

Wevefront coding による被写界深度の拡大

小松進一[†]

結像光学系の瞳関数のアナログ変調とデジタル画像復元を組み合わせた波面コード化法は独創的かつ有効な被写界深度拡大技術である。ここでは、焦点はずれによる瞳関数の変化に基づいて波面コード化の原理を説明し、最近の研究開発動向の一端を紹介する。

Extended Depth of Field in Wavefront Coded Imaging

Shinichi Komatsu[†]

Wavefront coding (WFC) is known as a breakthrough technique for extending the depth of field of an imaging lens. The WFC technique requires a phase mask to modulate the pupil function along with the subsequent digital decoding. The principle of WFC is explained on the basis of the pupil phase variation due to defocusing. Some recent researches on WFC are briefly introduced as well.

1. はじめに

波面コード化 (Wavefront Coding) 法では、瞳関数位相分布のアナログ変調とデジタル画像復元処理をうまく組み合わせることにより、レンズを絞らずに焦点深度 (および被写界深度) を画期的に深くできる[1-5].

写真におけるボケ味が大切なことはいうまでもないが、その一方で、顕微鏡やロボットの眼、監視カメラなど、計測・医用・セキュリティ分野では、被写界の隅々までピントが合ってほしい用途も多い。

レンズを絞って瞳径を小さくすれば、簡単に被写界深度を拡大できる。しかし、同時に透過光量が減少して像が暗くなり、さらに回折拡がりが増大して空間分解能も低下してしまう。

像の明るさや分解能を犠牲にしないで被写界深度を深くするために、これまでに様々な方式が提案されており、その中には、複眼レンズを利用する方法や[6]、色収差レンズと CMOS イメージセンサの色フィルタ配列をうまく結びつけた方法などもある[7]。ここでは簡単のため単色・単眼の結像光学系に限ることにすれば、主として

- ① 合焦点を光軸方向に走査しながら、各位置で得られる合焦像を合成する[8,9]
- ② 焦点はずれ像の各部分に対して物体距離に応じたデコンボリューション・フィルタをかけ、それぞれの復元像を合成して画面全体をシャープにする[10,11]

そして

- ③ 波面コード化 (Wavefront Coding) 法

の3方式に分類される。③の波面コード化法では、結像光学系に特殊な位相板を挿入して瞳関数の位相分布をアナログ的に変調し、その結果、点像分布関数 (PSF) が焦点はずれ量に依存しないようにできる。この PSF に対応するデコンボリューション・フィルタを施して焦点はずれ劣化像からシャープな画像を得る際に、物体距離と無関係に画面全体に1つのフィルタをかければよいことが、波面コード化法の最大の利点である。また、オートフォーカス用の機械的走査機構を必要としないため、撮像システムの小型化に利用できる。

波面コード化は、Dowski と Cathey によって提案された大変ユニークな被写界深度拡大法である[1]。発表後 10 年間はあまり注目されなかったが、数年前からまず産業界を中心に世界的な関心が集まり始め、大学や研究所の研究者にも徐々にその革新性が理解されつつある。OSA (米国光学会) が出版する 3 誌に掲載された Wavefront Coding 関連論文の数を表 1 に示した。キーワードとして wavefront coding, extended

[†] 早稲田大学 先進理工学部 応用物理学科
Department of Applied Physics, School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

depth of field など少数のキーワードで検索した結果であり、関連論文をすべて網羅したものではないが、全体的な増加傾向が見てとれる。とくに2007年以降のOpt. Lett. およびOpt. Express の掲載論文の伸びが顕著であり、このほか国際会議での発表件数も最近目立って増えている。さらに、高強度レーザービームの分野においてもAiry beam として、最近そのユニークな伝搬特性が注目を集めている。[12,13] その一方で、波面コード化の原理や適用限界などには、いまだ謎に包まれた部分が多く残されており、その総合的な理解と、それに基づく新たな展開が期待されている。

表 1 Wavefront Coding 論文の出版状況 (白井調べ)

掲載誌	Opt. Lett.	Opt. Express	Appl. Opt.	備考
出版年				
1995			1	CPM (Dowski & Cathey)
1996				
1997	1		2	
1998			1	
1999		1		
2000			1	
2001				
2002			2	
2003		1		
2004			2	LPM
2005	3		1	
2006			5	
2007	1	2	4	EPM (Opt. Commun.) Airy Beam (PRL)
2008	3	4	2	FPM
2009	3	4	1	RPM
2010	3	3	1	10月11日出版まで

