

固体撮像素子、CMOSの挑戦

CMOSイメージセンサの可能性

CCDとの競争・共存

ソニー株式会社

パーソナルITネットワークカンパニー

パーソナルビデオカンパニー

米本 和也

1. はじめに

CCDイメージセンサは、1970年初頭からCCDを撮像素子に応用する研究開発がスタートし、それから10年あまり経った1980年前半からカメラ一体型ビデオに使われはじめ、いまでは固体撮像素子としてすっかり撮像管に取って代わった。焼き付けや残像がない、あるいは小型軽量かつ低消費電力で衝撃に強い、などの特長をもつCCDイメージセンサは、撮像管と比較して感度が低くダイナミックレンジが足りないなど性能面で不利であったが、半導体製造プロセスの進化や技術の向上により、いつの間にか撮像管と比較されなくなるほど特性の向上を達成していた。さらには、電子シャッタを皮切りに、手ブレ補正や電子ズームなど、撮像管では実現困難な機能を容易に組み込むことに成功し、いまでは俗にCCDと言えば固体撮像素子のことを指すくらいにまでなった感がある。近年飛躍的に小型化高性能化したカメラ一体型ビデオカメラや、銀塩フィルムを使ったカメラに置き換わる勢いのデジカメでは、いまやそこに使われているCCDイメージセンサの画素サイズがレンズの解像限界に追いつき、光学的な限界に近づきつつあるとまで言われている。

一方、CMOSイメージセンサは、CCDより古く

1967年にその概念が提案された画素に増幅機能を持たないMOS型イメージセンサとは違い、画素に増幅用MOSトランジスタを採り入れたActive Pixel Sensor、略してAPSの一種である。CMOSイメージセンサはAPSのなかでも、単一電源、低消費電力で標準CMOSプロセスで製造できることからシステムオンチップが容易であるという利点があり、特殊な製造プロセスを必要とするCCDイメージセンサと対比され注目を集めた。しかし、CMOSイメージセンサ特有の固定パターンノイズとフォトダイオードの暗電流ノイズにより、画像を取り扱うには画質が不十分であった。それらに対して、固定パターンノイズを抑圧する回路が数多く考案され、標準CMOSプロセスを改善したり、CCDと同様のフォトダイオード構造を採り入れることでフォトダイオードの暗電流を低減する方法がとられるようになった。ADCを含めたカメラ信号処理を同一チップに内蔵するシステムオンチップの検討も進んでおり、チップ単体でNTSC準拠のビデオ信号を出力するCMOSイメージセンサの試作も行われて、いよいよ本格的な商品化のフェーズに入ったと思われる。

本論では、CMOSイメージセンサの現状をCCDと比較しながら、これからどのような分野の応用が期待できるか考察してみたい。

2. CCDとCMOSイメージセンサの構造

CCDとCMOSイメージセンサのブロック構成図を図1に示す。一般的なCCDイメージセンサの場合は、フォトダイオードで光電変換した電子を垂直CCDと水平CCDで出力部に転送し、ここで電子を信号電圧に増幅(変換)する。このためCCDの特性は主に、フォトダイオードの量子効率と暗電流特性、CCD転送路の転送効率と暗電流特性、出力部の増幅率(変換効率)とS/N比によりその性能が支配される。一方、CMOSイメージセンサの多くは、フォトダイオードで光電変換した後、画素ごとに信号を増幅をしているので垂直信号線や水平信号線のノイズを受けにくい特長があるものの、画素ごとにある増幅器のバラツキによる固定パターンノイズが映像信号のS/N比を悪化させている。これが、CMOSイメージセンサの商品化を遅らせた最大の原因であるといっても過言ではない。

