

撮像新時代 CMOSデジタルイメージング イメージセンサー編

名雲 文男 著

まえがき

本書は2021年1・2月号から2022年3・4月号まで雑誌「O plus E」に「撮像新時代 CMOS デジタルイメージング」として連載されたイメージセンサー編にマシンビジョン系のシステム編を追加したもので、第二の革命ともいえるべき現在進行形の撮像技術をベースにした解説である。

第一の革命はシリコン製の CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサー (以降、CCD) の出現で起きた。真空管時代にプロ専用であった映像機器を CCD が市民に開放した革命だ。いわば民生用カメラの時代を開いた革命であった。

現在進行形の第二の革命は CMOS イメージセンサー (CIS) とデジタル技術の融合で始まった。この革命も激烈だ。この半世紀間、CCD 研究開発を始めとして一貫して撮像技術に従事している筆者でさえも眼前で展開するこの進化は眼を見張るほどに強烈だ。

その第二革命のキーワードは以下の2点である。

- ◆ CMOS イメージセンサー (以降 CIS) の 3D 積層技術
- ◆ イメージセンシングとデジタル/コンピューティングとの融合

前半のイメージセンサー編ではこの「CIS + デジタル」の壮大な進化を紹介する。そのゴールの1つが“観る = Imaging”系の最新スマホカメラの撮像技術 QBC (Quad Bayer Coding) とそのデジタル処理だ。その画質の進化はすさまじく、「小指ほどの CIS が 35 mmFF 一眼カメラに追いつき追い越せ」状態だ。一方“測る = センシング”系撮像技術もその機能を進化拡大中だ。先端の例が画素出力がデジタルという異次元異能のセンサー、人呼んで「デジタル画素 (DPS : Digital Pixel Sensor)」だ。これは 3D 積層技術による画素の小型化、高機能化で実用化に至った次世代イメージセンサー技術だ。3次元撮像の d-ToF = LiDAR や EVS (Event Based Vision Sensor, 恐竜のように変化を撮像する) など、尖った異能のイメージセンサー群がその一例である。

撮像システムでは高性能 CIS とコンピュータビジョンとの融合が新しい時代を開いた。機械の視覚認知機能 = マシンビジョンを進化させ、自動運転車やペットロボットなど機器の自律化 (Autonomous) を大いに支援している (Embedded Vision)。

本書ではこのように劇的に進化する撮像技術を「CMOS デジタルイメージング」と呼ぶ。CCD はアナログイメージセンサーだが、一方の CIS は原初からデジタルであり、その CIS と CMOS 製のコンピュータチップとの融合によって劇的に進化する撮像技術が「CMOS デジタルイメージング」だ。

本書ではこうして劇的に進化する「CMOS デジタルイメージング」を「イメージセンサー編」(技術動向)と「撮像システム編」(マシンビジョン系の撮像要素技術)の二面で解説している。後者では日本インダストリアルイメージング協会 (JIIA) のご協力のもと、その道のプロの仲間たちに解説いただいている。

本書の解説は現在進行形の撮像技術の動向を主としている。ここでいう第二の革命は撮像技術に関係する方々に新時代変化への備えを強く要求するほどに激烈である。読者の皆様にも本書を通して、こうした劇的進化の現状を感じていただければ幸いである。

