

1. まえがき

映像情報メディアのさまざまなシステムにおいて,その入 力部にあたるカメラはシステム全体の品質を大きく左右す る重要な技術である.カメラを構成する部品の中でも,像 情報を時空間サンプリングし電気信号に変換するイメージ センサは,最も重要なデバイスである.現在,イメージセ ンサは,スマートフォンやディジタルカメラなどの電子機 器に広く搭載されているが,車載やセキュリティ,IoTなど への活用により,その活躍の場がさらに広がりつつある.

本稿は、2018年4月以降の約2年間におけるイメージセ ンサやカメラ等の画像情報のセンシング分野における技術 進展を,主に情報センシング研究委員会の構成員が分担し て記述したものである.以降、2章ではイメージセンサに おけるセンサ構造・材料、回路技術、画素微細化・多画素 化、高感度・低ノイズ化、高速化・広ダイナミックレンジ 化・広波長化、画像処理、特殊機能について、3章では放 送用カメラ・高精細カメラ、携帯電話用カメラ・ディジタ ルカメラ・ビデオカメラ、車載用カメラ・セキュリティ用

†1 金沢大学

†2 NHK 放送技術研究所
†3 北海道大学
†4 株式会社 SensAI
†5 キヤノン株式会社
†6 東北大学
†7 静岡大学
†8 埼玉大学
†9 東京工業大学
†10 株式会社ニコン
†11 パナソニック株式会社
†12 三菱電機株式会社
†13 浜松ホトニクス株式会社

"Image Electronics Information Sensing" by Junichi Akita (Kanazawa University, Kanazawa), Yoshinori Iguchi and Ryohei Funatsu (Science and Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Masayuki Ikebe (Hokkaido University, Hokkaido), Motoyuki Maruyama (SensAI, Yokohama), Hiroshi Sekine (Canon Inc., Tokyo), Rihito Kuroda (Tohoku University, Miyagi), Keiichiro Kagawa (Shizuoka University, Shizuoka), Takashi Komuro (Saitama University, Saitama), Takashi Tokuda (Tokyo Institute of Technology, Tokyo), Madoka Nishiyama (Nikon Corporation, Tokyo), Yutaka Hirose (Panasonic Corporation, Osaka), Daisuke Fujisawa (Mitsubishi Electric Corporation, Kanagawa), and Yukinobu Sugiyama (Hamamatsu Photonics K.K., Shizuoka) カメラ・産業用カメラについて、4章では不可視光撮像技術として赤外線、X線について、それぞれ説明する.

2. イメージセンサ

2.1 センサ構造・材料

近年,光電変換部とロジック回路とを3次元的に集積す る積層型イメージセンサの技術が成熟し,この技術を用い た画素の微細化や高機能化が進んでいる.一方,光電変換 材料については,有機材料や非シリコン系半導体材料が台 頭してきており,新たなイメージセンサ開発の方向性とし て注目されている.本節では,センサの構造や材料に着目 して最近の研究報告を紹介する.

スマートフォン用カメラの小型化・多画素化の要求に応 えるため,積層型CMOSイメージセンサの画素ピッチの狭 小化が進んでおり,2018年から2019年にかけて画素ピッ チ0.8µmのセンサが発表された^{1)~3)}.2020年にはKim (Samsung社)らが,画素ピッチが可視光波長と同等とな る0.7µmのセンサを報告した⁴⁾.画素ピッチの縮小には,上 下の回路を接続する電極の微細化やウェハを積層する際の 位置合わせ精度の向上に加えて,隣接画素のクロストーク を抑制するDeep Trench Isolation (DTI)技術やオンチップ マイクロレンズ間の分離技術の進歩が大きく寄与している. 例えば,前述の0.7µm画素ピッチのセンサでは,DTIを形 成する際のエッチングにおいてアスペクト比6:9という高 い値を達成しており,この技術を用いてフォトダイオード の深さを増したことで,画素ピッチ0.8µmのセンサと同等 の飽和電荷数6,000 e-を維持している.

表面に電極を埋め込んだウェハ同士を接合するハイブリッ ドボンディングの手法を用い,画素レベルで上下の回路を 接続することで,センサの高機能化を図る取り組みも進ん でいる.Venezia (OmniVision社)らは,画素ピッチ1.5µm, 800万画素の高ダイナミックレンジ (High Dynamic Range: HDR)センサを報告した⁵⁾.本センサではHDR画素に必要 なサイズの大きな電荷蓄積容量をフォトダイオードの直下 に配置することで,画素の光開口率を高めている.Park (OmniVision社)らは,画素ピッチ2.2µm, 1,280×1,024画 素のグローバルシャッタ機能搭載のセンサを報告した⁶⁾. 本センサは寄生感度(入射光に対する電荷保持部とフォトダ イオードとの感度比)の抑制に効果的とされる,電荷を電圧 に変換して保持する回路構成(Voltage Domain Global Shutter)を備えている.Finateu(Prophesee)らは,画素 ピッチ4.86µm, 1,280×720画素のイベント検出型センサを 報告した⁷⁾.本センサはコントラスト変化の検出機能を持ち, 1.066 GEPS (Giga Events Per Second)のレートでイベント検 出を出力する.Honda (NHK)らは,ハイブリッドボンディ ングによる多層接合技術の開発に取り組み,Silicon on Insulator (SOI)構造を用いて接続ピッチ6µmの3層構造デイ ジーチェーン配線を試作し,約100万電極の一括接続に成功 した⁸⁾.さらに,その技術を用いた初の3層構造発振回路を 報告した⁹⁾.開発したプロセスは4層以上の積層にも対応し, 将来的には,多層構造化によりイメージセンサのさらなる 高集積化・高機能化が期待される.

光電変換部にシリコン以外の材料を用いたセンサの開発 も活況を呈してきた. Togashi (ソニーセミコンダクタソ リューションズ)らは、緑色に感度を持つ有機光電変換膜 の下に青色と赤色の波長を吸収するシリコンフォトダイ オードを積層した画素構造のセンサを報告した¹⁰⁾. 堺 (NHK)らは、波長選択性のある有機光電変換膜を積層す る有機イメージセンサの研究に取り組んでおり、In-Sn-Zn-O (ITZO) 半導体を用いたバックチャネル構造の薄膜トラ ンジスタを適用した青色用センサを報告した¹¹⁾. 画素ピッ チは20μm、画素数は320×240である. これらのセンサは、 画素内で色分離が可能であるため、色分解プリズムやオン チップカラーフィルタが不要となり、カメラの小型化や高 感度化に寄与する.

Manda (ソニーセミコンダクタソリューションズ)らは, III-V 属化合物半導体である InGaAs/InPをフォトダイオード とし、これをシリコンの読み出し回路とハイブリッドボン ディングで接合したセンサを報告した12). 画素ピッチ5µm, 1,280×1,040 画素で,400 nmの青色領域から1,600 nm以上 の近赤外領域までの幅広い波長帯域をもつ.為村 (NHK) らは,可視光の吸収係数がシリコンに比べ1桁以上高い結 晶セレン膜を光電変換部に用い,これをCMOS 読み出し回 路上に積層した, 画素ピッチ3.2µm, 3,300万画素のセンサ を報告した13).その後、結晶セレン膜に高電界を印加して アバランシェ増倍を起こさせることによる感度の向上に取 り組み、電子ブロッキング層にp型ワイドギャップ半導体 である酸化ニッケルを用いることで, CMOS 読み出し回路 側からの電子注入に起因する暗電流を低減し、約1.4倍の 電荷増倍動作による良好な画像の取得に成功した14). 非シ リコン系の光電変換材料を用いたイメージセンサは、それ ぞれの材料に特有の物理特性を生かし、マルチスペクト ル・不可視光検出や超高感度撮像といった人の目を超える センサとして,バイオセンシング,医療,マシンビジョン など、さまざまな分野への活用が期待される.

イメージセンサの高解像度化・高速化に合わせ、センサ 用のA/D変換技術の研究開発とともに、特定用途に向け機 能的に情報を読み出す研究開発も進められている.VCO型 ADCは¹⁵⁾,本来、ディジタル回路との融和や幅広い環境 条件に向けて開発されてきた¹⁵⁾.連続型ADCであるため プレフィルタを必要とせず、1次ΔΣ変調特性を持つ、積 分動作が可能という特徴により、特殊用途のイメージセン シングにも使われるようになってきた¹⁶⁾.LiDAR向けと して、VCOの連続動作とサンプリング期間による電圧値の 変換のためのパルス数の差分モードを備えることで、信 号値の変化とTDCとしての機能を同時に取得することに 成功した¹⁷⁾.VCO型の問題点は、電圧-周波数の線形性で あるが、複数位相型のパルス変調フィードバックにより回 路負荷を抑制しながら線形性の向上を行っている.

また、同じくLiDAR向けとして従来のイメージセンサの 構成をうまく活用しながら、システムとしての駆動方式を 工夫することで、高解像度と適切な時間内の距離情報取得 を両立した開発も行われている¹⁸⁾.カラムアンプ、アナロ グCDS, SS-ADCをI/Fとした高解像度ピクセルアレイに対 して、距離測定におけるロングレンジをサブレンジ化して、 その信号情報を上記回路で出力する.450fpsのサブレンジ出 力を30fpsのロングレンジ情報にまとめる.また、サブレン ジ間にわたる光子到達イベントを管理することで、近距離 のサブレンジ内で10 cmの解像度も同時に実現している.

