本記事関連動画を
ホームページで公開中!
www.ite.or.jp

3章 超高感度・超高精細イメージセンサ技術

小林 昌弘[†](正会員)

キーワード：イメージセンサ，超高感度，超高精細，超多画素

1. まえがき

近年、イメージセンサの応用範囲はますます拡大している。デジタルカメラ、ビデオカムコーダやスマートフォンなどの観賞用のイメージング用途に加えて、ドローン、車載カメラ、監視カメラや産業用カメラなど、センシング分野への応用が積極的に進められている。観賞用のイメージング用途においては、感度を高めることで信号ノイズ比を高く鮮やかに夜景を撮像したい、画素数を増やすことで同じ画角でもより細かい質感を解像度高く撮像したい、といったユーザの要求に応える形で、各社からカメラ製品が積極的に発表・発売されている(図1, 図2)。

一方、センシング分野においても、感度を高めることで、肉眼では検知できない低照度下でも物体や天体などを検出することができる。また、解像度の向上とノイズの低減を両立させることで、より微細な欠陥の検査可能な産業用カメラや、より広域を撮影可能な監視カメラネットワークを少ない台数で構築できる。など、さまざまな産業的な利点が得られる。さらに、可視光領域外にも感度を持たせることで、紫外光を用いた異物混入検査や赤外光を用いた距離計測や物体認識への応用など、これまでイメージセンサが用いられていなかった分野においても幅広い展開が見込まれる。

本稿では、近年の主要国際会議等で報告された内容やニュースリリースなどの開発事例を中心として、超高感度・超高精細イメージセンサ技術についてまとめて述べる。

2. 近年の高感度センサの開発動向

イメージセンサの感度は一般的に $[e^-/(lx \cdot s)]$ という単位で表現される。単位が示すとおり、ある照度 $[lx]$ の光が単位時間 $[s]$ イメージセンサに照射された場合に、光電変換部(フォトダイオード)で何電子 $[e^-]$ に変換されるか、とい

う指標である。感度を高める方法としては、大きく分けて、①画素に入射した光を光電変換部に集める、②光電変換部の面積・体積を大きくする、③単位深さあたりの光電変換効率を高める、の三つが考えられる。①の例としては、古くはオンチップマイクロレンズ構造^{1)~3)}や反射防止構造、近年では光導波路構造⁴⁾⁵⁾、裏面照射型構造⁶⁾や積層構造⁷⁾、などがある。②の例としては、イメージセンサの1画素のサイズを大きくする。フォトダイオードを深くまで形成することで特に長波長側の感度を向上させる、などがある。③の例としては、アバランシェ増幅により電子を増幅する、Si以外の光電変換材料を用いる、などがそれぞれ考えられる。さらに、最新のイメージセンサではそれらが適宜組み合わせられて超高感度化が実現されている。

2.1 イメージング用途向け高感度センサ

図1に示すのは、レンズ交換式デジタルカメラ(Digital Interchangeable Lens Camera: DILC)の中でもAPS-H(約28mm×約18mm)以上の光学サイズのイメージセンサを搭載したデジタルカメラの日本国内での発売時期を横軸として、最高ISO感度設定についてまとめたものである^{8)~14)}。なおISO感度(Film Speed)は写真フィルム用に国際標準化機構(ISO)で策定された規格であり、ある写真フィルムが

図1 デジタルカメラの最高ISO感度の推移

[†] キヤノン株式会社 半導体デバイス製品第二設計部

"Technology Trend of Image Sensors for Ultra High Sensitivity and Ultra High Definition" by Masahiro Kobayashi (Semiconductor Device Product Design Div. 2, Canon Inc., Kawasaki)

図2 デジタルカメラ・イメージセンサの画素数の推移

どの程度弱い光まで記録できるかを示す指標である¹⁵⁾。デジタルカメラにおいては、写真フィルムではなくイメージセンサを用いるため、ここでいうイメージセンサのISO感度は、写真フィルムのISO感度に「相当」する値である。さらに、デジタルカメラにおけるISO感度は、ある基準光量での信号ノイズ比を基とし、各社でその基準は異なる。そのため、同じ最高ISO感度設定値であってもイメージセンサの感度は異なることがありうるが、簡易的な比較のために図1では各社のカメラ仕様をそのまま載せている。