2. 波面コード化の原理

波面コード化の原理を図1の模式図に示す。まず、特殊な位相板を瞳に挿入して光学系の結像特性を変化させ、その光学系を用いて結像した中間画像を得る。位相板を挿入すると一般に結像特性は悪化し、中間画像は劣化する。この劣化の仕方が焦点はず

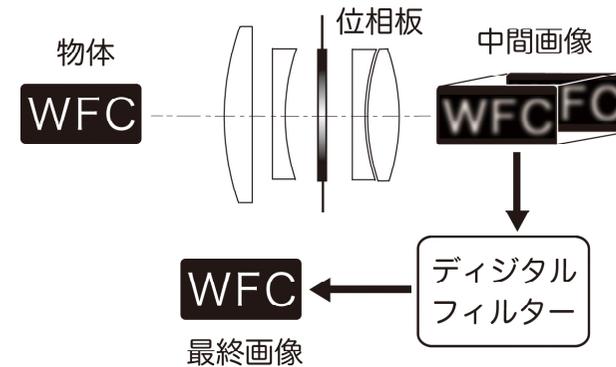


図 1 波面コード化の原理図

れ量を変えても変化しないような位相板の形状が存在すれば、光軸方向に沿って同じ劣化像が「金太郎飴」のように並んだ中間画像を得ることができる。

このような位相板形状を求めるため、Dowskiらは、結像光学系の伝達関数 (OTF : Optical Transfer Function) を任意の焦点はずれについて包括的に表現できる曖昧 (両義性) 関数 (Ambiguity Function) に停留位相法を適用して評価した。その結果、次のような空間座標の3乗に比例した位相変化を与える位相板 (CPM : Cubic Phase Mask) が良い近似解となることを解析的に示した[1]。

$$\varphi(x) = \alpha x^3 \quad (1)$$

Dowskiらのアプローチは、CPMのユニークな働きを明確にした点で画期的であるが、取扱いがシステム論的ややブラックボックス的であるため、なぜ焦点はずれに依らず「金太郎飴」のようなPSFが生ずるか、その物理的な仕掛けがはっきりせず、今ひとつ物足りない。より実体論的なアプローチが望まれる所以である。

そこで、CPMを挿入したレンズに焦点はずれを与えた際に生ずる瞳関数の変化に基づいてCPMの効果を下に説明する。フーリエ光学によれば、インコヒーレント結像のPSFは、瞳関数のフーリエ変換の絶対平方で表される。また、PSFをフーリエ変換すると、結像光学系の空間周波数伝達特性を表すOTFになり、さらにフーリエ変換の性質から、瞳関数の自己相関関数がOTFになることも分かる[14]。以上の関係を図2にまとめた。

レンズの基本的な作用は、光波面の曲率を変換することにある。平面波を焦点に集

める作用は、入射平面波の曲率半径 ∞ を焦点に向かって収束する球面波の曲率半径 f (=焦点距離) に変換することであり、物体の像を結ぶ作用は、物体上の点から発散する球面波の曲率半径 a を対応する像点に収束する球面波の曲率半径 b に変換することである。フーリエ光学で使われる薄肉レンズの近似では、入射波面の位相に次式の位相を加える位相変調器としてレンズを扱っている[14]。ただし (x, y) は、瞳の寸法 L で規格化したレンズ面の空間座標で、光の波長を λ とする。

$$\theta_L = -\frac{\pi L^2}{4\lambda f}(x^2 + y^2) \quad (2)$$

焦点ずれのレンズでは、本来ならば像距離 b の面で観察すべき像を、距離 d の撮像面で観察している。撮像面を基準にすれば、曲率半径を d に変換すべきところを誤って b に変換した状態にある。その結果、レンズ面において次式の位相分布が余分に加わった状態にある。

$$\theta_D = \psi(x^2 + y^2) \quad (3)$$

ここで、右辺の係数 ψ は焦点はずれの大きさを表す規格化された量であり、デフォーカスパラメータと呼ばれ、次式で与えられる。

$$\psi = \frac{\pi L^2}{4\lambda} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{a} - \frac{1}{d} \right) \quad (4)$$

