

メディアテクノロジーシリーズ 7

# コンピュータビジョン

— デバイス・アルゴリズムとその応用 —

日浦慎作

【編】

香川景一郎・小池崇文・久保尋之

延原章平・玉木 徹・皆川卓也

【共著】

コロナ社

## メディアテクノロジーシリーズ 編集委員会

---

編集委員長	近藤 邦雄 (元東京工科大学, 工学博士)
編集幹事	伊藤 貴之 (お茶の水女子大学, 博士 (工学))
編集委員 (五十音順)	五十嵐悠紀 (お茶の水女子大学, 博士 (工学))
	稲見 昌彦 (東京大学, 博士 (工学))
	牛尼 剛聡 (九州大学, 博士 (工学))
	大淵 康成 (東京工科大学, 博士 (情報理工学))
	竹島由里子 (東京工科大学, 博士 (理学))
	鳴海 拓志 (東京大学, 博士 (工学))
	馬場 哲晃 (東京都立大学, 博士 (芸術工学))
	日浦 慎作 (兵庫県立大学, 博士 (工学))
	松村誠一郎 (東京工科大学, 博士 (学際情報学))
	三谷 純 (筑波大学, 博士 (工学))
	三宅陽一郎 (株式会社スクウェア・エニックス, 博士 (工学))
	宮下 芳明 (明治大学, 博士 (知識科学))

---

(2023年5月現在)

## 編者・執筆者一覧

---

編者	日浦 慎作	
執筆者 (執筆順)	香川景一郎 (1, 2章)	小池 崇文 (3章)
	久保 尋之 (4章)	延原 章平 (5章)
	玉木 徹 (6章)	皆川 卓也 (7章)

---

## 刊行のことば

“Media Technology as an Extension of the Human Body and the Intelligence”

「メディアはメッセージである (The medium is the message)」というマクルーハン (Marshall McLuhan) の言葉は、多くの人々によって引用される大変有名な言葉である。情報科学や情報工学が発展し、メディア学が提唱されたことでメディアの重要性が認識されてきた。このような中で、マクルーハンのこの言葉は、つねに議論され、メディア学のあるべき姿を求めてきたといえる。

人間の知的コミュニケーションを助けることができるメディアは生きていくうえで欠かせない。このようなメディアは人と人との関係をより良くし、視野を広げ、新しい考え方に目を向けるきっかけを与えてくれる。

また、マクルーハンは「メディアはマッサージである (The medium is the massage)」ともいっている。マッサージは疲れた体をもみほぐし、心もリラックスさせるが、メディアは凝り固まった頭にさまざまな情報を与え、考え方を広げる可能性があるため、マッサージという言葉はメディアの特徴を表しているともいえるだろう。

さらにマクルーハンは“人間の身体を拡張するテクノロジー”としてメディアをとらえ、人間の感覚や身体的な能力を変化させ、社会との関わりについて述べている。現在、メディアは社会、生活のあらゆる場面に存在し、五感を通してさまざまな刺激を与え、多くの技術が社会生活を豊かにしている。つまり、この身体拡張に加え、人工知能技術の発展によって“知能拡張”がメディアテクノロジーの重要な役割を持つと考えられる。このために物理的な身体と情報や知識を扱う知能を融合した“人間の身体と知能を拡張するメディアテクノロジー”を提案・開発し、これらの技術を活用して社会の構造や仕組みを変革し、

## ii 刊行のことば

---

どのような人にとっても住みやすく、生活しやすい社会を目指すことが望まれている。

一方、大学におけるメディア学の教育は、東京工科大学が1999年にメディア学部を設置して以来、全国の大学でメディア関連の学部や学科が設置され文理芸分野を融合した多様な教育内容が提供されている。その体系化が期待されメディア学に関する教科書としてコロナ社から「メディア学大系」が発刊された。この第一巻の『改訂メディア学入門』には、メディアの基本モデルの構成として「情報の送り手、伝達対象となる情報の内容（コンテンツ）、伝達媒体となる情報の形式（コンテナ）、伝達形式としての情報の提示手段（コンペア）、情報の受け手」と書かれている。これからわかるようにメディアの基本モデルには文理芸に関連する多様な内容が含まれている。

メディア教育が本格的に開始され20年を過ぎるいま、多くの分野でメディア学のより高度で急速な展開が見られる。文理芸の融合による総合知によって人間生活や社会を理解し、より良い社会を築くことが必要である。

