

液晶空間光変調素子を利用した補償光学技術

白井智宏

Adaptive Optics with a Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Tomohiro SHIRAI

The concept of adaptive optics was originally proposed to compensate for blurring of astronomical images in real-time. However, its use has increasingly expanded beyond astronomy and become important especially in medicine and industry. Most adaptive optics systems currently utilize deformable mirrors as wavefront correctors, and they have some drawbacks of, e.g., great expense, high complexity, high power consumption, and needs for massive calculation in operation. To overcome all these problems, we have proposed a novel adaptive optics system based on feedback interferometry using a liquid-crystal spatial light modulator. In this paper, we review some basic features of this adaptive optics system and show how this system works in a medical application. Trends in adaptive optics for medicine and industry are also discussed.

Key words: adaptive optics, liquid-crystal spatial phase modulator, feedback interferometry, retinal imaging, real-time image restoration

最近では、波面制御と聞いて補償光学を連想する光学研究者は少なくないであろう。補償光学とは光波の歪みを実時間で計測し補正する技術であり、その概念は大気のゆらぎによってぼやけた天体像を実時間で改善することを目的として提案された。その提案から半世紀が過ぎ、その後の技術的進展にも恵まれ、今ではこの技術は地上の大型天体望遠鏡には欠かせない必須アイテムのひとつとして広く認識されている¹⁾。

一方、最近の新しい展開として、この技術を医療や工業など天文学以外の分野に応用する研究開発が盛んに進められている^{2,3)}。そのきっかけともいえる眼底イメージング機器への応用では、眼球光学系の歪みの影響を効果的に除去することにより、これまでになく鮮明な網膜像を生きたまま観察することに成功し大きなインパクトを与えてきた^{4,5)}。

補償光学技術を具現化する方法はこれまでに数多く提案されているが、最近、特に医療や工業分野への応用を目的として、液晶空間光変調素子を利用する方法が注目を集

めている。本稿では、補償光学の原理とそれを医療や工業分野に応用する際に求められる基本的性能について簡単に述べた後、筆者らが研究開発してきた液晶空間光変調素子を用いたフィードバック干渉法に基づく補償光学システムの原理とその応用例について概説する。あわせて関連する国内外の研究開発動向を紹介する。

1. 医療・工業分野への応用に適した補償光学システムとは

一般的な補償光学システムは、図1に示すように光波の歪みを計測する波面センサー、その歪みを補正する可変形鏡、波面センサーからの情報に基づき可変形鏡を制御するための信号を作り出す制御装置によって構成される⁶⁾。その動作は、概念的には単純であり、入射波面の歪みを波面センサーで計測し、その歪みを打ち消すべく可変形鏡の形状をすばやく制御することにより、歪んだ入射波面をフラットな波面に補正する。その結果、この補償光学システムを通して天体を観測すると、大気ゆらぎの影響を受けない

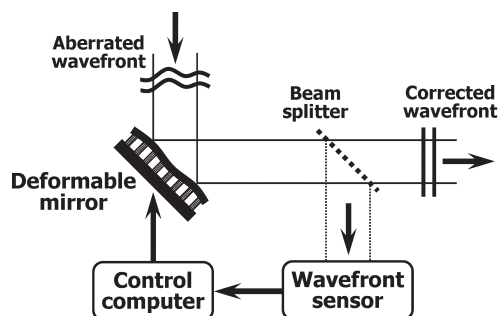


図1 補償光学システム概念。Wavefront sensor：波面センサー，deformable mirror：可変形鏡，control computer：制御装置。

鮮明な天体像を実時間で観測することが可能となる。ここで可変形鏡とは、例えば、薄く柔軟性のある鏡の背面にアクチュエーターが多数取り付けられ、電気的な制御信号に基づいて鏡面形状を変化させることのできる反射鏡である。波面センサーの種類は豊富にあるが、補償光学を目的とする場合には、一般にシャック・ハルトマンセンサーか波面曲率センサーが利用される。

このような補償光学システムでは、可変形鏡がシステム全体の性能や価格を左右する重要な鍵となる。一般に可変形鏡は、一昔前に比べるとその価格はかなり低下したものの、それでもまだ高価であり、アクチュエーター1素子あたり10数万円にも及ぶ。波面歪みの補正をより高精度に行うためには多数のアクチュエーターが必要となるため、システムの高性能化を図るほど高価になる。例えば、眼底イメージング機器に可変形鏡を導入する場合には、基本的な性能を得るために少なくとも100個程度のアクチュエーターが必要であるといわれる。

