

人生における時間は有限である。限られた時間を有効に使って、有意義に研究をしましょう…。とかいう話では、もちろんない。撮像素子の定番だった CCD (charge-coupled device) が CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) に変わり、多様な機能をもつ撮像素子が次々に実用化されている。そこで、時間軸を巧みに使った撮像技術を取り上げ、近い将来に一般的になるであろう撮像システムを予想したい。

### 1. CMOS 撮像素子の発展

フォトダイオードで発生した光電子自身を、完全空乏化したポテンシャル内で、損失なく、無雑音で扱うことは、CCD 撮像素子の大きな特徴であり、それが低ノイズの画像読み出しを可能としていた。4トランジスタ構成<sup>1)</sup>の画素方式が実用化されて以来、CMOS 撮像素子でも、画素内で光電子の制御が可能となった。トランジスタ増幅回路による光電子数(すなわち入射光強度)の読み出しは、必然的にランダム雑音の発生を伴うため、可能な限り無雑音で光電子そのものを扱い、大きな信号量となった後で読み出すことが望ましい。その後は、アナログ・デジタル回路で自在に信号処理できる。CMOS 撮像素子は「1段 CCD + アナログ・デジタル混載回路」ともいわれるが、光電子自身の制御と信号処理の融合は、性能と機能性の両立を可能としている。また、CMOS プロセスの微細化は、読み出し回路の高速化(すなわち、高画素化と高フレー

ムレート化)と低雑音化に寄与するため、CCD 撮像素子と異なり、半導体技術のスケージングの恩恵を十分に受けることができる。

基本的な光電子の操作には、(1)蓄積、(2)転送、(3)振り分け、(4)廃棄、などがある(図1)。これらは、不純物濃度の分布(静的制御)や、MOS トランジスタのゲートに印加する電圧(動的制御)により、ポテンシャル形状を制御することで実現される。鍋底状の窪みを作れば光電子はそこに蓄積され、傾斜や段差を作れば流れ落ちる(転送される)。複数の傾斜の手前に MOS トランジスタの門を作り、いずれかの門を開ければ、振り分けられる。拡散層に相対的に高い電圧を印加することで、そこに奈落を作り、光電子を捨てることのできる。

### 2. 変調

光電子の廃棄と蓄積を組み合わせると、任意の時間系列パターンで電子シャッターを切ることができる。このような変調型撮像素子の原型は、文献2にみられる<sup>2)</sup>。これは、カメラにおける手振れ補正用の可動機構を不要とするかもしれない。一般的なデジカメの手振れ補正では、加速度を検出して、レンズまたはセンサーを、手振れを打ち消す方向に動かしている。それに対し、文献3に示されているように<sup>3)</sup>、蓄積時間中にシャッターをランダムにオン/オフし、別の方法で計測したぶれ情報(点像分布)を用いてデコンボリューションすることで、アーティファクトの発生を抑制しながら、手振れを補正した画像を得る手法がある(図2)。通常の撮像素子ではこのようなシャッターを切ることができないため、従来は光量効率が悪く低速な液晶シャッターな

