日本写真学会誌 2009 年 72 巻 5 号：360–365

講　座

デジタル写真基礎講座　3
デジタルカメラの信号処理技術（I）

Fundamentals of Digital Photography 3
Signal Processing Technology for Digital Still Camera (I)

乾　谷　正　史*

Masafumi INUIYA*

要　旨　デジタルカメラとはデジタル的に画像データをメディアに記録する電子スチルカメラであるが，単に銀塩フィルムが CCD に置換わったのみならず，銀塩カメラで培われた，レンズ等の光学技術，AE，AF 等の電子制御技術と，ビデオカメラで培われた固体撮像技術，デジタル信号処理技術，システム制御技術，等の複合技術で成り立っている．
その中で，今号では単板カラー撮像方式と信号処理技術，次号の「デジタルカメラの信号処理技術（II）」ではデジタルカメラの色再現やファイルフォーマットを中心に概説する．

Abstract　Digital still camera is the electronic still camera that records the taken image data in the storage media digitally. But besides the photographic film was replaced to CCD only, the digital still camera is made with the complex technologies of the conventional camera technology (lens, AE, AF, etc.), the CCD image capturing technology, the digital signal processing technology and system control technology.
In these technologies, I'll mainly explain about a single plate color image capturing method and the signal processing technology in this issue, and the color reproduction and the file format for a digital still camera in the next issue.

キーワード：デジタルカメラ，単板撮像技術，デジタル信号処理，JPEG 圧縮，Exif フォーマット
Key words: DSC, Image capturing technology, Digital signal processing, JPEG, Exif

1.　はじめに

1988 年に富士写真フイルムが世界に先駆けてデジタルカメラ DS-1P をフォトキナで発表[1]して以来，2002 年には，デジタルカメラの総出荷台数が銀塩コンパクトカメラを追い越し 2008 年には 1 億台を突破，カメラと言えばデジタルカメラの時代となった．

デジタルカメラとはデジタル的に画像データをメディアに記録する電子スチルカメラであるが，単に銀塩フィルムが CCD に置換わったのでなく，銀塩カメラで培われた，レンズ等の光学技術，AE・AF 等の電子制御技術，画像設計評価技術と，ビデオカメラで培われた固体撮像技術，デジタル信号処理技術，システム制御技術，等の複合技術で成り立っている．

デジタルカメラの基本コンセプトは,「シャッターを押すだけで綺麗な写真が撮れ，規格に準拠した画像ファイルが得られる」である．

得られた画像ファイルが規格に準拠しているが故に，異なるカメラで撮影された画像ファイルを統一的にハンドリングでき，各種方式のプリンタでプリントアウト出来る．

規格に準拠したと言うコンセプトは非常に重要で, 例えば, デジタルカメラに搭載される撮像素子の画素数が年々増加し画質が向上しても画像ファイルの互換性は維持され買い替え需要を喚起できる. 結果として技術が進歩し市場が拡大する．

このコンセプトを達成する為に，デジタルカメラは,

(1) 被写体像を撮像素子の光電変換面に結像する為の光学系
(2) 固体撮像素子（CCD や CMOS センサ）を用いて光学系で結像された画像を画像信号に変換する撮像系
(3) 固体撮像素子の出力信号を加工し高画質かつ規格に準拠した画像ファイルを生成する為のデジタル信号処理回路
(4) 信号処理された画像ファイルを記録メディアへ書き込む回路および記録メディア
(5) その他として，ファインダー機能，カメラ制御・電源，シャッターボタン，ストロボ等

を基本的に備えている．

平成 21 年 9 月 25 日受付・受理　Received and accepted 25th, September 2009
*富士フイルム株式会社　先端コア技術研究所　〒 258-8577　神奈川県足柄上郡開成町牛島 577
FUJIFILM Corporation, Frontier Core-Technology Laboratories, 577 Ushijima, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa 258-8577, Japan

