

撮像新時代 CMOSデジタルイメージング 撮像システム編

名雲 文男 監修・著

岸 順司 遠塚 弘 福井 博 山口 裕 著

試し読み



Advanced Communication Media
アドコム・メディア株式会社

まえがき

《CMOS デジタルイメージング》とは CMOS イメージセンシングとデジタル処理とが融合して作り出す革命的な撮像技術をいい、本書はその撮像システム部分の解説書である。

当シリーズ前編の《イメージセンサー編》ではシリコン製イメージセンサーの進化を紹介した。そのゴールが CMOS イメージセンシングとデジタル処理との結合であるが、3D 積層技術がその革命の引き金となり、新次元の高性能と新機能とを出現させたこと、そして一例としてスマホカメラと一眼カメラの画質対決や、異能異次元のデジタル画素イメージセンサー（DPS）について紹介した。

続く本編《撮像システム編》ではカメラの要素技術を紹介する。対象を《人間が観るための＝イメージング技術》のスマホカメラではなく、要素技術全てを包含する《機械の眼＝センシング》のマシンビジョンにして解説する。

撮像システム編の各要素技術の解説はその道の専門家が担う。そこではカメラの基本技術の解説を基本としつつ、マシンビジョンならではのオモシロネタを織り込み紹介する。個性的執筆者揃い故、一部重複する記述もあるが、それぞれ個性的な解説として味わって頂きたい。

本書最初はマシンビジョンの概要と、続く各回の異能技術＝オモシロネタのアラカルトの紹介である。なお、DPS 群の記事はイメージセンサー編と重複するが、重要故に本編でも紹介する。

続く各回は撮像要素技術の実用技術とオモシロネタの紹介で、以下その一部を紹介する。

マシンビジョン照明の第2回はスマホカメラ技術では皆無のオモシロネタ満載だ。照明とカメラの相対位置を変えることで、出力画像の白黒コントラストを反転させて必要な特徴情報をあぶり出す技術（明視野照明、暗視野照明）や、照明の位置を変えての複数撮像画像の合成で、表面の立体情報を浮かび上がらせる照度差ステレオ法はその一例だ。

光学系の第3～4回は実用的情報満載で、イメージセンサーのサイズ計算式、像倍率、像の明るさ等を紹介する。一般的なガウスの結像公式よりもニュートンの結像公式の方がマシンビジョンには相性がいいため使い勝手が良く、魔法のテレセントリック光学系もマシンビジョンに好適だ。

マシンビジョンの目的は計数、計測、異物欠陥検出、認識そして判定などで、前処理はそれらへの準備として、ノイズ削減や二値化、輪郭抽出などの整形処理を行う。また、階調補正も重要だ。簡単にできるコントラスト補正法も紹介するのでお手元の写真で試して頂きたい。オモシロネタのもう一つが拡大縮小処理でする特殊なノイズ削減技術《モフォロジー》だ。

《CMOS デジタルイメージング》はスマホカメラやマシンビジョンを超えて発展する。エンベデッドビジョン＝多くの機器に組み込まれる視覚認知機構＝へ飛躍する技術だ。本書がそれら未来への要素技術の背景をお伝えできれば幸いである。

