

デジタルカメラの光学系とその周辺技術

三 原 伸 一

Optical Systems for Digital Cameras and Related Technologies

Shinichi MIHARA

Recently, several technologies for digital cameras have improved still more, for example, designing of high capable zoom lenses, processing of high accurate aspherical lenses, diffractive optical lenses, thin optical low pass filters, miniature actuators, fine image sensors, wide liquid-crystal displays, fast auto focusing technologies, image stabilizing technologies, several kinds of correcting and retouching technologies of pictures, and so on. I'm going to explain about the latest trends of the optical technologies on each categories of digital cameras, single lens reflex type, all in one high grade type, conventional compact type, thin body type and cellular phone with camera function.

Key words: lens type, aspherical lenses, diffractive optical lenses, optical low pass filters, finders

デジタルカメラ市場は1995年以来成長が続き、2002年には年間出荷台数が全世界で約2500万台に達し、ついに銀塩フィルムカメラのそれ(約2400万台)を上回った。それまでコンパクトタイプのカメラを中心に伸びてきた本市場も、2003年にはレンズ交換式デジタル一眼レフレックスカメラが20万円を切ったことも相まって出荷台数がさらに伸び、2004年には全体で約6000万台という予測が出ている(カメラ映像工業会調べ)。加えて、メガピクセルカメラ付き携帯端末機市場も急成長中である。本稿では、デジタルカメラの光学系を中心に、最近の技術動向についてカテゴリー別に述べる。

1. レンズ交換式一眼レフレックスカメラ¹⁾

基本的に、以下の2つに分けられる。

1. 銀塩フィルムカメラの顧客を考慮して、レンズなどの従来システムを資産として流用できるカメラ。多くは、35mmフィルムのフルサイズ、あるいはAPS(advanced photo system)とほぼ同じ有効画面サイズの撮像素子を使用している

2. 固体撮像素子諸特性を含め、デジタルに特化して最適化をはかるために、レンズ群など新しくシステムを起し直したカメラ

画素数は現在410万~1370万程度(特殊フォーマットでは2000万を超えるものもある)であり、撮像素子としてはサイズが大きいこのクラスでは、消費電力、処理速度、コストの点で有利なCMOS(complementary metal oxide semiconductor)系のものがよく採用されている。ノイズ面の欠点については、プロセスの改良や画像処理技術の進展などにより、問題ないレベルになってきている。また、システムとの整合性やQCD(quality, cost, delivery)を考慮し、各社独自タイプの撮像素子を開発し搭載している²⁾。

