

## 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

パウロ E. X. シルベイラ・立原 悟\*・ケニス S. クバラ  
エドワード R. ダウスキー

### Extension of the Depth of Field for Imaging Systems through Coding the Wavefront and Digital Decoding

Paulo E. X. SILVEIRA, Satoru TACHIHARA\*, Kenneth S. KUBALA and Edward R. DOWSKI

We introduce Wavefront Coding<sup>TM</sup>\*1 technology from an optical engineering point of view and explain its many applications, with emphasis on its ability to extend the depth of field of imaging systems. Next, we explain how the Wavefront Coding technology can benefit compact camera modules such as those used in cell phone cameras. The benefits are derived from the Wavefront Coded<sup>®</sup>\*2 module's ability to capture high quality images with an extended depth of field without the need for auto-focus, resulting in no shutter lag, small module size, high reliability and reduced cost, making this solution ideal for mass production in a wide range of consumer applications. We show sample images captured by Wavefront Coded compact camera modules and also show how they can be applied to barcode reading.

**Key words:** extension of depth of field (focus), optically coded wavefront, digital decoding, image reconstruction, computational imaging

Wavefront Coding 技術は光学結像技術とデジタル画像処理技術の複合技術である。図1に、その概念を示す。広い被写体距離範囲にわたって、高品質の画像を得ることができる、すなわち被写界深度、あるいは焦点深度の広いシステムとするために、まず光学系の瞳関数(収差)のコード化が行われる。このコード化により、光学系には一般的に大きな収差が付与され、受光素子上の光学像は、図1(b)にみられるように、ぼけたものとなる。この光学像は、受光素子でとらえられた後、最適設計されたコンボリューション・カーネルで空間的なフィルター処理(画像処理によるデコード)が行われて、図1(e)のようなぼけのないシャープな画像に復元される。重要なことは、光学系のコード化によって、受光面近傍の広いデフォーカス範囲にわ

たり、ちょうど、金太郎飴のように、ほぼ同一のぼけた像を得るという点である。これによって、単一のコンボリューション・カーネルを用いた画像処理により、広いデフォーカス範囲にわたり、シャープな画像が復元され、したがって、深度の広いシステムが実現されることになる。

Wavefront Coding 技術は、Dowski と Cathey<sup>1,2)</sup> によって発明され、後に Kubala ら<sup>3)</sup> によって実用的なレベルにまでもたらされた。本技術は、光学系の被写界深度(焦点深度)を拡大するだけでなく、色収差の補正<sup>4)</sup>、光学系の加工・組み立て誤差許容量の増大、振動や温度変化に対する許容量増大<sup>3)</sup>、また、光学系におけるレンズ枚数の低減にも有効であり、生産工程の削減やコストダウンにも大きな効果をもたらす<sup>5)</sup>。

CDM Optics Inc. (4001 Discovery Dr., Suite 130, Boulder, CO 80303-7816, USA)

\* E-mail: satoru.tachihara@cdm-optics.com

\*1 Wavefront Coding<sup>TM</sup> は、CDM Optics 社の商標。

\*2 Wavefront Coded<sup>®</sup> は、CDM Optics 社の登録商標。

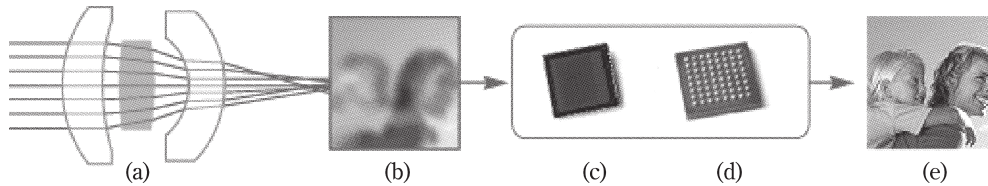


図1 Wavefront Coding 技術の概念図：光学系の瞳関数変調と画像処理による復調。(a) 非球面による瞳関数変調，(b) ぼけた光学像，(c) CMOS 受光素子による像検知，(d) 画像処理プロセッサによる像の復元，(e) 復元されたシャープなデジタル画像。

