

# 非球面計測の進歩を可能にする可変光学ヌル部品

アンドリュー・クラウイーク

可変光学ヌル部品を用いて非点収差とコマ収差を除去する非球面ステッチング干渉計は、近似球面から1000波までのずれをもつ非球面を測定できる。

光学系に非球面を使うことの利点はよく知られており、実績もある。非球面は防衛用の赤外撮像などのさまざまな用途に使われ、その作製はシングルポイントダイヤモンド旋削の進歩によって可能になっている。非球面は携帯電話やデジタルカメラなどの量産用途にも応用され、そこでは成形技術が発達し、十分な品質の光学系が生産されている。

しかしながら、高精密撮像システムへの非球面の応用は、フレキシブルな全開口計測技術が存在しなかったこともあり、広範な利用は進んで来なかつた(これは先端メーカーがしばしば口にする「測定できないものは作れない」と

いうことの一つの例である)。とくに、中間領域の空間周波数の影響が認識されるようになったことに加え、全体の形状誤差の公差(仕様)も厳しくなってきたことによって、高解像度な全開口計測技術の必要性が認識されるようになった<sup>(1)</sup>。さらに正確な全開口計測技術は、磁性流体表面加工(MRF)やその他の決定論的表面加工においても必要になることが多い。

## 従来の測定法

従来の非球面計測は触針形状測定法またはヌル干渉測定法を用いて行われてきた。両者はいずれも、利点と欠点

を有する。触針形状測定法は汎用性が高く、コスト効果を期待できるが、測定精度に限界があり、全開口の高解像測定には適用できない。ヌル干渉測定法は全表面を測定できるが(干渉計に対応する光学系の寸法に依存する)、汎用性とコスト効果が不十分で、非常に特殊な非球面の測定には専用装置やヌルレンズが必要になる。

最近はサブナイキストや帶状合成干渉測定法などの非ヌル系の干渉測定技術が進歩し、代替法として登場したが、これらの技術はいずれも、測定できる光学系のサイズと非球面のずれに限界がある<sup>(2), (3)</sup>。中間領域の空間周波数を測定する能力は撮像光学系の画質と干渉計のカメラ画素の制約を受ける。

サブ開口ステッチング干渉測定法は、

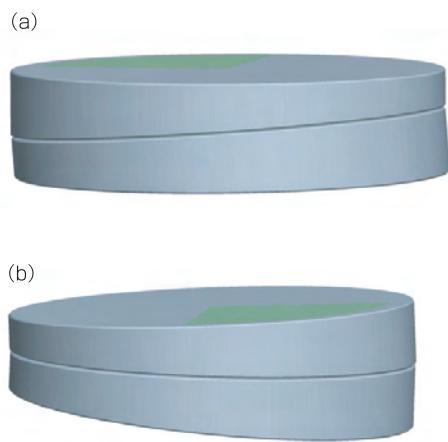
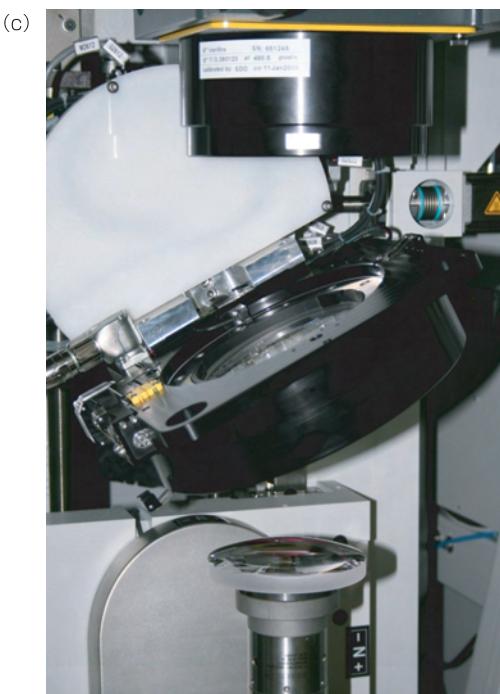


図1 二つの対向回転する光学くさび(aとb)がVON組立部品の心臓部になる。二つのくさびは相対位置を変更できる。それぞれは一体となって傾斜し、さまざまな量の非点収差とコマ収差を生成する。(資料提供:QEDテクノロジーズ社)



高性能なレーザーモジュールから  
LEDモジュールまで...