1.1 撮影レンズ

銀塩時代から発展してきた設計製造技術のうち、ここ最近注目されているのは、

- ・大口径非球面レンズ加工技術(成形, 研削, レプリカ)
- ・積層型回折光学素子³⁾

である。小型でかつ明るい F 値あるいは広画角とするために、各メーカーともに交換レンズへの非球面レンズの導

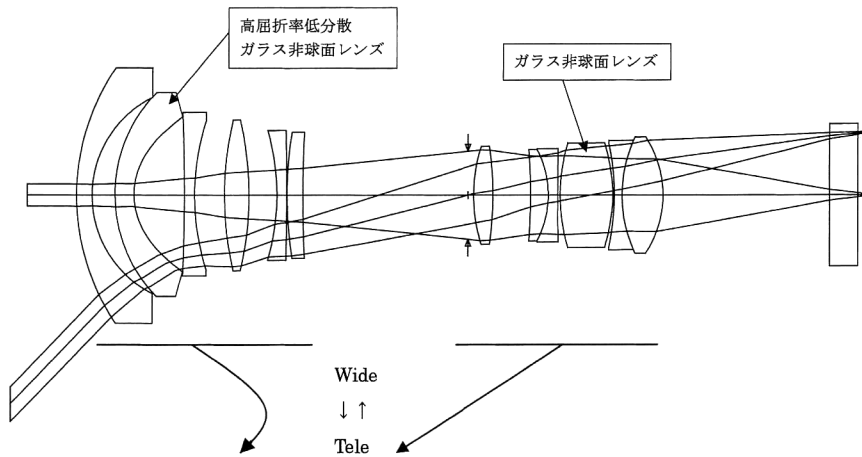


図1 オリンパス E-1用 $f=11\sim 22$ $F/2.8\sim 3.5$ (35ミリ判換算値 $f=22\sim 44$) の光学断面図。

入率が急増している。加工の難易度は要求精度だけではなく、径、形状、硝種にも大きく左右され、特に最近では、大口径化、急曲率深面化、高屈折率低分散化の傾向にある。要求精度面でも、面のイレギュラリティーや偏心公差、つまりデータム軸に対する面の傾き角や横変位は画素ピッチに比例して厳しくなる。積層型回折光学素子は不要次数光によるフレアがなく、通常の屈折レンズと逆の分散を有し、さらに蛍石以上の二次スペクトル補正能力を有する強力な色収差補正素子として注目されている。まず、400 mm $F 4.0$ クラスの明るい超望遠レンズに搭載されたが、最近では70~300 mm クラスのズームレンズ（いずれもキヤノン EF レンズ）に搭載されるなど、応用範囲が広がりつつある。

ところで、固体撮像素子を用いたときの課題として、シェーディングやモアレの発生がある⁴⁾。これらの課題については過去に何度か紹介してきたので詳細を割愛するが、モアレ防止用の光学的ローパスフィルター（以下、OLPF）はナイキスト限界周波数以下の重要な周波数成分のコントラストをも劣化させてしまうため、過去の銀塩用レンズによくありがちな、低周波特性が通常より低めで高い周波数までよく伸びているタイプのMTF (modulation transfer function) 特性を有するものに対しては、鮮鋭性の面で対策が必要な場合がある。なお、前記 OLPF を省くために、色フィルター配列を工夫したりフォトダイオード積層構造の撮像素子を採用したものもある（前者：コダック DCS Pro 14n, 後者：シグマ SD 10）。なお、OLPF として、従来の水晶に対して、厚さが約6分の1ですむニオブ酸リチウム結晶からなるもの（LN 素子）を用いたカメラも多い。

ところで、現状のレンズ交換式一眼レフレックスカメラはほとんど前記1のタイプであるが、前記2の数少ない例

としてオリンパス E-1 がある。これに採用された撮像素子は4/3型であるため「フォーサーズシステム」と呼ばれており、有効画面サイズは17.3×13である。したがって、交換レンズはすべて新設計である（たとえば図1）。

1.2 ファインダー

プロ・ハイアマ仕様の場合は、ファインダー視野率をほぼ100%とし、かつ視野角を極力大きくする必要がある。しかし、TTL (through the taking lens) ファインダーでは、撮像素子が小さい場合スクリーン像も小さくなるため、接眼系の倍率を高くするなりリレー光学系を挿入するなどして視野角を大きくしたり、スクリーンマットのレリーフピッチを像の大きさに比例して小さくするなどの対策をとっている。たとえば、オリンパス E-1 の場合、ピッチ幅 $20\ \mu\text{m}$ の変形六角形マイクロレンズで構成されたスクリーンを搭載している。

1.3 その他の注目すべき技術

レンズ交換式の最大の問題点は、レンズ交換時やフォーカルプレーンシャッターの作動などにより撮像素子近傍にゴミが付着しやすく、また、簡単には除去できない点である。そこで、シャッターと撮像面の間に、カメラ電源を入れると自動的に作動する超音波防塵フィルター（20 kHz）を設けたものもある（図2）。また、銀塩カメラ時代からの注目技術として、高速性が特徴の TTL 位相差検出方式のオートフォーカス、光学系の一部をシフトさせる方式の手ぶれ補正制御機構、超音波モーター駆動の高速アクチュエーターなどがある。さらに、銀塩カメラより不利とされるレリーズタイムラグも、このクラスでは0.04秒を切るものが出ており、ほとんど遜色はない。

