

新しいCMOS センサに押される CCD

コリン・コーツ、クリス・カンピーロ

増強された CCD はニッチな用途に対して重要な性能を維持しているが、最近の進歩した新しい CMOS イメージャは科学的用途にも対応できる。

科学用途のカメラの場合、電子増倍 (EM) CCD、インターライン CCD および CMOS センサの技術の選択には、コストは勿論、速度、視野、雑音、ダイナミックレンジ、画素分解能などの間でもトレードオフがつきものだった。しかしながら、科学用 CMOS (sCMOS) カメラの最近の進歩は、先例のない速度、極端に低い雑音、高いダイナミックレンジおよび広い視野を同時に実現し、基本的な性能のトレードオフを解消しながら、「実用カメラ」の価格帯での値ごろ感を維持している。その結果、sCMOS カメラは既存のインターライン CCD の多くと EMCCD センサのいくつかの応用を獲得しようとしている。とは言え、インターライン CCD センサと EMCCD センサには、長いスターリング時間や単一分子検出などに独自の特性があり、特定のニッチな用途では依然として好まれている。

トレードオフの歴史

科学品質のデジタルカメラの性能限界を定める最も重要なパラメータには、 e^- /画素/秒の単位で測定される暗電流、 e^- /画素の単位で測定される読取り雑音、フレーム/秒または M 画素/秒で定義される速度、画素サイズと全画素数の関数としての視野、所定波長の信号として検出される光子の確率を百分率で表す量子効率 (QE)、最小検出可能信号に対する最大測定信号の比を示すダイナミックレンジなどがある。現在までのところ、これら全てのパラ

メータを同時に最適化できるセンサ技術は存在しないため、カメラは特定の用途に対して適度な妥協で済むセンサに基づいて選択されなければならない。このトレードオフは、生化学の事象を高速度で画像化したいが、同時に低雑音、高分解能、広視野 (つまり大量の画素) などにも必要になる生物学者にとっては大きな問題であった。

低雑音 CCD

CCD は非常に低い雑音と高い QE を確保できる究極のイメージセンサであると考えられてきた。暗電流はカメラを -30°C 以下にまで冷却すると、 $1e^-$ /画素/秒よりもはるかに低い値が容易に得られ、高性能 CCD カメラの場合は -100°C に冷却することで同様の値が得られる。一般に、画素当たり数電子の読取り雑音は、低光量/高速度のいくつかの用途を制約する問題になるが、このことは EMCCD の開発によってうまく解決されている。この場合、各画素からの信号は読取り回路に到達する前に、チップ上のいくつかの増幅段によって増強され、読取り雑音は信号増幅の倍率と同等の比率で減少する。

CCD の重要な制約条件は速度であった。画素のすべての列は読取り抵抗へ連続的に移動し、共通の読取りノードへ転送される必要がある。センサの画素構成がわずか $1k \times 1k$ であっても、このようにして処理する画素数は 100 万にもなる。より高速の読取り回路の利用も可能だが、この場合は雑音が増加す

る。画素のグループ分けやすべてのチップの一部だけを使用する方法も高速化に役立つが、分解能と視野が犠牲になる。

インターラインアーキテクチャは CCD のフレーム速度をある程度改善する。この場合、それぞれの列は入射光を遮蔽する電荷蓄積領域を含むため、露光される画素は次のフレームを取得しながら読取りを実行できる。同様に、フレーム転送型 CCD (このアーキテクチャは EMCCD でも使われる) は 100% のデューティサイクルを達成できるが、この場合は蓄積領域が隠蔽され、すべてのフレームが読取り回路へ転送される。しかしながら、これらの方法はいずれも少数の共通読取りポート (通常は 1 ポート) を使用するため、フレーム速度は厳しく制約される。

