

進化するデジタルカメラ



随筆

— 岡 芳 樹*

The Evolution of Digital Still Cameras

Key Words : Optical Industries in Japan, Photographic Camera, Digital Still Camera, Image Sensors, Lens Design, Image Processing

はじめに

梅田を通る時、時間があればヨドバシカメラに入ることになっています。目的は時代の最先端をゆくデジタルカメラ、パソコンなどのOA機器や、スマートフォンなどの最新製品を見るためです。デジタルカメラ*(以下 デジカメ)は2Fに陳列されており、正に百花繚乱、週替わりというほど次々に新しい商品があらわれ、その進化の速さ、新陳代謝の激しさに驚いています。現在、国内はもちろん、世界中どここの国に出かけてもほとんどの旅行者がデジカメをもっていますが、そのブランドをみるとほとんどが日本製です。1960年代初めのコンピュータの導入期からレンズの計算やデジタル画像処理、光画像システム開発などに従事してきた筆者にとって、現在のデジタルカメラの盛況ぶりをみると万感の思いがあります。ここでは、デジカメ開発の起点となったわが国の光学産業の実力や、進化しつづけているデジカメの概要を紹介したいと思います。

1. わが国の光学産業

歴史的に第2次大戦後の日本の産業復興の先鞭を務めたのは光学産業でした。光学産業は戦時中、陸海軍の庇護のもとにおかれ、高品質の潜望鏡、双眼鏡などの光学機器を製造していました。幸い、戦後、GHQから光学産業は平和産業とみなされ、終戦時

に温存されていた高いレンズ設計技術、光学ガラス製造技術、レンズ研磨技術をもつ光学技術者らにより、カメラの製造が始まりました。昭和20年代半ばにはライカの模倣ではありましたが高品質のカメラが商品化され、進駐軍の米兵のお土産として爆発的に売れたそうです。戦後のカメラの生産は、昭和23年(1948)から始まっており、1951年には、生産台数25.8万台、生産額25億円が統計に記録されています。製造されたカメラは高品質であったので、以後のわが国の輸出工業製品の品質保証と信頼性の向上に大いに役立ちました。このとき既に、ニコン、キヤノンなどのブランド名は国際的にも広く知れ渡っています。昭和40年代以降の高度成長期には、わが国の光学産業も発展を続け、カメラを中心に日本を代表する多くの光学メーカーのブランドが確立されていきました。以後、集約・統合はあったものの、現在、わが国のデジタルカメラ製造メーカーは、家電メーカーも含め、ほぼ10社に再編されています。

日本の光学産業の実力は国際的にも高く、わが国が誇る、光学系、機械系、電子系を融合する擦り合わせ技術が最大限に発揮されるモノづくり力を基に、カメラに代表される高品質の光学機器関連製品を世界中に供給しつづけてきました。これら光学機器を支えるコア技術は、わが国の高い光学設計技術と製造技術に基づく光デバイス技術にあります。わが国の光学機器製品の世界シェアは、デジタル一眼レフカメラ、交換レンズ群、液晶露光装置では100%、医療光学機器の内視鏡では95%以上となっています。さらに、デジタルカメラ、眼底カメラなどの世界シェアは75%以上です。その他、液晶ディスプレイ用偏光板保護フィルム、反射防止フィルム、イメージセンサ、リニアイメージセンサなどの光・電子関



*Yoshiki ICHIOKA

1937年11月生
大阪大学大学院工学研究科 応用物理学
専攻 修士課程修了(1962年)
現在、大阪大学名誉教授、奈良工業高等
専門学校名誉教授 工学博士 応用物理
学(主に 光学、光・画像システム、画
像処理)
TEL : 078-854-0320
FAX : 078-854-0320
E-mail : yichioka@nifty.com

* 静止画を撮影するデジカメを Digital Still Camera(DSC)、動画を撮影するデジカメを Digital Video Camera(DVC)と呼称。

連部品では95%以上の世界シェアを持っています。半導体露光装置(ステッパー)も日本の光学産業の得意分野でしたが、ヨーロッパ共同企業体の巻き返しがあって、現在、苦戦を強いられ世界シェアは50%を割っています。