名雲 文男

2023 年 12 月 吉日

目 次

序文	i	§4 空間変化利用の照明技術	17
目次	iii	4.1 Structure from Motion	17
		4.2 構造化照明法	17
		おわりに	18
第 1 回 マシンビジョンの概要, 異能の技術そして進化 名雲文男	1	第 3 回 マシンビジョンカメラの光学系 (1)	
はじめに	1	山口 裕	20
§1 マシンビジョンの概要とセンシング異能技術	1	はじめに	20
§2 異能の画像センシング	2	§1 マシンビジョン光学系とは?	20
2.1 センシング専用 CIS の概要	2	§2 撮像センサーのイメージサイズ	20
2.2 Single Photon Avalanche Diode (SPAD)	2	§3 レンズマウント	22
2.3 直接型 d-ToF (Time of Flight)		§4 倍率	26
出力 = $T(x, y)$	3	4.1 撮影レンズでの光学倍率	26
2.4 Event based Vision Sensor (EVS) :		4.1.1 横倍率	26
出力 = (T, X, Y)	3	4.1.2 縦倍率	26
§3 マシンビジョン照明	5	4.2 望遠鏡や双眼鏡の倍率	27
3.1 マシンビジョン照明の概要	5	4.3 ルーベの倍率	28
3.2 照明の幾何光学的アプローチ	6	4.4 ズームレンズの倍率	28
§4 画像信号の前処理	6	第 4 回 マシンビジョンカメラの光学系 (2)	
4.1 マシンビジョン, 画像の前処理	6	山口 裕	29
4.2 ヒストグラム均等化による階調補正法	7	§1 レンズの公式	29
4.3 個性的なノイズ除去法 “モフォロジー”	8	§2 繰出し量	30
§5 エンベデッドビジョンという進化	9	§3 テレセントリック光学系	30
おわりに	11	§4 カメラにおける像の明るさ	31
第 2 回 マシンビジョンの照明技術		4.1 コサイン 4 乗則	31
遠塚 弘	12	4.2 センサーの斜入射光特性とシェーディング	
はじめに	12	について	32
§1 マシンビジョン照明技術の概要	12	4.3 露光量, EV 値について	32
1.1 マシンビジョン照明の役割と技術	12	4.4 輝度不変の法則	33
1.2 照射光と観察光	12	おわりに	34
§2 反射・透過特性利用の照明技術: 明視野照明		第 5 回 マシンビジョンカメラの伝送技術	
法と暗視野照明法	13	(ハード編) 福井 博	35
§3 波動特性利用の照明技術	15	はじめに	35
3.1 単色光照明	15	§1 マシンビジョンカメラ事始め	35
3.2 可視外光照明	16	1.1 マシンビジョンの進化	35
3.3 偏光照明	16		

1.2 デジタルインターフェイスの登場	35	3.2 アプリケーションの再利用性を高める 2つのアプローチ	45
1.3 デジタルインターフェイス規格の 世界標準	36	3.2.1 IIDC2	45
§2 MV 専用インターフェイスの出現	36	3.2.2 GenICam	46
2.1 MV の進化	36	3.2.3 IIDC2, GenICam の関係性	47
2.2 CL の信号構成	36	おわりに	47
2.3 CL の信号伝送路	36		
2.4 カメラ制御信号の標準化	37	第7回 マシンビジョン画像処理 前処理編	48
§3 高速化が進む MV インターフェイス… 10 Gbps を超える伝送速度へ	37	はじめに	48
3.1 高速化技術	37	§1 前処理の概要：役割と処理ツール	48
(1) カレントモードや小振幅スイッチ	37	1.1 マシンビジョン前処理の役割とツール	48
(2) 伝送特性の補償技術	38	1.2 前処理のツールと解析ツール	50
(3) デジタル信号の技術	38	§2 振幅処理	50
3.2 伝送路技術	38	2.1 階調補正	50
(1) ツイストペア線路	38	2.2 2値化処理	51
(2) 同軸線路	38	2.2.1 固定しきい値法	51
3.3 G3 標準インターフェイス	38	2.2.2 自動しきい値法	51
3.3.1 USB3-Vision (U3V)	38	2.2.3 動的しきい値法	52
3.3.2 GigE-Vision (GEV)	39	§3 空間フィルタ処理 (1)：カーネル処理 (線形処理を中心に)	52
3.3.3 CoaXPress (CXP)	39	3.1 カーネル処理の概要	52
§4 MV 用光インターフェイス	40	3.2 線形空間フィルタ (畳み込み積分処理) の代表例	53
4.1 光伝送の現状	40	3.3 輪郭抽出→距離計測：目的別加工 (1)	54
4.2 光伝送の利点	40	§4 空間フィルタ処理 (2)：非線形処理	54
おわりに	41	4.1 アダプティブ動作のバイラテラルフィル ター	54
第6回 マシンビジョンカメラの伝送技術 (ソフト編)	42	4.2 カーネル領域内の画素値大小を比較選択 して出力するフィルタ	55
はじめに	42	4.2.1 メディアンフィルタ	55
§1 ソフトウェアから見た伝送	42	4.2.2 モフォロジー：膨張・収縮処理	55
§2 マシンビジョンカメラにおける伝送方式の 変遷	42	4.3 画像2値化→プロブ解析：目的別加工 (2)	56
2.1 アナログ伝送方式	43	おわりに	56
2.2 初期のデジタル伝送方式	43		
2.3 現在主流のデジタル伝送方式	43	第8回 マシンビジョン画像処理編	
§3 高度化するカメラ制御へのアプローチ	44	田中 肇	58
3.1 カメラ制御の概要と課題	44	はじめに	58
3.1.1 コマンド文字列による制御	44	§1 画像処理の目的の変遷	58
3.1.2 アドレスマッピング方式による制御	45	§2 画像処理の構成	59

