サブピクセル画像処理を用いた構造物の 非接触変形・応力計測法に関する研究*

畝田道雄** 柴原正和*** 松石正克**** 石川憲一** 岩田節雄† 北村幸嗣†

Studies on Non-Contact Deformation and Stress Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing

Michio UNEDA, Masakazu SHIBAHARA, Masakatsu MATSUISHI, Ken-ichi ISHIKAWA, Setsuo IWATA and Koji KITAMURA

Strain gauges are frequently used for inspecting the strength and reliability of actual structures. However, the measurement of actual structures by strain gauges needs dangerous works such as pasting strain gauges and cabling them to strain meters located in a remote place. Therefore there is a growing demand for developing non-contact and accurate deformation and stress measuring technique of structures.

The authors developed a non-contact and accurate deformation and stress measuring technique using the sub-pixel digital image processing method. This paper presents the detail of the measuring technique and the method of analyzing the measured data, and the results of performance test of the measurement system. The results of the numerical computation and the experiments demonstrated the effectiveness of our deformation and stress measuring technique using the sub-pixel digital image processing method.

Key words: sub-pixel image processing, deformation and stress measurement of structures, non-contact measurement, images correlation, response surface method

1. 結 言

現在、鉄筋コンクリートや鉄鋼材料等からなる構造物や、レール等の鉄道構造物に関して、これら構造物の健全性確保や長期信頼性の保証、補強・改修必要性の判断を目的として、様々な調査や点検が実施されている¹⁾。加えて、昭和30年から40年代の高度経済成長期に建設された公共構造物の供用年数が40年近くなった昨今、維持・管理技術の重要性が増してきている²⁾。

このような維持・管理技術として広く用いられている計測方法に、ひずみゲージを用いた方法がある。そして、ひずみゲージによる方法は、信頼性の高さに加えて、計測原理が簡易であることから一般的に用いられている。しかし、実構造物の測定現場でひずみゲージを貼り付けるには手間とコストを要し、時には作業者が危険な環境に立ち入る必要もある。また、ゲージの貼り付け位置のひずみ情報しか得られないことや、取り付けミスが発生する可能性があること、環境によっては測定できないこと、変形が大きい場合には測定できないこと等の問題を有している^{3,4)}。このことから、ひずみゲージを用いずとも高精度に構造物の変形や応力状態を計測できる方法の開発が望まれており、特に光学的計測法の適用が検討されている。

非接触で且つ、光学的に計測する有効な方法の一つとしては、レーザを用いたホログラフィ干渉法がある⁵⁾。しかし、ホログラフィ干渉法においてはレーザ光源、ミラー、ビームスプリッター等の特殊装置を必要とするものであり、上記した構造物の計測に適しているとは言い難いと考えられ

る。

一方、デジタルカメラ等のデジタル画像記録機器は飛躍的に性能が向上し、近年のコンピュータの発展とともに構造物のひずみ計測に画像処理を応用する研究が盛んに行われるようになってきている^{3,4,6,7)}。このような中であって著者らは、構造物の変形・応力計測技術に、これまで画像照合という異分野で検討されてきた技術としてのサブピクセル画像処理^{8,9)}を用いることによって、高精度変形・応力計測を可能にすることを目指して検討を行ってきている。

すなわち、本研究ではサブピクセル画像処理技術を応用して、非接触・高精度変形・応力計測法を開発することを目的としている。本論文では、サブピクセル画像処理を用いて、構造物の変形・応力計測までの一連の解析を行った場合における計測性能評価に関して、理想画像を用いた変形・応力計測シミュレーション、並びに、実験によって本方法の有効性を確認した結果を述べる。

2. サブピクセル画像処理を用いた変形・応力計測法

2.1 応答曲面法を用いたサブピクセル変形・応力計測法

画像相関法と応答曲面法を用いた構造物のサブピクセル変形・応力計測法について、図1に示すようにX軸方向、Y軸方向のピクセルサイズを単位とする長さ S_x 、 S_y の(a)変形前の基準画像及び(b)変形後の計測画像がある場合を例に、その概要を述べる。