Wavefront Coding 技術は、これまでに顕微鏡<sup>6)</sup>や望遠鏡<sup>3)</sup>など幅広い分野で応用がなされている。また、本技術は広い波長範囲にわたって応用が可能であり、遠赤外領域<sup>5,7)</sup>、紫外線領域、また X 線領域で検討が行われている。さらに、低コストの携帯電話用カメラモジュール<sup>8)</sup>、生体認証システム<sup>9,10)</sup>、バーコードリーダー、ヘッド・マウント・ディスプレイ、フォトリソグラフィ<sup>11)</sup>などにおいても、本技術の応用検討がなされてきている。デジタル受像素子と画像処理技術があれば、本技術はどんな分野でも応用可能であり、誤差許容量の増大、小型化、低コストなどの利益を享受することができる。そのために必要なことは、光学系および画像処理系を、同時に統合的に最適化することができる、ということである。

本稿では、結像光学系の設計および最適化に関する知識と、基礎的な画像処理技術の知識を有する光学技術者を読者と想定して、Wavefront Coding 技術についての解説を行う。第1章では、まず本技術を用いたシステムがどのようにして最適化設計されるかについて述べ、第2章では、光学系の深度拡大のため本技術がどのように使用されるかを紹介し、第3章では、本技術が小型カメラモジュールに対してどのような利点をもたらすかを述べ、第4章で本技術を採用した TrueFocus<sup>®</sup>\*3 カメラモジュールで実際に撮影されたサンプル画像を、バーコードリーダーへの応用例を含めて示し、最後に結語を述べる。

## 1. Wavefront Coded 結像システムの設計

本技術を用いた結像システムは、光学系の瞳関数（収差）と画像処理系におけるコンボリューションカーネルを、同時に最適化を行うことによって得られる。最適化時のメリット関数としては、通常の光学設計に用いられるものの、例えば、対象となる空間周波数における MTF のデフォーカス特性や、対象となる被写体距離における PSF（ポイント・スプレッド・ファンクション）のサイズなど、またはシステムの目的に応じた量、例えば、対象となる被

写体範囲における S/N 比の波長特性<sup>12)</sup>、瞳認証システム<sup>9,10)</sup>における Hamming 距離<sup>13)</sup>、あるいはバーコードリーダーにおけるビットエラー率など、が使われる。

一方、最適化の対象としては、許容量を増大させたい対象、例えば、深度増大が目的の場合はデフォーカスの量、色収差の補正のためには波長の範囲、あるいは、温度変化の許容増大のためには、対象の温度範囲などが挙げられる。瞳関数とコンボリューションカーネルを同時に最適化することの最大の利点は、そうすることによって設計者のもつ自由度が増え、したがって、従来の最適化法では得られなかったような、広い範囲での設計解の探索が可能となることである。このような一体的な最適化が可能となった背景には、電子技術の発達により低いコストで、非常にパワフルなコンピューターが容易に使えるようになったこと、それに高画素数のデジタル画像を実時間で画像処理できるようになったことが挙げられる。

図2は、本技術を用いた結像システムを最適化するプロセスを示したダイアグラムである。プロセス全体は、複数のソフトウェアをリンクしながら用いられる、自社開発の最適化ソフトウェアによってコントロールされる。これにより、設計者は光学系と画像処理系を同時に一体的に最適化することが可能となる。デザインの流れは次のようになる。まず、ベースとなるレンズの設計を、従来から使われている光学設計ソフトウェア（Zemax や CODE V など）を用いて行う。このレンズは無収差である必要はないが、設計解の探索範囲を大きくし過ぎないために、最終的な解に近い状態になっていることが望ましい。次に、光線追跡を用いて、このレンズによる結像シミュレーション像が得られ、さらに、この像は、使用される受光素子の物理的特性（例えば、リードノイズやフルウェル量、画素ピッチ、フィルファクター、クロストーク、固定パターンノイズなど）に基づいた数値モデルにより、サンプリング処理、検知処理が行われる。この検知された像に対して、実際の製品等で施されるのと同じ内容の画像処理が行われる。この