2. 銀塩フィルムカメラからデジタルカメラへ

デジタルカメラは、わずか10年未満の短期間で、長い歴史をもつ銀塩フィルムカメラ(以下 銀塩カメラ)に取って換わりました。その変革を起こしたのが、半導体撮像素子CCDやCMOSイメージセンサの普及と、急速な性能向上、特に、銀塩フィルムに匹敵する空間解像度の向上です。CCDやCMOSイメージセンサの製造技術は、わが国のメーカーが技術的、製品戦略的に世界をリードしてきました。デジカメでは、イメージセンサ上に結像した撮影画像は(デジタル)電子化され、しかも、それがコンピュータで自在に加工・操作ができ、インターネットで伝送できるところに大きな特徴があります。さらに、技術的には次の3つの要因がその変革のスピードを加速させました¹⁾。

撮像素子としてのイメージセンサの大きさを自由に選択できたこと。特定サイズのフィルムをベースに進化してきた銀塩カメラに比べ、ユーザーの要求やシステムの目的にあった最適な画面サイズが選択できました。そのため、コンパクトデジタルカメラでも高倍率ズームレンズが搭載でき、デジタル一眼レフカメラでは感度の高いものを選択することができるようになってきました。

レンズ設計は基本的にコンピュータによる非線形多変数最適化技術であり、光学性能評価の尺度である収差の値などが全てデジタル量で数値化されていたこと。したがって、これらデジタル評価尺度とデジカメ実機によるモニター上の撮像結果の画質(アナログ量)との対応が容易になり、性能目標をより明確に、より高いものに設定し、それらの要求に応えうる高性能の撮像光学系が開発できるようになってきました。

従来のカメラ技術である光技術とメカトロニクス技術の融合に加え、デジカメの機能向上のために、光技術と画像処理技術の融合ができるようになってきたこと。その結果、表示される取得画像を人々に見やすくするために、様々な画像処理技術が利用で

きるようになってきました。

3. デジタルカメラの画像形成に関わる基本技術

デジカメの画像形成は撮影レンズ、撮像素子、画像処理部で行われています。デジカメに必要なイメージセンサ、基本技術であるレンズ設計技術、画像エンジンについて簡単に述べます。

デジカメでは、従前の銀塩カメラの写真フィルムのかわりにCCDまたはCMOSイメージセンサ上に画像を形成します。イメージセンサの大切な特徴は、ダイナミックレンジの拡大と低ノイズ化であり、この特性により撮影レンズの性能をデジタル画像処理技術で補うことが可能になってきました。撮像素子の集積度、性能は日進月歩で向上しており、初期の10万画素CCDから、現在、コンパクトデジタルカメラでは、10M(1000万)~16M画素のCMOSセンサが、デジタル一眼レフカメラでは20M画素を超えるものが装備されるようになってきました。当初の市場の予想に反して急速な画素数増大を可能にしたのは、わが国の光学産業のもつカメラに対する(高解像度の静止画に対する)統合的なノウハウによるものです。現在、デジカメには10MB画像を1000枚以上記録できるメモリが標準装備されます。それに伴いデジタルカメラの性能と機能も長足の進歩をとげつつあります。

レンズ設計とは、目的に適した結像性能を持つように、レンズ面の曲率、レンズ面間隔、レンズの材質などのレンズの構成パラメータの最適の組み合わせを見出す非線形多変数最適化問題で、膨大な計算量を必要とします。コンピュータ開発の動機の一つは、光線追跡などの膨大な数値計算を必要とするレンズ設計の援用のためでした。事実、国産の実用コンピュータ第一号機は電子メーカーでなく光学メーカーである現在の富士フィルム(株)で開発されています。1960年代初頭のコンピュータの実用化により、最適レンズパラメータの組み合わせを自動的に探索するレンズ自動設計法の研究開発が、産学連携で開始され、1970年代初めには、各社でレンズ自動設計アルゴリズムの実用化が達成されています。以後、半世紀以上が経ち、現在、種々の設計ソフトが商品化され、市販されています。この間、コンピュータの驚異的な性能向上、ズームレンズや非球面レンズ、自由曲面の設計・製作技術の進展、高分散ガラスや

新しいプラスチック光学材料の開発などにより、バラエティーに富む高性能撮像光学系が開発できるようになってきました。現在、広角から30倍ズーム(35ミリカメラ換算 $f = 28\text{mm} \sim 800\text{mm}$)まで可能なズームレンズを装備したコンパクトデジタルカメラも市販されています。

