

Single-Parameter Division Model を用いたレンズ歪み補正の 偏光高速度干渉計への適用

Application of Lens Distortion Correction using Single-Parameter Division Model to High-Speed Polarization Interferometry

1W173068-8 島崎 湧 指導教員 及川 靖広 教授
SHIMAZAKI Yu Prof. OIKAWA Yasuhiro

概要：近年、音響現象の可視化手法として、偏光高速度干渉計を用いた並列位相シフト干渉法（PPSI）が利用されている。しかし、計測結果には干渉計に組み込まれているレンズの影響による歪みが生じてしまう。本研究では、200 mm の平凸レンズで発生するラジアル歪みに着目して、Single-Parameter Division Model を用いたラジアル歪み補正手法を干渉計に適用した。このモデルの下では直線は円弧に変換されるという性質を持つため、circle fitting によって円のパラメータを推定すれば、モデルの歪みパラメータを求めることができる。高精度な circle fitting のために、干渉計の計測システムの特徴を利用して、干渉計に即した画像処理を提案し、実験によりその有効性を確認した。さらに、PPSI のための校正用音場を提案し、その可能性について考察した。

キーワード：光学的音響計測、偏光高速度干渉計、レンズ歪み、Division Model

Keywords: optical sound measurement, high-speed polarization interferometry, lens distortion, division model

1. まえがき

光学的音響計測は、光学系を用いて音響現象を可視化・計測する技術である [1]。近年では、偏光高速度干渉計を用いた PPSI の実現により、可聴音場の瞬時・定量的計測が可能になり、様々な音響現象の可視化が行われてきた。偏光高速度干渉計の概要を図-1 に示す。一方で、レンズによって結ばれた像には、中心から放射状に膨張あるいは収縮するラジアル歪みが生じる。ラジアル歪みの例を図-2 に示す。本研究では、参照面の手前にある直径 200 mm の平凸レンズによって生じるラジアル歪みに着目し、補正を行った。さらに、PPSI のための校正用音場を提案し、その可能性について考察した。

2. レンズ歪みのモデルと補正手法

レンズ歪みのモデルとして、Fitzgibbon [2] が提案した Division Model のうち、一次の項のみを用いた

$$x_u = x_0 + \frac{x_d - x_0}{1 + \lambda r_d^2}, \quad y_u = y_0 + \frac{y_d - y_0}{1 + \lambda r_d^2} \quad (1)$$

を、特に Single-Parameter Division Model と呼ぶ。ただし、 $[x_d, y_d]^T$ は歪んだ点の位置、 $[x_u, y_u]^T$ は補正後の点の位置、 $[x_0, y_0]^T$ は歪みの中心位置、 r_d は $[x_0, y_0]^T$ から $[x_d, y_d]^T$ までの距離である。このモデルの下では、直線は円弧に変換されるという性質を持つ。よって歪みパラメータ (x_0, y_0, λ) は、異なる 3 つの円のパラメータ $(A_i, B_i, C_i)_{i=1,2,3}$ を用いて、次の式によって定められる。

$$\begin{cases} (A_1 - A_2)x_0 + (B_1 - B_2)y_0 + (C_1 - C_2) = 0 \\ (A_1 - A_3)x_0 + (B_1 - B_3)y_0 + (C_1 - C_3) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

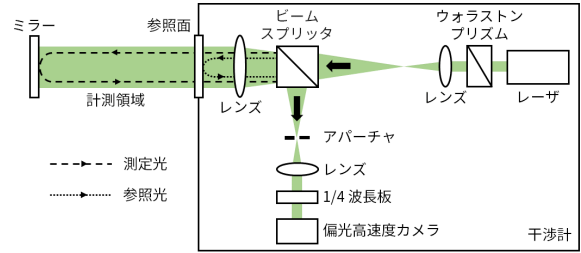


図-1 偏光高速度干渉計の概要図

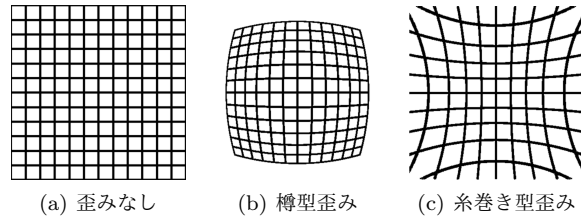


図-2 ラジアル歪みの例。半径方向に収縮する歪みは樽型歪み、膨張する歪みは糸巻き型歪みと呼ばれる。

$$\frac{1}{\lambda} = x_0^2 + y_0^2 + Ax_0 + By_0 + C \quad (3)$$

したがって、歪みパラメータの推定問題は円のパラメータの推定問題、すなわち circle fitting に帰着する。

3. 提案手法

歪みパラメータを推定する上では、円弧の抽出や circle fitting の精度が重要である。従来手法 [3] では、多数のオブジェクトが含まれた風景の画像の中から所望の点を抽出していくアプローチをとるが、干渉計の計測結果には撮影対象しか写らないため、本研究では計測領域外などの不要な点を削除するアプローチをとる。

表-1 歪みパラメータの推定値

歪みの中心位置 $[x_0, y_0]^T$	$[116.5643, 125.7855]^T$
歪み係数 λ	7.4545×10^{-6}

まず, RANSAC と Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いて計測領域境界の circle fitting を行う. RANSAC は, 外れ値を含む入力データからモデルのパラメータを推定する手法で, LM 法は非線形最小二乗法の解法の一つである. これらを組み合わせることで, 外れ値の影響を受けず, 高精度な circle fitting が可能である. 次に, 計測領域より外側にある点を削除し, 残った点列の中から円弧の抽出を行う. 最後に, 抽出した円弧に対して, 最小二乗法と LM 法を用いて circle fitting を行う. 円弧が完全に抽出できている場合は最小二乗法だけでも十分な精度を得られるが, 円弧の一部しか抽出できていないと, circle fitting の結果は本来の円弧から大きく外れてしまうため, LM 法によって調整する.

