

デジタルステレオビジョンによる 広領域ひずみ場計測システムの開発

館石和雄¹

¹ 正会員 工博 名古屋大学助教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

構造部材の大ひずみを計測する手法として、ステレオビジョンを用いたシステムを開発した。これは部材の表面に設けた標点の動きを、ステレオビジョンによって3次元的にとらえ、その座標の変化からひずみ場を計算するものである。撮影した画像の前処理からひずみ計算までの一連の処理は、自動的に行うことができる。本システムの利点は、板の面外変形のような部材の3次元的な挙動が生じる場合にも適用できる点であり、座屈部の近傍に生じるひずみ場なども計測することができる。本システムをコンクリート充填鋼管部材に対する載荷試験に適用し、座屈部近傍の変形、ひずみ計測が自動的に行えることを示し、その有用性を確認した。

Key Words : strain measurement, stereo vision, digital image, image processing, low cycle fatigue

1. はじめに

阪神大震災以降、土木構造部材の耐荷力、変形性能を従来以上に高精度に評価することの重要性が認識され、数多くの研究が行われている。それらの中において、大変形の繰返しにより鋼製部材に低サイクル疲労と考えられるき裂が生じ、それによって部材が終局状態に至る事例¹⁾²⁾や、部材のひずみ集中部から脆性破壊が発生する事例³⁾などが報告されている。低サイクル疲労や脆性破壊など、鋼部材の高塑性域における破壊メカニズムを解明しておくことは、地震力の増大や材料・部材の高じん性化に伴って今後ますます重要なものと考えられる。

鋼素材の低サイクル疲労強度については、機械、造船などの分野で古くから研究が行われている⁴⁾。試験方法としては、圧縮時の座屈を防止するために砂時計型に整形した試験体に繰り返しひずみを与え、破断まで載荷を繰り返すというものが一般的である。この際のひずみは試験体の軸方向あるいは径方向の変位によって計算される。これらの研究により、鋼素材そのものの低サイクル疲労強度についてはすでに多数のデータの蓄積があり、低サイクル疲労強度は塑性ひずみ範囲によって整理できることが明らか

となっている。よって構造部材レベルでの低サイクル疲労強度を考える上においても、部材に発生するひずみを正確にとらえ、素材の低サイクル疲労強度と比較することによって検討を行うのが最も合理的なアプローチとなろう。しかし、部材レベルで考えた場合、数十%といった高塑性領域までのひずみを計測することは実際には極めて困難である。例えば最も一般的に用いられるひずみゲージによる計測では、ゲージそのものに測定限界があり、15%程度以上のひずみの測定は不可能である。また、低サイクル疲労き裂は部材が局部座屈した箇所に生じことが多いが、そのような場合には板の面外変形によってひずみゲージが剥離してしまうなどの問題がある。さらに、ひずみゲージによって測定できるのはゲージ位置でのひずみであり、ひずみ分布が大きく変化している領域においてはその最大値や最小値を測定することは容易ではない。ひずみゲージ法以外の手法としては、レーザースペックル法⁵⁾や画像計測による手法⁶⁾などが提案されているが、これらは2次元のひずみ場を計測する手法であり、3次元的な変形を伴う対象物に適用することはできないことや、広領域のひずみ場の測定は困難であるなどの問題がある。また、最近、板の曲げ試験によって生じる変