§3 画像の抽出	59	5.3 バーコード読み取りと品質検査	66
3.1 グレースケール画像	59	5.4 QRコード読み取り	66
3.2 2値画像	59	5.4.1 QRコードの特徴	66
3.3 固定しきい値法	59	5.4.2 主な読み取りの手順	67
3.4 動的しきい値法	59	(1) 2値化処理	67
3.5 自動しきい値法	60	(2) ファインダーパターンの検出	67
3.6 微分2値化法	60	(3) タイミングパターンからサンプリング	
§4 計測	60	ポイントを算出	67
4.1 寸法測定	60	(4) QRコードの基本情報の取得	67
4.2 面積測定	61	(5) マスクパターン重畳の復元	68
4.3 個数カウント ラベリング処理	61	(6) エラー訂正符号によるエラーの訂正	68
4.4 位置測定	61	5.5 一般の印刷物の検査	68
§5 画像処理の実例	64	5.6 可変印刷物の検査	69
5.1 異物、傷、欠陥の検出	64	おわりに	71
5.2 文字認識	64		

第1回 マシンビジョンの概要，異能の技術 そして進化

本書の「撮像システム編」では，その基本技術を光学系，カメラ，照明技術，伝送技術，画像処理など要素ごとに解説する。

はじめに

イメージングとかセンシングとかいう紛らわしい用語がある。前者は“人が観るため”の撮像機能だが，後者は“機械の眼”であり，その役割は被写体からの光学情報抽出である。本書ではこのセンシングの代表格であるマシンビジョンを例にセンシングカメラの概要とそこで使われる個性的な撮像関連技術を紹介する。撮像技術の門外の方には漫画交じりの図だけでもご覧いただきたい。結構面白いと思う。なお，技術の詳細は本書で続く専門家の解説記事に委ねる。

この第1回の出だし §1 と終わりの §5 はいわゆる総論であり，その間の節は技術の各論である。うち，§1 はマシンビジョンシステムの全体論で，照明，撮像，画像処理という撮像情報の変換処理機能とその間を繋ぐ伝達機能から構成されることを紹介する。

各論の節では上記3つの情報変換機能がそれぞれえり抜きの異能のかたまりであること，そしてそれをアラカルト風つまみ食いの紹介するので，イメージング機能との違いを面白がっていただければと思う。例えば，“超”のつく性能機能のCMOSイメージセンサー(CIS)，検査対象（ワーク）の特徴情報（S）をあぶり出す特殊な照明技術，画像前処理技術の一部で“膨張・収縮”といった奇妙な名前のノイズ抑圧技術などがそれだ。

なお，撮像システム編においても，イメージセンサー編と同様に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 マシンビジョンの概要とセンシング異能技術

デジタルカメラなど“人が観る”ためのイメージング機能は照明を除いて自己完結だ。内部で高画質化処理と画像信号符号化を行い，既定の画像（映像）信号を出力する（図1(a)）。一方，機械の眼であるマシンビジョンは被写体からの光学情報の抽出を役割とし，5つの独立した機能で構成される*（図1(b)）。