\*3 TrueFocus<sup>®</sup> は、Ominivision Technologies 社の登録商標。

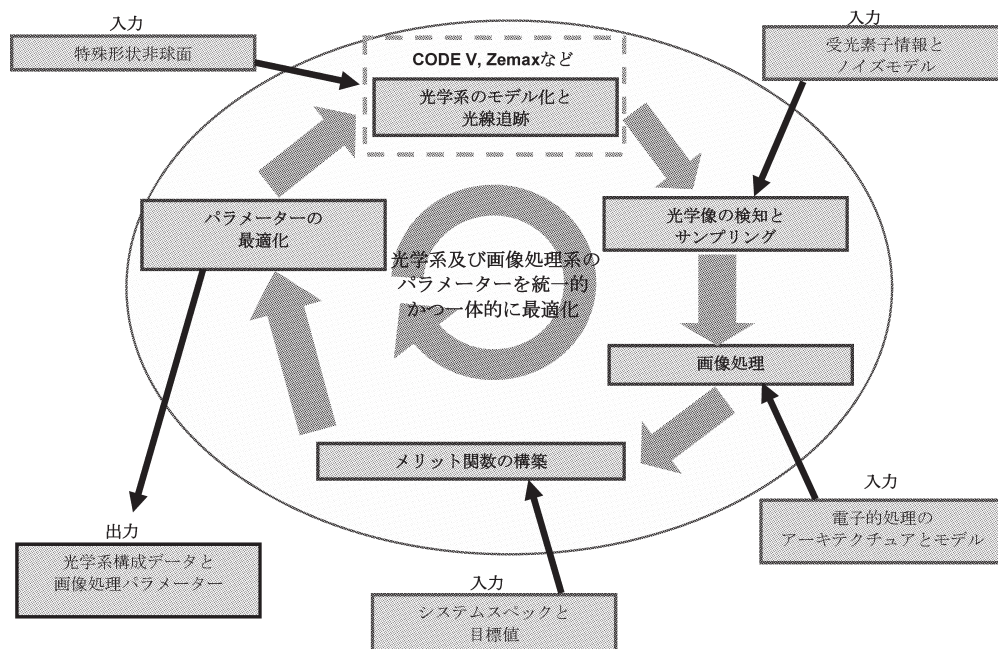


図2 システムの最適化設計プロセスを示すダイアグラム。

画像処理には、デコードによる復元処理はもちろんのこと、受光素子の固定パターン・ノイズ除去、ホワイトバランス、色補間、ガンマ補正、コントラスト強調、非線形処理によるノイズ除去、像のスケージング、出力のフォーマッティングなどが含まれる。

もちろん、この画像処理の内容は、そのシステムのゴールが何かによって、すなわち、例えば、デジタルカメラや携帯電話用カメラモジュールのように、画像を人間が目で見ると、バーコードリーダーやOCRのように機械的読み取りシステムの場合とでは、当然異なってくる。どちらの場合も、設計者は設計結果の品質に比例した何らかの数値を評価量として受け取るようになっている必要があり、その数値は、システム全体の最適化時のメリット関数を構成するものである。

このようにしてメリット関数が定義されたならば、最適化に移る。この際、光学系の入射瞳（絞り）またはその近傍のレンズ面に、Wavefront Coded面を定義する。この面は、既存のレンズ面上に定義することもできるし、また、新たに平行平板等を挿入し、そこに定義することも可能である。この、瞳に変調を与える（波面のコード化を行う）ための特別な面は、数学的関数として、あるいは、数値的に定義することが可能であり、種々の面形状が考えられている。最適化時の変数は一般的に光学系における変数と、画像処理系における変数で構成される。光学系の変数は、レンズを構成する要素（面曲率や厚みなど）とWavefront Coded面の関数係数である。画像処理系の変