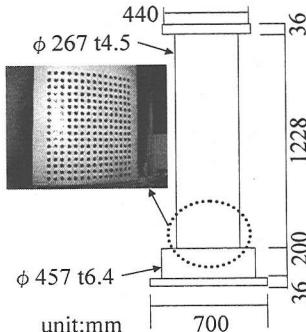


図-1 試験体の形状・寸法

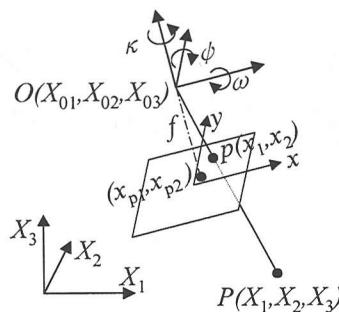


図-2 座標系

表-1 カメラの仕様	
撮像素子	2/3inch 単板 有効画素数 130万
画像サイズ	1280×1000
焦点距離	9.2~25.8mm

形を画像計測によってとらえ、大ひずみを計測する手法が提案されている⁷⁾が、これも試験体レベルでの適用にとどまっている。

以上の理由により、部材レベルで考えた場合の大ひずみ測定手法は確立されておらず、そのために低サイクル疲労についても必ずしも十分に検討されているとはいえないのが現状である。そこで著者らはステレオビジョンの技術を応用し、一対のステレオ画像からひずみ場を計測するというアイデアを提案し⁸⁾、座屈のような面外変形が生じた場合においても大ひずみの領域までひずみが精度よく計測できることを載荷実験により確認した⁹⁾。そこでデータ処理作業においては、実験終了後に撮影画像を一括して分析していたが、すべての処理には数日の時間を必要とした。また、画像処理や情報の抽出などにおいて、人が判断しなければならない部分も多く、その処理にはかなりの慣れを必要とした。部材のひずみを自動的にかつリアルタイムでモニターできるようなシステムとなれば、部材レベルでのひずみ制御低サイクル疲労試験の実現などが可能となり、土木構造部材の低サイクル疲労現象の解明のためにきわめて有効なシステムとなると考えられる。そこで本研究では、過去の試験において使用していたシステムを自動化し、画像読み込み後、比較的短時間でひずみの計算結果を表示できるシステムの開発を試み、ほぼ成功したので、報告するものである。

2. 実験概要とシステム構成

本研究では、コンクリート充填鋼管部材をモデル化した試験体に対して正負繰返し交番載荷を行い、その際に撮影された画像をモデルとしてシステムの開発を行った。試験体の形状・寸法を図-1に示す。

この試験体の場合、基部の近傍に局部座屈、き裂などが発生することがわかっているので、そこをひずみの計測領域とする。載荷に先立ち、試験体にはあらかじめペンキによって標点を設けておく。ここでは先に領域全体に白のペンキを塗布し、その上に直径約2mmの標点を6mm間隔で黒色のペンキによって設けた。図-1中の写真の黒い小点が標点である。

載荷は同一の変位レベルを3回ずつ繰り返す交番載荷とした。試験体に交番載荷を繰り返すと、ある変位レベル以降からは基部の付近に局部座屈が発生し、それが進展することにより徐々に耐荷力が低下する。さらに交番載荷を繰り返すと、鋼管表面にき裂が発生し、急激な耐荷力の低下を生じて終局状態を迎える。

それぞれの変位段階において、適当な間隔を開けて配置した2台のデジタルカメラによって計測領域を撮影し、画像をとりこむ。使用したデジタルカメラは一般撮影用に市販されているものであり、その仕様は表-1に示す通りである。デジタルカメラはパソコン用にSCSIインターフェースによって接続されており、画像データをコンピュータに高速に転送することができる。また、撮影モードの設定やリリーズ操作など一連の撮影作業をコンピュータ側から制御することができる。本システムは2組のデジタルカメラとパソコン用に構成されており、安価にシステムを構築することができるのも大きな特徴である。

3. ステレオビジョンを応用したひずみ計測手法

本研究のひずみ計測手法はステレオビジョンを応用したものであり、2台のデジタルカメラによって撮影されたステレオ画像を処理することによって対

象領域の変位を計測し、それによりひずみを算出するものである。以下に計測理論の概要を示す。

本システムでは内部標定要素として、写真中心と主点のずれ、画面距離、レンズディストーションを考慮しており、この場合、図-2に示す対象点Pのワールド座標 (X_1, X_2, X_3) と、それを撮影した画像上での点pの座標（画面座標） (x_1, x_2) との間には次の関係がある¹⁰⁾。

$$x_1 = -f \frac{a_{11}(X_1 - X_{01}) + a_{12}(X_2 - X_{02}) + a_{13}(X_3 - X_{03})}{a_{21}(X_1 - X_{01}) + a_{22}(X_2 - X_{02}) + a_{23}(X_3 - X_{03})} + \\ x_{p1} - \bar{x}_1(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (1a)$$

$$x_2 = -f \frac{a_{21}(X_1 - X_{01}) + a_{22}(X_2 - X_{02}) + a_{23}(X_3 - X_{03})}{a_{31}(X_1 - X_{01}) + a_{32}(X_2 - X_{02}) + a_{33}(X_3 - X_{03})} + \\ x_{p2} - \bar{x}_2(k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (1b)$$