イメージセンサの高感度化では、ノイズ低減のため Conversion Gain (CG)の向上も重要な要素である.ピクセ ル構造の工夫としてFD容量を低減することで、CG値の向 上がなされてきた.ここで回路方式の工夫によって、ピク セル内に差動アンプを構成して、この課題を解決する方式 も提案されている¹⁹⁾.ピクセル回路は、nMOSFETにより 構成されるため、差動アンプを構成するpMOSFETは、カ ラム共通要素としてアレイ外に配置されている.解像度は 落ちるが2つのピクセルのうち、片方を参照電圧生成用と して扱い、そのリセット値を基に、他方のFDノードへ負 帰還リセットすることで差動アンプのオートゼロを実現す る.Pixel Pitch1.45 μmでありながら、熱雑音の低減とCG の向上 (560 μV/e-)を同時に実現した.

近年,機能センサ開発が再燃し,知的処理の前段を低電力 独自回路で行うセンサの開発も進展していくと予想される (イベントドリブン⁷⁾,動き抽出²¹⁾,特徴抽出系センサ²⁶⁾). 従来も,大学などの研究機関を中心に認識処理に向けた特 徴抽出センサの開発が行われてきたが,エッジAIのような キラーアプリに注目が集まってきたことで,本用途のセン サ開発に企業群も加わるようになってきた.エッジAIにお いて動画理解は特に重要であり,動き情報の特徴量を抽出 するには,グローバルシャッタが必須であるとともに,フ レーム間差分やオプティカルフローの実装も行わなければ ならない.基本的には、画素内にメモリーを有して時系列 フレームの差分出力を得ることとなる.メモリーをダブル バッファのように扱うことで、差分出力をフレームロスす ることなく出力することが可能である.同時に動き情報を さらに空間内・複数フレームで積分することで、動きの あった場所を指す注目度マップの作成も可能である²⁰⁾.イ ベント検出においては、動いた領域のみの特徴量を出力す ることとその低電力化が重要である.現在ピクセル内の変 動量を監視して∆変調としてイベント出力する方式が開発さ れ²¹⁾,この高解像度向けセンサ開発が進んでいる⁷⁾.

回路技術に基づいた高機能化に向けて,裏面照射型セン サの積層支持基板を活用する流れも加速している.今まで に周辺回路(A/D変換器の並列化²²⁾,メモリー²³⁾,信号処 理²⁴⁾)などに有効活用しているが,今後,深層畳み込み ニューラルネットワーク(DCNN)などの知的処理に向けた プロセッサの同時集積化も,検討・実現されて行くと思わ れる²⁵⁾.このとき,高速化と演算リソース確保のため,基 本的には低解像度DCNNが用いられるが,高解像度出力と の効果的な融合・統括処理の研究がこれから進むものと思 われる.

2.3 画素微細化・多画素化

CMOSイメージセンサ (CIS)の画素微細化と多画素化は, Majority市場であるスマートフォンの進化とともに進んで おり、それに追随する形でスマートフォン以外のアプリ ケーションでも同様な動きがみられる.

スマートフォン市場では、端末の薄型化・ディスプレイ の大型化(狭ベゼル化)によりカメラモジュールに対するサ イズ制約が求められる中で、市場からの多画素化要求に応 えるべく画素微細化が進んでいる。2015年に1.0µm画素サ イズのCISが商品化されてから、「可視光波長により近い サブミクロン画素の開発は難易度が高まり微細化の動きは 緩やかになる」との予測を覆すように2018年に0.9µm, 2019年に0.8µm, 2020年に0.7µm画素サイズのCISが商品 化されており、直近の3年でも画素サイズの微細化は進ん でいる。また画素数も、隣接4画素・9画素で同色カラー フィルタを共有する配列のCIS商品化での多画素化が進 み、スマートフォンのリアカメラは4,800万画素を中心に 6,400万画素、1億800万画素、フロントカメラ(セルフィ) は3,200万画素とハイエンド機種からローエンド機種まで 多画素CISを採用する機種が増えている。

研究発表では,画素微細化に伴う飽和電子数・感度の減 少やクロストークの抑制をいかに前世代画素との差分をな くすかの報告が多くなされている.

T.Hasegawaら (OmniVision社) は0.8 µm 画素でクロス トーク抑制のためBackside Deep Trench Isolation (BDTI) やComposite Metal-oxide Grid (CMG)を導入, 画素微細化 により特性劣化が懸念されるRTSノイズと飽和電子数に対 してはVertical Transfer Gate (VTG) によりRTSノイズを 0.9µm 画素比70% 削減, 飽和電子数は0.9µm 画素同等とし た²⁷⁾. Y. Lee ら (Samsung社) は, 0.8 µm 画素高感度化の ためにmetallic grid部での光損失を最小化させるべくカ ラーフィルタの分離に低屈折率材料を導入し、感度を15% 改善, SNRを0.4 dB改善し, 世界初の0.8 µm 画素ピッチ CISを量産したと報告した²⁸⁾.H.Kimら (Samsung社)は, 0.7 µm ピッチの4,400 万画素イメージセンサを報告してい る. 電気的, 光学的クロストーク抑制のためにfull-depth DTIを採用、画素微細化により高アスペクト比となるDTI の形成について、プロセス技術を改善することでフォトダ イオード(PD)の物理的な体積減少を最小限に抑えた. DTIのPN接合部の最適化によりPDの電気的容積が向上 し、0.8µm 画素同等の飽和電子数を得たとした.また負バ イアスDTI形成における材料最適化により暗電流が低減し 0.8µm 画素同等以上の画素特性を得たとしている4).

画素微細化・多画素化に伴い位相差検出オートフォーカス (PDAF) に関しても変化がみられている.これまで画素 を半分マスクする方式が主要なソリューションとして採用 されていたが, 微細化技術を用いて画素を二分するデュア ルPD構造や複数画素でオンチップレンズ (OCL) を共有す る方法が報告されている.

J.Yunら (Samsung社) はPDAF向け画素を全画素に配し た0.61 µm×1.22 µm ピッチのデュアル PD 構造のイメージセ ンサを報告している.デュアルPD構造による飽和電子数の 低下を克服するためにパターニング手法を開発,縦長型PD を形成することにより1.22 µm ピッチのシングル PD 画素に 比べ飽和電子数を10%改善したとした.また、二つのPDを 画素内DTIにより光学的に分離することでQEが3%向上す るとともに、位相差検出にとって重要な特性の一つとなる 入射角依存特性についても画角全領域にわたり良好な結果 を得ているとした²⁹⁾. T.Okawaら (Sony Semiconductor Solutions社)は、2×20CL構造を持つ0.8µmピッチの4,800 万画素 CIS を報告している. Quad Bayer 配列に, 2×2画 素にわたるオンチップレンズ構造を採用することで, Quad Bayer 方式が持つ高解像度,高ダイナミックレンジ 化の利点とデュアルPD方式が持つ高いPDAF性能を併せ 持つとしている. 高像高部において生じる同色画素間の信 号強度偏りという問題に対し, DTIを採用することでこれ を解決し解像度の向上を図った.また、OCL形成における 高精度な制御およびDTI形状の最適化により、異色画素間 のクロストークおよび同色画素間のQEばらつきの改善を 図った.これによりQEピークが向上し,SNR10が改善し たとした.加えて低照度におけるPDAF性能が向上,最低 AF照度がQuad Bayerでの10 lxから改善し、1 lxとなっ たとした3).

昨今のスマートフォンに搭載されているリアカメラは, 広角,超広角,光学ズーム,マクロ,Depthを組み合わせ た3眼構成や4眼構成などの「マルチ化」が進み実装エリア が拡大していることや多画素化によるセンサ光学サイズの 大型化のように多様化している.このような変化に富んだ 市場要求に応えるように,CISの画素微細化・多画素化は イメージング分野のみならずセンシング分野でも今後進ん でいくと期待される.

2.4 高感度化・低ノイズ化

イメージセンサ市場は2018年,2019年ともに前年比10% を超える成長率で市場が拡大している.この成長を支える 最大のアプリケーションはスマートフォンであるが,ほか のアプリケーションとして,自動運転,マシンビジョン, 監視カメラについても今後イメージセンサ市場をけん引す ることが予想されている.それに伴い,これらアプリケー ションのニーズに応える技術報告が近年活発化しており, 高感度化,低ノイズ化技術についても例外ではない.以上 を踏まえ,この2年間の高感度化および低ノイズ化に関す る技術報告について述べる.