図1によれば、2001年12月にAPS-HサイズのDILCがISO1600で⁸⁾、2002年11月にフルサイズ(約36 mm×約24 mm)のDILCがISO1250で⁹⁾発売されたのをはじめとして、常用最高ISO感度、拡張最高ISO感度ともに年々向上している。さらに、2008年11月には拡張ISO感度で25600¹⁰⁾、2012年3月には20万^{11) 12)}、2015年12月には456万¹³⁾、2016年3月には328万¹⁴⁾と、目覚ましい速度で向上している。

また、図1には図示されていないが、2013年のISSCCでは300 mmのSiウェハサイズで作製可能な最大のチップサイズ(約20 cm角)で作製された画素サイズ160 μm 角のCMOSイメージセンサが報告されている¹⁶⁾。感度は 25×10^6 [e⁻/(lx·s)]であり、このイメージセンサを望遠鏡やカメラとして用いた場合、満月時の明るさ(0.3 lx程度)相当の環境下でも10等級相当の非常に暗い流星や夜の森の中でもフクロウ(図3)を動画で撮像することができる¹⁷⁾。

2.2 非可視光領域の高感度センサ

イメージセンサの次なる応用先として、デジタルカメラに代表される観賞用のイメージング用途の次に期待されているのが、車載カメラ、監視カメラや産業用カメラに代表されるセンシング用途である。特に近赤外領域の撮像は、歩行者の検知や距離計測など車載カメラ用途での需要の拡大が見込まれており、直近の主要国際会議においても多くの報告がなされている^{18)～24)}。また、紫外領域への撮影範囲の拡大に

図3 超高感度センサ^{16) 17)}による満月時の明るさ(0.3 lx程度)相当での撮影例

よって、これまでは特殊計測器を用いていたセンシング用途への拡大を狙った報告も多くなされている^{19) 25)～29)}。非可視光領域の感度を高めるために、②のフォトダイオードを深く形成する²²⁾、基板の平坦性を原子レベルとすることで、表面で生じる電荷も活用する¹⁹⁾、基板表面を特殊な形状とすることで赤外感度を高める²⁴⁾、③のSi以外の材料を用いる^{18) 20) 21) 23) 25)～27)}など、さまざまな報告が積極的になされており、イメージセンサ開発におけるデジタルカメラの次のテクノロジドライバの一つであると言える。

2.3 CCD・CMOSイメージセンサ以外の高感度センサ

③に相当する光電変換効率を高めるための技術として、光子をアバランシェ増倍しカウントするSPAD (Single Photon Avalanche Diode)がある。SPADは各画素にカウンタが必要で、これまで画素ピッチを縮小することが難しく、Fill Factor (開口率)も低くなっており、光電変換効率の低下要因ともなっていた。この課題に対し、特にカウンタ部分の専有面積を縮小可能な微細なプロセスと裏面積層構造の適用とで、画素ピッチのシュリンクとFill Factorの向上による性能向上とを両立したとする報告が相次いでなされた^{30)～32)}。またSiフォトダイオード以外を用いる例として、有機材料や無機材料からなる光電変換膜も開発が進められている。一般的に光電変換膜はSiよりも材料の配合による波長選択性があるとされており、かつ光吸収係数を大きくできることから薄膜化が可能であり、特に非可視光領域でSiフォトダイオードの量子効率を大幅に超える感度を得られるとする報告が相次いでなされている^{18) 20) 21) 26) 33) 34)}。

3. 近年の高精細センサの開発動向

図2に示すのは、横軸を図1と同様にして、縦軸にイ

イメージセンサの画素数をまとめたものである^{8) 9) 35) ~ 42)}。市販のカメラにおいては、APS-Hサイズ以上のイメージセンサを搭載したものを載せた。画素数を向上させることで、画角が同等であれば、より微細な構造を撮像したり、同等の解像感でより広角の画像を得たりすることができる。例えば、ドローンに搭載して橋脚のコンクリートのひび割れを点検したり、より遠方から不審物の監視を行ったりすることが可能となる。

