

ステレオ画像法に基づく三次元溶接変形計測法の開発*

柴原 正和**, 河村 恵里***, 生島 一樹****,
伊藤 真介*****, 望月 正人*****, 正岡 孝治*****

Development of 3-Dimensional Welding Deformation Measurement Based on Stereo Imaging Technique*

by SHIBAHARA Masakazu**, KAWAMURA Eri***, IKUSHIMA Kazuki****, ITOH Shinsuke*****,
MOCHIZUKI Masahito***** and MASAOKA Koji*****

Due to the rapid improvement of digital cameras, especially the pixel resolution, digital image correlation (DIC) has been introduced to measure the deformation and strain of structures. Using digital cameras for the DIC technique is an easy and fast method for obtaining structural information, represented as all the pixel points in a photo. Because a wide range of structural deformation can be obtained with high accuracy, this method has the potential to be very useful.

Currently, DIC can execute a measurement with high accuracy only when the out-of-plane displacement is small. When the out-of-plane displacement is large, the deformation causes the measurement error. Therefore, a stereo imaging method using two digital cameras is proposed in the present study. The proposed method can measure not only in-plane deformation but also out-of-plane deformation with high accuracy without calibration of the errors caused by the out-of-plane displacement.

In this paper, the measurement accuracy of the proposed method for in-plane and out-of-plane deformation is discussed through the application of a bead-on-plate welding test. The proposed method can measure transverse shrinkage and angular distortion with high accuracy. In contrast to the vernier caliper and laser distance meter measurement methods, which can measure only a few points at a time, the proposed method using two digital cameras can measure the full field in a short time. These results confirm that the proposed method is more advantageous than other methods.

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

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。これら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面内の変位分布、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、画素数分だけ計測点を有しているため、その情報量の多さゆえ有望視されている手法³⁾である。しかしこの手法は、原理的には面外変形が小さい場合にのみ高精度に計測可能であると言われている⁴⁾。すなわち、設置した試験片の面外への位置ズレまたは面外変形が大きい場合には、固定されたカメラ位置からの距離が変化するため、面外への位置ズレまたは面外変形自体を収縮量または膨張量として計測してしまう可能性があり、それらを補正する必要性が指摘⁵⁾されている。

そこで本研究では、カメラ2台を用いた計測システムを構築し、デジタル画像相関法に基づくステレオ画像法を適用することで、上記の様な面外への位置ズレや面外変形に起因する誤差問題を解消し、高精度に面内変形および面外変形を計測できる手法を開発した。この手法では、デジタルカメラを用いた撮影画像を基に解析するため、撮影画像全域に亘る計測が可能である。

さらに、提案システムを基礎的な溶接試験に適用することにより、面内および面外変形に対する計測精度について検討を行った。その結果、本手法は横収縮および角変形の計測において、ノギスやレーザー変位計を用いた三次元形状計測システムによる点計測結果と同等の精度が得られる

*受付日 平成21年7月8日 受理日 平成22年2月23日 平成21年度春季全国大会で発表

**正 員 大阪府立大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

*** 研究当時大阪府立大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Osaka University

****学生員 大阪府立大学大学院工学研究科 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

*****正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

***** 正岡技術開発 Masaoka Technical Development

ことが確認でき、しかも、それが短時間で全視野に亘り計測可能なことから本手法の優位性を示すことができた。

2. ステレオ画像法に基づく三次元変形計測システム

本研究では、デジタルカメラ 2 台を用いて、変形前および変形後の画像を取得し、それらを解析することにより三次元変位量を算出するシステムの開発を行った。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説明する。

2.1 提案システムの概要

本システムは、変形前において撮影された 2 枚の画像、および変形後に撮影された 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 次元座標の集合として、変形前三次元形状を得ることができる。また、ステレオ画像法においては、2 枚の画像間における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 節で示す画像照合法および 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、すなわち溶接した後に、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。これにより、変形後の計測対象物の 3 次元座標の集合、すなわち、変形後三次元形状を得ることができる。

最後に、変形前・後において同一カメラから撮影された画像、すなわちここでは変形前・後において左カメラにより撮影された画像計 2 枚を用いて、変形前の画素位置が変形後

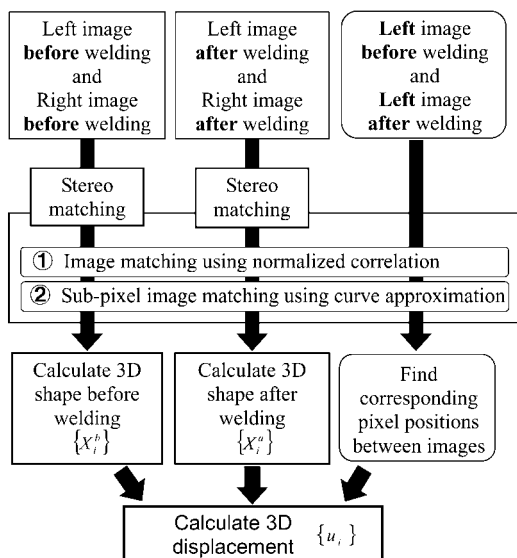


Fig. 1 Flow of proposed method.