多彩な商品群をラインアップ!!

CW・変調・高出力・  
マルチライン・狭帯域・高消光比・  
レーザーエンジン

- 紫外 (375nm)
- 可視 (405nm~685nm)
- 赤外 (785nm~1060nm)

#### PhoxX小型高性能OEMレーザー

##### 【特徴】

- 特に小型の多機能搭載型OEMレーザーで、4つの基本動作モードを搭載
- 波長: 375nm~830nm
- 出力: 20mW~140mW
- 動作モード: CW・アナログ・デジタル・ミック



#### DPSS FKL & FKAシリーズ

##### 【特徴】

- 高出力 (~10W) の532nmグリーンレーザー
- 高安定性能を誇る温度安定化およびディスクレーザー共振器構造
- 空冷
- アナログ・デジタル・変調機能搭載



#### SOLEレーザーエンジン

- 最大6波長搭載・20波長から選択



#### 高出力LEDモジュール

- 225nm~950nm/5600K, 深紫外~白色



##### 【用途】

- ・バイオサイエンス ・可視化
- ・光ディスクマスタリング ・レーザー直描
- ・計測 ・実験研究 ・OEM

<http://www.japanlaser.jp/>

E-mail: lase@japanlaser.jp

株式会社日本レーザー

本社

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1

TEL: 03-5285-0863 (直)

大阪支店 TEL: 06-6323-7286

名古屋支店 TEL: 052-205-9711

従来の干渉測定法の能力を拡大するために開発されたが、より大きな直径と開口数を全半球まで測定できる利点があり、横方向の分解能と精度が大幅に改善される<sup>(4)</sup>。非球面の測定にも拡張されたステッピング、つまり縫い合わせる手法では、拡大された非ヌル干渉縞パターンの測定と球面への局所的近似が行われる<sup>(5)</sup>。しかしながら、このアプローチは非球面が鋭くなると、測定する干渉縞の密度が限りなく増加するため、その使用は中間的な非球面(近似球面からのずれが200波以内)の測定に限られている。このような干渉縞の密度の増加は、干渉計の球面の波面とサブ開口内部の非球面からの球面でない波面との不整合から生じる。

#### 可変光学ヌル部品

米QEDテクノロジーズ社(QED Technologies)は、サブ開口ステッピング干渉測定法の利点を維持しながら非球面ずれの測定能力を顕著に増強することを目的にして、可変光学ヌル部品(VON)を

の概念を導入した干渉測定法を開発した<sup>(6)</sup>。オプトメカニカル部品から構成されるVONは、通常の干渉計から発生する球面の波面を利用し、この波面に収差を加えて、測定するサブ開口内部の非球面の局所形状とほぼ整合する波面を生成する。非球面の形状とほぼ整合した波面を生成することで、干渉縞の密度は顕著に低下する。その結果、完全ヌルの干渉縞パターンの発生が不要になり、干渉計はサブ開口の全面を解像できる干渉縞パターンの生成だけが必要になる。

回転対称性の非球面の場合、軸外によるサブ開口内部の非球面計測では非点収差とコマ収差が支配的になる。したがって、非球面の場所が異なると、両者の収差の大きさも異なるため、理想的なVONは両者の制御可能な大きさの収差を発生する必要がある。VONは比較的簡単な光学系とその動きを利用して構成されるが、それはモデルに基づく波面の発生が必要になるためである。収差の基礎理論から分かるように、球面の波面のなかに光学くさびを入れ