数は、デコードのためのコンボリューションカーネルなどである。

上記のように、ベースとなるレンズデータから開始し、目標の結果が得られるような光学系変数（Wavefront Coded面を含む）と画像処理系変数の組み合わせが得られるまで、最適化のサイクルを回すことになる。

## 2. Wavefront Coding 技術による被写界深度の拡大

深度を拡大するためのWavefront Coding技術の使用については、各種参考文献<sup>1,2,9-14)</sup>で詳述されている。物理数学的にいえば、本技術は、瞳関数から求められるアンビグイティー (ambiguity) 関数が、デフォーカスと空間周波数をパラメーターとした、インコヒーレントOTF (MTF) の極座標表示<sup>15)</sup>である、という事実に基づいている。もともとはレーダー技術における信号処理<sup>16)</sup>から生まれた、このアンビグイティー関数表示から、アンビグイティー、逆にいえばデフォーカスの関数であるMTFを、広域に広げるという発想が生じ、瞳関数に三次関数的位相を付加してMTFを広げ（したがってMTFの値自体は低下する）、その後デジタル処理でコントラスト (MTF) を復元することで深度拡大が実現可能であるという、はじめての結果につながった。付加する位相としては、この三次関数形状に続き、その後種々の関数系が考案されている。

従来の考え方では、光学設計者はシステムの明るさと深度の増大というトレードオフと直面することとなる。すな

わち、従来は深度を拡大するためには絞りを絞り込む必要があり、その結果、解像力の低下、集光能力の低下を招いていた。しかし、本技術を用いたシステムでは、瞳関数に多少の位相変調が必要なだけで、集光能力の低下がなく、また本質的に解像力の低下も生じない。ただ、コントラスト復元の過程において、センサーノイズも増幅されるので、実際にベースとなるレンズに比べてどの程度深度を拡大させるかについては、このノイズゲイン<sup>17)</sup>とのトレードオフとなる。

深度拡大が可能となる類似の技術として、例えば masked aperture technique<sup>18-20)</sup> や light field camera<sup>21-23)</sup> などの、いわゆるインテグラル・フォトグラフィーの範疇に入る技術が報告されている。Wavefront Coding 技術がデフォーカス、すなわち像空間の位置に依存せず、均一な光学特性を実現しようとする技術であるのに対し、インテグラル・フォトグラフィー技術では像面における光線の情報が、その位置だけでなく、角度としても得られるので、後段の処理において、それぞれ次元数 2 をもつ位置および角度情報<sup>24)</sup> を使うことで、さまざまな像状態を構築することができる。例えば、システム構成に依存して制限はあるが、物体面の位置とパースペクティブを変化させた像を得ることができる。深度を増大させた画像は、複数の物体面からの像を復元、構成することで得られることになる<sup>21)</sup>。このような強力な機能は、しかしながら、使用されるハードウェアに依存して、犠牲となる点が生じ、また空間的分解能も犠牲となる。

masked aperture technique では、バイナリー、またはグレイスケールの透過率分布型マスクが光路中に挿入され、そのマスクによって光が強度変調を受ける。もし、マスクが光学系の絞りの位置に置かれたならば、瞳関数が変調を受け、結果として像面での深度拡大が実現される。しかし、これはマスクによる光のロスおよび解像力の低下を招く。絞りを絞り込む、という一般的操作も、この手法の特殊ケースと考えられる。また、空間周波数的に狭帯域のマスクを像面近傍に配置し、得られた像に対して通信系で行われるのと同様のヘテロダイン処理を行うことで、前記の位置、角度情報が得られるが、これについての詳細は、文献 18 を参照されたい。

一方、light field camera では、複数のレンズ、あるいはとんぼの複眼のようなレンズアレイを用いて、物体空間に対する複数の画像を、異なる角度から同時にとらえる。記録後、同じレンズアレイを通して、もとの物体空間の立体情報を再現できるので、立体テレビにも応用が検討されている技術である。像面での光線の位置と角度が記録され

