2. デジタル一眼レフカメラ用CMOSイメージセンサ

正会員 加藤 得三[†]

キーワード ■ CMOSセンサ, デジタル一眼レフカメラ

1. ま え が き

キヤノンが2000年に世界ではじめてCMOSセンサを使ったデジタル一眼レフカメラ (EOS D30) を発売して以来、6年が経過し、その間にEOSシリーズで14機種のCMOSセンサカメラを発売してきた。他社からもCCD以外のMOS系センサを採用したデジタル一眼レフカメラも発売されている。今回はEOSシリーズで採用してきたセンサを中心にデジタル一眼レフカメラ用CMOSセンサについて技術紹介する。

2. CCDとCMOSセンサの比較

デジタル一眼レフカメラ用のイメージセンサとしては、Kodak、キヤノンで共同開発したデジタル一眼レフカメラ¹⁾でCCDセンサを採用したのに始まり、キヤノン以外ではCCDセンサが主流として使われている。

CCDもCMOSセンサもシリコン上に形成されたフォトダイオードが受光した光エネルギーを光電荷に変換する基本構造は同じで、その違いは電荷を読出す構造にある。

CCDはバケツリレーに例えられるように、光電変換された電荷をそのまま運び最後に電荷を電圧変換する、一方CMOSセンサは画素毎に電荷を電圧変換してから読出す。CCDはシリコンの深層部で電荷を移動させるので、ノイズに対して有利であるが、駆動には高い電圧が必要で、電極は画面全体で大きなキャパシタと同じなので、これを充放電するには電力が必要となり、大画面および高速に読出すセンサには不向きである。CMOSセンサは各画素にアンプをもつので、画素毎のゲイン、オフセットばらつきがノイズとなるが、単一の低電圧で回路構成ができ高速駆動にも対応可能で、他のCMOS回路を同一チップ上に形成することも可能である。

以上、各々のセンサの長所、短所をまとめたのが図1である。次に、これらCMOSセンサの短所を克服してデジタル一眼レフカメラ用CMOSセンサとして開発してきた経緯

	CMOS センサ	CCD (Charge Coupled Device)
電荷読出し	画素アンプ 画素 垂直配線 水平配線 画素毎に信号を増幅し、順次読み出す	垂直 CCD 画素 水平 CCD バケツリレーで信号を読出し、最後に増幅
長所	消費電力小、高速化容易 周辺回路をオンチップ化	技術蓄積と製品実績あり ⇒素子の簡略化 ⇒ノイズ小さい 高S/N
短所	ノイズが大きい - 画素毎のばらつき - ランダムノイズ	消費電力大、高速化困難 周辺回路をオンチップ化困難

図1 CMOSとCCDセンサの比較

図2 CMOSセンサの完全転送構造

を紹介する。

3. オンチップノイズ除去技術

CMOSセンサの場合、画素のリセット時に発生するランダムノイズ (CCDでも同様に発生) と素子の製造上のバラツキで発生するFPN (固定パターン) ノイズがある。CCDの場合もランダムノイズは発生し、外付けのCDS (相関二重サンプリング)²⁾ 回路によりキャンセルしている。CMOSの場合はFPNのノイズも発生するためこれらを同時にキャンセルする方法について説明する。

固定パターンノイズをキャンセルするためには、各画素の光無信号時の電圧 (ノイズ成分) を記憶しておき光信号時 (光信号成分+ノイズ成分) から差をとれば光信号成分だけが取出せる。ランダムノイズに関しては、図2に示すように、画素アンプのリセット終了時発生するので、アンプの

[†] キヤノン株式会社 イメージコミュニケーション第五技術開発部
"Review of the CMOS Image Sensors for Digital Single-Lens Reflex Cameras" by Tokuzo Kato (Image Communication Technology Development Div.5, Image Communication R&D Center, Canon Inc., Tokyo)

