

色収差を利用した被写界深度拡大技術

江川 佳孝

Depth of Field Expansion Technology Using Chromatic Aberration

Yoshitaka EGAWA

As for the cellular phone, a thin camera module that does not use the automatic focus mechanism is requested. Therefore, EDoF (extended (enhanced) depth of field) technology is developed and it is introduced into the product. We developed WF (wide focusing) technology of extended depth of field using chromatic aberration. The WF camera module has expanded the depth of field by adopting the special optical lens with chromatic aberration and the new color filter array WWGR (white, white, green, red) and using the WF signal processing. The depth of field achieved infinity from 13 cm.

Key words: extended depth of field (EDoF), chromatic aberration, wide focusing (WF), special optical lens, color filter WWGR

携帯電話用イメージセンサーのカメラモジュールは、小型化と多画素化の要求から、画素サイズの微細化が進んでいる。この画素サイズの微細化は、光学レンズの焦点深度（許容範囲）を狭くするため、焦点深度が浅くなる。このため、一般的にはオートフォーカス（AF）が使われる。しかし、携帯電話の薄型化から、AFを使わないで被写界深度を拡大する EDoF (extended (enhanced) depth of field) 技術を搭載した小型のカメラモジュールが求められている。

この EDoF 技術は機械的な AF 機構を使わないため、① 小型、② 衝撃に強い、③ ピント調整によるタイムラグがないためシャッターチャンスに強い、④ AF の誤動作による不鮮明な画像（いわゆるピンボケ）がない、⑤ 移動物体に強い、⑥ AF 機構がないため低消費電力化ができる、さらに、⑦ レンズの F 値を小さくすることで高感度化が実現できる、などの多くの長がある。この EDoF 技術には、古くからいろいろな手法が提案されている¹⁻⁵⁾。携帯電話では、2009年2月に Nokia 社から初めて EDoF 技術を搭載した N5630 が発売された。

この EDoF 技術には、イメージセンサー出力信号の低ノイズ化処理と、光学的にぼけた画像を鮮鋭化するための鮮

鋭化処理などの重要な基本技術が含まれる。このため筆者らは、2007年4月に EDoF 技術の開発に着手し、独自の wide focusing (WF) 方式を開発した⁶⁾。この WF 方式では、光学レンズの色収差特性を積極的に利用している。一般的な単板カラーカメラの色フィルター配列は、 2×2 の対角に G (緑)、他を R (赤) と B (青) を配置した Bayer 配列が主流となっている。鮮明な画像を得るための解像度信号は、市松配置の G 信号から得ている。まず、市松状の G 信号を補間処理 (R, B 画素位置に G 信号を生成する) する。次に、輪郭補正回路にて G 信号より輪郭信号を抽出し、輝度信号に加算する。そして、良好な鮮鋭度となるように輪郭信号量を調整している。一方、WF 方式では、色収差特性を生かすために、解像度信号として W (透明) 画素を採用した。この W 画素の信号には、R, G, B の3つの信号が含まれる。そこで、光学レンズの焦点距離を各 R, G, B の波長で異ならせることで、被写界深度を拡大した信号を W 画素から得られるようにした。今回、新たな色フィルター配列として、 2×2 の対角に W、他を G と R を配置した WWGR 配列を採用した。

WF 方式では、色収差特性が大きくなるように設計した特殊な光学レンズと新たな WWGR 色フィルター配列と W

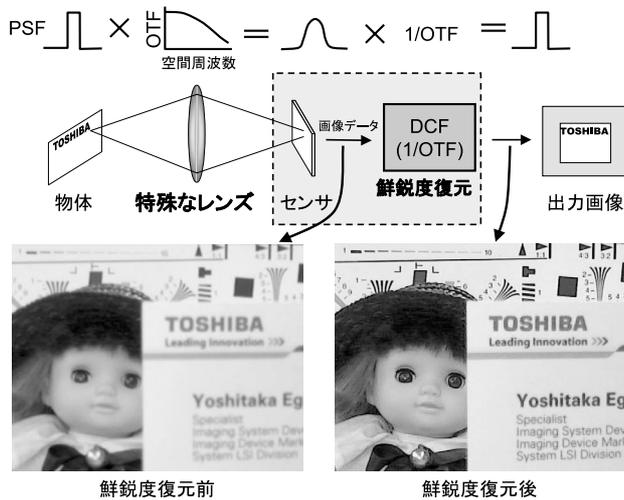


図1 EDoFの原理図。

画素のランダムノイズを低減するとともに、輪郭信号を鮮鋭化するための鮮鋭度復元 (wide focusing: WF) 処理回路により被写界深度を拡大した良好な画像を得た。本稿では、EDoFの原理と色収差レンズを利用したWFカメラモジュールの開発について紹介する。

