

線集光型フーリエドメイン干渉計による形状計測

遠藤 隆史・安野 嘉晃・巻田 修一・青木 剛毅・伊藤 雅英・谷田貝豊彦

筑波大学物理工学系 〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

Profilometry with a Line-Field Fourier-Domain Interferometry

Takashi ENDO, Yoshiaki YASUNO, Shuichi MAKITA, Gouki AOKI, Masahide ITOH
and Toyohiko YATAGAI

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba 305-8573

A line-field Fourier-domain interferometry is proposed, which is capable of fast three-dimensional (3-D) measurement. This system is constructed from the combination of a conventional Fourier-domain interferometer and a 1-D imaging system. Since this system directs a line-shaped focus onto the specimen, a 1-D sectional profile is obtained without any mechanical scan. This means that the 1-D sectional shape is calculated from a one-shot CCD image. Experimental results of measurements of an aspherical mirror and a Japanese coin are presented as examples.

Key words: Fourier-domain interferometry, white light, profilometry, line-field

1. はじめに

工業のさまざまな場面において物体の形状を計測する機会は数多く存在し、非接触かつ高分解能な計測方法として、光の干渉を利用した計測方法の研究が行われてきた。その中でも、現在では白色干渉計測が盛んに応用されている^{1,2)}。

白色干渉計では広帯域な光源、つまり低コヒーレンス光源が使用される。一般的にその光学系はマイケルソン干渉計からなり、計測試料によって反射された物体光と、ミラーによって反射された参照光により干渉縞が形成される。低コヒーレンス光源を使用しているため、この干渉縞は参照光と物体光の光路長差が等しい付近でのみ現れる。したがって、干渉縞が現れる位置を測定することで計測試料の高さの絶対長が計測でき、単色光源を使用する干渉計とは異なり高さの不確定性が存在しないため広範囲の計測が可能になる。

このような「非接触」、「高分解能」、「広範囲計測」などの特徴は三次元形状計測の現場において常に要求されるものであり、白色干渉計が有用な計測方法であるといえる。しかしながら、現在、白色干渉計には「高速計測」というさらなる要求が存在している。現在の白色干渉計は十分な

高速化が実現されていない。その計測時間増加の主な原因は機械的な走査である。白色干渉計では、光路長差が等しく干渉縞が現れる位置を探すための機械的な走査が必要不可欠であり、さらにこの走査は原理的に2つの制限を受ける。第1に、その走査距離である。この走査距離は計測範囲に依存し、より広範囲の計測を行おうとすると、より長い距離の走査が必要となる。第2に、そのサンプリング間隔である。通常、白色干渉計では、光源の中心波長に依存した高周波成分(キャリア)と光源の波長幅に依存した包絡線(エンベロープ)の掛算によって表される信号が得られ、そのエンベロープの中心が計測試料の高さを示す。つまり、キャリアとエンベロープからなる信号からエンベロープを抽出するという過程が必要となる。この過程においてエンベロープを正確に抽出するためには、基本的にキャリアのナイキスト周波数以上の高周波数のサンプリングを行わなければならない。一般的にそれは数百nm程度のサンプリング間隔となる。これらの制限を満たす走査幅とサンプリング間隔で機械的な走査を行うと、非常に多くのサンプル数が必要となり、結果的に白色干渉計の計測時間を増加させてしまう。現在までの研究において、高速な走査機構^{3,4)}やナイキスト周波数以下のサンプリングから

