積分ドット重心追跡法による高精度ひずみ計測 (誤差低減手法の精度検討)

High Precision Measurement of Strain Distribution by Integrated Dot Centroid Tracking Method (Fundamental Study for Accuracy of Error Reduction)

和田義孝*・豊吉巧也**・古川知成***・山田知典****
Yoshitaka WADA, Takuya TOYOSHI, Tomonari FURUKAWA and Tomonori YAMADA

(Received October 26 2015)

This paper presents the effectiveness of the error reduction methods for integrated dot centroid tracking method. Two important sources of error and noise are lens distortion and brightness intensity fluctuation on each pixel, which should be taken in account to achieve high accuracy of full-field strain measurement. The method can correct lens distortion at any focal distance between a digital camera and an object. Pixel based noise reduction method using Kalman filter and integrated image by multiple images was proposed. When we need very accurate strain field, the lens distortion should be removed as possible as we can. Due to the corrections, 0.1% strain accuracy is accomplished and total computation time is reduced in comparison with an arithmetic mean operations. The effectiveness of the idea is shown through experimental and numerical examples and the result of strain field measurement is presented and discussed.

Key Words: Full-Field Strain Measurement, Integrated Dot Centroid Tracking Method, Sub-Pixel Effect, Lens Distortion

1. 緒言

機械構造材料として炭素繊維強化プラスチックの適用範囲を広げるためには、異方性材料の物性同定を迅速かつ精度よく行うことが求められている¹⁾。材料強度評価において複合材料の破壊はしばしば複雑な挙動を示し定量的な評価が難しい。このような挙動を理解するために、損傷力学の考え方により、見かけのヤング率やコンプライアンスを測定する強度評価方法が提案されている²⁾。つまり、損傷を受けた複合材料は剛性やヤング率が低下するため、与えたエネルギーと蓄積されるひずみ密度エネルギー分布を測定し負荷履歴に応じた損傷状態を知ることができる。古川ら³⁾は特別に設計された5軸の引張圧縮試験機を利用しCFRP内部の破壊に伴い散逸したエネルギーを計測し材料強度評価手法を提案した。CFRPのような複合材料では、様々な方向へ荷重を与えどのように散逸エネルギーが破壊と関係しているのかを調べる必要がある。つまり、試験片全体に渡っ

て圧縮と引張のひずみを短時間かつ正確に測定できることが重要である。

これらの高い要求に応えうる全視野ひずみ計測手法が提案されている。例えば、デジタル画像相関法^{4)~6)}、モアレ干渉法⁷⁾、位相シフト法⁷⁾、ドット重心追跡法^{8),9)}であり、それぞれ特徴を活かした対象に適用されている。これらの測定手法はデジタル画像を用いて非接触で計測するため、比較的簡便に大変形問題や移動が生じる試験片に対して適用できる。高解像度低ノイズイメージセンサ、高速データ転送技術などの進歩により高精細なデジタル画像処理が可能となった。このような進歩に伴い、0.1%未満のひずみにたいしてもひずみ計測が可能になりつつあるが、根本的な誤差低減を施さないと、全視野ひずみ計測の適用範囲も限られる。

工学における実問題では、非接触ひずみ計測技術は移動や回転する物体、または、恒温槽や燃焼室内部のような極限環境において極めて有効である。古川ら^{10)~12)}はこれら

* 近畿大学理工学部 機械工学科 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

Kinki University, Department of Mechanical Engineering (3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, 577-8502 Japan)

** 近畿大学総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻 (〒 577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

Kinki University, Graduate School of Science and Engineering, Department of Mechanical Engineering
(3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka 577-8502 Japan)

*** バージニア工科大学 機械工学科 (225 Goodwin Hall, Virginia Tech, 635 Prices Fork Road, Blacksburg, VA 24061)

Virginia Tech, Department of Mechanical Engineering (225 Goodwin Hall, Virginia Tech, 635 Prices Fork Road, Blacksburg, VA 24061)

**** 東京大学人工物工学研究センター (〒 277-8568 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

University of Tokyo, Research into Artifacts, Center for Engineering (5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8568 Japan)