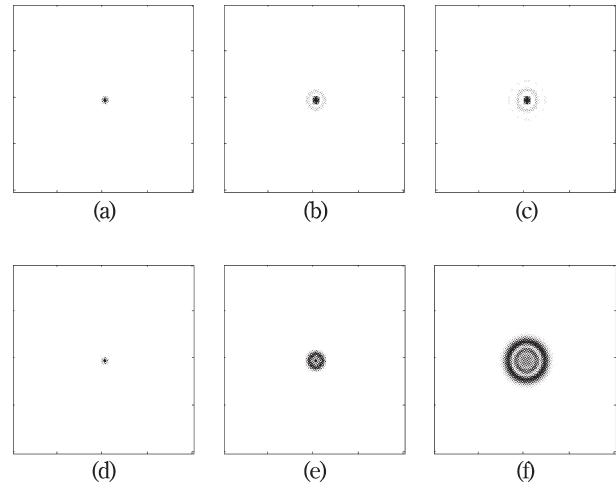


図3 被写体距離による画像処理後のPSF比較。(a) 本カメラモジュール無限遠、(b) 本カメラモジュール中間距離、(c) 本カメラモジュール近距離、(d) 通常カメラモジュール無限遠、(e) 通常カメラモジュール中間距離、(f) 通常カメラモジュール近距離。

ているので、記録後の処理によって、任意の物体面にフォーカスを合わせた像を得ることが可能となり、深度拡大が実現できることになる。しかしながら、1つの画像センサー上に、この複数のレンズによる画像が多数個並んでできるので、このレンズの個数に反比例して解像度が低下するという欠点がある。

また、どちらの技術も、本 Wavefront Coding 技術での  $S/N$  比よりもよい値は得られない。

図3に、本 Wavefront Coding 技術を用いた場合と用いない場合の、PSFの比較を示す。これらは、光学系のPSFに、通常のデジタルカメラモジュールで行われる、センサーピクセルによるサンプリング、および第1章で記述したような画像処理を施したシミュレーション結果である。本技術を用いた例では、コード化された瞳関数のデコード処理も行われている。(したがって、光学的な意味でのPSFでなく、それに画像処理を加えた後の点像の形を意味しているが、ここでは便宜上、PSFとよぶ。)なお、この例は、実際に設計、製作された小型カメラモジュールのものである。この TrueFocus とよばれるモジュールについては、次章で詳述する。

図3(a)は、本 TrueFocus カメラモジュールの、被写体距離無限遠におけるPSFを示す。図3(d)の通常カメラモジュールのPSFと比較すると、両者は非常によく似ている。両者ともPSFのエネルギーが中心にコンパクトにまとまっている。通常モジュールの光学系では、無限遠で光学性能がベストとなるよう設計されているので、当然の結果である。

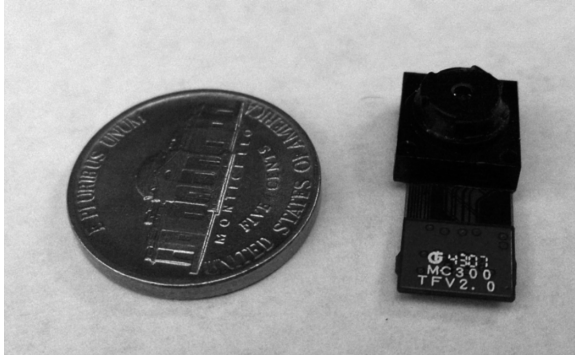


図4 TrueFocus 小型カメラモジュールの外観写真。

次に、図3(b)に、中間被写体距離における本モジュールのPSFを示す。この距離は、通常モジュールでオートフォーカスを用いない場合、無限遠方にフォーカスを合わせた際の被写界深度限界程度の距離である。本モジュールのPSFは、無限遠時のPSFとほぼ同一であるのに対し、図3(e)の通常モジュールのPSFは、依然コンパクトなもの、無限遠のPSFと比べると明らかにフォーカスがずれているとわかるくらいに広がっている。