図2によれば、2001年12月にAPS-HサイズのDILCが約410万画素で⁸⁾、2002年11月にフルサイズのDILCが約1,100万画素で⁹⁾発売されたのをはじめとして、ISO感度ほどの急激な伸びではないものの年々向上している。近年では2015年6月にフルサイズでは約5,060万(50.6 M)画素のDILC(画素ピッチ:約4.1 μm , 光学サイズ:約36 mm×約24 mm)³⁵⁾が、中判以上のサイズでは2018年6月に1億(100 M)画素のDILC(画素ピッチ:4.6 μm , 光学サイズ:約40 mm×約53 mm)³⁶⁾が発売されている。

一方、広く販売されているカメラではないが、学会発表や開発発表がされているイメージセンサとしては、2007年6月にAPS-Hサイズで約5,200万(52 M)画素(画素ピッチ:3.2 μm)³⁷⁾、2010年8月にAPS-Hサイズで約1億2千万(120 M)画素(画素ピッチ:約2.2 μm)³⁸⁾、2015年6月に大型のCCDセンサで約2億5千万(250 M)画素(画素ピッチ:5.6 μm , 光学サイズ:約96 mm×約82 mm)³⁹⁾、2015年9月にAPS-Hサイズで約2億5千万(250 M)画素(画素ピッチ:約1.5 μm)⁴⁰⁾、2016年2月に大型のCMOSセンサで約3億9千万(390 M)画素(画素ピッチ:3.9 μm , 光学サイズ:約102 mm×約59 mm)⁴¹⁾が、それぞれ発表されている。

APS-Hサイズで約2億5千万画素のイメージセンサをカメラとして用いた場合、約300 m離れた道路標識も拡大して視認でき(図4)、約18 km離れた場所を航行する航空機を識別することも可能となる⁴⁰⁾。人間の網膜には明暗を認識する桿体(かんたい)細胞が片目あたりに約1億2千万個存在するといわれており^{42) 43)}、両目では約2億4千万個となる。人間が目で取り込んだ像を画像として認識するまでには立体視や脳でさまざまな画像処理に相当する神経伝達が行われるため単純には比較できないが、ほぼ人間の目と同等の解像度がAPS-Hサイズ程の大きさのCMOSイメージセンサで得られるようになった点は一つのマイルストーンと言えよう。

また、2018年7月には光学サイズが約6.4 mm×約4.8 mmで1/2型相当と小型でありながら画素ピッチ0.8 μm で4,800万(48 M)画素を有し、スマートフォンに搭載可能なCMOSイメージセンサが発表されている。なお、0.8 μm という長さは、おおよそ人間の可視光線の上界から近赤外領域にかけての長さに相当する。さらに、仮にこの画素ピッチでフルサイズ相当の光学サイズに広げた場合には約13億

図4 超多画素センサ⁴⁰⁾による遠景の撮影例と15倍電子ズーム結果の例(右下)

(1.3G)画素にもなる。イメージセンサの解像度の向上に合わせて撮像レンズやモニタの解像度も向上させることや、データ量の増加に合わせて画像保存のためのストレージや画像圧縮技術を備えるなど、イメージセンサのみならず関連する技術開発も合わせて考える必要がある。

4. 今後の展望とむすび

これまで述べたとおり、イメージセンサの超高感度化・超高精細化は2000年以降で急速に進んでおり、合わせてイメージセンサの応用範囲もイメージング用途にとどまることなく、さまざまなセンシング用途へと拡大している。一方で、これまでのイメージセンサ技術開発の牽引役であったデジタルカメラ、スマートフォンに限らず、他のセンシング用途の応用製品が技術開発の牽引役となる可能性もあり、イメージセンサ開発からますます目が離せない状況である。今後も従来の発想にとらわれない構造や駆動方法、信号処理、材料など、新しいアイデアが各所から生み出され、イメージセンサに更なるブレイクスルーと新たな需要の創出がもたらされることを、イメージセンサ開発に携わる技術者の一人として期待するとともに、一助となるよう開発に励みたい。

(2018年8月17日受付)

