多機能化する

イメージング技術の

最新動向と

その応用

静止画において銀塩写真画質、動画においてフルハイビジョン仕様を実現することが、この十数年、画像センサ、デジタルカメラムービーを開発する技術者の最大の目標でした。コンパクトな民生カメラでそれが実現できる時代になり、これからはこのベースの上にさまざまな付加価値、付加機能を加えることで、かつてない写真体験、映像体験を提供することが目標になります。このような背景から、本小特集は、画像センサとカメラシステムにおいて、最先端の付加価値、付加機能を提供する技術を、第一線でご活躍の皆様執筆していただきました。

画像センサはCMOS化による多機能化について、超高フレームレートがもたらすさまざまな機能、RGBW型カラーフィルタによる高感度化と高ダイナミックレンジ化、および移動体検出機能を用いた高画質化など、を解説していただきました。カメラ関係では、光学システムと画像処理系をトータルに最適設計することが最近の話題になっております。それに関してComputational Photographyの全体像、実用レベルにある興味深い例としてWavefront Coding、およびシステムの観点から複眼カメラを解説していただきました。最後に、あらゆる手段を講じて撮影の高速化を試み、1千万フレーム秒を実現したバイオナノスコープについて解説していただきました。

なお、本小特集の企画は、太田淳幹事、柳澤斉幹事と私が担当しました。

編集幹事 蚊野 浩

1-2 White-RGBカラーフィルタを用いたCMOSイメージセンサの開発

図1 色フィルタ配列と分光感度特性

図5 SNR改善の実測結果

図8 SNRとダイナミックレンジを改善した撮像例

1-3 動き検出機能を有するイメージセンサ

図5 試作センサの出力例

図10 動きベクトル検出結果の例

2-1 コンピュータショナルフォトグラフィ ～演算を前提とした画像の獲得～

図5 手持ちカメラで撮影した画像(左)とそれから生成した背景ぼけ(右)⁵⁾

図7 撮像素子の移動による被写界深度のコントロール

図6 符号化露光カメラ(上)⁷⁾と符号化開口距離計測・ぼけ除去(下)⁸⁾

図8 LightStage 5¹⁴⁾

2-3 CMOSイメージセンサを用いた複眼カメラとその応用

図5 SNR改善の実測結果

図6 150°広角複眼カメラの構造

図7 150°広角画像例

図4 動体撮像イメージ図

図8 180°超広角複眼カメラの撮像例

図9 150°広角動き検出カメラの撮像例

図5 個眼画像間の差分による動き検出結果

図10 3次元情報取得結果 (提供：大阪大学大学院谷田研究室)

1. 多機能化する画像センサ

1-1. 超高フレームレートCMOSイメージセンサ

奈良部 忠邦[†]

キーワード ● デジタルカメラ、カムコーダ、高速撮像、CCD、ハイレームレートカメラ、ビデオカメラ

1. 背景

1969年にベル研究所でCCDが発明され¹⁾、1980年に世界初の実用化CCDビデオカメラ「XC-1」²⁾³⁾をソニーが発売してから現在に至るまでに、カメラの画質向上にはめざましいものがある。その結果、現在のコンシューマ市場においては、動画、静止画ともに、従来の銀塩カメラからデジタルカメラに置き換わっている。さらに、カメラ付携帯電話という銀塩フィルム時代にはなかった新しい市場が誕生し、現在も成長を続けている。

このような市場の変革をもたらしたのは、ソリッドステートイメージセンサの高画質化によるところが極めて大きい。そして、最近では、このようなカメラの高画質化に加えて、顔認識などの機能がカメラに搭載され、カメラの高機能化が進んでいる。カメラの高機能化により、イメージセンサに求められる特性も、従来からの高画質化から来る特性だけでなく、イメージセンサとしての機能特性の追加や向上が期待されるようになってきた。

このイメージセンサの機能特性の追加や向上を実現していく方式や手段は、その目的とするところによりさまざまな手法がある。その中で、超高フレームレートイメージセンサは、画質の向上に寄与するだけでなく、カメラとしての機能特性の追加や向上にも貢献できる手法の一つである。