名雲文男
2023年6月吉日

目 次

序文	i	5.3 EVS (Event Based Vision)	14
目次	iii	5.4 DPS (Digital Pixel Sensor)	14
		5.5 光電変換膜積層	
		= 赤外線イメージセンサー	14
第 1 回 CMOS イメージセンサー (CIS)	1	おわりに	14
の性能進化	1		
はじめに	1		
§ 1 CIS の性能進化	1	第 3 回 CMOS イメージセンサー (CIS)	16
1.1 CIS の基本構成	1	の機能進化 (2)	16
1.2 進化 1：埋込型 PD = ダークノイズ削減	2	はじめに	16
1.3 進化 2：列並列 ADC, デジタル CDS		§ 1 機能進化を支える仕組み	16
= 高速化, 縦スジノイズ削減@2007	3	§ 2 水平分業による進化 (1)	
1.4 進化 3：裏面照射 = 高感度化@2009	4	マシンビジョン系	16
1.5 進化 4：3D 機能積層 = 機能進化@2012	4	2.1 多色撮像 (マルチカラーイメージング)	16
§ 2 CIS の基本性能成熟	4	2.1.1 ファブリーペロー干渉フィルター	17
2.1 感度：光利用率向上/ノイズ削減	4	2.1.2 プラズモンフィルター	17
2.2 解像度, 画素サイズ	4	2.2 偏光撮像	18
§ 3 CIS に残された課題の解決	5	§ 3 水平分業による進化 (2) スマホカメラ系	18
3.1 高ダイナミックレンジ (HDR)	5	3.1 高ダイナミックレンジ撮像：	
3.2 LED フリッカーと対策 (LFM)	6	光電変換の水平分業	18
おわりに	6	3.2 AF 用 3D 撮像 (測距)：	
		光路選択の水平分業	19
第 2 回 CMOS イメージセンサー (CIS)	8	<<挿話 1>> 巨大水平分業, ライトフィールド	
の機能進化 (1)	8	カメラ	20
はじめに	8	3.3 最新スマホの撮像技術 QBC：	
§ 1 CIS の機能進化, その全容と基盤技術	8	Quad Bayer Coding	20
1.1 センシング CIS 機能進化の全容	8	<<挿話 2>> 超水平分業 分業画素数最適値	
1.2 CIS 基盤技術の進化：3D 積層技術	8	探し	21
§ 2 機能進化, 時の流れに沿って	8	<<挿話 3>> 水平分業でスマホが一眼カメラ	
2.1 萌芽期：車載専用 CIS 出現	9	に挑戦	21
2.2 成長開始期 3D 撮像と超高速撮像	9	おわりに	21
2.3 発展期：新型機能 CIS が普及へ			
@画素並列積層	10	第 4 回 CMOS イメージセンサー (CIS)	23
§ 3 機能進化を支える仕組み = 分業	10	の機能進化 (3)	23
§ 4 水平分業 = 画素間機能分担	10	はじめに	23
§ 5 垂直分業 = 3D 積層で分業	13	§ 1 3D 積層型 CIS の進化と実現される性能,	
5.1 垂直分業の実施例	13	機能	23
5.2 SPAD 画素と LiDAR	13	§ 2 高画質撮像へ, 積層で進化	24

2.1 最古の高画質撮像用 3D 積層 CIS	24	第 6 回 赤外線イメージングの話題	40
2.2 最新の高画質撮像用積層 CIS	24	はじめに	40
《挿話 1》 スマホが一眼カメラを超えた？	25	§ 1 赤外線と撮像	40
§ 3 超高速撮像へ、積層で進化	25	1.1 赤外線の波長区分の定義	40
3.1 4KTV 放送用スーパーモーションカメラ	25	1.2 赤外線撮像の全容と用途	40
3.2 スマホカメラのバーストイメージング	25	《挿話 1》 3つの 3D 撮像法と主要な用途	41
§ 4 ビジョンチップへ、積層で進化	25	§ 2 赤外線イメージセンサー技術の概要	42
4.1 高速ビジョンチップ	26	2.1 赤外線センサーの動作原理	42
4.2 AI ビジョンチップ	26	2.1.1 量子型光電変換@波長の短い光	42
§ 5 DPS = 画素並列で異次元進化	27	2.1.2 熱型光電変換@波長の長い光	42
おわりに	28	2.2 赤外線イメージセンサー構造と製法	43
		2.3 赤外線カメラ用レンズ	43
第 5 回 DPS 型 CMOS イメージセンサー (CIS), 異能異次元への進化	31	§ 3 NIR 用 CMOS イメージセンサー (CIS)	43
はじめに	31	3.1 NIR カメラの用途と市場	43
§ 1 DPS の進化	31	3.2 NIR 用 CIS の高感度化技術	43
§ 2 元祖 (本来の) DPS	32	3.2.1 NIR 光吸収効率改善： 光路の長距離化	43
2.1 本来の DPS とその特徴	32	3.2.2 SPAD (Single Photon Avalanche Diode)	44
2.2 初期の DPS = 表面照射型	32	§ 4 SWIR イメージセンサー	44
2.3 実用版 DPS = 垂直分業、積層技術の 貢献	33	4.1 SWIR カメラ、大きな期待、課題は コストダウン	44
§ 3 QIS	33	4.2 InGaAs センサー、シリコンキャリアで 低価格化	45
§ 4 SPAD	33	4.3 量子ドット (QD) でウエファレベル 製法	46
4.1 SPAD の原理	33	4.4 CMOS 系の SWIR PD, 革命勃発か？	46
4.2 SPAD 画素の特徴と 2 つの用法	34	§ 5 LWIR マイクロボロメータ	47
4.3 SPAD センサーの進化、垂直分業 = 積層技術の貢献	34	5.1 LWIR センシングの市場と商品化例	47
4.4 SPAD 期待のアプリ、3DLiDAR	35	《挿話 2》 LWIR 戦線異常あり	47
§ 5 EVS	36	5.2 LWIR マイクロボロメータ技術と カメラコア	47
5.1 EVS の概念と動作、特徴	36	おわりに	48
5.2 EVS の進化、垂直分業 = 積層技術の 貢献	36		
5.3 EVS の特徴とアプリ	37		
おわりに	38		