のどの位置に移動したかについて対応付けを行う。その際にも、三次元座標の算出と同様にして、2.3 節および 2.4 節に示す画像照合法およびサブピクセル画像相関法を用いることにする。

上記により得られた変形前後における三次元座標 $\{X_i^a\}$ および $\{X_i^b\}$ 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、単純には $\{X_i^a\}$ を求めることはできない。そこで、変形前の画像位置と対応する変形後の画素間の位置における三次元座標を、Fig. 2 に示すような周辺 4 点から線形補間により求めた。

2.2 ステレオ画像法⁵⁾

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、それぞれの撮影画像上への計測対象物体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. 3 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。本節においては、両カメ

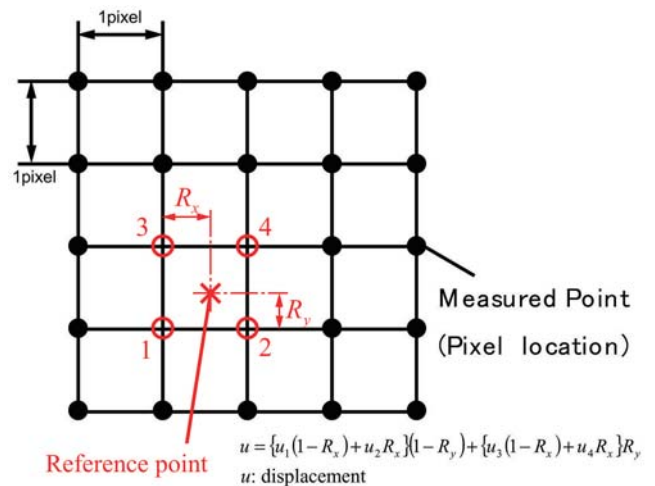


Fig. 2 Linear interpolation used to determine displacement of reference points.

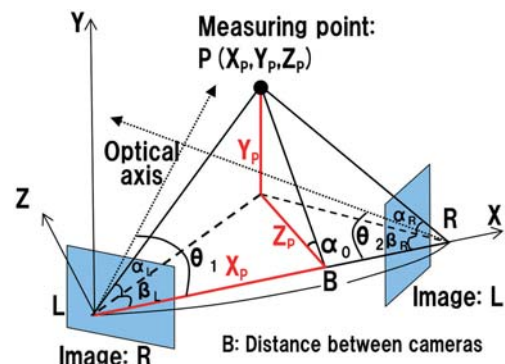


Fig. 3 Geometrical parameters for stereo imaging technique.

ラ間の光軸周りのカメラ角は、左右で一致していると仮定し、また、焦点距離の等しい2台のカメラを配置した場合について、その基礎理論について説明する。

左カメラのY軸周りのカメラ角を 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} をBと定義する。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、P点の右カメラにおける撮影画像上の座標を(x_R, y_R)、また、焦点距離をfと定義すると、 α_R, β_R は式(3)~(5)のように表され、 α_0 は式(6)のように表すことができる。

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

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

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

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

以上により、焦点距離fと左右カメラ間距離Bおよびカメラ角 θ_1, θ_2 が既知であり、両画像の対応点(x_R, y_R)および(x_L, y_L)が正確に探索できれば、 $\alpha_R, \beta_R, \alpha_L, \beta_L$ が算出でき、これらの値を式(2)に代入することで、構造物の三次元形状を算出することが可能となる。本研究では、両カメラを比較的容易に設置するために、ステレオ画像法におけるカメラの光軸が平行な場合、すなわち両眼視差法⁶⁾を採用

した。なお猪瀬ら⁷⁾は、ステレオ画像法により試験体表面に設置されたターゲットポイント上における溶接変形量を実用上十分な精度で測定している。本研究で用いた計測システムは撮影画像中に写る試験体全域に亘り詳細に溶接変形量を測定できる点に特徴がある。

2.3 画像照合法^{8,9)}

前述のステレオ画像法においては、2台のカメラ位置から計測対象物を撮影し、それぞれの画像上の任意の画素点同士の対応位置を求める必要がある。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. 4 (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。次に、 $B(b_k)$ と $A(a_i)$ の領域内の輝度値より、輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ を算出する。輝度相関値 $R(b_k, a_i)$ 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。次に、本研究における画像相関に採用した正規化相関¹⁰⁾で用いられる輝度相関値を次式に示す。

$$R(b_k, a_i) = \frac{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{a_i(x_i + \Delta x + s, y_j + \Delta y + t) - a_i\} \{b_k(x_i + s, y_j + t) - b_k\}}{\sqrt{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{a_i(x_i + \Delta x + s, y_j + \Delta y + t) - a_i\}^2} \sqrt{\sum_{s=-n}^n \sum_{t=-m}^m \{b_k(x_i + s, y_j + t) - b_k\}^2}} \quad (7)$$