リセット終了時と光信号を読出す間に、ノイズを読出すタイミングを設けそのノイズ成分が“FPNノイズ+ランダムノイズ成分”となるような完全転送構造にして一挙に両方のノイズをキャンセル可能にしている。これらを示したのが図3で、オンチップ上にCMOSでこれらの回路を形成し、CMOSの短所を克服しCCD並のS/N性能が確保できるようになった。これが、我々が第一世代と呼んでいるオンチップノイズ除去技術である。

次に図4に示すように、さらなるノイズの低減として、各列方向の信号を読出す狭帯域の低ノイズアンプを列毎に挿入し増幅しオフセットを除去した後、高速低ノイズアンプで増幅する、このようになるべく狭帯域での信号増幅処理することによりノイズのバンド幅も狭くなり、更なるS/N改善が可能となった。この回路もCMOSでオンチップ上に形成した。これが第二世代と呼んでいるオンチップノイズ除去技術である。

以上の技術の導入により、現在では、CCDを凌駕するS/N性能を確保することが可能となった。

4. 暗電流特性

センサノイズは、以上のノイズの外に発生原因が異なる暗電流ノイズがある。暗電流ノイズには、固定パターン性、ランダム性のものがあるが、温度と蓄積時間に比例して大きく変化するので徹底的に少なくしないとカメラの使用状態により画像に悪影響を与える。特に一眼レフカメラは、コンパクトカメラと異なり長秒蓄積、バルブ機能がスペックの売りになっており、これを抑えることが重要な要件となる。

暗電流の要因は、製造段階の重金属などの汚染とシリコン結晶の不規則性である。これらを対策するためには、図5に示すように、センサの構造と徹底したクリーンプロセス化とプロセス管理にあり、他のASIC、DRAMのCMOSプロセスと比較すると桁違いのクリーン化が必要で、これらを徹底するためにはセンサ専用ラインで製造する必要がある。

キヤノンでは、この長秒特性に優れた特徴を生かして、天体観察愛好家向けに赤外カットフィルタをチューニングしたEOS 20Da³⁾を提供している。

図6 CCD、CMOSセンサの多チャンネル読み出し例

図8 CMOSとCCDセンサの分割露光比較

図7 消費電力比較

図9 フルサイズセンサの分割露光

5. 高速化と消費電力

CMOSセンサは1画素ごとに電荷を電圧に変換するアンプを備えているため、1列ごとに別々に読出すなど、多チャンネル化が比較的簡単に可能で、高速化がしやすい構造である。図6は、EOS-1Dの2チャンネルCCDとEOS-1D MK IIに採用したCMOSの8CH読み出しの例である。CCDは、図に示したセンサを左右に分けて別々に読出す2チャンネル化までは簡単にできるが、それ以上多チャンネル化するには、センサの構造がかなり複雑になる。左右読み出し方式では、分割画面の空間周波数が低いため、左右画面の特性の違いが認識しやすく各チャンネルのアナログ特性の合わせ込みが、かなり必要となる。このようにCMOSセンサは、CCDセンサと比較すると高速化が容易である。

CMOSセンサの電圧転送は、CCDセンサの電荷の転送と比べて電力を必要とせず、CMOSセンサは、サイズが大きくなってもチャンネルを増やさない限り消費電力は、あまり増加しない。一方、電荷をそのまま転送するCCDは水平の読み出しに電力がかかるため、サイズが大きくなると比例して消費電力が増加する。また、高速化しようとするときに電力を必要とする。これらの関係を図7に、CCDとCMOSの消費電力を試算した相対値で示した。