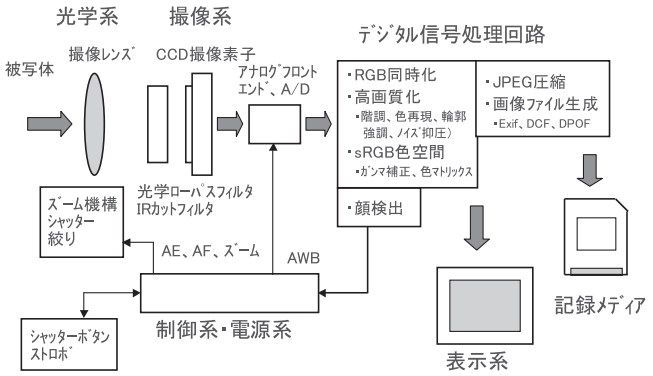

Fig. 1　デジタルカメラの基本構成

本講座では主として（3）のデジタル信号処理回路を取り上げる．

デジタルカメラの信号処理回路は今日ほとんどが信号処理LSIとしてIC化されている．

ここではその中身，デジタルカメラの信号処理技術に関して機能と原理を概説する．

2.　デジタルカメラの基本構成

Fig. 1にデジタルカメラの基本構成を図示する．

基本的には，

（1）光学系：撮像レンズ，絞り，シャッター，AF 機構，光学ローパスフィルタ，IR カットフィルタ，等
（2）撮像系：CCD 撮像素子，アナログフロントエンド（CDS，GCA，A/D 変換器）
（3）デジタル信号処理回路：RGB 信号同時化（補間処理），高画質化（階調補正，色再現補正，輪郭強調，ノイズ抑圧），sRGB 色空間への変換（γ補正，色マトリックス），顔検出アルゴリズム，JPEG 圧縮，画像ファイル生成（Exif，DCF，DPOF に準拠）
（4）記録メディア系：記録メディア（SM，xD，CF，MS，SD），書き込み回路
（5）表示系：LCD，表示回路
（6）制御系・電気系：システムコントローラ，電源系（電池，DC-DC 電源），AE，AF，AWB の制御
（7）その他：シャッターボタン，ストロボ，等

で構成される．

デジタルカメラでの一連の撮像動作は，①電源 ON →②LCD に動画像表示→③シャッターボタンを押して撮影→④記録メディアに画像ファイルを記録→②に戻る→②～④を繰り返し→⑤電源 OFF で撮影終了であるが，その間，撮像素子の駆動は①～②で「モニターモード」，③～④で「静止画撮像モード」に切り替わる．

モニターモードでは，CCD 撮像素子は「高速動画読出し駆動」となり，30 フレーム / 秒の速度で 30 万画素レベルの動画信号が出力される．この信号は，デジタル信号処理回路で信号処理され LCD 上に動画像として表示されると共に，AE（自動露光），AF（自動焦点），AWB（オートホワイトバランス）に使われる．

LCD に表示された動画で撮像する画像の構図を決定した後，シャッターボタンを押すと，デジタルカメラの撮像モードは静止画撮像モードに切り替わり，AE，AF，AWB を再度設定した後，CCD 撮像素子は「高解像度静止画読出し駆動」になり，メカニカルシャッター併用で静止画を撮像する．

CCD 撮像素子で撮像された静止画信号は，アナログフロントエンドの CDS（相関二重サンプル）で CCD の KTC ノイズ除去，ゲインコントロールアンプ（GCA）でホワイトバランスの補正及び感度設定が行われ，A/D 変換された後，デジタル信号処理回路で RGB 信号同時化処理，階調補正，マトリックス回路による色再現補正，輪郭強調，ノイズ抑圧，等の高画質化処理，および JPEG 圧縮が行なわれる．

更に規格（sRGB，Exif，DCF，DPOF）に準拠した画像ファイルを生成した後，記録メディアに書き込まれる．

3.　デジタルカメラの信号処理

Fig. 1 における信号処理回路を信号の流れに沿って図示すると Fig. 2 となる．

以下，信号処理回路の主構成要件である，RGB 信号同時化処理，高画質化処理，JPEG 圧縮の原理と，sRGB 色空間，Exif，DCF，DPOF 等の関連規格に関して順次説明する．