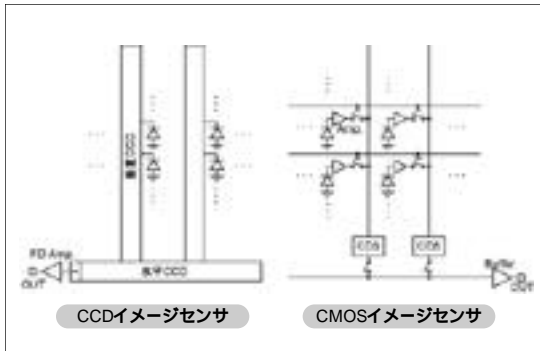


図1 ブロック図

また図2に示すように、画素の構造に目を向けると、CCDの場合はフォトダイオードから垂直CCDまでが連続した構造で作られており、各部のサイズや構造の細部がCCDの性能を大きく左右する。CMOSイメージセンサは、フォトダイオード、増幅部(Amp.)、画素選択スイッチ(SW)、画素リセット部(Rst)と機能ごとに素子が分かれており、回路記号で表現できる。そのため、フォトダイオードの構造と、各素子の素子パラメータとパターンレイアウトに性能が左右される。CCDとCMOSイメージセンサともにフォトダイオードの構造が重要であり、暗電流ノイズを抑え可視光領

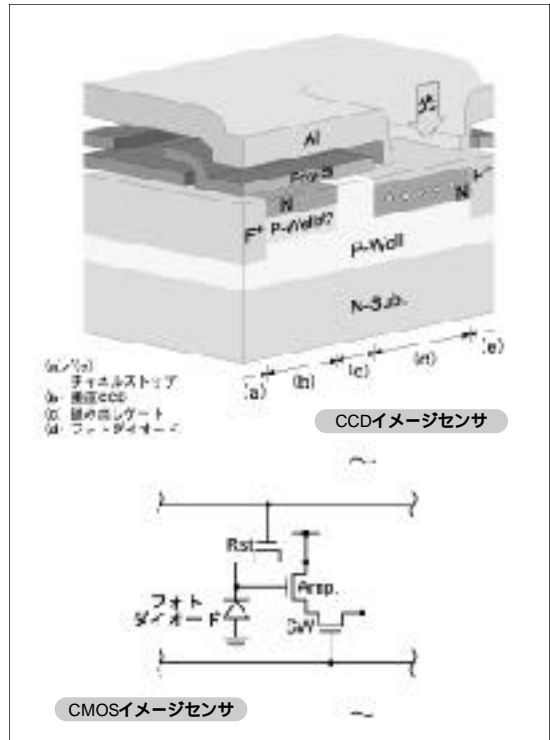


図2 画素の構造

域の分光特性に気をを使う必要がある。ひとつ大きな違いがあるとすれば、CCDの場合はスミア抑圧比を強く意識して遮光部の構造を決めているのに対して、CMOSイメージセンサは光電変換した電子の拡散電流が隣の画素に洩れこむことによる混色がないように、ウェル構造や基板に注意が払われている。

3. CCDイメージセンサとの比較

CCDイメージセンサはその製造プロセスの特殊性から、各社ともそれぞれプロセスの改良に長年の努力を積み重ね、カメラ一体型ビデオやデジタルスチルカメラに非常に高い画質を供給するまでになった。たとえば感度について言えば、CCDイメージセンサが本格的にカメラ一体型ビデオで使われ始めた時に比べ、今では単位面積で換算すると2桁以上の向上がみられている。撮像面で光電変換した電子数が1,000個に満たない信号でも、十分なS/N比の画像を出力することが可能なくらい暗電

流が低減し、感度およびダイナミックレンジが大幅に向上している。

CMOSイメージセンサについて言えば、画素それぞれに増幅用トランジスタが組み込まれている関係で、トランジスタのバラツキが固定パターンノイズの原因となり、そのノイズをキャンセルする技術が広く研究されてきた。

そこで、CCDとCMOSイメージセンサをいくつかの角度から独自に比較した結果を、表1に示す。

イメージセンサ	プロセス	電源		システムオンチップ	画質	コスト	サイズ
		電圧	電力				
CCD	専用	x		x			
CMOS	標準CMOS (+)					~	~

表1 CCDとCMOSの優劣

CCDイメージセンサが専用の製造プロセスで作られるのに対して、CMOSイメージセンサは標準CMOSプロセスが使える、多くの製造ラインで作ることが可能である。ただ、標準CMOSプロセスといえども、十分な画質を得るために、フォトダイオードの暗電流を低減する追加工程が用いられることが多い。電源に関して言えば、CMOSイメージセンサは低電圧単一電源で消費電力も小さく有利であるといえる。システムオンチップが容易であるかどうかはその製造工程が標準であるかどうかに関強く依存しており、CCDイメージセンサの製造プロセスにCMOS回路を作る工程を加えることが不可能であるとはいえないものの、製造プロセスに手を加える必要がない点で、明らかにCMOSイメージセンサのほうが有利である。

