた2枚の写真については手で番号をつける必要がある。それぞれの写真の外部標定(撮影位置・角度)は基準板の像にDLTを適用することによって求められる。そこで2点を通る光線を前方に延長し、これらが交わる点をターゲットの座標とする。図3参照。この操作を前方交会と呼ぶ。二本の光線は厳密には交わらないので、実際には最近接点の座標を求めている。

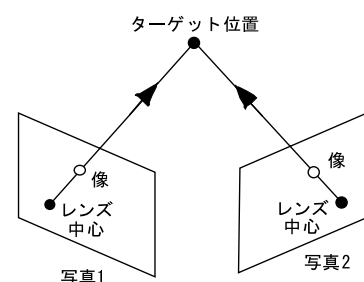


図3 前方交会

ステップ2：後方投影

第三の画像についても同様に基準板から外部標定が求まる。ステップ1でターゲットの概略座標が求められているので、今度は図4のようにレンズ中心に向かって光線を伸ばす。この光線と画面との交点がターゲット像のおよその位置である。

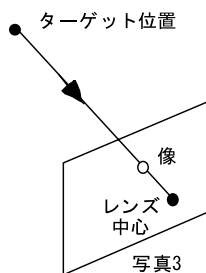


図4 後方投影

以上の2ステップでほとんど間違いなくターゲット像の番号づけができる。ステップ1の自動化が現在の課題である。

2 変位算出法

変位を計るには次のようにする。すなわち、変形前の静止状態において必要枚数の写真を撮り、計測点の3次元座標を算出する。次に対象物が変形した後の静止状態において、同様にして計測点の座標を求める。そして両座標値の差を取る。この差が変位量である。

ところがこのとき、ひとつ問題がある。画像計測法では、対象物の相対的形狀は正確に測れるが、絶対座標は測れないということである。すなわち、まったく変位がない場合であっても、2回の測定で算出される同一点の座標は異なる。言い換えれば、測定ごとに異なる座標系で対象点座標が表現される。その理由は、基準点(予め座標が分かっている点)をふつうは置けないからである。このため、座標系を固定しないフリーネットワーク法で解を求める必要があり、上記のような事情は避けることができない。

そこで変形前後の2回の測定で得られた座標値を比較するときは、次のようにする。

- 1) 変形後の形状を、変形前の形状に重ね合わせるように座標変換する。座標変換は、回転・平行移動・伸縮の3つの変換の合成である。
 - 2) 上記操作を行った後、対応する点の座標の差をとる。
- そこで重要なのは、手順1)の重ね合わせの方法である。以下これについて説明する。

重ね合わせの基準は最小二乗誤差である。計測の重みが一様な場合、特異値分解を用いて簡易に解くこと

ができる。

変形前後のn個の計測点の座標をそれぞれ x_i, y_i ($i=1, \dots, n$)とする。両者の関係は、次のように表される。

$$x_i = sM(y_i - t) + v_i, \quad i=1, \dots, n \quad (8)$$

ここでsはスケール比(伸縮の割合)、Mは座標回転行列、tは平行移動ベクトル、vは誤差である。

簡易法は、伸縮、回転、平行移動の3つの操作が、互いに相互関係なく独立に行えるという仮定のうえでこれら各操作量を求める。本来はこれらの操作は互いに関連するはずである。

最初にスケール比を計算する。スケール比は、それぞれの計測点の重心からの距離の二乗和が等しくなるように定める。まずそれぞれの計測点の重心座標を x_g, y_g とし、座標系の原点を重心に移動させると、座標値は $x_i - x_g, y_i - y_g$ となる。これを改めて x_i, y_i と置きなおす。とするとスケール比sは

$$s^2 = \sum x_i^T x_i / \sum y_i^T y_i \quad (9)$$

として求めることができる。ここで総和記号は計測点全点の和を取ることを意味する(以下同じ)。このスケール比を変形後の座標に乗じてスケールをあわせ、改めて y_i とおく。以上でスケール調整が終わったが、重心を原点に取り直したことによって平行移動も終わっている。