そこで、このメディア分野の研究に関わる大学生、大学院生、さらには社会人の学修のため「メディアテクノロジーシリーズ」を計画した。本シリーズは“人間の身体と知能を拡張するメディアテクノロジー”を基礎として、コンテンツ、コンテナ、コンペアに関する技術を扱う。そして各分野における基本的なメディア技術、最近の研究内容の位置づけや今後の展開、この分野の研究をするために必要な手法や技術を概観できるようにまとめた。本シリーズがメディア学で扱う対象や領域を発展させ、将来の社会や生活において必要なメディアテクノロジーの活用方法を見出す手助けとなることを期待する。

本シリーズの多様で広範囲なメディア学分野をカバーするために、電子情報通信学会、情報処理学会、人工知能学会、日本ソフトウェア科学会、日本バーチャルリアリティ学会、ヒューマンインタフェース学会、日本データベース学会、映像情報メディア学会、可視化情報学会、画像電子学会、日本音響学会、芸術科学会、日本図学会、日本デジタルゲーム学会、ADADA Japan などにおいて第一線で活躍している研究者の方々に編集委員をお願いし、各巻の執筆者選

定、目次構成、執筆内容など検討を重ねてきた。

本シリーズの読者が、新たなメディア分野を開拓する技術者、クリエイター、研究者となり、新たなメディア社会の構築のために活躍されることを期待するとともにメディアテクノロジーの発展によって世界の人達との交流が進み相互理解が促進され、平和な世界へ貢献できることを願っている。

2023年5月

編集委員長 近藤邦雄

編集幹事 伊藤貴之

## 表紙・カバーデザインについて

私たちは五感というメディアを介して世界を知覚し、自己の存在を認知することができます。メディア技術の進歩によって五感が拡張され続ける中、「人」はなにをもって「人」と呼べるのか、そんな根源的な問いに対する議論が絶えません。

本書の表紙・カバーデザインでは、二値化された五感が新しい機能や価値を再構築する様子をシンプルなストライプ柄によって表現しました。それぞれのストライプは5本のゆらぎを持った線によって描かれており、手描きのような印象を残しました。

しかし、この細かなゆらぎもプログラム制御によって生成されており、十分に細かく量子化された表現によって「デジタル」と「アナログ」それぞれの存在がゆらぐ様子を表しています。乱雑に描かれたストライプをよく観察してみてください。本書を手にとった皆さんであれば、きっともう一つ面白いことに気づくでしょう。

デザインを検討するにあたって、同じコンセプトに基づき、いくつかのグラフィックパターンを生成可能なウェブアプリケーションを準備しました。下記 URL にて公開していますので、あなただけのカバーを作ってみてください。読者の数だけカバーデザインが存在するのです。世界はあなたの五感を通じて存在しているのですから。

馬場哲晃

〈Cover Generator〉 ぜひお試しください

<https://tetsuakibaba.github.io/mtcg/>

(2023年5月現在)



# まえがき

メディアテクノロジーについて述べる上で、コンピュータビジョン技術の発展と最新動向は欠くことができない。特に深層学習に代表される AI 技術の高度化と普及は目覚ましく、メディアの生成から消費に至るすべての領域を変革しつつある。また一方で、デプスカメラやライトフィールドディスプレイなどに見られるように、画像入出力デバイスも多様化・高機能化が進んでおり、インタラクション、アート、エンタテインメントなどさまざまなメディア体験のデザインに影響を与えている。

そこでこの書籍では、画像メディア機器とコンピュータビジョンの分野から、メディアテクノロジーにとって影響が大きいにもかかわらず、従来の教科書等では漏れがちであった領域や、体系的な記述がなされていない切り口を特に選び、各分野の第一人者により俯瞰的に解説いただくこととした。前半ではまず画像メディアデバイスのうち、画像処理・認識やメディア応用分野の教科書ではほとんど深掘りされることのなかった画像センサについて多くの紙幅を割いた。1章では CMOS イメージセンサについて、ダイナミックレンジやノイズなどの諸特性をその根源から理解できるよう平易に解説した。つぎに2章では、光子計数型カメラやイベントカメラ、LiDAR など、従来型のカメラとは目的や特性がまったく異なるセンサについて取り上げた。3章では2次元画像を入出力する従来型のカメラ・ディスプレイを超える体験を提供し得る、ライトフィールドカメラ・ディスプレイについて概観した。

コンピュータビジョンはその応用分野として、生産工程の自動化などに主眼をおいたマシンビジョンなどの研究開発も活発に行われているが、近年では家庭用ロボットや自動車の自動走行など、一般生活環境への応用の広がりが著しい。そこで本書では特に「人による鑑賞」と「人を対象とした画像認識」に関

係の深いトピックを選定した。具体的には、4章でリアルなCGや自然なバーチャル環境の生成に重要な、反射特性のモデル化と計測について述べる。続いて5章では、人とのコミュニケーションや共存のために必須となる、画像による人体の計測・認識・モデル化を取り上げた。6章ではいまやコンピュータビジョン分野の中核をなすといっても過言ではない機械学習を軸に、各技術の関係や発展の歴史・経緯、さらには近年の深層学習の急速な発展普及に至る流れについて俯瞰し、最後に7章ではそれらの研究成果を利用するためのソフトウェアフレームワークとビジネス事例を紹介した。