図3(c)には、近距離における本モジュールのPSFを示す。名刺や高解像度バーコードなどの撮影を想定した近距離を選んでいる。PSFは、この近距離でも無限遠や中間距離におけるものと非常に似ており、無限遠方から近距離まで、同一のデコードフィルター（コンボリューション・カーネル）が使用可能であり、しかも、高い結像性能が達成されていることがわかる。一方、図3(f)に示される通常モジュールのPSFは、大きく広がっており、画像としては完全にぼけていることがわかる。

このように、本モジュールでは、光学系の瞳関数のコード化および後段の画像処理におけるデコード化により、無限遠方から近距離の広い被写体距離範囲にわたって、通常モジュールのベストフォーカス位置におけるPSFとほぼ同じレベルのPSFを得ることが、すなわち広く拡大された被写界深度を得ることができる。

### 3. TrueFocus 小型カメラモジュール

近年、デジタルカメラを組み込んだ携帯電話が普及してきているお陰で、小型カメラモジュールの設計および大量生産という観点からは、大きな変革がみられる。この変革の背景には、低コストの、小型で高解像度、高性能のCMOSセンサーの開発、それに低コストで高品質の成型プラスチックレンズの開発があろう。さらに、CMOS技術の発達により強力な画像処理パワーも自由に使えるようになってきている事実も存在する。この光学技術と画像処理技

術の高いレベルでの融合は、システム設計者に十分なツールを与えるという意味で、本Wavefront Coding技術のようなコンピュータシミュレーション・イメージング技術に大きな利益をもたらすものである。逆に、小型カメラモジュール側からみると、本技術を採用することで、より広い深度を得る、という利益を受けることになる。結像システムが広い深度をもつことと、オートフォーカス機能をもつこととは、当然ながら同じことではない。両者の併用でより大きな利益が得られるかもしれないが、基本的には、両者は競合するものであり、この点は本技術が小型カメラモジュールにとって、新しい領域での可能性を示しているともいえる。

最近の受光素子における画素ピッチの低下は、カメラモジュールに大きな利益をもたらしていると考えられる。すなわち、モジュールの大きさ（体積、長さ）を増大させることなく総画素数の増加を可能としている。デジタル結像システムの焦点深度は、（ピクセルピッチ）×（光学系のFナンバー）で与えられるが<sup>25)</sup>、この両者がどんどん小さくなるに従って、深度も減少することとなり、広い被写体範囲にわたって高い結像性能を維持するためには、一般的にはオートフォーカス機構が必須となってくる。

しかし、オートフォーカスは、1) 対象となる被写体までの距離の計測、および2) その距離へのフォーカス調節の、少なくとも2つのステップを必要とする。どちらのステップも、ある程度の時間が必要のうえ、誤差を生じることもあり、また特に携帯用のデバイスでは貴重なリソースである電力を消費する。時間が必要ということは、狙った瞬間や、狙った被写体を外すことにもつながる。さらに、オートフォーカスはモジュールのコストやサイズの増大を招き、信頼性の低下をも招く場合がある。このような理由から、モジュールのコストやサイズを増加させず、またメカ機構もないため信頼性の高い本技術が、広い被写体範囲にわたって高い結像性能を維持するための手段として、カメラモジュールにとっては非常に適していると考えられる。

図4は、CDM Optics社とOminivision Technologies社で共同開発された小型カメラモジュールの写真である。このモジュールは3メガピクセルのCMOSセンサー、画像処理チップ、それにプラスチック成型レンズを使用している。レンズの1面に、波面のコード化のため特別に設計された非球面が施されており、後段のデコード画像処理との組み合わせで、広い範囲にわたる被写界深度拡大を実現している。モジュールサイズは、8×8×6ミリ、レンズのFナンバーは2.8であり、無限遠方から10～12cm程度の近距離まで深度が確保されている。



図5 TrueFocus 小型カメラモジュールによる撮影例 (屋外).