一方、可変形鏡は、その構造上、大規模な構成となりかつ消費電力も大きいため、これを有効に活用できる分野は限られてしまう。また、大気のゆらぎを補正するためには複雑な演算を毎秒数百回以上のペースで繰り返し行う必要があるため、制御装置に要求される性能も高い。

このような従来型の可変形鏡を利用した補償光学システムは、大型の天体望遠鏡（天文台）には問題なく設置され、そのすぐれた効果を発揮している。しかし、これまでに述べた「高価」「大規模な装置構成」「消費電力が大きい」「高性能の演算装置が必要」等の特徴は、このシステムを天文学以外の分野で利用する際の障害となってしまう。

医療や工業分野で使用されるイメージング機器は、大型の天体望遠鏡に比べて桁違いに低価格であるため*1、そこ

に設置される補償光学システムもそれらの機器に見合う程度の価格であることが期待される。さらに、設置場所や運用形態を考えると、これらの分野で使用される補償光学システムは小型で低消費電力であることが望ましい。

このような補償光学システムを実現する方法のひとつとして、従来型の可変形鏡に代わり液晶空間光変調素子を利用する方法が有望視されてきた⁷⁾。液晶素子は、小型、安価、低消費電力であることに加え、可変形鏡のアクチュエーター数に対応する画素数を多くとることができるため、波面補正能力が格段に向上することが期待される。ただし、液晶素子の本質的な特徴として、応答速度が遅く、大気ゆらぎのような素早い動きに追従した波面補正ができない欠点がある。しかし、特に、医療分野への応用を考えると、多くの場合、補正対象となるゆらぎの速度は比較的遅いことから、これは致命的な問題とはならない。

2. フィードバック干渉法の基礎

液晶空間光変調素子を利用した補償光学システムにも、使用する液晶素子や動作原理に応じてさまざまな種類がある。以下では、医療や工業分野への応用を目指して筆者らが研究開発を進めてきた、フィードバック干渉法に基づく補償光学システムについて議論する⁸⁻¹²⁾。

ここで取り扱うフィードバック干渉法とは、任意の二光波干渉計の一方の腕に光アドレス型の液晶空間位相変調素子を置き、干渉計の出力強度（干渉縞パターン）をその位相変調素子の駆動信号（書き込み光）としてフィードバックする手法であり¹³⁾、これまでに双安定性に基づく画像メモリ¹⁴⁾、位相差分布・表面形状を実時間で可視化する計測システム^{15,16)}、そして補償光学の原理¹⁷⁾となりうるものが示されてきた。この手法を利用した補償光学システムにはいくつかのバリエーションがあるが、原理を説明するための概念図として、実際に動作の検証実験にも使用した図2に示す光学系を考える⁸⁾。なお、通常の補償光学システムとは異なり、このシステムの動作には独立した波面センサーと制御装置を必要としない。

使用した液晶素子は、ピクセル構造のない高分解能の光アドレス型液晶空間位相変調素子である浜松ホトニクス社製のPAL-SLMである。PAL-SLMの位相変調は、液晶分子の配向方向（図では鉛直（紙面に対して垂直）方向に設定されていると仮定）に平行な偏光成分にのみ作用する。補正すべき歪んだ波面をもつ直線偏光かつ空間的にコヒーレントな入射光は、PAL-SLMの位相変調面（R面）で反