高感度化について、ここでは大きく3つに分けて報告す る.まず,一般的な埋め込みフォトダイオードを前提に量 子効率を向上させる技術に関しては、超高抵抗基板を用い てSi基板深部まで感度領域を持たせることで波長1050 nm での量子効率を26.7%にまで高めたとする報告30)や、厚エ ピしたSi基板において基板上の構造物で光を拡散させ、光 路長を伸ばすことで近赤外感度の向上(43%@940 nm)を実 現した技術31),またカラーフィルタ間の分離に低屈折材料 を用いることで、可視光領域がおよそ20%向上したとの報 告³²⁾がなされた.このカラーフィルタ間に用いる低屈折材 料素子は、スマートフォン向けのイメージセンサのように 画素ピッチ1µmを下回るサイズで混色を抑えつつ高感度 化をするには非常に有効な技術であり、特に聴講者の注目 を集めていた.次に、Si基板以外を用いた技術としては、 有機膜のポリマーとPbSの量子ドットを積層させて高い近 赤外感度を実現したとする報告³³⁾や、Si基板上にGeを積 層させて1400 nm付近まで感度領域を持たせた測距用セン サの報告³⁴⁾がなされた.このセンサはLiDARに搭載する ことを想定しており、太陽光の影響を受けづらく、人の眼 への安全性がより担保される波長領域に感度があるという 点で、今後の活用が期待される技術の1つであろう、3つ 目に, SPAD技術に関連した報告を紹介する. SPADに関 する報告は年々件数が増え、活発な議論が行われるように なってきている.この2年間では、低感度FSI-SPADと高 感度BSI-SPADを組み合わせてダイナミックレンジを向上 させたとする報告35)や、積層結晶セレン膜でのアバラン シェ動作を実現させたイメージセンサの報告36), 裏面照射 型のSPADを積層し、画素ピッチの縮小とFill Factor (開 口率)の向上を両立したとする報告³⁷⁾がなされた.このよ うに高感度化はさまざまなアプローチで技術開発が行われ ており、今後もアプリケーションの広がりとともに新たな 技術が生まれることが期待される.

続いて低ノイズ化に関しては、近年、ランダムノイズが 1e-を下回る報告を目にする機会が増えてきたが、さらなる 低ノイズ化に向けた検討が活発に行わている、ランダムノ イズの要因の一つであるRTSノイズ低減のプロセス的なア プローチとして、フッ素注入とThin Gox SF構造の有用性 を示した報告³⁸⁾やCIS製造におけるプロセス誘起損傷を引 き起こすX線照射に起因するランダムノイズ成分の変化を 解析した報告³⁹⁾がなされた.実際にランダムノイズ1e-以 下を実現したとする報告としては、1 MPixelのマルチビッ トQIS (jotと呼ばれる画素)を用いて2フォトン/jot/フレー ムでの撮像が可能なカメラシステムを構築した報告40)がな され、新たなイメージングデバイスの可能性を示して注目 を浴びた. そのほか, 感度の異なる2つのフォトダイオー ドで1画素とするサブピクセル構造のセンサにおいて、車 載用途で要求される高温耐性と高ダイナミックレンジを確 保しつつ0.6e-のダークランダムノイズを達成したとする報 告41)がなされた.また、画素内差動アンプの回路構成を採 用した画素において, 差動対の参照画素を共有することで 一般的なソースフォロアアンプの回路構成の画素よりもノ イズ特性が有利であることを示し、ダークランダムノイズ 0.5e-を達成したとの報告¹⁹⁾がなされた.それ以外にも,画 素内メモリーを用いてグローバルシャッタ機能を搭載した 電圧保持型の画素に関しても低ノイズ化に進展があった. 一般的に信号を電荷で保持する電荷保持型のタイプに比 べ、信号を電圧で保持する電圧保持型は、保持部のノイズ 特性で不利であるとされている.しかし、高容量 MIMの 保持部を用いてダークランダムノイズ3.5e-を達成したとの 報告⁴²⁾や, RAM形状の保持部によって0.72pFもの容量を 実現し、ダークランダムノイズ2.1e-を達成したとの報告43) がなされた.

イメージセンサに対するニーズが多様化する昨今,あら ゆるアプローチで高感度化,低ノイズ化の技術開発の動き がみられている.今後もさらに技術が進展し,自動運転, マシンビジョン,監視カメラをはじめさまざまな用途で適 材適所の技術が採用されていくであろう.

2.5 高速化・高ダイナミックレンジ化

前回の年報執筆時からの2年間で,高速化・広ダイナ ミックレンジ化(DR)・広波長化のそれぞれについて大い に進展が見られた.

バースト型の高速度イメージセンサでは100 Mfps以上の 性能が相次いで報告された.マルチコレクションゲートと 画素内CCDメモリーを設けた裏面照射型イメージセンサ では、画素ピッチ12.73µm、512 H×512 Vのフル画素モー ドにおいて100 Mfps,連続5コマの記録を実証し、光の飛 翔を捉えることに成功している⁴⁴⁾.画素に隣接して電圧信 号保持型のアナログメモリーアレイを設けた CMOS イメー ジセンサでは、高速電荷収集型フォトダイオード (PD) に ポテンシャルが接続されたフローティングディフュージョ ン (FD)容量をリセットした後に複数回信号をサンプリン グするバースト相関二重サンプリングと合わせることで、 画素サイズ70H×35 Vµm²、画素数50H×108 Vのプロト タイプチップにおいて、100 Mfps・連続368コマ、125 Mfps・連続184コマの撮像性能を実証している⁴⁵⁾.また、 ラテラル電界制御電荷変調素子によるマルチタップ型のイ メージセンサにおいては、サブ画素辺り4タップ、2×2サ ブ画素を1つのマクロ画素とした計16タップに符号化され たシャッタを適用することで112 Mfpsの撮像を達成してい る⁴⁶⁾.またシャッタ制御自体は500 MHzで駆動できること を確認している.このようにフレーム周期が間接ToF等に 用いられる変調型イメージセンサの変調周期のオーダに近 づきつつある.

広DRイメージセンサは、車載やセキュリティ等の用途に 向けて産業界では120 dBのDRを3µm以下の画素ピッチで 達成する広DR・高解像度化がトレンドとなっている.ここ では、大小のフォトダイオード、横型オーバフロー蓄積容 量 (LOFIC)、電荷電圧ゲイン切り替え等の複数の広DR化技 術を組み合わせた単一露光型のCMOSイメージセンサが報 告された.特に2019年6月に開催されたInternational Image Sensor Workshop (IISW)では多くの発表が揃っており、本 誌の特集記事にもまとめられている⁴⁷⁾.

画素毎に感度の異なる2つのフォトダイオードを設け、電 荷電圧変換ゲイン切り替え、相関・非相関二重サンプリン グを組み合わせて計4信号を単一露光で取得する裏面照射・ 積層型のCMOSイメージセンサでは、画素ピッチ3.0 µm、 画素数2897 H×1977 Vにおいて、単一露光で132 dBを達 成している⁴¹⁾.また,信号の切り替え点のSNRをジャン クション温度100℃において25dB超とすることができて いる. LOFICを用いたCMOSイメージセンサにおいては, トレンチ型LOFICを導入し、飽和電子数24M電子超、最 高SNR70dB超の吸光分析向けCMOSイメージセンサが報 告され、低酸素濃度Cz基板を用いた近赤外光高感度化に よって高いフォトダイオード量子効率と高 SNR を両立して いる⁴⁹⁾. また、トレンチ型LOFICを2段構成としたCMOS イメージセンサでは、信号の切り替え点における SNR を 32 dB超に保ちつつ, 120 dB超のDRを得ることに成功して いる50). このように従来は主に素子分離に用いられていた ディープトレンチを機能素子として用いるトレンドも発展 している. 容量性ディープトレンチをグローバルシャッタ CMOSイメージセンサの電荷保持ノードに適用し、長短の 2回露光と組み合わせたCMOSイメージセンサでは、92dB のDRを3.2 mum ピッチの画素で達成している⁵¹⁾. さらに, グローバルシャッタ関連では、電圧信号保持型のノイズ性 能を律則する画素内信号保持容量に高密度キャパシタを適 用する報告がなされており、高密度 MIM 容量や 52) 6), さ らに容量密度が高いDRAM容量を用いることで⁵³⁾,2μm 台前半の微細画素にて低ノイズ性能が得られている.

広波長化に関しては、車載・認証・セキュリティ・ヘル スケア等のセンシング応用に向け開発が活発化している. 特に微細画素においては、光照射面に光回折/散乱機構を 設けるとともにディープトレンチアイソレーションを適用 し光路長を延伸するとともにクロストーク抑制を図る構成 が複数提案されている。なお、先駆けて発表・実用化され たピラミッド型の光回折パターンを設ける技術は、2019年 のIISS Walter Kosonocky Awardに輝いている⁵⁴⁾.また, 光照射面にトレンチ構造を設けて散乱機構を形成する報告 もなされた³¹⁾.また、さらなる長波長帯域化に向けた可 視-近赤外光InGaAs積層型イメージセンサにおいては, Cu-Cuハイブリッドボンディングを用いて5µm角という InGaAsとしては極めて微細な画素を形成し、高解像度化 に成功している12).大口径の基板製造が困難なエピタキ シャルInGaAs基板を小片化し、複数の小片化ダイをサ ポートSiウェハに積層し、大口径基板でのプロセス工程を 経た後に信号読み出し基板とのCu-Cuハイブリッドボン ディングを行う一連のフローは,他の小口径基板材料を用 いた積層化へも適用も期待できる.

今後とも革新的な技術開発によるさらなる発展が期待される.

