

B04 ステレオ画像法を用いた溶接時における 三次元変形その場計測

恩田 尚弘

(指導教員：正岡孝治、柴原正和)

In-situ Measurement for 3-Dimensional Welding Deformation Using Stereo Correlation Technique on Welding

by Takahiro Onda

Abstract

The technique which can measure the transient welding deformation directly is very important to investigate the mechanism of welding deformation. In this study, in-situ displacement measurement method using digital camera is developed. This system is non-contact type and it doesn't need any complicated optical systems but it can measure the in-situ displacement over the full-field in high accuracy by using digital image correlation technique. Therefore, it is considered to be useful and easy to apply to practical problems. The number of measuring points that can be obtained at a time are more than 10 million. It is the same as the available pixels of the digital camera. Furthermore, since the active light source is not necessary in this system, the influence of the fluctuation of the atmosphere caused by the high temperature area is small.

In this study, the detail of the proposed system is performed and it is applied to the transient 3-dimensional deformation problem under very high brightness lightened by welding arc. Through the comparison between the experiment and measurement using laser measurement device, the validity of the transient transverse shrinkage, longitudinal shrinkage and angular distortion which are measured by proposed system is verified. The residual deformation is also investigated to check the accuracy and usefulness of proposed system.

1. 緒 言

溶接中における変位挙動は、溶接変形や溶接残留応力の発生メカニズムを知る上で、非常に重要な情報である。これまで、その挙動を知るためには、熱弾塑性解析による有限要素法に代表される数値解析により予測するのが一般的であり、直接測定法としては、目黒らによる ESPI システム¹⁾による面内の計測により、その可能性が示されているのみである。ただし、ESPI システムを用いた手法では、変位増分を高精度に計測できる一方で、レーザー光源などの精密な光学装置を必要とするため高価であり、測定範囲等の測定条件における制約が多い。また、レーザー光を計測対象部に照射し、その反射光を精確に受光する必要があるため、アークによる強光度下での計測は、困難であると考えられる。

そこで本研究では、実用的かつ実施工への適用が容易な方法として、安価であるデジタルカメラを用いた三次元変形計測法を独自に構築した。本手法の特徴としては、非接触かつ撮影した画像全域に渡る三次元的な変位挙動すなわち面内変形および面外変形を時系列に沿って計測可能である点が挙げられる。

また、計測装置が非常に簡便で、かつレーザー等の特殊な光源を必要としないため、溶接時の温度上昇に伴う大気の影響を受けにくく、さらに画像照合法の技術を基に画像解析しているため、大変形の計測においても適用可能である。その上、すべての画素を計測点として用いることができるため、一度に取得可能な計測点数は、カメラの有効画素数と同じ、1000 万点以上であり、

カメラの画素分解能の向上と共に計測精度の向上が見込まれるため、将来性にも期待できる手法である。本研究では、構築された計測法を、アークによる強光度下における変位挙動の時系列計測に適用し、結果として得られた残留収縮分布について、レーザー変位計およびデジタルノギスを用いて、本手法のもつ計測精度および有用性について検証した。

2. 三次元溶接変形その場計測システム および基本原理

2. 1 三次元溶接変形その場計測システム

三次元変形の計測は Fig.1 に示すような、変形前の左右 2 枚の画像および、変形後の左右 2 枚の画像から行う。まず、Fig. 1 の実線で囲まれた変形前の左右 2 枚の画像から変形前三次元座標を 2.2 節から 2.4 節において説明するステレオ画像法、画像照合法を用いて算出する。同様に、Fig. 1 の一点鎖線で囲まれた変形後の左右 2 枚の画像から変形後の三次元座標を算出する。次に、Fig. 1 の破線で囲まれた変形前後の 2 枚の左画像あるいは右画像から、前述と同様の画像照合法を用いて変形前後の対応点を算出する。