E-mail: endo@optlab2.bk.tsukuba.ac.jp

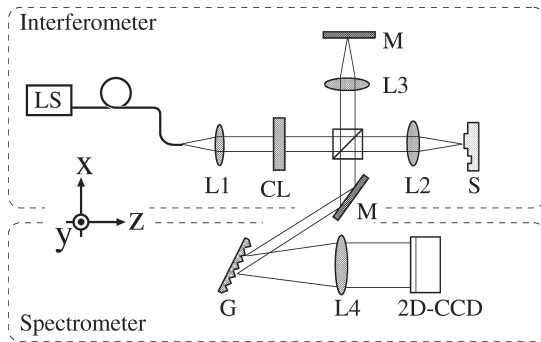


Fig. 1 Optical scheme of line-field Fourier-domain interferometer. Here LS denotes a light source. L2, L3, L4 are spherical lenses whose focal lengths are 100 mm, 100 mm, 150 mm. CL denotes a cylindrical lens whose focal length is 100 mm. S denotes a specimen. M denotes a mirror. G denotes a grating of 1200 lp/mm.

エンベロープを抽出するアルゴリズム⁵⁾が研究され、白色干渉計測の高速化が徐々に実現されつつあるが、それぞれ高価な機材や複雑なアルゴリズムが必要になってしまう。

筆者らは、この問題点を解決するため、光をスペクトル領域で干渉させるフーリエドメイン干渉計を応用した形状計測システムを研究してきた。後に詳しく述べるが、スペクトル領域で光を干渉させることにより、計測試料の高さを機械的走査なしで得ることができる。このフーリエドメイン干渉計と結像光学系を組み合わせ、機械的走査なしで計測試料1ラインの形状を計測できるシステム⁶⁾を、時空間光情報処理の応用として筆者らは研究を行ってきた。これまでのシステムでは1枚レンズで一次元結像系を構築していたのに対し、今回提案するシステムでは、干渉計手前で1枚シリンドリカルレンズを使用することで、2枚レンズによる一次元結像光学系を構築している。これにより、より高い分解能が達成された。

2. 線集光型フーリエドメイン干渉計の基本原則

2.1 光学系

線集光型フーリエドメイン干渉システムの一般的な光学系図を Fig. 1 に示す。マイケルソン干渉計からなる干渉計部分と、回折格子、レンズ、二次元 CCD カメラから構築されるスペクトロメータ部分の2つから構成されている。このことは従来のフーリエドメイン干渉計、もしくはスペクトル干渉計⁷⁾やフーリエドメイン光コヒーレンストモグラフィ (Fourier-domain optical coherence tomography: FD-OCT)⁸⁾ とよばれるものと同じであるが、BS と L1 の間にシリンドリカルレンズが挿入されている点と、二次元 CCD カメラを使用している点のみが異なる。シリンドリカルレンズは、その前焦点位置と L2, L3 の後ろ焦

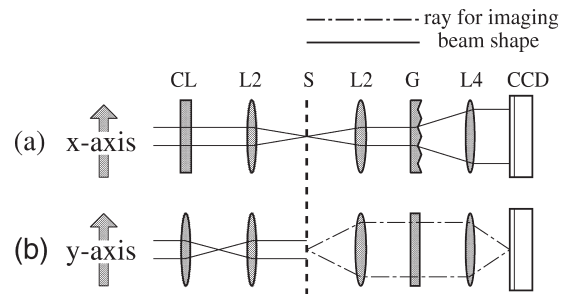


Fig. 2 Perspectives of optical setup on x - z plane (a) and y - z plane (b).

点位置が一致する場所に挿入されている。なお、Fig. 1 で示すように、今後の説明で光の伝播方向を z 軸、 z 軸に対して垂直で紙面に平行な軸を x 軸、 z 軸と紙面に対して垂直な軸を y 軸と定義する。本システムでは、この座標系における x - z 平面と y - z 平面について異なる光学系が構築されている。 x - z 平面と y - z 平面それぞれの光学系を模式的に表したものを Fig. 2 に示す。Fig. 2 は物体光が影響を受ける光学素子を順番に並べた模式的な図になっており、そのため計測試料の左右に位置する L2 は同一のものである。