*1 参考までに、すばる望遠鏡の建設費は約400億円、標準的な眼底カメラ一式の価格は400万円程度である。

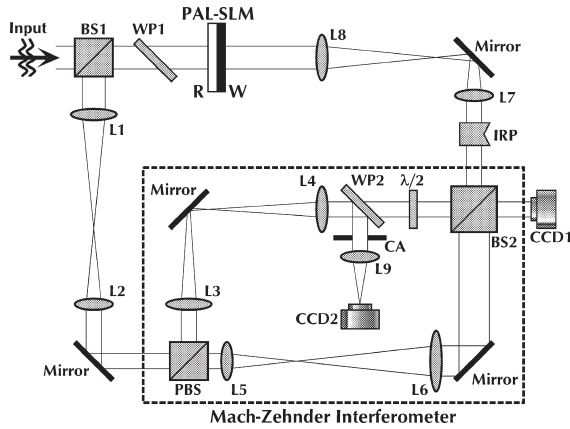


図2 フィードバック干渉法に基づく補償光学システム。

射され、マッハ・ツェンダー型の干渉計（点線枠内）へと導かれる。なお、入射光の偏光方向は水平方向と鉛直方向の間に設定しているため、鉛直偏光成分と水平偏光成分に対応する二光波が同一光路中を伝搬するものと考えることができる。この干渉計では、偏光ビームスプリッターPBSの作用により、鉛直偏光成分と水平偏光成分が分離され、前者はそのまま出力位置に結像され（ただし、半波長板 $\lambda/2$ により偏光方向が90度回転）、後者は歪んだ波面から擬似的に平面参照波を作るべく4倍に拡大され出力位置に到達する。これらの二光波によって生じる干渉縞を、像回転プリズムIRPを通して像の回転を補正しPAL-SLMの書き込み面（W面）に結像すると、PAL-SLMの偏光依存性により干渉計に導かれる二光波のうち鉛直偏光成分の位相のみが変調されフィードバック干渉法が実現される。なお、入射光の偏光方向は、観察される干渉縞の可視度が最大となるように調整する。

さて、この場合に実現される補償光学の動作を、やや厳密性には欠けるが理想化した条件のもとで数式を交えて説明しよう¹⁸⁾。フィードバックのない通常の二光波干渉計の出力強度、すなわちPAL-SLMのW面を遮光した際にカメラCCD1で観察される出力強度は

$$I_{out}(x, y) = A\{1 + V\cos[\phi_{mod}(x, y) + \phi(x, y)]\} \quad (1)$$

となる。ただし、 A 、 V 、 ϕ_{mod} 、 ϕ は、それぞれ干渉縞の平均強度、可視度、PAL-SLMの変調位相、そして入射光波の位相（PAL-SLMがない場合の、干渉計内の二光波の位相差）である。ここで単純なフィードバックとして、PAL-SLMの変調位相 ϕ_{mod} が

$$\phi_{mod}(x, y) = kGI_{out}(x, y) \quad (2)$$

で記述されるような、干渉縞の強度分布 I_{out} に比例して変化する場合を考える（ k ：正の定数、 G ：フィードバック

ループのゲイン）。このとき、式(1)と式(2)から、

$$\cos[\phi_{mod}(x, y) + \phi(x, y)] = \frac{1}{V} \left[\frac{\phi_{mod}(x, y)}{kAG} - 1 \right] \quad (3)$$

が導出される。式(3)において $G \rightarrow \infty$ かつ $V=1$ を考えると、 $\cos[\phi_{mod} + \phi] = -1$ が得られる。これは、フィードバックループのゲイン G が十分に大きい場合には、 ϕ_{mod} と ϕ の和が常に定数となること、すなわち入射光の位相 ϕ の変動を打ち消すようにPAL-SLMの位相 ϕ_{mod} が変化する（いいかえると、PAL-SLMの変調位相が入射波面に対して共役になる）ことを表している。そのため、歪んだ入射波面は反射の過程でフラットな波面に変換されることになり、補償光学システムが実現される。

以上の説明は、定常状態での動作特性を示すものであり、入射光の位相変動に伴うPAL-SLMの位相変化の動作特性についての情報は一切含まれていない。そのため、この説明のみでは、この光学系が入射光の位相変動を「実時間」で補正するシステムとして動作するかを判断することはできない。しかし、やや複雑ではあるがより厳密な理論解析を用いて、この光学系が実際に実時間で動作する補償光学システムとして機能することを示すことができる。それらの理論解析については、例えば、文献19を参照されたい。

このフィードバック干渉法に基づく補償光学システムは、従来型の可変形鏡を利用したシステムと比較すると「小型」（光学系の最適設計により、さらなるコンパクト化が可能）、「安価」（可変形鏡のような高価な装置を使用していない）、「低消費電力」（可変形鏡に代わって利用した液晶素子の消費電力はきわめて小さい）、「波面の高精度制御が可能」（ピクセル構造のない高分解能の液晶位相変調素子を使用）、「計算機による膨大な演算が不要」（フィードバック干渉法の採用により、計算機による演算が一切不要となった）等の特長をもっている。そのため本システムは、医療や工業分野への応用に適した補償光学システムのひとつとして、重要な役割を果たすものと考えられる。