最後に、変形前後の対応点における三次元座標の差から三次元変形量を算出する。以上の作業を随時時系列的に行う。

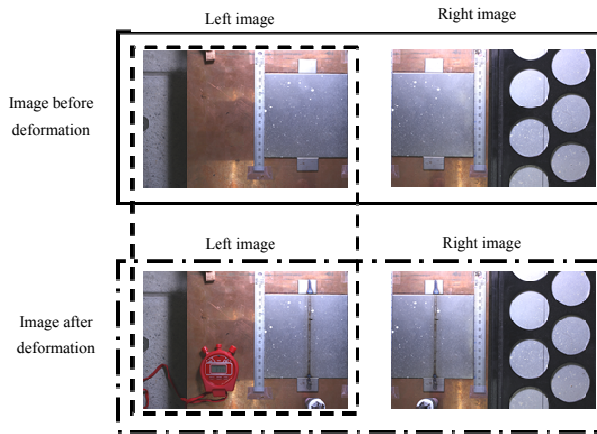


Fig. 1 Digital images for 3-dimensional measurement

2. 2 ステレオ画像法の基本原理²⁾

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、視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、2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 は画像を取得する際のカメラ間距離である。ただし焦点距離の等しい 2 台のカメラを用いる必要がある。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。投影位置のずれである視差 $x_L - x_R$ を d とおくと、三次元座標は次式で表される。

$$X = B(x_L + x_R) / 2d \quad (1)$$

$$Y = B y_L / d \quad (2)$$

$$Z = B f / d \quad (3)$$

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. 3 正規化相関による画像照合法³⁾

画像照合法とは 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

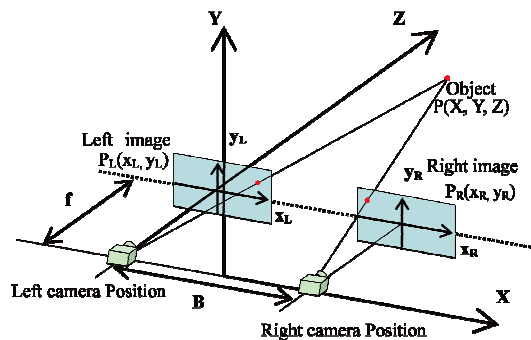


Fig. 2 binocular parallax

ても同様に、 $b_j(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を中心とした $B(b_j)$ を設定する。これら基準画像領域 $A(a_i)$ と比較画像領域 $B(b_j)$ より、次式で表される輝度相関値 R_{ij} を算出する。

$$R_{ij} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \{a_j(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - a^*\} \{b_j(x_i + y_i) - b^*\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \{a_j(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) - a^*\}^2} \sqrt{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \{b_j(x_i + y_i) - b^*\}^2}} \quad (4)$$

ただし、 a^* 、 b^* は画像探索領域全域における輝度値の平均値である。比較画像領域 $B(b_j)$ 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 1 に最も近づく時の座標 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ が相関性の最も高い座標、すなわち対応点である。

2. 4 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_{ij} 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、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。

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

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。

2. 5 全変位型変形計測システム

Fig. 4 にデジタルカメラを用いた全変位型変形計測システムの流れを示す。本手法では、溶接開始前に取得した変形前の画像を基準にし、溶接中を経て冷却後に至る N 枚の画像を撮影して得られた画像すべてとの間で画像解析することにより直接的に全変位量を求めることができる。