したがって、2次元 CPM を挿入したレンズに焦点はずれを加えた効果は、本来のレンズ作用を除いて次式のように表される。

$$\varphi(x, y) = \alpha(x^3 + y^3) + \psi(x^2 + y^2) \quad (5)$$

ここで、 $\gamma = \psi/\alpha$ を用い、(2)式の右辺を整理して次のように変形できる。

$$\varphi(x, y) = \alpha \left[\left(x + \frac{\gamma}{3}\right)^3 + \left(y + \frac{\gamma}{3}\right)^3 - \frac{\gamma^2(x+y)}{3} - \frac{2\gamma^3}{27} \right] \quad (6)$$

すなわち、CPM を挿入した瞳に焦点はずれを与える効果は、CPM の平行移動 (右辺括弧内の第1項と第2項に対応) と、波面の傾き (第3項)、定數位相の付加 (第4項) の3つの効果に分解できる。

このうち定數位相項は、インコヒーレント光の結像特性に影響を与えないので無視

できる。また、波面の傾きは、点像の像面内での平行移動に対応しており、点像を变形させない。点像の移動は、空間周波数に比例する線形な位相を OTF に付加するだけである。OTF の絶対値で与えられるコントラスト伝達関数 (MTF: Modulation Transfer Function) は、これによって変化しない。

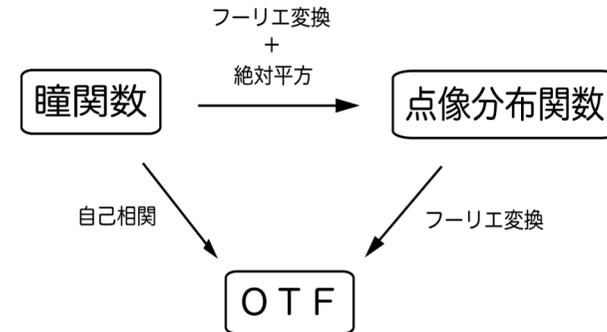


図2 瞳関数, PSF, OTF の間の関係 (インコヒーレント結像の場合)

最後に述べた CPM の平行移動は、瞳径が無限に大きくかつ無収差ならば、像面における光の複素振幅に直線的な位相を加えるだけであり、インコヒーレント結像に影響を与えない。すなわち、瞳径の大きさと収差の影響を無視できれば、焦点はずれを加えても、PSF に影響を与えるような実質的な位相変化は、第3項の波面の傾き以外には生じない。これが CPM の原理である。

また軸上の色収差の効果も焦点はずれと同様に、2乗位相分布の付加で表されるから、CPM を用いる波面コード化結像システムが色収差の影響を受けにくいことも同様に理解できる。

その一方で、同時に CPM の問題点も見えてくる。まず、第3項の波面の傾きは、点像を像面内で横ずれさせ、その横ずれ量は物体距離によって異なるため、最終画像を歪ませる要因になる。

また、結像光学系の残存波面収差が無視できない場合には、(6)式右辺括弧内の第1項と第2項、すなわち平行移動する CPM が、静止した波面収差に対して相対的に位置ずれするため、両者を足し合わせた位相分布の形状がくずれる。そして最後に、この点をもっとも重要であるが、現実の瞳径は有限であるから、3乗位相の横ずれにしたがって瞳内に留まる位相分布は徐々に変化する。この横ずれが無視できないほど位相変化が顕著になった場合は、やはり最終画像の劣化要因となる。

3. 波面コード化に関する最近の話題

前節で、波面コード化用位相板としての CPM の有効性と付随する問題点を明らかにした。より優れた被写界深度拡大効果を実現するため、CPM 以外の位相板の探究が盛んである[15-18].

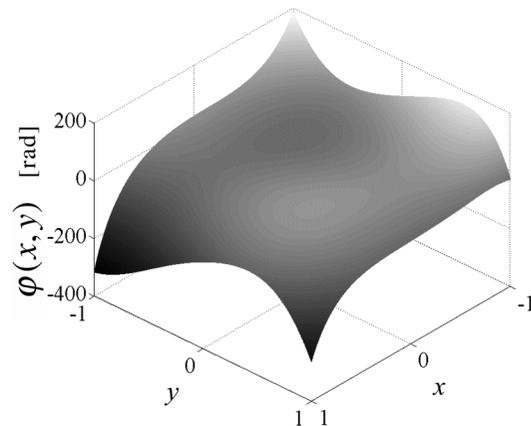
それと同時に、情報ネットワークサービスの使い勝手の改善や、生物・医用画像の画質向上をめざし、波面コード化の優れた特性を活かすための応用が多方面で検討されている。