もっとも注目される画質については、長年の間画質を追及して、専用製造プロセスが改良に改良を重ねられてきたCCD撮像素子のほうが、圧倒的に良いことは周知の事実である。CMOSイメージセンサについても、同様に製造プロセスをカスタマイズすることで画質がCCDイメージセンサに近づく可能性はあるが、CMOSイメージセンサが多くCMOS製造プロセスで作れるという特長が失われる可能性がある。

コストに関して言えば、多くの論文で標準プロセスのCMOSイメージセンサのほうが低く抑えら

れると述べられているが、フォトダイオードを作る追加工程やカラーフィルタ工程を考慮すると、チップコストにそれほど大きな差がみられないと考えている。その上、イメージセンサのパッケージや撮像検査、信号処理ICをまとめて考えると、イメージセンサ以外を同じ条件でカメラシステムを作ると想定すれば、ますます差が小さくなっていく。もちろん、CMOSイメージセンサの画質に合わせたカメラシステムIC、パッケージなどにより、意識的にコストを下げることを検討する必要がある。

サイズはもっとも比較しにくい項目であるが、現段階では構造的側面から見て、CCDイメージセンサのほうが画素サイズを小さくでき、レンズまで含めたカメラモジュールを意識するとまだまだ有利である。ただ、システムオンチップで1-Chipカメラができる可能性があるとか、CCDイメージセンサで必要なDC-DCコンバータが必要ないとか、ビデオカメラの小型化に貢献した実装技術など多くを考え合わせると、将来どちらが有利かどうかは判定が難しい。

ここで、常に話題になるCCDとCMOSイメージセンサの画質を数値的に比較してみたい。いまのところ、同じ画素サイズ、画素数、動作周波数のイメージセンサが見当たらないため、比較としては不適正かもしれないが、ともに4μmを切る画素サイズのものを取り上げてみた。表2は、1/6型38万画素CCDイメージセンサと3.7μm角CMOSイメージセンサの特性比較表である。CMOSイメージセンサの感度はおおよそ1/5くらいであり、まだまだ性能の差が大きい。飽和信号量はたまたま同じであるが、暗電流はそれぞれ最大値と実力値であるため比較がしにくいので、CCDの暗電流をおお

	1/6型38万画素CCD	3.7×3.7μm ² CMOSイメージセンサ
感度	300mV	300mV/20 lx (学会公表値) (換算値) ≒ 60mV
暗電流 (50)	1mV (最大値)	≒ 0.1mV (実力値) 1mVp-p
飽和信号量	600mV	600mV

カラー品、輝度信号、F5.6、706cd/m²、3200K

表2 CCDとCMOSの特性比較

よその目安として実力値に置き換えてみると、約10倍の差が見られ、結果的にCMOSイメージセンサのダイナミックレンジが約20dB低いことがわかる。かなり荒っぽい比較ではあるものの、CMOSイメージセンサの画質はCCDに比べ大きな開きがあることがわかる。

これまであまり取り上げられなかったCCDの最大の弱点であるスミアに関しては、CMOSイメージセンサは一般的に画素で信号を増幅しているために極めて小さいと言える。逆に、CCDは撮像面全体にわたって露光タイミングが同じであるのに対して、一般的なCMOSイメージセンサは垂直走査に同期してラインごとに露光期間がずれる、いわゆるフォーカルプレーンシャッタになっているため、動体を映したときにゆがむ可能性があることに注意したい。

4. システムオンチップ

先にCMOSイメージセンサはCCDと比べてシステムオンチップが容易であることを述べた。ここでは、カメラ信号処理システムのイメージセンサとの親和性に関して考察してみたい。

CMOSイメージセンサは、標準CMOSプロセスで製造できるといっても基本はアナログICであるので、方式にもよるが、その特性は供給される電源電圧に大きく左右される。特に出力信号のダイナミックレンジは、フォトダイオードの蓄積電荷量やイメージセンサの信号線/出力回路の関係で、電源電圧に強く依存している。このため、イメージセンサの電源電圧は、ASICのトレンドに沿って低電圧へ移り変わることが難しく、3.3V前後から5Vで、現状は低くても2.7Vまでである。