ここに、 (X_{01}, X_{02}, X_{03}) :投影中心、 f :焦点距離、 a_{ij} : ω, ϕ, κ からなる回転行列、 (ω, ϕ, κ) : X_1, X_2, X_3 軸まわりの回転角、 (x_{p1}, x_{p2}) :主点のずれ、 (k_1, k_2) :ディストーション補正のための係数、 $\bar{x}_1 = x_1 - x_{p1}$ 、 $\bar{x}_2 = x_2 - x_{p2}$ 、 $r^2 = \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2$ である。

計測に先立って、座標が既知の標点を配置した基準パターンを撮影し、その画像から得られた標点の画面座標を用いて (X_{01}, X_{02}, X_{03}) および (ω, ϕ, κ) の6つの外部標定要素と、 (x_{p1}, x_{p2}) 、 f 、 (k_1, k_2) の5つの内部標定要素を2台のカメラそれぞれについて定めておく。求められた標定要素を用い、式(1)の関係を逆に利用することにより、最小二乗法によって測定対象点の3次元座標 (X_1, X_2, X_3) を求めることができる。

以上の計算により各標点の変形前後における座標がわかれば、その差をとることにより変位ベクトルを計算することができる。ここでは隣接する 3×3 個の標点で構成される領域を考え、そこでの変位場が次式のように変形前の座標値の2次関数で近似できるとした。

$$u_i = \alpha + \sum_{j=1}^3 \beta_j X_j + \sum_{j=1}^3 \gamma_j X_j^2 \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

ここに $\alpha, \beta_j, \gamma_j$ は未定係数であり、9個の標点に対して求められている変位ベクトルを用いて最小二乗法により定める。変位場の近似式が求められれば、Lagrangeのひずみテンソルは次式によって計算することができる。

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_\alpha}{\partial X_i} \frac{\partial u_\alpha}{\partial X_j} \right) \quad (3)$$

表-2 標定要素の計算結果

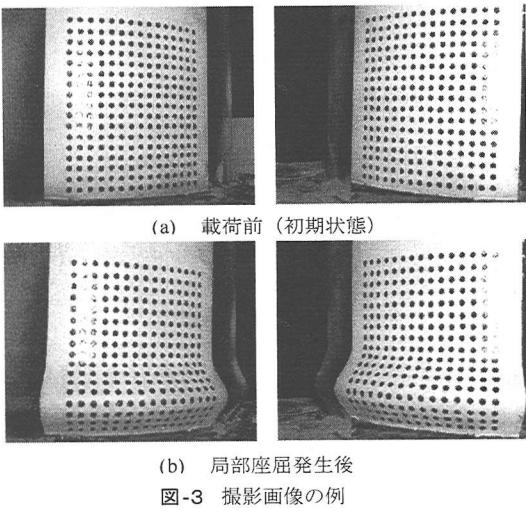
標定要素	左カメラ	右カメラ
X_{01} (mm)	-183.8	112.4
X_{02} (mm)	-8.5	13.4
X_{03} (mm)	323.9	287.3
ω (rad)	-0.126	-0.120
ϕ (rad)	0.445	-0.445
κ (rad)	-0.006	-0.105
x_{p1} (mm)	0.131	0.391
x_{p2} (mm)	0.210	0.214
k (mm ⁻²)	-0.004797	-0.003503
k_2 (mm ⁻⁴)	0.000432	0.000320
f (mm)	17.2	15.5