2.6 高機能化

距離画像を取得する光飛行時間(ToF)イメージセンサは, 車の自動運転,拡張現実(AR),ジェスチャ認識などさま ざまな応用が想定されており、スマートフォン55)やタブ レット56)など身近な製品にも搭載されるようになった. ToFイメージセンサは、センサの直近に配置した光源から 発した光が物体で反射して戻ってくるまでの時間から距離 を計測し,直接法と間接法に大別される.直接法は反射光 の時間波形そのものを計測するため、情報量が多く、マル チパス(反射や散乱などにより信号経路が複数生じる現象) による誤計測の問題が少ない.しかし、Time-to Digital Converter (TDC) 等と光波形を再構築するためのヒストグ ラム生成回路を必要とするため回路規模が大きい. そのた め3次元積層技術を用いなければ多画素化が難しい. それ に対し間接法では、光波形と時間的な変調関数の相互相関 (光波形と変調関数が同じ形の場合自己相関)をいくつか計 測し(典型的には4つ),そこから距離を計算する. 画素内 にほとんど回路がなく回路規模が小さいため多画素化に適 しているが、マルチパスの影響を受けやすい、そのため近 年3次元積層技術を用いた直接法ToFイメージセンサの開 発の進展が著しい.

直接法ToFでは画素単位で光子の到来時刻を計測し,そこから到来時刻ヒストグラムを構築する.受光素子として Single Electron Avalanche Diode (SPAD)が利用されること が多い.信号処理回路規模を縮小するため,Differential Time-to-Charge Converter (TCC)と呼ばれるアナログ的な 手法がサムスンセミコンダクターなどにより提案された57). 線型性を補正する必要があるが、100mの距離範囲で概ね 0.1%以下の相対誤差を実現している.3次元積層を用いず 0.18µmプロセスにより画素サイズ30µm²を実現している. なおこの方式ではマルチパスにより複数時刻にパルスを受 信する場合、最初のパルスが計測される.

間接法では光源強度変調方式として、インパルス(幅1ns 以下の非常に短いパルス),パルス(幅数10ns以上),正弦波 (CW方式と呼ばれる)が利用される.受光素子として電荷蓄 積部を2つ以上もつ電荷変調器が利用されることが多いが、 SPADをゲーティングモードで用いて時間窓内で起こった受 光イベント数を数える方法も用いられる.間接法では、パ ルス方式では3つ、CW方式では4つの相関値を計測するこ とが多いが、被写体が動く場合これらを一度に計測しなけ ればモーションアーティファクトが生じる. CW 方式におい てモーションアーティファクトを低減するために、フォト ゲートを用いた4タップ電荷変調器がサムスンエレクトロニ クスにより開発された58).また、2タップ電荷変調器を利用 しながら, 偶数行と奇数行で位相をπ/2ずらし, 距離の勾配 を考慮することで動きの影響を受けないように距離画像を 生成する擬似4タップ方式もSungkyukwan大学から提案さ れている59). このセンサは裏面照射型であり, 画素上部に 差分値を記憶する MiM 容量を搭載することで背景光の影響 を抑制する. 画素サイズは8µm²に抑えられている. さら に多くのタップを実現した例として、静岡大学の8タップ 電荷変調器がある⁶⁰⁾. 1タップを電荷排出に用いているた め、7つのタップによりレンジシフトを用いて6つの距離 範囲を一度に計測することでモーションアーティファクト を抑制するとともに、測定範囲を拡げるために距離に応じ て蓄積時間(=照射パルス数)を変えている. ToFでは波 長850 nmや940 nmがよく用いられるが、人間の目に対し て安全性の高い長波長(1.5µm付近)を利用することで、光 源強度を高める試みも行われている. Artilux 社はゲルマ ニウム薄膜を形成したシリコン基板とシリコン集積回路を ビアで接続した電荷変調器を用いた240×180画素のToF イメージセンサを発表している⁶¹⁾.

2000年中頃から光線方向を分離して奥行きを同時に撮影 するライトフィールドカメラや,計算処理を前提とし光の 領域でデータ圧縮を行う圧縮センシングが注目されてい る.これらは総称してコンピュテーショナルイメージング (もしくはシステムとしてコンピュテーショナルカメラ)と 呼ばれている.1つのフォトダイオードに対し,複数の電 荷蓄積部と電荷制御部をもつマルチタップまたはマルチバ ケット電荷変調器は,露光パターンがプログラム可能であ る.画素内にディジタルメモリーをもたせることで,画素 単位に制約なく時間的な符号化露光を行うイメージセンサ がトロント大から発表されている⁶²⁾.彼らは,これを構造 光照明と組み合わせた3次元形状計測をデモしている.ま た,このイメージセンサをダイナミックレンジ拡大に適用 した例も発表している⁶³⁾.静岡大の香川らはマクロ画素構 造により通常のシングルアパーチャレンズが利用できる高 時間分解時間圧縮型イメージセンサを開発している.同じ センサでシングルショット超高速撮影と繰り返し蓄積を実 証した⁴⁶⁾.またこのセンサを利用し,反復計算を用いない リアルタイム計測に適したToFにおけるマルチパス分離を 実証した⁶⁵⁾.今後,コンピュテーショナルイメージングと ToFの関係はますます深くなって行くものと予想される. 具体的な利用環境における制約,演算量とリアルタイム性 などを考慮した実用性の高い新しいToF撮像方式の登場が 期待される.

2.7 画像処理

通常と異なる特殊なイメージセンサやカメラを用いて撮 影した映像に対して画像処理を行うことで,新しい機能を 実現する研究が行われている.

イメージセンサの画素ごとに露光タイミングをランダム にずらして画像を撮影し,再構成処理を行うことで,撮像 センサの時空間サンプリングを超えた画像が得られる圧縮 ビデオセンシングと呼ばれる技術がある.実際のイメージ センサにはハードウェアの制約があるため,完全なランダ ム化は難しい場合がある.そこで,深層学習を用いて露光 パターンと再構成のためのデコーダを同時に最適化する手 法が提案された⁶⁶.

また,符号化開口カメラを用いてライトフィールドを取 得する研究も行われている.先行研究では深層学習を適用 することで,わずか数枚の撮影画像から数十視点の光線空 間を復元できていたが,被写体が静止していることが前提 であった.そこで,ネットワーク構造と学習データを工夫 することで,動的な被写体に対して適用できるように拡張 した手法が提案された⁶⁷⁾.

画像センサ上にフレネルゾーン開口 (FZA) を配置するこ とで、レンズレスでライトフィールドを取得し、3次元再 構成を行う手法が提案されている⁶⁸⁾.4つの異なるFZAを 通して取得したセンサ画像から再構成した複素画像の虚部 が合焦位置周辺において0になることを利用して距離画像 を生成する.

光飛行時間 (ToF) に基づく距離画像センサはカメラモ ジュールの小型に有利であるが,直接反射以外の経路によ るマルチパスにより計測距離に誤差が生じる.この問題に 対し,マルチタップ・マクロ画素を用いた超高速コンピュ テーショナル CMOSイメージセンサに,サブクロックシフ トを適用した複数周波数の符号化シャッタを用いること で,パルス方式ToFにおいてシングルショットでマルチパ スを分離して計測する手法が提案された⁶⁹⁾.シミュレー ションと実験により提案方式の妥当性が確認されている.

低解像度の画像から高解像度の画像を生成する超解像技術 の研究は昔から行われており,近年ではニューラルネット ワークを用いたものが主流となりつつある.一方,イメージ センサの画素配置を擬似的に不規則とすることで直線エッジ 部分のジャギーを低減する効果を持つことが示されており, この技術を超解像に適用する検討が行われている⁷⁰⁾.不規則 な画素配置によりダウンサンプリングした低解像度画像と原 画像のペアを訓練画像としてニューラルネットワークに学習 させることで推定が行えるようにする.

一般的な高ダイナミックレンジ (DR) 画像の合成方式で は、ゴーストやフリッカなどのアーティファクトが生じる ことが多い.そこで、多重露光時間撮像が可能なイメージ センサを用いて、露光時間の異なる画像を同時に取得し、 動領域とフリッカ領域の検出結果に基づいて合成すること で、動きぼけとフリッカを抑制した高DR画像を再構成す る手法が提案された⁷¹⁾.

特定の波長域の光のみを選択的に吸収する有機薄膜撮像 素子と固体撮像素子を積層化したイメージセンサによる撮 像方式と再構成手法が提案されている⁷²⁾.一層目の有機薄 膜撮像素子で緑の波長域の信号を取得し,二層目の固体撮 像素子で赤と青の波長域の信号を取得する.一層目と二層 目の素子を半画素ずらして配置することで空間的な標本数 を増やし,高空間解像度画像の取得を可能としている.

2.8 特殊機能

ナノフォトニック構造を利用したセンシングでは,前回 の年報において紹介したソニーの画素レベル偏光素子搭載 型の偏光イメージセンサ(IEDM2017において報告)が商品 化されたことが大きなニュースである.これまでオンチッ プ偏光子の搭載技術としては,配線層によってワイヤグ リッド偏光子を形成する方法と,ポストプロセスで偏光子 を形成する方法の2つが試みられてきたが,ここ数年は後 者のポストプロセス型が画素数,偏光分解能ともに性能面 での優位性を示してきた.今回の商品化によりポストプロ セス型の偏光子搭載に軍配が上がった.なお,商品化され たセンサはIEDMで発表されたものとは異なり,表面照射 型のセンサである.

商品化を境に, 偏光イメージング技術はこれまでの研究 開発から社会実装の段階に移行したといえる. すでに各社 からこのセンサを搭載した (画素レベル) 偏光分析カメラが 市販されており, 新しいアプリケーションの開拓に大きな 期待が寄せられている.