はじめに、基準画像、計測画像におけるピクセル座標計測点(以下、計測点とする。) $N_0(x,y)$ 、 $N_{a0}(x,y)$ をそれぞれ計測基準位置とする比較部分画像 $A_0(x,y)$ 、 $A_{a0}(x,y)$ を設定する。なお、ここでの比較部分画像 $A_0(x,y)$ 、 $A_{a0}(x,y)$ は取得した基準画像、並びに計測画像の一部を、それぞれ計測点 $N_0(x,y)$ 、 $N_{a0}(x,y)$ をその図心として切り出したものであり、比較部分画像のX軸方向のピクセルサイズを d_x 、Y軸方向のピクセルサイズを d_y とする。そして、比較部分画像 $A_0(x,y)$ と $A_{a0}(x,y)$

* 原稿受付 平成17年6月14日

** 正会員 金沢工業大学(石川郡野々市町扇が丘7-1)

*** 大阪府立大学(堺市学園町1-1)

**** 金沢工業大学(石川郡野々市町扇が丘7-1)

† 日造造船株式会社技術研究所(大阪市大正区船町2-2-11)

Fig.1 Deformation measurement method by images correlation

の相関値 $r(x, y)$ を求める。

次に、計測画像中における点 $N_{d0}(x, y)$ を基準に、その周囲をX, Y軸方向にそれぞれ1ピクセルを最小変化量として、例えばX軸及びY軸方向にそれぞれ m_x, m_y ピクセル変化させた点 $N_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ における比較部分画像 $A_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ を順次設定する。なお、点 $N_0(x, y)$ や点 $N_{d0}(x, y)$ の場合と同様に、点 $N_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ は比較部分画像 $A_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ の図心とする。そして、 m_x, m_y の値をそれぞれ掃引（スキャン）することで、比較部分画像 $A_0(x, y)$ と $A_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ の相関値 $r(x + m_x, y + m_y)$ を求める。ここで、 m_x, m_y に関しては、それぞれで最大値（ $m_{x, max}, m_{y, max}$ ）、最小値（ $m_{x, min}, m_{y, min}$ ）を有する整数である。そして、計測点 $N_0(x, y)$ の変形後におけるピクセル単位での移動量（変位量）として、相関値 r の値を極値とする m_{x0}, m_{y0} を求めることになる。

ところで、相関値 r を極大あるいは極小とするかについては、使用する相関法に依存するものであり、本論文では残差自乗和相関を用いた。したがって、相関値 $r(x + m_x, y + m_y)$ は式(1)で与えられるとともに、これを最小とする m_{x0}, m_{y0} を求めることになる。すなわち、残差自乗和相関における相関値 $r(x + m_x, y + m_y)$ は、 $A_0(x, y)$ と $A_{dm}(x + m_x, y + m_y)$ からなる差分行列の要素自乗和を表す。

$$r(x + m_x, y + m_y) = A_0(x, y) - A_{dm}(x + m_x, y + m_y) \quad (1)$$

なお、記号 $\|\bullet\|_p$ は行列要素の p 乗和を表すノルムである¹⁰⁾。そして、 m_{x0}, m_{y0} の値は、基準画像中における計測点 $N_0(x, y)$ が計測画像中における点 $N_{dm0}(x + m_{x0}, y + m_{y0})$ に移動したとするピクセル単位での変位計測値を意味するものとなる。

一方、上記方法で構造物の変形計測を実施する場合、計測値の最小分解能は、当然1ピクセルとなる。ところが、実構造物の変形計測における分解能としては、1ピクセル以下が要求されることが多いと考えられる。そして、一般に1ピクセル以下の画像移動量はサブピクセルレベルの移動量と呼ばれる。このサブピクセルレベルの移動量を検出するための方法が、画像間に変形を伴わない画像照合の分野において検討が進められている。

ここで、上記サブピクセルレベルの位置ずれを検出する有効な方法として、応答曲面を用いた幾つかの方法が提案、検討されてきている⁴⁾⁸⁾。すなわち、ピクセルレベルで計算された、画像相関法に基づく相関面の極近傍を何らかの関数によって曲面（応答曲面）近似を行い、得られる応答曲面が極値を示す座標を調べて、その座標からサブピクセル