CMOS の限界

異なるタイプのセンサとしては CMOS チップがあるが、これは集積電子回路に使用されているものと同じ相補性金属酸化半導体技術に基づいている。CMOS イメージャはコストが低く性能も比較的低いと評価されており、携帯電話カメラなどの民生用デバイスに広く使われている。これらの半導体デバイスの各画素は入射した光子を電子に変換する感光領域をもつため、CMOS イメージセンサは CCD と同様であると見なすことができる。しかしながら、各画素の電荷を共通の出力構造へ直列転送する CCD とは異なり、CMOS デバイ

表1 2種類の一般的な科学用CCDと比較したsCMOSの性能

パラメータ	sCMOS (Neo)	インターラインCCD	EMCCD
センサ形式(M画素)	5.5	1.4~4	0.25~1
画素サイズ(μm)	6.5	6.45~7.4	8~16
読取雑音	1e^- @30フレーム/秒 1.4e^- @100フレーム/秒	$4-10\text{e}^-$	$<1\text{e}^-$ (EM利得を含む)
読取速度(最大) (M画素/秒)	5500	25	~30
QE(最大)	0.57	0.6	90%「後方照明」 65%「仮想フェーズ」
ダイナミックレンジ	3万:1 (@30フレーム/秒)	~3000:1 (@11フレーム/秒)	8500:1 (低EM利得による@30フレーム/秒)
増倍雑音	なし	なし	1.41倍EM利得 (有効半値QE)

スの各画素は電荷を電圧に変換し信号を一時的に蓄積する独自の回路をもつ。したがって、CMOSアレイは信号の並列読取りが大きな特徴になっている。

並列読取りは速度の面で有利だが、CMOS技術は、高い読取り雑音、高い暗電流、低い画素間の均一性、ダイナミックレンジの制約、低いQEなど、それ以外の性能では劣るため、科学用途のデジタル撮像では優位に立てなかった。また、CMOSチップはCCDチップに比べると、欠陥数、つまり暗電流雑音の高い「熱」画素が増加しやすかった。いくつかのアレイメーカーはCCDバックプレーン上にCMOSセンサをバンプ接合するハイブリッド技術を開発し、50フルフレーム/秒の高い速度と数電子のノイズフロアをもつCMOSカメラを実現した。しかし、多くの応用に対して、この雑音はあまりにも高く、その技術は高価であった。

科学用のCMOS

最近では半導体およびMEMS技術の進歩とフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)の高速信号処理機能の進歩によって、CMOSデバイスは適切なハードウェアとファームウェアを使用すると、性能限界の克服が可能になり、その用途は科学分野への拡大が可能に

なった。英アンドールテクノロジー社(Andor Technology)のNeo sCMOSカメラはCMOSの高速の利点(最大100 Hzフルフレーム)を非常に低い雑音、高いQE、広いダイナミックレンジ、高い空間分解能および広い視野で確保している(表1)。

これはどのようにして達成されたのだろうか? 初期のCMOSデバイスの低いQEは画素の複雑な構造が直接の原因であった。そこで、それぞれの画素にはいくつかのトランジスタが組込まれ、光検出に利用できる画素の面積は100%に近づいた。新しいsCMOSセンサは物理的に小さなトランジスタ、それ

に関係する構造および光捕集用のマイクロレンズアレイを使用して、CCDと同等の充填率と57%のQEを実現している(図1)。さらに重要なのは、これは、増幅をしなくても、わずか1電子の読取り雑音特性が初めて得られるカメラ技術であるという点だ(図2)。このことは30フルフレーム/秒(または200M画素/秒)の速度で実現された。100フレーム/秒の速度でも、読取り雑音はわずか 1.4e^- であった。この数字をCCDカメラで実現することは1M画素/秒以下の低速であっても難しい。

