

## ■ 光学工房

## カスタム CMOS イメージセンサー

システム  
の視点から

ある日、ふとひらめいて、新しいシステムに思いを馳せる。ところが、必要なデバイスがない。そのシステムは絵に描いた餅だったことに気づき、がっかりする。こんなデバイスがあれば、自分の思い描く素晴らしいシステムができるのに…それが実現できなくて歯がゆい。そんなとき、自分でデバイスが作れたらと思う。しかし、既存デバイスを組み合わせてシステムを作ってきた私は、デバイス作製に敷居の高さを感じ、尻込みしていた。

同じような悩みを抱える方々に、今の私からのお勧めは、必要な機能をもつ受光素子、とりわけ、CMOS (complementary metal oxide semiconductor) イメージセンサーを自分で設計し、LSI 試作サービスを用いて作り、そのデバイスを使って夢のシステムを実現して、世に送り出すことである。

現在の光学システムの多くは、電子技術との組み合わせで多彩な機能を実現している。多くの光学システムの信号の出口は受光素子である。1点の光強度の時間変化を観測するにはフォトダイオード、一次元ではリニアセンサー、二次元（うまく使えば三次元）ではイメージセンサー、と相場は決まっている。しかし、その中でもイメージセンサーは、特に曲者である。例えば、光強度の微弱変化を検出したい場合、ロックイン検出するのは常套手段であろう。リニアセンサーの場合、フォトダイオードごとに光電流を並列に出力して、その後にロックインアンプを並べることができる。ところが、イメージセンサーとなると、各画素にあるフォトダイオードから直接電流を取り出すには、チャンネル数に限度がある。全チャンネル並列出力すると、 $32 \times 32$  チャンネルぐらいが限界だろう。高速に高解像度の画像を読み出してその後でロックイン検出すると、消費電力もノイズも増えるので、やはり難しい。仕方ないので、リニアセンサーで二次元面をスキャンすることになるが、スキャンに時間がかかる。このように、デバイスがシステムに与える制約は大きい。結局、思い描いているシステムの性能や機能を妥協することになり、ちょっと切ない思いをする。

LSI といえば、現代社会を支えるごく基本的な電子デバイスである。ところが、特にアナログ LSI となると、光に関わる研究者で設計経験のある方は、それほど多くないと思う。実際に挑戦してみると、オペアンプ回路ほど簡単ではないものの、電子回路の基本的なことがわかっていれば敷居もそれほど高くない。LSI の設計方法<sup>1,2)</sup> はおおよそ決まっている。まず、ソースフォロワー回路、カスコード増幅回路、これを利用したスイッチトキャパシタ回路、カレントミラー、サンプルホールド回路などの基本回路から、必要なものを選ぶ。次に、駆動する配線や後段の回路の入力容量と必要なスピード（スルーレート）からバイアス電流量を決め、所望の利得と動作点電圧（オーバードライブ電圧）からトランジスタサイズを決める、といった具合である。回路が決まれば、素子特性を合わせるための並進対称レイアウト、電圧低下を起こさないための配線の太さ、フォトダイオードなどの敏感な部分に容量結合によるノイズを与えないための配慮、などの定石を守って設計すれば、LSI の動作確率も高くなる。LSI が設計できれば、当然、イメージセンサーも設計できる。大学・高専であれば、東京大学大規模集積システム設計教育研究センター<sup>3)</sup> (VDEC: VLSI Design and Education Center, <http://www.vdec.u-tokyo.ac.jp/>) の協力で、研究用途に限定して、無償で LSI 設計ツールを利用できる。また、VDEC を通して、国内外の LSI 試作サービスを利用し、格安で LSI が試作できる。

では、システムの観点からみたとき、どんな機能をもつカスタムイメージセンサーが、即効果を上げられるだろうか。

ひとつの有望な例として、「ビデオレートを遙かに上回る高周波信号を、信号処理により、ビデオレート程度の低周波信号に変換して画像を得る」場合がある。先のロックイン検出の例で、10 kHz の周波数で光強度を変調して物体を測定し、30 fps (frames per second) で画像を得るとする。少なくとも、ナイキスト周波数を考慮して 20 kfps, など