2. レンズ一体型高級機

レンズ交換式一眼レフ並み、あるいはそれに準ずる画質

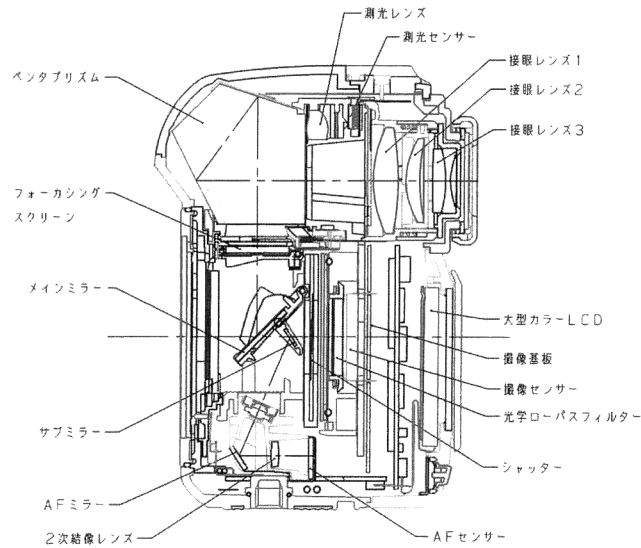


図2 オリンパス E-1 の概略断面図。

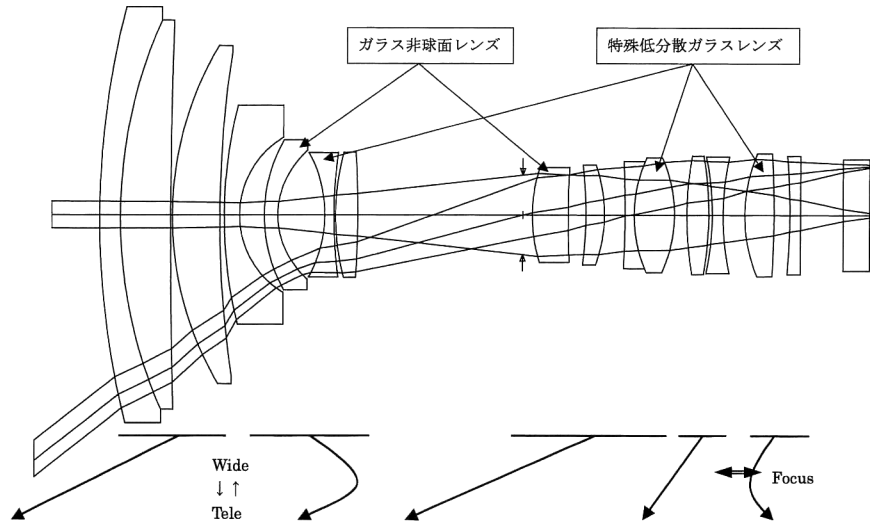


図3 オリンパス カメディア C-8080 Wide Zoom の光学断面図 (35 ミリ判換算焦点距離 $f=28\sim 140$ $F/2.4\sim 3.5$ 800 万画素)。

や機能を求めながら、コンパクト性、機動性、廉価性などを重視したカテゴリーである。撮像素子の有効画面サイズは、 8.8×6.6 (2/3 型) で画素数 $5\sim 8$ M^{*1}。撮像素子の色フィルターはおおむねベイヤー配列であるが、なかには、そのグリーンフィルターの半分だけ 20 nm 程度分光特性をブルー側にシフトしたエメラルドと称するフィルターに置き換えて、色再現の向上をねらったものもある (ソニー 4Color Super HAD CCD)²⁾。

2.1 撮影レンズ

いままで広角端がおおむね 35 mm 相当の画角であったが、最近では 28 mm 相当への広角化傾向にあり、ズーム比

も 3~4 倍から 5 倍以上への高倍率化傾向にある。高変倍率化のために、第 1 群目が収斂群のズーム形式を用いており、また広角端 28 mm 相当を実現するために、ズーミング時にはほとんどのレンズ群を移動している (図 3)。