3.1 波面コード化の最適位相分布

筆者らは位相板の分布関数を次式のようなべき級数で展開し、その展開係数を最適化アルゴリズムにより求めた。

$$\phi(x, y) = \sum_{n=0}^K \left(\sum_{m=0}^{K-n} C_{nm} x^n y^m \right) \quad (7)$$

このような位相板を挿入した結像光学系のOTFが、合焦点と複数の焦点はずれ面とで同一になることを、最適化の目標とした。その結果得られた位相分布関数は、図3のようになり、大まかな形状はCPMと似ているが、3次係数と同程度の大きさの展開係数をもつ高次項をいくつも含んだ分布となっている[17].



(x, y) : 瞳面の規格化座標

図3 最適化位相板の位相分布 [17]

この最適化位相板を挿入した波面コード化システムの結像特性のシミュレーション結果を図4の右側の列に示す。比較のために、左側に通常的光学系による像、中央にCPMの波面コード化システムの最終画像を示した。それぞれのシステムの合焦点での像を上段に、焦点はずれ面 ($\psi = 30$)での像を下段に示している。通常結像光学系では劣化が顕著となる焦点はずれに対して、波面コード化システムでは細部まで結像できること、またCPMでは目立つ偽像が、最適化位相板では大幅に抑制されていることが分かる。

この最適化手法は、はじめ複数個の焦点はずれ位置でシャープに結像する離散多焦点特性を得るために導入された。実際に良好な3焦点特性が実現できたが、離散焦点数の増加や離散焦点間隔の減少によって、離散多焦点特性からEDOF特性に移行することが見いだされている[19].

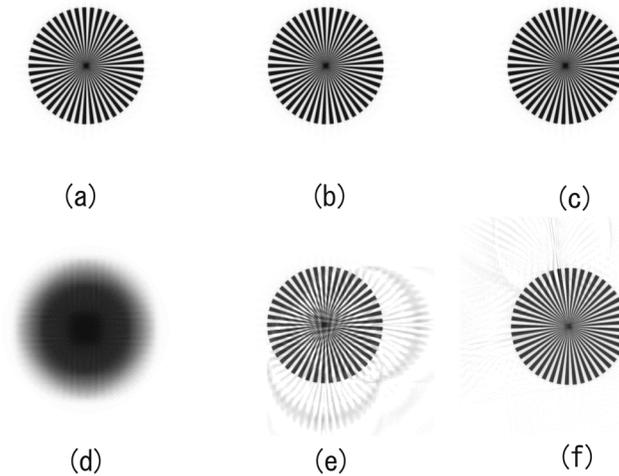


図4 波面コード化システムの最終像 [17]

左：通常光学系，中央：CPM，右：最適化位相板。

(a)~(c) : 合焦点，(d)~(f) : 焦点はずれ面 ($\psi = 30$)

3.2 最適化位相板による EDOF 効果の検証実験

射出成型で作製された最適化位相板を用いて EDOF 効果の検証実験を行った[20-26]. 最初の実験結果を図 5 に示す. 上段は通常光学系で撮影した像, 下段が波面コード化システムの最終画像である. 物体距離が 0.55m ($\psi = 0$) と 0.7m ($\psi = 52$) の位置に被写体を置き, デジタル一眼レフの標準レンズの絞り位置に上記の最適化位相板を挿入してストロボ照明で中間画像を撮像し, その一部(2048×2048 画素)を画像復元して得た最終像の一部(約 1000×1000 画素)が, (c) ($\psi = 0$) および(d) ($\psi = 52$) として示されている. $\psi = 52$ の大きな EDOF 効果が確認できる一方で, 本来無地の白地部分に織地のようなアーティファクトが目立つ. 復元フィルタの設計に使用する PSF データの精度を高めることによりを, このようなアーティファクトはほとんど気にならない程度に抑制できる. 軸外特性の検証実験の結果を図 6 に示す. 左側の(a), (c)を撮像するときには, 被写体をカメラの視野の左端に配置しており, 画面の左端で画角は約 15° で



図 5 最適化位相板の光学実験結果 [20]

上段: 通常光学系, 下段: 波面コード化最終像. (a), (c) $\psi = 0$, (b), (d) $\psi = 52$.

