デジタル像相関を用いた 3 次元変形の測定 (高精度の対応点探索法について)

Measurement of Three-dimensional Deformations Using Digital-Image Correlation Techniques (On the Process for Accurate Digital Correlation)

正 加藤 章 (中部大) 〇学 和手 久直 (中部大院)
Akira KATO, Chubu University 1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi
Hisanao WATE, Chubu University

Key Words: Experimental Strain Analysis, Non-Contact Deformation Measurement, Image Processing, Template Matching

1. まえがき

本研究は一对の CCD カメラを用いてステレオ法により 3 次元変位分布を非接触で正確に計測することを目的としている。その計測における主な処理はまず両方のカメラ画像の対応点を探索して位置情報を得ること。そして、変形前後の対応点を探索して変位量を求めることの二点であり、対応点を探索することが重要な意味をもつ。そこで同一点探索の高速化と 1 画素以下の分解能をもつ探索方法について検討した。その方法を用いて平面変位の測定を試み、測定精度について検討した。

2. 対応点の探索法

計測システムは Fig.1 に示す通りで、一对の CCD カメラと観測された画像を取込み、処理を行うためのコンピュータで構成されている。3 次元計測の方法についてはすでに Sutton らが報告している¹⁾。本研究では変形前の参照画像と変形後の画像との対応点の探索法について検討した。対応点探索は最小単位が 1 画素の粗探索と 1 画素以下の分解能をもつ微探索に大きく二つに分けて行った。一般的に粗探索は計算量が多く計算時間が長くなる。そこで、粗探索を高速に行うためにそれをさらに二段階に分け、(1)粗い探索法により 10 点程度の対応点の候補を求める。(2)候補点の中から 1 点を選ぶ。(3)微探索により 1 画素以下の分解能の探索を行う。という三段階に探索を行う方法を用いた。対応点探索の方法としては残差逐次検定法 (SSDA 法)²⁾を用い、残差の絶対値の和を評価関数として用いた。SSDA 法は参照画像の $N \times N$ 画素の部分画像をテンプレート画像として、変形画像内の探索範囲で動かし、次式

$$R(a,b) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} |I_{(a,b)}(m,n) - T(m,n)| \quad (1)$$

で表される残差が最小になるようなテンプレート画像の中心位置を求めて、対応点を探索する方法である。ただし、

(a,b) は変形画像におけるテンプレート画像の中心位置を示し、 $I_{(a,b)}(m,n)$ は変形画像の部分画像、 $T(m,n)$ はテンプレート画像の画素 (m,n) の輝度である。

(1) の段階ではテンプレート画像のサイズは 10×10 画素とし、計算時間を短くするために Fig.2 に示すように 1 画素とびのウィンドウを用いた。探索範囲は注目画素から上下、左右方向に ± 50 画素とし、 $R(a,b)$ の小さい 10 箇所を候補点として選んだ。(2) の段階では (1) の場合と同じく 1 画素とびのウィンドウを用い、ウィンドウサイズは 20×20 画素とした。(1) で求めた候補点に対して SSDA 法を行い $R(a,b)$ が最小となる点を求め粗探索が終了する。(1)(2) の段階の粗探索の様子を Fig.3 に示す。

以上の方法によって 1 画素単位で探索した対応点に対してさらに 1 画素以下の微探索を行う方法を提案する。いま、粗探索で探した変形画像の対応点の座標を (x_s, y_s) とする。変形画像は小数点以下の移動量がなく画素単位で平行移動したものとすると、変形画像の (x_s, y_s) を中心とする部分画像とテンプレート画像はまったく同じになる。このとき、テンプレート画像を 1 画素左にずらした場合 ($l=-1$) と右にずらした場合 ($l=1$) で両者の輝度の差 $I_{(x_s+l, y_s)}(m,n) - T(m,n)$

をとれば、Fig.4 に示すように符号が異なるだけで絶対値は同じである。したがって、次式

$$R(x_s + l, y_s) = \sum_{m=p}^{N-1-q} \sum_{n=0}^{N-1} |I_{(x_s+l, y_s)}(m,n) - T(m,n)| \quad (2)$$