この5つの機能だが，ここではこれを役割ごとに2つに分けて考える。1つは撮像情報の変換処理機能，もうひとつはその伝達機能である。

◆撮像情報変換処理機能（光学情報→電子情報→データ）

照明：ワークの光学的特徴情報（S）の抽出

特殊な手法で情報（S）をあぶり出す。

撮像：光電変換（リニアセンサー，エリアセンサー）

不可視光撮像や“超”のつく異能なCISもある。

カメラ出力は未加工のRAWデータ

画像処理：初段の前処理部が撮像信号の処理工程を担う。

機能→信号（S）の強化，ノイズ（N）の抑圧

イメージングカメラの高画質化処理に相当。

目的→後続の画像理解処理のためのお膳立て

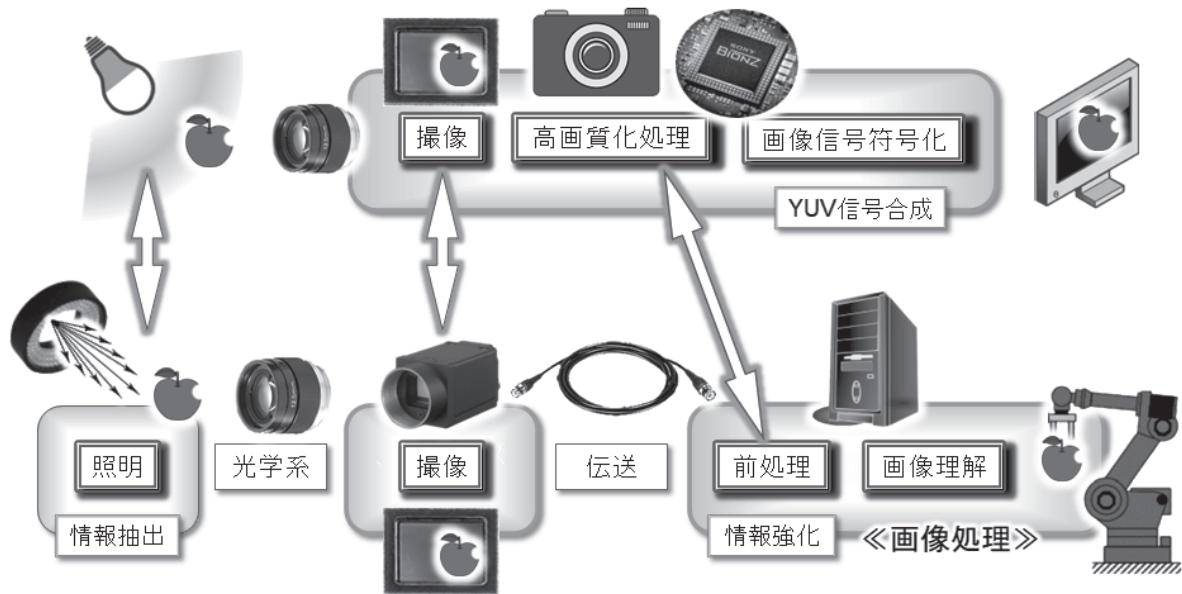
例：二値化，階調補正，輪郭抽出等

◆情報の伝達機能（忠実な情報伝達）

光学系：ワーク光学像の撮像部への伝達

* 第5節で紹介する進化系のエンベデッドビジョンなどその限りではないものもある。

(a) デジタルカメラの信号処理



(b) マシンビジョンシステムの情報操作

図1 イメージングカメラとマシンビジョンシステム

マシンビジョンシステムでは3機能が撮像情報の変換と処理を受けもつ。照明部はワークの光学的特徴情報(信号:S)をあぶり出す。カメラはそれを受けて光電変換し、そのまま出力する。画像処理部初段の前処理工程が情報(S)を強化し、ノイズ(N)を抑圧する。

伝送系：撮像信号(RAW データ)の画像処理部への伝達
高画素高速 CIS 出力の忠実な伝送のための規格
例：CoaXPress, USB Vision, GigE Vision

§2 異能の画像センシング

2.1 センシング専用 CIS の概要

マシンビジョン用 CIS には規格上の制約がないから、勝手気ままのし放題、異能の機能のオンパレードだ。それをざっと整理したのが図2で、不可視光の撮像とか“超”のつく撮像がある。後者の“超”とは超高性能ないし超次元という異能の CIS をいい、以下で概説する。

超のつく CIS のうち図2中*印の3例には共通点がある。いずれも画素自体がデジタル値を出力する点だ。本稿ではこれらを Digital Pixel Sensor (DPS) と呼ぶ。ただし、これは本来の定義の拡大解釈^{*1)}だ。

* APS と DPS という技術用語には CIS 古来の定義がある。APS (Active Pixel Sensor) とは CIS の発明当初 (1993 年) の呼称である。一方、DPS (Digital Pixel Sensor) とは画素に AD 変換器を備えてデジタル出力する CIS だ (1995 年発明)。本稿では後者 DPS の定義を拡大解釈して、画素がデジタル値を出力する CIS すべてを DPS と呼んでいる。

DPS は高性能高機能だが、内蔵する機能故に画素が巨大化する難点があり、その実用化は遅々として進まなかった。そこに2階建ての3D積層構造(画素並列接続型)と呼ばれる CIS 技術が登場、これで画素機能の一部が階下の層に移設されて小型化し、ようやく実用期に到達したという大器晩成型の CIS だ。