以上のように、本書はあまたある一般のコンピュータビジョン教科書のような網羅性は求めておらず、むしろ意図的に、相当に偏ったトピック構成となっていることをご理解いただきたい。本書が画像メディア機器およびコンピュータビジョン技術の最新動向をメディアテクノロジーの研究・開発に活かす上で、新たな手掛かりを得る助けとなれば幸いである。

2024年8月

編者 日浦慎作

---

<sup>1</sup> 本書の書籍詳細ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339013771/>) にカラー図面などの補足情報があります。

<sup>2</sup> 本書で使用している会社名、製品名は一般に各社の登録商標です。本書では®やTMは省略しています。

<sup>3</sup> 本書で紹介しているURLで参照日のないものは2024年5月現在のものです。



# 目 次

## 第 1 章

### CMOS イメージセンサの 機能と特性

<b>1.1 CMOS イメージセンサの正体</b> .....	1
1.1.1 CMOS イメージセンサの画素の基本機能	3
1.1.2 CMOS イメージセンサの画素特性の定式化	6
1.1.3 画素に関する重要な事項	10
1.1.4 重要なイメージセンサの仕様・特性値	17
<b>1.2 アナログ・デジタル混載集積回路としての   CMOS イメージセンサ</b> .....	20
1.2.1 設 計 の 流 れ	20
1.2.2 回路設計のポイント	21
1.2.3 CMOS イメージセンサの製造	23
1.2.4 集積回路における回路素子	25
1.2.5 素子の特性ばらつきの抑制	27
1.2.6 回路素子が生じるランダムノイズ	28
<b>1.3 CMOS イメージセンサの特異性とアーキテクチャの選択</b> .....	32
1.3.1 CMOS イメージセンサ設計の特異性と制約	32
1.3.2 回路の稼働率と共有・時分割多重による稼働率の向上	37
1.3.3 バス構造を用いた回路の共有化と時分割多重	38
1.3.4 並列度によるイメージセンサアーキテクチャの分類	39

<b>1.4 要素回路</b> .....	42
1.4.1 受光回路	42
1.4.2 ユニット選択回路	45
1.4.3 プライオリティエンコーダ	46
1.4.4 クロックツリー	47
1.4.5 スイッチトキャパシタ回路	48
1.4.6 A/D 変換器	49
<b>1.5 まとめ</b> .....	51

## 第 2 章

### 特化した機能・性能を持つ イメージセンサ

<b>2.1 光子計数</b> .....	53
2.1.1 SPAD	53
2.1.2 高変換ゲイン FD アンプ	54
<b>2.2 高ダイナミックレンジ (HDR)</b> .....	55
2.2.1 マルチ露光時間方式	56
2.2.2 マルチ変換ゲイン方式	57
2.2.3 マルチフォトダイオード方式	57
2.2.4 オーバフロー方式	57
2.2.5 飽和時間検出方式	57
<b>2.3 可変解像度 (電荷領域)</b> .....	58
<b>2.4 イベント駆動型 CMOS イメージセンサ</b> .....	60
<b>2.5 オンチップ信号処理機能を持つ低電圧・低消費電力 イメージセンサ</b> .....	62
<b>2.6 LiDAR イメージセンサ</b> .....	62
2.6.1 直接法 ToF	63

2.6.2 間 接 法 ToF	64
2.6.3 マルチパス干渉	65
2.7 符号化露光/読出し .....	66
2.8 光強度以外の検出：波面、波長、偏光 .....	67
2.9 ま と め .....	67

## 第 3 章

### ライトフィールド カメラ・ディスプレイ

3.1 ライトフィールドカメラ .....	68
3.1.1 ライトフィールドカメラの分類	69
3.1.2 ライトフィールドカメラの発展	70
3.1.3 ライトフィールドカメラの実用化	71
3.2 ライトフィールドディスプレイ .....	73
3.2.1 ライトフィールドディスプレイの分類	74
3.2.2 ライトフィールドディスプレイの周波数特性	74
3.2.3 ライトフィールドディスプレイの実装面における技術	75
3.2.4 ライトフィールドの HMD への応用	75
3.2.5 ライトフィールドディスプレイの応用技術	76
3.2.6 ライトフィールドディスプレイの実用化	77
3.3 ま と め .....	78

