画像相関を用いた微小変位の計測 (画像センサーの感度のばらつきを考慮した)

加藤 章^{*1}

Measurement of small displacement Using Image Correlation (Influence of Sensitivity Scatter in Image Sensor)

Akira KATO^{*2}

^{*2} Chubu University, Dept. of Mechanical Engineering
Matsumoto-cho 1200, Kasugai, Aichi, 487-8501, Japan

We investigated a method to measure displacement distribution in the full view field of a CCD camera using digital image correlation (DIC) technique. This method intends to measure displacement field on a surface by comparing two images before and after deformation taken with a CCD camera. In this method, template matching of the corresponding points on the two images with accuracy less than one pixel is necessary to measure small displacement. In general, image sensor such as CCD and CMOS has scatter of sensitivity in each pixel. This scatter in sensitivity causes difference of gray level in each pixel and has a large influence on the template matching for the DIC method. In this study, we investigated difference of sensitivity in each pixel and we measured sensitivity difference for each pixel and also considered a method to calibrate gray level for different pixels.

Key Words : Experimental Strain Analysis, Full-Field Measurement, Image Correlation, Image Sensor

1. 結 言

画像相関法は、CCD カメラなどの入力装置から得られた変形前後の表面画像の対応点を探索することにより、各点ごとの 2 次元変位を測定することができる⁽¹⁾。画像を入力する光学系の倍率により測定領域の大きさを自由に取ることができ、微小領域から広い領域まで広範囲な対象に適用できる。すなわち、標点距離を自由に取ることができ、非常に自由度の高い計測法である。

一般的に広く画像入力に使われる CCD や CMOS などの画像センサーは各画素ごとに受光センサーを持っているが、高解像度になるほど受光センサーの大きさは小さくなり、それに伴って各受光センサー間の感度のばらつきも大きくなると考えられる。画像相関法では変形前後の 2 枚の画像から対応点を探索するが、画素の間に受光センサーの感度にばらつきがあれば、位置の異なる画素の輝度値は異なることになり、変形前後の対応点の画素の輝度がわずかに異なることになって、正確な対応点探索が困難になる。そこで本研究では、画像センサーの各画素ごとの感度の違いを検出することを試みた。また、感度の違いを補正する方法についても考えてみた。

2. 画像相関による変位分布計測

画像相関法では、Fig. 1 に示すような物体表面における変形前後の 2 つの画像を比較して、対応点を探索し変

Fig.1 Sample image of a specimen surface

Fig.2 Distribution of residual R

^{*1} 正員，中部大学（〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200）

E-mail: katoa@isc.chubu.ac.jp

Fig. 3 Illustration of the imaging system

位置を求めるものである。対象物表面に明暗のコントラストが大きく、明るさが急激に変化する標点が多数できるように、例えば、黒色の塗料を塗った後、白色のスプレー塗料を吹き付けてランダムパターンを作成する。

画像相関法を用いる場合に問題となる主な点は次の3点である。(1)類似度を評価するための関数、(2)評価関数を最大化(あるいは最小化)するための方法、(3)1画素以下の移動に対する輝度の補間法、である。(1)の評価関数については、各種の関数が提案されているが⁽²⁾。本研究では計算の簡単さも考えて、輝度差の絶対値の総和を考えた。変形前の画像(a)から任意の矩形の部分画像を考え、これをテンプレート画像とし、変形後画像(b)から同じ大きさの部分画像を考え、それぞれの部分画像内において各画素の輝度をそれぞれ $g(x, y)$, $h(x', y')$ とする。部分画像内において次式に示す輝度の残差の絶対値の和を求める。

$$R = \sum |g(x, y) - h(x', y')| \quad (1)$$

変形後画像(b)の探索範囲内で部分画像との残差 R を求め、その分布を調べる。Fig.2に示す R の分布において最小値を取る位置 (x_0, y_0) を求めることにより、両者の対応点の位置の違いから x, y 方向の1画素単位の変位 u, v が得られる。さらにこの分布の最小値付近の R の分布を x, y の2次式で近似し、その最小値の位置を求めることにより1画素以下の変位を求めることが出来る。

さらに、テンプレート画像を画像補間により1画素以下の微小量だけ移動させた画像を仮想的に作り、変形後画像との対応点探索を繰り返すことにより、1画素以下の精度で対応点探索を行う⁽³⁾⁽⁴⁾。