デジカメの特徴は、撮影された画像信号に対して、デジタル画像処理を行う画像エンジンという画像処理専用のシステムLSI(一種の専用コンピュータ)が組み込まれていることです。イメージセンサで取り込まれたアナログ画像信号はアナログ→デジタル変換器で0,1の信号列で表されるデジタル信号に変換されます。このデジタル信号を図1²⁾に示すように画像エンジンで、画像処理を行って写真画像を構成し、JPEG圧縮してメモリに保存します。詳細は省きますが、画像エンジンでは補間、画像の色補正、階調を変換するガンマ補正、人に見やすくするために画像の強調・鮮明化などの基本的な画像処理(情報の加工と補正)を施します。画像処理を受けた画像信号は最終的にモニターに出力あるいはプリントされます。画像エンジンは専用コンピュータですから、カメラ本体の制御機能も行います。自動露光(AE)、オートフォーカス(AF)のほか、高感度ノイズの低減、手ブレ補正制御、収差補正制御などに利用されています。最近では、これらに加えて、顔・人物画像処理、超解像処理、HDR画像生成(階調制御)、電子式手ブレ補正(画像修正技術)、動体被写体の追跡技術、人物をきれいに撮る機能、被撮影シーンを自動的に認識し、自動的に最適な設定をするオートシーンモードなどの機能にも利用されています。市販のデジカメには、これらの機能がごく当たり前に標準装備されるようになってい

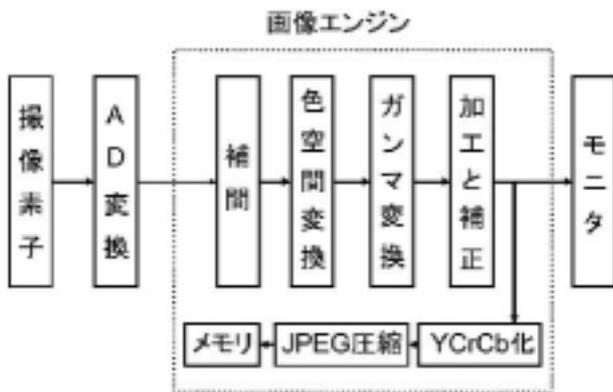


図1 画像エンジンの基本処理²⁾

はご承知の通りです。

4. デジタルカメラ / カメラ付き携帯電話の市場動向²⁾

デジタルカメラ元年は、1997年と言われていいますが、統計上では1999年から記録されています。1999年度は生産台数500万台、生産額2300億円となっています。1998年の銀塩カメラの生産高は3660万台もありましたが、2007年を最後に統計に現れていません。図2に銀塩カメラとデジカメの年毎の生産高を示します。生産台数は2007年に1億台を突破、2010年現在、1億2千万台になっています。内訳はコンパクトデジタルカメラ1億800万台、デジタル一眼レフカメラ1290万台です。現在、デジカメの生産額はカメラ用交換レンズを含めて2兆円強でわが国を代表する大産業になっています。ちなみに、デジタル一眼レフカメラの購入者の85%が男性だそうです。

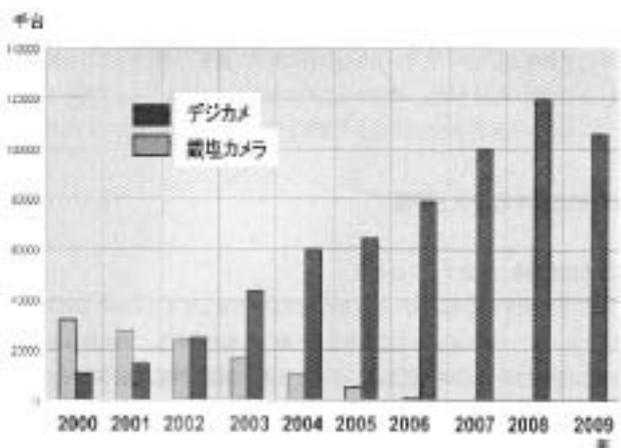


図2 デジタルカメラ出荷台数の変遷²⁾

携帯電話の普及とともに、撮影した画像をメールに添付できる通信手段が一般化され、また、常に携帯電話にカメラが搭載されているという利便性から、デジタルカメラ付き携帯電話は消費製品となってきました。携帯付きデジカメの普及品はカメラというよりもブロック状のモジュール化された画像取得部品の形をしています。撮像素子の高密度化・小型化、撮像レンズの小型化に向けての周辺技術の進歩はかなり速いものがあります。撮像素子はほとんどがCMOSイメージセンサで、解像度は当初11万画素でした。半導体製造技術の進歩とともに、31万画素(VGA)、1.3M(130万)画素、2M画素、

