B308 ステレオ画像法による三次元変形計測法の開発に関する研究

1. 緒言

近年,デジタルカメラの高解像度化とコンピュータの 高性能化が進み,デジタルカメラによる三次元計測に関 する研究¹³が盛んに行われている.三次元計測法の中で もステレオ画像法は,計測の補助となる光波,音波等の エネルギーを利用せずに外光等の環境からのエネルギー だけを用いる受動的計測法の一つと分類されている.受 動的計測法は計測が簡易で,三次元情報を得る計算時間 が短いという特徴を有するため,実用性が高い手法であ ると考えられる.そこで,本研究では高精度な画像照合 技術を用いてステレオ画像法による三次元形状計測法を 確立し,更にそれを応用して三次元変形計測法を開発し た.その手法を基礎的な構造試験に応用することにより 精度および変形計測法への適用性について検討を行った.

2. 画像処理による三次元変形計測法

本研究で用いる三次元変形計測法の流れを Fig.1 に示 す.まず,解析を行う画像の全画素において明るさの程 度を表す輝度を求め,画像相関法¹⁾を用いて二枚の画像 の対応点を探索する.求めた対応点を基に,計測対象範 囲内の全画素におけるサブピクセル単位での対応点¹⁾を 算出し,両画像対応点の位置の差である視差を求め,ス テレオ画像法により三次元座標を決定する.以上の方法 を変形前,変形後の両画像に適用し,それらの三次元座標



Fig.1 三次元変形計測法の流れ

河村 恵里(指導教員:柴原,正岡)



Fig.2 両眼視差法模式図

の差を求めることにより三次元変位分布を算出する.以下 では三次元変形計測法の要素技術であるステレオ画像法, 画像相関法,サブピクセル画像照合法について説明する.

2.1 ステレオ画像法の基本原理

ステレオ画像法は、複数の異なる視点から同一の対象 物の画像を撮影し、それぞれの画像上へ投影される計測 点からの位置の差から三角測量の原理を用いて対象物ま での距離を算出し、三次元位置を取得する手法である。 本研究ではステレオ画像法の中でも特にシステム構成が 単純でカメラパラメータによる誤差が少ないという利点 を持つ両眼視差法を採用した。

両眼視差法は Fig.2 に示すように.二つの異なる方向 から撮影した画像を用いる手法である.図中のfはレンズ の焦点距離,Bは画像を取得するカメラ間の距離である. ただし二台のカメラに下記の制約条件を課す必要がある.

- ・焦点距離を等しくする.
- ・撮像面が同一平面上になるよう調整する.
- ・撮像面が一直線上になるよう調整する.

上記の制約条件により, 左右の画像の (x_L,y_L) および (x_R,y_R) 座標はそれぞれ次式で表される.

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \end{pmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} X + \frac{B}{2} \\ Y \end{pmatrix}$$
(1)
$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{pmatrix} X - \frac{B}{2} \\ Y \end{pmatrix}$$
(2)

ここで、左右画像に投影される同一計測点の y 座標値は 必ず等しくなるため、 $y_L=y_R$ となる.ここで、同一計測 点における投影位置のずれである視差 x_L-x_R を d とおく



(a)基準画像 (b)比較画像 Fig.3 画像相関法による対応点探索

と,三次元座標(X, Y, Z)は次式で表される.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{B}{d} \begin{pmatrix} (x_L + x_R)/2 \\ (y_L + y_R)/2 \\ f \end{pmatrix} = \frac{B}{d} \begin{pmatrix} (x_L + x_R)/2 \\ y_L \\ f \end{pmatrix}$$
(3)

上式において, 焦点距離fとカメラ間の距離Bが既知で あることから, 両画像の対応点が正確に探索できれば, 三次元座標を求めることができる.

2.2 画像相関法

画像相関法とは Fig.3 のように、基準画像上に設定した微小領域と最も類似性の高い領域を比較画像上において検出する方法である.まず、同図(a)に示すように基準 画像上の点 $a_i(x_i, y_i)$ を中心とする $dx \times dy$ の基準画像領域 を設定し、これを $A(a_i)$ と定義する.次に比較画像におい ても同様に、 $b_i(x_i+\Delta x_i, y_i+\Delta y_i)$ を中心とした $B(b_i)$ を設 定する.これら基準画像領域 $A(a_i)$ と比較画像領域 $B(b_i)$ より、次式で表される輝度相関値 R_i を算出する.

$$R_{ij}(a_{i}, b_{j}) = \|B(b_{j}) - A(a_{i})\|$$
(4)

比較画像領域 B(b)を1 画素ずつずらしながら解析領域内 の輝度相関値 R_{ij} を算出する.輝度相関値 R_{ij} が最小とな る時の座標($x+\Delta x$, $y+\Delta y$)が相関性の最も高い座標,す なわち対応点である.