バイオ応用においては、奈良先端大などによる接触型バ イオイメージング研究が進んだ.脳などの生体のほか、マ イクロ流路と組み合わせたオンチップ蛍光センシングなど も報告されている.これらの成果においてはセンサ設計も さることながら、オンチップフィルタの性能向上が重要な 役割を果たした.オンチップフィルタによる機能拡張とい う観点でみれば、偏光イメージングとも方法論としての共 通点がある.この方向性はこの先も続くと考えられ、独創 的なオンチップフィルタ構造による新しい機能性の創出に 期待する.

一方, イメージセンサアーキテクチャをベースとして, フォトダイオードによる光情報ではなく画素電極を利用し て接触型電位(電気)イメージングを行うセンサの開発は 2000年前後からなされているが,近年は画素数や低ノイズ 性などの計測性能を向上した報告例が出ている.2019年に ソニーが報告⁷³⁾したセンサでは計測におけるノイズレベル は数μVであり,チップ上の神経細胞の活動(~100μV)を 2次元的に精細に観察することに成功している.光と電気, 両方のアプローチでのオンチップバイオイメージングの進 展に今後も期待する.

3. カメラ

3.1 放送用カメラ・高精細カメラ

2018年12月1日に「新4K・8K衛星放送」が開始され、4K・8K 番組制作に対応した放送用カメラやレンズが続々と発表さ れている.また、4K以上の画素数を持つ高精細カメラは 医療・産業用などの分野での利用が拡大しているほか、8K 動画撮影に対応したスマートフォンも登場した.さらに、 VirtualReality (VR)を中心に8Kを超える解像度の映像利 用も始まっている.

放送用4Kカメラは、初期段階では主に映画用として用 いられる Super35 mm 光学系に準拠した単板式が主流で あったが、近年は放送用HDカメラとレンズマウントの互 換性を持ち,ズームレンズの小型化や高倍率化が可能な 2/3インチ光学系のカメラ^{74)~78)} やレンズ^{79) 80)} 製品のライ ンナップが充実してきた.撮像方式にはメーカごとの特色 がみられ、2/3インチ光学系用4K撮像素子3枚による RGB・3板式⁷⁴⁾⁷⁵⁾のほか, 画素サイズの縮小に伴う感度や ダイナミックレンジの低下を抑えるために、拡大光学系と 1インチ光学系用4K撮像素子を組み合わせた方式⁷⁶⁾や, 2/3インチ光学系用2K撮像素子4枚を用いたRGGB・4板 画素ずらし方式77)なども採用されている.また、ローリン グシャッタに起因する像の歪みやフラッシュバンド (スチ ルカメラのフラッシュにより映像に帯状の白浮きが発生す る現象)の発生を回避するため、グローバルシャッタ方式 のCMOS撮像素子を採用した製品⁸¹⁾も登場した.いずれ も水平解像度2000 TV本以上,感度F8以上が確保されて おり, 放送用カメラとして実用的な撮像性能を備える.

放送用8Kカメラは、制作現場のニーズに即した実用的 な機能を中心に開発が進んでいる.撮像方式は4Kと同様 に単板式が先行したが、HD・4Kとの一体化制作において カメラ間の色の差を小さくするために3板式も用いられる ようになった.ただし、画素縮小に伴う画質劣化を抑える ため、2/3インチより大きい1.25インチ光学系が採用され ている.1.25インチ光学系では、HDRや120frames/秒(fps) などの撮影に対応した本体重量7kgのポータブル3板式カ メラ⁸²⁾や、スポーツ中継などで多用されるスローモーショ

ン撮影に対応可能な240fps対応の3板式ハイスピードカメ ラ⁸³⁾が開発された.単板式カメラでは,Super35 mm 光学 系用8K撮像素子を搭載し、専用の交換式メディアにフ レーム内圧縮された60fpsの8K映像を40分撮影・収録でき るカムコーダ製品⁸⁴⁾や、35mmフルサイズ光学系用8K撮 像素子で撮影した8K映像から最大4chの4K映像を切り出 すことのできるカメラシステム85)が発表されている.また. 有機CMOS撮像素子を採用して優れたSN比やダイナミッ クレンジ特性を備えた8Kカメラ⁸⁶⁾が開発されている.こ のほか、マラソン中継などの機動的な撮影を可能にするワ イヤレス8Kカメラの研究開発⁸⁷⁾⁸⁸⁾も進められている.放 送用として開発された8Kカメラを医療分野へ利用する取 り組みも進んでいる。特に、カメラの小型化が実現したこ とにより、8K 解像度の顕微鏡89)や内視鏡90)が実現してお り、外科手術での利用が可能となってきた.また、2020年 に入り,8Kカメラを搭載したスマートフォン^{91)~93)}も登 場し、一般ユーザが手軽に8K動画を撮影することが可能 になってきた.これは、撮像素子の画素微細化や高速化に 加えて、スマートフォン用システムLSI (SoC) 上で8K動画 処理が可能となったことが大きい. 2020年5月現在のSoC では、8K 解像度 (3.300 万画素) を上回る最大 4.800 万画素 の信号を30fpsで処理することが可能となっている94).

8Kを上回る高精細カメラの利用もVR用途を中心に広 がっている.近年,VRの標準化活動が活発化しており⁹⁵⁾, ITU-Rにおいても360度VR映像の番組素材交換用映像パ ラメータの勧告⁹⁶⁾が成立した.本勧告におけるVR映像素 材の画素数は水平30K×垂直15Kに達するが,この画素数 に対応したカメラはまだ登場していない.VR映像制作用 としては、11K×5Kで360度撮影が可能なカメラ⁹⁷⁾が製品 化されているほか,撮影実験としては、HDカメラを16台 利用しての水平16K・360度撮影⁹⁸⁾や,8Kカメラを複数台 利用した12K×4K映像撮影⁹⁹⁾,1億3,300万画素単板式カ メラを用いた16K×8K映像の撮影¹⁰⁰⁾などが報告されてい る.VRでは規格策定がカメラ開発を先行しているが、今 後VR規格に対応した高精細カメラの登場が期待される.

3.2 携帯電話用カメラ・ディジタルカメラ・ビデオ カメラ

近年,カメラの使われ方は大きく変化し,それに関して イメージセンサの技術も変化してきた.特に2020年には世 界の年間出荷台数予測が約16億台となったスマートフォン に搭載されるカメラモジュールは,圧倒的な手軽さとSNS への静止画・動画の投稿が容易などの利便性から,カメラ の市場構造を大きく変えた.それに伴い,以前は500万画 素前後(画素ピッチ1µm台後半)のカメラが1つ搭載され ているに過ぎなかったものが,1,000万~2,000万画素(画 素ピッチ1µm台前半)から5,000万画素や1億画素(画素 ピッチ0.8µm)を超える超多画素なものも相次いで発表さ れている¹⁰⁴⁾.スマートフォンのカメラは光学ズーム機能 がないものが多く,ディジタルズームを使用するものが多 い. そのときの画質劣化を防ぐことが,多画素化の目的の 1つであると考えられる. さらに,複数のカメラモジュー ルを搭載することで,ボケ感演出や広角撮影,マクロ撮影 といった,レンズ交換式カメラ(DILC: Digital Interchangeable Lens Camera)の得意とするさまざまな撮 影を可能にしつつあり,中にはToFカメラを搭載するス マートフォンも現れている. このようなスマホカメラの発 展は,前項でも紹介されている画素微細化のための裏面照 射技術,積層化技術の進歩によるところが大きい. また, ベイヤー配列の工夫や,カラーフィルタ間の遮光構造など, 光学構造の進歩も,スマホカメラの進歩に貢献している.

一方,ディジタルスチルカメラの総出荷数は減少傾向で あり,現在はピーク時の1/6以下(0.2億台程度)に落ち込ん でいる.中でも「レンズ一体型」の衰退は著しいものの,光 学式ファインダの代わりに電子ビューファインダを内蔵し たミラーレス一眼カメラは,小型軽量化を実現でき,重く て大きな一眼レフカメラは持ち歩きたくないが,綺麗な写 真が撮りたい顧客層を中心に受け入れられている.

DILCにおけるイメージセンサについて、35mmフルサ イズセンサ搭載の各社フラグシップ機のDILCを対象に、 最近の製品の製品仕様から技術動向を俯瞰する.まず画素 数については、1,600万画素前後から2,200万前後へ増加し た. 画素ピッチで言い換えると7µm台から6µm台へ縮小 されたことになる. 前述のスマートフォンのカメラに比べ ると多画素化は進んでいないが、一部のラインナップでは 4,000万画素を超える画素数のDILCが製品化されている.続 いて、常用最高ISOについては12800から102400まで引き上 げられた.これについては、前項より紹介されている低ノ イズ化技術、高感度化技術の弛まぬ技術蓄積が大きく貢献 している.また、動画については30fps@フルHDから 120fps@フルHDや60fps@4Kでの撮影が可能になった.こ れを可能にしたのは、ADC回路技術やディジタル出力化, 裏面照射型構造や積層構造による信号読み出し配線複線化 などのイメージセンサの技術進歩によるところが大きい. また, AF性能という観点では, 像面位相差 AF技術101)~103) はミラーレスカメラ、スマートフォンのカメラのライブ ビュー撮影および動画撮影時のAF速度を飛躍的に向上さ せた技術である.