レベルの位置ずれ量を計測するものである。そこで本論文においては、上記応答曲面関数を $g(x, y)$ として、変数 x, y に関する次式、

$$g(x, y) = \alpha_1 x^2 + \alpha_2 y^2 + \alpha_3 xy + \alpha_4 x + \alpha_5 y + \alpha_6 \quad (2)$$

で与えられる2次曲面関数¹¹⁾を用いるものとしてサブピクセルレベルでの変形計測を実施するものとした。係数 α は、ピクセルレベルにおける相関値の極値となる (m_{x0}, m_{y0}) を基準に、(X軸： $m_{x0}-1, m_{x0}, m_{x0}+1$ の3点) × (Y軸： $m_{y0}-1, m_{y0}, m_{y0}+1$ の3点) = 合計9点の相関値からなるデータ点集合を用いての最小自乗法によって求めるものとした。なお、文献¹¹⁾においては適用範囲が変形計測ではないものの、重回帰分析で用いられる自由度修正済み決定係数を用いて応答曲面を決定するために用いるデータ点集合の最適選択方法について検討されているが、本論文においては前述の方法のように最適選択までは実施していないことを付記する。

2.2 サブピクセルレベル変形計測値を用いた応力解析法

前節の方法によって求められた変位計測値を用いて応力を計算することは、次の方法によって可能になると考えられる。すなわち、基準画像中における応力計測の要素は、X軸方向に p_x 、Y軸方向に p_y となる方形であると仮定する。そして、基準画像中における計測点 $N_0(x, y)$ に対して、X軸方向およびY軸方向において、隣り合う計測点を $N_1(x + p_x, y)$ 、 $N_3(x, y + p_y)$ とするとともに、対角上にある計測点を $N_2(x + p_x, y + p_y)$ として考えると、これら4つの計測点からなる要素によって、応力解析を実施することができる。この場合、これら4つの計測点 $N_i(x, y)$ ($i = 0 \sim 3$)が、X軸方向、Y軸方向にそれぞれ、 u_i, v_i 移動したと考える。このとき、これら4計測点からなる要素中心点 $N_{c0}(x + p_x/2, y + p_y/2)$ が変形後に生じるX軸方向ひずみ、Y軸方向ひずみ、剪断ひずみ、並びに、X軸方向応力、Y軸方向応力、剪断応力をそれぞれ、 $\epsilon_x(x + p_x/2, y + p_y/2)$ 、 $\epsilon_y(x + p_x/2, y + p_y/2)$ 、 $\gamma_{xy}(x + p_x/2, y + p_y/2)$ 、並びに、 $\sigma_x(x + p_x/2, y + p_y/2)$ 、 $\sigma_y(x + p_x/2, y + p_y/2)$ 、 $\tau_{xy}(x + p_x/2, y + p_y/2)$ とすると、これらの値は簡易的に、

$$\epsilon_x(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) = \frac{(u_1 + u_2) - (u_0 + u_3)}{2p_x} \quad (3)$$

$$\epsilon_y(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) = \frac{(v_2 + v_3) - (v_0 + v_1)}{2p_y}$$

$$\gamma_{xy}(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) = \frac{u_3 - u_0}{2p_y} + \frac{v_1 - v_0}{2p_x} + \frac{v_2 - v_3}{2p_x} + \frac{u_2 - u_1}{2p_y}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \\ \sigma_y(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \\ \tau_{xy}(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \end{pmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \\ \epsilon_y(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \\ \gamma_{xy}(x + \frac{p_x}{2}, y + \frac{p_y}{2}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

として求めることができる。なお、 E は測定対象物の縦弾性係数、 ν はポアソン比である。すなわち、上式を用いることによってサブピクセルレベルでの変位計測値に基づいて応力解析を行うことができる。

3. 理想画像を用いたサブピクセル変形・応力計測法に関する性能評価シミュレーション

前章までの計測法を基に、本章では単純一軸引張りによ

Fig.3 Brightness values of both original image and deformed image for computation

って生じる画像変形をモデル化し、その変形・ひずみ計測を実施することによって、本研究で提案するサブピクセル変形・応力計測法の精度を検証する。なお、本シミュレーションは理想画像を作ることによってサブピクセル方法の精度限界に及ぼす画像特有の階調度、いわゆるbit数に起因した画像輝度値の分解能の影響を知ることを行なったものである。