表-3 座標の平均誤差

X_1 方向	0.13mm
X_2 方向	0.10mm
X_3 方向	0.21mm

4. 標定計算結果と座標値の精度に関する考察

標定計算によって求められた標定要素を表-2に示す。 X_{01} などの外部標定要素の値はワールド座標系の取り方、すなわち基準パターンを設置する位置、角度などによるものであるが、ここでの場合、ワールド座標系の原点は試験体基部上の表面付近に設定しているので、その点と左右のカメラまでの距離を (X_{01}, X_{02}, X_{03}) の値から単純に計算するとそれぞれ372.5mm、308.8mmとなる。対象物がこの距離にあると仮定し、焦点距離や撮像素子寸法などから理論的な空間分解能を計算すると、左右画像でそれぞれ1画素あたり0.15mm、0.14mmとなった。また、これらの標定要素から基準パターンの標点座標を求め、その平均誤差を計算した結果を表-3に示す。表中の X_1, X_2 方向とは画面にほぼ平行な平面の縦横方向、 X_3 方向とはそれと垂直な方向（奥行き方向）を表している。以上の検討により、本手法による座標の計測精度は画面に平行な面内の方向には0.1~0.15mm程度、奥行き方向には0.2mm程度であるといえる。ただし、これは座標値の計測精度を表す一つの指標であり、これがそのままひずみの計測精度と関連づけられるものではないことに留意する必要がある。



(b) 局部座屈発生後
図-3 撮影画像の例

5. 撮影画像の特徴

撮影した画像は 1280×1000 画素のグレースケールのビットマップファイルとして記録した。載荷前の画像の例を図-3 (a) に、試験が進行し局部座屈が生じた後の画像の例を図-3 (b) に示す。この例に示すように、画像には次のような特徴がある。

- ・奥行き方向の精度に配慮し、基線長を長くとっているため、左右の画像の撮影角度は大きく異なっている。
- ・光の反射などによって見えない標点が存在する。試験体の表面が曲面であることや、座屈に伴って大きな面外変形が発生することから、試験体に均一に光を当てるることは困難であり、このような標点の欠落は不可避なものと考える必要がある。欠落の仕方は様々であり、一点だけ抜け落ちるものもあれば、何点かが連続して欠落する場合もある。また、左右の画像における欠落点は同一のものではない。
- ・座屈変形の性格上、標点の横方向の並びの変化は比較的少ないが、縦方向の並びは座屈変形に伴って大きく変化する。
- ・標点はかならずしも円形や楕円形に見えるとは限らず、ある場合には後述する画像処理の段階で、1つの標点が分断されて見えることもある。
- ・試験体の周辺の環境が写り込んでいる。

自動処理システムの開発に当たっては、以上の特徴から生じる様々な制約を考慮する必要がある。

6. 標点の自動検出と対応関係の決定

本手法において最も問題となるのは、デジタル画像からいかにして標点を抽出し、さらにステレオ画像間での対応関係を決定するかという点にある。これらの処理の自動化、高速化が本システムの開発における最大のポイントである。以下、本システムで採用した自動処理の方法について詳細に述べる。

(1) 画像前処理

a) 計測領域の抽出

撮影画像には計測領域以外の周辺環境も写り込んでいる。これを含んだまま処理を行うことは、計算時間上不利であるばかりではなく、物体認識の際のエラーの原因にもなり得るので、まず、計測領域のみを自動的に抽出することとした。使用したアルゴリズムは境界追跡アルゴリズム¹¹⁾を改良したものである。また、濃度による領域の識別よりも、その点の微分値（エッジ特性値）によって識別した方が良好な結果を得られることが多かったので、エッジ特性値による境界線探査を行った。エッジ検出用フィルターとしては Sobel フィルター¹¹⁾を使用した。境界線追跡によって得られた計測領域の境界線を図-4 に示す。なお、説明のため、境界線以外の画像はコントラストを落として示してある。反時計回り探索によって計測領域の上部が、時計回り探索によって下部が抽出されるので、この領域以外の画素をすべて白に置き換えることによって計測領域のみを抽出することができる。計測領域を自動抽出した後の画像の例を図-5 に示す。なお、この画像は後の処理で再度利用するので、保存しておく。

b) 2 値化

計測領域のみを抽出した画像に対して、2 値化処理¹¹⁾を行う。図-5 に示すように、試験体表面が曲面であることなどから、標点の平均濃度は場所によって差があり、本来であれば動的しきい値法による2 値化などが望ましいが、計算時間がかかること、単純2 値化でも後の処理に支障がでなかつたことから、ここではすべての画素について同一のしきい値を適用する単純2 値化法を採用した。なお、後述のように、標点の有無、位置は再度精査されるので、ここでしきい値レベルはノイズの除去に主眼をおいて少し厳しへに設定すればよい。

