

デジタル画像相関法による溶接変形の計測

学生員 河村 恵里* 学生員 生島 一樹**
正員 柴原 正和* 正員 正岡 孝治*

Measurement of Welding Deformation Using Digital Image Correlation

by Eri Kawamura, Student Member Kazuki Ikushima, Student Member
Masakazu Shibahara, Member Koji Masaoka, Member

Key Words: 3D measurement, Digital image processing, Digital image correlation, Stereo imaging technique, Welding deformation

1. 緒言

近年におけるデジタルカメラの高性能化、特に画素数の急激な増加に伴う画素分解能の向上によって、構造物の変形・応力計測に画像相関法等の画像処理技術を応用する研究^{1,2)}が盛んに行われている。この手法では一般的に、構造物の変形前における状態を基準画像として撮影し、また、計測・点検を実施したい変形後における状態を計測対象画像として撮影する。そして、取得した2枚の画像の輝度相関値を計算することにより、カメラで撮影された全領域における変位分布、ひずみ分布および応力分布を計算する。この手法は、簡便であり、なおかつ原理的には、画素数だけ計測点を有しており、その情報量の多さゆえ有望視されている手法である。

一方、溶接変形は、一般的に、面外変形である縦曲がり変形、横曲がり変形、座屈形式の変形および、面内変形である縦収縮、横収縮に分類される。入熱量にもよるが、通常、面内変形はサブミリのオーダーであることが多く、面内変形を計測するためには、高い精度が要求されるが、サブミリオーダーの面内変位を試験片全域に渡り短時間に測定する方法は、著者の知る限り存在しない。

そこで本研究では、デジタル画像相関法を基にするステレオ画像法による三次元変形計測システムを開発し、基礎的な溶接試験に適用することにより、本手法のもつ計測精度について検討を行った。さらに、本手法を溶接した際の面内・面外変形に適用する方法について検討すると共に、横収縮分布および面外変形分布の計測を実施した。

2. ステレオ画像法による三次元変形計測システム

本研究では、変形前の2枚の画像および変形後の2枚の画像を用いて三次元変形量を算出するシステムを開発した。ここでは、本システムの概要および本システムで用いられている基礎理論について述べる。

2.1 提案手法の概要

本システムは、変形前の2枚の画像および変形後の2枚の画像を用いて三次元変形量を算出するものである。その概要を Fig.1 に示す。本手法では、まず、計測対象物の変形前の写真を2台のカメラを用いて撮影する。2台のカメラの位置関係において、光軸が平行でなおかつ光軸周り

のカメラ角が一致する場合には、次節で示すステレオ画像法を用いることで、計測対象物の3次元座標 $\{X_i^b\}$ を得ることができる。また、ステレオ画像法においては、2枚の画像の位置の対応付けを行う必要があるが、本研究ではその対応付けに2.3節で示す画像照合および2.4節で示すサブピクセル画像相関法を適用した。

次に、計測対象物を変形させた(溶接した)後に前述と同位置に設置した2台のカメラを用いて変形後の写真を撮影する。こうすることにより、変形後の計測対象物の3次元座標 $\{X_i^a\}$ を得ることができる。

最後に、変形前と変形後における同一カメラの2枚の画像、すなわちここでは左カメラにより撮影された画像を用いて三次元座標の算出と同様に、画像相関法およびサブピクセル画像相関法を用いて対応付けを行う。

上記により得られた変形前後における三次元座標 $\{X_i^b\}$ および $\{X_i^a\}$ の差として三次元変位量 $\{u_i\}$ が次式のように算出される。