3. 画像センサーの感度のばらつきについて

Fig.3に示すような画像入力系を用い、画像を撮像した。CMOSセンサーをピエゾ素子によって駆動するXおよびZ軸ステージ上に置き、レンズとは独立に移動できるようになっている。レンズは固定し、測定対象の画像をCMOSセンサー上に結像するようにしてある。用いたCMOSセンサーはモノクロで、解像度は1280x1024で、画素のサイズは5.2x5.2 μm である。測定対象の表面画像の一例をFig.4(a)に示す。いま、CMOSセンサーを1 μm ずつXおよびZ方向に移動させて、画像を撮像する。(a)の中心部を拡大したものが(b)であるが、ステージをX方向に微小移動した場合のこの画像の矢印位置のx方向の4画素の輝度の変化を示し

(c) Gray level change of each pixel for small movement

Fig. 4 Sensitivity difference of each pixel in a CMOS sensor

たのが(c)である。初期の画像から1 μm ずつ6 μm までCMOSセンサーのみを微小移動させ、撮像した。画素の大きさは5.2 μm であるので、6 μm 移動した場合には1画素を少し超えて移動したことになる。Fig.4(c)に示すように微小移動による輝度の変化が隣の画素に完全に接続しないで少し段差が見られることがわかる。これが画素ごとの受光感度の違いによるものと考えられる。すなわち、同じ測定点に対しても、隣の画素では得られる輝度値にこれだけの差が生じることになる。

隣り合う画素の感度差を以下のように求めた。Fig.

Fig. 5 Sensitivity difference between adjacent pixels

4(c) のように $1\mu\text{m}$ ごとの移動による輝度値の変化を 2 次式で近似し, その近似曲線を図中に示す. 隣の画素の初期位置において 2 次式による近似値と各画素の輝度値との差を求め, これを感度差とする. 感度差を Δg_x とし, x 方向の分布を Fig. 5 の dg_x に示す. さらにこの隣り合う画素の感度差は輝度値により変化すると考えられる. いま, この感度差は輝度値に比例するものと仮定し, 感度差 Δg_x に最高輝度値 255 と該当画素の輝度値 $g(x, y)$ との比を掛けることにより $(\Delta g_x \times (255/g(x, y)))$, 最高輝度の場合の感度差 Δg_{x255} に換算して標準化する. 標準化した感度差を図中に $dg_x(255)$ として合わせて示した. この感度差 Δg_{x255} を CMOS センサーのすべての画素について求める. 同様に CMOS センサーを z 方向に移動させ, 画像中の y 方向の感度差 Δg_y を求め, 同様な方法により標準化した感度差 Δg_{y255} を求める. これらのデータをデータファイルとして記録しておく.

これらの感度差のデータファイルを用いて, 実際に感度補正を行う場合には以下のように行う. いま x 方向に順に輝度補正を行う場合には, 一つ手前の画素の輝度補正量を $cg(x-1)$ とし, x の位置における輝度補正量 $cg(x)$ を次式により順に決定する.

$$cg(x) = cg(x-1) - \Delta g_{x255}(x) \frac{g(x, y)}{255} \quad (2)$$

ここに, $g(x, y)$ は対応する画素の輝度値である. これを輝度補正量として対応する画素の輝度値に加える. 同様に y 方向に順に補正を行い, y 方向の輝度補正量を

$cg(y)$ とすれば, その平均を取って画素 (x, y) の輝度値 $g(x, y)$ の補正量とする. 以上の方法により, 1 画面のすべての画素の輝度補正を行う. 以上の方法の具体的な検証はまだ行っていないが, 画像相関法において大きな問題となる画像センサーの感度のばらつきによる影響が, このような方法により感度のばらつきを検出し, 輝度補正を行うことによって少しは改善できるのではないかと期待される.

文 献

- (1) Luo, P. F., Chao, Y. J., Sutton, M. A. and Peters, W. H., Accurate Measurement of Three-dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision, *Experimental Mechanics*, 33-2 (1993), 123.
- (2) Onoe, M., Image Processing Handbook, Shohkohdo, (1981), 303 et al.
- (3) Kato, A. and Funatani, R., Displacement Measurement in the Whole View Field Using Random Pattern (Template Matching with High Accuracy), *Proc. 1st International Conference on Design Engineering and Science*, (2005), 301-304.
- (4) Kato, A. and Moriuchi, T., Measurement of Small Displacement in the Whole View Field by Image Correlation, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics*, (2008-12), (CD-ROM).