第1回 CMOSイメージセンサー (CIS) の性能進化

はじめに

本書のテーマ“CMOS デジタルイメージング”とは本書の造語である。CMOS イメージセンサー (以降 CIS) と CMOS コンピュータチップ*の融合が創出する高度な撮像技術をいう。CCD はアナログセンサーだが CIS は基本的にデジタルセンサーだ。デジタル機能を搭載する CIS は今や撮像性能を成熟させ、技術開発の舵を機能追及へと切り替えている。さらに、CIS とコンピューティングの融合がそれらの進化を加速させる。

こうした CIS の進化を2つの世代に分けて考える。人が観る用途 = イメージング = 向けの“性能進化”と、機械が情報を撮る用途 = センシング = 向けの“機能進化”の2つの世代である。本書ではその境界に“裏面照射技術”があり、目下第二世代の成長期にあると考える。

今回はその第一世代である CIS の性能進化の過程を振り返ることで CIS の特質を紹介し、次回に第二世代、現在進行形のセンシング機能進化を解説したいと思う。

それらの解説だが、幅広い読者層を想定して、半導体知識無用のマンガ的直感的な表現で解説する。お忙しい方やご専門の方は文章を飛ばして筆者のマンガ解説を苦笑しつつご覧いただきたい。それで進化の大河を再認識していただけるはずだ。なお、一步踏み込んだ情報として、技術解説サイトの URL (QR コード: QR#m) や参考文献を各回の最後に紹介する。

§1 CIS の性能進化

安かろう悪かろうで始まった CIS 第一世代はモバイル

* コンピュータチップ: 本書では SoC(System on Chip), ISP(Image Signal Processor), VPU(Vision Processing Unit), AI Chip を総称してこう呼ぶ。

(携帯, スマホ) という巨大市場を駆動力にして急速な性能進化を遂げた。

図1に民生用実用化をベースにした CIS 進化の過程を示す。性能進化のキーワードは“埋込型画素”, “列並列 ADC”, そして、ゴールの“裏面照射型”である。

1.1 CIS の基本構成

最初に CIS の基本構成を考える (図2)。その構成要素は2次元アレイの画素部 (P), 列回路 (C), そして出力回路 (O) である。

CIS の画素部 (P, 図3) は光電変換部 = PD (Photo Diode), 電荷電圧変換回路 = FDA (Floating Diffusion Amp), そして行選択スイッチからなる。CIS の第一の特徴は、画素内に超高効率の FDA を設けたことにある。

図3初段の PD (バケツがその例え) は入射光を受け、光電荷に変換しそれを蓄積する。FDA はその電荷を超高効率に電圧に変換して ($V = Q/C$, Q : 電荷量, C : 容量, メスシリンダーがその例え), 後段で発生するノイズへの耐性をもたせる。画素出力部の行選択スイッチは行読み出しのタイミングを決める。

図4に列回路 (C) と出力回路 (O) の構成を示す。上段 (a) は原初型の主流, 下段 (b) は現在主流の構成である。

原初型では初段に CDS (相関2重サンプリング; QR#1) を設ける。これは FDA で生じたノイズを相殺する重要な機能を担う。列出力部の選択スイッチは列読み出しのタイミングを決める。その後、出力回路 (O) の ADC (A-D 変換回路) を経てデジタルの撮像信号を出力する。