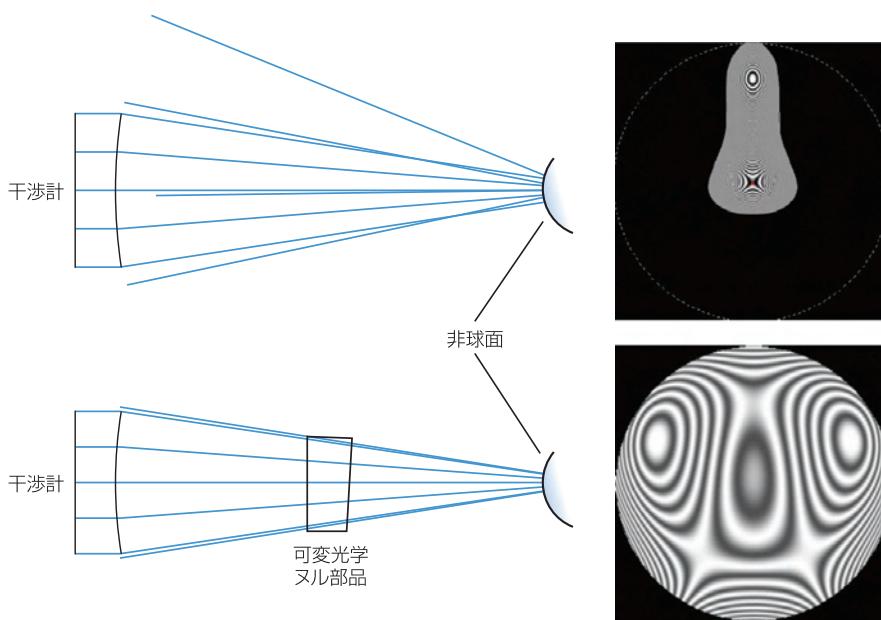


図2 VONの有無に対応した光線追跡図とそれぞれの干渉縞パターンを示している。VONがある場合の干渉縞は劇的に減少することが分かる。VONがないと、非球面から反射された光線のかなりの部分が干渉計に戻らないことにも注意して欲しい。(資料提供: QEDテクノロジーズ社)

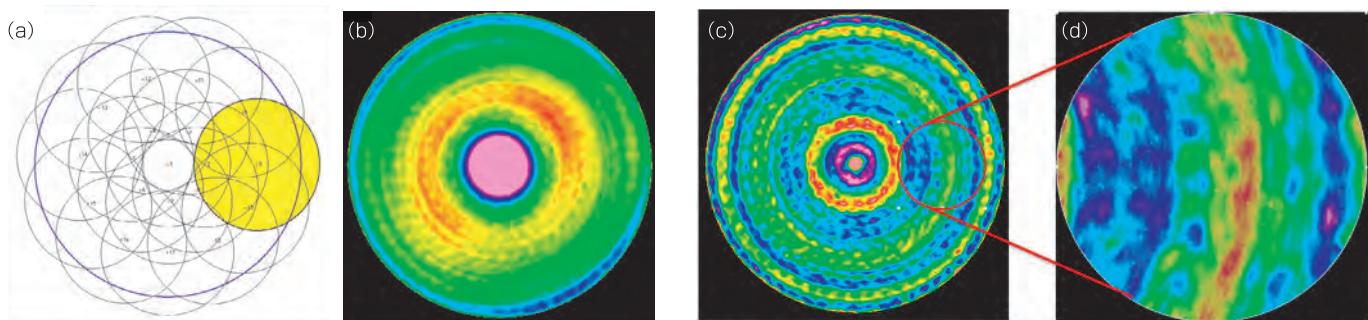


図3 VON部品を組入れたASIを使用して非球面の高解像測定が行われた。サブ開口のパターンがステッチングされて全開口の測定が完成する(a)はサブ開口の一つを黄色で強調している。(b)の全開口測定は非球面の目標形状からのずれを示している。(c)はゼルニケ多項式の低次の項を除去した全開口測定を示し、(d)は(c)の一部を拡大して、より高い空間周波数領域の非球面構造を示している。