$$\{u_i\} = \{X_i^a\} - \{X_i^b\} \quad (1)$$

ただし、一般に、変形前画像の画素位置と変形後の画素位置は一致しないので、その対応付けのため、2.3節で示す画像相関法および2.4節で示すサブピクセル画像相関法

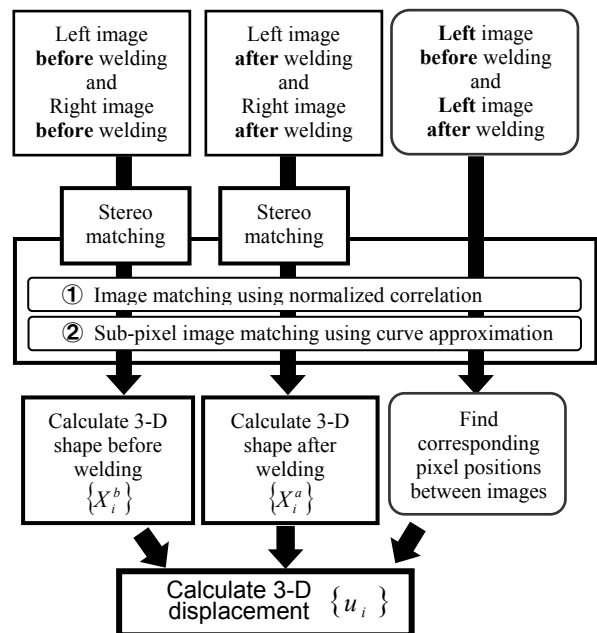


Fig.1 Flow of proposed method.

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 大阪府立大学工学部

原稿受付

秋季講演会において講演

©日本船舶海洋工学会

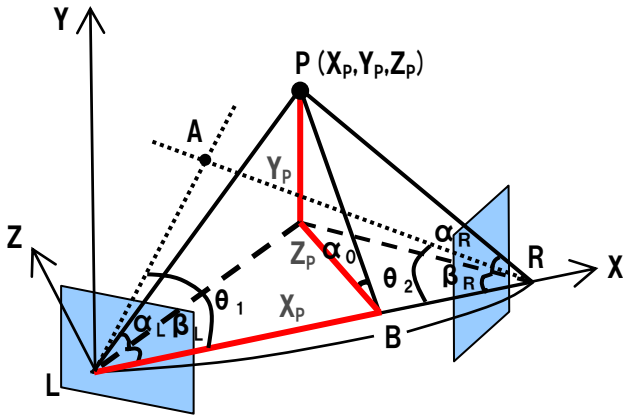


Fig.2 Geometrical parameters on stereoisaging technique.

を用いた。また、この方法を用いる場合には、変形後画像の画素間に存在する対応位置における変形量を求める必要があり、ここでは画素位置における三次元座標を線形補間して算出した。

2.2 ステレオ画像法

ステレオ画像法とは複数の異なる視点から計測対象物の画像を撮影し、計測対象物のそれぞれの撮影画像上への投影位置の違いから三次元情報を取得するものである。Fig.2に示す図は、ステレオ画像法における幾何学的パラメータを模式的に表したものである。本節では、焦点距離の等しい2台のカメラを左右に配置した場合の基礎理論について説明する。ただし、カメラの光軸は平行でなおかつ光軸周りのカメラ角は一致していると仮定する。

Y軸周りの左カメラのカメラ角を θ_1 、右カメラのカメラ角を θ_2 と定義する。図中の $P(X_p, Y_p, Z_p)$ は計測対象物上の点、A を左右カメラの光軸の交点位置、L を左カメラ主点位置、R を右カメラ主点位置と定義する。また、PL と XZ 平面のなす角を α_L 、PL と XY 平面のなす角を β_L とし、同様に PR と XZ 平面のなす角を α_R および β_R 、また、P と L、R を結ぶ平面と XZ 平面のなす角を α_0 、左右カメラ間距離 $\overline{LR}=B$ とする。これにより三次元座標 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ は式(2)で表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} X_p &= B \tan \beta_R / (\tan \beta_L + \tan \beta_R) \\ Z_p &= X_p \tan \beta_L \\ Y_p &= Z_p \tan \alpha_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、右画像座標 (x_R, y_R) 、焦点距離 f とすると、 α_R, β_R は式(3)~(5)、 α_0 は式(6)で表される。

$$\tan \alpha_R = \frac{y_R}{\sqrt{f^2 + x_R^2}} \quad (3)$$

$$\tan \beta_R = \frac{f \cos \theta_2 + x_R \sin \theta_2}{f \sin \theta_2 - x_R \cos \theta_2} \quad (4)$$

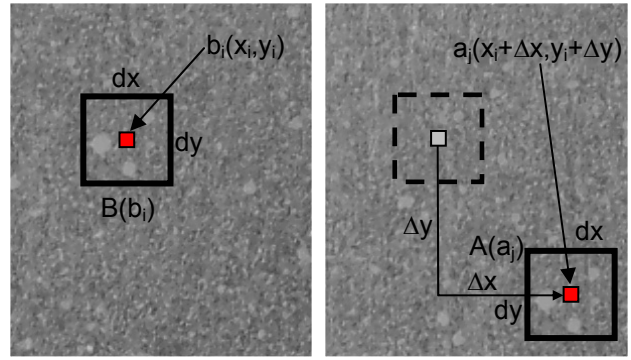
$$\sin \beta_R = \frac{f \cos \theta_2 - x_R \sin \theta_2}{\sqrt{f^2 + x_R^2}} \quad (5)$$

$$\tan \alpha_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan \alpha_L}{\sin \beta_L} + \frac{\tan \alpha_R}{\sin \beta_R} \right) \quad (6)$$

