

M18 連続画像を用いた光学式非接触変形・ひずみ計測法の開発に関する研究

山口 晃 司 (指導教員 正岡・柴原)

Studies on Development of Optical Non-Contact Deformation and Strain Measurement Technique using Sequence Images.

by Koji Yamaguchi

Abstract

There is a growing demand for developing non-contact and accurate deformation and strain measuring technique of structures. Then, studies on digital image correlation technique, which can obtain the deformation of a surface by comparison of digital images of the undeformed and deformed configurations, are presented in this paper. Since this technique does not need a complicated optical system, the measurement can be performed easily. In addition, unlike other methods which utilize the interference of light waves, phase analysis of the fringe pattern and subsequent phase unwrapping process are not required. Thus, applications of this method to various problems can be expected. This paper presents the detail of the measuring technique and the results of behavior of displacement of welded joints during welding and cooling. And the accuracy of the proposed measuring method system was verified by the comparison with the result of thermal elastic plastic analysis.

1. 緒 言

高精度の光学式非接触変形・ひずみ計測技術としてモアレ干渉法やスペックル干渉法などが提案されており、レーザーの波長程度の非常に高精度な計測が可能なが報告¹⁾されている。しかし、これらの方法はレーザーを光源に用いた計測手法であるため大気の影響を受けやすいことから熱変形の計測等は困難であることが挙げられる。また計測システムの構成および計測方法が高度で複雑なことなどから測定条件に制約が多く、実構造物の汎用的な変形・ひずみ計測手法としては適用されにくい。そこで近年のデジタルカメラの高性能化、特に画素数の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²⁾³⁾⁴⁾が盛んに行われている。この手法の利点として、構造物に非接触に変形・ひずみ計測が可能なことやレーザー等の計測装置が必要でないことから安価であること、撮影した画像領域全域において変位場・ひ

ずみ場の計測が可能なることから情報量が多いこと、測定方法が非常に簡便であり、大気の影響を受けにくく、大変形時の計測においても適用可能なことがあげられる。そのため汎用的な変形・ひずみのその場計測法として期待することができる。そこで本研究では連続画像を用いた光学式非接触変形・ひずみ計測法を独自に開発し、ブードオンプレート溶接時の溶接中および冷却過程における溶接変形・ひずみ挙動の計測について適用し、本手法の計測精度および有用性について検証した。

2. デジタルカメラを用いた変形計測システムおよび基本原理

2.1 デジタルカメラを用いた変形計測システム

本研究において構築したデジタルカメラを用いた変形計測法の流れを Fig.1 に示す。同図に示すように取得した画像に対し、変形前の画像を基準に変形挙動を算出する時系列型計測システム、直前に取得した画像を基準に随時変形増分の挙動を算出する増分加算型計測システムを提案する。増分加算型計測システムでは計測点におけるピクセル単位の変位情報を随時更新することにより、変形前画像の計測点の変位増分を算出することが可能となる。

2.2 画像相関法を用いた画像照合法

変形前の画像である基準画像と、変形後の画像である計測対象画像において、Fig.2 (a)に示すような微小領域と最も類似性の高い領域を Fig.2 (b)で示される変形後画像より検出する。その方法を以下に示す。

(1) 基準画像中におけるある画素位置 $b_1(x_i, y_i)$ を中心とする $dx \times dy$ の微小領域を設定する。これを基準画像領域 $B(b_1)$ と定義する。

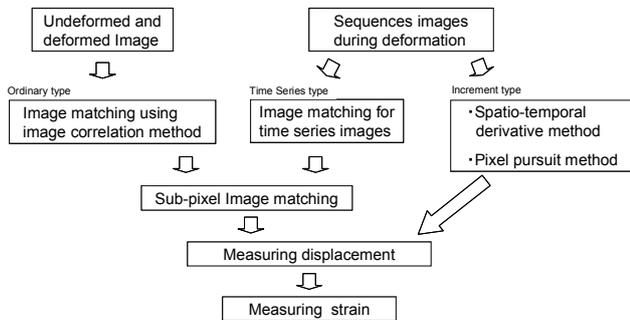
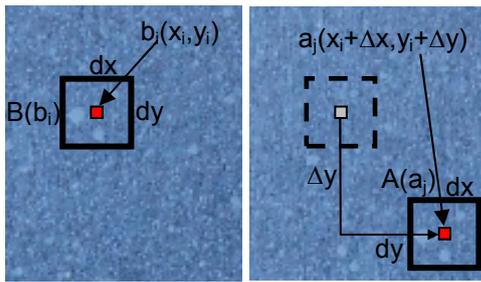


Fig.1 Flow chart of deformation measurement method using digital camera.