また，顔検出アルゴリズムを用いた AE/AF にも言及する．

3.1　単板カラー撮像方式と信号処理

ほとんど全てのデジタルカメラで撮像方式には単板カラー撮像方式を採用している．

単板カラー撮像方式とは，モザイクカラーフィルタを備えた 1 個の撮像素子「単板撮像素子」を用い，信号処理によって RGB カラー画像を得る撮像方式である．

単板カラー撮像方式は元々，ビデオカメラで技術進歩し，初期のデジタルカメラではビデオカメラ用に開発された CCD 単板撮像素子と信号処理 LSI がそのまま流用されていたが，現在ではデジタルカメラ専用の撮像素子と信号処理 LSI（DSP，信号処理エンジン，画像エンジン等，称する）が開発され，ビデオ画質をはるかに凌ぐ高画質な静止画を得ている．

Fig. 3 には単板カラー撮像方式において原理的に発生する偽信号発生原理とその防止策である光学ローパスフィルタの原理について示す．

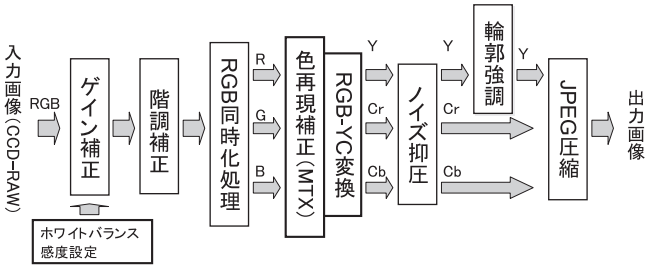

Fig. 2　単板カラー撮像方式での信号処理の流れ

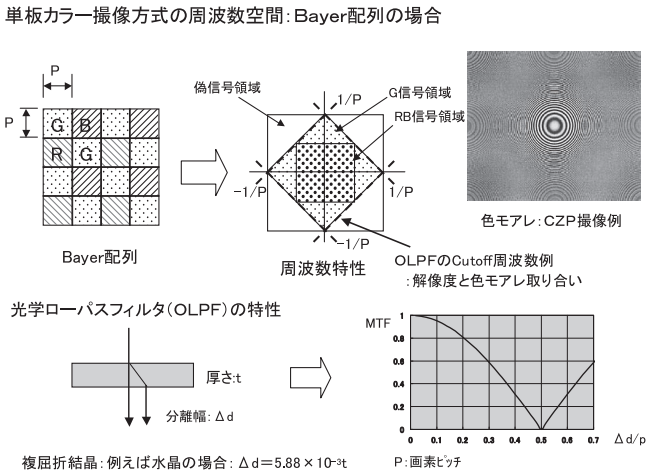

Fig. 3　単板カラー撮像方式における偽信号発生メカニズムと光学ローパスフィルタ特性

3. 1. 1　単板カラー撮像方式における偽信号発生原理と光学ローパスフィルタ

Fig. 3 により単板カラー撮像方式において原理的に発生する偽信号発生原理とその防止策である光学ローパスフィルタの原理について説明する．

単板カラー撮像方式での撮像素子は，画素が規則的かつ離散的に配列され，且つ，R 画素，G 画素，B 画素のサンプル点が同一でない為，規則模様の被写体を撮像すると RGB が異なったモアレパターン画像を発生する．これを色モアレ（偽信号）と称する．

この色モアレを抑圧する為に光学ローパスフィルタが用いられる．

また，R 画素，G 画素，B 画素は，例えば，ベイヤ配列では，G 画素は市松配列，R 画素と B 画素は線順次配列であり，撮像素子の全画素数に対して G 画素は 1/2，R 画素と B 画素については 1/4 の数しか存在しない．

この場合の R 画素 G 画素 B 画素それぞれの 2 次元周波数特性（周波数空間）と光学ローパスフィルタ特性を Fig. 3 に示す．

CCD 撮像素子等，画素が離散的に配列されている固体撮像素子において，画素ピッチを P，画素開口を A とすると，サンプリング周波数は 1/p，画素の MTF は式（1）で与えられる．

$$MTF = \frac{sin\left(\frac{\pi}{A}f\right)}{\pi f} \qquad (1)$$

サンプリング定理より明らかなごとく，$\frac{1}{A} \geq \frac{1}{2P}$ 即ち $2p \geq A$（画素開口が画素ピッチの 2 倍より小さい）なら折り返し歪（モアレ，偽信号）を生じる．