3. 動作の検証実験⁸⁾

図2に示す光学系に基づき、基本動作の検証実験を行った。歪んだ波面をもつ光波は、直線偏光のHe-Neレーザーからの平面波を厚さが不均一なガラス板に照射することにより作製した。この光学系では、これが補償光学システムとして正常に動作した場合、円形開口CAに導かれる光波の歪みが補正される。円形開口の直後にはレンズL9が置かれ、その焦点面にカメラCCD2が配置されている。そのため、この光学系の動作を、CCD2で観察される回折

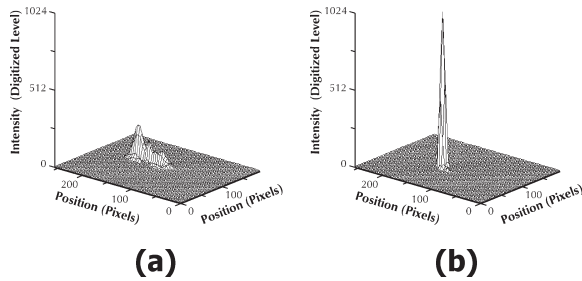


図3 円形開口による回折像、フィードバックを (a) オフにした場合と (b) オンにした場合。

像を利用して評価することができる（後述するストレーラ比に基づく評価）。その結果の一例を図3に示す。

PAL-SLMのW面を遮光しフィードバックをオフにすると、歪んだ入射波面がそのまま円形開口に到達するため、波面歪みの影響により回折像は広範囲に分布しそのピーク強度も低くなる。しかし、PAL-SLMのW面の遮光を解除しフィードバックをオンにした瞬間に、フィードバック干渉法の原理に基づき円形開口内の光波の歪みが補正され平面波に近づくので、その回折像は小さなスポットとなりピーク強度も上昇する。以上の結果から、図2に示す光学系が、補償光学システムとして正常に動作していることがわかる。

4. 応用例：眼底イメージング

一般に、ヒトの眼の角膜や水晶体には、コンタクトレンズやメガネでは補正できない複雑な歪み（高次の収差）が存在する。そのため、角膜や水晶体を通して眼球の内部を観察する各種眼底イメージング機器では、それらの歪みが擾乱となり、得られる眼底像が不鮮明となる。この眼球光学系の歪みによる光波の乱れを補償光学技術によって補正

すると、鮮明な眼底像を実時間で取得することが可能となる。本章では、フィードバック干渉法に基づく液晶補償光学システムの性能評価の一環として、このシステムを基本的な眼底イメージング光学系に適用した場合の効果について議論する。

4.1 光学系

実験に用いた光学系を図4に示す¹²⁾。図2に示すような全光学型のフィードバック干渉法では、フィードバックを行う際の位置合わせが容易ではないうえに、素子の感度の問題から微弱光では動作しない問題があった。この問題を解決するために、図4の光学系では、光アドレス型の液晶空間位相変調素子 PAL-SLM の書き込み面側にプロジェクターの光学系を配置した位相変調ユニット（浜松ホトニクス社 PPM, X8267）を導入した。また、実験に用いた人工眼は、レンズ Le（焦点距離 20 mm）、収差板 AP（厚さが不均一なガラス板）、円形開口 CA1（直径 6 mm）、平面物体 T（規格は後述）で構成され、それぞれ眼の水晶体/角膜、収差、瞳孔、網膜に対応する。この人工眼モデルは、サイズの面から散瞳された標準的なヒトの眼にほぼ一致している。

この光学系の動作は、素子の一部を共有するが、眼底イメージング光学系と補償光学システムとに分割して考える必要がある。眼底イメージング光学系は、眼底を照明するためのハロゲン光源、結像レンズ（L1, L2, L10）、眼底撮影用の CCD カメラ（CCD3）等で構成される。一方、この光学系の大部分を占める補償光学システムは、基本的にはマッハ・ツェンダー型の干渉計であり、レーザー光による干渉縞を CCD カメラ（CCD1）で撮影し、その映像信号を位相変調ユニットにフィードバックする構成となっている。