2.2 高さ計測の原理

本システムにおいて、計測試料 z 方向の位置つまり高さは、 x - z 平面に構築されているフーリエドメイン干渉計によって実現される。挿入されているシリンドリカルレンズの曲面が y - z 平面上に挿入されているため、Fig. 2 (a) のように x - z 平面ではシリンドリカルレンズの影響は受けず、 x - z 平面における本システムの光学系は通常のフーリエドメイン干渉計として扱うことができる。コリメートされた光は L2 により計測試料表面の1点に集光される。そこで後方散乱された光はもう一度 L2 を通り平行光となる。その後、スペクトロメータ部分に入り、その中の回折格子に入射される。回折格子では、光の各波長ごとに異なる角度に回折される。次にレンズで CCD 検出面上に集光されるが、波長によって異なる角度でレンズに入射するため、各波長によって異なる位置に集光される。つまり、CCD 検出面の x 軸は波長を表していることになる。さらに、CCD カメラは強度検出素子であるため、CCD カメラからはパワースペクトルが得られることになる。ここで入射される光は参照光と物体光2つからなる光であるため、参照光と物体光が各波長ごとに干渉させられたスペクトル干渉縞が検出される。

このようにして得られた横軸が波長である干渉縞に軸変換を施し、横軸が周波数である干渉縞に変換しなければならない。なぜならば、この後、このスペクトル干渉縞を時

間領域へ変換するためフーリエ変換を用いるからである。フーリエ変換は時間領域と周波数領域とを結ぶ変換であり、この軸誤差がフーリエ変換後の信号の幅を広げてしまう。信号のエネルギー自体は変化ないので、信号のピーク値は低下する。この幅が広がることとピーク値が低下することは、本システムにおいてそれぞれ z 軸の分解能の低下と S/N 比の低下を意味する⁹⁾。この問題を解決するため、筆者らは波長軸から周波数軸への変換を行った。等周波数間隔でサンプリングするための位置は計算により容易に求めることができるが、当然計算後のサンプリング位置は等間隔には存在せず、通常それぞれの画素が等間隔に並んでいる CCD カメラでは計測するのは不可能である。したがって筆者らは、画素間の値をゼロ重点を用いた補間を使用することで求め、等周波数間隔にサンプリングされた干渉縞を得た¹⁰⁾。

このようにして得られるスペクトル干渉縞は式 (1) のように表される。

$$\hat{I}(\omega) = |\hat{E}_r(\omega)|^2 + |\hat{E}_p(\omega)|^2 + \hat{E}_r^*(\omega)\hat{E}_p(\omega) + \hat{E}_r(\omega)\hat{E}_p^*(\omega) \quad (1)$$

ここで、 \hat{E} は E のフーリエ変換、 E_r は参照光、 E_p は物体光、 E^* は E の複素共役を表す。この信号をコンピュータに取り込み、フーリエ変換する。すると、式 (1) は次の式 (2) のように表される。

$$I(t) = \Gamma[E_r(t)] + \Gamma[E_p(t)] + \Gamma[E_r^*(t), E_p(t)] + \Gamma[E_r(t), E_p^*(t)] \quad (2)$$