ベイヤ配列の場合，周波数空間で RB 信号領域と G 信号領域が異なり G 信号領域の方が広い．

一般に，モアレの影響を軽減する為に複屈折を利用した水晶製の光学ローパスフィルタが用いられる．

複屈折を利用した光学ローパスフィルタは画素分離幅を Δd，フィルターの周波数特性を MTF，カットオフ周波数を fc とすると，それぞれの値は式（2）で与えられる．但し t は水晶の厚みとする．

$$\Delta d = 5.88 \times 10^{-3} t \qquad MTF = \left| cos\frac{4\pi}{\Delta d} \right| \qquad fc = \frac{1}{2\Delta d} \qquad (2)$$

例えば，水晶の厚みが 1 mm であるとカットオフ周波数は 85 本 /mm である．

但し，1 枚の水晶板では一次元方向のノッチフィルタにしかならない為，多くの場合複数枚の水晶を組み合わせて 2 次元光学ローパスフィルタ特性を得ている．

また，G 画素と RB 画素で信号領域が異なる為，G 画素はモアレを完全にカットするが RB 画素は若干モアレを残し，解像度と偽信号のバランスの中で絵作りするよう光学ローパスフィルタ特性が設計されている．

3. 1. 2　信号処理に利用される視覚特性

単板カラー撮像方式では，光学ローパスフィルタを用いて色モアレ（偽信号）を抑圧する一方，信号処理により少ない画素数から如何に高解像度のカラー画像を得るかが課題となる．この課題が次に述べる RGB 同時化処理である．

単板カラー撮像方式における RGB 同時化処理や JPEG 圧縮では，視覚特性を利用して画像情報の補間や削減を行っている．

これら信号処理に利用される視覚特性を Fig. 4 にまとめた．即ち，人間の視覚特性は以下の特徴を有している．

(1) 色解像度は輝度解像度に比べて一桁以上悪い．従って急峻に変化する部分は白黒画像に置き換えても良い．
(2) エッジ部分は連続して見える．孤立点はノイズにしか見えない．
(3) 水平・垂直方向に輝度解像度が高い．

3. 1. 3　RGB 同時化処理

単板撮像素子からは，RGB 各画素信号が RGBG... と時系列で出力される．この時系列信号から RGB 各画素信号を分離（色分離）し，画素信号がない仮想画素を補間（画素補間）し，フル画素数の R 画像，G 画像，B 画像を生成する処理を「RGB 同時化処理」と称する．