1. 被写界深度拡大 (EDoF) の原理

図1にEDoFの原理図を示す。一般的なEDoFでは、被写界深度を拡大するための特殊なレンズを用いる。この特殊なレンズで得られる信号は、被写界深度を深くすることができる。しかし、解像度 (G) 信号から得られる輪郭信号量が小さくなり、ぼけ量が増加する。そのため、鮮鋭度復元処理回路では、画像データのぼけを低減させることで輪郭信号量を増加させ、被写界深度を拡大したシャープな画像を得ることができる。この鮮鋭度復元処理として、光学レンズの点像分布関数 PSF (point spread function) のフーリエ変換から求められる光学伝達関数 OTF (optical transfer function) を逆畳み込み変換 DCF (deconvolution filter) 処理することなどにより、物体の解像度を元に復元する手法が提案されている¹⁻⁵⁾。

図2に、EDoFのための3種類の特特殊な光学レンズを示す。図2 (a) のレンズは、球面収差特性を利用している。レンズのエリアを分割し、焦点距離を変えている。エリアは、多重円もしくは十字などの扇型に分割することができる。図2 (b) のレンズは、色収差特性を利用している。元来、レンズ設計では色収差が出ないように、色消しレンズと組み合わせて色収差を補正している。しかし、この色収差レンズは逆に、色収差を積極的に拡大するように設計する。図2 (c) は標準レンズに位相板を追加したレンズとなっている。このレンズには、色収差を低減した良好なレ

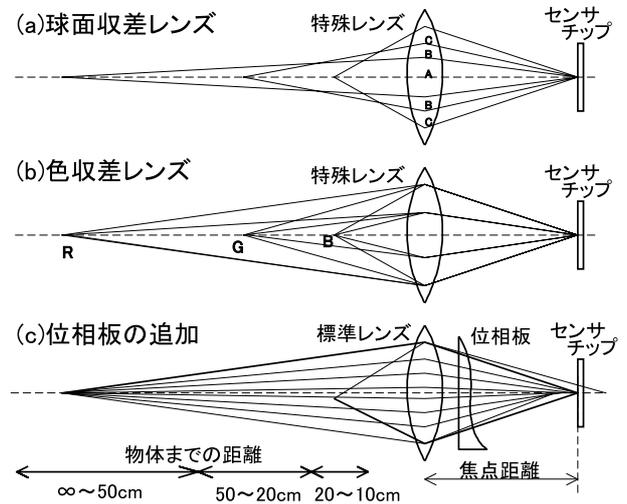


図2 EDoFのための特殊な光学レンズ。

ンズ特性を生かしたまま被写界深度を深くすることができる特長がある⁵⁾。これらの特殊な光学レンズは、近距離から遠距離まで焦点が合った信号と焦点が合わない信号が存在するため、全体的にぼけた画像となる。そこで、後段の鮮鋭度復元処理回路では、ぼけを改善するための鮮鋭度復元処理を実施している。

2. 色収差を利用した wide focusing (WF) 方式の特長

図3はWF方式のシステム構成図を示す。WF方式は、①特殊な光学レンズとして色収差を拡大した色収差レンズを用いている。②色フィルター配列にW画素を使った2×2画素のWWGR配列を用いている。③ぼけた解像度 (W) 信号を鮮鋭化するためのWF信号処理回路を有している。このWF信号処理の出力信号は、デモザイキングした一般的なRGB信号に変換している。後段では一般的なカラー信号処理 (ホワイトバランス, リニアマトリクス, ガンマ補正, 輪郭補正, YUVマトリクスなど) を実施している。カメラモジュールからは、RGBもしくはYUV信号を出力する。

色フィルターにBがないため、B信号は $B=W-G-R$ の演算処理によって生成している。通常、W信号からのRとG信号を減算した減算処理でB信号を生成すると、ランダムノイズは減算されずに加算されるため、SN比 (信号対ノイズ比) が大幅に劣化する。しかし、今回開発したWF信号処理では、SN比の劣化を抑えたB信号の生成処理を実施している。