で示すように絶対値の和をとれば同じ値になるはずである。ただし $l=-1$ のとき $p=1$, $q=0$, $l=0$ のとき $p=0$, $q=0$, $l=1$ のとき $p=0$, $q=1$ である。しかしながら、変形画像の (x_s, y_s) を中心とする部分画像とテンプレート画像に 1 画素以下のずれがある場合は R の値は $l=-1$ と 1 の場合で同じにならない。そこで、この場合テンプレート画像を線形補間により、1 画素以下の移動量で少しずつ動かし、 $l=-1$ と $l=1$ の R の値が近くなるように 1 画素以下の対応点を探索していく方法をとった。すなわち、Fig.5 に示すように $l=-1$ の場合の方が $l=1$ の場合よりも R の値が大きい場合、テンプレート画像を右に d 画素だけ動かし $x_s^{(1)} = x_s^{(0)} + d$ とする。ただし、 d は 0 から 1 の間の定数である。この場合の $l=-1, 0, 1$ の R の計算値を Fig.5 の■印で表す。さらに、次は d^2 画素

Fig.1 Measurement system

Fig.2 Window for rough search

(a) Reference image (b) Deformed image

Fig.3 Fast rough search

Fig.4 Subtraction of reference image from deformed image

Fig.7 Surface of specimen

Fig.5 Procedure for fine search

Fig.6 Convergence of x_s

だけ動かして、 $x_s^{(2)} = x_s^{(1)} + d^2$ とする。このように順にテンプレート画像を動かして $l = -1$ と $l = 1$ の R が近い値になるように繰り返して計算をする。 x_s の変化は $x_s^{(i+1)} = x_s^{(i)} + d^i$ で表される。ただし、 i は繰り返し数である。このとき、 $d = 1/2$ のときが収束するのが最も速いが、この値を用いると一度収束する軌道から外れると、その後何度繰り返し計算しても真値に収束しないことがわかったので $d = 1/1.5$ とした。Fig.6 に参照画像の注目点の座標を 320 として、0.1 画素右に移動させた画像に対し上述の方法で微探索した結果を示す。 x_s の収束値は 320.101 であり誤差が +0.001 画素と極めて良好な結果が得られた。微探索では 30×30 画素のテンプレート画像を使用した。同様な方法により y 方向にも探索を行う。

3. 平面変位測定

測定対象に黒色の塗料を全面に吹き付けた後、白色の塗料を吹き付け、ランダムパターンをつくった。Fig.7 に測定対象の表面を示す。はじめに、その測定対象を CCD カメラで 1 画像取り込み、その画像をシミュレーションにより 1 画素以下の移動量で平行移動させ、上で述べた対応点の探索法を使って参照画像内の 81 点に対して平面変位測定を試みた。81 点の測定値の平均値(Ave)と最大、最小値から平均値を引いたものを Error として Table 1 に示す。移動

量と測定値の平均値の誤差は最大で 0.002 画素であり、平均値からのずれは最大で 0.006 画素であることがわかる。

次に対象物を実際に平行移動させて変位測定を行った。対象物は最小読み取り値 0.01mm のマイクロメータが 3 軸それぞれに取り付けられた XYZ 軸ステージに取り付けてある。32 通りの変位量で対象物を動かし平面変位測定を行ったが、その中から x の正方向のみ変位させた 3 つの測定結果を Table 2 に示す。Table 2 も Table 1 と同様に 81 点の測定値の平均値(Ave)と最大、最小値から平均値を引いたものを Error として示してある。ただし、測定値はカメラパラメータ³⁾を使って移動量の単位を画素から実寸法に変換したものである。測定値の平均値と実際の移動量の誤差は最大で 0.0032mm であり、平均値からのずれは最大で 0.0018mm であることがわかる。以上のように非常に高精度で測定できることが明らかになった。

Table 1 Measurement of displacement obtained by simulation

Displacement (pixel)		Measurement (pixel)			
x	y	x (Ave)	Error (x)	y (Ave)	Error (y)
0.1	0	0.102	+0.005 -0.004	-0.002	+0.003 -0.004
0	0.1	-0.002	+0.004 -0.004	0.100	+0.003 -0.006

Table 2 Measurement of displacement obtained by experiment

Displacement (mm)		Measurement (mm)			
x	y	x (Ave)	Error (x)	y (Ave)	Error (y)
0.1	0	0.0999	+0.0006 -0.0005	0.0028	+0.0005 -0.0005
0.5	0	0.5017	+0.0010 -0.0006	-0.0004	+0.0007 -0.0008
1	0	0.9998	+0.0016 -0.0018	0.0032	+0.0010 -0.0016

参考文献

- 1) P.F.Luo, Y.J.Chao, M.A.Sutton and W.H.Peters, "Accurate Measurement of Three-dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision" Experimental Mechanics, 33-2, (1993), 123-132.
- 2) 高木幹雄, 下田陽久, 画像処理ハンドブック, 東京大学出版会, (1991), 707-746.
- 3) Tsai, R.Y, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses." IEEE J.of Robotics and Automation, RA-3-4, (1987), 323-344.