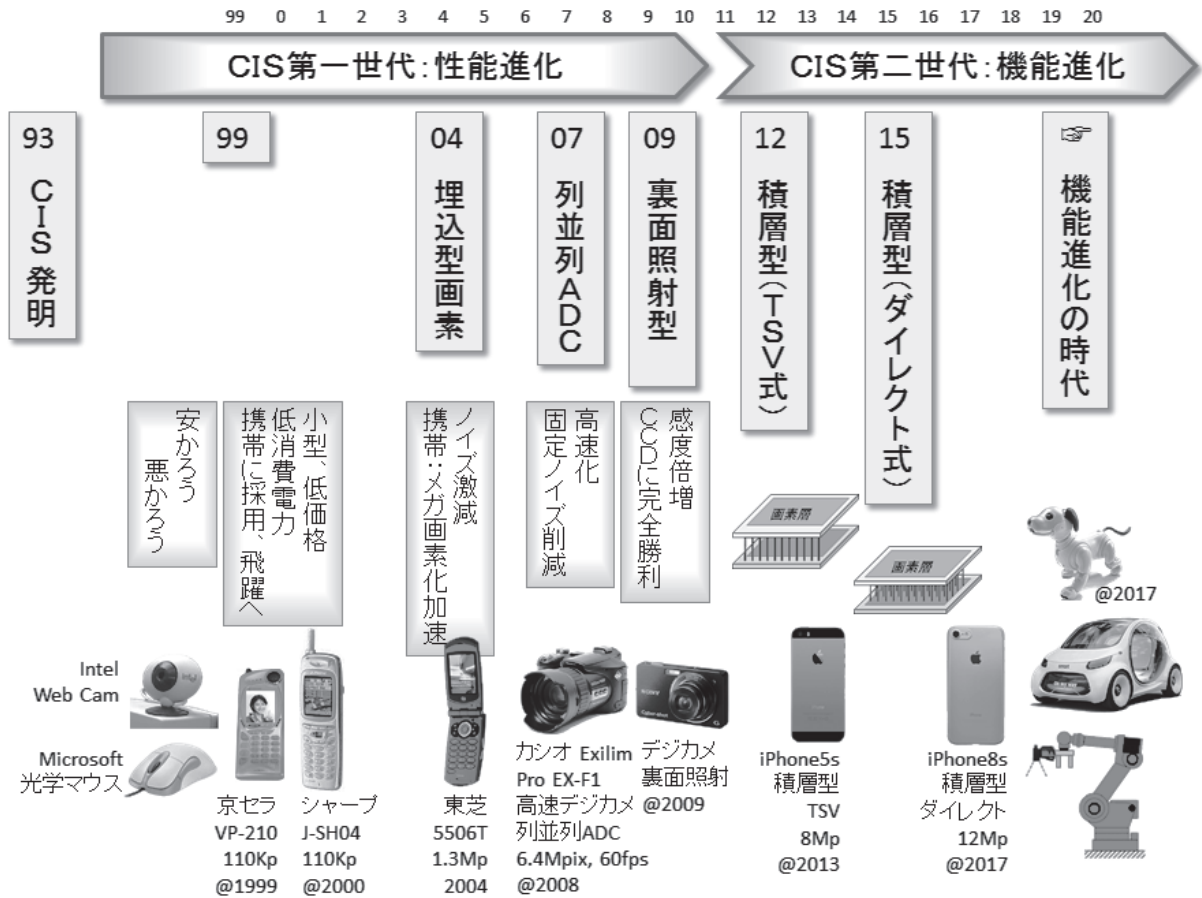


図1 CIS: CMOS Image Sensor の進化 (民生用実用化ベース)