3.1 変形前後における画像のモデル化

ここでは、図2に示すような（変形前）画像を検討対象として議論を進める。基準画像、並びに計測画像のサイズは、X軸： S_x ピクセル、Y軸： S_y ピクセルとした。また、各ピクセルにおける輝度値を0～65535での整数で表現した。すなわち、本検討では、16bit画像をモデル化している。このとき、Y軸方向での輝度値はすべて同一であるとし、X軸方向への輝度値の変化は、図3に従うと仮定する。このとき、基準画像におけるX軸方向にxピクセル、Y軸方向にyピクセルでの輝度値 $f_0(x,y)$ は、

$$f_0(x,y) = R \left[\frac{65535}{S_x - 1} (x-1) \right] \quad (5)$$

となる。なお、xは1～ S_x 、yは1～ S_y 間の自然数であり、 $R[\cdot]$

は小数点第1位を四捨五入する処理を表すものとする。

次に、計測画像（変形後画像）を、図2の基準画像（変形前画像）に対して、X軸方向に Δx の伸びを生じた場合として考える。このとき、計測画像における輝度値 $f_d(x,y)$ は、

$$f_d(x,y) = R \left[\frac{65535}{S_x - 1 + \Delta x} (x-1) \right] \quad (6)$$

として与えられ、それは図3に示したようになる。

3.2 サブピクセル変形・応力計測法の精度検証

図4(a)は、 S_x を1001ピクセル、 S_y を201ピクセルとし、変形量 Δx を3ピクセルとした場合、すなわち、画像間の変形に伴うX軸方向のひずみ ϵ を3000 μ (0.003)とした場合において、変位計測点xと変位計測値、並びに、理論変位量の関係を示している。また、同図(b)は変位計測値と理論変位量との間で生じる変位計測誤差の分布を示している。なお、本シミュレーションの場合におけるxピクセルでの理論変位量とは、画像に階調制限を設けない場合として、その値は、 $\epsilon(x-1)$ で与えられる。一方、比較部分画像のサイズとしては、 $d_x=d_y=S_y$ とした。したがって、相関値の掃引はX軸方向のみとしたため、式(2)で与えた応答曲面関数においても、この場合はX軸方向のみの変化を取り扱った。また、同図(c)は同図(a)のサブピクセル変形計測値を用いて、ひずみ計測（計算）を行った結果である。なお、X軸方向ひずみ $\epsilon_x(x,y)$ を求めた。

この結果から、変位計測値は理論変位量と同等の結果であり、変位計測誤差分布においても、その程度は 10^{-4} ピクセルオーダーであり、かなりの高精度で計測できていることが分かる。一方、この変位計測値に基づいてひずみ計測を行ったところ、同図(c)から、 $\pm 100\mu$ (± 0.0001) 程度のひずみ計測誤差があることが分かる。

ここで、このように変位・ひずみの計測値に対して誤差を生じる理由としては、階調制限に起因した誤差の丸めこみがあると考えられる。すなわち、今回のシミュレーションにおいては階調制限画像を作るにあたり、式(5)、(6)に示したように、小数点以下情報の四捨五入による丸めこみを行ったが、この際に隣接するピクセル間同士で類似の丸め

Fig.4 Computation results of deformation and strain measurement value at (d_x, d_y) values of 201 and ϵ of 3000 μ

Fig.5 Effect of image strain on maximum measured error of strain

Fig.6 Decreasing of maximum measured error of strain by averaging processing of measured strain value

Fig.7 An example of mean stress averaged over 3 x 3 measurement points

こみが行われたことで、画像情報が階段状になったことが原因と考えられる。すなわち、理想画像におけるシミュレーションにおいて当該事項を原因とする誤差を生じることから、本結果は実際に取得される画像の解析における精度限界の指針を与えるものであると考えられる。