図3は、カメラ信号処理システムまでイメージセンサの中に取り込んだ場合のブロック構成の一例を示している。最先端のCPUやASICではすでにデザインルールが0.18 μm の製造プロセスが使われ始めているが、その電源電圧は2.0Vを切り1.8V前後になっている。イメージセンサの信号処理も画像圧縮などの負荷の高い処理を要求されるようになると、消費電力の関係からこのような最先端のプロセスを用いる必要が出てくると考えられる。

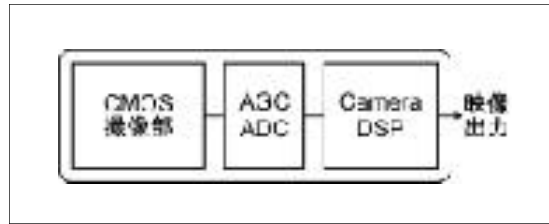


図3 CMOS 1-Chipカメラ

すると、イメージセンサと信号処理システムの電源電圧に大きな隔たりが生じ、同一チップにする発想のシステムオンチップが正しい選択かどうか疑わしくなってくる。もちろん、2種類の電源電圧を持つプロセスも存在するが、この場合は製造コストが高くなることは間違いない。また、ADCもそれを構成する重要な回路はアナログであるため、これも電源電圧が2Vをきることに困難があると言われている。

現時点では、信号処理ICに使われるCMOSプロセスの主流は、0.35から0.5 μm のプロセスであるため、電源電圧が3.3V前後であるが、低消費電力を追求するがためにより微細なデザインルールのプロセスが要求される場合は、将来的にイメージセンサと信号処理システムがそのプロセスにおける親和性を崩してしまう可能性が出てきそうである。したがって、イメージセンサではシステムオンチップが最大の特長であるとは言えないかもしれない。そうすると、システムオンチップに頼るより、むしろ今話題になっているスーパーコネクタ技術を含む実装技術がものを言うようになると想像される。

図4は、カメラ用よりむしろ、映像信号を処理した後の信号を利用することに焦点が絞り込まれ

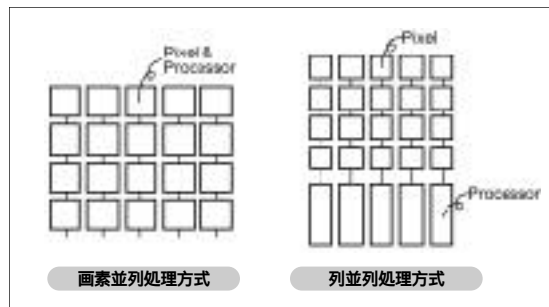


図4 並列信号処理

た場合のブロック構成図である。画素ごとに信号処理してしまう画素並列型、画素1行分の信号を同時に処理する列並列処理型の構成に大別される。このような構成のCMOSイメージセンサは、ビジョンチップとかマシンビジョンと呼ばれているセンサに有効であると考えられ、先に述べてきた電源電圧に関わるイメージセンサとシステムオンチップの親和性は当てはまらない。したがって、次のセクションで述べるような信号処理の機能を限定した用途においては、システムオンチップは必須のものといえる。

5. 応用

すでに、CMOSイメージセンサを使ったデジタルカメラやビデオカメラが発売されていることは周知の事実である。これが多くのユーザに受け入れられているかどうかは別として、すでに「価格が安く」しかも「気軽」という需要があることは間違いない。ただ、価格が安いという事実は、CMOSイメージセンサがとりわけ安いからではなく、カメラとしての性能や機能を絞ったり、部品全般のコストを抑えた結果である。今では、デジタルカメラも解像度が300万画素を超えるようになり、気軽に見るにはオーバースペックとも言われ、VGA解像度程度の簡単なカメラがインターネット需要により見直されているようである。

商品化された例を表3にまとめてみた。PCカメラにおいては台湾をはじめとしたPC周辺機器メーカーがUSB接続のCMOSカメラを商品化しており、PalmなどのPDAやゲーム機用がすでに登場している。また、おもちゃとして子供を対象にデジタルカメラとかビデオカメラまで作られており、一部の携帯電話やメール端末でもCMOSイメージセン