## 第 4 章

### 反射・光伝搬のモデル化と計測

4.1 反射現象のモデル化と計測 .....	79
4.1.1 放射輝度の計測	80

4.1.2 反射モデル	84
<b>4.2 光伝搬のモデル化と計測</b>	<b>86</b>
4.2.1 プレノプティック関数とライトフィールド	87
4.2.2 光伝搬行列とライトトランスポート	88
4.2.3 反射現象とライトトランスポートの関係	91
4.2.4 曲率に依存した反射関数	96
<b>4.3 ま と め</b>	<b>99</b>

## 第 5 章

### 人物の計測・認識・モデル化

<b>5.1 人物表面形状</b>	<b>100</b>
5.1.1 物理的・幾何学的制約に基づいた手法	101
5.1.2 統計的形状モデルを用いた手法	105
5.1.3 画像から直接推論する手法	107
5.1.4 人体 3 次元形状推定のためのデータセット	108
<b>5.2 骨格姿勢・運動</b>	<b>110</b>
5.2.1 モーションキャプチャ	111
5.2.2 マーカーレスモーションキャプチャ	112
5.2.3 骨格姿勢推定のためのデータセット	117
<b>5.3 視 線</b>	<b>119</b>
5.3.1 眼球を直接計測する手法	119
5.3.2 顔画像を計測する手法	120
5.3.3 体や顔の動きから推論する手法	121
<b>5.4 ま と め</b>	<b>122</b>

# 第 6 章

## 現代の CV 基盤技術

<b>6.1 画像認識と機械学習</b> .....	123
6.1.1 顔 検 出	123
6.1.2 姿 勢 推 定	125
6.1.3 局 所 特 徴 量	126
<b>6.2 深層学習とCV</b> .....	134
6.2.1 データセットとコンペティション	134
6.2.2 ニューラルネットワーク	135
6.2.3 CNN	137
<b>6.3 高次特徴量と潜在空間</b> .....	143
6.3.1 end-to-end と pretrain による転移学習	143
6.3.2 中間特徴量とアテンション	145
6.3.3 エンコーダ・デコーダと潜在空間への埋込み表現	146
6.3.4 時系列モデル	149
<b>6.4 CNN による画像処理</b> .....	153
6.4.1 教師なし学習	154
6.4.2 大規模データセットの作成	160
6.4.3 潜在空間の利用	163
6.4.4 画質の改善への応用	168
<b>6.5 ま と め</b> .....	169

## 第 7 章

## CV をとりまく環境

<b>7.1</b>	<b>オープンソースソフトウェア</b> .....	170
7.1.1	CVライブラリ	170
7.1.2	深層学習フレームワーク	173
<b>7.2</b>	<b>CV のビジネス事例</b> .....	179
7.2.1	顔 検 出	179
7.2.2	顔 認 証	179
7.2.3	一般物体認識	181
7.2.4	物体検出/追跡	183
7.2.5	姿 勢 推 定	184
7.2.6	拡張現実感	185
7.2.7	画 像 生 成	193
7.2.8	クラウドサービス	195
<b>7.3</b>	<b>ま と め</b> .....	196
	<b>引用・参考文献</b> .....	198
	<b>索 引</b> .....	235

# 第 1 章

## CMOS イメージセンサの 機能と特性

本章では、コンピュータビジョン研究者の CMOS イメージセンサに対する疑問や不満の根源を解明するために、集積回路であるイメージセンサの常識と非常識を解説する。集積回路は製造費用と歩留まりの制約から、限られた面積の中に回路を詰め込む。したがって、CMOS イメージセンサでは回路の共有による省面積化が当然のように行われる。そのため、画素の機能とイメージセンサのアーキテクチャが一緒くたに説明されることが多い。本章では、できるだけ機能とアーキテクチャを分離して説明する。

まず、広い意味の「画素」を定義し、イメージセンサが捉える画素値をノイズを含めて定式化する。それをを用いて、ダイナミックレンジなどイメージセンサの重要な特性値を解説する。つぎに、CMOS イメージセンサがアナログ・デジタル混載集積回路として実装されることにより生じる制約を明らかにし、その制約が CMOS イメージセンサの構造（アーキテクチャ）を決めることを説明する。その後、CMOS イメージセンサでよく用いられる受光回路、選択回路、アナログ・デジタル変換回路を紹介する。

なお、アナログ集積回路技術の詳細については、文献 1)~6)、CCD/CMOS イメージセンサの詳細については、文献 7)~14)、半導体デバイスについては文献 15)などを参照されたい。

### 1.1 CMOS イメージセンサの正体

CMOS イメージセンサ（相補型金属酸化膜半導体イメージセンサ、complementary metal-oxide-semiconductor image sensor）は、実世界の画像情報をデジタル情報に変換する、コンピュータビジョンの入口とも言えるデバイスである。現在では、スマートフォンやノート PC の内蔵カメラ、アクションカム、