以上のような状況を踏まえ、この解説では、カメラの画質向上に寄与しているイメージセンサの特性向上と、最近注目されている超高フレームレートカメラに搭載されている超高フレームレートCMOSイメージセンサに関して解説する。

2. デジタルカメラの高画質化におけるイメージセンサの特性向上の役割

デジタルカメラの画質に関係するカメラとしての特性項目は数多くある。解像度、最低被写体照度、手振れ、シャッタースピード、色特性、レンズのF値、レンズのズーム

倍率、レンズの焦点距離、イメージセンサの光学サイズ、ダイナミックレンジ、フレームレート、消費電力などがカメラとしての主な特性項目である。イメージセンサの特性は、これらのカメラとしての特性項目に非常に大きな影響力を持っている。これらの特性の中で、最も影響を与えている特性が、解像度であり、イメージセンサの仕様としては画素数とその特性に対応するものである。イメージセンサの画素数を増大させるためには、光学サイズが同一であれば、イメージセンサの画素サイズを小さくする必要がある。イメージセンサの他の特性を同等レベル以上にして、画素サイズを小さくしていくことがイメージセンサの開発の大きな流れであり、それは現在も進行している。

一方、この解像度というカメラの特性、すなわち、イメージセンサの多画素化、画素微細化の流れとは別の流れによるカメラ画質の向上も以前から進められてきた。具体的には、高感度化、低ノイズ化、電子的手振れ補正、電子シャッタによる露光時間制御、電子ズームによる画角変化、色フィルタ配列の工夫による色特性と感度の向上、ダイナミックレンジの拡大、高フレームレート化などである。

これらの特性の中で、超高フレームレート化に関しては、一部の特殊なカメラ、例えば、制作用、放送局用、工業用、学術用などにおいて実用化されているものがあったが、コンシューマ市場でのカメラの実用化は最近になってからであり、そのカメラ自体ばかりでなく、そのカメラに使用されているイメージセンサも注目されている。このコンシューマ市場での超高フレームレートイメージセンサは、後段の信号処理LSIや記録メディアの情報処理速度をイメージセンサからの出力信号速度に対応させることにより、連続した超高フレームレート撮像が可能となる。

このように、この超高フレームレートイメージセンサは、コンシューマ市場におけるカメラの特性に動解像度の向上という新しい付加価値を作り上げることにより、更なる画質向上を実現させた。

3. デジタルカメラの多機能化の進展

一方、デジタルカメラの性能向上は、画質の向上に加えて、近年、多機能化が進展している。

[†] ソニー株式会社

"Multifunctional Imaging Sensor: A Super High Frame Rate CMOS Image Sensor" by Tadakuni Narabu (Sony Corporation, Atsugi)

例えば、デジタルスチルカメラにおいて、夜景や逆光を最適な設定で綺麗に撮れるシーン認識や人物の顔を綺麗に撮る顔認識などの機能が搭載されているカメラが商品化されている。動画においても、顔認識による顔部分の高画質化機能が搭載されたカムコーダが商品化されている。さらに、近年、動画撮影時に、動画に影響を与えることなく、リリースボタンを押すと静止画が撮れるようになり、動画と静止画の融合が加速している。

このようなカメラの多機能化は、従来のフレームレートの中で機能処理をしてきたのがほとんどであった。超高フレームレートイメージセンサ^{4) 5)}がコンシューマ市場に投入された今、今後、超高フレームレートの信号を活用したカメラの高機能化が期待できる。

4. 多機能イメージセンサへの要望仕様と種類

カメラとして実現して欲しい機能により、イメージセンサに求められる仕様はさまざまである。

イメージセンサから見ると、イメージセンサの信号に関係する多機能化の手段としては、画素内信号処理、画素間信号処理、フレーム内信号処理、フレーム間信号処理といった種類がある。

これらの方式の中で、画素内、画素間信号処理は、信号処理を画素内あるいは画素間で行い、センサチップの外部で必要な情報のみをイメージセンサチップから出力するので、高速化が可能である⁶⁾。しかし、画素内、あるいは、画素間で信号処理をするための回路がイメージセンサチップの画素領域に必要となるため、画素の微細化が難しい。