これらの他に,新たなカメラの形態も生まれている. 4K8Kカメラは,インターネットの動画サイト向けに超高 解像度の動画の撮影が気軽にでき,近年普及が急速に進ん でいる.フルハイビジョン(1920×1080画素)の2倍の解 像度をもつ4KUHDTV(3820×2160画素)では,大画面で 画像を見る際やズーム拡大しても画質が劣化しないなどの メリットがある.現在のテレビは4Kが主流で,8Kは家庭 に浸透するのはまだ先であるが,業務用の8Kビデオカメ ラが登場しており,注目を集めている.来年開催予定と なった東京オリンピックで8Kの臨場感のある映像が提供 される.

また近年市場が立ち上がってきた360度カメラは,撮影 者の肉眼視野に入っていない情報を記録することができ る.従来のカメラは,撮影者がフレーミングした「視野制 限」の画像しか取得できないが,360度カメラは,自分の興 味で「視野制限」を超える情報・画像を見ることができ,新 たな気づきが得られる.VR映像を創出しエンタテインメ ント分野やビジネス活用等への普及が進んでいる.

3.3 車載用カメラ・セキュリティ用カメラ・産業用 カメラ

車載用センシングシステムは、レベル3まで着実に進化 してきた¹⁰⁵⁾.これに対応して、車内外を全方位、全レン ジにわたって画像センシングするための車載用カメラは, 室内モニタ,前方監視,側方監視,後方監視,全方位(パ ノラマ)モニタ,コーナービュー,さらに2018年以降に新 規に登場したドアミラーカメラ¹⁰⁶⁾に至るまで、7種類ほぼ 標準装備されて商品化されている. 今後, 運転者操作を介 さないレベル4以上にむけてのシステム開発が進んでいく と考えられる. そのためには, 高速走行時の危険予知判断 と安全確保が大きな課題である。特に前方監視センシング システムにおいて、障害物検知機能に加えて、障害物まで の距離, さらには障害物の識別・認識性能が必要となる (指標として、「夜間+250m遠方+10cm段差」の高速検知 が求められる).しかし、これら諸要求すべてをを1台で満 たすセンシング「装置」はなく、測距性能の高いミリ波レー ダー, ライダーと認識に不可欠な画像情報を出力するカメ ラを組み合わせたシステム構成が検討されている. このよ うな状況の中,ソニーは,前方監視車載カメラ用途として, 従来の画素数2Mから8Mにシフトし、500m遠方、 FOV30°で検知性能を有するCMOSイメージセンサ(CIS) 開発を先行し、本年からの車載量産準備が整ったと発表し ている¹⁰⁷⁾.一方,近距離用途の間接ToFカメラの測距性 能は従来5m程度までであったが¹⁰⁸⁾,近年は10mを超え るレベルまで延びてきており108),近距離域でのレーダー に対する代替が可能か否か注目される. さらに近距離はも とよりレーダーレベルの長距離(250m)までをリアルタイ ムで測距し、かつ、メガピクセルの解像度を有するアバラ ンシェフォトダイオード (APD) 画素 CIS-ToF システムも 開発されている¹⁸⁾.反射率が高ければ、上記「250 m にあ る10 cm」の大きさの物体を測距・検知可能である.近距離 における測距分解能も10 cm まで向上している.まさにラ イダーとカメラの2台を1台でカバーする性能である.耐 環境性の問題を克服できれば、レーダーをも凌ぐ技術とし て期待される.

近赤外光を用いたToFカメラは,車載だけではなく, (間接型・直接型とも)幅広い分野での応用が期待される. 3次元測距装置として産業用途,近赤外光による暗視性能 を活かしたセキュリティ用途等である¹⁰⁸⁾. Artilux は近赤 外に高い感度を有する Ge を光電変換部とした間接型 ToF カメラを発表した³⁵⁾. ToF カメラとしてではないが,近赤 外帯域で高感度な CIS として InGaAs を光電変換部とする 裏面照射センサをソニーも産業用に発表している¹⁰⁹⁾.

一方、通常のフレーム撮像方式ではなく、各画素の信号 変化のイベントを非同期で出力するイベントベースビジョ ンセンサ(EB-VS)あるいはダイナックビジョンセンサ (DVS) がロボティクス,マシンビジョン用に,急ピッチで 開発が進んでいる¹¹⁰⁾¹¹¹⁾. 画素数解像度は従来のCISと同 等(1M以上)で、各画素の信号変化をON. OFF信号とし て1 MHz 程度の速度で測定検出するので、仮に1000fpsの 高速CISと比較しても1000倍程度速い被写体の動きを画素 レベルで検出することが可能である.光電流を対数変換回 路で電圧に変換することによりダイナミックレンジ140dB のものまで実現されており、屋外太陽光下での撮像にも有 効である¹¹²⁾.BSI貼り合わせ技術との融合により、回路領 域が基板分離され、開口率も4.8µm 画素で77%まで向上可 能である.消費電力も通常CISの1/1000と圧倒的に少なく, ネットワーク, IoT, 移動ロボット等広い分野で活用され ていくものと期待される.

3.4 不可視光撮像

赤外線イメージセンサは,物体(熱源)から輻射される赤 外線の分布を画像化するもので,可視のイメージセンサのよ うに光源の物体からの反射光を見るのではなく,物体から放 射される赤外線を直接に検知する.さらに,物体が放射する エネルギーはその物体の温度に依存することから,非接触で 物体表面の温度を計測することが可能である.赤外線イメー ジセンサで用いられる波長帯は,大気の窓と呼ばれる,大気 が赤外線をよく透過する波長帯から,1~3µm帯(短波長赤 外),3~5µm帯(中波長赤外),8~14µm帯(長波長赤外) に分けられ,各波長帯はそれぞれ特徴があり,用途・使用 条件に応じて選択される.常温物体からは10µm近傍の赤 外線が最も多く放射されることから,これらの波長帯のう ち8~14µm帯を検知対象とした赤外線イメージセンサは, 常温物体の検知に優れている.

赤外線イメージセンサは、検出原理の違いから冷却型 (量子型)と非冷却型(熱型)に大別される.量子型は、赤 外線をフォトンとして扱い、半導体におけるフォトンと電 子の相互作用を利用するため、高い感度を持ち、応答速度 が速いという利点を有している.また、熱型は、冷凍機が 不要であることから、赤外線カメラの小型・軽量化、低消 費電力化を可能にし、民生用途向けに低価格化が進められ てきた.熱型赤外線イメージセンサは、シリコン基板上に 断熱構造を有する画素(温度センサ)を2次元アレイとして 形成したものである.赤外線を吸収する赤外線吸収体と温 度センサから構成された画素の検知部において、赤外線の 入射により発生する微小な温度変化を検知する.温度セン サとしては,ボロメータ,ダイオード,サーモパイル,強 誘電体等などさまざまなものが用いられている.

本節では、赤外線のセンサ技術動向として、米国で毎年 開催される SPIE (国際光工学会) 主催の国際シンポジウム 「Defense + Commercial Sensing」での報告を中心に、技術 動向について述べる. トルコ MikroSens 社は, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ベースのマ イクロボロメータ技術, MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術、ウエハレベルパッケージング による低コスト化について報告した113). 35 µm ピッチ 160×120 画素熱型赤外線イメージセンサにおいて、温度 分解能NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) は89mK@光学系F値1.0,4Hzである. 仏ULIS社は, 画素 構造の変更により温度分解能 NETD が低下することなく, 熱時定数(応答速度)を,10msecから2.5msecへ低減し, 高速化を実現した¹¹⁴⁾.米SensIR社からは、焦電型赤外線 センサの新しいアプローチが紹介された. 焦電型は, 材料 自体の温度変化による自発分極値の変化を使用するため, 入射光をメカニカルシャッタなどで、ON/OFF する必要が あるが、本報告では静電駆動により材料を基板に接触させ ることにより、温度を基板温度にリセットする方法が報告 された115).熱型赤外線センサへの新機能付加としては、 三菱電機から、プラズモニック吸収体による熱型赤外線セ ンサへの波長選択機能の付加について報告された116).こ のほか,米国FLIR社,Seek Thermal社,仏ULIS社, JVCケンウッドからは、熱型赤外線カメラを車載応用とし て,前方監視に使用した場合の評価結果が報告された.夜 間や霧中などのさまざまな環境における人検知に関して有 用性が示された117)~119).

以上のように、赤外線センサは、民生用途向けとしては熱型中心に、引き続きさまざまな研究開発が繰り広げられている。画素微細化の取組みを中心に、多画素化、高感度化および低コスト化が追求されており、確実な技術の進展がうかがえる。開発動向の重要な流れとしては、画素ピッチ縮小があり、センサチップの縮小による光学系を含むカメラの小型化や、画素数増加による高解像度化を可能にする。 画素ピッチのトレンドとしては、従来主流であった17µmから12µmが主流となりつつある。

今後,安価な赤外線カメラは,セキュリティ,保守・保 全,家電向け,自動車向け,医療などさまざまな分野でま すます重要になってくると思われ,熱型赤外線センサが赤 外線カメラの新たな用途を作り出すキーデバイスになると 考えられる.

X線イメージングは可視光イメージングと同様の進化を みせている.高速化や、高感度、高解像度など画質向上の ためのさまざまな技術開発が行われている.可視光でのマ ルチスペクトラルイメージングに相当する複数エネルギー のX線画像を組み合わせることにより物質を特定させる撮 像法の研究も多くみられる.画像解析には,ディープラー ニングやAIなどの技術が使われることもある¹²¹⁾.読み出 し回路技術においては,可視光イメージングの技術がその まま転用されることも多いが,X線イメージング用途に特 化して転用される例もある.