## 2 1. CMOS イメージセンサの機能と特性

監視カメラなどさまざまなカメラに使われている。かつてはイメージセンサと言えば CCD（電荷結合素子, charge coupled device）であった。しかし、多画素化、高フレームレート化、処理機能の内蔵、低消費電力化などの要求に応えることができず、わずかな応用を除いて CMOS イメージセンサに置き換えられた。

CMOS イメージセンサが注目され始めた頃、CCD イメージセンサよりも自由な画素読出しができて、さまざまな処理回路が内蔵できること（いわゆる SoC: system on chip）が利点とされた。しかし、市販の CMOS イメージセンサを見ると、シャッターを押した瞬間、または一定時間間隔で連続的に、画像を出力するという機能はどれも大差ない。また、画像処理から認識まで、イメージセンサの中で自由にプログラムして実行できれば便利そうに思われるが、そういう製品は多くない。応用に特化したさまざまな機能を持つ CMOS イメージセンサも研究されてきたが、容易に入手できるものはなかなかない。あっても、光感度が低くノイズが大きいなど、基本性能が弱いことが多い。

CMOS イメージセンサは、シリコン基板に 2 次元的に配置した多数の画素から構成される。画素は受光素子と電子回路により、受光素子が置かれた平面内の座標  $(x, y)$  を中心とする画素領域において、時刻  $t$  から露光時間  $T$  の間に入射する「光子数」を計測し、それをデジタル値に変換して画素値として出力する。イメージセンサ全体としては、デジタル画素値の 2 次元配列が出力される。

CMOS イメージセンサは、一般的なシリコン集積回路製造プロセスに埋込みフォトダイオードなどのイメージセンサ特有の製造技術を追加した専用プロセスで作られる。受光素子とそのごく周辺を除き、一般的なアナログ・デジタル混載（アナデジ混載, mixed signal）集積回路として実装されるため、アイデア次第でさまざまな機能を集積できる。

しかし、多くの電子回路を詰め込むと、画素面積が大きくなって空間分解能が低下する。さらに、画素面積における受光素子面積の割合が減り、光感度が低下する。また、後述するように、回路そのものが発生する 3 種類の「ランダムノイズ」と、画素ごと・素子ごとの特性ばらつきによる「固定パターンノイ

ズ」に配慮しなければならない。つまり、ソフトウェアとしての信号処理アルゴリズムをそのまま集積回路化しても、ノイズが大きく光感度の低い、実用性に問題があるイメージセンサができあがる。

また、受光素子と電子回路をシリコン基板内にびっしりと詰め込むために、アナログ・デジタル混載集積回路設計の定石から外れた設計を強いられる。さらに、試作には量産を前提としたビジネスプランが要求されたり、原理的には製造可能でも、標準から外れる構造の製造やプロセスのチューニングができないといった制限も生じ得る。

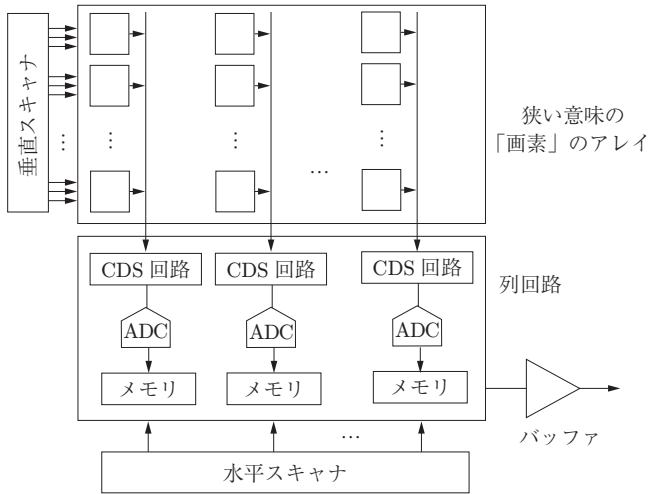
### 1.1.1 CMOS イメージセンサの画素の基本機能

本章では、まずイメージセンサの具体的なアーキテクチャや回路実装を無視して、広い意味の「画素」を考える。つまり、CMOS イメージセンサを単なる「画素の2次元配列」と考え、「個々の画素がどのような機能と信号の流れを持つか」だけに注目する。