2.3 サブピクセル画像照合法

前節の手法で算出される視差は、ピクセル単位である. しかし一般に対応点はピクセル間に存在するので、三次 元計測精度の向上のためにはピクセル単位以下、すなわ ちサブピクセル単位での対応点探索が要求される.本研 究では輝度相関値 R_jの分布を最小自乗曲面に近似し、対 応点探索を行った.以下にその方法について説明する.

まずは、ピクセル単位で得られた対応点 $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ と、その点を基準にして x、y方向にそれぞれ ± 1 ずつ





Table I 訂例来件			
		θ _{Yo} [°]	n[mm]
	1	0.00	0.0
m	2	8.74	10.0
	3	14.5	20.0
	4	22.0	30.0
	5	30.0	40.0
	6	45.0	56.6

ましましタ (中

Fig.5 試験片の形状と寸法

ずらした基準点周囲の画素の計9点における輝度相関値 を用いて次式で示される最小自乗曲面 g(x, y)を作成する.

$$g(x, y) = ax^{2} + bx + cy^{2} + dy + exy + f$$
 (5)

ただし、a-fは最小自乗法により得られる係数である. こ の最小自乗曲面 g(x, y)を最小値とする時の座標(x,y)がサ ブピクセル単位での対応点である.以上の手法を全画素に おいて繰り返し適用することにより画像全域におけるサ ブピクセル単位での対応点を算出することが可能となる.

3. 直方体試験片を用いた三次元形状計測

3.1 計測方法および試験片の形状と寸法

計測装置はデジタルカメラ,ダイヤルゲージ,三脚, 照明用ランプ,各々一台ずつで構成される.この計測で は試験片を設置した台を上昇させることにより,カメラ 位置を変化させた二地点での画像を撮影した.

Fig. 4 に示すようにカメラからの三次元位置座標を(X, Y, Z), 上部①の位置におけるカメラにより撮影された画 像中の座標を(x_{H} , y_{H}), また,下部②の場合の座標を(x_{L} , y_{L}), 計測対象物体の三次元座標を(X_{o} , Y_{o} , Z_{o})と定義する.な



Fig.7 計測により得られた三次元座標分布 ($\theta_{Yo}=22.0^\circ$)

お X-Y, X₀-Y₀ 平面は撮像面と平行, 座標軸 Z, Z₀ は撮 像面と垂直となるよう調整した.また,二つのカメラ位 置①, ②間の距離は B=20.0mm とし, レンズは焦点距離 が f=60mm のものを用いた.

次に、計測対象である直方体試験片の形状および寸法 を Fig. 5 に示す.実験では同図に示す Y_oまわりの回転角 θ_{xo} が異なる6通りの場合について検討を行った.なお 本実験においてデジタルカメラ・試験片間の距離は約 400mm であった.

3.2 画像処理による三次元形状計測の解析結果

撮影画像をFig 6 に示す.計測対象領域は図中の枠内の 部分であり, a-a'は計測対象領域内における y 方向中央部 である.Fig 7 の(a)~(c)はそれぞれ解析領域内における X, Y, Z座標分布を示す.同図(a)より x 座標は横方向にほぼ 等間隔に増加していることが分かる.また、同図(b)より 計測対象領域内右端付近の等高線の屈折部が,試験片の 角部と一致していることが確認できる.同図(c)からも, 角部の z 座標が小さくなるという良好な結果が得られた.

Fig. 8 に Table 1 に示す計測条件①~⑥の a-a'上における画像解析から得られた z 方向座標分布を,また, Fig.9 には計測条件②と④の z 方向座標分布および試験片形状

を示す. Fig.8 より,全ての場合において,計測対象領域 右端付近における角部の直角が計測できていることが確 認できる.また Fig.9 から,計測結果と試験片形状の差 は最大で 0.40mm(計測条件2),および 2.1mm(計測条件 ④)であることが分かる.したがって,Fig.8 の各計測結 果における実際の θ_{Yo} とのずれは,初期配置に寄るとこ ろが大きいと考えられる.