(2) 標点の抽出

画像処理を施した画像から、標点としての特徴を有している領域を認識し、その座標を求める。標点の認識を行うために、まずラベリング¹¹⁾を行う。黒

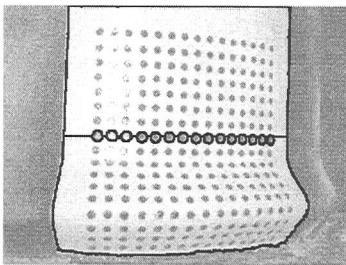


図-4 計測領域協会の追跡結果

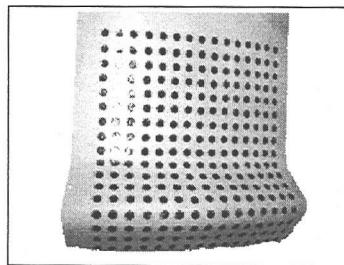


図-5 計測領域の自動抽出結果

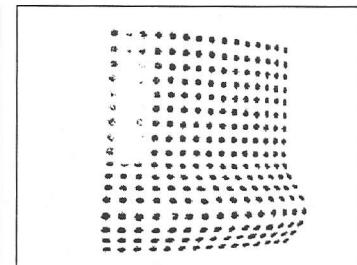


図-6 標点の自動抽出結果

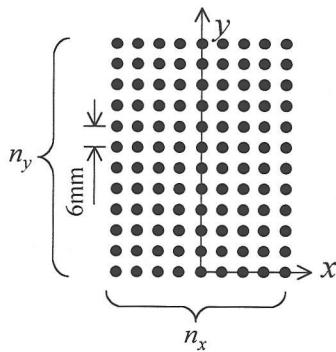


図-7 初期計測用のテンプレート

(3) 標点の対応付け

ステレオビジョンで最も問題となるのは、ステレオ画像の対応関係を決定することであり、本研究の例でいえば、片方の画像に写っている標点が他方の画像のどの標点と同一のものかを判定することである。ステレオビジョンにおいては、エピポール関係を用いて両画像の対応点を探索することがよく行われる¹²⁾。しかし本研究で対象としている画像の場合、標点が縦方向、横方向に規則的に並んでいることから、エピポーラ線に沿って多数の標点が並んでしまい、対応関係を求めるることは困難である。そこで、ステレオ画像の対応付けを直接行うのではなく、その標点が何行目、何列目に属するかを両画像について別々に判定することによって、左右画像における標点の対応関係を決定することとした。具体的には、Hough 変換法¹²⁾などで用いられる投票と多数決原理を応用した手法によって各標点の所属行を求め、その後、テンプレートマッチングによって所属列を決定した。

まず、以下に示す手法によって所属行の決定を行う。配置した標点の行数を n_y 、列数を n_x としたとき、[step1] 標点を y 座標が小さい順(画面下方にある順)に n_x 個取り出す。

[step2] 取り出した n_x 個の標点の中から任意の 3 点を選び、それを通る 2 次曲線を求め、係数を保存す

る。すべての 3 点の組み合わせについてこれを行う。
[step3] 2 次曲線の係数のヒストグラムを作成し、最も頻度の多い値を取り出す。その係数によって表される 2 次曲線を検知線とする。

[step4] 検知線との距離がある値以下のものを同じ行に属する標点として記憶し、以下の処理の対象からはずす。

[step5] [step1]へ戻る。

以上の処理をすべての標点の所属行が定まるまで繰り返す。続いて、格点の所属列を決定するために以下に示すテンプレートマッチングを行う。

[step1] 適当なテンプレートを用意する

[step2] 行内に標点が n_x 個存在する行に着目し、その行に含まれる標点を抽出する。これは、1 行内の標点数が配置した標点数 n_x と等しい場合には欠落点やノイズが含まれていないと仮定するものである。