#### 4. 画像サンプルとバーコードリーディング

これまで、デジタル画像の質を評価する尺度としてさまざまなものが提案されてきているが、まだ業界の標準として認知されている尺度はないように思われる。したがって、ここでは、実際のカメラモジュールで撮影されたサンプル画像を示すこととする。

図5は、屋外のシーンである。近景の噴水、背景の建物や陰のある木々、それに建物の後ろの明るい青空など、幅広い明るさの範囲、広い被写体の距離範囲、それに動きのある対象が含まれている。建物のエッジなどはくっきり再現されており、色にじみもない。背景の陰の部分におけるコントラストも高い。また、動いている噴水の水滴もぶれなくとらえられている。

図6は、室内のシーンである。暗い中でも、本モジュールが瞬間を遅れなくとらえていることがわかると思う。色再現は自然ではっきりしており、また、デコード画像処理によって画像に歪みが生じたり、偽像が発生したり、ということもない。

最後に、本モジュールがバーコードリーディングにも使用可能であることを示したい。図7 (a) は、本モジュールを用いて近距離で撮影された、二次元QRバーコードの像である。図7 (b), (c) に示される、市販の固定焦点タイ



図6 TrueFocus 小型カメラモジュールによる撮影例 (室内).

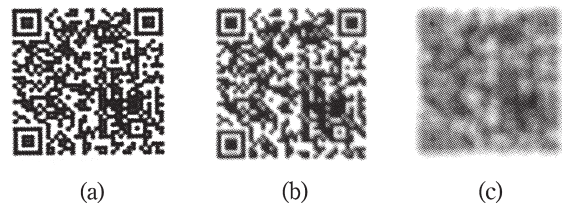


図7 二次元QRバーコードの撮影例. (a) TrueFocus 小型カメラモジュール, (b) 市販カメラのマクロモード, (c) 市販カメラの遠方被写体モード.

プのカメラモジュールで撮影された像と比べ、コントラストが高く、シャープなエッジの像が得られている。図7 (b) は、市販カメラモジュールのマクロモードで、(c) は通常 (遠距離被写体) モードで撮影されたもので、どちらもぼけており、正しく解読するには十分な像ではない。図3にPSFとして示されたように、本技術の採用で、非常に広い被写体範囲に対して高いコントラストと解像力が実現されており、その結果がごく近距離におけるバーコード解読をも可能としている。

Wavefront Coding 技術は、特別に設計された光学系とデジタル画像処理技術の組み合わせからなる、新しいコンピュータショナル・イメージング技術である。本稿では、その原理を簡単に示し、実際の設計の考え方を示した。より詳細については、文献を参照されたい。

本技術は、近年のエレクトロニクスの発達の恩恵に基づき、システム全体を統一的に最適化できる方法 (ソフトウェア) の開発により設計が可能になったもので、設計者に光学系の深度拡大のみならず、加工・組み立て誤差許容量増大という利益をもたらし、さらには設計の考え方そのものに新たな自由度をもたらすものである。

本稿では、本技術の応用例として、デジタルカメラモジュールを取り上げ、オートフォーカス機構が不要で信頼性が高く、シャッターラグのない、しかも広い被写界範囲にわたって高い画質が得られる小型モジュールが実現できることを示した。いうまでもなく、これらの利点は、あらゆる種類のデジタル結像システム（例えば、セキュリティーカメラ、車載用カメラ、電子内視鏡など）が享受できるものである。また同様に、バーコードリーダー装置、瞳や指紋を用いた生体認証システムなど産業分野におけるデジタル画像システムにも応用ができる。