ある. すべての場合において, 手前のサイコロに焦点を合わせており ($\psi = 0$), 後方のキーボックスが焦点はずれの位置にある ($\psi = 38$). 下段の通常光学系では判読できないキーボックスの数字を, 上段の波面コード化最終像では, 軸上, 軸外ともはっきり読むことができる[22]. カラー被写体も対象とした最近の実験結果でも, 良好な実験結果が得られている[23-26].

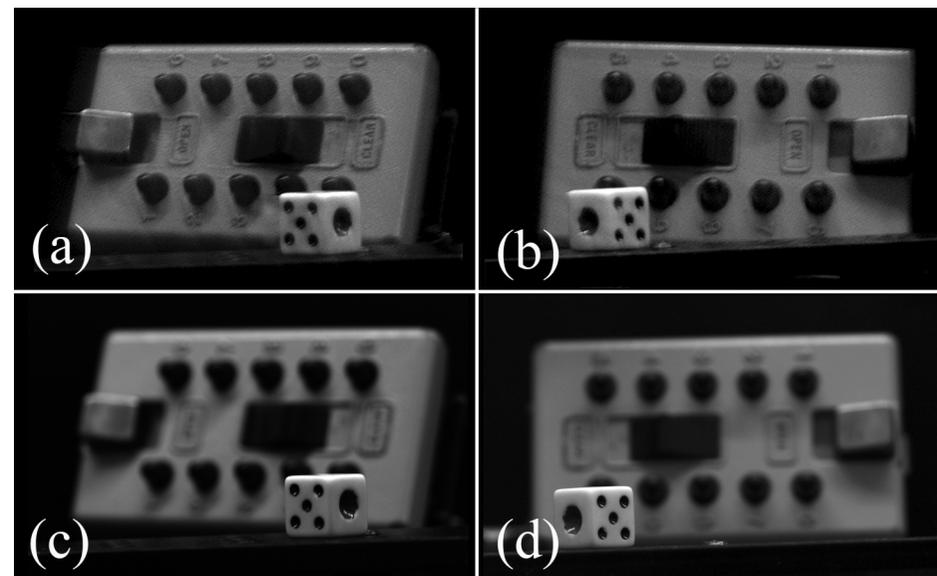


図 6 最適化位相板の光学実験結果 (軸外特性) [22]

上段: 波面コード化最終像, 下段: 通常光学系. (a), (c) 軸外 (左端 15°), (b), (d) 軸上

なお, 画角の大きな領域で発生する軸外収差に対しては, CPMの特性はあまり良好でないことが指摘されている[27]. 図 7 のシミュレーション結果から分かるように, 最適化位相板は画角特性においても CPMより優れている[21]. なお, 図 7 は合焦面における画角特性であるが, 焦点はずれ面においても同様な結果が得られている.

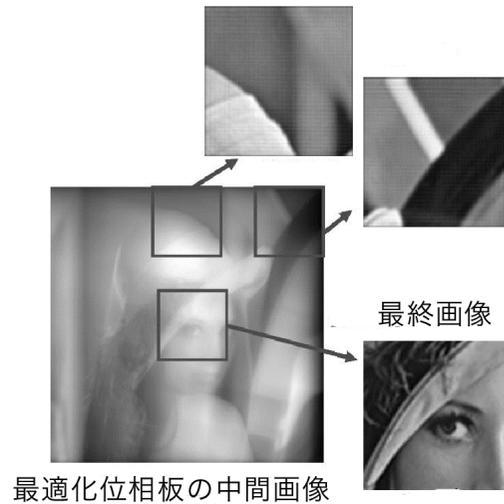
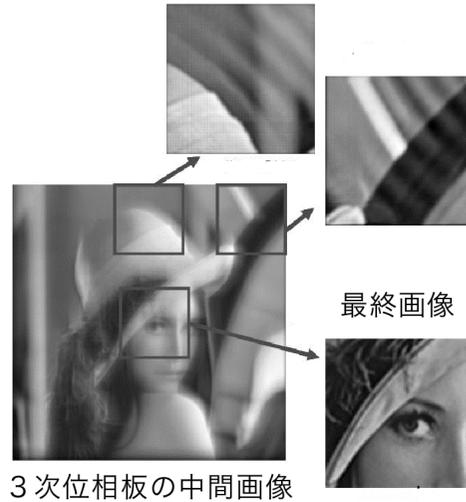


図7 3次位相板 (CPM) と最適化位相板の軸外特性の比較 (シミュレーション)

3.3 位相板の高次項について

フーリエ光学に基づく前節のシミュレーションから, (7)式のべき級数で表される位相板を CPM の代わりに使うと EDOF 効果の特性が改善されることが分かった[20, 22, 28]. しかし, なぜ改善されるかは, 現象論的な説明は可能であるが, 改善される物理的な理由はまだ十分には解明されておらず, 今後の検討課題として残されている.