これより、焦点距離 f と左右カメラ間距離 B が既知であり、両画像の対応点が正確に探索できれば、本手法を用いて三次元座標の分布を計測することができる。

2.3 画像照合法

前述のステレオ画像法においては、左右のカメラ位置から計測対象物を撮影し、それぞれの画像同士の対応位置を



(a) Original image

(b) Deformed image

Fig.3 Basic procedure of digital image correlation.

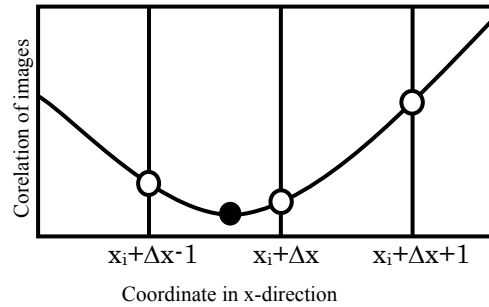


Fig.4 Basic procedure of curve approximation for sub-pixel measurement.

求める必要がある。そこで本研究では、画像照合により対応点探索を行う。一例として、Fig.3(a)に基準画像を、(b)に比較画像を示す。同図(a)に示すように基準画像上の点 $b_k(x_i, y_j)$ を中心とする $dx \times dy$ の大きさの基準画像領域を設定し、この領域を $B(b_k)$ と定義する。比較画像上においても同様に、 $a_i(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$ を中心とした $dx \times dy$ の大きさの比較画像領域 $A(a_i)$ を定義する。 $B(b_k)$ と $A(a_i)$ の領域内の輝度値より、輝度相関値 $R(a_k, b_i)$ を算出する。輝度相関値 $R(a_k, b_i)$ の値は1に近づく程相関が高い、つまり画像の類似性が高いと言える。 $B(b_k)$ に対して最も類似性の高い $A(a_i)$ の中心点 $a_i(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)$ が、 $b_k(x_i, y_j)$ の対応点となる。正規化相関で表される輝度相関値 $R(a_k, b_i)$ を次式に示す。

$$R(a_k, b_i) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \{b_i(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - b_i^*\} \{a_k(x_i, y_j) - a_k^*\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \{b_i(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - b_i^*\}^2} \sqrt{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \{a_k(x_i, y_j) - a_k^*\}^2}} \quad (7)$$

ただし、 $m=dx-1, n=dy-1$ であり、 a^*, b^* は相関領域全域における輝度の平均値である。式(7)から分かるように正規化相関では、各ピクセルの輝度値から画像全体の平均輝度値を引くことで画像全体の照度の差をなくすことができ、残差自乗和相関法³⁾等と比べて照度変化に対するロバスト性が高いと言える。

2.4 サブピクセル画像相関法

前節の画像照合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2画像における対応点はピクセル間に存在するため、三次元計測精度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 $R(a_k, b_i)$ の分布を Fig.4 に示すように最小自乗曲面に近似し、対応点探索を行う。

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

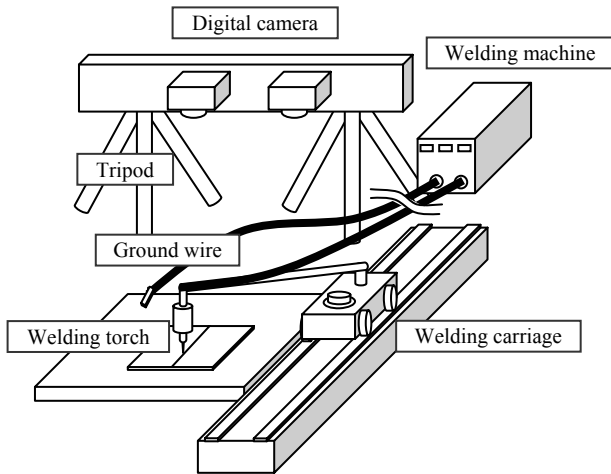


Fig.5 Experimental equipment for welding deformation measurement.