ここで、 $\Gamma[\]$ は自己相関を、 $\Gamma[\ , \]$ は相互相関を表す。次に、この干渉縞から計測試料の高さを検出する方法について述べる。このスペクトル干渉縞を構築している参照光と物体光には、マイケルソン干渉計のそれぞれのアームの光路長差に応じた時間遅延 τ が生じている。つまり、光路長差に依存しているということは計測試料の z 軸方向の位置、すなわち高さに依存しているのである。ここで、物体アームにおいて、参照光と光路長が等しくなる位置から計測試料表面までの距離を h とすると、時間的遅延 τ は $2h/c$ と表される。ここで c は光速である。よって、式 (2) は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} I(t) &= \Gamma[E_r(t)] + \Gamma\left[E_p\left(t - \frac{2h}{c}\right)\right] \\ &\quad + \Gamma\left[E_r^*(t), E_p\left(t - \frac{2h}{c}\right)\right] + \Gamma\left[E_r^*\left(t + \frac{2h}{c}\right), E_p(t)\right] \\ &= \Gamma[E_r(t)] + \Gamma\left[E_p\left(t - \frac{2h}{c}\right)\right] \\ &\quad + \Gamma[E_r^*(t)] \otimes \delta\left(t - \frac{2h}{c}\right) + \Gamma[E_r^*(t)] \otimes \delta\left(t + \frac{2h}{c}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 \otimes はコンボリューションを表す。この際、物体光と参照光を同じスペクトルであるとして取り扱い、計測試料表面による散乱・反射・吸収によるスペクトル形状の変化は考慮していない。しかし、実際の計測においてもほとんどの場合、これらの影響は無視できるほど小さいため、分解能の低下などにはつながらない。式 (3) において、第 1 項と第 2 項はそれぞれ参照光と物体光の自己相関関数を表し、フーリエ変換後のデータの中心に重なって現れる。第 3 項と第 4 項のデルタ関数は、計測試料 z 方向の位置に依存した距離だけ中心からずれており、原理的に計測試料の z 方向の反射率の空間分布を表している。つまり、デルタ関数の位置が計測試料表面の高さを表していて、このデルタ関数が参照光の自己相関関数を点応答関数とするピークとして表されている。よって、この第 3 項もしくは第 4 項のピーク的位置を検出することで、計測試料の高さが計測される。このピーク的位置の検出はピークの半値全幅以上の部分の重心を計算し、その位置をピーク的位置、つまり計測試料の高さとした。

2.3 計測試料 1 ラインの形状計測への拡張

以上が計測試料の高さを得る原理であり、計測試料 1 ラインの形状計測や三次元形状計測を行うには、この原理を拡張する必要がある。筆者らは、この原理を拡張した 1 ラインの形状計測を、機械的走査を用いずに結像光学系を構築することにより実現した。その結像光学系は $y-z$ 平面に構築されており、Fig. 2 (b) のようになる。CL, L2 により光源から出た光は計測試料に均一照射される。 $x-z$ 平面も含めて考えると、計測試料表面では y 軸方向に沿った線状に光は集光される。さらに、 $y-z$ 平面においては、L2 と L4 によって計測試料面と CCD 検出面において結像関係が保たれている。L2 と L4 の間に回折格子が挿入してあるが、回折格子は一次元回折格子を用い、その溝の軸が y 軸方向に置かれているため $y-z$ 平面には影響を及ぼさない。これにより、計測試料の y 軸方向の位置の情報が CCD の y 軸より得られる。つまり、CCD カメラ x 軸にはフーリエドメイン干渉計により計測試料の z 方向の位置の情報を含んだスペクトル干渉縞が広がり、 y 軸には結像光学系により計測試料の y 方向の位置が現れることになり、機械的走査なしで計測試料 y 軸方向 1 ラインの形状が計測できる。

2.4 三次元形状計測への拡張

これまで説明してきた線集光型フーリエドメイン干渉システムの原理を用い三次元形状計測を行うためには、Fig. 1 のような光学系に付加的な機械的走査が必要となる。この 1 軸走査により計測試料 x 方向の位置が計測され、三次

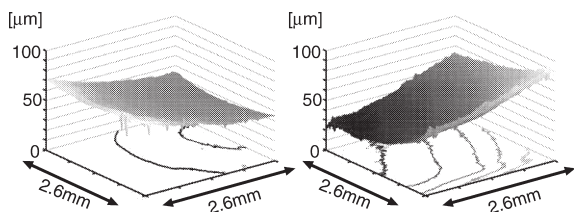


Fig. 3 Three-dimensional profiles of an aspherical mirror. Contour lines are at each 10 nm interval.