4. 薄板の座屈試験および三次元変形計測

4.1 実験装置および試験片の形状と寸法

アムスラー型万能試験機(島津社製 UNIVERSAL TESTING MACHINE (TYPE:RH-30))を用いて, Fig.10に 示す形状・寸法の薄板に上下方向から圧縮荷重を負荷す る方法により薄板の座屈試験を実施した.試験では 0N~1156Nまで荷重 P を変化させ,同時に図中 A, B に 設置したダイヤルゲージにより z 方向変位を計測した. 883N 負荷時を変形前,1158N 負荷時を変形後とし,変形 前と変形後における上部①および下部②の画像を撮影し, 変形計測を実施した.カメラ間の距離を B=10.0mm とし, レンズの焦点距離を f=60mm,また,カメラから対象物 までの距離を約 1330mm とした.







Fig.12 座屈試験における基準画像

4.2 薄板の座屈試験および変形計測結果

ダイヤルゲージにより測定されたたわみ量を基に得られた荷重-たわみ曲線を Fig.11 に示す. 図中の点線は, 偏心を考慮した場合の理論曲線であり, e の値はその偏心量を示している. なお,縦軸は次式で表されるオイラーの座屈荷重 P_E で無次元化した荷重を示している.

$$P_E = \frac{\pi^2}{L^2} EI \tag{6}$$

ただし、Lは薄板のy方向長さ、Eはヤング率、Iは断面 二次モーメントである. 同図より、今回の実験に置ける 偏心量は約 0.1~0.5mm 程度であると推定され、座屈試 験としては概ね十分な精度で行われたと考えることがで きる.次に、画像処理による三次元変形計測法を用いて、 荷重 P=1158N 負荷時(Fig.11(P_A)点)における z 方向変位分 布を計測した. Fig.12 に荷重 P=1158N 負荷時(Fig.11(P_A) 点)における基準画像を示す. 解析領域は図中の枠内の部 分であり、bb' は解析領域内における x 方向中央部であ る. なお比較画像としては Fig.11(P_B)点のものを用いた.

Fig.13 には、Fig.12b-b'部における z 方向計測分布と理 論変位分布を示す. 理論変位分布は、Fig.11 の実験結果 における P_A 点と P_B 点の変位量の差を表し、偏心量とし ては、実験値がその時のダイヤルゲージによる測定量に 最も近い e=0.5 の場合を用いた. 同図より、両者には最



大で約 1mm の差はあるものの,変形傾向の点から良好 に一致していると考えることができる. ただし, 今回の 解析においては, カメラパラメータ等のキャリブレーシ ョンを行っていないため,多少のバラツキが確認できる.

5. 結言

本研究ではステレオ画像法による三次元形状計測法およ び三次元変形計測法を開発した.これらの手法を,直方体 試験片を対象とした三次元形状計測および薄板の座屈試験 を対象とした三次元変形計測に応用することにより本手 法の適用性について検討した結果,以下の結論が得られた.

- 開発された手法を用いることで、三次元形状計測に おいて、非常に良好な精度で計測可能であることが 確認された。
- 同手法を三次元形状計測を応用することで三次元変 形計測が可能であることが分かった.ただし、多少 のバラツキが確認された.

6. 参考文献

- 柴原正和、山口晃司、正岡孝治、坪郷尚:画像処理 による比接触変形・応力計測法の開発、溶接シンポ ジウム2006講演論文集、2004
- Michio Uneda, Masakazu Shibahara, Masakatu Matsuishi, Setuo Iwata, Koji Kitamura and Kenichi Ishikawa : Studies on Non-Contact Deformation and Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing, Journal of the Japan Society of Precision Engineering 3-72, (2006)
- Mizuki Hagiwara, Masayuki Kawamata : Performance Evaluation of Subpixel Displacement Detection for Images Using Phase-Only Correlation, 第16回ディジタル信号 処理シンポジウム講演論文集, 3-6, (2001), 517-522
- Koji Okamoto : PIV Image Evaluation Algorithms, Journal of the Visualization Society of Japan 24-95, (2004), 31-35