(a) Original Image (b) Deformed Image

Fig.2 Basic procedure of digital image correlation.

- (2) 計測対象画像においても、同様に、画素位置 $a_j(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を中心にした $dx \times dy$ の微小領域である比較画像領域 $A(a_j)$ を設定し、基準画像領域 $B(b_i)$ と比較画像領域 $A(a_j)$ の輝度相関値 $R_{ij}(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を、画像相関法を用いて求める。
- (3) 比較画像領域 $A(a_j)$ を 1 画素ずつらしながら全画像領域内の輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ を求める。

2.2.1 残差自乗和相関

画像照合する際、画像において各々の画素がもつ輝度値による相関値を算出し、対応点を探索する。残差二乗和相関とは変形前・後の画像の輝度値の大きさにおいて相関値を算出する手法であり、輝度相関値は次式で表される。ただし $A(a_j)$ 、 $B(b_i)$ は、Fig.2 に示す画像領域内の点の輝度値である。

$$R_{ij}(b_i, a_j) = ||A(a_j) - B(b_i)|| \quad (1)$$

この式から輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ が最小値をとる時、もっとも相関が高いことを示す。

2.2.2 正規化相関

2.2.1 で示した残差二乗和相関は周囲の照度変化に弱い相関法であると指摘されている⁴⁾。すなわち、照度変化や変形前画像と後画像において平均的な照度が異なると正確に対応点を探索することが困難になる。これに対し正規化相関は照度変化に対するロバスト性が高いことが報告⁴⁾されており、次式で表される。

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

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。輝度相関値 R_{ij} の値は -1 から 1 の値をとり、-1 に近いほど相関が低く、1 に近づく程相関が高い、つまり類似性が高いことがいえる。また本手法では前節で示した残差二乗和相関に比べ、多少計算時間が増加する。

2.3 曲面近似を用いたサブピクセル変形計測法

2.2 節で紹介した方法を用いて計測できる変位はピクセル単位であるが、実構造物の変形計測においてはより高い精度が要求される。当然のことながら、応力・ひずみは変位の微分量なのでこれらを求めるには必然的に変位

に対する要求精度は高くなる。そこで、画像相関法により得られた変位解の精度をピクセル単位以下、すなわちサブピクセルにする方法について説明する。

前節により得られた輝度相関値 $R_{ij}(b_i, a_j)$ が最小、すなわち相関性の最も高いピクセル単位の照合位置 $(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)$ を基準として、 x, y 方向の ± 1 画素ずつをそれぞれ加えた計 3×3 点における輝度相関値を用いて、次式により示される最小自乗曲面 $g(x, y)$ を作成する。

$$g(x, y) = ax^2 + bx + cy^2 + dy + exy + f \quad (3)$$

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 $g(x, y)$ が最小となる時の座標 (x_k, y_k) が、サブピクセル単位での照合位置であり、また、基準画像中における画素位置 $b_i(x_i, y_i)$ との差がサブピクセル計測変位 $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ である。以上の方法を基準画像の全画素について繰り返し適用することにより、画像内全体のサブピクセル計測変位分布 $\{u\}$ が得られる。

3. 基礎溶接継手の溶接変形・ひずみのその場測定への適用

次に本手法を溶接中および冷却過程における溶接変形・ひずみのその場測定へ適用した。

3.1 実験および諸条件

試験片の形状および寸法を Fig.3 に示す。材料は SM490 材とした。なお、実験の際には始端部および終端部にタブ板を設け、また今回の計測では面内変形のみを計測対象とするために、単位溶接長あたりの入熱量を、板厚に対して比較的大きい 581 J/mm とし溶接速度は 100 mm/min とした。

3.2 計測手法

溶接中および冷却過程における画像取得時の実験風景を Fig.4 に示す。あらかじめ試験片の溶接部以外に白スプレーを塗布した。また同図に示すようにデジタルカメラを試験片に対し、平行に設置し、試験片全域を撮影範囲として溶接前の画像を取得する。次に、溶接中および冷却過程において連続的に画像を取得した。画像取得間隔は約 8 秒である。そこで 2 章に示した時系列型計測システムおよび増分加算型計測システムを適用し、時系列に沿った変形挙動および変形増分挙動を計測した。この際、溶接中においてアーク光による強い光が発生することから画像相関法は、2.2.2 にしめす正規化相関を用いた。また本実験に対応した FEM 熱弾塑性解析を実施し、実験結果との比較を試みた。

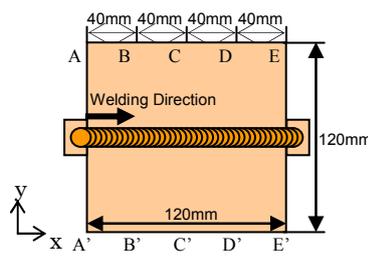


Fig.3 Shape and size of welding test specimen.