の非接触ひずみ測定技術とバイズ推定を用いた材料試験を行いながら材料物性を同定するオンライン材料物性同定技術を提案した。バイズ推定により精度の向上が望め、さらにドット重心の計算では計算量が他の手法に比べ少なく済むためオンライン材料物性同定に向いている。しかし、それまでの研究においては ± 10 レベルの輝度値の変動およびレンズがもつ光学的ひずみにより安定して0.1%以下のひずみの計測が困難であった。0.1%ひずみ測定適用を考えると、生じているノイズは40%程度と大きく材料試験の高精度化の障害である。著者らは、0.1%ひずみを確実に測定するためにカルマンフィルタを用いたノイズ低減手法を提案した¹³⁾。さらに、ノイズを低減するために積分画像を用いる手法を提案した¹⁴⁾。測定値の誤差は機械的振動および光学的ひずみの重畳、計測のための照明から生じる不均一な明るさの分布、センサで生じるノイズなどが同時に影響を与える。カルマンフィルタによるノイズ低減技術は撮影に必要な枚数を半分にすることができた。

第2に、効果的かつ高速なレンズひずみ修正方法¹⁵⁾を提案した。計算量および計算時間を減少させるために、重心位置のみを解析的関係式を用いて、Newton-Raphson法で解を求める。しかし、通常のカメラのレンズおよび位置に関するモデルでは16の自由度を持つ上に非線形である^{16),17)}。したがって、係数決定が局所最適解しか得られないのが一般的である。ただし、0.1%以下のひずみの測定では1 pixel未満の変位しか生じないため局所解においても実用上有効なレンズひずみ係数を得ることができる¹⁵⁾。画像を直接修正する方法では、ひずみ除去は画素値の補間を画像全域で行うため画像中心から離れるほど誤差が大きくなる。

本報では、レンズひずみがどの程度ひずみ計測に影響をあたえるのかを調べ、センサノイズ除去とレンズひずみ除去を適用した時、0.1%ひずみ計測が可能であることを示す。次のように本報を構成する。第1章は、変位測定のための基礎的な考え方について述べ、続く第2章では積分ドット重心追跡法におけるノイズ源について述べる。第3章では、レンズひずみモデルと三次元空間におけるレンズひずみ曲線を示す。第4章では実験によって得られた変位およびひずみ測定結果を示し有効性について論じる。第5章は結論を述べる。

2. 積分ドット重心追跡法

サブピクセル効果^{8),9)}を利用したデジタル画像による2次元重心計算について述べる。ドットマークの形状は任意でよいが、ここでは最も簡単な黒い円とする。例えば、高粘着性シートに黒い円を印刷することにより容易に測定対象に貼付させ、輝度レベルを用いて重心位置を計算する。Fig.1(a)に示すよう輝度分布から、Fig.1(b)のように1/2 pixel移動したときに測定される輝度値を用いて重心位置を画素未満の精度で求めることをサブピクセル効果という。

Fig.1 Brightness intensity of sub-pixel effect: (a) initial state of object and image; (b) moved state of object and image.

この効果は変位の1階微分であるひずみ測定において精度上重要である。1画素は極めて小さい領域で輝度レベルを記録する最小単位である。通常は正方形で構成される。センサの画素はある（通常は極めて短い）時間の積分された輝度レベルを記録する。撮影された画像は被写体とカメラの距離およびレンズの焦点距離によって、1画素あたりの物体上の撮影される長さ X が決まる。また、各画素は n レベルの輝度値（多くは8 bits, 12 bits, 14 bitsなど）を持つ。理想とされる変位の分解能は X/n が期待される。

ここでは具体的に8 bitの深度を持つ正方形の画素と仮定する（Fig.1）。各pixelはすべて同じサイズである。これらは多くのイメージセンサ（CCD, CMOSなど）と同様である。通常JPEGなどの圧縮形式で記録されたデータの場合、各pixelは0から255の値を持つ。つまり $2^8 = 256$ 段階を表している。重心を求める計算ではグレースケールに変換した後に重心計算を行う。最大の輝度レベルは255、最小の輝度レベルは0とするが、重心位置を求めるため黒を255、白を0とする。この場合、255と線形結合で次のように計算される。

$$x_c = \frac{0.5(255 - I_1) + 1.5(255 - I_2) + 2.5(255 - I_3)}{255 \times 3 - I_1 - I_2 - I_3} \quad (1)$$