本技術のような、光学技術と画像処理技術を高いレベルで融合した考え方は、今後、さまざまなデジタル画像システムにおいて、必要不可欠のものとなるであろう。

## 文 献

- 1) E. R. Dowski and W. T. Cathey: "Extended depth of field through wavefront coding," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 1859-1866.
- 2) W. T. Cathey and E. R. Dowski: "A new paradigm for imaging systems," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 6080-6092.
- 3) K. Kubala, E. Dowski, J. Kobus and B. Brown: "Aberration and error invariant space telescope systems," *Proc. SPIE*, **5524** (2004) 54-65.
- 4) H. Wach, E. Dowski and W. T. Cathey: "Control of chromatic focal shift through wavefront coding," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 5359-5367.
- 5) E. Dowski and K. Kubala: "Reducing size, weight and cost in an LWIR imaging system with wavefront coding," *Proc. SPIE*, **5407** (2004) 67-73.
- 6) W. E. Ortyn, D. J. Perry, V. Venkatachalam, L. Liang, B. E. Hall, K. Frost and D. A. Basiji: "Extended depth of field imaging for high speed cell analysis," *Cytometry A*, **71A** (2007) 215-231.
- 7) K. Kubala, H. Wach, V. Chumachenko and E. Dowski: "Increasing the depth of field in an LWIR system for improved object identification," *Proc. SPIE*, **5784** (2005) 146-156.
- 8) E. Dowski and K. Kubala: "Phone enables instant image capture," *Photonics Spectra*, **41**, No. 11 (2007) 62-65.
- 9) R. Narayanswamy, G. Johnson, P. E. X. Silveira and H. Wach: "Extending the imaging volume for biometric iris recognition," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 701-712.
- 10) R. Narayanswamy, P. E. X. Silveira, H. Setty, V. P. Pauca and J. van der Gracht: "Extended depth-of-field iris recognition system for a workstation environment," *Proc. SPIE*, **5779** (2005) 41-50.
- 11) E. Dowski, G. Johnson, K. Kubala and W. Cathey: "Lithographic systems and methods with extended depth of focus," U.S. Patent No. 7088419 (2006).
- 12) P. E. X. Silveira and R. Narayanswamy: "Signal-to-noise analysis of task-based imaging systems with defocus," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 2924-2934.
- 13) R. W. Hamming: "Error detecting and error correcting codes," *Bell Syst. Tech. J.*, **26** (1950) 147-160.
- 14) E. J. Tremblay, J. Rutkowski, I. Tamayo, P. E. X. Silveira, R. A. Stack, R. L. Morrison, M. A. Neifeld, Y. Fainman and J. E. Ford: "Relaxing the alignment and fabrication tolerances of thin annular folded imaging systems using wavefront coding," *Appl. Opt.*, **46** (2007) 6751-6758.
- 15) K. H. Brenner, A. W. Lohmann and J. Ojeda-Castafieda: "The ambiguity function as a polar display of the OTF," *Opt. Commun.*, **44** (1983) 323-326.
- 16) P. M. Woodward: *Probability and Information Theory with Applications to Radar* (McGraw-Hill, New York, 1953).
- 17) J. H. Ritzerfeld: "Noise gain expressions for low noise second-order digital filter structures," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, **52** (2005) 223-227.
- 18) A. Veeraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin: "Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing," *ACM Transactions on Graphics, PROC SIGGRAPH*, **26**, No. 3, Article 69, San Diego (2007) pp. 1-12.
- 19) A. Levin, R. Fergus, F. Durand and W. T. Freeman: "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture," *ACM Transactions on Graphics, PROC SIGGRAPH*, **26**, No. 3, Article 70, San Diego (2007) pp. 1-9.
- 20) A. Busboom, H. D. Schotten and H. Elders-Boll: "Coded aperture imaging with multiple measurements," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1058-1065.
- 21) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Stanford Tech. Report CTSR, **2005-02** (2005) 1-11.
- 22) P. Green, W. Sun, W. Matusik and F. Durand: "Multi-aperture photography," *ACM Transactions on Graphics, PROC SIGGRAPH*, **26**, No. 3, Article 68, San Diego (2007).
- 23) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and A. Yuyama: "Three-dimensional video system based on integral photography," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1072-1077.
- 24) G. Lippmann: "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," *J. Phys.*, **7** (1908) 821-825.
- 25) 例えば, W. J. Smith: *Modern Optical Engineering*, 3rd ed. (McGraw-Hill, New York, 2000) 154-157.

(2008年1月11日受理)