[step3] テンプレートの標点 (X_1, X_2) と、[step2]で抽出した標点 (x_1, x_2) の間に次の射影関係が成り立つものと仮定し、最小自乗法により係数 b_i を求める。

$$x_1 = \frac{b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3}{b_7 X_1 + b_8 X_2 + 1} \quad (4a)$$

$$x_2 = \frac{b_4 X_1 + b_5 X_2 + b_6}{b_7 X_1 + b_8 X_2 + 1} \quad (4b)$$

[step4] テンプレートのすべての標点を射影変換する。

[step5] 射影変換後のテンプレートの標点に最も近い標点が対応点であると仮定し、標点の所属列を定める。

テンプレートについては、初期の画像（載荷前の画像）については図-7 に示すものを、それ以降のものについては前段階で求められた標点座標を用いた。

以上の処理により、各標点の所属行、所属列が定まる同時に、欠落点の行、列位置が定められる。欠落点については、周辺の標点の座標を元にして補完を行う。このように所属行の決定と、所属列の決定を別の手法で行わなければならないのは、座屈変形後の標点の並びの特性が行方向と列方向で大きく

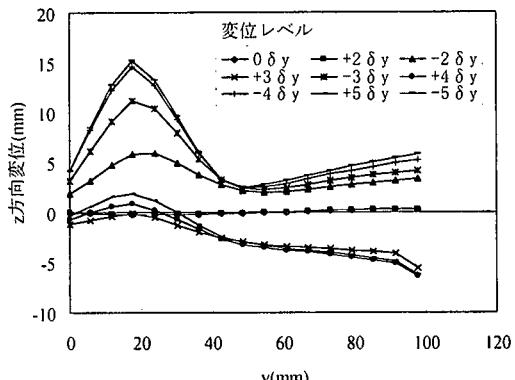


図-8 変形計測結果

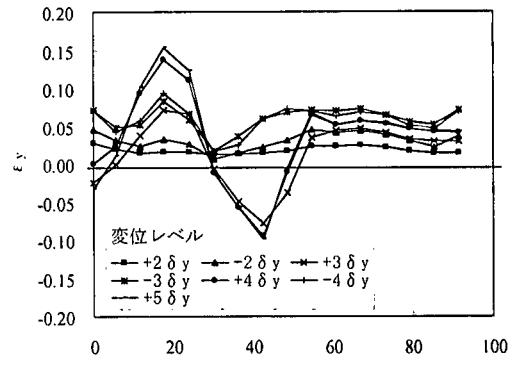


図-9 ひずみ計測結果

異なるためである。テンプレートマッチングのみですべての対応関係を求めるよりも試みたが、本画像の場合、左右の画像で異なる標点が欠落することなどから、良好な結果は得られなかった。本手法は抽出した標点の重心の情報のみからその対応関係を求めており、画像としてのマッチングは行っていないため、高速な処理が可能となっている。

以上の処理により、標点の所属行、所属列、重心が求められるが、これは二値化した画像に対して行っていることから、本来画像に写っている標点が欠落したり、標点の形状が円形からはずれ、重心位置に誤差を含んでいる可能性がある。そこで、再度標点座標の精査を行う。計測領域の自動抽出を行った直後の画像(図-5)を再度呼び出し、これまでに求められた各標点の重心位置を基点として、その点の周囲の内側境界追跡を行い、標点としての領域を決定する。ここで用いるしきい値は、二値化の時に用いた値よりもゆるめに設定する。標点の領域が定まつたらば、改めてその重心を求めるのであるが、その際、次式で示されるように各画素の濃度で重み付けをして重心を計算した。

$$x_{G1} = \frac{\sum_{i,j} x_1(i,j) D(i,j)}{\sum_{i,j} D(i,j)} \quad (5a)$$

$$x_{G2} = \frac{\sum_{i,j} x_2(i,j) D(i,j)}{\sum_{i,j} D(i,j)} \quad (5b)$$

ここに(x_{G1}, x_{G2})は重心の座標、 $x_1(i,j), x_2(i,j)$ は画素(i,j)の x, y 座標、 $D(i,j)$ は画素(i,j)の濃度である。以上のように自動抽出した標点の重心を用いて、3章に示した理論を適用することによってすべての標点の3次元座標およびひずみを求める。