図5は画像に生じたひずみが、ひずみ計測値の誤差分布に及ぼす影響を検討した結果である。なお、誤差分布としてはひずみ計測における最大誤差値で評価した。この結果より、画像のひずみが $1/d_x$ 以下である場合には誤差分布はほぼ一定であることに対して、画像のひずみが $1/d_x$ 以上となる場合には誤差分布は急増していることが分かる。すなわち、画像のひずみが $1/d_x$ 以上となる場合、基準画像において $1 \sim d_x + \alpha$ ピクセル内に含まれていた画像情報が、計測画像において $1 \sim d_x + \alpha$ ピクセル内に含むことになる。このことから、変形計測における誤差が増加することによって、このような結果になるものと考えられる。

このようにして生じるひずみ計測値の誤差を低減する有効な方法として、近傍計測点同士の平均化処理があると考えられる。図6はひずみの誤差分布低減に与える平均化処理サイズの影響を示している。なお、ここでの平均化処理は図7に示すように、各計測点で計測された応力値に対しての平均化処理を意味している。すなわち、図7では平均化処理サイズ A_s が3である場合を一例として模式的に示しているが、平均化処理前に計測点 $N(i,j)$ で得られる応力値 $\sigma_{i,j}$ を平均化処理後に $\bar{\sigma}_{i,j}$ と置き換えることになる。図6に示すように、平均化をしない場合（同図横軸の平均化処理サイズ A_s が1の場合）の誤差分布に比較して、平均化処理を行うことによって誤差分布は大きく低減できていることが分かる。加えて、平均化をしない場合には図5に示したように画像に生じたひずみの大小がひずみ計測精度に及ぼす影響は大きく、それは図6の平均化処理サイズが1である場合の結果から見受けられる。一方、平均化処理を行うことによって画像のひずみによる精度の相違は殆ど無いことが分かる。このことから、平均化処理によってひずみ計測精度を向上することができると言える。

したがって、画像による構造物の変形・ひずみ計測を行う場合、画像の階調制限に起因する誤差要因の影響等を受けることになるが、それを低減するためには平均化処理が有効な方法であると考えられる。

Fig.8 Experimental set-up configuration

Fig.9 Detail of test-piece

Fig.10 An example of surface of test-piece

4. 実験による性能検証

4.1 実験方法

実験は図8のような状況で行った。すなわち、引張試験機によってアルミ（A5052-O、縦弾性係数 $E=69.3\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ ）製の帯板、並びに円孔板試験体の引張試験を行い、その引張りによって各試験体に生じる変形量、並びにひずみ量をサブピクセル画像処理によって計測するというものである。なお、使用した引張試験機は上部チャックが固定され、下部チャックが下方に移動するものである。

試験体は図9のような形状であり、同図(a)が帯板試験体、同図(b)が円孔板試験体である。ここで、実験で用いたアルミ板には、図10のようにスプレー塗料による微小特徴の付与を行っている¹²⁾。図10(a)は幅30mmのアルミ板の外観であり、図10(b)はピクセルによる格子模様が見えるまでに図10(a)の一部を拡大した写真である。すなわち、元々のアルミ材には光沢が有り、①実構造物の表面性状を考えての防

Table 1 Analysis cases of deformation and stress measurement

(a) Without hole (Case I)	
Original image	$\varepsilon_a = 0\mu$
Case I-1	$\varepsilon_a = 349\mu$ (337 μ , 338 μ , 364 μ , 357 μ)
Case I-2	$\varepsilon_a = 595\mu$ (576 μ , 577 μ , 619 μ , 608 μ)
Case I-3	$\varepsilon_a = 961\mu$ (932 μ , 934 μ , 998 μ , 982 μ)
(b) With hole (Case II)	
Original image	$\varepsilon_a = 0\mu$
Case II-1	$\varepsilon_a = 231\mu$ (230 μ , 231 μ)
Case II-2	$\varepsilon_a = 465\mu$ (461 μ , 468 μ)
Case II-3	$\varepsilon_a = 710\mu$ (703 μ , 716 μ)

Notes: ε_a means average value. Numerical values in parenthesis are measured values by each gauge

錆塗料を模擬すること、②本計測方法では光沢面計測は困難であると考えられること、を考慮してスプレー塗料の付与を行った。

各試験体には、それぞれ図9中のように所定の位置にひずみゲージが貼り付けられている。なお、写真撮影面を表として、帯板試験体は表裏各2枚の計4枚、円孔板試験体には円孔75mm上部は表裏各1枚、円孔部は裏面のみ10枚の計12枚のひずみゲージが張られている。そして、これらゲージ出力を画像処理によって計測した変形・応力値との比較用データとして用いた。