一般に次式のように記述される。

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i (n_{\text{level}} - I_i)}{\sum_{i=1}^n (n_{\text{level}} - I_i)} \quad (2)$$

ここで、 n は重心位置を求める対象となる素数、 n_{level} は画素の持つ輝度レベル、 x_i は画素の座標における位置、 I_i は

番号 i の pixel の輝度値である。この場合の分解能は $1/256$ である。12 bits の輝度レベルを持つイメージセンサでは、 $1/4096$ の分解能を持つ。実際の 2 次元空間における計測では、レンズの精度やレンズひずみ、センサの取り付け精度、センサのもつノイズ等の理由によりここで示した分解能を得ることは困難である。

積分画像は式 (4) より求める。この積分画像は主に白色ノイズで生じる誤差を平均化し結果として誤差を減じることができる。ラベリング法によって分けられたドットにおいて i 番目のドットを包含する $w_i \times h_i$ の矩形領域の輝度値の総和を式 (5) で求める。この総和量を用いてドットの重心位置を式 (6) から決定する。移動前後の輝度値の分布から重心の移動量（変位量）を輝度値の補間を必要とせず単位 pixel 以下の精度が得られる。

$$I_i(x,y) = \sum_{m=1}^x \sum_{n=1}^y I(m,n) \quad (3)$$

$$\sum_{m=x-w}^w \sum_{n=y-h}^h I(m,n) \quad (4)$$

$$= I_i(x,y) - I_i(x-w,y) - I_i(x,y-h) + I_i(x-w,y-h)$$

Fig.2 Error model for integrated dot centroid tracking method

Table 1 Notations for the error model

Symbols	Error type	Description	Counter measure
e_p^{const}	static random	printing or marking error from ideal dot pattern	large dot marks with high resolution sensor
e_{o-c}^{const}	evaluative / static nonlinear	relative positions between camera and objects	determination of accurate 3-d. reconstruction coefficients
e_l^{const}	evaluative / static nonlinear	lens distortion	mathematical model to correct distortion
e_s^k	evaluative / Gaussian	sensor noise	Kalman filter technique and integrated image
e_m^k	Random	mechanical vibration	adding heavy weight on tripod
e_{l-high}^k	Known / Periodic	light (flicker)	synchronizing FPS value to flicker or no flicking light
e_{l-low}^{const}	evaluative / static nonlinear	light (non-uniformity)	mathematical model to subtract non-niformity of brightness intensity level distribution
e_{soft}^k	evaluative	discretized error (i.e. finite element discretization)	mathematical model to correct using relative error evaluation

$$x_c = \frac{\sum_{m=x-w}^w \sum_{n=y-h}^h x_i \times I(m,n)}{\sum_{m=x-w}^w \sum_{n=y-h}^h I(m,n)} \quad (5)$$

3. 誤差要因となるノイズ

3.1 積分ドット重心追跡法におけるノイズモデル

測定精度はいくつかの誤差原因の影響により決定される。高精度を達成するためには、誤差原因となるノイズを特定しモデル化することで効果的な対策を講じられる。Fig.2 に本研究で想定している誤差要因を示す。また、8 つの要因の説明と低減するための方針を Table 1 に示す。本稿で対策を講じるノイズや誤差は 2 つあり、画素レベルの輝度値レベルのノイズ (e_s^k) とレンズの光学的ひずみによる誤差 (e_l^{const}) を対象とする。機械的振動 (e_m^k) およびライトの明滅 (e_{l-low}^{const}) に関しては対策をすでに施している。その他の誤差要因については現状では対策を行っていない。

3.2 画素レベルにおけるノイズ低減手法¹³⁾

著者らは個々の画素で輝度レベルのノイズ (e_s^k) を減じる手法を提案した。この手法では、最初実際に測定に用いるドットマークを撮影し、すべての画素を用いて輝度レベルごとの標準偏差を求める。この標準偏差分布を Fig.3 に示す。この標準偏差の輝度値に対する分布は主に計測に用いるカメラの特性に強く影響される。したがって、カメラ毎に決定することが要求される。次に、複数の画像をカルマンフィルタにより真の輝度レベルを推定する。全画素についてこの処理を行うことにより画素レベルのノイズを大幅に減少可能である。実験により 25 画像を用いれば何も処理しない 50 画像の平均を用いた結果に相当する誤差低減効果が得られる。特に撮影枚数を増加させた場合の時間削減効果は大きい。

3.3 レンズひずみの除去¹⁵⁾

Fig.5 に理想ドットマークとレンズにより光学的に歪んだ

Fig.3 Distribution of deviations according to brightness intensity level which represents camera noise model.