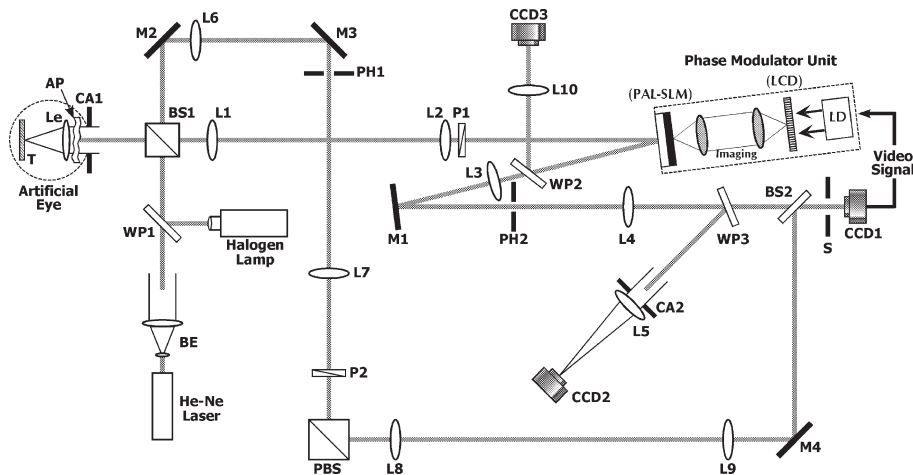


図4 フィードバック干渉法に基づく補償光学システムと眼底イメージング光学系の融合。

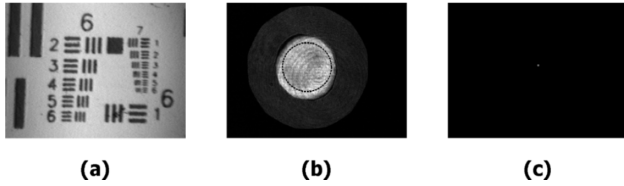


図5 収差のない理想的状態における (a) テストターゲット像 (CCD3にて観察), (b) 干渉縞 (CCD1にて観察), (c) 回折像 (CCD2にて観察).

眼底イメージング光学系では、ハロゲン光源からの白色インコヒーレント光によって網膜に対応する平面物体 T が一様に照明され、その反射光が、位相変調ユニット (PAL-SLM) の位相変調面を経由してカメラ CCD3 で結像される。ただし、CCD3 で観察される平面物体 T の像は、一般に、収差板の影響を受けてぼやけている。この光学系では、PAL-SLM の位相変調面は、眼の収差に対応する収差板 AP と結像関係になるよう配置される。また、PAL-SLM の液晶分子の配向方向と偏光板 P1 の透過軸は共に鉛直方向に設定されているため、CCD3 には PAL-SLM によって変調された光波のみが入射することになる。

CCD3 で観察されるぼやけた像を改善するために、補償光学システムを駆動する。そのためには、まず直線偏光の He-Ne レーザーからの平面波 (偏光方向は鉛直方向) をビームスプリッター BS1 で反射させて円形開口 CA1 に入射させ、レンズ Le の作用により平面物体 T 上に鋭くフォーカスする。平面物体 T 上で反射された集光スポットは、結像レンズ (L1~4) および PAL-SLM の位相変調面を経由してカメラ CCD1 に到達するが、この光波はもはや平面波にはならず収差板 AP の影響を受けて歪んでいる (AP がなければ、理想的に平面波となる)。一方、同じレーザーからの平面波をビームスプリッター BS1 および結像レンズ (L6~9) を介して CCD1 上に導き、これを参照平面波として前述の歪んだ光波と干渉させる。このとき得られる干渉縞を CCD1 で撮影し、それを位相変調ユニットにフィードバックすると、フィードバック干渉法の原理に基づき、位相変調ユニットに組み込まれた PAL-SLM の位相変調面の位相は収差板 AP によってレーザー光が受けた波面歪みを打ち消す分布に変化する。眼底 (反射物体) を結像するためのハロゲン光についても、補償光学システムを駆動するためのレーザー光と同様な波面歪みの影響を受けているため、位相変調ユニット (PAL-SLM) にて反射する過程で波面の歪みが打ち消され、鮮明な眼底像

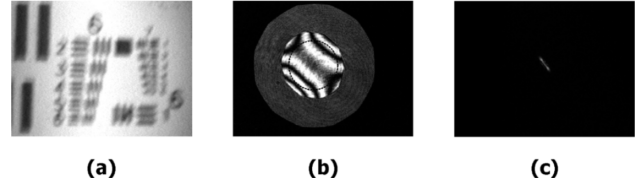


図6 収差があり、かつフィードバックをオフにした状態での (a) テストターゲット像 (CCD3にて観察), (b) 干渉縞 (CCD1にて観察), (c) 回折像 (CCD2にて観察).

