

縦横並列検出光干渉計を用いた 3 次元形状計測

○渡部裕輝 (山形大学)

3D shape measurement using axial lateral parallel optical interferometry

* Y. Watanabe (Yamagata University)

Abstract— Axial lateral parallel optical interferometry obtains a X-Z interference image using diffracted light as the reference beam and a linear illumination beam without any scan. By scanning a sample mechanically, 300 interference images were measured using an InGaAs camera (320 × 256 pixels, 60 frames/s, 1.05-ms exposure). 3D shape of a sample was obtained by performing the subtraction of the DC image, which was an averaged interference image, from each interference image, a high-pass filter for the axial direction and the Hilbert transform.

Key Words: Axial lateral parallel optical interferometry, 3D shape measurement

1 はじめに

3 次元計測は、従来その計測に多大な時間を要するのが一般的であった。しかし、光による非接触計測手法が普及するにつれ、高速計測への要求が高まってきた。人体計測においては、数秒の姿勢静止でさえ被験者にとって抵抗があり、得られた画像もモーションアーチファクトの影響を受けてしまう。我々は、短時間に生体の 3 次元断層画像計測を行うため、2 次元カメラを検出器とする光干渉断層計(OCT, Optical Coherence Tomography)の開発を行ってきた¹⁻³⁾。この OCT 技術は、回折光を参照光にして、線状なプローブ光を生体に照射し、一切の機械的な走査なしに縦-横方向を並列に検出することができる。さらにこの縦横並列検出光干渉計のプローブ光を機械的に走査することで、3 次元断層画像が得られる。開発した OCT システムにおいて、3000frames/s(fps)動作の CMOS カメラを検出器とし、測定範囲 5.8×2.8×2.0mm³ (x×y×z)、画素数 512×250×512 が 1/6 秒で測定でき、空間分解能は、35×42×11μm(x×y×z)の結果を得ている²⁾。

光学的非接触計測手法は、生体の断層画像の計測だけでなく、工業製品の表面の形状計測にも有効である。工場における製品の寸法計測においては、製品全数を製造工程中で計測するインライン全数検査の要望が強くなっており、高速 3 次元計測への展開が期待できる。

そこで本研究では、縦横並列検出光干渉計において、サンプルを走査による 3 次元計測を検討した。

2 実験光学系

図 1 に縦横並列検出型光干渉計の実験光学系を示す。光源である SLD(QPhotonics, SLD QSDM-1300-9; 中心波長: $\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m}$, スペクトル半値全幅: $\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$, コヒーレンス長: $l_c = 50.3 \mu\text{m}$)から出射した光は、レンズによりコリメートされ、ビームスプリッタによりサンプル光と参照光に分割される。サンプルアームでは、シリンドリカルレンズ($f = 80\text{mm}$)を配置して、線状に

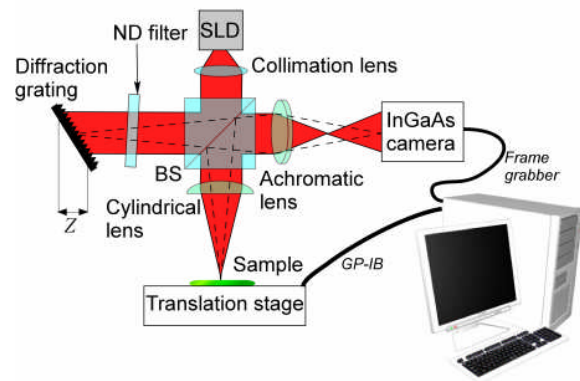


Fig.1 Schematic of axial lateral parallel optical interferometry

集光した光をサンプルへ照明する。また参照アームにおいて、反射型回折格子をリトロー配置に設置する。グレーティング方程式は、

$$p(\sin \alpha + \sin \beta) = n\lambda \quad (1)$$

と表され、 p は回折格子の格子間隔、 λ は回折光の波長、 α と β はそれぞれ入射角と回折角、 n は回折次数である。リトロー配置において、入射光と回折光の角度が等しくなるのでリトロー角 θ は、

$$\theta = \sin^{-1}(n\lambda_0/2p) \quad (2).$$

となる。1 次回折光において、リトロー角は $\theta = 23.14^\circ$ と求まる。サンプルからの後方散乱光と回折光がアロマティックレンズ($f = 75\text{mm}$)により 2 次元 InGaAs カメラ (Goodrich-Sensors Unlimited, SU320MS-1.7RT; 256×320 画素, 25-μm 画素間隔, 12 ビット分解能, フレームレート 60 fps, 露光時間 1.05 ms)に結像される。カメラの水平方向の画素($N = 256$)を光軸方向、垂直方向の画素($M = 320$)を横方向の画像化に用いた。回折格子により発生する空間的な光遅延 Z は、

$$Z = d \tan \theta, \quad (3)$$

と表すことが出来る。ここで d はビーム直径である。横方向領域 ΔX は、カメラの垂直方向の画素で測定されるので、水平領域 ΔY は $N\Delta X/M$ と表せる。よって横

方向領域 ΔX と深さ領域 ΔZ の関係は次式と表せる。

$$\Delta Z = \Delta Y \tan \theta = (N/M) \Delta X \tan \theta \quad (4)$$

またサンプリング定理より、光軸方向のプロファイル Δl は 2 画素以上で検出する必要があり、これを満たす最大深さ領域 ΔZ_{\max} は次式のようになる。

$$\Delta Z_{\max} = \Delta l \times \frac{N}{2} = \frac{l_c}{2} \times \frac{N}{2}. \quad (5)$$