RGB 同時化処理における画素補間処理は，偽信号なく如何に高解像度のカラー画像を得るかが課題であり，多くの信号処理方式が提案されている [2–6]．

その中で代表的な方式は「加算平均法」と「相関判別法」である．

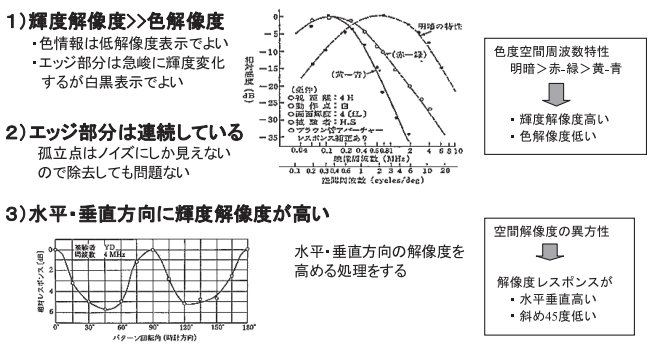

Fig. 4　信号処理に利用される視覚特性

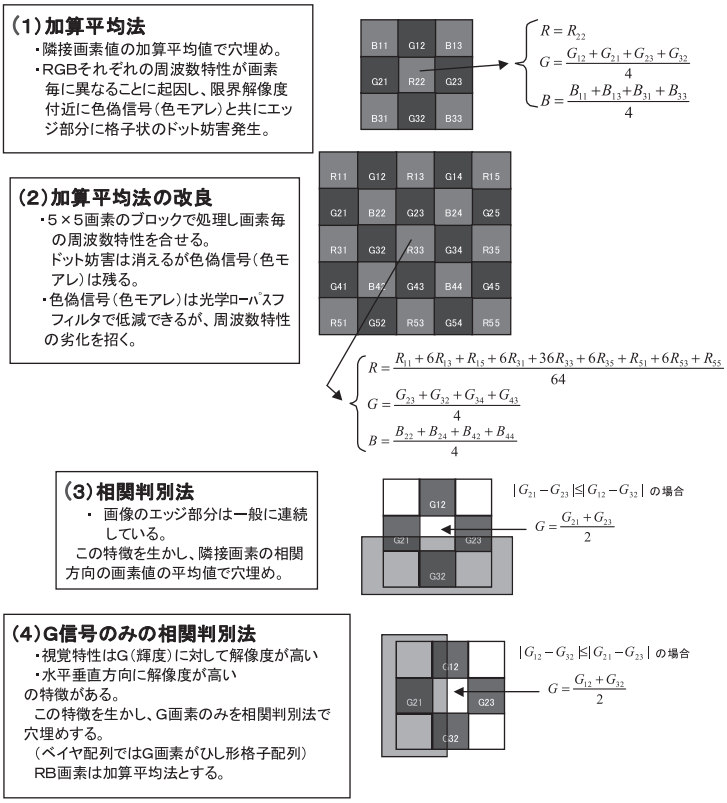

Fig. 5　RGB 同時化の為の画素補間法

加算平均法

Fig. 5（1）に加算平均法の代表例を示す．

加算平均法とは隣接画素値の加算平均値で穴埋めする方式である．演算は単純であるが，R 画像，G 画像，B 画像それぞれの空間周波数特性が画素点ごとに異なることに起因して，限界解像度付近に色偽信号（色モアレ），エッジ部分に格子状のドット妨害を発生する．

この色偽信号及びドット妨害を低減する方式として，Fig. 5（2）の如く 5×5 画素のブロックに拡大して処理し，画素毎の空間周波数特性を合わせる方式が提案されている．

この改良方式でも色偽信号は残り，光学ローパスフィルタによる抑圧が必要である．

いずれにしても，加算平均法は解像度が撮像素子の G 画素の数で決まる限界解像度以上にはならない．

相関判別法

画像のエッジ部分は一般にある方向に連続している．この性質を生かし，隣接画素の相関方向（エッジ部分の繋がり方向）の画素値の平均値で穴埋めする方法が「相関判別法」である．

Fig. 5（3）に相関判別法の代表例を示す．例えば，画像のエッジ部分が水平方向に繋がっている場合は水平方向の隣接画素の方が垂直方向の隣接画素よりも相関が大きい．この場合は水平方向の隣接画素の平均値で穴埋めを行なう．

逆に垂直方向の隣接画素の方が水平方向の隣接画素よりも相関が大きい場合は垂直方向の隣接画素の平均値で穴埋めを行なう．

この相関判別法の改良方式として視覚特性を利用した処理法もある．

Fig. 5（4）に相関判別法の改良例を示す．

前述の如く人間の視覚特性は，① G（輝度）に対して解像度が高い，②水平垂直方向に解像度が高いという特徴があり，また，ベイヤ配列は G 画素が市松配列（水平垂直方向に解像度が高い）という特徴がある．

そこで，G 信号のみを相関判別法で穴埋めし，RB 画素は加算平均法で穴埋めする方式が提案されている．

更には，隣接画素のみならずより多くの周辺画素から穴埋めする画素値を推定する高度な方式も提案されている．

相関判別法は加算平均法に比べ演算が複雑になるが，偽信号が少なく，より高解像度のカラー画像が得られる．

システム LSI の飛躍的な処理能力向上により，アナログ信号処理の時代には実現不可能であったより高度な演算が可能となり画質が飛躍的に向上した．

3. 2　高画質化処理

3. 2. 1　写真における高画質とは

1839 年ダゲレオタイプの写真術が発明されて以来，写真技術は，日本語で真実を写すとあるように，「人間が見た通りの画像を正確に，そしてより容易に写しとり，表示する」ことを求めて技術進歩してきた．