〔文 献〕

- 1) http://www.ieice-hbkb.org/portal/doc_551.html: “電子情報通信学会知識ベース知識の森8群4編画像入力とカメラ”(Oct. 2011)
- 2) 和田孝道ほか: “固体撮像装置およびその製造方法”, 特許公報, 特願昭51-151123 (Dec. 1976)
- 3) Y. Ishihara, et al.: “A high photosensitivity IL-CCD image sensor with monolithic resin lens array”, IEDM, pp.497-500 (Dec. 1983)
- 4) M. Kobayashi, et al.: “A 1.8e-rms Temporal Noise Over 110dB Dynamic Range 3.4 μm Pixel Pitch Global-Shutter CMOS Image Sensor with Dual-Gain Amplifiers SS-ADC and Multiple-Accumulation Shutter”, ISSCC, pp.74-75 (Feb. 2017)
- 5) H. Sekine, et al.: “A High Optical Performance 3.4 μm Pixel Pitch Global Shutter CMOS Image Sensor with Light Guide Structure”, Proc. 2017 IISW, pp.394-397 (June 2017)
- 6) http://www.sony-semicon.co.jp/products_ja/IS/CMOS_tech/: “CMOSイメージセンサ (Sony HP)”

- 7) <https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201201/12-009/>: “カメラの進化を実現し続ける次世代の裏面照射型CMOSイメージセンサを開発” (Jan. 2012)
- 8) <https://cweb.canon.jp/eos/lineup/old-products/index.html>: “EOS生産終了した商品 (Canon HP)”
- 9) <https://cweb.canon.jp/eos/lineup/old-products/index.html>: “EOS生産終了した商品 (Canon HP)”
- 10) <https://cweb.canon.jp/eos/lineup/old-products/index.html>: “EOS生産終了した商品 (Canon HP)”
- 11) http://www.nikon-image.com/products/slr/discontinue_lineup/: “一眼レフカメラ製品一覧 (旧製品) (Nikon HP)”
- 12) <https://cweb.canon.jp/eos/lineup/old-products/index.html>: “EOS生産終了した商品 (Canon HP)”
- 13) <https://cweb.canon.jp/newsrelease/2015-07/pr-me20fsh.html>: “キヤノン初の超高感度多目的カメラ “ME20F-SH” を発売最大ゲイン時は最低被写体照度0.0005lux以下 (ISO感度400万相当) を実現” (Sep. 2015)
- 14) <http://www.nikon-image.com/products/slr/lineup/>: “一眼レフカメラ製品一覧 (Nikon HP)”
- 15) <https://ja.wikipedia.org/wiki/ISO感度>: “ISO感度”
- 16) Y. Yamashita, et al.: “A 300mm wafer-size CMOS image sensor with in-pixel voltage-gain amplifier and column-level differential readout circuitry”, ISSCC, pp.408-410 (Feb. 2011)
- 17) <https://global.canon/ja/news/2011/p2011sep15j.html>: “世界最大面積の超高感度CMOSセンサを応用し、10等級相当の流星の広視野動画撮像に成功” (Sep. 2011)
- 18) S. Machida, et al.: “A 2.1-Mpixel Organic Film-Stacked RGB-IR Image Sensor with Electrically Controllable IR Sensitivity”, ISSCC, pp.78-79 (Feb. 2017)
- 19) Y. Fujihara, et al.: “A Spectral Imaging System with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor and Electrically Tunable 10nm FWHM Multi-Bandpass Filter”, Proc. 2017 IISW, pp.47-50 (June 2017)
- 20) L. Barrow et al.: “A QuantumFilm Based QuadVGA 1.5_m Pixel Image Sensor with Over 40% QE at 940 nm for Actively Illuminated Applications”, Proc. 2017 IISW, pp.378-381 (June 2017)
- 21) P.E. Malinowski et al.: “Monolithic Near Infrared Image Sensors Enabled by Quantum Dot Photodetector”, Proc. 2017 IISW, pp.382-385 (June 2017)
- 22) A. Lahav, et al.: “Cross Talk, Quantum Efficiency and Parasitic Light Sensitivity Comparison for Different Near Infra-Red Enhanced sub 3um Global Shutter Pixel Architectures”, Proc. 2017 IISW, pp.390-393 (June 2017)
- 23) H. Oka, et al.: “Back-side Illuminated GeSn Photodiode Array on Quartz Substrate Fabricated by Laser-induced Liquid-phase Crystallization for Monolithically-integrated NIR Imager Chip”, IEDM, pp.393-396 (Dec. 2017)