それでも, フーリエ光学の枠外では4次以上の高次項が必要になることは, 以下の考察からも理解することができる.

ここでは簡単のため, 焦点距離 f の1次元レンズが垂直入射する平面波を球面波に変換する場合を考えてみる. 焦点に向かう収束球面波へ変換するレンズの働きは, 入射平面波に次の位相変化を付け加えることと考えられる.

$$\theta(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[f - \sqrt{f^2 + x^2} \right] \quad (8)$$

なお, ここでは光軸に対して垂直な方向の規格化していない位置座標を x としている.

焦点深度を深くすることは, 焦点を光軸方向に均等に伸ばすことに相当する. そのためには, 焦点距離 f が光線の入射位置座標 x とともに1次式 $f + ax$ のように変化すればよい. すなわち, レンズが入射波に付加する位相分布は

$$\theta_a(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(f + ax) - \sqrt{(f + ax)^2 + x^2} \right] \quad (9)$$

であり, これをべき級数に展開して整理すると

$$\begin{aligned} \theta_a(x) = & \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \left(-\frac{1}{2f} x^2 + \frac{1}{8f^3} x^4 - \dots \right) \\ & + \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \left(\frac{a}{2f^2} x^3 - \frac{a^2}{2f^3} x^4 + \frac{a(a^2 - 3/4)}{2f^4} x^5 - \dots \right) \end{aligned} \quad (10)$$

となる. 右辺の前半部分は入射平面波を収束球面波へ変換するレンズ作用を表し, 後半部分が EDOF 効果をもたらす位相板の分布を表す. 後半部分には CPM に対応する3次項に加えて, 4次以上の高次項が現れることが分かる. それぞれの部分の第1項目だけを残すのがフーリエ光学の解で, その場合は, 薄肉レンズと CPM の組合せに対応する.

3.4 レンズの組合せによるCPM効果の生成

通常の波面コード化に用いる位相変調の大きさは波長の数十倍と大きく、とくに白色光照明下では液晶パネル型の空間光変調器の使用が困難である。射出成型法等で作成した位相板は、少量生産時のコストが高いうえに、(1)式の係数が固定であるため撮像条件に応じて位相変調の大きさを変えることができない。球面収差の大きさが等しい凸レンズと凹レンズの対を用意し、これらの光軸を相対的に横ずらしすると、CPMのような3次位相を生成できることが報告されている[29]。解析はDowskiらのオリジナル論文にある曖昧(両義性)関数の式展開を踏襲した長々しいものになっている。本稿の2節と同じく瞳位相の変化を考えて、それ表す次式に基づいて、原理を容易に理解することができる。

$$(x + \delta)^4 - x^4 = 4\delta x^3 + 6\delta^2 x^2 + 4\delta^3 x + a^4 \quad (11)$$

あまり重要でない係数を除けば、(11)式の左辺が、等しい球面収差をもつ凸レンズと凹レンズを互いに δ だけ横ずらししたときの波面収差であり、その結果、右辺のようにCPMの3次位相が生じ、その係数は横ずらし量 δ を調節して変えられることが分かる。それと同時に、2乗項に対応する焦点移動と一乗項に対応する波面の傾きも副産物として生ずることも分かる。

3.5 円対称な位相板(波面コード化の類似技術)

CPMや最適化位相板によって大きなEDOF効果が得られるが、従来からのレンズ設計手法との整合性やレンズ組立行程における調整の容易さから、可能であれば円対称な分布をもつ位相板が望まれる。さらに、位相板を挿入するのではなく、レンズ自身の波面収差で円対称な位相を実現できれば、部品点数が少なく済み、コストも削減できる。このような理由で、レンズ設計と一体化した円対称位相板の最適化が検討されている[30-32]。2節で述べたWFCの原理を考えると、円対称位相とWFCとは原理的に相容れないものがある。実際に、焦点はずれに伴うMTFの変化はかなり大きい。しかし、特定の目的を達成するためにわずかなEDOF効果で十分な場合や、画角特性が最重要で被写界深度は通常程度確保できればよい場合などには有効であろう。とくに、3次位相板のEDOF効果が保証されないほどFナンバーの大きな(低NAの)光学系では重要な選択肢となりうる。