ると、光ビームにはくさびの大きさと傾きに対応した非点収差とコマ収差が導入される。両方の収差の発生にはリズリー(Risley)のプリズム対として知られる光学部品が最も適している(図1)。それぞれのプリズムに個別の回転を与える、全体を光ビームのなかで傾斜させると、さまざまな大きさの非点収差とコマ収差が発生する。

VONの基本原理はVONの有無に対応した光線追跡の図に基づいて容易に理解できる(図2)。いずれの場合も球面の波面は干渉計から発生する。VONのない干渉計は、球面の波面と非球面の波面との不整合によって、非常に高密度の干渉縞パターンが形成される(干渉縞は光線追跡図の右側に示している)。VONを配置した干渉計は、最適化した光学くさびを傾けると、収差をもつ波面と非球面の形状とが十分に整合され、サブ開口の全面の干渉縞は解像可能な状態になる。その結果、干渉計の干渉縞パターンは容易に測定できる密度になり、VONから発生する波面モデルを組合せることで、非球面(すべての形状誤差を含む)の精密形状の決定が可能になる。

## 1000波までの偏差測定

われわれはサブ開口ステッチング干渉測定とVON部品の組合せを用いる干

渉計を開発した<sup>(7)</sup>。この非球面ステッチング干渉計(ASI)は、多軸運動制御プラットホーム上に業界標準の6インチフィズー干渉計、最新の制御ソフトウェアおよびステッチアルゴリズムを組合せている。ASIは200mm以上(多くの場合は300mmまで)の直径と1.0(全半球)までの開口数をもつ凹状と凸状の球面の非球面および平面を正確に測定できる。ASIは近似球面からのずれが1000波以内のさまざまな非球面を測定できる。

一つの例では、測定された非球面の近似球面からのずれは約60μmになる(図3)。図3aは測定に使用した格子構造(サブ開口パターン)を示している。6インチ、f/2.2の透明の非球面を使用

する場合、十分な重なりをもって全体を測定するためには、20のサブ開口が必要になる。それぞれのサブ開口内部では干渉計の全体分解能(1000×1000画素)が確保される。そのため、ステッチングを用いると、各方向が数千ピクセルで構成された、非常に高解像度な出力マップを得ることができる。この場合の全開口マップは約300万のデータ点から構成される。ゼルニケ多項式の低次の項を当てはめ、測定から除外することによって、表面の精密構造の可視化が可能になった。このデータを拡大した部分は、ASIの高解像能力ばかりでなく、表面の中間領域の空間周波数成分が得られることも明瞭に示している。

## 参考文献

- (1) D. Aikens et al., "Specification and Control of Mid-Spatial Frequency Wavefront Errors in Optical Systems," OSA/FiO/LS/META/OF&T 2008.
- (2) J.E. Greivenkamp, Appl. Opt. 26, 24, p. 5245 (Dec. 15, 1987).
- (3) M.F. Kuechel, "Absolute Measurement of Rotationally Symmetrical Aspheric Surfaces," in Optical Fabrication and Testing 2006(OSA), OTFuB5.
- (4) P. Dumas et al., "Extending the range of interferometry through subaperture stitching," Optifab 2003, Tech. Dig. SPIE, Vol. TD02(2003).
- (5) P. Murphy et al., "Accurate interferometric measurements of mild aspheres without null correction," Optifab 2007: Technical Digest of SPIE, TD04, TD040N, (2007) 0277-786X/07/\$15 doi: 10.1117/12.719484, Proc. SPIE, Vol. TD04 TD040N-1.
- (6) A. Kulawiec et al., "Subaperture-stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating configurable null optics," Optifab 2009, TD06-44.
- (7) U.S. and International Patents pending.

## 注記

MRFとASIはQEDテクノロジーズ社の登録商標。VONは同社の商標。

## 著者紹介

アンドリュー・クラウイーク(Andrew Kulawiec)はQEDテクノロジーズ社の社長。  
e-mail: kulawiec@qedmrf.com