光源のコヒーレンス長 $l_c = 50.3 \mu\text{m}$ とカメラの画素数 $N = 256$ から最大深さ領域 ΔZ_{\max} は 3.2 mm と求められる。これ以上の深さ領域では、光軸方向分解能は低下する。

カメラから出力される干渉画像は、フレームグラバードで PC に取り込まれ、各画素を次式のようになる。

$$E_i = I_{\text{ref}} + I_{\text{sig}} + I_{\text{inc}} + 2[I_{\text{ref}} I_{\text{sig}}(x, z) * |\gamma(z)|]^{1/2} \cos \phi \quad (6)$$

ここで I_{ref} , I_{sig} , I_{inc} は参照光、信号光、非干渉光の各光強度、 $\gamma(z)$ は光源のコヒーレンス関数、 ϕ は位相差、 $*$ はコンボリューションを表す。サンプルは移動ステージ上に固定し、このステージは、GP-IB を介して、PC で制御される。

次にカメラの出力である干渉画像からサンプルのプロファイルを表す干渉振幅成分画像を抽出する方法を述べる。3次元データを取得するためサンプルを走査し、複数枚の干渉画像を PC に取り込む。まず、これらの干渉画像の平均画像を求め、各干渉画像から差し引く。この処理は、主に参照光強度 I_{ref} を差し引くことに相当する。次にサンプルからの反射光のうち干渉に寄与しない成分 I_{inc} は、光軸方向へ一様な強度分布であるので、ハイパスフィルタにより、非干渉光を除去する。最後にヒルベルト変換により、干渉信号の位相を 90° シフトし、解析信号を得て、その振幅を計算する。この方法は、1 回のカメラ計測で得た干渉画像から 1 枚の干渉成分振幅画像を得ているが、複数枚の干渉画像を利用し非干渉成分を求めているので、擬似シングルショット法を呼ぶ³⁾。

3 測定結果

本システムにおいて、横方向領域を評価した結果 $\Delta X = 6.8 \text{ mm}$ であった。またリトロー角 $\theta = 23.14^\circ$ より、深さ領域 $\Delta Z = 2.3 \text{ mm}$ と求められる。ステージは、 1.2 mm/s で 5 秒間走査したので、測定領域 $\Delta Y = 6 \text{ mm}$ で 300 枚の干渉画像を測定した。また空間分解能は、 $42 \times 40 \times 25 \mu\text{m}$ ($x \times y \times z$) であった。サンプルには M6 のネジを用いて測定した。カメラで観測できる XZ 面のある干渉振幅成分画像を Fig.2 に、3D データから、ボリュームレンダリングした結果を Fig.3 に示す。ねじ山の形状が計測できていることが確認できる。

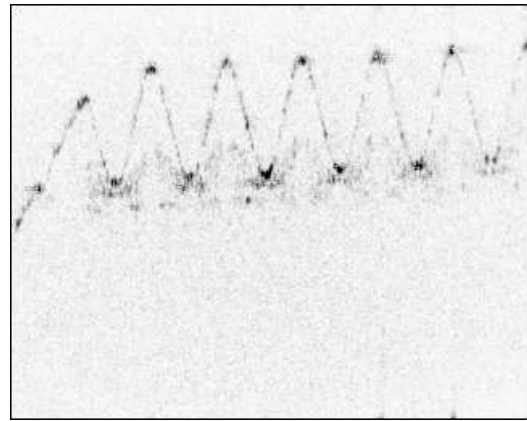


Fig.2 XZ-plane of a metal screw, $6.8 \times 2.3 \text{ mm}^2$ ($x \times z$)

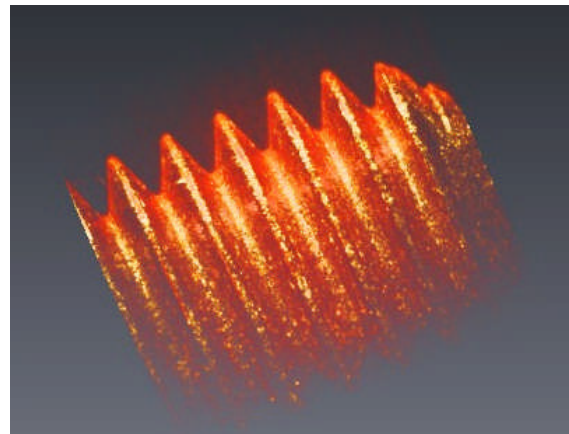


Fig.3 Volume rendered image of a metal screw: $6.8 \times 6.0 \times 2.3 \text{ mm}^3$ ($x \times y \times z$)

4 まとめ

縦横並列検出光干渉計において、サンプルを走査による 3 次元計測を検討した。測定領域 $6.8 \times 6.0 \times 2.3 \text{ mm}^3$ ($x \times y \times z$) を 5 秒で測定した。今後はインライン化を目指し、検討を行う。

謝辞:

本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO 技術開発機構)平成 17 年度産業技術研究助成事業のご支援を頂いている。深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Y. Watanabe, et al., "In vivo nonmechanical scanning grating-generated optical coherence tomography using an InGaAs digital camera", *Opt. Commu.*, **261**, 376/380 (2006)
- 2) Y. Watanabe, et al., "Three-dimensional imaging by ultrahigh-speed axial-lateral parallel time domain optical coherence tomography", *Opt. Express*, **14**, 5201/5209 (2006)
- 3) Y. Watanabe, et al., "Quasi-single shot axial-lateral parallel time domain optical coherence tomography with Hilbert transformation," *Opt. Express*, **16**, 524/534 (2008)