開発したWF方式には3つの特長がある。

2.1 特長1: WWGR色フィルター配列による解像度劣化のない被写界深度の拡大

図4 (a) は色収差レンズで得られるPSF特性、図4 (b)

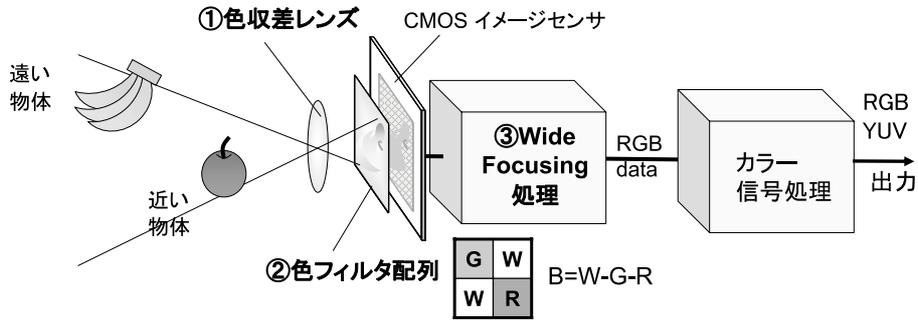


図3 WF方式のシステム構成図.

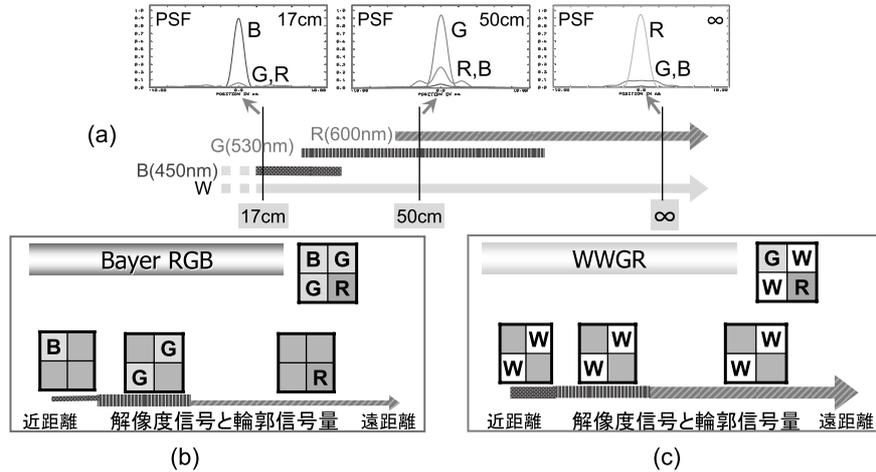


図4 WF方式の特長1: (a) 色収差レンズで得られるPSF特性, (b) Bayer配列から得られる解像度信号と輪郭信号量, (c) WWGR配列から得られる解像度信号と輪郭信号量.

は Bayer 配列から得られる解像度信号と輪郭信号量 (B と R 画素から解像度信号を得たとして), 図 4 (c) は WWGR 配列から得られる解像度信号と輪郭信号量 (W 画素からのみ解像度信号を得ている) の違いを示している. WF 方式では色収差レンズを使い, 図 4 (a) に示すように, 各 RGB の分光特性の感度ピークの波長となる B 信号 450 nm, G 信号 530 nm, R 信号 600 nm に対して, B 信号 17 cm, G 信号 50 cm, R 信号無限遠となるようにレンズ設計をした. もし従来の Bayer 配列に適用した場合, 図 4 (b) に示すような解像度の低下が生じる. 近距離と遠距離では, B 信号もしくは R 信号の 1 画素からしか解像度信号が得られない. そのため, 中距離の G 信号に対して解像度が 2 分の 1 に低下する. さらに中距離から近距離もしくは遠距離と変化する領域では, 解像度信号の位置が G 画素から B 画素もしくは R 画素と位置がずれるため, 解像度の不連続が発生する. しかし, 図 4 (c) の WWGR 配列では解像度信号を W 画素から得ているため, 近距離から遠距離まで 2 画素の解像度信号を得ることができる. さらに, 近距離中距離遠距離と変化しても, W 画素から得られる解像度信号の画素位置は変化しない.