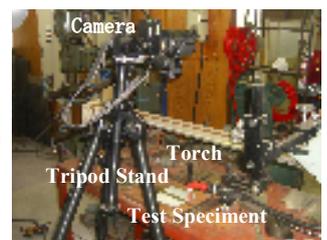


Fig.4 Experimental procedure.

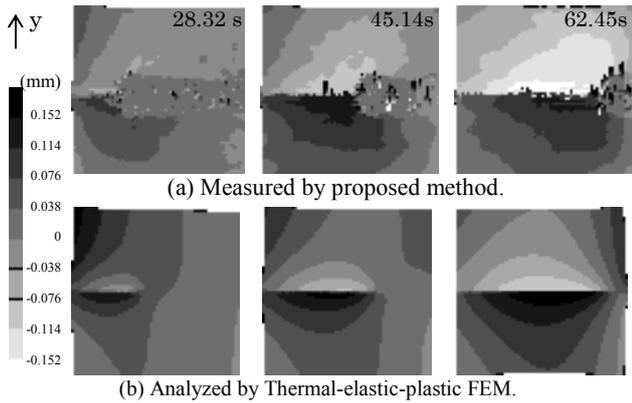


Fig.5 Distribution of displacement in y direction during heating.

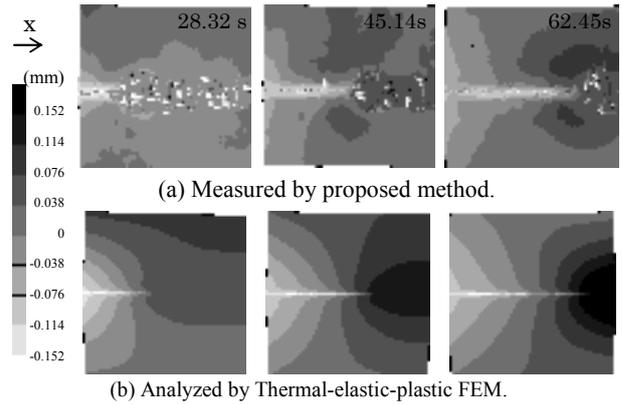


Fig.6 Distribution of displacement in x direction during heating.

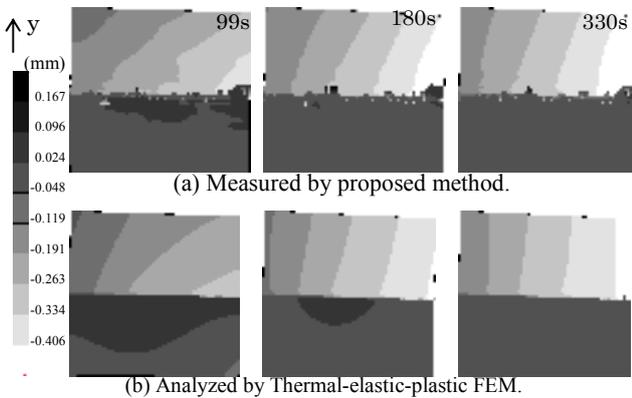


Fig.7 Distribution of displacement in y direction during cooling.

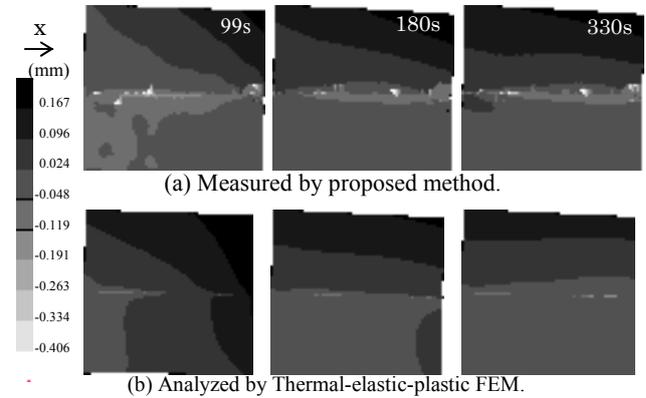


Fig.8 Distribution of displacement in x direction during cooling.