分類	応用例
PCカメラ	USB接続PCカメラ、PDA用カメラ、ゲーム機
デジタルカメラ	おもちゃ、35mm電子フィルム
ビデオカメラ	おもちゃワイヤレスカメラ
端 末	メール端末、携帯TV電話
その他	ラジコンカー、指紋照合センサ

表3 応用例

サが利用されている。面白いところでは、ラジコンカーに組み込まれたり、指紋照合センサの応用がみられる。その中でも特に携帯情報端末についていえば、バッテリーに用いられている材料が変わらない限り画期的にその容量が増加することはないため、使われるICの消費電力をいかに低減するかが大きなテーマとなっている。したがって、通信速度が大幅に速くなる次世代通信方式のサービスについては、携帯TV電話で動画を互いに伝送することがひとつの売り文句であり、低消費電力のイメージセンサが求められるなか、CMOSイメージセンサに期待がかかっている。

また別の観点から、ビデオカメラ用ではなく、主に映像信号をセンサ上で処理した結果を利用しようという動きがある。表4は主に日本の企業や研究機関で取り組まれている技術を示している。ここで取り上げた物体認識、動体検出、距離センサ、超高速撮像や蓄積時間適応はCMOSイメージセンサでないといふと困難な技術である。画像圧縮、蓄積時間適応や広ダイナミックレンジ撮像などは、やはりCMOSイメージセンサの得意とする技術と考えられる。このような用途では、ビデオカメラのように感度、ダイナミックレンジ、色再現性、解像度などすべての項目に対して小型化と同時に要求されることはなく、利用できる光量に制限がある場合に感度の高さだけが求められるとか、一方ではダイナミックレンジさえ大きければよいなど、他を犠牲にしながら比較的容易に要求をクリアできる応用がある。このような分野はむしろCCDでは実現が困難な領域であり、CMOSイメー

研究開発テーマ	研究機関
物体認識	三菱
動体検出	東大 / 東京理科大、三菱、ニコン、豊田中研
距離センサ	東芝、ソニー
超高速撮像	Photobit
画像圧縮	豊橋技科大 / 松下電子、東大 / 東京理科大
広ダイナミックレンジ撮像	ミノルタ / ローム
解像度可変	東大 / 東京理科大、オリンパス
蓄積時間適応	東大 / 東京理科大

表4 研究開発テーマ

ジセンサの成長が見込まれる分野であることは間違いない。

6. まとめ

以上、CCDとCMOSイメージセンサの比較から、CMOSイメージセンサのシステムオンチップ、その応用までとりとめもなく述べてきた。CMOSイメージセンサは、その最大の問題点である固定パターンノイズを解決する技術がいくつか開発され、いよいよ実用化の段階に入ってきている。しかしカメラの用途を考えた場合、CCDとの画質の差は依然大きくその発展もいまだ衰えを見せていないため、CMOSイメージセンサがビジネスとして成り立つには、その長所を生かした携帯機器での応用に特化することが近道であろう。また、カメラに使うのに十分な画質を追求するとともに、CCDでは実現が難しい機能面での研究開発を、今後、より活発に進めるべきであると考えている。

ソニー(株)