ここで「人間が見た通りの画像」とは，物理的に忠実という意味でなく，人間がそのシーンを見た時の感動や記憶，即ち，心理的に真実ということである．

一般に，被写体は，自然光や人口光によって照明されてい

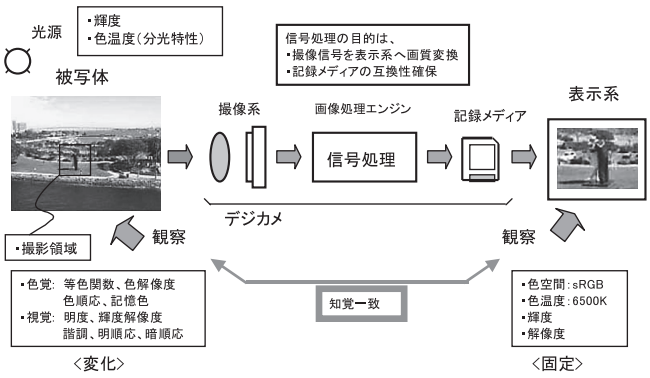

Fig. 6　被写体と表示画像の画質関係

る，あるいは自ら発光している．それら光源の輝度や色温度は多種多様である．

にもかかわらず，たとえ光源の色温度が異なっても白いワイシャツは白く見え，芝生は緑に見える．

一方，プリントや CRT に表示された画像に対しては，人間の目は直接被写体を見たときと同様の順応を起こさない．

人間がそのシーンを見た時の感動や記憶，即ち，心理的に真実な，プリント，あるいは CRT 表示を提供するには，ただ忠実に被写体の情報を記録し表示するのでなく，被写体の情報をよく解析して，心理的に真実な画像情報に変換する必要がある．

この様な被写体と表示画像の関係を Fig. 6 に示す．デジタルカメラシステムにおける信号処理の目的は，照明条件が多種多様である被写体に対して撮影者が知覚した画質と，撮影後に表示系に表示された画像に対する知覚を出来るだけ一致させることにあると言える．

3. 2. 2　オートホワイトバランス（AWB）

人間の眼は，色順応によって，晴天下で見た白色板もタングステン光照明下で見た白色板も白く見える．

しかし，撮像素子から出力される RGB 信号は，Fig. 7 の如く晴天下では B 信号が相対的に大きく，タングステン光照明下では R 信号が相対的に大きい．

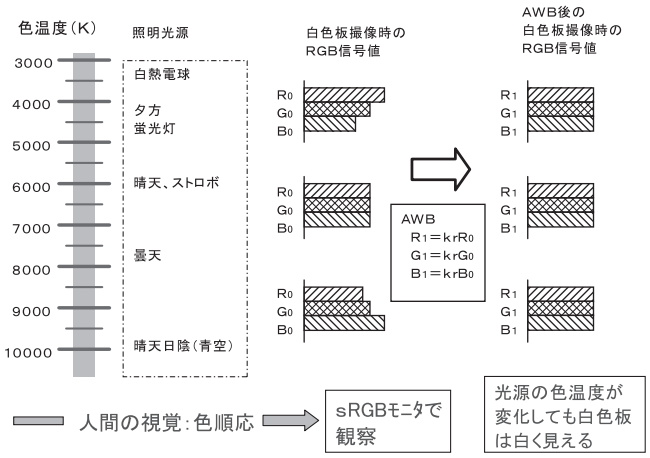

Fig. 7　オートホワイトバランス（AWB）の原理

一方，デジタルカメラの色再現システムは，後に述べるごとく D65 標準光源で照明された被写体を白色点 D65 の CRT で表示する事を基本に設計されている．

そこで，たとえ照明光の色温度が変化しても，白色板を撮像した時は，D65 標準光源で照明された時の RGB 信号と同じ信号値（R=G=B=白レベル）になるよう RGB 感度設定アンプのゲインを調整する機能が必要となる．これを自動的に行なうのがオートホワイトバランス（Automatic White Balance（AWB））である．

Fig. 7 に AWB の原理を示す．AWB は撮像素子の RGB 信号からゲイン補正係数を算出し，このゲイン補正係数で RGB 感度設定アンプのゲインを設定する．

AWB は，白色板を撮像した時に RGB 信号が同じ信号値になるよう設定する機能である．しかし，現実の被写体の中には必ずしも白色板が存在しないし，たとえ存在してもどれが白色板か特定できない．

そこで，ゲイン補正信号算出には，①タングステン，蛍光灯，晴天，等のゲイン補正係数をプリセットしておき手動で切り替える「固定値切り替え方式」，②被写体のすべての色を平均するとグレーになる確率が高いという経験則に基づき，RGB 信号各々の平均値を算出し，各平均値が等しくなるようゲイン補正係数を得る「平均方式」，③ RGB 信号各々のヒストグラムを算出し，このヒストグラムより照明光源色を推定，その推定された照明光源色に対するゲイン補正係数を用いる「ヒストグラム方式」などが一般に使われている．