3.3 変形計測

Fig.5(a)に溶接中における提案手法による画像計測により得られた y 方向変位分布、(b)に熱弾塑性解析から得られた y 方向変位分布を示す。同図から提案手法により得られた変位分布および熱弾塑性解析から得られた変位分布の両者において、熱源の通過時に溶接トーチ周囲の熱膨張が見られ、トーチ通過後に横収縮が認められた。また Fig.6 に提案手法による溶接中における x 方向変位分布、(b)に熱弾塑性解析から得られた x 方向変位分布を示す。同図から熱源通過後に熱源周囲の膨張が見られる。このことから熱源近傍の画像情報が失われた領域を除け

ば、y 方向変位分布および x 方向変位分布とも提案手法により得られた変位分布と熱弾塑性解析から得られた変位分布は良好に一致していることが確認できる。

Fig.7(a)に冷却過程における提案手法から得られた y 方向変位分布、(b)に熱弾塑性解析から得られた y 方向変位分布を示す。同図より提案手法および熱弾塑性解析から得られた変位分布において、時間の経過とともに試験片始端部が収縮し、終端部にはおおきな横収縮が発生していることが確認できる。このことから溶接中および冷却過程の両方において提案手法から得られた変位分布と熱弾塑性解析から得られた変位分布は良好に一致している

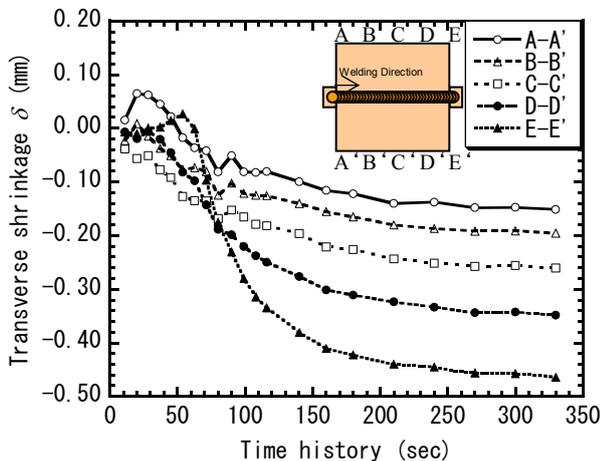


Fig.9 Transverse shrinkage measured by proposed method.

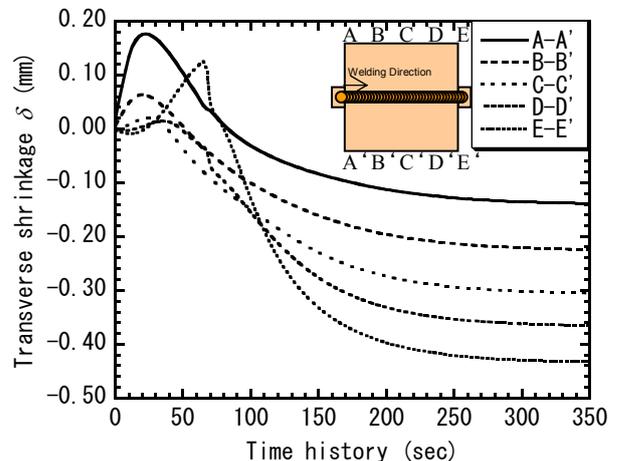


Fig.10 Transverse shrinkage computed by Thermal-elastic-plastic FEM.

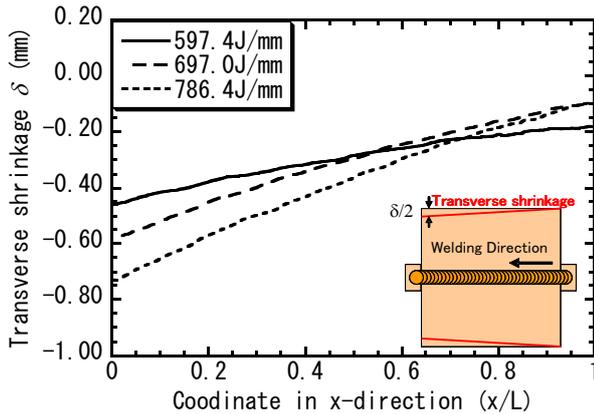


Fig.11 Transverse shrinkage measured by proposed method.