6. フルサイズCMOSセンサ

現在、最先端の微細加工が可能な半導体露光装置は、最大一括で露光できるのはAPS-Cサイズ程度までであり、これが各社デジタル一眼レフカメラにAPS-Cサイズセンサが採用されている理由にもなっている。EOS-1Dsのフルサイズセンサでは、これらの装置で35mmフルサイズセンサを作るにあたり、微細加工の必要な部分については3分割の露光を行った。当然ながら、分割境界に受光領域などを避けることにより画像信号に影響が出ないように配慮している。図8に示すように、この分割露光はCCDのような受光・転送領域の微小信号の行き交う領域を分割せざるを得ないセンサと比較するとかなり有利な条件である。さらにEOS-5Dでは、製造工程を削減してコストダウンを計るため、図9に示すように、二分割で微細露光できるステップと一括で露光できるステップとの露光工程を組合せることによりさらに安定した歩留まりで製造可能となった。

7. パッケージ技術

EOS一眼デジタルカメラでは、ベイア配列原色フィルタの単板カラーセンサを採用しており、色、輝度モアレ除去、赤外域カットのため3枚の水晶LPFと赤外カットフイ

図10 水晶LPFカバーガラスパッケージ

ルタの4枚構成の光学フィルタをセンサの前に配置している。この厚みを極力薄くし、光学性能に影響する非点収差等を抑える必要があるため、特にフルサイズのセンサでは、水晶の代わりにニオブ酸リチウム単結晶LPF⁴⁾でさらに薄くしている。

EOS-5Dでは、光学性能の改善とコストダウンのため、図10に示すように、センサのカバーガラス(0.4mm)の代わりに水晶LPFを張り合わせた。ただしカバーガラスと水晶は熱膨張率が異なるため、単純に置き換えるだけでは、信頼性が得られず、各々の熱膨張とマッチングした接着剤、パッケージ材料を組合せることにより、信頼性をおとすことなく達成できた。この技術は最新のEOS Kiss digital Xにも採用して、薄型化がセルフクリーニングセンサユニットのスペース確保に貢献している。

8. む す び

以上、EOSで採用してきたCMOSセンサについて紹介し

てきたが、コンパクトデジタルカメラも含め高画素化のニーズは高く、特に高画質を求められる一眼デジタルカメラにおいては、性能(感度、S/N、飽和特性)を落とさず達成する必要がある、技術ハードルは高い。

今後の注目される技術としては、本誌⁵⁾にもレポートされているように、CCDに対して劣っているマイクロレンズ下からフォトダイオードまでの配線層と層間絶縁膜の薄膜化がある。高速化も小型センサにおいては、読出し列毎に高速A/D変換器をオンチップで配置するCMOSセンサも発表⁶⁾されており、ますますCCDに対して優位になってきている。CMOSセンサの機能面では、リセットノイズを落としたグローバル電子シャッタの実現が課題であり、これらがすべて実現した暁には、ほとんどのセンサがCMOSになるのではないと思われる。

(2006年11月30日受付)

〔文 献〕

- 1) EOS DCS 3 (1995~1997)
- 2) 西田, 小池, 大竹, 吉川: "CCD型撮像素子のノイズと低雑音信号読出し法", テレビ誌, 39, 12, pp.1176-1181 (1985)
- 3) 古都悦郎: "デジタル一眼レフの応用 EOS 20Da", 日本写真学誌, 69, 3, pp.187-190 (2006)
- 4) 加藤得三: "EOS-1Dsの開発", 日本写真学誌, 66, 3, pp.242-246 (2003)
- 5) 高橋秀和: "CMOSイメージセンサにおける画素縮小化技術", 映像学誌, 60, 3, pp.297-298 (2006)
- 6) Y. Nitta, et al: "High-Speed Digital Double Sampling with Analog CDS on Column Parallel ADC Architecture for Low-Noise Active Pixel Sensor", ISSCC 2006/SESSION 27/IMAGE SENSORS/27.5

かとう とくぞう
加藤 得三 1973年、東京電機大学工学部卒業。1982年、キヤノン(株)入社。ビデオカメラの電気設計を担当、DVCカムコーダの電気設計を経て、1998年より、デジタル一眼レフカメラの電気設計を担当。現在、CMOSセンサを中心としたデジタルカメラの要素技術開発を担当。正会員。