一方、フレーム内信号処理、フレーム間信号処理は、画素領域とフレームメモリ領域、信号処理領域とを分離することが可能であるため、微細画素のイメージセンサにも適用でき、また、信号処理の自由度を高くとることができる⁷⁾。しかしながら、以前は、画素数が増加するに従い、フレームレートが低下するため、多画素のイメージセンサを用いた機能処理の高速化は難しいという課題が残っていた。

5. 超高フレームレートCMOSイメージセンサの意義と効果

イメージセンサの高フレームレート化を実現することにより、微細画素への対応と、機能処理の高速化への対応の両方を達成することができる。これはすなわち、高フレームレート化は、高画質化、高機能化を両立させる有力な手段である^{8) 9)}。

現在、市販されている、通常の動画像のフレームレートは、ハイビジョンで60fpsである。一方、放送局用や研究用としての特殊なカメラとして、画素数約81,000画素(312(水平)×260(垂直))で、100万fpsのカメラが2005年に市販され、その後、コンシューマ用途としては、2008年に超高フレームレートカメラとして、画素数約32,000画素(336

図1 高速撮像の例(300fps)

(水平)×96(垂直))で、1,200fpsのものがすでに市販されている。このコンシューマ用途のカメラは、約600万画素の高精細静止画では、60fpsの高フレームレートで撮影が可能である。このコンシューマ用途の超高フレームレートCMOSイメージセンサによる300fpsの撮像例を図1に示す。

この超高フレームレートCMOSイメージセンサは、このような動解像度の向上に加えて、超高フレームレートによる機能の向上を実現させることができる。

その一つの機能が、「動画・静止画シームレス記録」である。これは、瞬間の静止画と途切れない動画を自由に記録したり、静止画の前後のシーンを動画で途切れなく撮影することが可能になる機能である。この機能により、高画質動画モードから高精細静止画モードへの切替えや、その逆のモード遷移において無効フレーム(コマ落ち)が発生せず、その結果、動画録画中に途切れることなく、640万画素の高精細な静止画を撮像することが可能になる。

次に、マルチプレーン加算による高感度化(高S/N化)や手振れ補正の機能である。時間方向の情報量を増やすことで画質を大きく上げることができる。全画素を60fpsで連続撮影し、時間方向に増えた情報を使って1枚のハイクオリティな画を作るという方法である。これは、カメラDSPを含むカメラシステムトータルで実現することができる。

例えば、全画素60fpsで連写した数枚の画像をマルチプレーン加算処理すると、1枚の画像よりも数倍S/Nが良い画像が得られる。

また、各画像に手振れ補正処理をしながら画を重ねていくことで、高速の手振れ補正も可能になる。少し暗めで手振れしやすい環境下でも、手振れの無い明るい画像がレンズ手振れ補正機能なしで撮影できる。この撮像例を図2に示す。

さらに、CMOSイメージセンサの読出しの自由度の高さを活用して、超高フレームレートCMOSイメージセンサは、多彩な読出しモードを可能にしている。例えば、10ビットデータをピクセルレート432MHzで出力する640万画素60fpsモード、高画質動画に対応した2×2加算モード、従来のSD動画に対応した3×3加算モード、最大300fpsが可能な垂直1/5間引きモード、12ビット出力モードでの640万画素15fpsモードが一つのCMOSイメージセンサで可能となる。

このような超高フレームレートCMOSイメージセンサをカメラに搭載することにより、カメラとしてさらに次のよ

図2 高速撮像の複数画像からの手振れ補正

うな機能も実現できる。一つは、リリースボタンを完全に押し込んだ時刻よりも前の画像情報もカメラに記録しておくことによって、リリースボタンを押すタイミングが遅れた場合でも、本当に撮りたかった瞬間の画像を再現させる機能である。他の機能としては、高速連写した複数の画像情報を基に、中央部の被写体を位置合わせしながら合成することによる流し撮りの機能である。

このように、超高フレームレートCMOSイメージセンサは、微細画素にも対応できることに加え、信号処理アルゴリズムに対する高い自由度を有しており、カメラの高機能化に大いに効果があると言える。

6. 超高フレームレートCMOSイメージセンサを実現する手段

コンシューマ市場において、超高フレームレートのイメージセンサを普及させるためには、他の電気光学的特性も従来のイメージセンサの特性と同等レベル以上にする必要がある。それらの特性の中で、超高フレームレートイメージセンサの大きな課題は、消費電力とノイズの増大への抑制である。