2.2 Single Photon Avalanche Diode (SPAD)

SPAD とは光子ひとつの入射の有無 (0/1) を出力する超高感度 Photo Diode (PD) である。超高感度を実現するのに単光子が励起した光電子を100万個にも増倍する Avalanche という雪崩現象が利用される(図3)(QR#1)。

SPAD 画素には雪崩現象を制御する Quench 回路と光子検知結果を処理するデジタル回路が付属する。そのひとつが入射した光子数をカウント (Photon Counting) して濃淡画像をデジタル値で出力する機能だ (N(x,y))

(図4(a))。これは超高感度撮像を実現する。開発例には0.002 lux という闇夜級の超低照度撮像を実現したとの報告がある (QR#2)。

第7回 マシンビジョン画像処理 前処理編

はじめに

マシンビジョンとはいうまでもなく産業用途のコンピュータビジョンである。このうち画像処理機能はカメラの撮像出力信号から必要な光学情報を抽出し、判断する。その動作は前処理と本処理とに大別されるが、この第7回ではそのうち前処理を、次の8回では本処理について解説する。

前処理部の役割は入力撮像信号を整形し、続く本処理に向けてその目的別に最適化することにある。《センシング》すなわち機械の眼の機能での撮像信号処理には階調補正など、人が観るための《イメージング》用カメラと同等の機能もあるが、多くは異色で異能の機能である。《膨張・収縮処理 = モフォロジー》というノイズ抑圧機能はその代表例だ。本稿ではこうした重要で特異な機能を中心に紹介する。また解説を基本的で重要な白黒2値画像やグレー画像の処理に絞り、カラー処理は除く。なお、本稿の体裁だが少々特異な前処理技術を門外

の方にもご理解いただけるよう図解中心の解説にする。また解説中に度々登場する《GIMP：画像処理》と《ImageJ：画像処理、分析》とはフリーながら高性能の画像処理ソフトである。お試しになるのもってこいにてご紹介しておく（QR#5, QR#6, QR#7）。

§1 前処理の概要：役割と処理ツール

1.1 マシンビジョン前処理の役割とツール

マシンビジョンシステムの構成を図1に示す。この画像処理部のうちの前処理は本処理を最適化するための準備を担うが、その役割が図2であり、用いる処理ツールが図4である。

前処理の役割：撮像信号の整形（図2）

- ①撮像信号の歪除去（キャリブレーション）
（図3）
- ②画質改善 = ノイズ抑圧 + 信号整形
- ③目的別加工

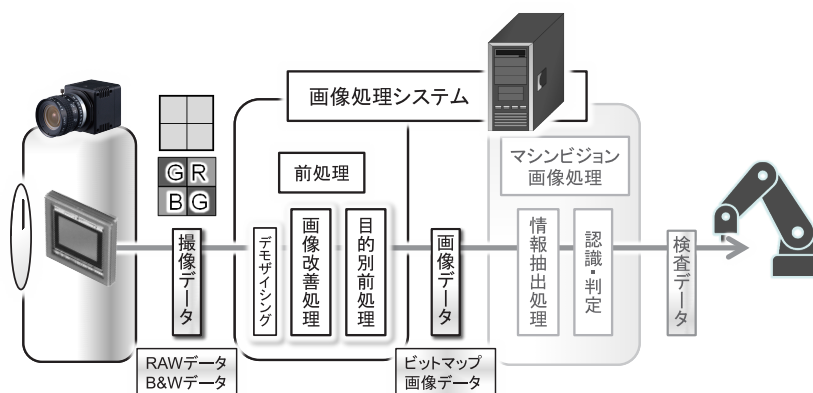


図1 マシンビジョンと画像処理システムの構成、前処理部

前処理のツール (図4)