ことが確認できる。

次に Fig.3 に示す試験片の A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' における提案手法および熱弾塑性解析から得られる横収縮の時間変化の比較を行った。Fig.9 に提案手法から得られた横収縮量の時間変化、Fig.10 に熱弾塑性解析から得られた横収縮量の時間変化を示す。両図とも始端部 A-A' において熱源の通過直後の 25 秒付近において膨張がみられ、終端部 E-E' ではトーチが終端部に達する約 80 秒後に膨張していることが確認できる。また始端部 A-A' および終端部 E-E' におけるトーチ通過時に発生する膨張量は B-B', C-C', D-D' と比較して大きいことがわかる。

さらに A-A' から E-E' において約 80 秒から約 200 秒あたりまで急速に収縮した後、ある程度一定になり最終的に始端部 A-A' から順に B-B', C-C', D-D', E-E' と収縮量が大きくなることを確認することができる。

このことから両者において提案手法から得られた横収縮量および熱弾塑性解析から得られた横収縮量は定性的に一致していることが確認できる。

3.4 定量的評価

次に定量的評価を行うために溶接後の横収縮量を対象に提案手法と、レーザー変位計を用いて変形計測を行った。レーザー変位計において、自動ステージ部にコム株式会社、LAF-3D・300XY、超高速レーザー変位センサにおいて SUNX 株式会社 HL-C105B-BK を使用した。試験片端部においてエッジ検出を実施することで横収縮分布を計測した。単位溶接長さあたりの入熱量は、板厚に対して比較的大きい $Q=597 \text{ J/mm}$ 、 $Q=697 \text{ J/mm}$ および $Q=786 \text{ J/mm}$ とし、溶接速度は 100 mm/min とした。提案手法では溶接前および溶接後の二枚の画像から 2 章で示した従来型計測システムを用いて計測し、画像相関法において残差自乗和相関を用いた。

Fig.11 に画像から取得した実験結果を示し、Fig.12 にレーザー変位計を用いた計測結果を示す。両者は、y 方向端部における横収縮分布を示している。これらを比較すると、終端部に向かい、収縮量が大きくなる点、および始端部から終端部における横収縮量がほぼ一致する点において、両者は良好に一致していると言える。また、提案手法から得られた変位分布は、非常に滑らかに横収縮分布を表現できていることが確認できる。

以上の結果は、提案手法を用いることで、溶接部などの高温部の変位挙動を非接触で、なおかつ高精度に全視野において検出することが可能となり、溶接部の高温割

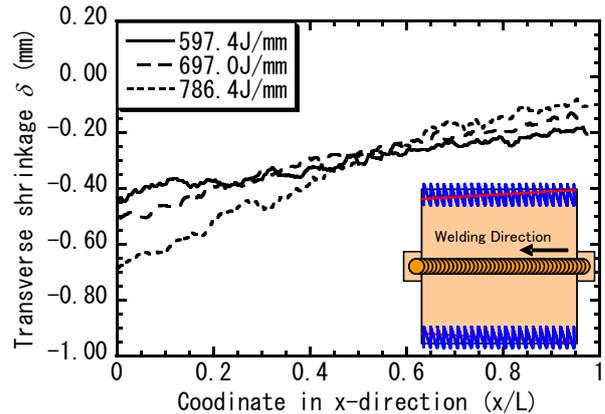


Fig.12 Transverse shrinkage measured by Laser Displacement Sensor.

れ等の欠陥のリアルタイム検出や、冷却過程における相変態挙動の検出⁵⁾にも効果が発揮すると考えられる。また、数値計算結果の定量的な妥当性検討手段としても利用可能であると考えられることができる。

4. 結 言

本研究では独自に開発した連続画像を用いた光学式非接触変形・ひずみ計測法を溶接中および冷却過程における変形・ひずみ分布のその場計測に適用した結果、以下の結論が得られた。

1. 提案手法を用いることで計測対象物の変形・ひずみ挙動を非接触かつ高精度に計測可能なことを確認した。
2. 提案手法を溶接問題の最終変形における横収縮量において適用した結果、実測値と良好に一致することを確認した。
3. 提案手法を溶接中および冷却過程における溶接部材の変形・ひずみのその場計測に適用した結果、熱弾塑性解析結果と良好に一致することが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 米山聡, 森本吉春: デジタル画像相関法による変位測定とその標準化について, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, 第 2003 号, 2003, pp.98-103.
- 2) 内野正和, 小金丸正明, 山口哲也, 米山聡: デジタル画像相関法によるひずみ分布計測 (1), 日本機械学会講演論文集, 第 2004 号, 2004, pp.293-294.
- 3) 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, 第 72 号, 2006, pp.360-365.
- 4) 池田光二, 吉田昌司, 中島啓介, 浜田長晴, 依田晴夫: 正規化演算の単調関数化による高速テンプレートマッチング, 電子情報通信学会論文誌, 第 J83-D-II 巻, 第 9 号, 2000, pp.1861-1869.
- 5) 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.