$$g(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \quad (8)$$

ただし、 $a \sim f$ は最小自乗法により得られる係数である。この曲面 $g(x, y)$ が最小となる座標 (x, y) がサブピクセル単位の対応点である。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。

3. 提案システムによる溶接変形の計測

3.1 溶接変形計測方法および実験条件

2章で述べたステレオ画像法による三次元変形計測システムを用いて、溶接変形の計測を実施した。その際に用いた実験装置の概略図を Fig.5 に示す。2台のデジタルカメラを用いて、溶接の変形前後の画像をそれぞれ2枚、すなわち計4枚取得し、溶接による変形量を計測した。例として Fig.6 に、入熱量 $Q=241.5\text{J/mm}$ 、溶接速度 $v=200\text{mm/min}$ の場合における撮影画像を示す。溶接方向は図中矢印に示す方向である。また、Fig.7 に計測対象である試験片の形状および寸法を示す。板厚 h は 2mm である。本実験では、提案手法により得られた計測結果の妥当性について検証するために、同図の●印で示す位置に、直径 2mm の円孔を設け、溶接前後における変形量をデジタルノギス(ミットヨ社製穴ピッチ用オフセットノギス NTD10P-20PMX・器差 $\pm 0.03\text{mm}$)で測定し、面内変形の精度について検証した。一方、面外変形については、レーザー変位計を用いた3次元形状測定システム(コムス社製 Laser Auto-Focus 3D Profilometer(LAF-3D))により検証を行った。溶接法は、TIG溶接とし、溶接条件としては、溶接速度を $v=200\text{mm/min}$ で固定し、電流値を $39\text{A} \sim 115\text{A}$ の間で6通りに変化させた。

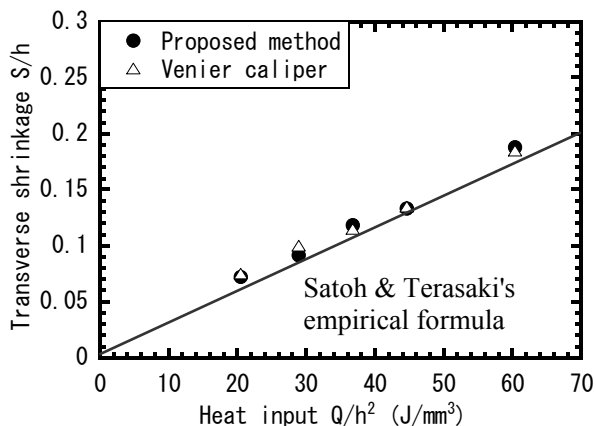


Fig.8 Influence of heat input Q/h^2 on transverse shrinkage S/h .

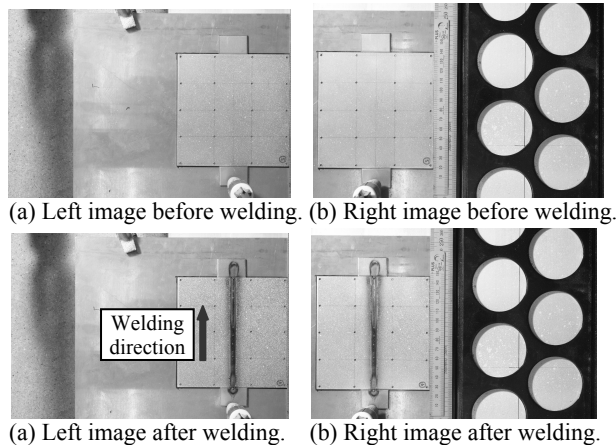


Fig.6 Images obtained by stereo camera system.

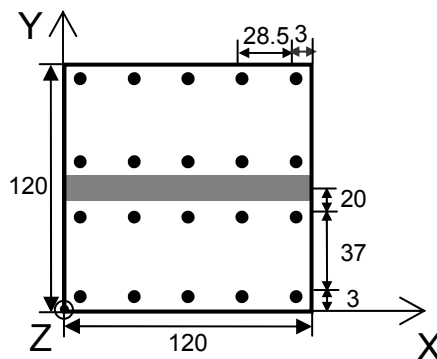


Fig.7 Shape and size of test specimen.