- ①振幅処理
- ②空間 (画素間) フィルター
- ③周波数フィルター
- ④幾何学変換

キャリブレーションとはシステム設定時の準備作業

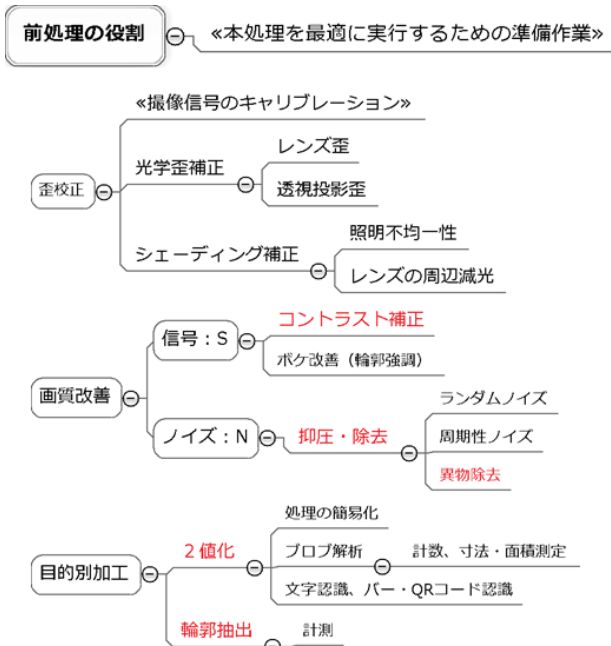


図2 マシンビジョン前処理の役割 (赤字部分は本稿での重点解説事項)

で、カメラ出力中に含まれる撮像信号歪を補正する。撮像信号の歪とは、カメラのレンズ光学歪、周辺減光 (COS4乗則)、カメラの設置角度で決まる射影歪そして照明の不均一性がある (図3)。

画質改善とはすなわち S/N 向上である。信号 (S) 整形の代表例として階調補正が重要だ。さらにノイズ (N) の抑圧では空間フィルター処理が主役だ。後者は着目画素とその周辺画素集団内の画素間の演算処理で、S/N を改善する機能である。ここではこの集団をカーネル画素領域と呼ぶ。例えば 3×3 や 5×5 などの画素アレイである。ノイズ抑圧 = 平滑化が一般的だが、異物を除去するモフォロジー (膨張・縮小) もそのひとつである。本号ではこれらを併せてカーネル処理と呼ぶことにす

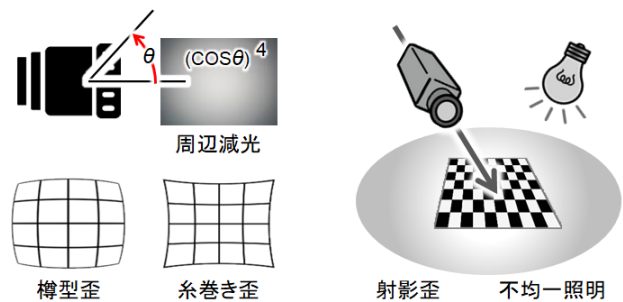


図3 キャリブレーション対象の撮像信号歪

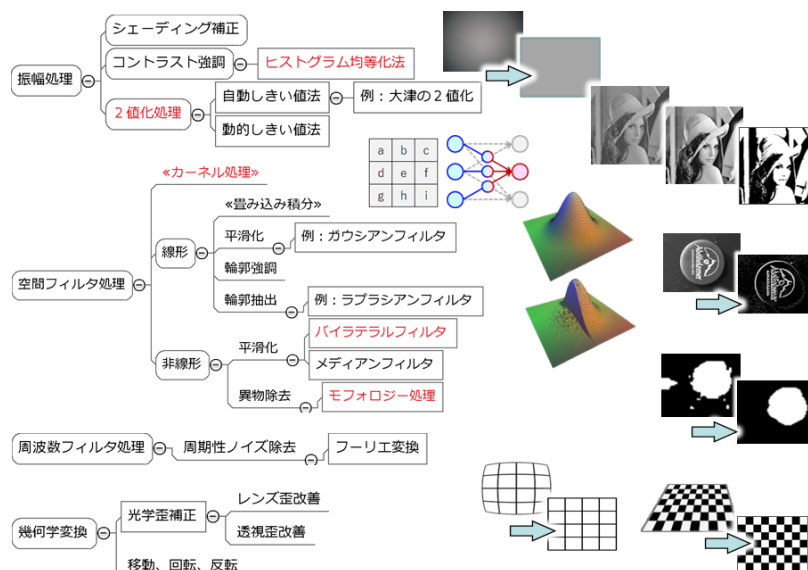


図4 前処理のツール (赤字部分は本稿での重点解説事項)

撮像新時代 CMOSデジタルイメージング 撮像システム編

2023年12月6日初版発行

監修	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

ISBN978-4-910636-36-8 C3055

© 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。