2.2 ファインダー

このタイプのカメラの場合、ズーム比が大きく実像式ズームファインダーの実現が困難であるため、EVF (electronic view finder, 20 万画素程度) か TTL 光学ファインダーとなる。後者は見えは良いが、撮影レンズ設計上の制約が大きく、結局、前者を採用する場合が多い。

*1通常、画素数を百万単位で「1メガピクセル」といういい方をするが、本文では略して「1M」と表記したところもある。

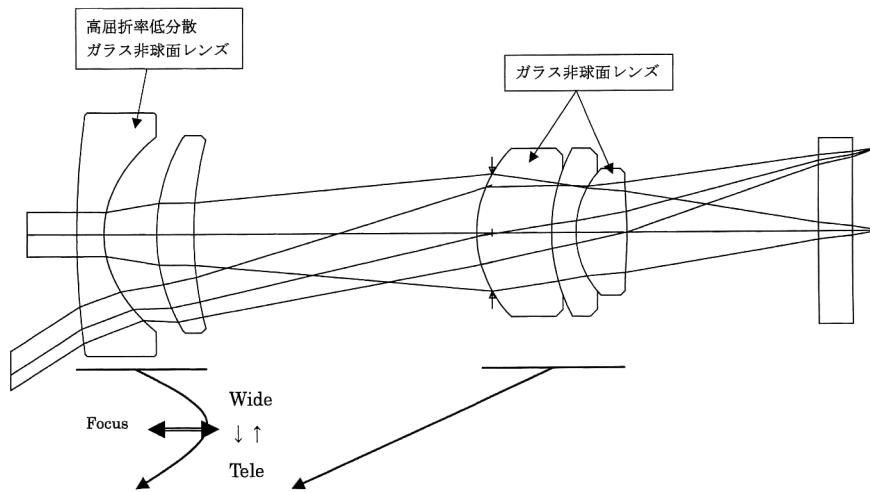


図4 オリンパス カメディア μ -25 Digital の光学断面図 (35 ミリ判換算焦点距離 $f=35\sim 105$ $F/3.1\sim 5.2$ 400 万画素).

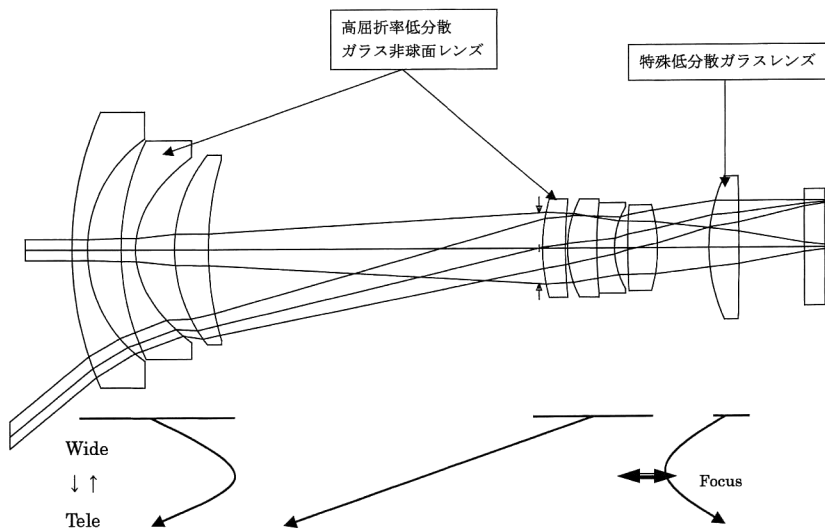


図5 オリンパス カメディア C-5060 Wide Zoom の光学断面図 (35 ミリ判換算焦点距離 $f=27\sim 110$ $F/2.4\sim 4.8$ 510 万画素).