を取得することが可能となる。なお、この像品質の改善を説明するための理論解析については、文献 11 の Appendix B を参照されたい。

4.2 実験¹²⁾

基本動作を確認する実験を行うために、網膜に対応する平面物体 T として、まずは鏡面反射物体である USAF 分解能テストターゲット (クロム膜、ネガ型) を使用した。フィードバックをオフにした状態 (補償光学システムを駆動しない状態) で、人工眼から収差板 AP を取り除いた場合に CCD3 で観察されるテストターゲットの像、CCD1 で観察される干渉縞、そして CCD2 で観察される円形開口 CA2 の回折像を観察した。その結果を図 5 に示す。これは収差の影響のない理想的状態であるため、鮮明なテストターゲット像が観察されるとともに、干渉縞は一樣強度に、そして回折像は小さなスポットになる。なお、この実験ではテストターゲットの最も細かいパターン (228 lp/mm; group 7, element 6) まで判別することができる。この場合のパターンの太さ (パターンを構成するバー 1 本の太さ) は約 $2.2 \mu\text{m}$ であり、これはヒトの眼の網膜上の視細胞 (中心窩の錐体細胞) の直径にほぼ一致する。

次に、人工眼に収差板 AP を導入し同様の実験を行った。フィードバックをオフにした状態では、図 6 に示すように、収差の影響を受けてテストターゲットの像がぼやけ、さらに回折像のピーク強度が低下し広範囲に分布する。この実験では、group 6, element 4 のパターン (90.5 lp/mm) までしか判別することができなかった。一般に補償光学の分野では、波面歪みの状態を定量化する指標としてストレール比^{*2}を利用するが、この場合のストレール比は 0.180 であった。しかし、フィードバックをオンにして補償光学システムを駆動した瞬間に、図 7 に示すように、ぼやけたテストターゲット像は鮮明となり、さらに回折像もピーク強度の高い小さなスポットへと変化した。この場合のターゲット像は、ややコントラストが低下したものの、図 5 (a) と同様に、最も細かいパターンまで判別す

*2 収差のない場合を基準とした、回折像のピーク強度の比として定義。そのため無収差の場合には、ストレール比は最大値の 1 をとる。

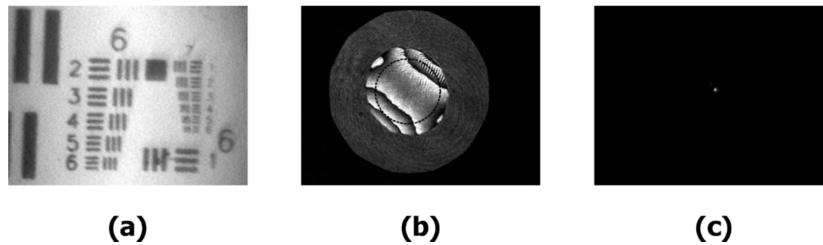


図7 収差があり、かつフィードバックをオンにした状態での (a) テストターゲット像 (CCD3 にて観察), (b) 干渉縞 (CCD1 にて観察), (c) 回折像 (CCD2 にて観察)。

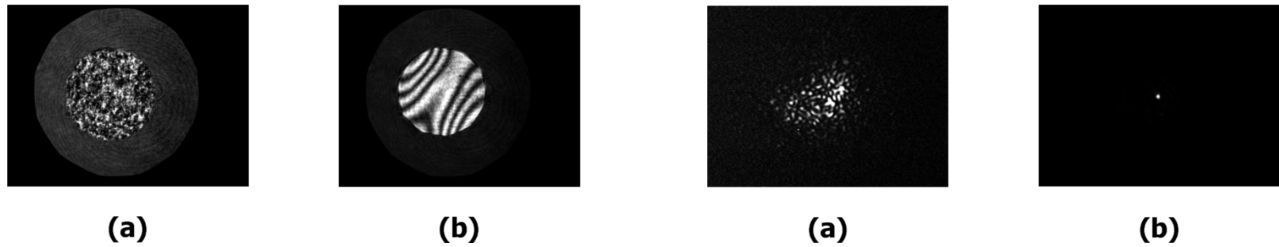


図8 平面物体 T として (a) 粗面を利用した場合、および (b) 鏡面反射物体を利用した場合の干渉縞 (CCD1 にて観察)。実験では、粗面として白色の再生紙を、鏡面反射物体として USAF 分解能テストターゲット (クロム膜) を使用した。