X線のエネルギー領域の中で,軟X線とよばれる数百eV から20keV程度までの低エネルギー領域のイメージング は,X線分析,X線天文観測,物理学実験などに使用され ている.検出器には,SiAPD,CCD,CMOSイメージセンサ などのダイレクト式の検出器が利用されることが多い.反 射防止膜をなくすなどの改造を市販の裏面入射型CMOSイ メージセンサ(11µm角,2048×2048ピクセル)に施して, 軟X線のエネルギー分別が報告されている¹²²⁾¹²³⁾.放射線 耐性を向上させるために,ウエハ厚を9.5µmに厚くする, 受光部表面のイオン注入エネルギーを低減し,不感領域を 5 nmまで薄くする,等の工夫もしている.不感領域を薄く することより,80~1000eVのエネルギー領域で90%以上 の高い量子効率を実現し,低エネルギー領域でのエネル ギー分解能を向上させている.

もう少しエネルギーの高い7.5k~50keVの領域でも市販 の裏面入射型CMOSイメージセンサ(1.4 um角, 2592× 1944ピクセル)を用いて、ダイレクト式でX線イメージン グが行われている¹²⁴⁾. 直接変換されるためシンチレータ によるぼけがなく、画素が小さいので、非常に高い空間分 解能を有する.黒樹脂で固められたIC内のφ15μmのボン ディングワイヤが撮像できている.複数のエネルギーの画 像を合成することにより、黒樹脂、フレーム、シリコン チップ、ボンディングワイヤを重ね合わせた擬似カラー画 像が取得可能となる. 高エネルギーX線の直接変換のため, 変換効率が0.05~0.3%と悪いのが欠点であるし、受光部と 画素回路部のX線ダメージも危惧される. 20k~100keV のエネルギー領域の硬X線領域は、物質に対する高い透過 率を利用して産業機器、医用機器に応用されており、シン チレータを用いてX線を一旦光に変換し、変換された光を 検出することで間接的にX線を検出するシンチレータ式の 検出器が一般的である。高速撮像の点においては、列並列 ADCを搭載した口腔内X線撮像用のCMOSイメージセン サが報告されている¹²⁵⁾. 18.5 µm 角, 1612 × 1204 ピクセル を最大31fpsで撮像することが可能であり、口腔内のX線 トモシンセシス画像撮像への応用が期待される.大面積撮 像の点では、90µm角、2304×2256ピクセルのX線撮像用 のイメージセンサが発表されている¹²⁶⁾. 12インチウエハ から1チップ取りで、受光サイズは20.7×20.7 cm²となる. このセンサも列並列 ADCを搭載しており、多画素にも関 わらず30fpsでの撮像が可能である.X線撮像用画素には フルウエルが大きなことも重要である.本報告では、画素 内にMOSキャパシタを配置し、ゲート電圧を制御するこ とにより変換係数を変え,最大6632 Ke-の電子数を画素に

854 (112)

保持できている.

4. むすび

画像情報のセンシング分野における最近2年間の技術進 展についてまとめた. イメージセンサに関する技術は,物 理から回路,情報処理まで幅広い技術が相互に密接に関連 しており,撮像素子の基本性能が完成の域に達しつつある 現在は,その傾向が加速している.また製造技術や実装技 術の高度化も,その傾向を強くしており,この傾向は,今 後も加速しつつ,カメラ機器等のアプリケーションの利用 場面という社会環境の変化とも表裏一体となりつつ,進む と考えられる. (2020年5月25日受付)

〔文献〕

1) ソニー報道資料: "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"(2018 年7月 23日)
2) T. Hasegawa et al., IISW, R02 (2019)
3) T. Okawa et al., IEDM, 16.3.1 (2019)
4) H. Kim et al., ISSCC, 5.6 (2020)
5) V.C. Venezia et al., IEDM, 10.1 (2018)
6) G. Park et al., IEDM, 16.4 (2019)
7) T. Finateu et al., ISSCC, 5.10 (2020)
8) Y. Honda et al., IEEE Trans. CPMT, 9 (9), pp.1904-1911 (2019)
9) Y. Honda et al., IEEE S3S, 4.03 (2019)
10) H. Togashi et al., IEDM, 16.6 (2019)
11) 堺ほか:2019年映情学年次大,33C-1 (2019)
12) S. Manda et al., IEDM, 16.7 (2019)
13)為村ほか:映情学誌, 74, 1, pp.187-191 (2020)
14)為村ほか:第67回応物春季, 4p-PB2-7 (2020)
15) T. Watanabe et al., Analog Integrated Cir. And Sig. Processing, 77,
3. pp.449-457 (2013)
16)S. Yokovama et al., ISSCC, pp.108-110 (2019)
17) S. Kondo et al., ISSCC (2020)
18) T. Okino et al., ISSCC, 5.2, pp.96-97 (2020) (2020)
19) M. Sato et al., ISSCC, pp.108-109 (2020)
20) T.H.Hsu et al. ISSCC (2020)
21)B. Son et al. ISSCC (2017)
22) M. Sakakibara et al., IEEE ISSC, 53 , 11, pp.3017-3025 (2018)
23) T. Haruta et al. ISSCC (2017)
24) T. Yamazaki et al. ISSCC (2017)
25) https://www.sonv.co.ip/SonvInfo/News/Press/202005/20-037/
26) X.P.Zhong et al. IEEE ISSC (2020)
27) T. Hasegawa et al., IISW, R02, pp.4-7 (2019)
28) Y. Lee et al. IISW. R04. pp.12-15 (2019)
29) I. Yun et al. IISW. R03. pp.8-11 (2019)
30) M. Murata et al. IEDM. pp.225-228 (2019)
31) I. Park et al. IISW. pp.183-186 (2019)
32) D. Park et al. IEDM. pp.16.2.1-16.2.4 (2019)
33) E. Georgitzikis et al. IISW. pp.298-301 (2019)
34) C.L.Chen et al. ISSCC. pp.98-99 (2020)
35) T. Abbas et al. IISW pp 206-209 (2019)
36) S. Imura et al. IISW. pp.214-217 (2019)
37) Y Hirose et al. ISSCC pp 104-105 (2019)
38) M Ha et al IISW pp 27-31 (2019)
39) Y Chao et al. IISW pp 36-39 (2019)
40) I. Ma et al. IISW pp 202-205 (2019)
41) Y. Sakano et al. ISSCC pp 106-107 (2020)
42)C Xu et al. ISSCC pp 94-95 (2019)
43) IK Lee et al ISSCC np 102-103 (2020)
44) T G Etoh et al Sensors 19 (2247), pp 1-16 (2019)
45) M. Suzuki et al. Sensors 20 (1086), pp.1-16 (2020)
10/11/ Suban et al, Senoro, 20 (1000/, pp.1-10 (2020)

46) K. Kagawa et al., IISW, R36 (2019) 47) 黒田, 映情学誌, 74 (2), pp.263-268 (2020) 48) Y. Sakano et al., ISSCC, pp.106-107 (2020) 49) M. Murata et al., IEEE Trans. ED, 67 (4), pp.1653-1659 (2020) 50) Y. Fujihara et al., Elec. Imaging 2020, pp.143-1-5 (2020) 51) A. Tournier et al., IEDM, 229-232 (2018) 52) M. Takase et al., Symp. VLSI Tech., pp.71-72 (2018) 53) J.K.Lee et al., ISSCC, pp.102-103 (2020) 54) S. Yokogawa et al., Scientific Reports, 7 (3832), pp.1-9 (2017) 55) https://consumer.huawei.com/jp/phones/p30-pro/ 56) https://www.apple.com/jp/newsroom/2020/03/appleunveils-newipad-pro-with-lidar-scanner-andtrackpad-support-in-ipados/ 57) Y. Wang et al., IISW, pp.222-225 (2019) 58) M. Keel et al., IEEE Symp. VLSI Cir., pp.C258-C259 (2019) 59) D. Kim et al., ISSCC, pp.100-101 (2020) 60) Y. Shirakawa et al., IISW, pp.187-190 (2019) 61) C. Chen et al., ISSCC, pp.98-99 (2020) 62) N. Sarhangnejad et al., ISSCC, pp.102-103 (2019) 63) H. Ke et al., IISW, pp.111-114 (2019) 64) K. Kagawa et al., IISW, pp.270-273 (2019) 65) M. Conde et al., ICASSP, pp.1469-1473 (2020) 66) 吉田ほか: 第22回画像の認識・理解シンポジウム, DS-4 (2019) 67) 坂井ほか:第22回画像の認識・理解シンポジウム, OS1B-4 (2019) 68) K. Yamaguchi et al., 映情学技報, 42, 40, pp.27-28 (2018) 69) 香川ほか:映情学技報, 44, 11, pp.51-56 (2020) 70)吉田ほか:映情学技報, 43, 13, pp.31-34 (2019) 71) 鹿倉ほか:映情学技報, 43, 18, pp.5-9 (2019) 72) 築村ほか:映情学技報, 43, 13, pp.9-12 (2019) 73) J. Ogi et al., Frontiers in Neuroscience, 13234 (2019) 74) https://www.sony.jp/professional/c c/ 75) https://www.ikegami.co.jp/broadcast camera 76) https://panasonic.biz/cns/sav/Panasonic 77) https://www.hitachikokusai.co.jp/products/broadcast/camera/ 78) https://www.grassvalley.com/products/ldx864K/ 79) https://cweb.canon.jp/pdfcatalog/indtech/bctv/ 80) https://www.fujifilm.com/jp/ja/business/cineand-broadcast/ portablelens/4K 81) https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201909/19-092 82) T. Sakiyama et al., SMPTE Motion Imaging J., 127, 3, pp.1-6 (2018) 83) R. Funatsu et al., SMPTE Motion Imaging J., 128, 3, pp.44-49 (2019) 84) https://jp.sharp/business/8Kcamera/products/8K-camcorder/ 85) https://news.panasonic.com/jp/press/data/2019/04/jn190408-3/in190408-3.html 86) S. Sato et al., SMPTE 2019 Annual Tech. Conf. & Exhib. (2019) 87) 松崎ほか:映情学技報, 43, 10, pp.29-32 (2019) 88) F. Ito et al., IEEE Global Commus Conf., WCSI5-5 (2018) 89) H. Yamashita et al., Clinical Ophthalmology, 2018:12, pp.1823-1828 (2018)90)S. Ohigashi et al., Asian J. Endoscopic Surgery, 12, 3, pp.362-365 (2019)91) https://www.mi.com/global/mi-10 92) https://www.galaxymobile.jp/galaxy-s20/specs/ 93) https://jp.sharp/products/aquos-r5g/spec.htm 94) https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-865-5g-mobileplatform 95)青木,映情学誌, 73, 1, pp.29-33 (2019) 96) Recommendation ITU-R BT.2023-0 (2019) 97) https://www.insta360.com/product/insta360-titan 98) D.E.Meyer et al., IS&T Inte. Symp. On Elec. Imaging, Stereoscopic Disp. And App. XXX, 8, pp.646-1-646-8 (2019) 99)小出ほか:映情学技報, 43, 10, pp.45-48 (2019) 100) 船津ほか: 2019年映情学年次大会, 12C-3 (2019) 101) H. Endo, J. ITE, 65, 3, pp.290-292 (2011) 102) 日暮, 日本写真学会誌, 77, 3, pp.213-217 (2013) 103) M. Kobayashi, J. ITE, 39, 35, pp.1-4 (2015)