全変位型変形計測システムは、変形前の画像の性質により精度が影響されやすい点に注意が必要であるが、溶接途中の画像それぞれを独立に扱うため、一度、計測不

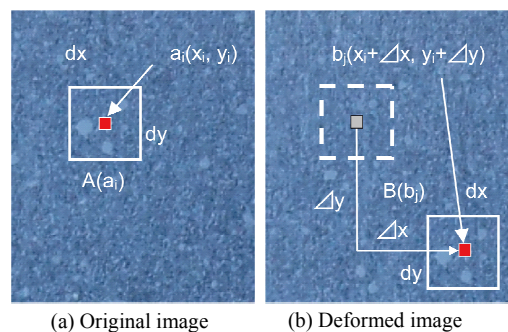


Fig. 3 Basic procedure of digital image correlation

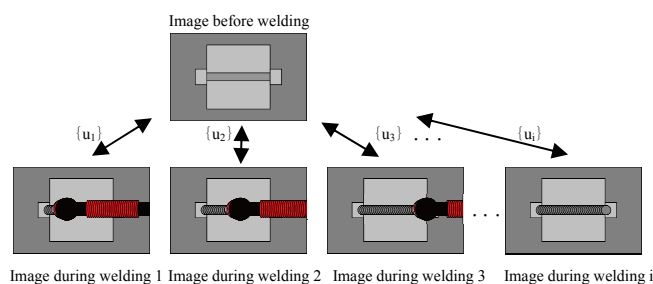


Fig. 4 Total displacement type of measurement method using digital images

能になった箇所でも、その後の計測が可能になるという利点を有する。

3. ステレオ画像法を用いた溶接変形その場計測

3.1 実験方法および実験装置

本節では、ステレオ画像法を用いた溶接変形その場計測を実施するにあたり、必要な実験システムについて説明する。本システムでは、カメラ二台、三脚 2 台およびチャンネル材を Fig. 5 に示すように組み上げ、試験片上方から試験片に正対する形で撮影する。それを溶接前後それぞれにおいて、左右 2 つのカメラから計 2 枚撮影することにより、試験片の三次元的な変形を計測する。用いた試験片には、水性スプレーを塗布することによりランダムパターンを付与し、画像照合時の照合精度を高める工夫をした。

試験片の長さは 120mm、幅は 120mm、板厚は 5.8mm である。材料は、軟鋼を用いた。溶接トーチを等速走行台

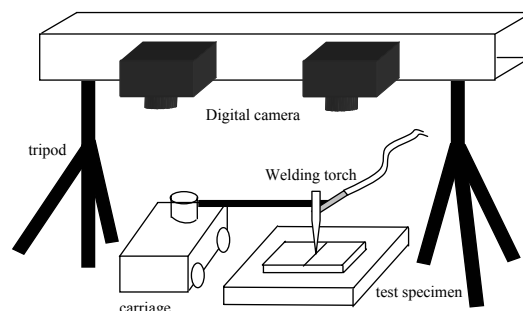


Fig. 5 Experimental equipment

車に固定し、溶接トーチから試験片へ安定して入熱されるよう工夫をした。試験片の設置に関しては、試験片の下部に三本の棒を用いた固定治具を設け、計測中に試験片に発生する微小振動を抑える工夫をした。

撮影時においては、左右のカメラの同期をとり、5 秒間隔で撮影を行うこととした。なお、溶接条件としては、電流値を 90A とし、溶接速度を 100mm/min とした。

3.2 ステレオ画像法を用いた溶接変形その場計測

Fig. 6, Fig. 7 および Fig. 8 には溶接時における、溶接線方向変位分布、板幅方向変位分布および面外方向変位分布を溶接開始時からの経過時間と共に示す。

Fig. 6 より、溶接トーチの後方には、熱膨張に伴う正の変位が分布していることが確認できる。その値は、終端部ほど大きくなっていることが確認できる。一方、Fig. 7 より、トーチの上方後部には、熱収縮に伴う負の変位が発生し、一方、トーチ下方後部には正の変位が発生していることが確認できる。このことは、横収縮がトーチ通過直後から