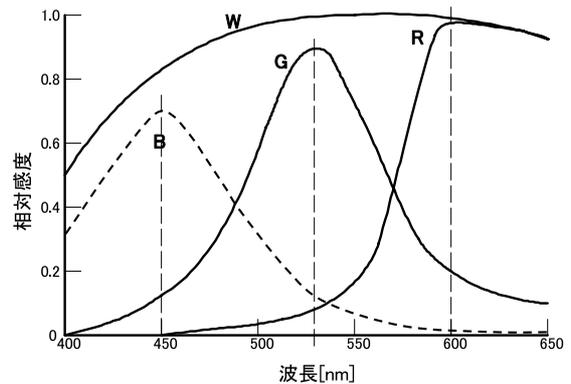


図5 WF方式の特長2: WGRの分光特性.

2.2 特長2: W画素による輪郭信号量の増加

図5は色フィルター WWGRの分光特性を示している. 色フィルターは3種類のW, G, Rを用いている. R画素G画素の色フィルターは, 従来の Bayer 配列と同等の分光特性となっている. W画素は色フィルターが透明なため, 白黒の特性と同じになっている. W画素は色フィルターによる損失がないため感度が約10%高い. さらに, 分光特性を積分したW画素の信号量は, G信号量の約2倍が得られる. このため, 解像度信号をW画素から得るこ

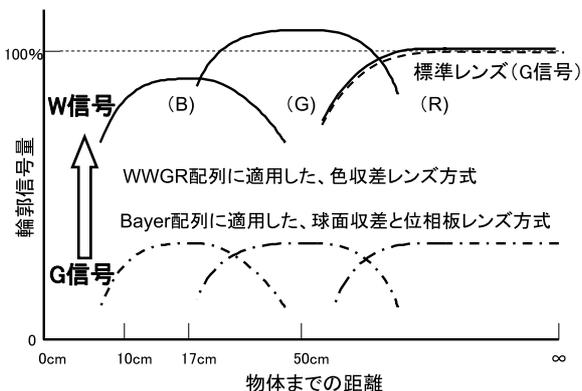


図6 WF方式の特長2: EDoFレンズで得られる輪郭信号量の物体までの距離依存性。

とで、白黒の被写体では従来の Bayer 配列の G 信号に対して約 2 倍の信号量が得られる。

図6は、EDoFレンズで得られる輪郭信号量の物体までの距離依存性を示している。従来の標準レンズを使った解像度(G)信号から得られる輪郭信号レベルを100%に正規化している。球面収差や位相板(擬似的に3分割したとして)レンズ方式の場合、解像度(G)信号から得られる輪郭信号量が3分割されるため、輪郭信号量は3分の1に低下する。そのため、標準レンズと同じ鮮鋭度を得るためには、輪郭信号を3倍に増幅する必要がある。しかし、輪郭信号に含まれるランダムノイズやショットノイズも3倍に増加するため、SN比が劣化する。すなわち、一般的なEDoF技術は被写界深度を拡大するとノイズが増加する欠点がある。よって、後段の鮮鋭度復元処理回路で、いかに解像度(G)信号に含まれるノイズを低減し、ノイズの少ない輪郭信号を抽出することができるかが重要な技術となる。

筆者らは、この輪郭信号量自体を増加させるために、W画素を採用した。例えばW画素から得られるB、G、Rの信号比を0.8:1:1とすると、図5に示すW画素自体の10%(BとG領域)の高感度化と、各色の信号を分割せずに輪郭信号を得ているため、近距離(B信号領域)で0.88、中距離(G信号領域)で1.1、遠距離(R信号領域)で1.0と他のEDoF方式に対して大きな輪郭信号量を得ることができる。

2.3 特長3: 色収差レンズにより異なる距離情報を有する色信号

EDoF技術では近くから遠くまで焦点が合うため、AF機構を必要としない。しかし、立体感がなく平面的な画像になる欠点がある。図7は開発中の焦点位置をデジタル的に制御できるデジタルAF処理の原理を示す。色収差レンズで得た各色信号には、異なった距離情報が含まれる。得たい距離位置に応じて解像度(W)信号から輪郭信号を抽出し精鋭化処理することで、デジタルAFが実現できる。

近距離では、W画素から得た輪郭信号から、各G画素とR画素から得た輪郭信号を減算することで、近距離の輪郭信号のみを抽出することができる。また、中距離では、G画素から得た輪郭信号とW画素から得た輪郭信号をAND処理することで、中距離の輪郭信号のみを抽出することができる。同様に遠距離では、R画素から得た輪郭信号とW画素から得た輪郭信号をAND処理することで遠距離の輪郭信号のみを抽出することができる。このデジタルAFが実現できれば、機械的なAF機構がなく、必要なピント位置以外をぼかすことができる、小型で高速のAF