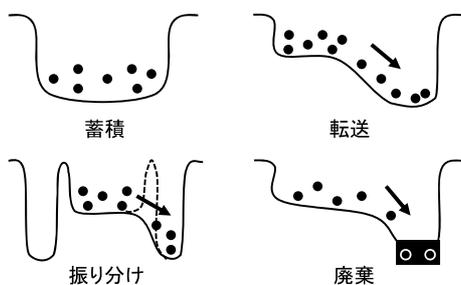


図1 光電子の制御。

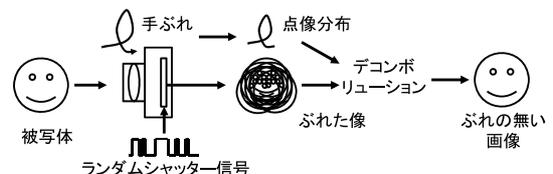


図2 フォーカルプレーンランダムシャッターとデコンボリューションを用いた手ぶれ補正。

どを利用するしかなく、あまり現実的な方法ではなかった。しかし、「廃棄+蓄積」を行う撮像素子があれば解決できる。

### 3. 高速化

単に撮像素子のフレームレートが高くなるだけでも、撮像システム的应用は格段に広がる。ただし、画素数と S/N はそのまま、という条件が不可欠である。CMOS 撮像素子は、カラム ADC (analog-to-digital converter) の恩恵もあり、高画素での高速撮像に非常に強い。CCD 撮像素子と異なり、低消費電力・低ノイズで実現できる。文献 4 に示されているように<sup>4)</sup>、最近では、メガピクセル級の画像を高分解能 (例えば 12 ビット) で毎秒数千枚読めるようになってきている。高画素・高 S/N・高フレームレートを兼ね備えた CMOS 撮像素子の出現は、光切断法や構造光投影による三次元計測などアクティブ光計測システムのほとんどを、ビデオレート化 (もしくはそれ以上に) してしまうかもしれない。高出力の LED や LD 光源、DMD (digital mirror device) などの高速光変調器との相性も抜群である。

### 4. 多重化

三次元形状計測と通常撮影などのように、異なる 2 つのモードの画像を時分割多重で一気取得することも自在にできるようになりそうだ。多重度 2 というのは小さいと感じるかもしれないが、1 が 2 になることの意味はきわめて大きい。文献 5 では、このような時分割多重撮影に、汎用的に利用できる面白い CMOS 撮像素子が提案されている (筆者らは、計算機写真用撮像素子と位置付けている)<sup>5)</sup>。1 画素内に 2 つの蓄積部をもち、ビデオレートよりも十分高い周波数で、光電子を、これらの蓄積部に交互に振り分ける。それぞれの蓄積部には、異なるモードの画像信号が蓄積され、ビデオレートで 2 枚の画像対が出力される (図 3)。1 フレーム 33 ms のうちに、ビデオレートよりも高い周波数で何回も振り分けを繰り返すことで、画像対の同時性を保証している点が特徴である。2 つのモードとして、フ

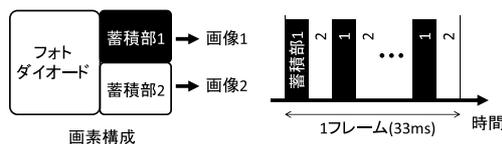


図 3 計算機写真 CMOS 撮像素子における時間多重化 (多重度 2)。

ラッシュの有無 (高ダイナミックレンジ化)、投影パターンの有無 (通常撮像+三次元形状計測) など、考えれば考えるだけ応用が出てきそうな面白い撮像素子である。

時間軸に注目し、CMOS 撮像素子が可能とするとごく近未来の撮像システムについて考えてみた。撮像素子を、単に光強度分布を電気信号に変換するだけの素子としてではなく、もっと能動的に「光電子を処理する」素子としてとらえれば、カメラのまた違った未来が見えてきそうである。

(静岡大学 香川景一郎)

### 文 献

- 1) P. Lee, R. Guidash, T. Lee and E. Fossum: "An active pixel sensor fabricated using CMOS/CCD process technology," *Proc. IEEE Workshop on CCDs and Advanced Image Sensors* (1995) pp. 115-119.
- 2) S. Kawahito, Z. Li and K. Yasutomi: "A CMOS image sensor with draining only modulation pixels for sub-nanosecond time-resolved imaging," *Proc. 2011 Int'l Image Sensor Workshop* (2011) pp. 185-188.
- 3) R. Raskar, A. Agrawal and J. Tumblin: "Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter," *ACM Trans. Graphics*, **25** (2006) 795-804.
- 4) J. Park, S. Aoyama, T. Watanabe, T. Kosugi, Z. Liu, T. Akahori, M. Sasaki, K. Isobe, Y. Kaneko, K. Muramatsu, T. Iida and S. Kawahito: "A high-speed low-noise CIS with 12b 2-stage pipelined cyclic ADCs," *Proc. 2011 Int'l Image Sensor Workshop* (2011) pp. 339-342.
- 5) G. Wan, X. Li, G. Agranov, M. Levoy and M. Horowitz: "A dual in-pixel memory CMOS image sensor for computation photography," *2011 Symposium on VLSI Circuits Tech. Dig. Papers* (2011) pp. 94-95.