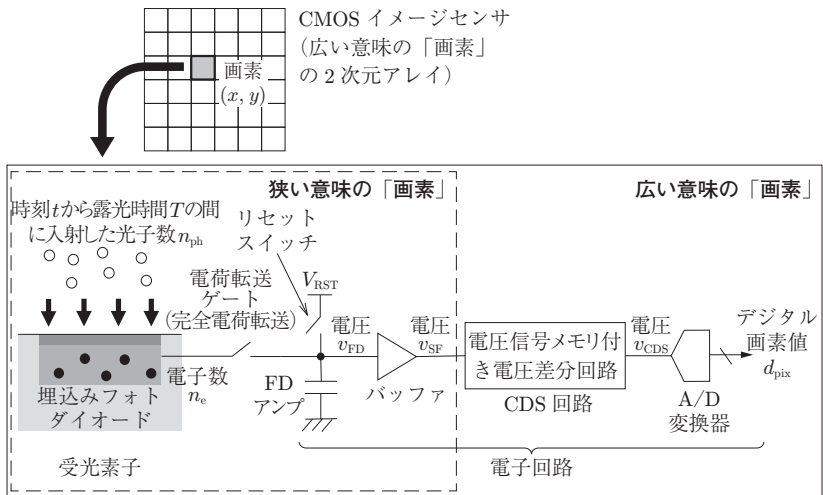
現在のCMOS イメージセンサの多くは、図 1.1 (a) に示すように、画素内にフォトダイオードとわずかな回路だけを持ち（これを狭い意味の「画素」とする）、信号処理回路を列回路として並列に備えている。そして、画素値は行と列を走査しながら読む。しかし、そのようなことはいったんすべて忘れる。本章の後半で、CMOS イメージセンサのアーキテクチャを決める要因を解説したあと、実際の姿に再び戻ってくることにする。このような手順を踏むことで、CMOS イメージセンサがなぜ現在の姿になったのか、その理由が理解できる。

図 (b) に CMOS イメージセンサの広い意味の「画素」の基本機能と信号の流れを示す。図中の電圧信号  $v_{FD}$ ,  $v_{SF}$ ,  $v_{CDS}$  は絶対値ではなく、基準電圧（普通はリセット電圧）からの変化を表す。なお、狭い意味の「画素」は破線で囲まれた部分に対応する。

まず、時刻  $t$  [s] から露光時間  $T$  [s] の間に画素領域に入射した光子数  $n_{ph}$  を考える。これを埋込みフォトダイオード (pinned photodiode, **PPD**) により電子数  $n_e$  に変換し、埋込みフォトダイオード内に蓄積する。このため、露光



(a) 通常描かれる CMOS イメージセンサの構造



(b) 本章で定義する CMOS イメージセンサの広い意味の「画素」の基本機能と信号の流れ

図 1.1 CMOS イメージセンサの構成

時間 = 蓄積時間となる。なお、この電子は光電子とも呼ばれる。埋込みフォトダイオードは、光電変換と信号蓄積の二つの機能を併せ持つことが重要である。

ただし、画素領域に入射したすべての光子が、信号として有効な電子になるわけではないので

$$n_e = \eta \cdot n_{ph} \quad (\eta \leq 1) \quad (1.1)$$

の関係がある。 $\eta$  は量子効率 (quantum efficiency, **QE**) と呼ばれ、画素構造によって決まる。また、光の波長と撮像レンズの F 値によって変化する。

露光時間  $T$  [s] が終わると、信号読出しの準備として、浮遊拡散層 (floating diffusion, **FD**) アンプと呼ばれる容量  $C_{FD}$  [C] を用いたアンプをクリアする。すなわち、リセットスイッチをオンにして、FD アンプの電圧をリセット電圧  $V_{RST}$  に設定する。その後、電荷転送ゲートをオンにして、埋込みフォトダイオードに蓄積した電子  $n_e$  個のすべてを FD アンプに転送する。この操作は完全電荷転送と呼ばれ、普通の pn 接合フォトダイオードでは実現できない<sup>16)</sup>†。

FD アンプは

$$v_{FD} = -n_e \cdot \frac{q}{C_{FD}} \quad (1.2)$$

の容量の式に従って、電子数  $n_e$  をアナログ電圧信号  $v_{FD}$  [V] に変換する。ここで、 $q$  [C] は素電荷 ( $\simeq 1.6 \times 10^{-19}$ C) を表す。負号は電子が負の電荷を持つためである。FD アンプの 1 電子当たりの電圧への変換ゲインは、単に変換ゲイン [V/e<sup>-</sup>] と呼ばれる。「e<sup>-</sup>」は電子の個数を意味する便宜上の単位である。つぎに、電圧ゲインが 1 以下のバッファを介して、この電圧を  $v_{SF}$  [V] として読み出す。

なお、 $v_{FD}$  にはリセットノイズ (リセットごとにわずかに電圧がランダムに変わる)、バッファ出力  $v_{SF}$  には出力電圧オフセットのばらつきといったノイズが重畳している。そこで、相関二重サンプリング (correlated double sampling, **CDS**) 回路により、これらのノイズを除去する。CDS 回路は、リセット後のバッファ出力電圧  $v_{SF,RST}$  を回路内に記憶し、それを電荷転送後の出力