この中で、高速化に伴うイメージセンサの消費電力増大を抑制するには、イメージセンサチップ内の信号出力回路の消費電力抑制が鍵となる。このイメージセンサの信号出力回路は、後段の信号処理LSIとのインタフェースとなる。600万画素クラスのイメージセンサの画像情報を60fpsの超高フレームレートで出力する場合、そのデータレートは、360メガピクセル/秒もの値になる。このデータをアナログ信号のまま、1本の出力端子で出力しようとする、その出力端子の繰り返し周波数は、360MHzとなり、この周波数は、通常のイメージセンサのアナログ出力端子の繰り返し周波数の1桁以上も高い周波数に相当し、現在のイメージセンサに使用されているアナログ回路の技術を使用し、アナログ信号のまま1本の出力端子で出力するのは現実的ではない。

そこで、超高フレームレートイメージセンサを実現するには、アナログ出力端子の数を10本以上に増やし、1本当たりの出力信号端子の繰り返し周波数を、実現できる値と

するか、あるいは、イメージセンサの出力信号をデジタル化して、デジタルの出力ビットレートを高くするか、の2種類の手法が現実的な手段として考えられる。

アナログ信号の出力端子数を増加させた場合、各端子間の特性差による補正が必要となり、後段の信号処理への負荷が増大するとともに、イメージセンサにオンチップされているアナログ回路の消費電力も増大する。

したがって、超高フレームレートイメージセンサを実現するには、イメージセンサにADコンバータを搭載し、信号をデジタル化して、デジタル信号の出力ビットレートを高くする手法の方が、後段の信号処理の負荷が少ない上に、デジタル信号の振幅を小さくすることによる消費電力の抑制が可能のため適している。

このような理由から、ソニーの超高フレームレートCMOSイメージセンサは、後段の信号処理LSIとの信号インタフェースにLVDS (Low Voltage Differential Signaling)を採用した。データレートは、最大432MHzで、内部生成した216MHzのクロックを用い、ダブルデータレートで転送する。

イメージセンサにオンチップするADコンバータの種類や方式は、さまざまな選択肢がある。

ソニーの超高フレームレートCMOSイメージセンサにオンチップするADコンバータは、カラム並列の積分型ADコンバータを採用した。この構成により、低ノイズ化と高速化の両方を実現させることができた^{10) 11)}。カラム並列ADコンバータ方式は、並列処理を行わない方式と比べ、低い周波数でのAD変換が可能となり、高周波数帯域のノイズ成分の影響を受けないため低ノイズ化できる。さらに、アナログCDS (Correlated Double Sampling)に加えて、デジタル化してCDS回路を各列に配置したデュアルノイズキャンセル方式の採用により、画素のノイズを低減するだけでなく、同時にアナログCDS回路やADコンバータのばらつきも低減している。この列並列積分型ADコンバータの構成と動作を図3と図4に示す。

以上のように、超高フレームレートの実現に伴う消費電力とノイズの増大に対して、極めて効果のある構成を採用した。この超高フレームレートCMOSイメージセンサの全体構成を示すブロックダイアグラムを図5に示す。

コンシューマ市場における超高フレームレートCMOSイメージセンサの一つの例として、ソニーのIMX017CQEの主な仕様を表1に示す。

7. 超高フレームレート化における課題

600万画素や900万画素のように多画素化を実現して解像度を上げ、かつ、カメラの小型化ができるように画素サイズを $1.75\mu\text{m} \times 1.75\mu\text{m}$ や $2.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ のような微細画素を開発し、さらに、カメラとしての従来からの特性は同等レベル以上を実現できる方式であることを重要視して、ソ

図3 列並列ADコンバータの構成

図5 超高フレームレートイメージセンサの構成

図4 列並列ADコンバータの動作タイミングチャート

ニーはコンシューマ市場のカメラに搭載する超高フレームレートイメージセンサを開発し、商品化してきた。この超高フレームレートイメージセンサを開発するに当たり、消費電力とノイズの増大を抑圧することが大きな技術課題であったが、ソニーは、カラム並列の積分型ADコンバータを開発し、信号のインタフェースにLVDSを搭載すること