元形状が求まる。三次元形状計測において1軸の機械的走査が必要となる点は従来の白色干渉計と同様であるが、線集光型フーリエドメイン干渉システムで必要となる機械的走査は一切の原理的な制限を受けない。このため、線集光型フーリエドメイン干渉システムは、従来の白色干渉計に比べより容易に高速な機械的走査が実現可能なシステムであるといえる。

3. 試作機による三次元形状計測

実際に線集光型フーリエドメイン干渉計を構築し、三次元形状計測を行った。光源には中心波長 856 nm、波長幅 (FWHM) 24 nm のスーパーluminescentダイオード (super-luminescent diode: SLD) を使用し、CCD カメラは NTSC 規格で速度が 30 frame/s のものを使用した。今回三次元計測を行うために、付加的な機械的走査を、ステッピングモーターを用いて計測試料を x 軸方向に動かすことにより行った。

まず、実際の三次元計測として、筆者らは非球面ミラーの計測を行った。その計測結果を Fig. 3 に示す。左右それぞれ光軸に対する傾斜が大きい部分と小さい部分の計測結果であり、等高線は $10 \mu\text{m}$ 間隔である。次に、散乱体である日本の 10 円硬貨の計測を行った。その計測結果を Fig. 4 に示す。硬貨裏面の年号の「平成十年」という文字の成の部分であり、正確に三次元形状が計測できていることが確認できる。Fig. 4 の下に示すような二次元形状が、1 枚の CCD 画像から得られる計測結果である。

今回構築した線集光型フーリエドメイン干渉システムの理論的分解能などは、次のように決定される。まず、 x 軸の分解能であるが、レーザー顕微鏡と同様に、光源の中心波長、ビーム径、計測試料直前のレンズの焦点距離に依存して決定され、今回筆者らが構築したシステムでは $16.1 \mu\text{m}$ であった。 y 軸方向の分解能は従来の光学顕微鏡と同じように、結像関係を構築しているレンズの開口数と光源の中心波長により計算され、本システムでは $3.4 \mu\text{m}$ と計算される。しかし、今回 CCD カメラ y 軸方向の画素間隔がそれよりも大きく $13.5 \mu\text{m}$ であり、その制限を受けるため、

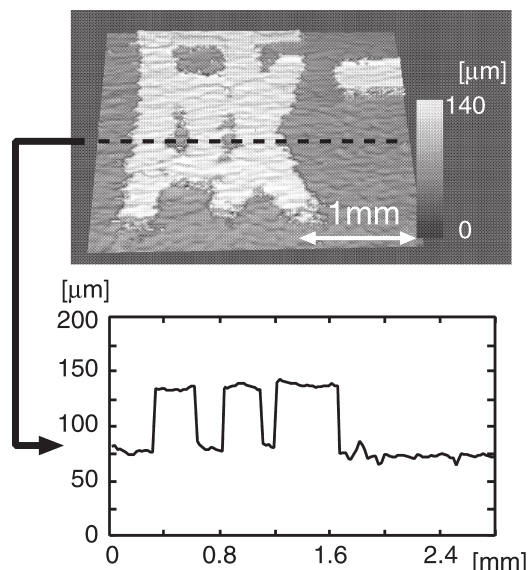


Fig. 4 Three-dimensional profile of a Japanese 10-yen coin and its sectional profile.

本システムの y 軸方向の分解能は $13.5 \mu\text{m}$ となる。 z 方向の分解能は通常の白色干渉計と同様に光源の中心波長、その波長幅によって決定され、筆者らのシステムでは $9.0 \mu\text{m}$ であった。さらに、構築したシステムで z 方向の繰り返し精度を計測したところ 228 nm であった。

y 軸方向の計測可能距離はビーム径、結像倍率、CCD の検出面サイズによって決定され、本システムでは 2.6 mm であった。 z 方向の計測可能距離はスペクトロメーター部分の分解能、つまり回折格子の周波数、CCD 前のレンズの焦点距離、CCD の x 軸方向の分解能に依存し、本システムでは 0.8 mm であった。