Fig.4 Ideal and distorted image of dot shapes by distortion model represented by Eq. (6).

ドットマークを示す。一般的なレンズは屈折に伴う結像時の歪みが生じる。この光学的なひずみをここではレンズひずみ (e_l^{const}) とよぶ。式 (6) で計算される重心位置は理想ドットマークでは円の中心となる。

$$\begin{aligned} r_{\text{ideal}} &= \sqrt{x_{\text{ideal}}^2 + y_{\text{ideal}}^2} \\ x_{\text{distorted}} &= x_{\text{ideal}}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ y_{\text{distorted}} &= y_{\text{ideal}}(k_0 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、画像の中心を原点とし、 x_{ideal} および y_{ideal} は歪みを持たない理想画像における位置、 r_{ideal} は原点からの距離、 k_0, k_1, k_2 はレンズひずみを表す係数である。レンズひずみにより歪んだドットの重心位置は図のように画像中心から離れるに従い歪みが大きくなる。この場合には、ドットマークの重心位置が画像中心へ移動する (Fig.4)。

著者らは式 (6) によるレンズひずみを仮定しドットマークの重心に対してレンズひずみ除去を行った¹⁵⁾。ここで、Fig.5 に理想ドットマークと歪んだドットマークを示す。歪んだドットマークは連続的に変化するため楕円形状に見えるが楕円ではない。重心計算を式 (6) で変換した式を式 (7) から (9) に示す。計測されるドットマークは Fig.5 の破線となる。計測結果から理想ドットマークの重心位置を求めるためには式 (7) から (9) の逆変換が必要である。この逆変換を解析的に行うことは困難であるため、Newton-Raphson 法で数値的に逆変換を行う。重心位置のみの逆変換は高速に実行できる。

$$x_g = \frac{S_{dx}}{S_d} \quad (7)$$

ここで、 x_g は Fig.5 で示すゆがんだドットマークの重心位置、

Fig.5 Image of ideal dot and distorted marks: distorted mark is not ellipse.

S_{dx} は撮影された断面一次モーメント、 S_d は撮影されたドットの面積である。

$$\begin{aligned} \frac{S_d}{\pi r_c^2} &= k_2^8 r^8 + 2k_1 k_2 r^6 + 2k_0 k_2 r^4 + k_1^2 r^4 + 2k_0 k_1 r^2 + k_0^2 \\ &\quad + 2a^2(10k_2^2 r^6 + 12k_1 k_2 r^4 + 6k_0 k_2 r^2 + 3k_1^2 r^2 + 2k_0 k_1) \\ &\quad + 3a^4[2k_2\{2r^2(5k_2 r^2 + 3k_1) + k_0\} + k_1^2] \\ &\quad + 8a^6 k_2(5k_2 r^2 + k_1) \\ &\quad + 5a^8 k_2^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{S_{dx}}{\pi r_c^2} &= a\{r^2(5k_2 r^2 + 3k_1) + k_0\}(k_2 r^4 + k_1 r^2 + k_0)^2 \\ &\quad + a^3(105k_2^3 r^{10} + 195k_1 k_2^2 r^8 + 110k_0 k_2^2 r^6 \\ &\quad + 110k_1^2 k_2 r^6 + 108k_0 k_1 k_2 r^4 + 18k_1^3 r^4 \\ &\quad + 21k_0^2 k_2 r^2 + 21k_0 k_1^2 r^2 + 5k_0^2 k_1) \\ &\quad + a^5(525k_2^3 r^8 + 650k_1 k_2^2 r^6 + 220k_0 k_2^2 r^4 \\ &\quad + 220k_1^2 k_2 r^4 + 108k_0 k_1 k_2 r^2 + 18k_1^3 r^2 \\ &\quad + 7k_0^2 k_2 + 7k_0 k_1^2) \\ &\quad + a^7(875k_2^3 r^6 + 650k_1 k_2^2 r^4 + 110k_0 k_2^2 r^2 \\ &\quad + 110k_1^2 k_2 r^2 + 18k_0 k_1 k_2 + 3k_1^3) \\ &\quad + a^9(525k_2^3 r^4 + 195k_1 k_2^2 r^2 + 165k_0 k_2^2 \\ &\quad + 11k_1^2 + k_2) \\ &\quad + a^9(105k_2^3 r^2 + 13k_1 k_2^2) \\ &\quad + a^{13}(5k_2^3) \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 レンズひずみの分布とモデル化