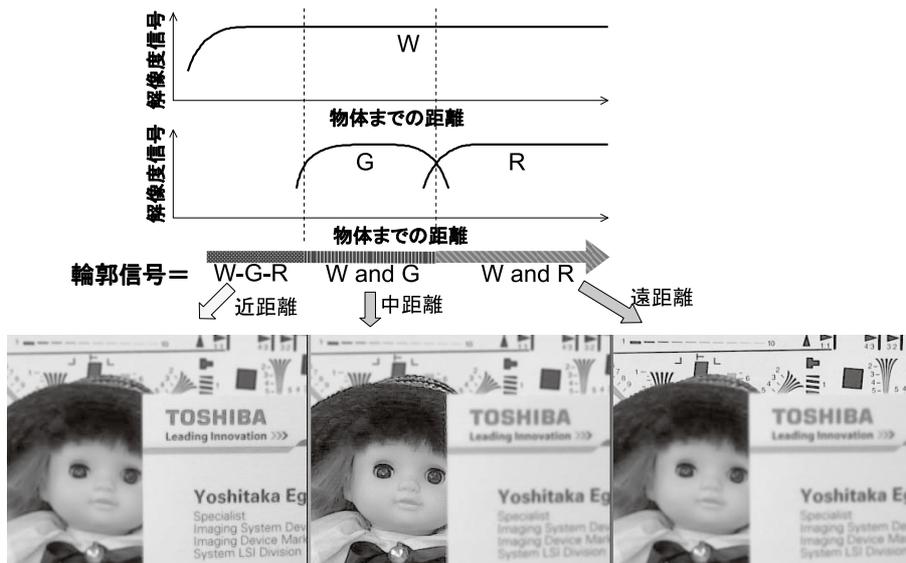


図7 WF方式の特長3: デジタルAFの原理図。

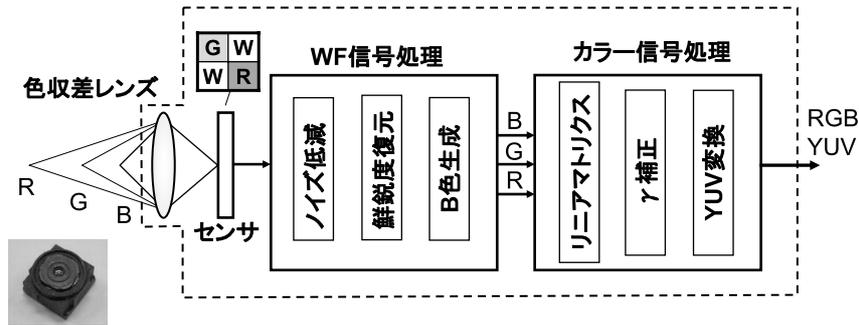


図8 WFカメラモジュールの外観写真と構成図.

表1 WFカメラモジュールのおもな仕様.

光学サイズ	1/4 インチ
有効画素数	2056 (H) × 1544 (V)
画素サイズ	1.75 μm × 1.75 μm
フレームレート	15 fps (JPEG)
出力形式	YUV 422, RGB 565
モジュールサイズ	8.0 × 8.0 × 5.5 mm
F 値	2.4
水平画角	57 度
レンズ構成	3 枚 (プラスチック)
焦点距離範囲	13 cm ~ ∞

動作が実現できる.

3. WFカメラモジュールの開発と結果

図8はWFカメラモジュールの外観写真と構成図を示している. 光学レンズに色収差レンズを採用した. CMOSイメージセンサーの色フィルター配列は2×2画素のWWGRとした. WF信号処理では, ノイズ低減能力を改善した新しいノイズ低減と, 色収差レンズでぼけた解像度(W)信号を精鋭化する鮮鋭度復元処理とB信号のB色生成処理($B=W-G-R$)を実施している. WF信号処理ではデモザイキングしたRGBを出力する. 後段のカラー信号処理は, 一般的なカラーカメラの信号処理と同様に, リ

ニアマトリクス処理, ガンマ補正, YUV変換回路などを有している. 表1に試作したWFカメラモジュールのおもな仕様を示す. 光学サイズは1/4インチで, 画素サイズは $1.75\mu\text{m} \times 1.75\mu\text{m}$, 画素数は320万画素, レンズ絞りF値は2.4, 水平画角57度で3枚のプラスチックで構成されている. 焦点距離は13cmから無限遠を実現した.