3.6 波面コード化の応用

波面コード化を用いれば、オートフォーカス焦点調節機構が不要になり、カメラ搭載機器の飛躍的な小型軽量化が可能になる。CDM Optics社とOmniVision Technologies社が共同開発した小型カメラモジュールで撮影した室内・室外の美しいカラー写真、そして2次元QRバーコードの撮影例などが「光学」の解説論文で紹介されている[2]。

蛍光イメージングなどバイオ関連への応用、ヒトの虹彩を利用する認証システム[24, 33-35]に加えて電子内視鏡や車載カメラへの応用など、今後の進展が楽しみである。

4. おわりに

本稿では、焦点はずれが瞳関数に与える変化に基づいて波面コード化による被写界深度拡大の原理を説明し、最近の研究開発の一端を紹介した。波面コード化は情報ネットワークサービスの使い勝手の改善や、生物・医用画像の画質向上など多方面での応用が見込まれる。多焦点特性の実現なども含めた波面コード化法の今後の展開が、さらに新しいシステムやサービスの創成・普及につながることを期待したい。

謝辞 本研究の一部は、早稲田大学特定課題研究(2010B-135)などの援助により行われた。研究室の学生として参加してくれた高橋康久、尾花 亮、工藤史堯、杓子尾雄大、米田祐基、臼井彬寿、伊藤靖晃の諸氏をはじめ、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) E. R. Dowski and W. T. Cathey: Extended depth of field through wavefront coding, Appl. Opt., Vol. 34, No. 11, pp. 1859-1866 (1995).
- 2) P. E. X. Silveira, 立原 悟, K. S. Kubala and E. R. Dowski: 波面のコード化とデジタル再生技術を用いた光学系の深度拡大”, 光学, Vol. 37, No. 6, pp. 340-346 (2008).
- 3) 小松進一: 撮像システムの被写界深度を拡大する Wavefront Coding 技術 ~物理的な仕掛けと最近の動向~, 映像情報メディア学会誌 Vol. 63, No. 3, pp. 279-283 (2009).
- 4) 小松進一: Wavefront Coding (波面コード化) による焦点深度拡大技術, OPTICS DESIGN (光設計研究グループ機関誌), Vol. 42, pp. 3-8 (2009).
- 5) 小松進一: 瞳関数の位相変調とデジタル復調による被写界深度制御, Optics & Photonics Japan 2009 (日本光学会年次学術講演会) 予稿集, pp. 244-245 (2009) (25pCS8).
- 6) http://www-nishio.ist.osaka-u.ac.jp/COE/report/sympo/final_doc/tanida.pdf
- 7) 江川佳孝ほか: 被写界深度を拡大したカメラモジュールの開発, OPTICS DESIGN (光設計研究グループ機関誌), Vol. 42, pp. 21-26 (2009).
- 8) 平岡 泰: 計算でボケを除いて見る(光学切片顕微鏡), 限界を超える生物顕微鏡(宝谷絃一, 木下一彦編, 学会出版センター) 第5章, pp. 71-90 (1991).
- 9) 宮坂 聡, 小松進一: 点像分布関数の推定に基づく3次元顕微鏡画像の回復, 光学, Vol. 27, No. 9, pp. 539-543 (1998).
- 10) N. Sakima et al.: Filter Bank Method for Determining Defocus Amount of Lens System, Digest of ICO Topical Meeting “Frontiers in Information Optics”, p.242 (1994).
- 11) 服部雅之, 小松進一: コンボリューションフィルタを用いる焦点ずれ量の推定法: 実験的検証, Vol. 27, No. 3, pp. 150-156 (1998).
- 12) G. A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu and D. N. Christodoulides: Observation of accelerating Airy