Fig.6 に実験で用いたレンズひずみ分布を対象までの距離を 4 つの場合 (無限遠, 3 m, 1 m, 30 cm) で描いた図を示す。この四つの場合はレンズ製造元から得た値である。それぞれの線は 7 つのポイントからスプライン補間により求めた関数を用いて描いた。これらの分布から距離が 75 cm, 60 cm と 50 cm のときのひずみ分布を求めた。レンズひずみ係数 k_1, k_2, k_3 はこの分布に最もフィットできるように最小二乗法により係数を求めた。利用したカメラの仕様を以下に示す

Fig.6 Optical distortion: 35 mm focal length lens and interpolated distortion curves: (a) distortion curves for full range; (b) distortion curves for sensor size range

Camera: Flea3 FL3-U3-88S2C-C of PointGrey Research,
 Sensor: Sony IMX121 CMOS, 1/2.5", 1.55 μm ,
 Shutter mechanism: Rolling Shutter with Global Reset,
 Resolution and Frame rate: 4096 $\times$ 2160 at 21 FPS,
 Lens: 35 mm Focal Lens, Maximum F number is 1.4.

1/2.5 インチサイズの CMOS センサは約 5.7 mm $\times$ 4.3 mm のサイズの長方形形状である。センサ面中心からセンサ四隅までの距離は 2.35 mm である。実験では、焦点と対象物体までの距離は 0.25 m から 1 m である。レンズひずみ係数は -0.0248 から 0.0319 と変化する。ひずみ計算は三角形一次要素を用いて有限要素法と同様に求めた。ひずみ成分は要素内一定となることからレンズひずみが適切に除去できなければ 0.1 % ひずみ計測に対して影響を大きく与える誤差が生じることになる。

Fig.7 Specimen: dot mark sticker sheet with different size dots

4. 実験結果と考察

4.1 実験条件

著者らはすでに帯板の引張試験を行い最も基本的な測定精度をひずみゲージと比較した¹⁴⁾。本報では応力集中の測定がどの程度可能かを検討するため円孔付き帯板の試験片を選定した。**Fig.7** に円孔付き帯板試験片を示す。厚み $t=3$ mm、ドットマークを貼付した領域は、円孔を中心に約 80 $\times$ 30 mm の領域である。材質は A2017-T4 であり、ヤング率は 69.09 GPa、ポアソン比 0.35 とした。ドットマークは厚み $t_s=0.15$ mm のポリエステル製の強粘着シートに印刷（1200 dpi 相当）した。一般にポリエステルのヤング率は 2.1 から 4.2 GPa 程度であり厚みは試験片の 1/20 である。以上より強粘着シートの剛性は試験片に比べて 1/2000 から 1/1000 程度であることより計測結果において影響はないと考える。

試験片には変位制御で 0.1 % ひずみ相当の変位を与える。初期状態で 100 画像を撮影した。その後 0.1 % 相当の強制変位を与え 50 画像撮影した。50 枚の撮影時間は約 2.5 秒である。初期撮影された測定点に対して Delaunay 三角形分割を行い測定対象に三角形一次要素のメッシュを生成した。すべてのひずみ成分はグリーンのひずみを式 (9) 用いて求めた。**Fig.6** (b) のレンズひずみの分布より、今回の撮影条件におけるレンズひずみ係数を $k_0 = -4.549 \times 10^{-5}$, $k_1 = -6.555 \times 10^{-7}$, $k_2 = -2.617 \times 10^{-9}$ と求め提案手法によりドット位置を補正した。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (10)$$