ただし、 $2n=dx-1, 2m=dy-1$ であり、 a_i^*, b_k^* 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大小による影響を受けにくくしており、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¹⁾

前節の画像照合法で算出される視差は、ピクセル単位で

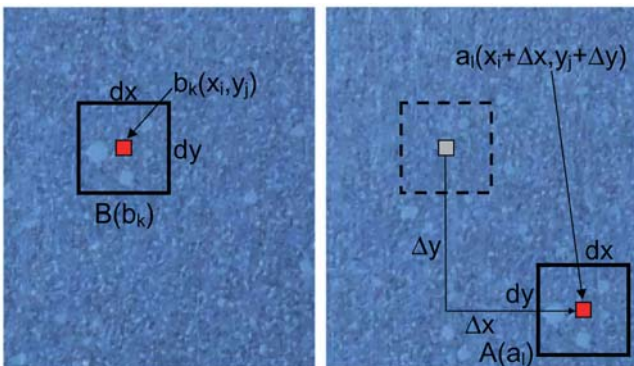


Fig. 4 Basic procedure of digital image correlation.

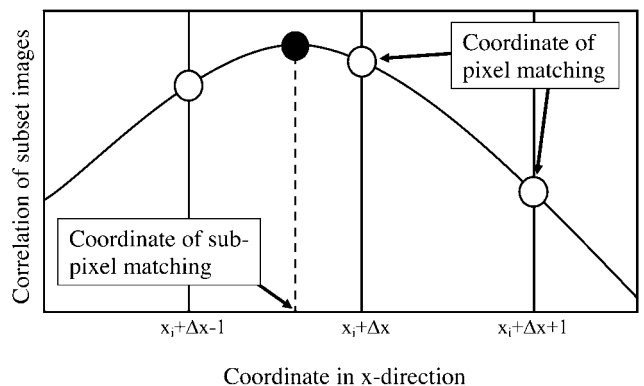


Fig. 5 Basic procedure of curve approximation for sub-pixel measurement.

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 $R(b_i, a_i)$ の分布を Fig. 5 に示すように最小自乗曲面に近似し、対応点探索を行う。具体的には、ピクセル単位で得られた対応点 $a_i(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ 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。

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

ただし、 a から 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. 提案システムを用いた溶接変形の計測

本章では、第 2 章において提案されたステレオ画像法を用いた三次元変形計測システムをビードオンプレート溶接時に発生する溶接変形に適用するための計測方法および計測結果について説明する。

3.1 実験方法

デジタルカメラ 2 台を含む、実験装置の概略図を Fig. 6 に示す。2 台のデジタルカメラの光軸は同じ方向を向くように設定し、2 台の三脚およびアルミニウム製チャンネル断面梁を用いて固定した。カメラの平行度やカメラ間距離などのカメラパラメータについては、カメラキャリブレーションによる修正する方法が提案¹¹⁾されているが、本研究

では、煩雑な処理が必要なカメラキャリブレーションは行わず、カメラ間距離 B やカメラの光軸同士の平行度の精度を向上させる方法を優先した。すなわち、カメラの光軸位置を、試験片位置において誤差 3 ピクセル以内に収まるように、カメラ角を調整した。また、両カメラ間の距離 B は、カメラを取り付けるためにチャンネル材に施した円孔間の距離をデジタルノギスで測定することにより決定した。すなわち、 $B=175.4\text{ mm}$ であり、カメラから試験片までの距離 H は、約 800 mm である。なお、カメラレンズに関しては、歪みが小さく、焦点距離が比較的大きなものを用いたため、レンズの歪みによる収差の影響を無視した。また、事前に焦点距離を求めた結果、 $f=50\text{ mm}$ であることが分かった。以上をまとめて Table 1 に示す。

溶接トーチは台車に固定され、その台車は速度 $v=200\text{ mm/min}$ で等速に走行する。なお試験片は、試験片より十分大きな板長 $250\text{ mm} \times$ 板幅 $250\text{ mm} \times$ 板厚 10 mm の銅板上に設置され、外部拘束はせずにビードオンプレート溶接を実施した。

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 2.0 mm または、 2.3 mm のものを用いた。本実験では、提案システム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

Table 1 Camera parameters

Distance between cameras: B		175.4 mm
Angle of cameras	θ_1	0°
	θ_2	0°
Focal length: f		50 mm