帯板試験体の場合における変形計測値は、ひずみゲージからの出力値に対しての比較データとして、ゲージ出力であるひずみ ε から得られる伸び Δl を

$$\Delta l = \varepsilon l \quad (7)$$

として求めた。 l はY軸方向における図9(a)中の点aを基準とした計測座標である。

画像の取得には階調制限が16bitであり、また、1200万ピクセルの解像度を有する一眼レフレンズ対応のデジタルカメラを使用しており、本実験によって得られた画像1ピクセルのサイズは約11.3 μ mである。なお、変形計測・応力解析を実施した場所は図9における長方形で示した部分であり、計測に使用した画像としては、表1に示すように、(a)帯板試験体 (Case I), (b)円孔板試験体 (Case II) ともに1つの基準画像に対して、3つ (1~3) の計測画像の変形・応力を解析した。なお、同表(b)中の値は、円孔上部75mmの部分の表裏に張られたひずみゲージの出力である。また、応力解析を実施する場合には、平均化処理を行うものとし、平均化処理サイズ A_s は21とした。

4.2 帯板試験体の場合

図11は帯板試験体の場合において、図9(a)中a-a'線上的変位をサブピクセル画像処理によって計測された結果とひずみゲージの出力値から計算した変位の関係を示している。この結果から、計測される変位はひずみゲージの出力結果と同等の精度を有していることを確認することができる。

図12はサブピクセル画像処理によって計測された変位の結果に基づいて、式(3), (4)を用いて計測面全面における応力分布を計算した結果であり、ある程度の誤差を有するものの、一様応力状態であることを計測できていることが分かる。また、図13は計測領域の中心線 (図9(a)中a-a'線) 上における応力分布を示した結果であり、この結果から、 $\pm 10\text{MPa}$ ($\approx \pm 100\mu$ ひずみ) の精度で応力を計測できていることが分かる。

Fig.11 Comparison between measuring result of relative deformation value by sub-pixel image processing and calculated result by strain output along a-a' line

Fig.12 Contour diagrams of stress distribution at cases of without hole

Fig.13 Comparison between measuring results of stress value by sub-pixel image processing and results by strain output along a-a' line

4.3 円孔板試験体の場合

図14は円孔板試験体の場合において、サブピクセル画像処理で計測された変位を示している。なお、計測線としては、図9(b)中のA~Eの各線上の変位を示した。また、円孔中心を解析上の座標原点としている。この結果から、試験体の両端部 (A線, E線) 付近においては、ほぼ一様の傾斜で変位が増加していることに対して、最も応力集中を生じる部分である円孔側部 (B線, D線) においては、円孔付近においての変位の傾きが大きくなっていることが分かる。このことは、応力集中を生じていることが計測できていることを示唆するものである。一方、中心部 (C線) においては、円孔上部, 下部のそれぞれにおいて、変位の変化は殆

Fig.14 Measuring results of deformation values by sub-pixel image processing by strain output along A to E lines at case II-3

Fig.15 Contour diagrams of stress distribution at case II-3

Fig.16 Comparison between measuring results of stress value by sub-pixel image processing and results by strain output along b-b' line at cases of with hole

ど見受けられないことから、応力が小さいということが予想され、これは、理論通りの結果であると言える。

図15は上記を含めた変位の計測結果に基づいて、計測領域全面における応力分布を計算した結果である。この結果から、円孔側部において応力集中を生じているとともに、円孔上部、下部においての応力が小さくなっていることが分かる。

図16は円孔断面部においてサブピクセル画像処理によって計測された応力分布（実線）、並びに、ひずみゲージによって計測された応力（プロット）を比較した結果である。また、同図中の1点鎖線（水平線）は表1(b)中に示した円孔上部75mmの位置にあるひずみゲージ出力から計算した円孔遠方部での応力 σ_0 である。これらに加えて、式(8)によって与えられる一様引張を受ける円孔の応力分布を計算した結果を図16中の点線で示す。

$$\sigma_y(x) = \sigma_0 \left(1 + \frac{r^2}{2x^2} + \frac{3r^4}{2x^4} \right) \quad (8)$$