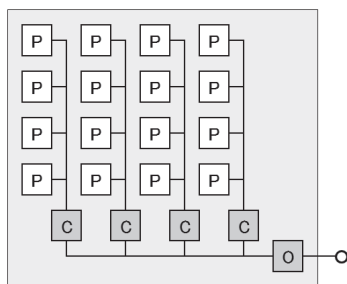


図2 CISの基本構成

P: 画素 C: 列回路 O: 出力回路

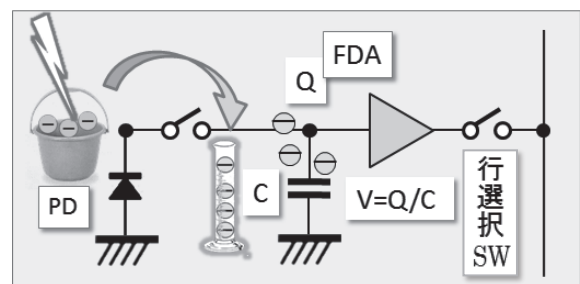


図3 画素 (P) の構成

PD (Photo Diode) : 光電変換し光電荷を蓄積する
 FDA (Floating Diffusion Amp) : 光電荷を電圧に変換する

原初の CIS は汎用の CMOS 工程を利用できる低コストのメリットで WEB カメラ等へ採用されたが、“安かろう悪かろう”の低画質で苦戦が続く。そこに救世主が登場。携帯カメラに採用されて飛躍が始まる。

1.2 進化1: 埋込型 PD = ダークノイズ削減

続いて携帯メガ画素カメラの時代に入る。そこで CIS の前に高画質の CCD が立ち上がる。阻まれた CIS は敵 CCD の技術を取り込んで対抗する。その技術が“埋込型 PD”だ。これが暗電流ノイズを劇的に減らす。

参考文献

- 1) 遠山, et al.: “デジタル2重サンプリングを用いた列並列AD変換器を搭載した高速・低ノイズCMOSイメージセンサの開発”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 30 (25), pp. 17-20(2006)
- 2) H. Togashi, et al.: “Three-layer Stacked Color Image Sensor With 2.0-um Pixel Size Using Organic Photoconductive Film”, IEDM 2019
- 3) S. Iida, et al.: “A 0.68e-rms Random-Noise 121 dB Dynamic-Range Sub-pixel architecture CMOS Image Sensor with LED Flicker Mitigation”, IEDM 2018

出典, 参考WEBサイト

QR#1 : CDS		“CCD イメージ・センサ出力の信号処理, トランジスタ技術 第4章, 2005年2月号(2005)”
QR#2 : 埋込型		埋込型 PD > 日本半導体歴史館 > 個別半導体 > 1975-85年: イメージセンサ用フォトダイオードの改良
QR#3 : 女王賞		英国女王賞 > GOV.UK > Business and industry Science and innovation
QR#4 : ADC・裏面		列並列 ADC・裏面照射 > Sony-Semicon > イメージング&センシングテクノロジー > カラム A/D 変換回路

QR#5 : ノイズ		オプティカルショットノイズ: Wikipedia > ショット雑音
QR#6 : SPAD		Canon Global > ニュースリリース > 世界初の100万画素SPADイメージセンサーを開発
R#7 : 有機		有機・複合イメージセンサー > NHK 技術研究所 > 有機膜積層型3層 @2020.06.26
QR#8 : QBC		gsmarena.com > Quad-bayer-sensors
QR#9 : HDRdol		Wodsee DOL-HDR WDR 4 IN 1 Camera New Arrival
QR#10 : HDRov		OmniVision: > EE Times Japan > センシング > LEDフリッカーの抑制とHDRを両立した車載用ISP
QR#11 : LFM		EE Times Japan > センシング > 次世代ADAS向け, 2.3MのBSI型イメージセンサー

第5回 DPS型CMOSイメージセンサー(CIS), 異能異次元への進化

はじめに

第5回ではCIS機能進化の最終章として、Digital Pixel Sensor (DPS)型CISという少々変わったセンサーを紹介したい。ちなみにここで言うDPSとは画素出力がデジタル値のCISであり、多くが異能異次元の機能をもつ。なお従来型のCIS (APS: Active Pixel Sensor) のセンサー出力はデジタルだが画素出力はアナログだ。