という高速画像はいらぬはずである。イメージセンサーには積分効果があり、これによって高感度を実現しているが、高周波成分は消えてしまう。そこで、高周波信号を捕らえるために、イメージセンサーの画素内で 10 kHz の成分を抽出してから積分する。その後、30 fps で画像を読み出すことで、トランジスターに起因する読み出しノイズを低減でき、メガピクセル級の高解像度化への可能性も期待できる。このようなイメージセンサーの例として、文献 3) がある。

もうひとつの例に、「光情報を複数の角度からみる」場合がある。手前味噌になるが、文献 4) では、イメージセンサーと空間光通信の受信デバイスとを兼ねたデバイスにより、空間波長多重通信を用いた高速通信を実現するとともに、通信時にユーザーの位置情報を取得して存在する場所を把握できる屋内光無線 LAN を提案している。このイメージセンサーは、通信機器が発するデジタル光信号を、位置マーカーと信号の 2 種類の型式で光検出する。最初に画素をイメージセンサーモードで動かして、通信機器の光源位置を捕らえる。その後、フォトダイオードで受信した光信号を直接増幅して、通信機器から送信される高速なデジタル光信号を得る。これは、カスタムイメージセンサーだからこそ実現できることで、新しい光学システムの創出に繋がるのではないだろうか。

ところで、筆者が思うに、システムに即適用できるカスタムイメージセンサーを設計するための重要なことは、実現したいすべての機能の中から、イメージセンサーに内蔵する処理を選択することである。必要最小限の機能のみをチップに内蔵し、それ以外の機能はチップ外で行う。例えば、アナログ回路が多くなると、精度や動作率の確保が難しくなるが、割り切ることで、イメージセンサーの回路構成を簡単にし、動作率を上げる。このような割り切りは設計者のさじ加減次第で、カスタムイメージセンサー設計の醍醐味である。前述の光無線 LAN を例にすると、通信機器の位置検出をセンサー上で行っ

て位置情報のみを出力するインテリジェントな方式にはしなかった。センサーは画像の出力のみに留め、外部の画像処理で位置検出を行うことで、LSI を確実に動作させた。デジタル回路も、組み合わせ回路や同期回路などの基本的なものに留め、タイミングに敏感な回路や、アナログ的な振る舞いをする回路は、動作実績を積み重ねてから、徐々に試すようにしている。

ここまで、カスタムイメージセンサーの効果と魅力を訴えてきたわけであるが、難しいこともある。カスタムイメージセンサーはアナログ回路なので、精度を出すことはそう簡単ではない。特に、フォトダイオード周りは、設計者に与えられている自由が少ないので、市販品のイメージセンサーに匹敵する画質性能を得ることを目的にすることは、お勧めできない。また、敷居が低くなったとはいえ、初めての LSI 設計は大変である。経験のある研究者との横の繋がり是非常に重要ではないだろうか。

システムの観点から発想するカスタムイメージセンサーは、発展途上にある。その一方で LSI 技術は多方面の分野に浸透し、異分野から新しい LSI が生まれてくる環境が整いつつある。今後、多くの光研究者が参入して、独創的なカスタムイメージセンサーと光学システムを世に送り出すことを切望している。

この記事に関するお問い合わせは、kadono@mech.saitama-u.ac.jp、もしくは hayasaki@opt.tokushima-u.ac.jp までお寄せください。

(奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科  
香川景一郎)

## 文 献

- 1) B. Razavi: アナログ CMOS 集積回路の設計, 基礎編および応用編 (黒田忠広監訳, 丸善, 2003).
- 2) 谷口研二: LSI 設計者のための CMOS アナログ回路入門 (CQ 出版社, 2005).
- 3) S. Ando *et al.*: *IEEE Workshop CCD & AIS* (IEEE, 1999) pp. 33-36.
- 4) K. Kagawa *et al.*: *IEICE Trans. Comm.*, **E86-B** (2003) 1498-1507.