最後に回転行列Mを求める。重ね合わせの誤差は

$$v_i = x_i - My_i \quad (10)$$

で表されるから、誤差の二乗和をEとすると

$$E = \sum v_i^T v_i = \sum (x_i - My_i)^T (x_i - My_i) = \sum x_i^T x_i - 2 \sum x_i^T M y_i + \sum y_i^T y_i \quad (11)$$

となる。ここでMは直交行列であるから $M^T M = I$ (Iは単位行列)となる性質を用いた。式(11)を最小にするようなMを求めるのが目標である。

式(11)の第1項と第3項は一定だから、Eを最小にするには第2項を最大にすればよい。

$$E_1 = \sum x_i^T M y_i = \sum \text{trace} \{x_i (M y_i)^T\} = \text{trace} \{(\sum x_i y_i^T) M^T\} = \text{trace} \{NM\} \quad (12)$$

ただしここで $N = \sum x_i y_i^T$ とおいた。

この 3×3 行列Nを $N = USV^T$ と特異値分解する。ここでU、Vは直交行列、Sは特異値を対角項に持つ対角行列である。すると E_1 は

$$E_1 = \text{trace} \{USV^T M^T\} = \text{trace} \{V^T M^T U S\} \quad (13)$$

と変形できる。ここで行列のトレースは、積が実行できるならばその順序に無関係であることを用いた。これが最大になるのは $V^T M^T U = I$ となるときである。なぜなら $V^T M^T U$ の要素を (a_{ij}) とし、 S の対角項 (特異値) を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ (いずれも非負) とすると $\text{trace}\{V^T M^T U S\} = \lambda_1 a_{11} + \lambda_2 a_{22} + \lambda_3 a_{33}$ となる。ところが $V^T M^T U$ は直交行列であるから a_{11}, a_{22}, a_{33} の最大値は 1 であり、そしてそのときに E_1 は最大になるからである。 a_{11}, a_{22}, a_{33} が 1 のとき、他の要素はすべて 0 となる。よって $V^T M^T U = I$ となる。

以上のことから求める回転行列は

$$M = UV^T \quad (14)$$

として求められる。

次に二つの実測例を説明する。

III コンクリート試験体の変位計測

1 実験の説明

実験のようすを図 5 に示す。計測対象は鉄筋コンクリート柱である。この柱に左右から交番加重を印加し、鉄筋ないし補強材と変形量との関係を求めることが目的である。

対象物は基礎部と柱部から成っており、変形するのは柱部である。測定点として専用の反射ターゲット (反射部の径 5mm) を貼りつけた。ターゲットは柱前面に 5 列 (中心、 $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 55\text{mm}$) \times 20 段 (25mm 間隔)、柱左右中央にそれぞれ 1 列 18 段 (25mm 間隔)、基礎部に 20 点設置した。更に基礎部前面には、計測の便利のために使う基準板を置いた (図 5 中央下部の黒い板)。これの利用法は後述する。

使用したカメラは 18mm のレンズをつけた Nikon D100 (3008 \times 2000 画素) である。1 回の測定につき、対象に向かって左上、左下、正面、右上、右下の 5 ヶ所から各 2 枚ずつ、計 10 枚の写真をストックをたいて撮った。以下これを 1 セットという。荷重をかけるたびに対象をいったん静止させ、このような撮影を行った。最初から、最終的にコンクリートが破壊するまで、合計 31 セット撮影した。1 セットの撮影に要する時間は 1 ~ 2 分である。

撮影した結果はパソコンで解析する。1 セットの解析に要する時間は約 10 分である。この結果、各ターゲットの 3 次元座標が得られる。変位量はセットどうしの差をとればよいのであるが、このとき基準となる不動

点が必要である。ここでは、変形しないと考えられる基礎部のターゲットを不動点とした。これを基準に二つの計測値を比較して変位量を算出した。

2 処理手順

主要な処理についてのみ述べる。

(1) 外部標定要素の取得

各写真について撮影位置と姿勢の 6 変数を求める必要がある。この作業を容易に行うために前述の基準板を用いた。基準板は約 20cm 四方の板に 16 点のターゲットを貼ったもので、各ターゲットの座標はあらかじめ測定してある。