- beams, Phys. Rev. Lett., Vol.99, 213901 (2007).
- 13) P. Polyinkin, M. Kolesik, J. Moloney, G. Siviloglou and D. Christodoulides : Extreme Nonlinear Optics with Ultra- Intense Self-Bending Airy Beams, Optics & Photonics News, Vol. 21, No.9, pp. 38-43 (2010).
- 14) J. W. Goodman: Introduction to Fourier Optics, (McGraw-Hill, 1968).
- 15) S. S. Sherif, W. T. Cathey and Ed. R. Dowski: Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems, Appl. Opt., Vol. 43, No. 13, pp. 2709-2721 (2004).
- 16) Q. Yang, L. Liu and J. Sun: Optimized phase mask for extension of depth of field, Opt. Commun., Vol. 272, No.1, pp. 56-66 (2007).
- 17) Y. Takahashi and S. Komatsu: Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging, Opt. Lett. Vol. 33, No.13, pp.1515-1517 (2008).
- 18) F. Zhou, G. Li, H. Shang and D. Wang: Rational phase masks for extended depth of field, Opt. Lett., Vol. 34, No.3, pp. 380-382 (2009).
- 19) 高橋康久, 小松進一: 位相板と画像処理を併用するハイブリッド結像システム, 第 67 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, 924 (2006).
- 20) 高橋康久, 小松進一: 最適化自由曲面位相マスクによる超焦点深度拡張の実験的検証, 第 55 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No.3, p.1062 (2008).
- 21) R. Obana, Y. Takahashi and S. Komatsu: Off-axis imaging characteristics of optimized freeform phase mask for wavefront coding, Technical Digest, MOC'08 (Brussels, Belgium), pp.125-126 (2008).
- 22) 尾花亮, 米田祐基, 小松進一: W F C 用最適化自由曲面位相マスクの軸外特性, 第 56 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No.3, p.1053 (2009).
- 23) Y. Yoneda, R. Obana, and S. Komatsu: Color imaging using optimized free-form phase mask for wavefront coding, Technical Digest, MOC'09 (Odaiba, Tokyo), pp. 318-319 (2009).
- 24) T. Shakushio and S. Komatsu : Extension of depth of field for iris recognition system by wavefront coded imaging using free-form phase mask, Technical Digest, MOC'09 (Odaiba, Tokyo), pp. 314-315 (2009).
- 25) 尾花亮, 米田祐基, 小松進一: 自由曲面位相板を用いる W F C システムの EDOF 効果 — 実験結果 —, Optics & Photonics Japan 2009 (日本光学会年次学術講演会) 予稿集, pp. 104-105 (2009) (24aF4).
- 26) H. Kudo, Y. Yoneda, T. Shakushio, R. Obana and S. Komatsu : Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging: Experimental Results and Discussions, Technical Digest, ODFC'10 (Yokohama), pp.309-310 (2010).
- 27) T. Y. Zhao, Z. Ye, W. Z. Zhang, Y. P. Chen, and F. H. Yu: Wide viewing angle skewed effect of the point spread function in a wavefront coding system, Opt. Lett. **32**, 10. pp.1220-1222 (2007).
- 28) H. Kudo and S. Komatsu : Comparison of characteristics between cubic phase mask and free-form phase mask for wavefront coding, Technical Digest, MOC'09 (Odaiba, Tokyo), pp.154-155 (2009).
- 29) J. O. Castaneda, J. E. A. Landgrave and C. M. G. Sarabia: Conjugate phase plate use in analysis of the frequency response of imaging systems designed for extended depth of field, Appl. Opt. **47** (2008) pp. E99-E105 (2008).
- 30) S. Lee, N. Park and Y. Park: Breaking diffraction limit of a small f-number compact camera using wavefront coding, Opt. Express., 16, 18, pp. 3569-13578 (2008).
- 31) P. Mouroulis: Depth of field extension with spherical optics, Opt. Express., 16, 17, pp. 12995-13004 (2008).
- 32) A. Usui and S. Komatsu: Extension Depth of Field Using Two Types of Circular-Symmetry Phase Mask, Technical Digest, MOC'10 (Hsinchu, Taiwan, 2010), (WP28).
- 33) R. Plemmons et al.: Computational Imaging Systems for Iris Recognition, Proc. SPIE, Vol. 5559, pp.346-357 (2004)..
- 34) R. Narayanswamy et al.: Extending the imaging volume for biometric iris recognition, Appl. Opt. Vol. 44, No. 5, pp.701-712 (2005).
- 35) D. S. Barwick: Increasing the information acquisition volume in iris recognition systems, Appl. Opt., Vol. 47, No. 26, pp.4684-4691 (2008).