2.3 その他の注目すべき技術

手ぶれ補正制御機構として、交換レンズ同様、電磁アクチュエーターによりレンズ系の一部をシフトさせる方式(パナソニック LUMIX FZ10 など) 以外に、圧電素子を用いて撮像素子をシフトさせる方式(コニカミノルタ Dimage A1) がある。オートフォーカス(以下、AF と呼ぶ)方式として、デジタルカメラの場合コントラスト検出方式が多く使われているが、これに外光パッシブ位相差方式を併用して高速化したタイプ(コニカミノルタ Dimage Z1, 富士フィルム Fine Pix S7000 など)もある。

3. コンパクトタイプ

スタイリッシュなデザインで、これまでのデジタルカメラ市場を牽引し、ひとつの完成の域に達した銀塩 LS カメラのデジタル版ともいべきカテゴリーである。2003

年現在、このクラスの撮像素子有効画面サイズは 7.2×5.4 (1/1.8 型) $\sim 5.3\times 4.0$ (1/2.7 型) 程度、画素数は 3 \sim 5 M, 画素ピッチは $2.8\sim 2.5\ \mu\text{m}$ であり、最近では $2.25\ \mu\text{m}$ ピッチの CCD を搭載したカメラも商品化されている。

3.1 撮影レンズ

光学仕様はズーム比 2 \sim 4 倍程度、広角端 F 値 2.8 程度が多く、小型化のために通常第 1 群目が発散群であるズーム方式を用い、近年特に進展の著しいガラス非球面レンズ成形技術と組み合わせて、さらなる小型化が進んでいる^{5,6)}(図 4)。また、広角端画角が 35 mm フィルム換算で 27 mm 相当の、4 倍ズーム付きの高機能高性能カメラも出てきている(図 5)。一方、第 1 群目が収斂群でかつ固定であるズーム形式を用い、非球面レンズや特殊低分散ガラスレンズを導入し、換算焦点距離 38 \sim 380 mm ($F/2.8\sim 3.7$) としたコンパクトな高倍率ズームカメラも出てい⁴⁾。

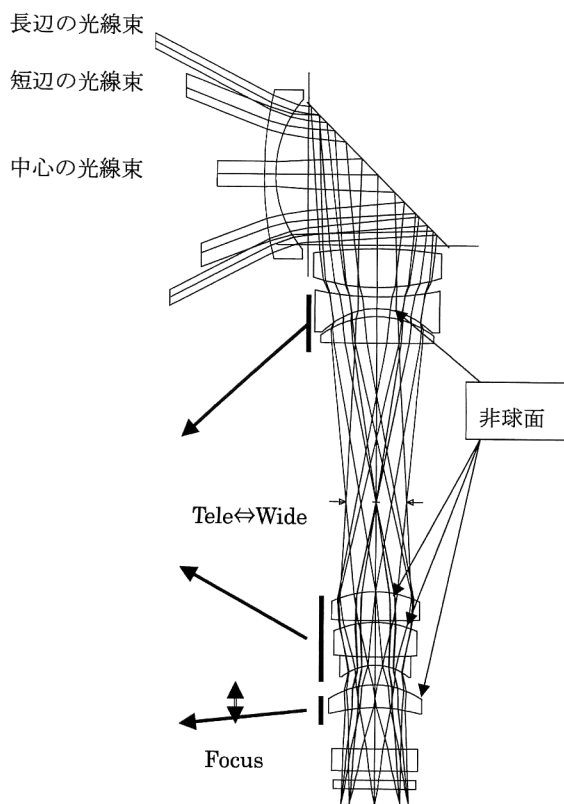


図6 光路折り曲げズームレンズの設計例 (特開2003-302576より).