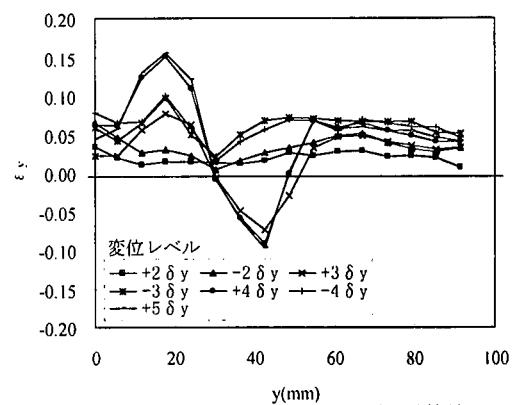


図-10 マニュアルによるひずみ計算結果

7. システムの適用例

本システムを実際の画像に適用した。使用したパソコン用コンピュータの性能は PentiumII 600MHz, 256MByteRAM であり、現時点においては既にミドルクラスの性能であろう。使用したプログラム言語は Visual Basic ver 6.0 である。

すべての画像に対して処理を行い、変位を計算した結果を図-8に示す。図に示す変位は、計測領域の中央列にある標点の奥行き方向変位(図-7における y 軸上の標点での z 方向変位)である。載荷した変位レベルの増加とともに局部座屈が生じる現象が明確にとらえられており、また、各載荷レベルにおける座屈部以外の箇所での変位はほぼ一致していることから、良好な計測が行えていることがわかる。

部材軸方向(y 方向)ひずみの計算結果を図-9に示す。引張時には全体が引張りひずみに、圧縮時には、座屈の頂部では引張ひずみが、座屈の裾部では圧縮ひずみが生じており、合理的な結果となっている。参考までに、本システムを用いずに、画像処理をマニュアルで行った場合のひずみの計算結果を図

-10 示す。ここで、マニュアルで行った場合とは、領域抽出や2値化の際のしきい値レベルの設定、ノイズの判定と除去、標点の対応付けなど、必要となる一連の画像処理を、人間の判断をもとに逐一行ったという意味である。この作業は時間はかかるが、人間の判断により画像の状況に応じた臨機応変な処理が可能であり、ひずみ計算に必要な情報を確実に得ることができる。図-9と図-10を比較すると、基部付近でのひずみの値にやや違いがみられるものの両者の値はよく一致している。図-10に示したようにマニュアルで画像処理を行ってひずみを計算した場合、少なくともひずみゲージで計測可能な大きさまでのひずみについては、本手法で求められる値とゲージから得られる値とはよく一致することを確認している^{8),9)}ことから、本システムによって、ひずみの計測精度を損なうことなく、適切に処理の自動化が図られているといえる。

表-4に各処理に費やされる時間の一覧を示す。一対の画像の処理を行ってひずみを計算するまでの所要時間は、画像解像度に手を加えない場合には253秒ほどである。しかし画像の解像度を落とし、標点の選別までの処理（表4中のNo.1～4）を縮小画像に対して行うことにすれば、高速化が図れる。No.4までの処理でひとまず標点の抽出を行うが、所属列、所属行を決定した後に、再度、No.8の処理において縮小していない画像を呼び出して標点重心の精査を行うため、No.4までの段階で縮小画像を使用しても最終的な精度には何ら影響を及ぼさない。No.1～4の処理を縮小画像に対して行った場合の計算時間は同表に示すとおりであり、縦横の画素数を半分にした場合（画素数を4分の1とした場合）の全体の処理速度は約74秒、縦横の画素数を4分の1（画素数16分の1）にした場合は約53秒であり、縮小画像を用いない場合に比べて大幅な処理速度の向上が図られている。さらに解像度を落とした場合についても試みたが、標点の抽出が必ずしもうまく行えない場合があったので、ここには示していない。

現在のシステム構成ではここに示すように画像取込後からひずみを計算するまでに最低50秒程度の処理時間が必要であり、完全なリアルタイムシステムとはなっていない。時間のかかる処理については、ソフト的な工夫によってより高速な手法を検討する必要があるが、計算時間についてはハードウェアの高速化に期待できる部分が大きく、近い将来にはより短時間のうちにひずみの計測結果を表示できる可能性が高いものと考えている。