3M画素と進化し、現在では5M～8M画素のものが普及しています。2007年には画素ピッチ1.75 μm の素子が製品化されています。このセンサーの大きさは、3M画素で1/4インチ、5M画素で1/3.2インチ、8M画素で1/2.5インチです。

世界の携帯電話の出荷台数は2006年度に10億台を突破、2010年には、出荷台数は15億台を越しカメラ付き携帯は10億台を突破しました。現在、スマートフォン（高機能携帯電話）が猛烈な勢いで普及しつつあるのは周知の通りです。この分野もわが国メーカーが存在感を示していましたが、デジタル機器のモジュール化、それに伴うオープン分業化によるアジアなどの海外メーカーの参入により、急激な価格低下を招いています。競争が激しく、出荷台数が急速に増えている割には出荷額の増加にはつながっていないというジレンマがあります。

5. 進化するデジタルカメラ技術

デジタルカメラはパソコンやネットワークとの親和性が高く、様々な利用法が開発され社会の広い分野に普及しています。デジカメの開発に必要な、レンズ設計技術、撮像素子作製技術、画像処理技術などは、長い間、個別の技術分野として発展してきました。しかし、最近のデジカメでは、撮影光学系、撮像素子系、および、デジタル画像処理系を融合、一体化したシステムと捉え、目的・用途に合わせて、サブシステムのパラメータを統合的に取り扱って、最適化システムを開発することができるようになってきました。このような技術の融合化により、デジカメの設計・開発手法も急速に変わりつつあり、新しい機能を付加したデジタルカメラや新しいデジタル映像機器の開発が進んでいます。2、3の例を示します。

コンピュータの性能は現在も飛躍的に向上しつづけており、結像光学系とデジタル画像処理系を組み合わせ、高度で複雑な後処理を前提として、目的にあわせて撮像系を再構築する、コンピューショナル・イメージングあるいはコンピューショナル・フォトグラフィという新しい映像技術分野が広がっています。前者の代表例は、病院にあるX線CT装置などの医療映像機器です。X線CT装置等で再構成されるX線断層像は、デジタル画像処理技術がなければ絶対実現できないものです。後者の

例として、撮影した光学像から、波面コード化法という後処理を前提として像再生を行う超深度被写界デジタルカメラ³⁾や、薄型複眼カメラTOMBO⁴⁾、ライトフィールドカメラなどが発表されています。波面コード化法は、光学結像技術とデジタル画像処理技術が融合したレンズを絞ることなしに被写界深度を拡大する技術です。図3²⁾にその原理を示します。レンズの瞳（絞り位置）に特殊な位相板を挿入してシステムの結像特性を変化させ、結像面にボケた中間アナログ像を結像させます。光軸に沿った奥行方向の異なる像面で同じボケ像が結ぶように位相板を設計すれば、光軸に沿って同じボケ像が「金太郎飴」のように並ぶ中間像が得られます。この中間像を撮像素子で撮影してデジタル画像化し、画像修正フィルターを施してボケを取り除くと、焦点はずれ量によらないシャープな画像が得られます。その結果、銀塩カメラでは実現できなかった被写界深度の深い画像を得ることができます。位相板の代わりに同じ効果を示すレンズ面を設計して結像光学系のレンズ枚数を減らすこともできます。この手法はあらゆる結像系に適用でき、特に、焦点深度の浅い高倍率の顕微鏡に効果が大きくなります。また、色収差の補正、光学系の加工・組立誤差許容量の増大、振動や温度変化に対する許容量の増大など、製造コストダウンにも効果をもたらすことが期待されています。

