

固体の微小変形計測のための高精度変位場計測手法の開発

東京大学大学院 学生員 ○中島誠門
 東京大学大学院 正会員 小國健二
 東京大学大学院 正会員 堀 宗朗

1 はじめに

本研究では、不均質材料の力学特性の分布計測を目的とする次世代材料試験のための基幹的要素技術として、固体の微小変形の計測に特化した変位場計測手法の開発に取り組んだ。画像解析により固体の微小変形を検出するためには、変位計測を高精度で行うことが最も重要な課題となる。その際、変形速度を必要としない本研究では計測の時間分解能は犠牲にしても構わない。固体の微小変形の計測に特化するという前提条件の下、計測方法・画像解析アルゴリズムの工夫により、現在のハードウェアで得られる変位場計測精度の限界を見ることが本研究における目的となる。

2 変位計測手法の開発

本研究で新規に開発した「副尺付き PIV」と「一様ひずみ場時空間勾配法」は、固体の変形特性に着目した物理的考察により、従来型の高精度 PIV¹⁾ から統計的推定を極力排除したものである。さらに、両者の統合により、あらゆるスケールの変位に対応した変位場計測が可能となる。

2.1 副尺付き PIV

本手法は流体の速度分布計測手法として開発された PIV の高精度化を図る手法である。通常の PIV は、変位前後におけるピクセル単位の画像データ g^{mn}, \hat{g}^{mn} を使って、

$$R^{mn} = \sum_{i=i_{min}, j=j_{min}}^{i_{max}, j_{max}} g^{ij} \hat{g}^{(i+m)(j+n)} \quad (1)$$

の最大値を与える $u_c = (m\Delta_1, n\Delta_2)$ を領域の移動先として定義する (Δ_1, Δ_2 は画素辺長)。これに対し、副尺付き PIV では、固体の変形計測に対する時間的制約の緩やかさに注目し、変位前において「画素ずらし」を実施し、被写体に対して撮像系を高精度にずらしながら蓄積したデータより作成される高解像度画像 g_{kl}^{mn} を使用する。式 (1) は、

$$R_{kl}^{mn} = \sum_{i=i_{min}, j=j_{min}}^{i_{max}, j_{max}} g_{kl}^{ij} \hat{g}^{(i+m)(j+n)} \quad (2)$$

のように書き改められ、変位ベクトルは式 (2) を最大化する $u_c = (m\Delta_1 + k\delta_1, n\Delta_2 + l\delta_2)$ として求まり、変位計測精度が向上する (δ_1, δ_2 はサブピクセル長)。

2.2 一様ひずみ場時空間勾配法

本手法は高精度な変位分布計測手法として知られる時空間勾配法²⁾ を応用したものである。時空間勾配法は輝度値

の勾配情報に基づいて、

$$\Delta f(x) = -\nabla f(x) \cdot u(x) \quad (3)$$

より変位分布を推定する画像解析手法である。ただし、時空間勾配法は、変位分布の「局所的並進」を仮定した手法であり、本研究で対象とする固体の微小変形(ひずみを伴う変位場)の計測には適さない。そこでまず、固体の微小変形に対するより妥当な変位場として、

$$u(x) = \sum_{\alpha} \psi^{\alpha}(x) u^{\alpha} \quad (u^{\alpha} = u(p^{\alpha})) \quad (4)$$

のように連続関数 $\psi^{\alpha}(x)$ の補間による「なめらかな変位場」を仮定する。その際、図-1 のように、変位推定点 p^{α} を画素の頂点に 2 画素おきに配置する。いま、画像の強度分布が変位場と同様、連続関数 $\varphi^{\beta}(x)$ を用いて、

$$f(x) = \sum_{\beta} \varphi^{\beta}(x) \bar{f}^{\beta} \quad (5)$$

と表されるとする。式中の係数 \bar{f}^{β} は、復元画像のピクセル輝度値を示しており、ここで復元画像の輝度を用いるのは、ひずみを伴う変位場では、劣化画像と原画像(被写体)の変位分布が一致しないためである。

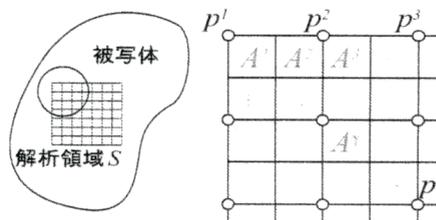


図-1 変位計測点の設置

こうして離散化された \bar{f}^{β} より輝度勾配 $\nabla \bar{f}$ を求め、式 (3) より、輝度変化量 $[\Delta \bar{f}]$ と式 (4) で離散化された $[U]$ の関係をつなげる作用素 $[M]$ を導出する。これにより、未知の変位ベクトル $[U]$ は、

$$[U] = [[M]^T [M]]^{-1} [M]^T [\Delta \bar{f}] \quad (6)$$

として導かれる。ところが、どのような画像に対しても $[M]$ の条件数は大きく、式 (6) より求まる $[U]$ は $[\Delta \bar{f}]$ の微小な

キーワード：変位計測、画像解析、PIV、時空間勾配法
 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 東京大学地震研究所
 TEL 03-5841-5756 / FAX 03-5802-3391 (堀研究室)