計算の手順は次の 2 ステップからなる。まず基準板の 16 点の像に対し、その空間座標を利用して DLT (Direct Linear Transformation)⁽⁶⁾ を適用する。DLT は初期値を必要としない方法だからである。しかし得られる解の精度は十分ではない。著者のプログラムではカメラの内部標定は既知として取り扱うことによって未知数を減らし、解の安定性を改善している。ただし予めレンズひずみパラメータが分かっているカメラ (校正済みカメラ) を使用することが前提である。カメラの校正作業は別途専用のターゲット場を用意して行っている。

次に第 2 ステップとして、DLT で得られた解を初期値に単写真標定を行う。これは繰返し解法であるため初期値を必要とするが解の精度は非常によい。当てはめ誤差の大きさが入力値の精度を表すため、元データの良否チェックにも使うことができる。

(2) バンドル調整

全写真について、ターゲット像の重心座標を求めたあと、自己校正つきバンドル調整を行う。この結果としてターゲットの 3 次元座標が得られる。本実験の場合、ターゲット像の数は 10 枚の写真で 1654 個であった。この規模で正味の計算時間は 5 秒程度である。計算上



図 5 実験のようす

の精度（モデル当てはめ誤差の標準偏差）はXYZ軸の平均で25.6μmであった。このとき画面上の誤差は約0.23μm（1画素の約34分の1）であった。

(3) 変位量の算出

二つの連続した実験で得られた同一点の座標の差をとれば変位量が分かるのであるが、そのためには両者の座標系を一致させておく必要がある。なぜなら上で述べたバンドル調整はフリーネットワーク調整なので、座標系は毎回異なっているからである。座標系を合わせる処理は次のようにした。

i) 座標系の変換

バンドル調整で得られる座標系は基準板の座標系である。それは初め基準板の座標で外部標定を算出し、以後それを使って他の座標を求めてゆくからである。これをコンクリート柱の辺に並行にとったXYZ座標系に変換する。

ii) 不動点の重ね合わせ

コンクリートの基礎部は変形しないので、基礎部のターゲットについて一方の座標を回転・平行移動して最小二乗誤差で他方に重ね合わせる。これで得られた変換を、変形部のターゲットにも適用した後、差をとる。重ね合わせはII 2の簡易法を用いた。繰り返し法でも計算してみたが有意な差は出なかった。今の場合、室内実験であるから強い撮影ネットワークが作れたため、計測精度がおおむね一様だったためである。

3 計測結果

異なるセット間で不動点のターゲットどうしを重ね合わせたとき、本来はぴったり重なるはずであるが、実際には誤差がある。この誤差が計測誤差であると考えられる。31セットの計測から30の重ねあわせが得られた。これらの誤差（標準偏差）の最大は20.1μm、最小は7.4μm、平均は11.3μmであった（図6参照）。したがってこの一連の測定には、おおむね20μm以上の精度があると結論してよいと考える。

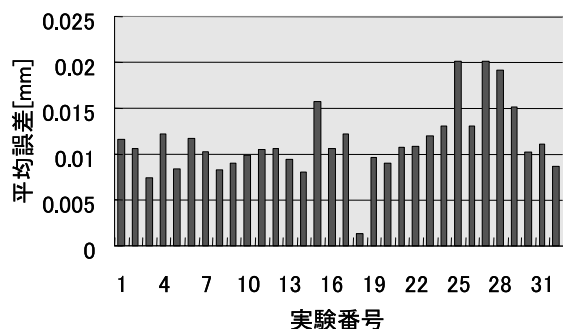


図6 重ねあわせ誤差

測定結果の一例を図7に示す。この図はセット1（荷重をかける前）とセット2（最初の右からの加重）との変位を3倍に拡大して示したものである。

その後さらに測定点数を増やして、本方法はコンクリート梁の曲げ試験に適用された⁽⁷⁾。

IV アラミドロッドの伸び計測⁽⁸⁾

アラミ繊維はその引っ張り強度の大きさから、近年土木建築用途にも用いられている。ここで実験したのは、繊維を編んでワイヤーロープにした後、樹脂で固めて棒状に加工した製品である。鉄筋の代わりにコンクリート内に埋め込めば、錆びないので設備寿命の延長が期待できる。