- 24) I. Oshiyama, et al.: “Near-infrared Sensitivity Enhancement of a Back-illuminated Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor with a Pyramid Surface for Diffraction Structure”, IEDM, pp.397-400 (Dec. 2017)
- 25) P. Padmanabhan, et al.: “A CMOS Front-end for GaN-based UV Imaging”, Proc. 2017 IISW, pp.184-187 (June 2017)
- 26) T. Okino, et al.: “Ultraviolet and Visible Spectral Imaging of Hydrogen Flames Using an Organic Photoconductive Film CMOS Imager”, Proc. 2017 IISW, pp.188-191 (June 2017)
- 27) Y.-R. Lin, et al.: “Low Dark Current UV-VIS Planar- electrode Perovskite CMOS Image Sensor”, Proc. 2017 IISW, pp.192-194 (June 2017)
- 28) S. Nikzad, et al.: “UV/Optical Photon Counting and Large Format Imaging Detectors from CubeSats, SmallSats to Large Aperture Space Telescopes & Imaging Spectrometers”, IISW, pp.352-355 (June 2017)
- 29) https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressimg/tohokuuniv-press20180711_01web_shigaisen.pdf: “超小型紫外線センシングSiフォトダイオードを実用化” (Sep. 2018)
- 30) T. Al Abbas, et al.: “8.25μm Pitch 66% Fill Factor Global Shared Well SPAD Image Sensor in 40nm CMOS FSI Technology”, Proc. 2017 IISW, pp.97-100 (June 2017)
- 31) M.-J. Lee et al.: “A Back-Illuminated 3D-Stacked Single-Photon Avalanche Diode in 45nm CMOS Technology”, IEDM, pp.397-400 (Dec. 2017)
- 32) A.R. Ximenes et al.: “A 256 × 256 45/65nm 3D-Stacked SPAD-Based Direct TOF Image Sensor for LiDAR Applications with Optical Polar Modulation for up to 18.6dB Interference Suppression”, ISSCC, pp.96-97 (Feb. 2018)
- 33) T. Watabe et al.: “Three-Transistor-Pixel CMOS Image Sensor for 8K Super Hi-Vision Stacked Sensor with Highly Sensitive Photoconversion Layer”, Proc. 2017 IISW, pp.218-221 (June 2017)
- 34) K. Nishimura et al.: “An 8K4K-Resolution 60fps 450ke-Saturation-Signal Organic-Photoconductive-Film Global Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller”, ISSCC, pp.82-83 (Feb. 2018)
- 35) <https://cweb.canon.jp/eos/lineup/5ds/>: “EOS 5Ds | 概要 (Canon HP)”
- 36) http://static.hasselblad.com/2016/04/SK_PressReleaseHasselblad_launches_an_all_new_medium_format_camera_JP.pdf: “ハッセルブラッドが「まったく新しい」電子プラットフォームの中判デジタルカメラを発表” (Apr. 2016)
- 37) M. Iwane et al.: “52 Mega-pixel APS-H-size CMOS Image Sensor for Super High Resolution Image Capturing”, Proc. 2007 IISW, pp.295-298 (June 2007)
- 38) <https://global.canon/ja/news/2010/p2010aug24j.html>: “APS-Hサイズで世界最高の約1億2,000万画素のCMOSセンサの開発に成功” (Aug. 2010)
- 39) J. Bosiers, et al.: “Recent developments on large-area CCDs for professional applications”, Proc. 2015 IISW, pp.32-35 (June 2015)
- 40) <https://global.canon/ja/news/2015/p2015sep07j.html>: “APS-Hサイズ (約29.2 × 20.2mm) で世界最高画素数約2億5,000万画素のCMOSセンサを開発” (Sep. 2015)
- 41) J. Bogaerts, et al.: “105 × 65mm² 391Mpixel CMOS Image Sensor with >78dB Dynamic Range for Airborne Mapping Applications”, ISSCC (Feb. 2016)
- 42) <https://global.canon/ja/technology/interview/CMOS/>: “人間の眼を超える技術CMOSセンサの開発秘話”
- 43) <http://mh.rgr.jp/memo/mz0384.htm>: “錐体細胞と桿体細胞 (森の里ホームズHP)”
- 44) <https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201807/18-060/index.html>: “業界最多有効4,800万画素のスマートフォン向け積層型CMOSイメージセンサを商品化” (July 2018)

こばやし きさひろ
小林 昌弘 2004年、東京工業大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。同年、キヤノン(株)入社。以来、画素デバイスをはじめCMOSイメージセンサに係わる設計、研究開発業務に従事。現在、同社半導体デバイス製品開発センター主任研究員。正会員。