† 肩付きの番号は巻末の引用・参考文献を示す。

# 索引

<b>【あ】</b>	
アクティブステレオ	101
圧縮ビデオ	66
アテンション	145
アテンションマップ	145
アナログ・デジタル変換器	6
アルベド係数	86

<b>【い】</b>	
一般物体認識	181
インスタンス	
セグメンテーション	161
インペインティング	157

<b>【う】</b>	
埋込み	146
埋込み表現	148
埋込みフォトダイオード	3, 11

<b>【え】</b>	
エンコーダ	147

<b>【お】</b>	
オートエンコーダ	148
オーバフロー	14
オプティカルフロー	157
オープンソースソフトウェア	170
オリエンテーション	130
オン抵抗	31

<b>【か】</b>	
回路オフセット	9
回路シミュレータ	20
回路ランダムノイズ	8
拡散反射係数	86
拡散反射面	85
拡散モデル	194
学習	137
拡張現実感	185
仮想現実感	185
仮想試着	189
画像生成	193
画像復元	155
画素並列	37
カートゥーンシェーディング	162
カーネル法	137
画風変換	165
可変ゲインアンプ	6
カメラアレイ型	69
カラー化	156
関心領域	46
間接法 ToF	64
完全空乏化	12
完全電荷転送	5, 12

<b>【き】</b>	
機械学習	123
寄生素子	22
教師あり学習	153
教師なし学習	154
鏡面反射	86

鏡面反射係数	86
局所特徴量	130
曲率に依存する反射関数	98
金属酸化膜半導体電界効果 トランジスタ	6

<b>【く】</b>	
空間分割型	70, 74
空乏化電位	12
グラフィカルモデル	137
グラフカット	137
クロックツリー	47
クロックフィードスルー	27

<b>【け】</b>	
蛍光指紋	94
蛍光波長	94
形状領域	104
現像処理	83

<b>【こ】</b>	
光学フォーマット	34
交差エントロピー	154
光子計数	10
光沢係数	86
光電子	5
勾配消失	151
勾配爆発	151
誤差逆伝播法	137
固定ノイズ	8
固定パターンノイズ	8, 9
コードブック	132
コーナー周波数	30



パノプティック  
セグメンテーション 161  
パルス変調方式 63  
反射方向ベクトル 85  
ハンドクラフトな特微量 143

**【ひ】**  
光伝搬 88  
光伝搬行列 89  
ビニング 58  
非破壊中間読出し 13  
微分可能レンダリング 175

**【ふ】**  
フォトマスク 23  
深いニューラルネットワーク 135  
不感時間 45  
複合現実感 185, 186  
複数姿勢 108  
符号化露光 66  
物体検出 183  
歩留まり 24  
浮遊拡散層アンプ 5  
浮遊ノード 22  
プライオリティエンコーダ 46  
フリッカーノイズ 29  
プーリング 141  
プレノプティック関数 88  
ブロップ 127

**【へ】**  
平均値プーリング 142  
ヘイズ 168  
ヘッド 144  
変換ゲイン 5  
ベンチマーク 134  
変分 AE 149

**【ほ】**  
放射輝度 81  
放射強度 80  
放射照度 80  
飽和時間検出方式 58  
飽和電子数 18  
ポストレイアウト シミュレーション 22  
ボディ 144  
ボンディングパッド 35  
ボンディングワイヤ 22

**【ま】**  
窓枠問題 127  
マルチサンプリング 14  
マルチセンサ型 69  
マルチパス干渉 65  
マルチプロジェクトウェハ 24  
マルチヘッドアテンション 153

**【め】**  
メタバース 185

**【も】**  
モーションキャプチャ 110

**【よ】**  
容量結合 22

**【ら】**  
ライトトランスポート 88  
ライトフィールド 88  
ライトフィールド ディスプレイ 73  
ランダムノイズ 8  
ランダムフォレスト 126

**【り】**  
リセットノイズ 5  
領域分割 160  
量子効率 5, 17

**【れ】**  
レイアウト 20  
励起-蛍光マトリクス 94  
励起波長 94  
レイヤー型 74  
レチクル 24  
列回路 41  
レンダリング方程式 85

**【A】**  
A/D 変換器 6  
AdaBoost 124  
AE 148  
Amazon Web Service 176  
AMCW 方式 63  
APS 12  
AR 185

AWS 176

**【B】**  
bag-of-features 132  
bag-of-visual words 132  
bag-of-words 131  
BERT 153  
bi-directional LSTM 151  
BoF 132