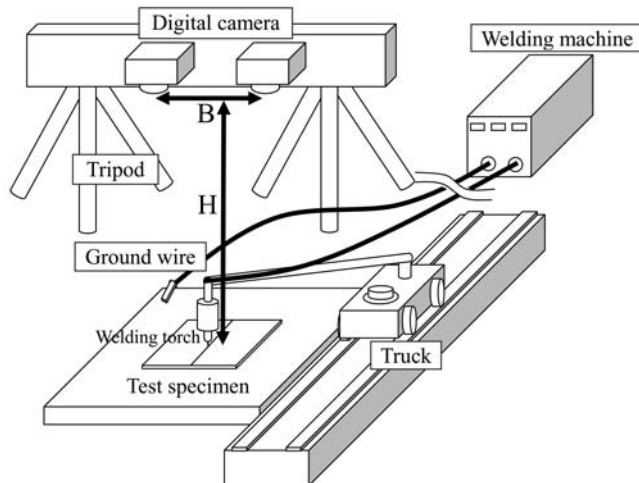


Fig. 6 Experimental equipment for welding deformation measurement.

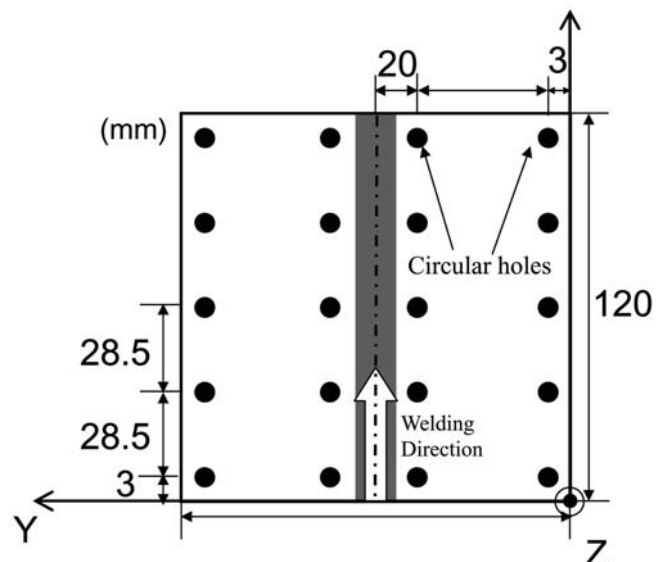


Fig. 7 Shape and size of test specimen.

2.0 mm の円孔を設け、溶接前および後における円孔位置間の距離の変化をデジタルノギス（器差±0.03 mm）で測定することで、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三次元形状計測システム（保証精度：0.03 mm）により検証を行った。溶接法は、TIG 溶接とし、入熱量 Q は、溶接機で設定した電流値 I に対し、電圧値 V 、溶接速度 v および熱効率 η を用いて、以下の式により算出した。

$$Q = \eta \frac{VI}{v} \tag{9}$$

ただし、電圧値 V は文献¹²⁾を基に 10 V と仮定し、熱効率 η は文献¹³⁾を基に 0.7 と仮定した。

画像の撮影に関しては、溶接前に左右のカメラ位置から計 2 枚の画像を撮影し、溶接後にも同様にして左右のカメラから計 2 枚の画像を撮影する。すなわち計 4 枚の画像を基に第 2 章で提案した画像計測システムにより溶接変形量を算出した。Fig. 8 に、入熱量 $Q=241.5 \text{ J/mm}$ 、溶接速度 $v=200 \text{ mm/min}$ の場合を例に、解析に用いた撮影画像を示す。一見したところ、変形前後の写真はビード部を除いてほと

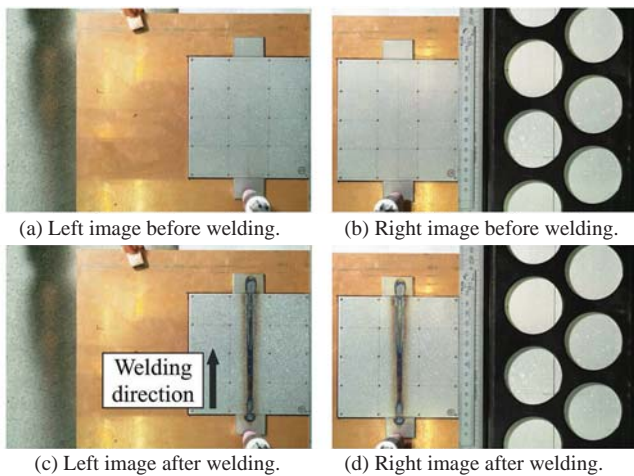


Fig. 8 Images obtained by stereo camera system.