この製品の出荷検査のひとつに、伸び試験がある。引張試験機にロッドを設置し、引張荷重をかけながらロッドの伸び量を測定する。伸び量の測定方法として、ひずみゲージ、変位計および伸び計の3種類のセンサーが用いられている。

ひずみゲージは直接ロッドに接着剤で貼り付ける。変位計はロッドに取り付けた当て板に先端を押し付け、軸の移動量をひずみゲージで電気量に変換する。伸び計とはコンパス状の道具で、コンパスの両端をロッドに取り付ける。ロッドが伸びればコンパスの足が広がるので、その変化をひずみゲージで計測する。

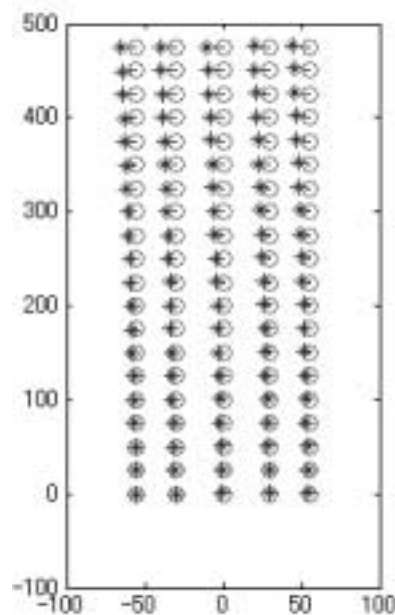


図7 測定結果の一例

○変形前の位置 *変形後の位置
ただし変位は3倍に拡大してある。

ところが、複数のセンサーをつけると往々にしておきる問題ではあるが、これらの計測値が一致せず、どれが本当かわからないという事態が生じていた。そこでこの問題に対し、画像計測法を用いてみることにしたものである。図8に試験の状況を、図9に他のセンサを、図10にデジタル画像の一例を示す。

図9において、中央垂直の棒が試験対象のアラミドロッドであり、それをはさむように取り付けられているのが伸び計である。右側の筒状の機器が変位計で、上部の軸を対象に押し当てる。この写真はまだ取り付け前である。ひずみゲージはロッド上部に貼り付けられているが、この写真では見えにくい。リード線だけが見える。

図10について説明する。ターゲットは試験機に29点、ロッド上に4点の計33点貼った。不動点は試験機上の21点（うち16点は基準板のターゲット）である。写真6の右上、縦方向に4点並んでいるのがロッド上のターゲットである。カメラはNikon D1X（3008×1960画素）、レンズは20mmを用い、各測定ごとに8枚の写



図8 試験の状況

真を撮った。撮影は加重0%（変形前）、20、40、60、70、80%の6段階の時点で引っ張りを撮影時間だけ止めておこなった。ロッドの太さによるが、おおむね100～400kNの加重で2%（1mで2cm）伸びた後、破断する。

計測結果の一例を図11に示す。図は横軸にひずみ量（もとの長さに対する伸び量の比）縦軸に加重を取ったものである。既存の3つの計測器は異なった値を示している。変位計と伸び計のグラフが途中までしかないのは、ロッド破断時に壊されるのを防ぐため、限界手前で取り外すからである。画像計測法の座標計測精度（内的精度）はロッド長さ方向で $10.8\mu\text{m}$ であった。