ダイナミックレンジはCMOSカメラとCCDカメラの制約条件になり、16ビットA/D(アナログ-デジタル)変換器であっても、低雑音性能に最適化したときの有効画素井戸深さの制約条件になる。Neo sCMOSカメラはそれぞれの列の上部と下部に高利得と低利得の増幅段(プラスA/D)がある。各画素からの信号は2種類の増幅器を用いてサンプリングする。次に、カメラの高速FPGAが両方の増幅器からの信号をサンプリングし、どちらを画素-画素ベースで受入れるのかを実時間で決定する。その結果、ダイナミックレンジは 1e^- の

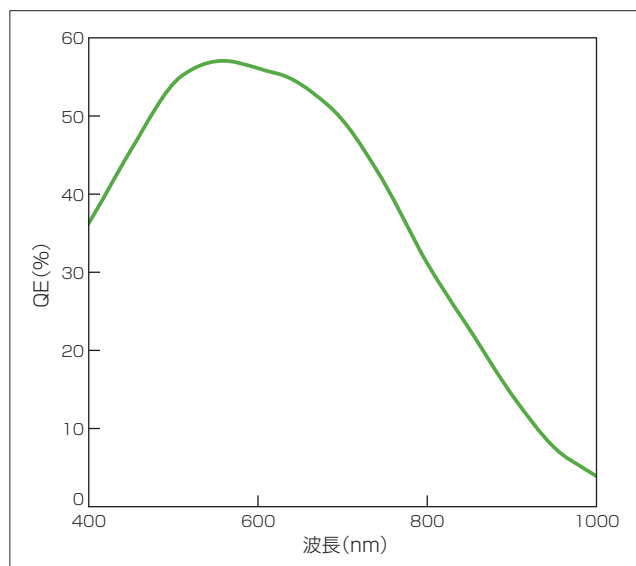


図1 現在のsCMOSカメラの量子効率曲線は、数年前のCMOSカメラの曲線よりもCCDの曲線に対して非常に近い。

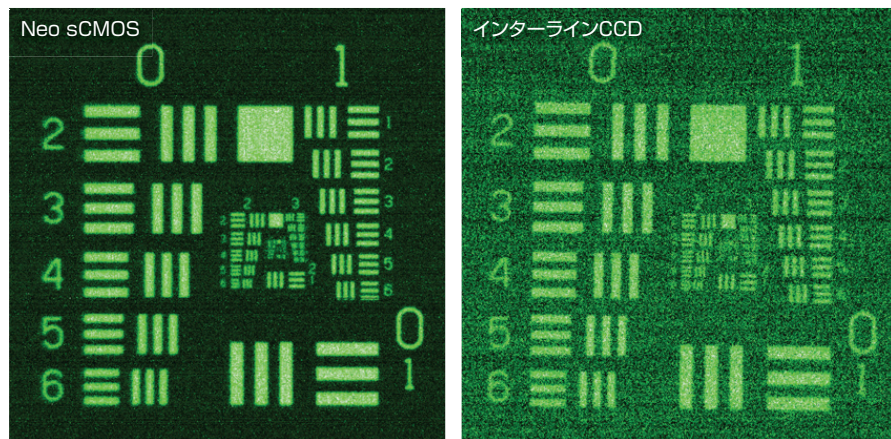


図2 Neo sCMOS (400MHzにおいて $1.2e^-$ の読取雑音)とインターラインCCDカメラ (20MHzにおいて $5e^-$ の読取雑音)を用いて取得した低光量画像を比較している。これらの画像は同じ照明レベルと露光時間で撮像され、同じ相対強度尺度で表示されている。