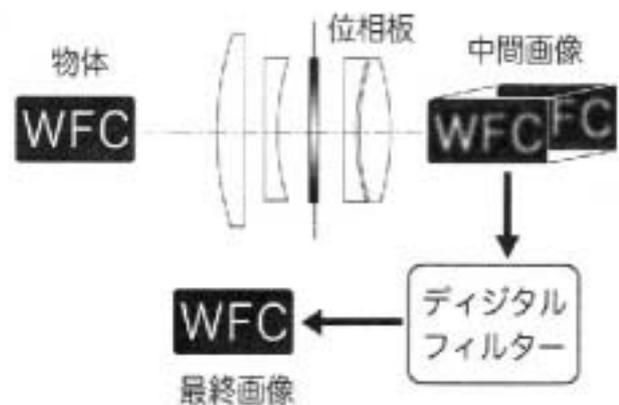


図3 波面コード化法²⁾

TOMBOは昆虫の複眼構造にヒントを得た超薄型の多眼レンズカメラで、大阪大学で開発された次世代デジタル映像システムです。微小なレンズを2次元アレイ状に配置し、個々の微小レンズによって

得られた多数の小画像から、画像処理技術、画像再構成技術を用いて高解像の画像を再構成します。微小レンズアレイの配置の仕方により、被写体までの奥行推定画像、3次元画像、マルチスペクトル画像など今までできなかった像再構成が可能となります。ライトフィールドカメラなどとともに次世代映像システム、次世代デジタルカメラの候補として期待されています。

6. これから

これから予想されるデジカメの進展として、ハード面では、光学系、撮像素子の性能向上による撮像性能の向上、ミラーレス一眼レフカメラの普及、パソコンやネットワークとの接続による映像コミュニケーションツールとしての普及、携帯・スマートフォン系カメラモジュールの高性能化とそれに伴うコンパクトデジタルカメラとの差の消滅、完全電子式デジカメの出現、写真機能以外の機能を併用する、プロジェクター型カメラ、3次元カメラ、多眼カメラなどの開発が挙げられます。

一方、ソフト面では、今まで蓄積されてきた膨大な写真資源(記録写真)、伝統的な写真文化や写真芸術などの継承は当然のこととして、さらに、コミュニケーションツールとしての応用分野の拡大による、新しい映像コミュニケーション文化の形成、

携帯・スマートフォンと通信・記録・画像アプリケーション・検索などが一体になった応用分野の拡大、通信系を含むシステムのオープン性を利用した、個人的な映像放送(双方向動画通信)の普及、すでに進行中ですが、デジカメによる実空間像、コンピュータによって生成される虚空間像やCGなどとの融合による新映像文化の創出、デジタル画像処理技術を利用した思いもよらない応用、

などが考えられます。その他、ソフト開発次第で、その応用展開は無限にありそうな気がします。

銀塩カメラからデジカメへのシフトは単なる技術革新や技術的パラダイムシフトだけでなく、カメラとコンピュータ技術、通信技術の融合により、人々の社会生活スタイルにまで変化を及ぼすイノベーションを引き起こしました。デジカメは現在まだまだ進化の途上にあり、今後も周辺技術の進展によるハードウェアとしての性能の向上、および、ソフトウェアの拡充により、応用分野の拡大が期待されます。これから大切なのは、今まで培ってきたカメラ産業やカメラビジネス、写真ビジネスに加えて、さらに、ハードとソフトが融合した新しい光システム/光ビジネスモデルを生み出して、より大きな社会変革を引き起こしていくことではないかと思われます。そのためには、これらのイノベーションを具現化する新しい産業や映像文化/芸術を創出することが、光学大国であるわが国に課せられた使命のように思われます。その実現には、科学技術だけでなく社会の様々な分野で活躍している次代を担う方々による協創力、協働力、創造力、想像力、起業力、実行力、行動力が期待されています。

参考文献

1. 加藤正猛、OPTICS DESIGN No.46, (2011) 1.
2. 平成22年度 光学機器における光デバイス設計と製造技術の先端動向に関する調査研究報告書、(社)日本機械工業連合会、(財)光産業技術振興協会、p.206, p.208, p.216.
3. Paulo E. X. Silveira, et. al., 光学 37 (2008) 340-346.
4. J. Tanida et. al., Appl. Opt. 40 (2000) 1806-1813.