線集光型フーリエドメイン干渉計では一切の機械的走査なしで計測試料 1 つの断面の形状計測ができるため、二次元形状計測においては CCD カメラの速度に依存し、今回構築したシステムでは、速度 $1/30 \text{ frame/s}$ の CCD を使用したため計測時間は $1/30 \text{ 秒}$ となる。三次元形状計測を行う場合、この CCD の速度のほかに、付加的な走査機構の速度に依存することになる。今回構築した走査機構ではステッピングモーターを使用しており、Fig. 3 のような $2.6 \times 2.6 \times 0.8 \text{ mm}$ の領域を $140 \times 140 \times 1024$ 点で計測するのに 30 秒 程度かかっている。しかし、これはステッピングモーターの制御によって大部分が費されており、走査方法を変更することにより改善される。具体的な改善策としては、走査方法をガルバノミラーを用いた走査に変えれば、NTSC 規格の一般的な CCD カメラでも同様の計測領域で 3 秒 程度での計測が可能になり、より高速な CCD を使用することでさらなる高速化も実現できる。

4. ま と め

今回筆者らは、 x - z 平面にフーリエドメイン干渉計、 y - z 平面に結像システムの構造をあわせもつ線集光型フーリエドメイン干渉計を提案した。本システムでは、機械的走査なしで二次元形状計測が可能であり、三次元形状計測の際でも機械的走査は原理的な制限を受けず、システムの高速度に適している。実際に構築したシステムでは、 y 軸方向の高い分解能を実現するため2枚レンズの結像光学系を採り入れ、以前のシステムより高い分解能が得られた。実際のシステムの性能として、繰り返し精度 228 nm 程度であり、鏡面である非球面ミラーと散乱面である日本の 10 円硬貨の形状を計測することに成功した。Fig. 4 の下の結果のような1つの断面の計測は1/30秒で計測できており、本システムの高速度計測の能力を示している。現時点では、 $2.6 \times 2.6 \times 0.8$ mm の領域を $140 \times 140 \times 1024$ 点で計測するのに30秒程度かかってしまっているが、原理的な限界ではなく走査方法の変更により容易に改善される。

文 献

- 1) B. S. Lee and T. C. Strand: "Profilometry with a coherence scanning microscope," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 3784-3788.
- 2) T. Dresel, G. Häusler and H. Venzke: "Three-dimensional

- sensing of rough surfaces by coherence radar," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 919-925.
- 3) G. J. Tearney, B. E. Bouma, S. A. Boppart, B. Golubovic, E. A. Swanson and J. G. Fujimoto: "Rapid acquisition of in vivo biological images by use of optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1408-1410.
- 4) G. J. Tearney, B. E. Bouma and J. G. Fujimoto: "High-speed phase- and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1811-1813.
- 5) P. de Groot and L. Deck: "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white light interferograms," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1462-1464.
- 6) Y. Yasuno, M. Nakama, Y. Sutoh, M. Mori and T. Yatagai: "Optical coherence tomography by spectral interferometric joint transform correlator," *Opt. Commun.*, **186** (2000) 51-56.
- 7) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (Pergamon Press, New York, 1980) pp. 1-265.
- 8) G. Häusler and M. W. Lindner: "Coherence Radar" and "Spectral Radar" —New tools for dermatological diagnosis," *J. Biomed. Opt.*, **3** (1998) 21-31.
- 9) M. Wojtkowski, R. Leitgeb, A. Kowalczyk, T. Bajraszewski and F. Fercher: "In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography," *J. Biomed. Opt.*, **7** (2002) 457-463.
- 10) C. Dorrer, N. Belabas, J. Likforman and M. Joffre: "Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry," *J. Opt. Soc. Am. B*, **17** (2000) 1795-1802.