図9 平面物体 T として粗面を利用した場合の回折像 (CCD2 にて観察)。フィードバックを (a) オフにした場合と (b) オンにした場合。

ることができた。また、図 7 (c) に基づき評価されるストレーラ比は、約 3.2 倍改善され 0.537 となった。以上の結果から、まだ検証実験のレベルにとどまるものの、ここで提案した補償光学システムおよび眼底イメージング光学系が、眼の収差を除去し鮮明な眼底像を得る手法としてうまく機能することが明らかとなった。

以上の検証実験では、網膜のモデルとして鏡面反射物体を使用したため、鋭くフォーカスされたレーザー光は文字通り鏡面的に反射され、CCD1 では収差の情報を反映したきれいな干渉縞を観察することができた。しかし、実際のヒトの網膜は光を散乱する粗面であるため、上記の検証実験のみでは、このシステムをヒトの眼に適用した場合に期待通りの効果が得られるか否かを判断することはできない。そこで、鏡面反射物体である分解能テストターゲットの代わりに、粗面の一例である白色の再生紙を利用して同様の検証実験を行った。その結果、図 8 (a) に示すように、レーザー光が粗面で反射する際に激しく散乱され、CCD1 では干渉縞ではなくスペckル状のランダムパターンが観察されるのみであった。比較のために、粗面を鏡面に交換した際に CCD1 で観察された干渉縞パターンを図 8 (b) に示す。しかし、鏡面反射物体を使用したときと同様にフィードバックをオンにすると、図 9 に示すように、歪

んだ波面が補正されストレーラ比が飛躍的に向上する現象が確認された。この結果は、生体組織のような光を激しく散乱させる物体を対象とする場合であっても、ここで議論したフィードバック干渉法に基づく補償光学システムがうまく機能することを示す新たな知見として注目される。

5. 研究開発の動向

液晶空間光変調素子を利用したシステムには限定されないが、近年、補償光学技術を天文学以外の分野、特に、医療や工業分野に応用する研究開発が活発に進められている。これは、この分野における国内外の国家レベルでの取り組みと密接に関連している。

米国では 1999 年に、国立科学財団 (National Science Foundation) により補償光学センター (Center for Adaptive Optics)*³ が設立され、全米の 9 大学と 1 国立研究所を創設メンバーとして、30 m 級の巨大な地上望遠鏡用の補償光学システムと、眼科医療用の小型補償光学システムの研究開発を重点的に推進している。しかし、この組織では、従来型の変形鏡に代わる新しい波面補正素子として、おもに MEMS 技術を応用して作製されたコンパクトな可変形鏡を採用しており²⁰⁾、波面補正を目的とした液晶空間光変調素子の使用実績は少ない。

*³ <http://cfao.ucolick.org/>

一方、英国政府は、産学の連携を促進し革新的な技術を開発することを目的とするファラデー・パートナーシップとして、2001年に補償光学に関連する要素技術や周辺技術を総合的に取り扱う「スマート・オブティクス (Smart Optics)*4」を採択している。この事業では、特に、小型で安価で信頼性のあるMEMSおよび液晶タイプの波面補正素子、各種波面センサー、およびその周辺技術の開発が重点的に進められており、液晶空間光変調素子を利用した補償光学システムの研究開発も盛んに行われている。

日本国内では、欧米諸国に比べてかなり遅れをとってしまったものの、2005年になって新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) により課題設定型産業技術開発費助成事業「分子イメージング機器開発プロジェクト/生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト」が公募*5され、産学官が連携して推進される「補償光学を用いた高精度3次元眼底イメージング機器の研究開発」プロジェクト (参加研究機関: 浜松ホトニクス(株)、京都大学、産業技術総合研究所、他3機関) が採択された。このプロジェクトでは、新しいタイプの液晶空間光変調素子とそれを利用した補償光学システム (ただし、前章で紹介したシステムとは異なる) の研究開発を行い、その補償光学システムを各種の眼底イメージング機器に組み込むことにより、高解像度の眼底像を取得する医療診断機器を開発する計画となっている。液晶空間光変調素子の真価が発揮される最新の医療機器として、今後の成果が注目される。