表-4 処理時間の一覧 単位：秒

No.	処理内容	画像縮小率		
		1/1	1/2	1/4
1	BitMapの読み込み	10.4	7.3	7.2
2	計測領域の自動抽出	7.2	2.7	1.5
3	二値化処理	3.1	0.8	0.2
4	ラベリング、面積などによる選別で標点を抽出、重心の計算	91.7	12.2	4.1
5	テンプレートの作成	0.0	0.0	0.0
6	所属行の決定	7.5	7.7	7.4
7	所属列の決定	0.1	0.1	0.1
8	標点重心の再精査	4.7	4.7	4.7
9	値の格納	0.2	0.2	0.2
	小計①	124.9	35.7	25.4
10	座標計算	0.2	0.2	0.2
11	ひずみ計算	2.5	2.4	2.4
	小計②	2.7	2.6	2.6
	総計（①×2+②）	252.6	73.9	53.4

8. まとめ

ステレオビジョンによってひずみを計測するシステムを開発した。本システムでは、計測領域の抽出、標点の抽出、標点の対応付けなどの処理がすべて自動化的に行える。特に、標点の対応付けを、画像そのもののマッチングで行うのではなく、各標点の重心の位置関係から行うことにより高速化を実現した。これにより中位クラスの性能を有するパーソナルコンピュータで、画像取込後50秒程度でひずみが表示される準リアルタイム計測システムを構築した。

本システムを活用し、載荷試験に適用することにより、構造部材に生じるひずみ場の定量化、ならびに低サイクル疲労強度の予測手法の確立などが行えるものと考えている。

謝辞:本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究B（代表者 館石和雄）によった。

参考文献

- 坂野昌弘、三上市蔵、鷹羽新二：鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動、土木学会論文集、No.563/I-39, pp.49-60, 1997.
- 村田清満、渡辺忠朋、西川佳祐、木下雅敬：軸力と曲げを受けるコンクリート充填鋼管柱の耐力、変形特性、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集I-A, pp.222-223, 1995.

- 3) 三木千寿, 四十沢利康, 穴見健吾: 鋼製橋脚ラーメン偶角部の地震時脆性破壊, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.273-281, 1998.
- 4) 例えば飯田国広: 歪制御低サイクル疲労, 溶接学会誌, Vol.37, No.6, pp.14-30, 1968.
- 5) 小倉敬二, 西川出: 破壊力学研究におけるレーザ応用変位・ひずみ計測, 材料, Vol.44, No.502, pp.891-898, 1997.
- 6) 吉田秀典, 堀井秀之, 林明華, 宇野晴彦: BSS を用いた不連続性岩盤の計測と岩盤評価, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, Vol.29, pp.241-245, 1999.
- 7) 酒井理哉, 斎藤智弥, 向出孝一: 画像計測を用いたひずみ制御の低サイクル疲労試験法, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, I-A84, pp.168-169, 2000.
- 8) 館石和雄, 荒木昭俊: 写真測量を用いた鋼材座屈部のひずみ計測, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集 I-A, pp.260-261, 1998.
- 9) 館石和雄, 村田清満: 画像計測によるコンクリート充填鋼管部材のひずみ測定, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1537-1544, 1999.
- 10) 村井俊治, 奥田勉, 中村秀至: 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol.29, No.6, pp.1-15, 1981.
- 11) 谷口慶治: 画像処理工学基礎編, 共立出版, 1996.
- 12) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 編: コンピュータビジョン, 新技術コミュニケーションズ, 1998.

(2000. 12. 28 受付)

STRAIN MEASUREMENT SYSTEM BY DIGITAL STEREO VISION

Kazuo TATEISHI

A system for measuring large strain in structural members is developed by using digital stereo vision. The system consists of the following processes, 1) trace the target points provided on the specimen surface, 2) identify the coordinates of each target point by digital stereo vision, 3) calculate displacement vector of each target point, and 4) calculate the strain field. All preprocesses are performed automatically, and the strain results can be obtained in some seconds. This system makes it possible to carry out semi-realtime strain measurements, even if an object includes three-dimensional deformation like local buckling.