以上の処理によって n 本の円弧が抽出されたとすると, そこから求められる歪みパラメータの組み合わせは nC_3 通り存在する. この中から外れ値を除外した上で中央値をとり, これを歪みパラメータの推定値とする. 歪みパラメータはレンズに固有の値であるため, 一度推定すれば, その値を用いて異なる計測結果の歪みを補正することができる. ただし, 校正用画像と補正用画像のサイズが異なる場合, 歪みパラメータをサイズに合わせて調整する必要がある. 校正用画像と補正用画像における計測領域の半径をそれぞれ m, m' とすると, 式 (1) より, 調整後の歪みパラメータ (x'_0, y'_0, λ') は

$$[x'_0, y'_0]^T = \frac{m'}{m} [x_0, y_0]^T, \lambda' = \left(\frac{m}{m'}\right)^2 \lambda \quad (4)$$

で与えられる.

4. 実験

提案手法を用いて, 歪みパラメータの推定を行った. 校正用画像には, 不透明かつ形状が直線的な物体として, 金属製の定規の撮影結果を用いた. 歪みパラメータの推定値を表-1 に示す.

次に, 推定した歪みパラメータを用いて, レンズ歪み補正を行った. 補正用画像には, キャリブレーションプレートの撮影結果と超音波素子の計測結果を用いた. キャリブレーションプレートには 5 mm 幅のチェッカーパターンが印刷されたものを, 超音波素子には 40 kHz の平面波を放射するものを用いた. 補正結果を図-3, 図-4 に示す. 補正前の画像には糸巻き型歪みが発生しているが, 補正処理によって軽減していることが分かる. したがって, Single-Parameter DM を用いたラジアル歪み補正手法が, 偏光高速度干渉計に対しても有効であることが確認できた.

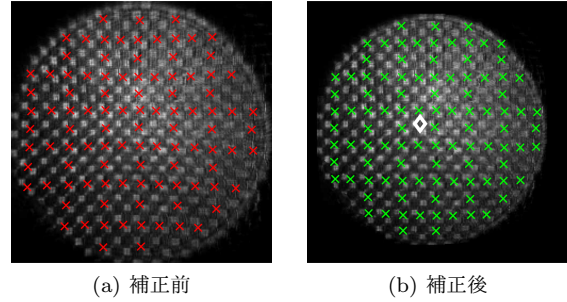


図-3 キャリブレーションプレート. 歪みの中心位置を白いひし形で示した. 補正前の赤いバツ印は, チェッカーパターンの交点を手動で抽出した. 緑色のバツ印はその補正結果である.

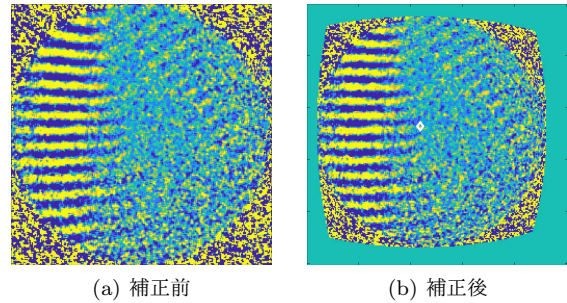


図-4 超音波素子. 歪みの中心位置を白いひし形で示した.

5. 校正用音場の提案

実験では校正用画像に光強度画像を用いたが, 音場の可視化結果からレンズ歪みを検出する方法が考えられる. 偏光高速度干渉計は音響現象のための計測装置なので, むしろその方が合理的なアプローチだともいえる. 光学的音響計測は SN 比の悪さが課題の一つだが, 超音波を用いれば強い音場を作ることができるので, 画像処理も十分適用できると考えられる. 特に, 平面波や球面波など性質が既知の音源は扱いやすく, 校正用音場としての利用が期待できる.

6. むすび

本研究では, 偏光高速度干渉計の計測結果に現れるレンズ歪みが, Single-Parameter Division Model を用いたラジアル歪み補正手法によって軽減されることを確認した. また, 歪みパラメータ推定を行う上での, 干渉計に即した画像処理について述べた. さらに, PPSI のための校正用音場を提案し, その実現可能性を示唆した. 今後は, 校正用音場を用いたレンズ歪み補正を実現する所存である.

参考文献

- [1] 矢田部浩平, 石川憲治, 谷川理佐子, 及川靖広, “[解説論文] 光学的音響計測,” 電子情報通信学会 Fundamentals Review, vol.12, no.4, pp.259–268, Apr. 2019.
- [2] A. W. Fitzgibbon, “Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion,” Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), vol. 1, pp. 125–132, Kauai, HI, USA, Dec. 2001.
- [3] F. Bukhari and M. N. Dailer, “Automatic Radial Distortion Estimation from a Single Image,” J. Math. Imaging Vis., vol.45, pp.31–45, Jan. 2013.