パーソナルITネットワークカンパニー

パーソナルビデオカンパニー

TEL 03-5769-5585 FAX 03-5769-5940

E-mail : yonemoto@cv.sony.co.jp

【参考文献】

- 1) E.R. Fossum, Active pixel sensors are CCDs dinosaurs?, Proc. SPIE, vol. 1900, pp.2-14, 1993
- 2) H. Ihara, H. Yamashita, I. Inoue, T. Yamaguchi, N. Nakamura and H. Nozaki, A $3.7 \times 3.7 \mu\text{m}^2$ Square Pixel CMOS Image Sensor for Digital Still Camera Application, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.182-183, 1998
- 3) A. Asai, Y. Toumiya, K. Matsuzaki, K. Nigawara, S. Kitayama, Y. Wataya and K. Masuda, A $3.30 \times 2.95\text{mm}^2$ 1/6-inch 250k-pixel IT-CCD image sensor, Proceedings of IEEE workshop on CCDs & AIS, R9, 1997
- 4) S.K. Mendis, S. Kemeny and E.R. Fossum, A 128×128 CMOS Active Pixel Image Sensor for High Integrated Imaging Systems, IEDM 93, vol.22.6, pp.583-586, 1993
- 5) E. Oba, K. Mabuchi, Y. Iida, N. Nakamura and H. Miura, A 1/4 Inch 330k Square Pixel Progressive Scan CMOS Active Pixel Image Sensor, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.180-181, 1997
- 6) K. Yonemoto, H. Sumi, R. Suzuki and T. Ueno, A CMOS Image Sensor with a Simple FPN-Reduction Technology and a Hole Accumulated Diode, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.102-103, 2000
- 7) H. Miura, H. Ishiwata, Y. Iida, Y. Matunaga, S. Numazaki, A. Morisita, N. Umeki and M. Doi, A 100Frames/s CMOS Active Pixel Sensor for 3D-Gesture Recognition System, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.142-143, 1999
- 8) J. Woo, D. Min, J. Kim and W. Kim, A 600-dpi Capacitive Fingerprint Sensor Chip and Image-Synthesis Technique, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.34, pp.469-475, 1999
- 9) 芦ヶ原隆之、吉村真一、横山 敦、距離画像センサチップを用いたリアルタイムレンジファインダ、映像情報メディア学会技術報告、vol.21, no.49, pp.13-18 Sep. 1997
- 10) K. Aizawa, T. Hamamoto, Y. Ohtsuka, M. Hatori and M. Abe, Pixel Parallel and Column Parallel Architectures and their Implementations of On Sensor Image Compression, Proceedings of IEEE Workshop on CCDs and AIS, R31, 1997
- 11) H. Nomura, T. Shima, A. Kamashita, T. Ishida and T. Yoneyama, A 256×256 BCAST Motion Detector with Simultaneous Video Output, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.282-283, 1998
- 12) 山田啓一、曾我峰樹、動き検出ビジョンチップの検討、映像情報メディア学会技術報告、vol.23, no. 5, pp.37-42 Jan. 1999
- 13) E. Funatsu, Y. Nitta, Y. Miyake, T. Toyoda, J. Ohta and K. Kyuma, An Artificial Retina Chip

- with Current-Mode Image Processing Functions, IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, pp.1777-82, Oct. 1997
- 14) S. Kawahito, M. Yoshida, M. Sasaki, K. Umehara, Y. Tadokoro, K. Murata, S. Doushou and A. Matsuzawa, A Compressed Digital Output CMOS Image Sensor with Analog 2-D DCT Processors and ADC/Quantizer, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.184-185, 1997
 - 15) 久間和生、田中健一、太田淳、田井修市、岩附守、人口網膜チップの開発と事業化、応用物理、第67巻、第4号、1998
 - 16) S. Smith, J. Hurwitz, M. Torrie, D. Baxter, A. Holmes, M. Panaghiston, R. Henderson, A. Murray, S. Anderson and P. Denyer, A Single-Chip 306 × 244-Pixel CMOS NTSC Video Camera, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.170-171, 1998
 - 17) E.R. Fossum, CMOS Image Sensors: Electronic Camera-on-a-Chip, in IEDM Tech. Dig., pp.17-25, Dec. 1995
 - 18) W. Yang, O. Kwon, J. Lee, G. Hwang and S. Lee, An Integrated 800 × 600 CMOS Imaging System, in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.304-305, 1999
 - 19) R.M. Guidash, T.-H. Lee, P.P.K. Lee, D.H. Sackett, C.I. Drowley, M.S. Swenson, L. Arbaugh, R. Hollstein, F. Shapiro and S. Damer, A 0.6 μ m CMOS Pinned Photodiode Color Imager Technology, in IEDM Tech. Dig., pp.927-929, 1997
 - 20) 山口鉄也、井原久典、山下浩史、井上郁子、野崎秀俊、CMOSイメージセンサにおける混色のシミュレーション解析、映像情報メディア学会技術報告、vol.21、no.74、pp.7-9、Nov. 1997
 - 21) ソニーICX238AKEスペックシート