なお、 σ_0 は上記で求めた円孔遠方部の応力であり、 r は円孔

半径（=5mm）である。この結果から、円孔左側においては幾分の差が見受けられるが、全体としては、サブピクセル画像処理による計測値、ひずみゲージによる計測値、並びに、式(8)による理論値はほぼ同程度の結果であることが分かる。

したがって、以上の結果から、本研究で検討しているサブピクセル画像処理を用いた計測法は、構造物の変位のみならず、変位の計測結果に基づいた応力計測も可能にする技術であることを実験からも確認することができた。特に、本論文では式(2)で与えた応答曲面関数の最適化等についての検討を行っていないものの、実験結果に見られる精度が得られていることから、本近似の有効性を実験的に示すことができたと考えられる。

5. 結 言

本研究では、サブピクセル画像処理を用いた、構造物の非接触・高精度変形・応力計測法を開発することを目的としている。本論文では、本方法を用いての変形計測精度、並びに、応力計測精度に関して、理想画像を用いたシミュレーション、並びに、実験の両面から検証した。ここでは、本論文で得られた結果を要約し、以下にまとめる。

- (1) サブピクセル画像処理を用いることで、サブピクセルレベルでの変形計測が可能になる。
- (2) サブピクセル変形計測値に基づいて応力計測を実施する場合、変形計測精度に起因した応力計測値の誤差を生じる。また、平均化処理をすることによって、応力計測誤差の低減、並びに、高精度応力計測を可能にする。
- (3) 本計測方法について実験的にも検証したが、一様応力のみならず、応力集中を生じる状態であっても、ひずみゲージと同等レベルの応力計測を可能にする。

参 考 文 献

- 1) 山田 徹, 桑原 清, 渡辺泰孝, 掛橋孝夫: デジタルビデオ画像を用いた軌道変位計測, 土木学会第 58 回年次学術講演会, (2002) 141.
- 2) 堀井千絵, 中村秀治, 藤井 聖: 画像計測における標点の読み取り方法について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, (2002) 887.
- 3) 酒井理哉, 宮川義範, 松尾豊史, 末広俊夫, 遠藤達巳: 画像計測を利用した鉄筋コンクリート構造のひずみ計測, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演論文集, (2001) 164.
- 4) 西田 昇, 田代発造, 廣瀬智博, 野村 俊, 神谷和秀, 園田里見: 二次元サブピクセル画像処理による木材パネルのひずみ測定, 2003 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2003) 484.
- 5) I.Takahashi, T.Omura, Y.Morimoto, S.Yoneyama, and M.Fujigami: Deformation measurement by digital holography interferometry, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 5264 (2003) 206.
- 6) 館石和雄, 判治 剛: 画像計測によるひずみ制御低サイクル疲労試験, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演論文集, (2003) 129.
- 7) 佐藤秀人, 国府田 誠, 田村昌仁, 刑部 徹, 和田昇三, 酒井茂賀, 熊田哲規: デジタルカメラによるコンピュータ画像計測法に関する研究—アルミ棒積層体を用いた模型実験の計測システム—, 日本建築学会構造系論文集, 565, 95-101 (2003) 95.
- 8) 荻原瑞木, 川又政征: 位相限定相関を用いた画像のサブピクセル精度の位置ずれ検出, 電子情報通信学会技術研究報告, (2001) 79.
- 9) 村瀬一朗, 金子俊一, 五十嵐 悟: 増分符号相関による画像照合—光沢物体および不良照明条件に対するロバスト画像処理—, 精密工学会誌, 66, 2 (2000) 261.
- 10) Gene H. Golub, Charles F. Van Loan: MATRIX COMPUTATIONS, The Johns Hopkins University Press, (1983) 12.
- 11) 稲田貴臣, 島村佳伸, 森 章, 小林英男, 中村春男: 応答曲面法を用いた固有振動数変化による CFRP 積層梁の損傷同定, 日本機械学会論文集 (A 編), 65, 632 (1999) 776.
- 12) 野村 俊, 神谷和秀, 佐久間映一, 田代発造: デジタル画像処理による木材の変位測定に関する研究—ランダムパターン製作装置の開発とその評価—, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005) 375.