4.2 変位計測結果と考察

Fig.8 に変位測定結果を示す。Fig.8(a) は、引張方向 (y 方向) の変位測定結果 (補正済) であり、Fig.8(b) はレンズひずみの補正量である。すべて単位は pixel で表示する。理由は本稿ではひずみ計測が目的であり、計算に直接用いられている変位の単位も pixel のためここでも pixel で表示した。レンズひずみ補正量は、ドットの初期値と変位した位置に依存する。この試験では斜め左上と右下の対角方向に引張られたため Fig.8(b) のような左右非対称の補正量となる。Fig.8 では、要素重心位置 (節点の平均) の変位を用いて要素単位で塗りつぶしの図とした。同様に補正量も要素重心位置を用いて可視化した。試験片下部を固定しクロスヘッドは上部に位置する。上端部では約 24 pixel の変位が測定され、下部においても、約 19 pixel の変位が測定された。撮影条件およびレンズおよびカメラの仕様から計算すると、レンズひずみによる最大の誤差は、レンズひずみ

が 0.03 %、変位に換算すると 0.35 pixel に相当する。測定対象中心に座標系中心をおいた場合、上端および下端で約 2.5 pixel の最大変位が観測される。この変位に対して、0.35 pixel は、14 % の誤差を生じることがわかる。測定精度が高いため試験片の取り付け状態や実際に引張られている方向が精密に測定される。そのため、変位の最大が左上、最小が右下にあることが Fig.8(a) より分かる。有限要素解析への正確な境界条件を与える目的においても本手法が有効に活用できる。

4.3 ひずみ計測結果と考察

Fig.9 にひずみ計測結果を示す。Fig.9(a) に引張方向 (y 方向) のひずみ分布 ε_{yy} を示す。変位分布および生成されたメッシュから式 (10) で定義される Green のひずみを用いて求めた。Fig.9(b) にレンズひずみによるひずみの補正量 $\varepsilon_{yy}^{\text{correct}}$ を示す。変位の補正量と同様の理由で試験片に対して非対称となる。また、同様に滑らかな分布に見えるが、要素単位で塗りつぶしの図であり、要素内一定の補正量を示す。試験条件では、0.1 % ひずみを与えた場合、円こう近傍では 0.35 % ひずみが計測される。

Fig.9(a) に示すようにひずみ集中は円孔縁において観測されている。その量は約 0.35 % から 0.45 % の間にある。Fig.9(b) から最大 0.032 % のひずみ修正が必要となる。この誤差は 0.1 % ひずみが生じている部位に生じるので変位より割合誤差の影響が大きく約 32 % となる。特にひずみ計測において測定中心から離れる部位のひずみが相対的に大きくない場合には、レンズひずみによる修正を積極的に行わないと大きな測定誤差を生じることになる。特殊なレンズを除き通常のレンズでは、実験で使ったレンズより大きなレンズひずみが生じる。また、非接触全視野ひずみ計測の利点として、大変位における測定がある。この場合、ここで議論している誤差は、総和に対しては相対的に小さいため問題ではなくなる。一方で、計測ステップごとの増分に対しては必要な措置である。

分解能を議論した既報¹⁴⁾においては帯板にひずみゲージを (試験片の表裏の同じ位置に) 貼付し引張試験による比較も行った。表裏のひずみゲージどうしても 5 % 程度の差は生じた。それらの平均値と提案手法を比較すると、10 % 未満の差異で計測出来ていることが分かっている。

以上より定性的および定量的評価において提案手法が全視野ひずみ計測において 0.1 % ひずみを精度よく計測できることが分かった。

5. 結論

本報では、これまで著者らが提案してきた全視野ひずみ計測における技術、積分ドット重心追跡法を実験結果と比較し有効性を示した。次の結論が得られた。

- (1) 初期設定が終了すれば、各変位において測定自体は 2~3

Fig.8 Displacement field in y direction: (a) displacement distribution; (b) displacement correction of lens distortion.

Fig.9 Strain field in y direction: (a) strain distribution; (b) strain correction of lens distortion.