本研究の一部は、NEDO技術開発機構による産業技術研究助成事業「適応的光波制御技術の研究開発」プロジェクト (平成12~14年度) において実施された。また、現在は、同機構による課題設定型産業技術開発費助成事業「補償光学を用いた高精度3次元眼底イメージング機器の研究開発」プロジェクト (平成17~21年度) の一環として行われている。

文 献

- 補償光学の歴史については、例えば、F. Roddier (ed.): *Adaptive Optics in Astronomy* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999) pp. 3-7.
- 白井智宏: “補償光学技術の新しい展開—医療・工業分野への応用を目指して—”, *光アライアンス*, **17** (2006) 1-7.
- 白井智宏: “バイオ・医療のための補償光学技術—生活習慣病に挑む超高解像眼底イメージングを中心として—”, 第40回サマーセミナー「命と光—光学とバイオ・医療との関係—」論文集, AP062332 (2006) pp. 56-63.
- J. Liang, D. R. Williams and D. T. Miller: “Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2884-2892.
- 総説として、例えば、D. T. Miller: “Retinal imaging and vision at the frontiers of adaptive optics,” *Phys. Today*, January (2000) 31-36.
- R. K. Tyson: *Principles of Adaptive Optics*, 2nd ed. (Academic Press, New York, 1998).
- G. D. Love: “Liquid crystal adaptive optics,” *Adaptive Optics Engineering Handbook*, ed. R. K. Tyson (Marcel Dekker, New York, 2000) pp. 273-285.
- T. Shirai, T. H. Barnes and T. G. Haskell: “Adaptive wave-front correction by means of all-optical feedback interferometry,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 773-775.
- T. Shirai, T. H. Barnes and T. G. Haskell: “Real-time restoration of a blurred image with a liquid-crystal adaptive-optics system based on all-optical feedback interferometry,” *Opt. Commun.*, **188** (2001) 275-282.
- T. Shirai and T. H. Barnes: “Adaptive restoration of a partially-coherent blurred image using an all-optical feedback interferometer with a liquid-crystal device,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **19** (2002) 369-377.
- T. Shirai: “Liquid-crystal adaptive optics based on feedback interferometry for high-resolution retinal imaging,” *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4013-4023.
- T. Shirai: “Capability of a liquid-crystal adaptive optics system based on feedback interferometry for retinal imaging,” *Opt. Rev.*, **12** (2005) 115-121.
- 先駆的研究として、A. D. Fisher and C. Warde: “Simple closed-loop system for real-time optical phase measurement,” *Opt. Lett.*, **4** (1979) 131-133.
- T. H. Barnes, T. Eiju, S. Kokaji, K. Matsuda and N. Yoshida: “Bistable optically writable image memory using phase-only spatial light modulator,” *Optik*, **96** (1994) 107-114.
- T. H. Barnes, T. Eiju and K. Matsuda: “Direct, unambiguous display of phase-difference using optical feedback to a phase-only spatial light modulator,” *Optik*, **101** (1995) 17-23.
- T. Shirai, T. H. Barnes and T. G. Haskell: “Surface-profile measurement by means of a polarization Sagnac interferometer with parallel optical feedback,” *Opt. Lett.*, **24** (1999) 297-299.
- A. D. Fisher and C. Warde: “Technique for real-time high-resolution adaptive phase compensation,” *Opt. Lett.*, **8** (1983) 353-355.
- T. H. Barnes, T. Eiju and K. Matsuda: “High resolution adaptive optics using an Interference Phase Loop,” *Opt. Commun.*, **132** (1996) 494-502.
- 総説として、A. R. D. Somervell, D. C. L. Cheung, T. H. Barnes and T. Shirai: “Feedback interferometry and its applications,” *Progress in Laser and Electro-Optics Research* (Nova Science, New York), in press.
- 例えば、N. Doble, G. Yoon, L. Chen, P. Bierden, B. Singer, S. Olivier and D. R. Williams: “Use of microelectromechanical mirror for adaptive optics in the human eye,” *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1537-1539.

(2006年10月13日受理)

*4 <http://www.smartoptics.org/>

*5 http://www.nedo.go.jp/informations/koubo/170411_2/170411_2.html