BoVW 132  
BoW 131  
BRDF 85  
BRIEF 131  
BUFF 108

**【C】**  
CAESAR 108  
Canny エッジ検出 161



SMPL モデル	105	ToF	62, 95, 102	Visual SLAM	189
SNR ギャップ	55	ToF カメラ	102	ViT	153
SNR デイック	55	TPU	174	VPS	191
SoC	2	TSV	36	VPU	177
SPAD	44, 63	TTS 方式	58	VR	185
STAR モデル	106	TV	159	~~~~~	
SVM	137				
	<b>【T】</b>		<b>【U】</b>		<b>【数字】</b>
TensorFlow Graphics	175	UP-3D	110	1 姿勢	108
TensorFlow	173			1D CNN	152
TensorFlow Lite	175		<b>【V】</b>	1/f ノイズ	29
TensorFlow 3D	175	VAE	149	3D CNN	152
Text-to-Image	194	vid2vid	163	3T-APS	13
THUman2.0	108	Viola-Jones 顔検出器	123	4T-APS	13
Time-of-Flight 法	95, 102	visual hull	103		
		Visual Inertial SLAM	190		

日浦 慎作（ひうら しんさく）

1993年 大阪大学基礎工学部制御工学科退学（飛び級）  
1995年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了（物理系専攻）  
1997年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了（物理系専攻），博士（工学）  
1999年 大阪大学助手  
2003年 大阪大学助教  
2007年 大阪大学准教授  
2010年 広島市立大学教授  
2019年 兵庫県立大学教授，現在に至る

香川 景一郎（かがわ けいいちろう）

1996年 大阪大学工学部応用物理学科卒業  
1995年 大阪大学大学院工学研究科修士課程修了（物質・生命工学専攻）  
2001年 大阪大学大学院工学研究科博士課程修了（物質・生命工学専攻），博士（工学）  
2007年 奈良先端科学技術大学院大学助教  
2007年 大阪大学特任准教授  
2011年 静岡大学准教授  
2020年 静岡大学教授，現在に至る

久保 尋之（くぼ ひろゆき）

2006年 早稲田大学理工学部物理学科卒業  
2008年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（物理学及応用物理学専攻）  
2011年 早稲田大学大学院先進理工学研究科博士後期課程修了（物理学及応用物理学専攻）  
2011年 早稲田大学助手  
2012年 博士（工学）（早稲田大学）  
2012年 キヤノン株式会社勤務  
2014年 奈良先端科学技術大学院大学助教  
2020年 東海大学特任講師  
2022年 千葉大学准教授，現在に至る

玉木 徹（たまき とおる）

1996年 名古屋大学工学部情報工学科卒業  
1998年 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了（情報工学専攻）  
2001年 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了（情報工学専攻），博士（工学）  
2001年 新潟大学助手  
2005年 広島大学准教授  
2020年 名古屋工業大学教授，現在に至る

小池 崇文（こいけ たかふみ）

1995年 東京工業大学理学部物理学科卒業  
1997年 東京大学大学院工学研究科修士課程修了（計数工学専攻）  
1997年 株式会社日立製作所勤務  
2006年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（電子情報学専攻），博士（情報理工学）  
2013年 法政大学教授，現在に至る

延原 章平（のぶはら しょうへい）

2000年 京都大学工学部電気電子工学科卒業  
2002年 京都大学大学院情報学研究所修士課程修了（知能情報学専攻）  
2005年 京都大学大学院情報学研究所博士後期課程修了（知能情報学専攻），博士（情報学）  
2005年 京都大学特任助教  
2007年 京都大学グローバル COE 助教  
2010年 京都大学講師  
2019年 京都大学准教授  
2023年 京都工芸繊維大学教授，現在に至る

皆川 卓也（みながわ たくや）

1997年 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業  
1999年 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）  
1999年 日本ビューレット・バックカード株式会社（同年、アジレントテクノロジー株式会社へ分社）勤務  
2003年 Kizna Corporation 勤務  
2004年 日本空間情報技術株式会社勤務  
2005年 ニブンビジョン株式会社勤務  
2006年 ジェイマジック株式会社勤務  
2009年 ビジョン& IT ラボ設立（2018年法人化），現在に至る  
2014年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了（開放科学専攻），博士（工学）

# コンピュータビジョン —デバイス・アルゴリズムとその応用—

Computer Vision —Devices, Algorithms and Applications—

© Hiura, Kagawa, Koike, Kubo, Nobuhara, Tamaki, Minagawa 2024

2024年10月25日 初版第1刷発行



検印省略

編者 日浦慎作  
著者 香川景一郎  
小池崇文  
久保尋之  
延原章平  
玉木徹也  
皆川卓也  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社  
製本所 株式会社 グリーン

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 · 電話 (03) 3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01377-1 C3355 Printed in Japan

(松岡)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。