秒程度

- (2) レンズひずみ 0.03 %、0.1 % ひずみ相当の強制変位を与えた場合、変位 u_y の最大誤差は約 14 %
- (3) レンズひずみ 0.03 %、0.1 % ひずみ相当の強制変位を与え、ひずみ ϵ_{yy} の最大誤差は約 32 %
- (4) 大変位ではこれらの誤差は相対的に小さいため総和に対しては問題とならないが、増分に対しては誤差の除去は必須
- (5) 0.1 % ひずみを十分な精度で計測することが可能であることを示した

参考文献

- 1) 藤原直也、阿南匡範：各種高分子複合材料の評価方法の動向、(株)コベルコ科研 技術ノート「こべるにくす」、**42** (2014) 7-9.
- 2) Mast, P., Nash, G., Michopoulos, J., Thomas, R., Wolock, I., and Badaliane, R.: Characterization of Strain Induced Damage

- in Composites Based on the Dissipated Energy Density Part I. Basic Scheme and Formulation., Theoretical and Applied Fracture Mechanics, **22-2** (1995) 71-96.
- 3) Furukawa, T. and Michopoulos, J.: Computational Design of Multiaxial tests for Anisotropic Material Characterization, International Journal for Numerical Methods in Engineering, **74-12** (2008) 1872-1895.
- 4) Vendroux, G. and Knauss, W., G.: Submicron Deformation Field Measurements: Part 2. Improved Digital Image Correlation, Experimental Mechanics, **38-2** (1998) 86-92.
- 5) 畝田道雄、粘奥畑峻、石川憲一：デジタル画像相関法を用いた全視野変形・ひずみ測定精度評価研究、日本機械学会論文集（C 編）、**76-763** (2010) 587-594.
- 6) 有川秀一、富永泰隆、米山聡：スペックル干渉・画像相関ハイブリッド法による広レンジひずみ測定、実験力学、**12-3** (2012) 235-242.
- 7) 藤垣元治、森本吉春：改造が容易な全視野計測研究用ソフトウェアの開発、実験力学、**8-4** (2008) 323-326.
- 8) Iliopoulos, A. P. and Andrianopoulos, N. P.: An Approach to Analyze Errors Introduced in the Random Grid Strain Measurement Method, International Journal for Experimental Mechanics, Strain, **46-3** (2010) 258-266.
- 9) Iliopoulos, A. P. and Andrianopoulos, N. P.: Performance Analysis of the Mesh-Free Random Grid for Full-Field Synthetic Strain Measurement, International Journal for Experimental Mechanics, Strain, **48-1** (2012) 1-15.
- 10) Michopoulos, J. G., Hermanson, J. G., Iliopolus, A., Lambrakos, S. and Furukawa, T.: On the Constitutive Response Characterization for Composite Materials via Data-driven Design Optimization, Proc. ASME. 54792; **2 A and B** (2011) 499-511.
- 11) Furukawa, T., Michopoulos, J., Pan, J. W. and Iliopoulos, A. P.: Online Material Characterization Using Full-Field Strain Measurement, Proc. ASME. 54792; **2 A and B** (2011) 527-535.
- 12) Furukawa, T., Wada, Y., Michopoulos J. G. and Iliopoulos, A.: Probabilistic Vision-Based Full-Field Displacement and Strain Measurement via Uncertainty Propagation, Proc. ASME. 45011; **2 A and B** (2011) 981-987.
- 13) Wada, Y. and Furukawa, T.: Noise Reduction Technique for Digital Image Based Full Field Strain Measurement, Proc. ASME. 45011; **2 A and B** (2012) 967-972.
- 14) 豊吉巧也、和田義孝、古川知成：積分ドット重心追跡法による測定分解能（第1報、静的引張試験におけるひずみ計測）、日本計算工学会論文集、**2015-20150010**, 2015, p9.
- 15) Toyoshi, T., Wada, Y. and Furukawa, T.: Camera Calibration Method for Accurate Full-field Strain Measurement by Dot Centroid Method, Proc. ASME. 45011; **2 A and B** (2012) 959-966.
- 16) Kobayashi, K. and Mori, C.: Relations between the Coefficients in the Projective Transformation Equation the Orientation Elements of a Photograph, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **6-9** (1997) 1121-1127.
- 17) Bradski, G. and Kaehler, A.: Learning OpenCV, Oreilly & Associates, 2008.