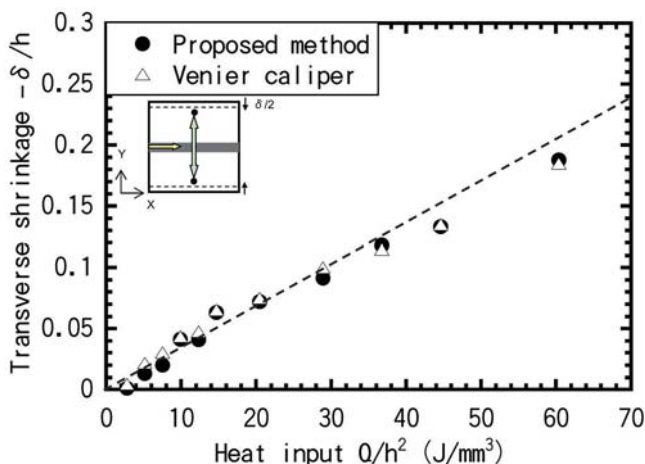


Fig. 9 Influence of heat input Q/h^2 on transverse shrinkage δ/h .

んど変化が無いように見える。なお、溶接方向は図中矢印に示す方向であり、実験に用いたデジタルカメラの有効画素数は約1200万画素である。

3.2 横収縮量および角変形量の計測

ここでは、基礎試験としてビードオンプレート溶接を実施した際に発生する横収縮量と角変形量を主な評価対象として、提案システムの持つ計測精度について検証を行った。

Fig. 9 に、提案システムによる画像計測の結果として得られた横収縮量 δ と入熱量 Q の関係を●印で示す。また、別途行ったノギスを用いた計測結果を△印で示す。なお、横収縮量は、溶接線方向中央部 ($X=60 \text{ mm}$) における $Y=3 \text{ mm}$ の位置での変位量と $Y=117 \text{ mm}$ の位置での変位量の y 方向成分の差として定義する。なお、実験で用いた溶接条件および板厚を Table 2 に示す。この結果より、提案システムによる画像計測の結果とノギスによる測定結果はほぼ一致しており、すべてのケースにおいて、両者の差はノギスの器差である±0.03 mm より十分小さくなっていることから、提案システムによる計測結果は高精度に横収縮を計測することができたと言える。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、すなわち横収縮分布を Fig. 10 に示す。入熱パラメータ Q/h^2 は、 20.5 J/mm^3 、 28.9 J/mm^3 、 44.6 J/mm^3 の場合について示している。図中の色塗りの印は提案システムによる結果を示し、白抜きの印はノギスによる測定結果を示す。これらの結果より、今回の実験では、溶接速度が $v=200 \text{ mm/min}$ と遅

Table 2 Experimental conditions.

Case No.	Welding speed v (mm/min)	Heat input parameter Q/h^2 (J/mm^3)	Thickness of plate h (mm)
1	200	2.78	2.3
2		5.16	
3		7.54	
4		9.92	
5		12.3	
6		14.7	
7		20.5	2.0
8		28.9	
9		36.8	
10		44.6	
11		60.4	

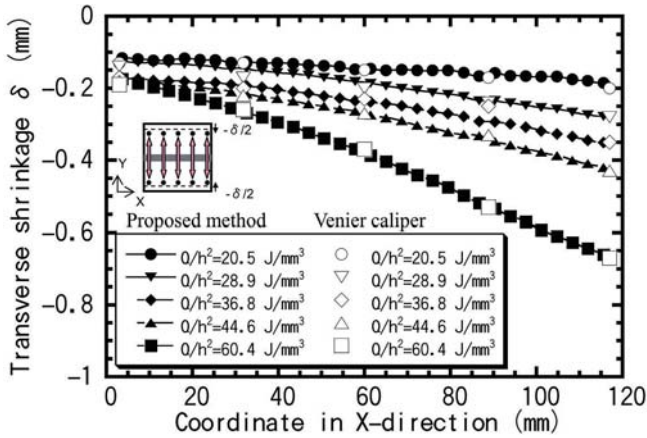


Fig. 10 Transverse shrinkage distribution in X-direction.

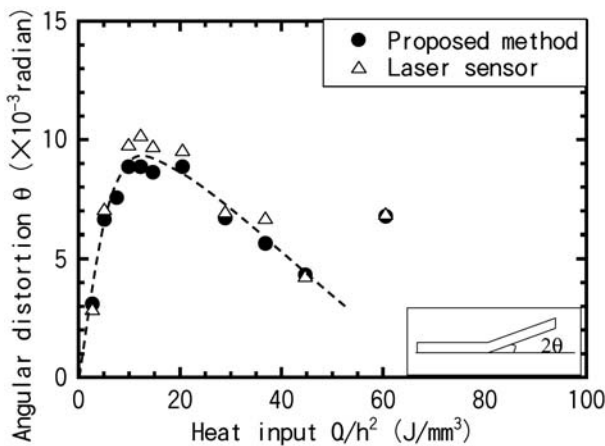
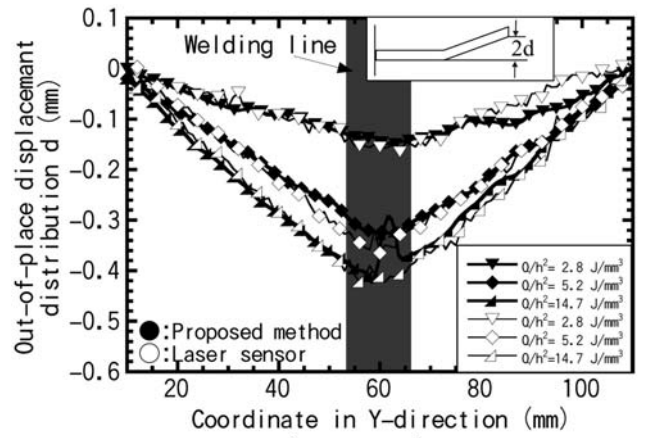