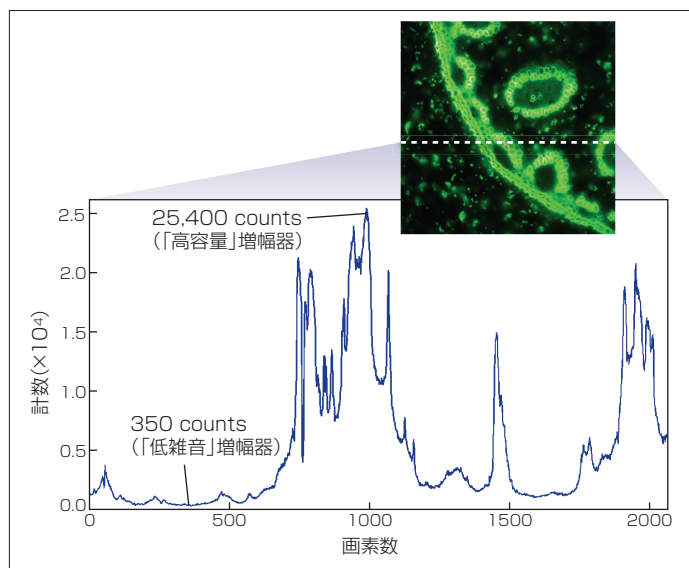


図3 二重増幅器と二重A/D変換器を使用して全ての画素の高い利得と低い利得での処理が行われ、比較的小さい(6.5 μm)画素ピッチから先例のないダイナミックレンジが得られている。このことは挿入画像とその単一画素列の強度ラインプロファイルから明らかである。

読取りノイズフロアで分割され、3万電子の全井戸深度になる(図3)。

前述したように、CMOS内部の欠陥は高い暗電流雑音をもつ熱い画素を生成することが多い。このことを解決するために、新しいsCMOSカメラは $-40^{\circ}C$ の真空冷却を用いて、これらの欠陥の大部分を取除いている。その結果、ほとんどすべての画素は初期のCMOSカメラよりもはるかに良好な $0.03e^-$ /画素/秒の暗電流が得られている。また、アンドール社のEMCCD技術を用いた実験から、生物学者に好まれる完全低

光量の画像を取得するには、まばらに発生する高い偽性読取り雑音をもつ画素への積極的な対応が必要であることが分かった。この対応はフィルタとFPGAを用いてすべての孤立した偽性画素を同定し、その値を隣接画素との平均値で置き換えることで可能になる。この補正はプログラムに基づいて、読取り雑音が比較的高く($5\sim 6e^-$)、光量が低い場所に対して行なわれる。カメラのFPGAはsCMOSセンサ全面の出力の平坦化補正も行い、CMOSチップの画素上信号処理特性の自然な変化から生

じる画素応答の固定化された偏差を補償する。その結果、固定パタンの雑音は完全に排除される。

応用: バランスの変化

新世代のsCMOSカメラに向けた性能の本質的な進歩は、sCMOS、CCDおよびEMCCD技術間のバランスを大幅に変化させている。上述したように、新しいsCMOSカメラは速度と視野の性能が改善され、その他のパラメータも損なわれず、十分な柔軟性が得られている。例えば、その広いダイナミックレンジは、非常に低い光量と中位の光量の両方において、十分に動作することを示している。また、光量の範囲は容易に変更できるため、カメラは低分解能のデバイスとしても使用できる。したがって、撮像パラメータが実験ごとに変化する科学用途を含めた多数の応用では、sCMOSカメラが最初の選択肢になる。

しかしながら、インターラインCCDセンサとEMCCDセンサの二つの技術はいずれもニッチだが重要な応用を期待できる。例えば、十分に最適化されたEMCCDの「ゼロ雑音」特性は、単一分子検出や単一光子計数などの極端に低い光量の場合において必要になる。また、インターラインCCDはほとんどの応用を失っているが、その優れた暗電流特性はDNA/RNAの配列決定のための化学ルミネセントゲルプロットや動物の生体内ルミネセンス撮像などの長時間露光(数分間)が必要になる用途の場合に好ましい。また、インターラインCCDは、当面の間、コスト面でも顕著な利点をもつと考えられる。

著者紹介

コリン・コーツ (Colin Coates)はアンドールテクノロジー社米国西海岸事業部のイメージングカメラ製品マネージャ、クリス・カンピロ (Chris Campillo)は同事業部のセールスエンジニア。e-mail: c.coates@andor.com