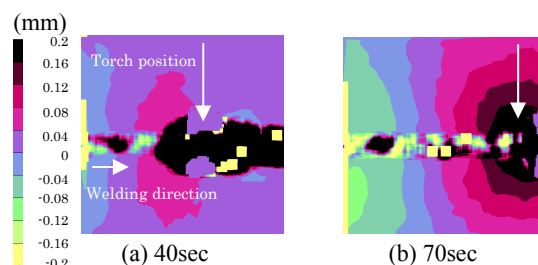


Fig. 6 Distribution of displacement in x direction during heating

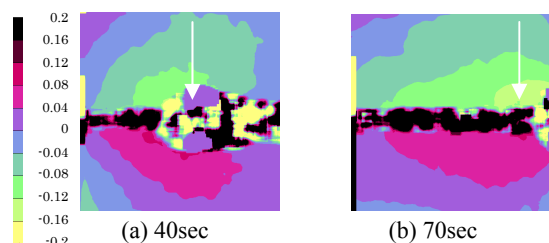


Fig. 7 Distribution of displacement in y direction during heating

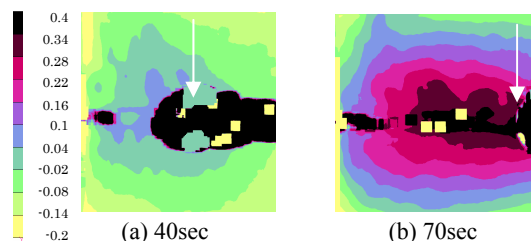


Fig. 8 Distribution of displacement in z direction during heating

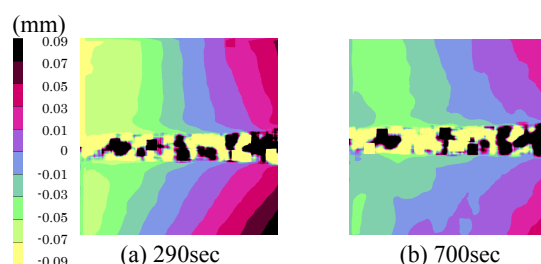


Fig. 9 Distribution of displacement in x direction during cooling

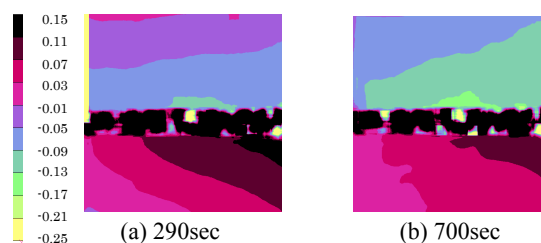


Fig. 10 Distribution of displacement in y direction during cooling

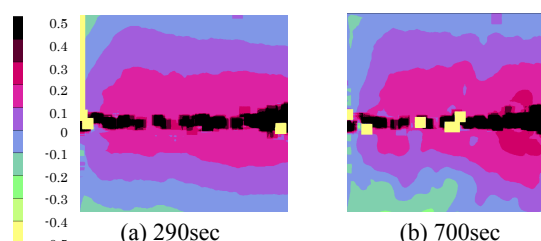


Fig. 11 Distribution of displacement in z direction during cooling

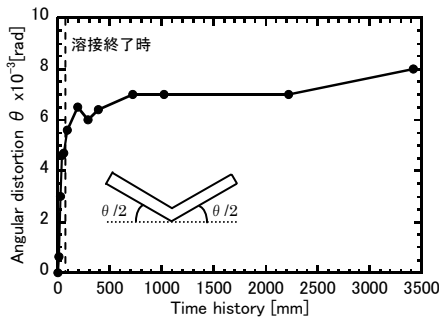


Fig. 12 Time history of angular distortion

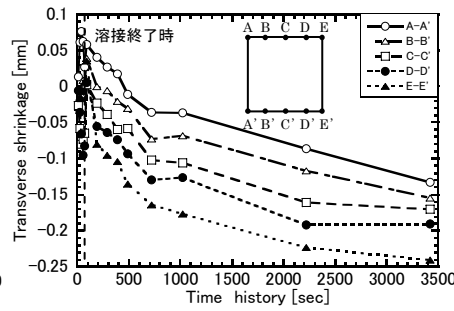


Fig. 13 Time history of transverse shrinkage

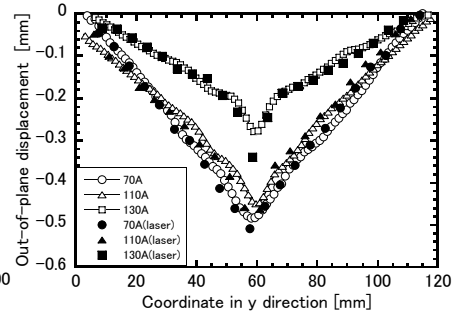


Fig. 14 Out-of-plane deformation

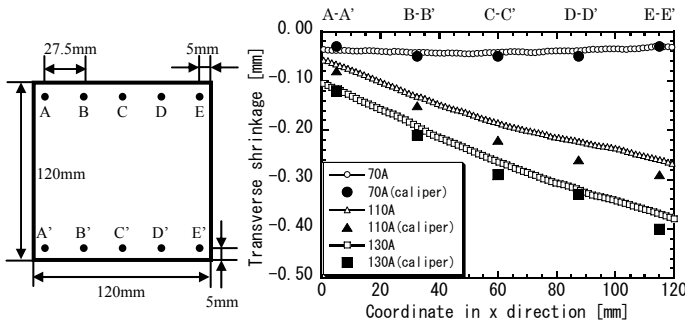


Fig. 15 Test specimen

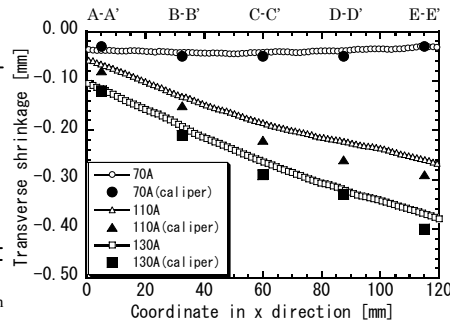


Fig. 16 Transverse shrinkage

発生し始めることを意味している。また、Fig. 8 より、トーチが通過した部分から順次角変形が発生している様子が確認できる。

次に、Fig. 9, Fig. 10 および Fig. 11 には、冷却過程における溶接線方向変位分布、板幅方向変位分布および面外方向変位分布を示す。Fig. 9 より、時間が経過するに従い、熱膨張が小さくなっていることが確認できる。次に、Fig. 10 においては、溶接終端部ほど横収縮量が大きくなることを確認できる。これは、時間の経過と共に増大することが分かる。Fig. 11 からは、角変形が(a)の $t=290$ (sec) の場合にはすでに形成されており、その形状は、時間が経過したとしても変化しないことが確認される。