3.2 ファインダー

ズーム比が5倍未満の場合は実像式ズームファインダーが採用されるが、5倍以上になると、2章2節と同様の理由でEVFが採用されている。なお、ほとんどのデジタルカメラには、背面に1.5~2.5型(約13万~21万画素)の液晶モニターが設けられており、撮影確認以外にファインダーとして使われるケースも多い。

3.3 その他の注目すべき技術

銀塩LSカメラに追いついていなかった技術として、生活防水機能搭載とシャッタータイムラグ短縮がある。前者は、オリンパスが μ -10 DIGITALではじめて実現した。後者については、最近まで1秒程度のタイムラグがあったが、銀塩LSカメラと同程度の0.2~0.3秒を切るレベルまで進歩した。なお、手ぶれ補正制御機構を入れたものも出ている(パナソニック LUMIX FX5)。

4. 薄型カメラ

35mmあるいはAPSともに、パトローネやフィルムサイズの制約から、厚み20mmを切ることはできなかった。しかし、デジタルカメラではそのような制約がないため、同等の画質で本体厚さ20mmを切ることが可能であり、すでに単焦点レンズ付きカメラでは、画素数3Mクラ

スで厚さ12mmを切るものが出ている(カシオ EXILIM EX-S3)。

4.1 撮影レンズ

ズームレンズの場合、電源切断とともにレンズユニットがカメラ筐体に引っ込む、いわゆる沈胴方式を用いているが、これだけではまだ不十分である。そこで最近では、

方式A: 物体光をレンズ系入射直後にミラーやプリズムにて折り曲げる⁷⁾

方式B: 光軸方向に沈胴収納するだけでなく、レンズ群の一部を光軸上から退避させて収納する⁸⁾

などを導入して、画素数4~5Mながら、あと一步で奥行き寸法20mmを切るところまできている(ソニー DSC-T1, カシオ EXILIM EX-Z4など)。方式Aは、奥行き方向を薄くするには最もすぐれた方法と考えられる。ただし、光学設計上の制約が多く、ズーム比や画角あるいはF値などの確保、折り曲げ後の全長や径(絞径を含む)、光学部品点数や非球面数の点で、解決すべき課題は多い(図6)。一方、方式BはAより厚いが、体積的には有利であり、構成枚数を増やさず、かつ相対偏心感を緩和するなどの光学設計解を得やすい。そのほか、光学系の小型薄型化への有効手段として、撮像素子への最適入射角度を大きくすることがあげられる(オリンパス μ -10 DIGITAL, ソニー DSC-T1など)。また、画素ピッチで決まる解像度の限界が光学系の回折限界に近くなったことと、薄型化推進のために、今後OLPFを搭載しない機種が増えると思われる。

4.2 ファインダー

本体がきわめて薄いため、視野角の大きな光学ファインダーを搭載することが困難である。したがって、搭載せずに液晶モニターをファインダーとするカメラもある。その場合、2.5型(約21万画素)など大型で高画素数のものを採用し、見やすくしている(ソニー DSC-T1など)。

4.3 その他の注目すべき技術

5章で述べるカメラ付き携帯端末機よりも小さく、かつ高画質高機能であることが大切であるため、特にアクチュエーターと高精度高密度実装技術の進展が今後のキーとなる。

5. カメラ付き携帯端末機

本市場は2001年より成長を始めたが、当時はCIF(11万画素)であった。以来、VGA(31万画素)を経て2003年春には130万画素のものが、そして、秋冬には200万画素のものが発売されている。まだ、同じ画素数の小型デジタルカメラに比べて解像感、エッジ強調の不自然さ、色再現の面でやや劣るが、なかには遜色ない画質、性能を有

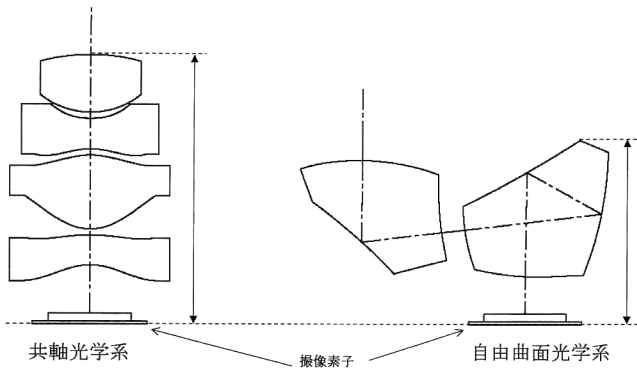


図7 自由曲面光学系と同等性能の共軸光学系との子午断面比較図 (35 ミリ判換算焦点距離 $f=35 F/2.8$).