図9は実測した解像度(SFR)特性の比較結果を示している. WF方式のカメラモジュールでは, 被写界深度を拡大した13cmから実用レベルの解像度が得られた.

図10は市販されている携帯電話のカメラとのSN比比較結果を示している. センサーの動作周波数は7.5fpsで, 画素サイズは $1.75\mu\text{m}$, 画素数は320万画素, 被写体照度は 10Lx と低照度時のマクベスチャートを撮影した. WF方式はB信号で大幅なSN比劣化の可能性があるが, B信号のSNRは -1.3dB の低下に抑えることができた. 一方, G信号と輝度(Y)信号は約 $+3\text{dB}$, R信号は $+6\text{dB}$ とよい結果が得られた.

本稿では, EDoF技術の原理と色収差レンズを利用したWFカメラ技術について述べた. このWFカメラモジュールでは, 光学レンズの色収差特性を利用することで, 被写

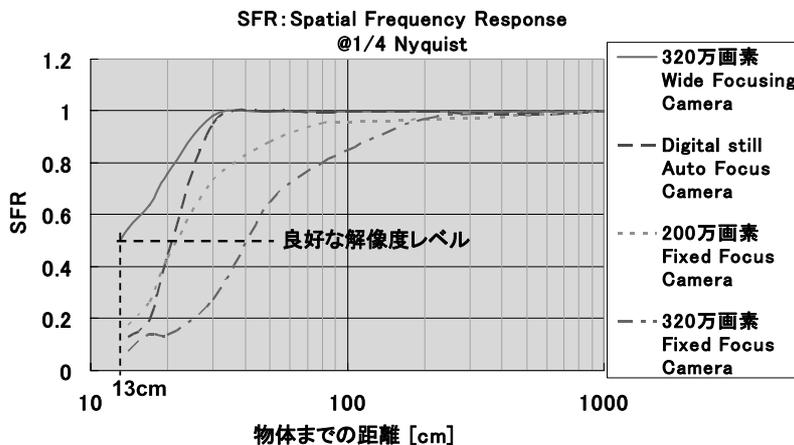


図9 解像度(SFR)特性の比較結果.

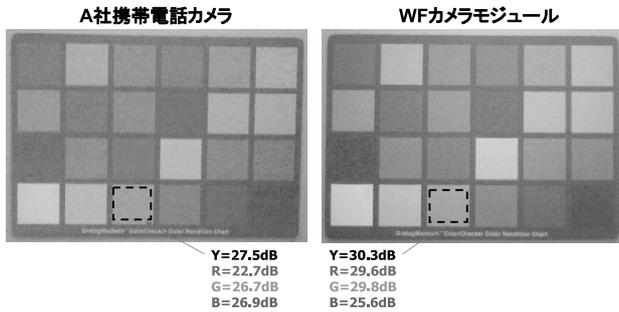


図10 被写体照度 10 Lx 時の SN 比比較結果.

界深度を深くできることを実証した。さらに、W 画素を用いることで、近景から遠景まで連続的で良好な解像度特性と SN 比を得ることができた。

今後、近距離 10 cm の実現や、高感度化のためのレンズ絞り $F2.0$ 化、さらには、本方式を発展させた焦点位置が調整できるデジタル AF の開発などが期待される。

本稿は、日本光学会第 35 回光学シンポジウム予稿集 (2010) 講演番号 17 「被写界深度を拡大したカメラモジュールの開発」 pp. 47-52 を元に執筆した。

文 献

- 1) M. Mino and Y. Okano: "Improvement in the OTF of a defocused optical system through the use of shaded apertures," *Appl. Opt.*, **10** (1971) 2219-2225.
- 2) J. Ojeda-Castaneda, R. Ramos and A. Noyola-Isgleas: "High focal depth by apodization and digital restoration," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 2583-2586.
- 3) 河田 聡編：超解像の光学 (学会出版センター, 1999).
- 4) 江口満男："虫眼鏡でナノの世界を見る", *O plus E*, **28** (2006) 285-293.
- 5) 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", *映像情報メディア学会誌*, **63** (2009) 279-283.
- 6) 江川佳孝, 飯塚智明："CMOS イメージセンサ Dynastron™ とカメラモジュール", *東芝レビュー*, **63**, No. 7 (2008) 22-26.

(2011 年 5 月 17 日受理)