入熱量 Q は、前節で述べた電流値に対し、文献⁴⁾から求めた電圧値および熱効率 η を乗じ、以下の式により算出した。

$$Q = \eta \frac{VI}{v} \quad (9)$$

ただし、熱効率は文献⁵⁾を基に 0.7 と仮定した。実験に用いたデジタルカメラの画素数は約 1200 万であり、試験片の表面と正対するように設置した。

3.2 横収縮および角変形量の計測

Fig.8 は、溶接線方向中央部 ($X=60\text{mm}$) における $Y=3\text{mm}$ と $Y=117\text{mm}$ の位置での変位の y 方向成分の差、すなわち横収縮 S と入熱量 Q の関係を示す。図中の●印は提案システムによる結果を示し、図中の△印はノギスによる値を示す。この結果より両者はほぼ一致しており、また、佐藤・寺崎の実験式⁵⁾との差も小さいことから、提案手法による計測結果は妥当であると言える。さらに、板幅方向端部 ($Y=3\text{mm}$ および $Y=117\text{mm}$) における Y 方向の変位量の差

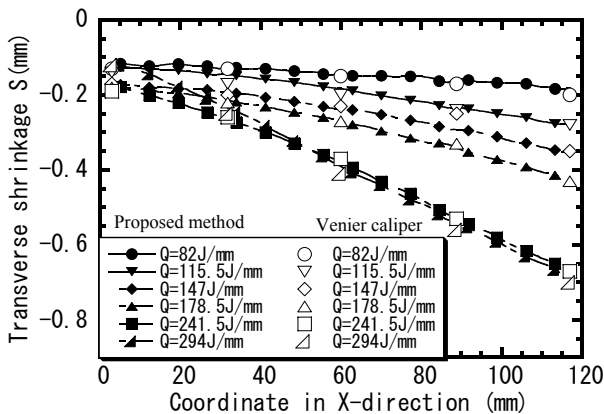


Fig.9 Transverse shrinkage distribution in X-direction.

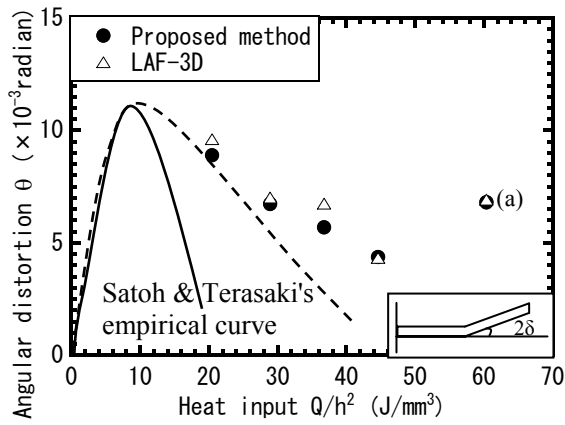


Fig.10 Influence of heat input Q/h^2 on angular distortion θ .

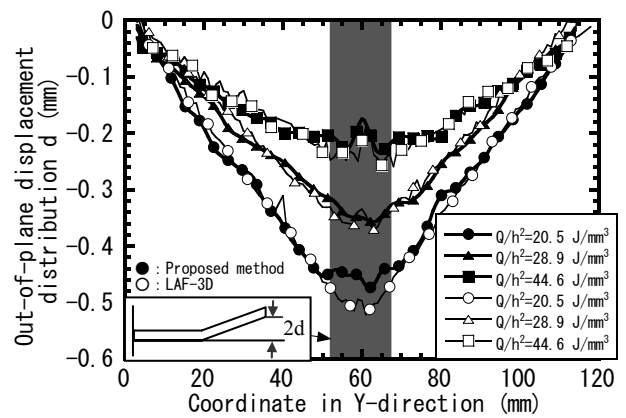


Fig.11 Out-of-plane displacement distribution.