- 104) T. Hasegawa et al., 映情学技報, 43, 31, pp.13-16 (2019)
- 105) 政府広報, https://www.govonline.go.jp/useful/article/

202004/1.html (2020)

- 106) 日本経済新聞, https://www.nikkei.com/article/DGXMZO35276970 S8A910C1TJ1000/ (2018)
- 107) 久米, https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/at/18/00006/00136/
- 108) 村田: OPIE '19 産業用カメラ技術セミナー講演予稿集, IC-1 p.7 (2019)
- 109) ソニー ニュースリリース, https://www.sony.co.jp/SonyInfo/ News/Press/202005/20-036/
- 110) G. Gallego et. al., arXiv:1904.08405 [cs.CV]
- 111) T. Finateul, et al., ISSCC, 5.10, pp.112-113 (2020)
- 112) D. Scaramuzza, http://rpg.ifi.uzh.ch/researchdvs.html
- 113) F. Tankut et al., Proc. SPIE, 11002, 110021Q (2019)
- 114) N. Boudou et al., Proc. SPIE, 11002, 110021Q (2019)



★ * c UshUb UshUb 1998年,東京大学大学院工学系研究科 電子情報工学専攻博士課程修了. 1998年, 金沢大学助手. 2000年,公立はこだて未来大学講師. 2004年,金沢大学 講師. 2008年,同大学准教授を経て,2011年より,同大 学教授.集積回路,特に高機能イメージセンサと,その 応用システム、特にインタラクティブシステムに関する 研究に従事.博士(工学).正会員.



井口 義則 1991年,早稲田大学大学院理工学研究 科修了.2001年,NHKに入局.同年より,NHK放送技 術研究所にて、MEMSマイクロホン、3次元集積化技術、 CMOSイメージセンサ, コンピュテーショナルイメージ ングの研究に従事.正会員.



池辺 将之 2000年,北海道大学大学院工学研究科 博士後期課程修了.同年,大日本印刷(株).2005年, 北海道大学大学院情報科学研究科准教授. 2018年, 北海 道大学量子集積エレクトロニクス研究センター教授. イ メージセンサ・高速画像処理 (AI アルゴリズム・ソフト /ハードウェアの研究に従事.博士(工学).



丸山 基之 1986年,同志社大学工学部機械工学 第二学科卒業.同年,(株)東芝入社.カメラ用ASSPの 開発・CMOSイメージセンサの開発に従事. 2016年, ソニー(株). (株) Imaging Device Technologies を経て, 現在,(株)SensAIにて,CMOSイメージセンサのシス テム研究開発に従事.



関根 寛 2014年, 東京大学大学院新領域創成科 学研究科物質系専攻修士課程修了.同年,キヤノン(株) 入社.以来, CMOSイメージセンサの設計, 研究開発に 従事.正会員.



黒田 理人 2010年, 東北大学大学院工学研究科博 士課程修了. 2007年~2010年, 日本学術振興会特別研 究員 (DC1). 2010年, 東北大学大学院工学研究科助教. 2014年、同大学准教授. 半導体集積回路・デバイス・プ ロセス技術, 高機能イメージセンサ等の研究に従事. 当 学会情報センシング研究会幹事.博士(工学).正会員.



香川景一郎 2001年,大阪大学大学院工学研究科物 質·生命工学専攻博士後期課程修了.同年,奈良先端科 学技術大学院大学物質創成科学研究科助手. 2007年, 同 大学物質創成科学研究科助教. 同年, 大阪大学大学院情 報科学研究科特任准教授. 2011年,静岡大学電子工学研 究所准教授. 2020年,同大学教授. 現在,高機能CMOS イメージセンサ開発と生体光イメージングなどへの応用 研究に従事.博士(工学).正会員.

- 115) C.M.Hanson, Proc. SPIE, 11002, 110021N (2019)
- 116) S. Ogawa et al., Proc. SPIE, 11002, 110021K (2019)
- 117) S. Yokoi et al., Proc. SPIE, 11002, 110021D (2019)
- 118) K.M.Judd et al., Proc. SPIE, 11002, 110021F (2019)
- 119) T. LeBeau, Proc. SPIE, 11002, 110021H (2019)
- 120) E. Bercier et al., Proc. SPIE, 11002, 110021J (2019)
- 121) Z. Sabetsarvestani et al., Appl. Sci. And Eng., eaaw7416 (2019)
- 122) T. Harada et al., Appl. Phys. Exp., 12, 082012 1-5 (2019)
- 123) T. Harada et al., Appl. Phys. Exp., 13, 016502 1-4 (2020)
- 124) J. Lipovetzky et al., Radiation Phys. And Chem., 167, 108224 1-7 (2020)
- 125) M. Sannino et al., IISW, pp.123-126 (2019)
- 126) S. Lee et al., ISSCC, pp.434-435 (2020)



小室 孝 2001年,東京大学大学院工学系研究科 数工学専攻博士課程修了.同年,科学技術振興事業団研 究員. 2002年, 東京大学大学院情報理工学系研究科シス テム情報学専攻助手. 2005年,同大学講師. 2011年,埼 玉大学大学院理工学研究科数理電子情報部門准教授. 2019年、同大学教授. 画像センシング、コンピュータビ ジョン,ユーザインタフェース,拡張現実感等に関する 研究に従事.博士(工学).正会員.



德田 🚔 1998年, 京都大学大学院工学研究科電 子物性工学博士後期課程修了,日本学術振興会特別研究 員を経て、1999年より、奈良先端科学技術大学院大学物 質創成科学研究科助手,助教,准教授. 2019年より,東 京工業大学未来産業技術研究所教授となり,現在に至る. CMOSセンサ,バイオセンサ,生体埋め込みデバイス技 術などの研究に従事.博士(工学).正会員.



船津 良平 2002年,東京工業大学大学院理工学研 究科修士課程修了.同年,NHK入局.北九州放送局を 経て、2004年より、放送技術研究所にて、超高精細撮像 技術の研究に従事.正会員.



門 1995年,(株)ニコン入社. 高密度光 西山 ディスク,スタンパー,回折光学素子,MEMSデバイ スの研究開発に従事. 2008年より、CMOSイメージセン サの設計,研究開発に従事.正会員.



廣瀬 裕 1987年,東京大学大学院工学系研究科 修士課程修了.同年,日本電気(株)入社.1996年, Princeton大学大学院博士課程修了. 同年, 日本テキサ ス・インスツルメンツ(株)入社.2001年,松下電器産 業(株)(現パナソニック(株))入社.イメージセンサ, 化合物デバイスの開発等に従事. Ph.D. (電気工学). 正 会員.



大介 2002年,豊橋技術科学大学大学院工学 藤澤 研究科電気電子工学専攻修士課程修了. 2005年, 同大学 院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了.同年, 三菱電機株式会社に入社. 同年より赤外線固体撮像素子 の研究開発に従事し,現在に至る.博士(工学).



杉山 行信 1995年,慶應義塾大学大学院理工学研 究科生体医工学専攻修士課程修了.同年,浜松ホトニク ス(株)入社.機能内蔵CMOSイメージセンサ、口腔内 X線撮像用CMOSイメージセンサ、プロファイルセンサ の設計,開発に従事.正会員.