2点の座標値から長さを計算した。

このグラフによると、画像計測法の結果と伸び計の結果が良く一致していることが分かる。

今後さらに多くのデータを調べなければならないが、現在のところ画像計測法の簡便さと精度が高く評価されている。

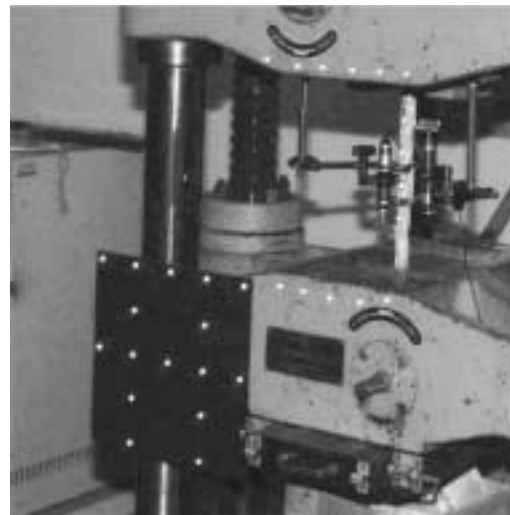


図10 デジタル画像の一例



図9 伸び計（中央）と変位計（右）

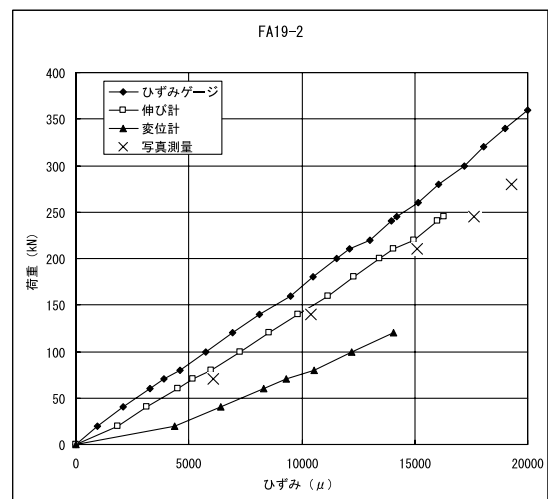


図11 計測結果の一例

V おわりに

画像計測法を物体の変形計測に応用した。本方法には従来の方法に比べて次のような利点があると考えられる。

- 1) 多数の点が同時に計測できる：ターゲットを貼れば数百点が一度に測定できる。
- 2) 簡易である：現場での作業はターゲット貼り写真撮影だけであり、配線作業などは不要である。
- 3) 安価である：ハードウェアとしてはパソコンと市販のデジタルカメラ（一眼レフ型）があればよい。一眼レフはレンズひずみ、ボディ剛性、CCDサイズにおいて優れている。より安価なカメラでもマニュアル撮影ができれば使用可能であるが、精度は落ちる。
- 4) 高精度である：数m規模の対象物で0.1mm程度の精度は安定して得ることができる。画面上の誤差で0.4~0.5 μ mである。

今後の課題は、処理のよりいっそうの高速化・自動化である。今回おこなったような変位・変形計測法は多くの研究・試験施設で利用可能であると思われる。更に使いやすいシステムを開発してゆきたい。

最近土木建築分野において、変位計測の要求が高まっている⁽⁹⁾。構造物の新設よりも、既存設備の維持管理に力が注がれるようになってきたからである。また安全・防災上の問題から、斜面の変形監視の要求があり、適用可能性を検討してゆきたい。

[参考文献]

- (1) Atkinson, K.B.(ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles, 1996.
- (2) 秋本圭一, 服部進: 画像計測の基礎, 岡山職業能力開発短期大学校紀要, vol.11, pp.23-38, 1997
- (3) 秋本圭一, 服部進, 岡本厚, 井本治孝: CCDカメラを用いた大型構造物の3次元精密計測, 計測自動制御学会講演会(千葉), 109C-1, 1998
- (4) 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 三浦悟: 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用, 土木学会論文集No.687/III-56, pp.289-301, 2001
- (5) 秋本圭一, 服部進: 工業写真計測における共線方程式, 四国職業能力開発大学校紀要, vol.12, pp.1-8, 2000
- (6) Mikhail, et. al: Modern Photogrammetry, pp. 251-256, John Wiley & Sons, 2001
- (7) 宮内克之, 荒川祐介, 秋本圭一, 服部進: 画像計

測法のRC はりの変形特性測定への適用性について, 土木学会第59回年次学術講演会(名古屋), CS10-004, 2004.9

- (8) 塩崎正人, 秋本圭一: 精密写真測量を用いたアラミドロッドの微小変形計測, 土木学会第59回年次学術講演会(名古屋), 6-179, 2004.9
- (9) 三浦悟ほか: トンネル工事へのデジタル写真測量技術の適用, 土木学会第59回年次学術講演会(名古屋), 6-176, 2004.9

※ 秋本先生は平成17年1月に亡くなりました。ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。