によって、コンシューマ市場における超高フレームレートCMOSイメージセンサの商品化に成功した。この成功には、高度な画素技術による画素の高感度化も大きな役割を果たしている。

今後、カメラに求められる、一層の多画素化、高速化、高画質化を満足させるためには、消費電力とノイズの抑圧

表1 超高フレームレートイメージセンサの主な仕様

製品名	IMX017CQE
対角	9.10mm (1/1.8型)
有効画素数	640万画素 (2,921 (H) × 2,184 (V))
画素サイズ	2.5 μm^2
ADC	12ビットカラムADCオンチップ
フレームレート	全画素60fps動画撮影対応
信号出力I/F	12ビットパラレルLVDS搭載 432MHzの高速データレート
使用電源	アナログ3.0V, デジタル1.8V
動画・静止画対応	動画・静止画モードのシームレス遷移

に加えて、更なる高感度化、および、回路領域のチップ面積から来るコストをも考慮した上での新しい方式の高速化技術を開発していくことが必要である¹²⁾。

8. 超高フレームレートCMOSイメージセンサの今後の展望

超高フレームレートイメージセンサは、動解像度の向上という画質の向上に寄与しただけでなく、カメラの多機能化として、動画撮影時に、動画に影響を与えることなく、リリースボタンを押すと静止画が撮れるという、動画と静止画の融合に加えて、複数枚の画像から1枚の静止画を作成するという新しい機能を実現させた。

今後、更なる高速化により、より自由度の大きな信号処理が可能となり、カメラの多機能化が進展していくと思われる。

(2008年11月26日受付)

〔文 献〕

- 1) C.H. Sequin et al: "Charge Transfer Devices" (1975)
- 2) 竹村ほか：「固体カラーカメラの現状と動向」，テレビ誌，35，3，

- pp.200-207 (Mar. 1981)
- 3) 名雲ほか：「CCDカラーカメラの線順次撮像方式と信号処理方式」，テレビ技報，TEBS60-1，pp.19-25 (Jan. 1980)
- 4) S. Yoshihara et al: "A 1/1.8-inch 6.4MPixel 60frames/s CMOS Image Sensor with Seamless Mode Change", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.492-493 (2006)
- 5) S. Yoshihara et al: "A 1/1.8-inch 6.4MPixel 60frames/s CMOS Image Sensor with Seamless Mode Change", IEEE Journal of Solid-State Circuits, pp.2998-3006 (2006)
- 6) S. Yoshimura et al: "A 48kframes/s CMOS Image Sensor for Real-time 3-D Sensing and Motion Detection", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.94-95 (2001)
- 7) T. Sugiyama et al: "A 1/4-inch QVGA Color Imaging and 3-D Sensing CMOS Sensor with Analog Frame Memory", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.434-435 (2002)
- 8) 小室孝ほか：「高フレームレートカメラを用いた運動物体の高S/Nイメージング」，画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008)，pp.973-978，7月 (2008)
- 9) T. Komuro et al: "High S/N Imaging of a Moving Object Using a High Frame Rate Camera", IEEE International Conference on Image Processing, pp.517-520 (2008)
- 10) Y. Nitta et al: "High-Speed Digital Double Sampling with Analog CDS on Column ADC Architecture for Low-Noise Active Pixel Sensor", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.500-501 (2006)
- 11) 遠山隆之ほか：「ディジタル2重サンプリングを用いた列並列AD変換器を搭載した高速・低ノイズCMOSイメージセンサ」，映情学技法，30，25 (2006)
- 12) S. Matsuo et al: "A Very Low Column FPN and Row Temporal Noise 8.9 M-Pixel, 60fps CMOS Image Sensor with 14bit Column Parallel SA-ADC", 2008 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers (2008)

奈良部忠邦 な ら ぶ だ くに 1978年，東北大学工学部電子工学科卒業。同年，ソニー（株）入社。中央研究所情報処理研究室（当時）にて，CCDの研究開発に従事。以降，主に，半導体事業本部にて，CCDエリアセンサ，CCDトランスパースアルフィルタ，CCDメモリー，CCD遅延素子，CCDリニアセンサ，CMOSイメージセンサ，CMOSカメラモジュールの研究開発・商品化を担当。