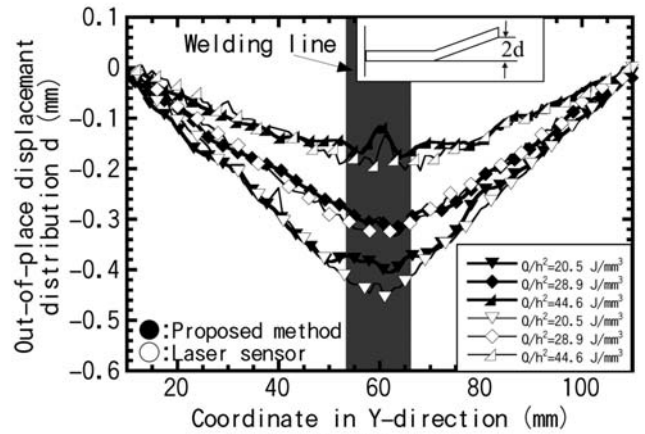
Fig. 11 Influence of heat input Q/h^2 on angular distortion θ .

いため、溶接トーチ前方への熱伝導による熱の蓄積の影響により、いずれのケースにおいても終端部ほど横収縮量が大きくなることが確認でき、また、いずれのケースにおいても、提案システムによる画像計測の結果とノギスによる測定結果が良好に一致していることが確認できる。さらに、その分布に着目すると、提案システムを用いた結果は、始端部から終端部まで連続的かつ高精度に計測できていることが分かる。

次に、横軸に入熱パラメータをとり、縦軸に提案システムにより求めた溶接線方向中央部 ($X=60\text{ mm}$) における面外変形量である角変形量について調べた結果を Fig. 11 に示す。入熱パラメータに関しては、Table 2 に示す11通りについて検討を行った。なお、角変形量は、 $X=60\text{ mm}$ の直線上における $Y=10\sim 50\text{ mm}$ の部分、および $Y=70\sim 110\text{ mm}$ の部分の z 方向変位量のそれぞれを最小自乗近似することにより2直線を求め、それらがなす角度を π から差し引くことにより求めた。同図の色塗りの印は提案システムによる画像計測の結果を示し、白抜きの印はレーザー変位計を用いた三次元形状計測システムにより得られた結果を示す。これらの結果から、角変形に関しても、提案システムによる結果は、レーザー変位計を用いた三次元形状計測システム



(a) $Q/h^2 = 2.8\text{--}14.7\text{ J/mm}^3$



(b) $Q/h^2 = 20.5\text{--}44.6\text{ J/mm}^3$

Fig. 12 Out-of-plane displacement distribution.

による結果といずれのケースにおいても良好に一致していることが確認できる。

角変形の分布について検討するために、Fig. 12 (a) に入熱パラメータ Q/h^2 が、 2.8 J/mm^3 、 5.2 J/mm^3 、 14.7 J/mm^3 の場合における溶接線方向中央部 ($X=60\text{ mm}$) での面外変位分布を示す。また、Fig. 12 (b) には Fig. 12 (a) の場合と同様にして、入熱パラメータが比較的大きな $Q/h^2=20.5\text{ J/mm}^3$ 、 $Q/h^2=28.9\text{ J/mm}^3$ 、 $Q/h^2=44.6\text{ J/mm}^3$ の場合における面外変位分布を示す。なお、Fig. 12 (a), (b) は比較検討のため、 $Y=2.5\text{ mm}$ および $Y=117.5\text{ mm}$ の点における z 方向変位がゼロとなるように、座標変換を行った。同図より、いずれのケースにおいてもレーザー変位計を用いた三次元形状計測システムによる変位分布と提案システムによる画像計測の結果は、定量的にみて良好に一致していることが分かる。

さらに、提案システムにより得られた試験片全体に渡る変位量の分布を Fig. 13 に示す。同図のような、試験片全域における X, Y, Z 方向の変位分布の同時計測は、本提案システムにより、初めて計測可能になったものである。(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