次に、Fig. 12 に角変形量の時間履歴を示す。ここで角変形とは、溶接線方向の中央部における角度を示す。Fig. 12 から、角変形は溶接開始直後に発生し、溶接終了時および冷却過程においては、緩やかになっていることが確認できる。この理由としては、微小変形を仮定した場合、板厚方向の温度勾配が小さくなると、面外変形がそれ以上生成しなくなるためであると考えられる。

Fig. 13 に横収縮量の時間履歴を示す。また、図中のラインはそれぞれ溶接始端部から溶接線方向に 0mm, 30mm, 60mm, 90mm, 120mm の位置における横収縮の時間履歴を示している。

同図より、いずれの位置においても、溶接中に膨張を起こし、その後収縮していることが確認できる。特に溶接始端部の膨張量は他に比べて大きい。これは、溶接始端部が周りから拘束されておらず加熱による膨張を直接的に受けるからであると考えられる。また、冷却が進行するにつれて、溶接終端部ほど収縮量が大きいことが確認できる。この原因としては、入熱速度が小さい場合には、溶接終端部ほど熱が蓄積されやすいことにより、みかけの入熱量が大きくなるためであると考えられる。

3.3 精度検証

本節では、本研究で提案されたステレオ画像法を用いた変形計測結果の精度検証を行う。まず、面外変形について精度検証するために、画像計測結果をレーザー変位計による計測結果と比較検討した結果を Fig. 14 に示す。この結果より両者は定性的かつ定量的にほぼ一致していることが確認できる。次に、面内変形の精度検証のために Fig. 15 に示すように試験片の A~E および A'~E' の位置に直径 2mm の円孔を設け、A-A'~E-E' における 2 点間の距離を溶接前および溶接後においてデジタルノギスで測定した。この方法により得られた横収縮分布を、画像計測により得られた最終変形における計測結果と比較した結果を Fig. 16 に示す。この図より、画像計測とデジタルノギスの両者とも、始端部から終端部に至るところで、また、入熱量の大小に関わらず、良好に一致することが確認できる。

以上の結果より、本手法を用いることで、溶接中および冷却過程における面内変形、面外変形が計測できることが確認でき、その精度は定量的にも正しいことが確認された。

4. 結 言

ステレオ画像法を用いた三次元溶接変形その場計測を行うことにより、以下の結論を得た。

- 1) 提案手法を用いることにより、溶接中および冷却過程における溶接線方向変位分布、板幅方向変位分布および面外方向変位分布を計測することが可能であることを確認した。
- 2) 提案手法を用いることにより、角変形量、横収縮量の時間履歴を計測可能であることを確認した。
- 3) 画像計測による最終変形における横収縮量および角変形量と、レーザー変位計、デジタルノギスを用いた結果と比較することにより本手法による計測が非常に良い精度で行われていることを確認した。

参考文献

- 1) 目黒奨, 村松由樹: ESPI システムの溶接への適用, 溶接学会論文集, 第 24 巻, 第 3 号, 2006, pp.247-252.
- 2) 河村恵里: ステレオ画像法による三次元形状・変形計測法の開発に関する研究, 卒業論文, 2007
- 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