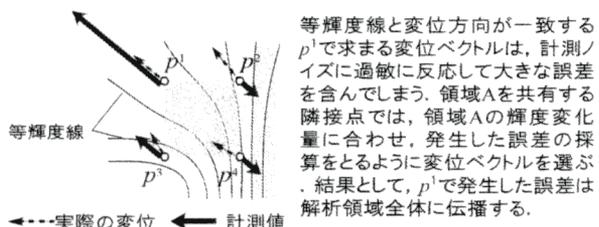


図-2 計測変位ベクトルの誤差

計測誤差に過敏に反応する。これは、輝度の離散的計測データを用いて式(5)に基づいて決定される滑らかな輝度値分布には、必ず等輝度線が存在することに起因する(図-2)。

式(6)の不安定性を回避するために変位場にさらに拘束条件、「局所的一様ひずみ」の仮定を加える。起こりうる変位モードを並進、剛体回転と伸縮およびせん断変形に限定することで、局所的一様ひずみの仮定は「微小領域内での変位方向の一様性」とほぼ同義となる。つまり、一様ひずみを仮定する領域(マスクS)内の変位場をマスク内で一定の角度θを用いて、

$$u(x) = \sum_{\alpha} \psi^{\alpha}(x) u^{\alpha} \quad (u^{\alpha} = (u^{\alpha} \cos \theta, u^{\alpha} \sin \theta)) \quad (7)$$

と表す。u^αは、変位推定点p^αにおける変位の符号付ノルムとみなすことができる。最終的な変位ベクトルは、この拘束条件を規定する作用素[R]と、θ方向の変位に対して輝度変化をほとんど生じない点の補間情報を有する[Q]を用いて、輝度変化の計測データ[Δf̂]に対する変位方向θの最小二乗解として求まる。すなわち、

$$[u] = [Q] [[Q]^T [R]^T [M]^T [M] [R] [Q]]^{-1} [Q]^T [R]^T [M]^T [\Delta \hat{f}] \quad (8)$$

これは、変位に対する輝度変化の敏感さに基づいて各変位推定点の計測データに重み付けした「重み付け最小二乗解」である。また、変位方向θの同定は、「最適に重み付けされた最小二乗解」の選択、すなわち式(8)の逆解析で得られる[u]が与える輝度変化と輝度変化の計測値[Δf̂]との間の誤差ノルム、

$$N(\theta) = \left| [\Delta \hat{f}] - [M][R][u] \right| \quad (9)$$

の(数値計算による)最小化によりなされる。

2.3 解析手法の統合

副尺付きPIV手法は、サブピクセルあるいはピクセルを単位とした比較的大きな変位を計測できる反面、局所並進を仮定しているため、固体のような微小変形の計測には適さない。一方、一様ひずみ場時空間勾配法は、現段階では計測機器の精度にある程度の制約を受けるものの微小な変形を計測するのに適した手法である。ただし、輝度値の局所Taylor展開に基づくため、サブピクセルオーダー以上

の大きい変位の推定には適さない。そこで、両者の長所を活かし、サブピクセル単位までの変位分布を副尺付きPIVで、サブピクセル以下の微小変形を一様ひずみ場時空間勾配法によって求めることで、大きな変位が伴う固体の変形に対応したマルチスケールの変位場計測を実現できる。

3 実験

3.1 概要

計測する被写体にはリバーサルフィルム(FUJIFILM社製:PROVIA400F)を使用し、図-3に示すように、円形の評点を焼き付けたものを用いた。また、照明にはハロゲンランプ(DOLAN-JENNER製:PL-900STD)を用い、発せられる白色光を被写体の背面から照射した。

画素ざらしおよび画像復元を行うためのシステムを図-4のように構築し、同システムによって、被写体に高精度に回転変位を与え、図-5に示す撮像系で画像データを取得した。



図-3 実験用画像

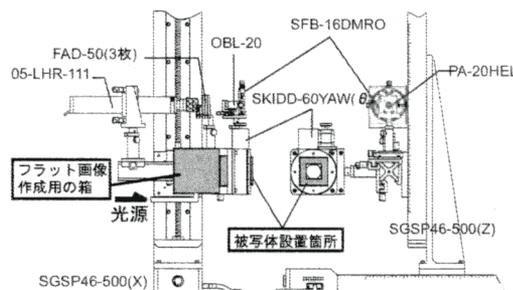


図-4 実験システム(制御系)

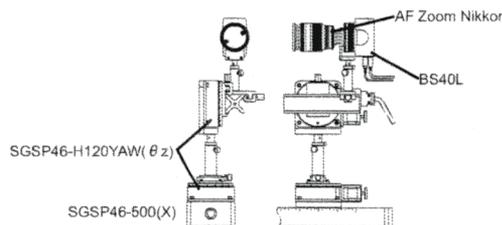


図-5 実験システム(撮像系)

3.2 結果

得られたデータを元に副尺付きPIVおよび一様ひずみ場時空間勾配法を統合した手法で変位場を計測したところ、その精度は平均で0.0270ピクセルであった。

参考文献

[1] 可視化情報学会(編).『PIVハンドブック』.森北出版,2000.
 [2] Nishio S., Okuno T., Morikawa S. Higher order approximation for spatio-temporal derivative method. Springer-Verlag, 1992.