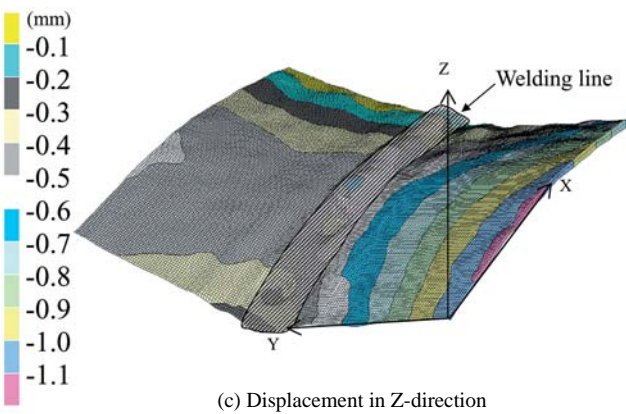
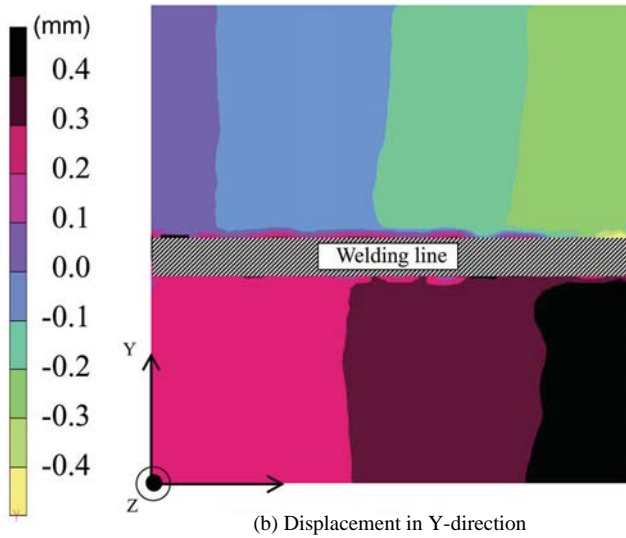
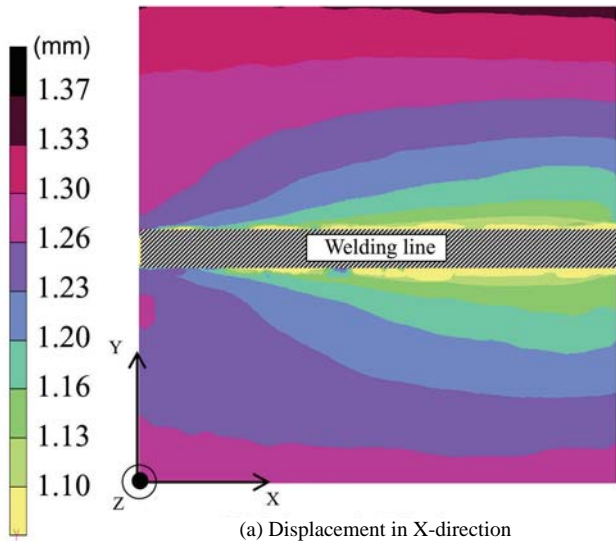


Fig. 13 Welding deformation measured by proposed method.

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、縦収縮の発生を意味しているものと考えられ、その左右端の差をとり整理した図が Fig. 14 である。●印は $Q/h^2=20.5 \text{ J/mm}^3$ の場合を示し、▲印は $Q/h^2=44.6 \text{ J/mm}^3$ の場合を示す。白抜きの印は、参考のため、ノギスによる測定

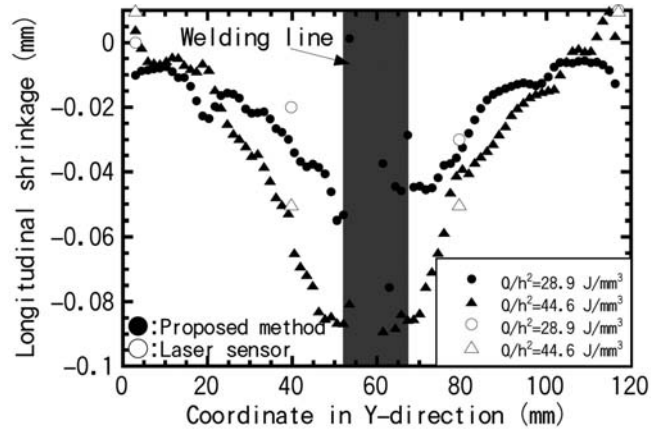


Fig. 14 Longitudinal shrinkage distribution in Y-direction.