するものも出てきており、デジタルカメラ市場の大衆層をしいに脅かしつつある。なお、撮像素子としては、VGA 以下では CMOS が多かったが、メガピクセルになってからは CCD が多くなっている。

5.1 撮影レンズ

光学系の奥行き方向を薄くするためには前群が正、後群が負のテレフォトタイプがよいが、レンズから画面周辺部への光線射出角度が大きくなりやすいので、最終レンズは光軸近傍が凹レンズ作用で、周縁部にいくほど凸レンズ作用になる特殊な形状としているものが多い。また、ほとんどの機種が、その光学系にナイキスト限界周波数以上の成分が少ないことを利用して OLPF を省略している。ところで、奥行き寸法を小さくするには、光路を折り曲げる方法も有効である。特に単焦点の場合、さらに反射屈折面を軸非対称に構成すると、厚さに有利だけでなく光学性能や部品点数の面で好ましい。この実例が、2004 年 1 月にオリンパスより発表されている。偏心系で発生する収差は、各光学面を回転非対称な形状とすることで補正でき、少なくとも数メガピクセルまでは対応できる結像性能が得られている (図 7)。一方、ズームレンズ付きの商品化も時間の問題であるが、発表されたモジュール部分のプロトタイプのうち、特にズームアクチュエーターとしてピエゾ素子⁹⁾

あるいは静電力を用いたものが注目されている。なお、低コスト性や量産性が普及型デジタルカメラ以上に求められるため、成形しやすい光学プラスチックレンズが多く用いられている。

5.2 ファインダー

覗き式を有するものはなく、既存の液晶画面をファインダーがわりに使用する。デジタルカメラでも最大級である、2.5 型を搭載したものもある。

5.3 その他の注目すべき技術

画素数が VGA クラス以下で有効撮像面サイズが $1/4 \sim 1/7$ 型だった当初は、被写界深度が深く、固定焦点あるいは 2 焦点位置切り替え式で十分であった。しかし、合焦操作が必要なメガピクセルになると、AF を搭載したカメラ付き携帯端末機が続々と登場しはじめた。そのアクチュエーターは、圧電方式、ボイスコイル方式、超小型ステッピングモーター方式と各社さまざまである。しかし、AF 使用時のシャッタータイムラグは 2 秒前後と、まだまだ普及型デジタルカメラに比べると遅い (AF なしの場合には 0.2 秒程度)。また、画像記録時間は、短いものでも 5 秒程度あり、なかには 10 秒を超えるものもある。そのほか、撮影モードへの移行時間や画像再生間隔も全般に長い。

文 献

- 1) カメラ年鑑 2004 付録 デジタルカメラ年鑑 2004 (日本カメラ社, 2004) pp.3-62.
- 2) デジタルフォト, No.18, 2月号 (2004) 36-53.
- 3) 中井武彦, 小川秀樹: 光技術コンタクト, **39**, No.9 (2001) 12-17.
- 4) 三原伸一: 光技術コンタクト, **41**, No.9 (2003) 3-12.
- 5) 高瀬 弘: 光技術コンタクト, **40**, No.10 (2002) 6-12.
- 6) 関田 誠: 光設計研究グループ機関誌, **23** (2001) 51-56.
- 7) 萩森 仁: 第 27 回光学シンポジウム講演予稿集 (2002) pp.37-40.
- 8) 江口 勝ほか: 第 28 回光学シンポジウム講演予稿集 (2003) pp.1-4.
- 9) 吉田龍一, 岡本泰弘: “マイクロ圧電アクチュエーター”, 精密工学会誌, **68**, No.5 (2002) 645-648.

(2004 年 4 月 9 日受理)