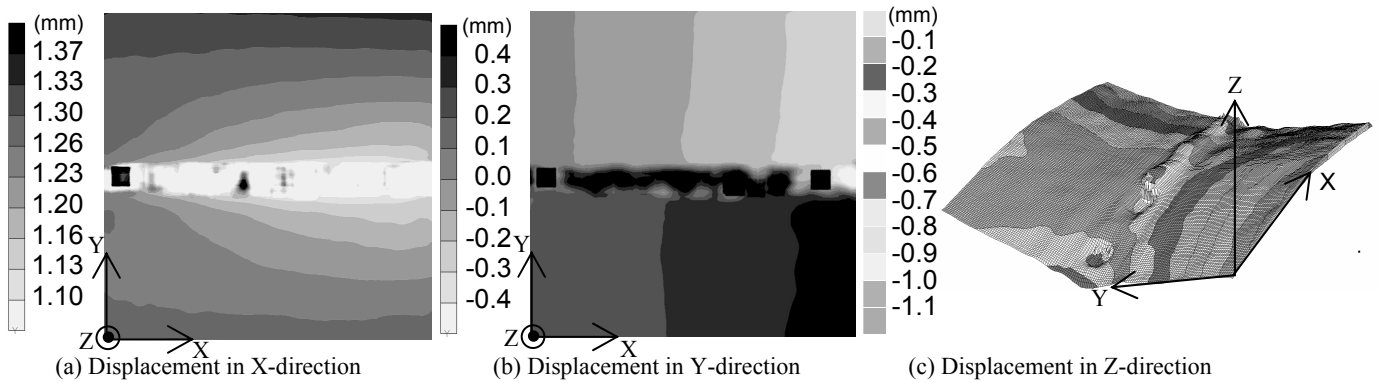


Fig.12 Welding deformation measured by proposed method.

すなわち横収縮分布を Fig.9 に示す。図中の色塗りの印は提案システムによる結果を示し、白抜き印はノギスによる測定結果を示す。同図より、いずれのケースも終端部ほど横収縮量が大きくなることを確認できる。また、いずれのケースも提案手法による結果とノギスによる結果が良好に一致していることが確認できる。

次に、角変形についてまとめた結果を Fig.10 および Fig.11 に示す。Fig.11 には入熱量 Q/h^2 が、 20.5 J/mm^2 、 28.9 J/mm^2 、 44.6 J/mm^2 の場合の溶接線方向中央部($X=60\text{mm}$)における角変形量を示す。Fig.10 より、提案手法による結果は、佐藤・寺崎の実験曲線⁵⁾の TIG 溶接の結果とは差があり、異なり、MIG 溶接の結果に近いことが確認できる。この理由は、裏板に熱伝導性の良い銅板を用いているためだと考えられ、その吸熱効果に起因して、裏面と表面間の温度差が大きくなり、角変形が生じやすくなったためと考えられる。なお、 Δ 印で示すレーザー変位計(LAF-3D)の結果とは良好に一致していることが確認できる。さらに、Fig.11 より、面外変形分布において、多少のばらつきは認められるものの、両者は良好に一致することが確認できる。

最後に、提案手法により得られた試験片全体に渡る変位量の分布を Fig.12 に示す。(a)は、変位の X 方向成分、(b)は変位の Y 方向成分を示す。さらに(c)には、変形図と共に、変位の Z 方向成分を示す。同図(a)より、溶接線近傍における変位分布に着目すると、画像情報が失われている溶接線上以外の部分において、右部ほど小さい値を示していることが分かる。これは、縦収縮の発生に起因するものであると考えられる。また、同図(b)より、溶接線の上部より下部の方が上方に移動しており、横収縮の発生が確認できる。また、その値に注目すると、終端部ほど大きく収縮していることが確認できる。さらに、同図(c)からは、単純に縦収縮および横収縮が発生しているわけではなく、座屈形式の変

形の発生も確認できる。この座屈形式の変形に起因して、Fig.10 中の点(a)に示す面外変形量が他の条件の場合とは異なる傾向を示すと考えることができる。

5. 結言

本研究では、ステレオ画像法に基づく三次元変形計測システムを構築し、基礎的な溶接試験であるビードオンプレート溶接における溶接変形問題に適用した結果、以下の結論を得た。

- 1) 提案手法を用いることで、横収縮および角変形の分布を試験片全体に渡り計測できることを確認した。
- 2) 提案手法により得られた横収縮量および角変形量は、別途実施したノギスによる測定値およびレーザー変位計による計測値とほぼ一致した。このことから、提案手法を用いることで、実用上十分な精度で計測できると考えられる。

参考文献

- 1) 畝田道雄、柴原正和、松石正克、石川憲一、岩田節雄、北村幸嗣：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，精密工学会誌 360-364, (2006)
- 2) Koji Okamoto : PIV Image Evaluation Algorithms, Journal of the Visualization Society of Japan 24-95, (2004), 31-35
- 3) 柴原正和、山口晃司、正岡孝治、坪郷尚：画像処理による非接触変形・応力計測法の開発，溶接シンポジウム 2006 講演論文集，2004
- 4) W. Finkelnburg and H. Maecker : Elektrische Bogen und thermisches Plasma, Handbuch der Physik, Bd. 22 (1956), 254
- 5) 佐藤邦彦、寺崎俊夫：構造物材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響，溶接学会誌 45 (1976), 4