結果を示している。同図より、画像計測の場合においては縦収縮分布の特徴である、溶接線近傍ほど収縮量が大きくなる傾向が計測できていることが確認できる。また、試験片の Y 方向端部である $Y=0 \text{ mm}$ および $Y=120 \text{ mm}$ においては、縦収縮がほぼゼロになっていることが確認できる。なお、今回実施した溶接条件および試験片寸法の場合においては、縦収縮の最大値の絶対値が 0.1 mm 以下であるので、その分布を精確に計測するには、計測機器に対し、 0.01 mm オーダーの非常に高い精度が要求される。従って、精度的な観点から考えると、縦収縮の計測は横収縮の計測に比べて非常に困難ではあるが、今回の計測結果によって、提案システムによる画像計測を用いることで、縦収縮分布が計測できる可能性を示した意味は大きいと考えることができる。

次に、変位の Y 方向成分を示す Fig. 13 (b) から、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。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。また、変位分布の等高線が縦に平行に並んでいることから、y 方向の変形は溶接部のみで発生しており、それ以外の部分は、y 方向には単に平行移動しているだけであることが分かる。さらに、同図 (c) からは、このケースにおける変形は、単純に縦収縮、横収縮および角変形しているわけではなく、入熱量が大きいために座屈形式の変形も発生していることが確認できる。この座屈形式の変形に起因して、Fig. 11 中の点 (a) に示すように、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られる。

本研究では、カメラ 2 台を用いた計測システムを構築し、デジタル画像相関法に基づくステレオ画像法を適用することで、高精度に面内変形および面外変形を全視野に亘り計測できる手法を開発した。本提案システムは、近年性能向上が著しいデジタルカメラの画素分解能の向上と共に精度が向上すると予想されるため、試験片レベルの寸法のみならず、実構造物の溶接変形計測の際にも有効になる可能性を秘めていると考えられ、今後の用途の拡大に期待が持て

る。

4. 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) 提案システムを用いることで、面内および面外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) 提案システム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を用いた三次元形状計測システムによる計測値と定量的にほぼ一致した。このことから、提案システムを用いることで、実用上十分な精度で計測できると考えられる。
- 3) 提案システムを用いることで、横収縮よりも必要精度の高い縦収縮分布を計測できる可能性を示した。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号19760579)の援助で行った。ここに感謝の意を表します。また、本研究の遂行にあたり、多大なる御協力を賜りました大阪府立大学生産技術センター渋谷義秋氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M. Uneda, M. Shibahara, M. Matsuishi, S. Iwata, K. Kitamura and K. Ishikawa: Studies on Non-Contact Deformation Measurement Technique of Structures using Sub-pixel Image Processing, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 72-3, (2006) 360-365. (in Japanese)
- 2) K. Okamoto: PIV Image Evaluation Algorithms, Journal of the Visualization Society of Japan 24-95, (2004) 31-35. (in Japanese)
- 3) M. Shibahara, K. Yamaguchi, K. Masaoka, T. Tsubogo: 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, 2, (2004) 667-674. (in Japanese)
- 4) M. Uneda, M. Matsuishi, S. Iwata and K. Ishikawa: Studies on Strain Distribution Measurement using Digital Image Correlation Method: Effect of out-of-plane deformation on strain measurement accuracy and its compensation, Journal of the Japan Society of Precision Engineering 73-6, (2007) 659-664. (in Japanese)
- 5) S. Murai, T. Okuda, H. Nakamura: 非測定カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 29-6, (1981) 196-209. (in Japanese)
- 6) H. Wakamatsu, S. Honma: Stereoscopic 3D CAD-System with Stereo-Coordinate Input Device Based on Binocular Parallax, Trans. IEE of Japan, Vol.120-C, No.8/9, (2000) 1135-1141. (in Japanese)
- 7) K. Inose, H. Imoto, Y. Nakanishi and Y. C. Kim: 3D-measurements of Welding Distortion Using Photograph and Its Applicability, Pre-Prints of the National Meeting of JWS, 75, (2004), 286-287. (in Japanese)
- 8) I. Murase, S. Kaneko and S. Igarashi: Robust Matching by Incent Sign Correlation, Institute of Electronics Information, and Communication Engineers, J83-D2, 5, (2000) 1323-1331. (in Japanese)
- 9) H. Shimono, S. Kaneko and S. Igarashi: Fast Rotated Image Matching based on Two-dimensional Orthogonal Expansion by Marginal Eigenvectors, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 68-8, (2002) 1042-1046.
- 10) F. Saitoh: Image Template Matching by Selecting Block Areas Based on Normalized Correlation Rates, Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 67-8, (2001) 1271-1275.
- 11) Zhengyou Zhang: "A Flexible New Technique for Camera Calibration", IEEE Trans. PAMI, Vol.22, No.11, (2000) 1330-1334.
- 12) K. Satoh and T. Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials, Journal of the Japan Welding Society, 45, (1976) 302-308.
- 13) W. Finkelburg and H. Maecker: Elektrische Bogen undthermisches Plasma, Handbuch der Physik, Bd. 22 (1956), 254.