ここで僭越ながら申し上げる。“DPS型CISとは第3世代の固体イメージセンサーだ”と。もしかして次世代CISかもしれない。そして今その開幕の時だと。

固体イメージセンサーの世代とは勝手ながら以下の通りと考える。

- ◆第1世代: CCDの世代: 撮像管から半導体へ移行
 - ・民生用電子カメラの時代を創出
 - ・CCDセンサー出力がアナログ輝度値
- ◆第2世代: 既存のCISの世代 = 当初APSと呼ばれた
 - ・ネットに繋がるスマホカメラの時代を築く
 - ・APS型CISの画素出力はアナログ値
- ◆第3世代: 積層型CISの世代
 - ・センシング (計測・認識) 機能への飛躍
- ◆もしかして次世代: DPS普及へ
 - ・DPS型CISは画素出力がデジタル値
 - ・異能異次元のセンシング機能を実現

第4回では積層型CIS(画素層とロジック層の3D積層構造)の垂直分業でセンシング機能が飛躍すると紹介した。AIビジョンチップなどがその積層第3世代の一例だ。今回はDPS型CISをその極めつけ、ないし次世代型と考える。その異能のDPS型CISが長い雌伏期を経て積層技術で実用期へ入ったのだ。積層+画素並列

接続技術(以降、画素並列技術)が巨大化しがちな異能異次元の機能画素を小型化し、実用画素数を実現したからだ。

DPSとは飛来する1個の光電子を検知し測距するSPAD (Single Photon Avalanche Diode) センサーや恐竜の眼のように高速変化を検知するEVS (Event based Vision Sensor) がその一例だ。そのようにDPSとは“光子のもつ情報を画素が直接抽出する異能異次元センサー”だといえる。以下、そうした個性豊かなDPSを紹介する。

§1 DPSの進化

本来の“DPS”とは画素がADCを備えてデジタル値を出力するCISをいう。画素出力がアナログ値の従来型CISの略称が“APS”とは語義は異なるも、対比的で面白い。なお、ADCなしでデジタル値を出力する画素をもつ新型新提案のCISをDPSの仲間に加える考え方があるので、今回はそれに倣い定義を拡張しておきたい。

“元祖DPS”の概念提唱者はスタンフォード大学だ。APS型CIS発明の翌年1994年の提案で、以降同大がDPS開発を牽引する。

一方、CMOS技術の進展を背景に画素に機能を盛り込む新提案のDPS型CISも続出した。とはいえ当初の非積層型では画素の巨大化故に出足は鈍かったのだが…。

表1がそのDPSの一例だ。面白いのはその異次元出力の欄だ。通常のCISの出力は画像信号すなわち“輝度 = $N(x,y)$ ”だが、新提案のCISは異次元情報の“3D 奥行 = $Z(x,y)$ ”であったり“時刻 = $T(x,y)$ ”であった

著者略歴

名雲 文男 (なぐも ふみお) , Fumio Nagumo

技術コンサルタント (撮像技術一筋, 半世紀, 基礎研究から事業運営まで)
日本インダストリアルイメージング協会 (JIIA) 相談役
名雲技術士事務所所長

<学歴・職歴>

東京工業大学電子工学科卒、同修士修了
ソニー株式会社
中央研究所：社長直轄 CCD 開発プロジェクト
半導体事業本部：CCD 開発部
情報機器事業本部：業務用カメラ開発部長, システムカメラ事業部長
東京メトロポリタンテレビジョン (TOKYO MX) 株式会社 常務取締役
株式会社シーアイエス 常務取締役

<受賞歴>

- ・ IEEE CE 部門年間論文賞 “CCD Digital Color Camera”
- ・ 日本映画テレビ技術協会通産大臣賞 “放送用 CCD HDTV ビデオカメラ開発”
- ・ 映像情報メディア学会 丹羽高柳賞 著述賞 『テレビジョンカメラの設計技術』 (コロナ社, 1999年) (共著)

ほか受賞多数

<取得特許件数>

約100件

撮像新時代 CMOS デジタルイメージング イメージセンサー編

2023年6月14日初版発行

著者	名雲 文男
発行者	喜多 野乃子
発行所	アドコム・メディア株式会社
	〒169-0073 東京都新宿区百人町2-21-27
	電話 (03)3367-0571(代)

Advanced Communication Media Co. Ltd., Tokyo, Japan, 2023

ISBN978-4-910636-32-0 C3055 ¥1800E

© Fumio Nagumo 2023

本書の無断転載、複製、頒布、公衆送信、翻訳、翻案等を禁じます。