3. 2. 3　輪郭強調とノイズ抑圧

昨今，CCD の画素サイズが年々微細化し，画素に到達するフォトン数が減少しているにも係わらず，カメラのシステム感度が向上している．これには撮像素子の高感度化技術進歩以上に信号処理の貢献が大きい．

一般に撮像素子からの出力信号を増幅すると，カメラのシステム感度はアップするがノイズも増幅され，画像の S/N は低下する．また，輪郭強調処理によってもノイズは強調され S/N が低下する．

従って，解像度を劣化させないでノイズを抑圧し，ノイズを強調しないで輪郭強調が出来れば，結果としてカメラのシステム感度を向上できる．

Fig. 8 にノイズ抑圧処理，Fig. 9 に輪郭強調とノイズ抑圧を両立させた非線形輪郭強調処理の代表例を示す．

撮像素子のノイズは，①撮像素子の暗電流（暗時のランダ

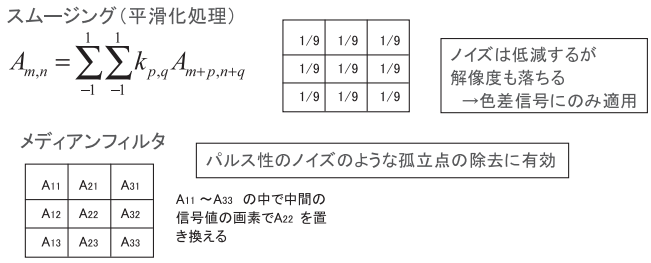

Fig. 8　ノイズ抑圧処理例

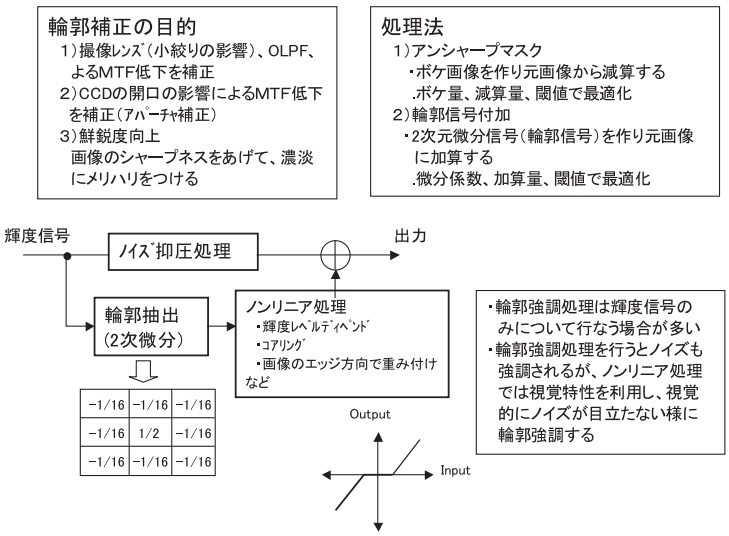

Fig. 9　輪郭強調とノイズ抑圧を両立させた非線形輪郭強調処理例

ムノイズ）や固定パターンノイズなど信号レベルに依存しないノイズ，②信号値の平方根に比例するショットノイズ，③白キズや黒キズのようなスパイク状の孤立点ノイズ，に大別される．

この中で，①と②は周波数スペクトルが低域から高域まで一様に分布しているホワイトノイズであり，Fig. 8 のスムージング（平滑化処理）の如くローパスフィルタによって抑圧出来る．ただし，ローパスフィルタを通過した信号は解像度が低下し画像がぼける．

また，③の孤立点ノイズは，Fig. 8 のメディアンフィルタで抑圧出来る．メディアンフィルタとは，注目画素と隣接画素の信号値をレベル順に並べ，その中の中間値を注目画素値と置き換える処理である．

Fig. 8 の例ではノイズ抑圧処理を行なうと画像がぼけ，輪郭強調処理を行なうとノイズが増加する．そこで視覚特性に着目してノイズ抑圧と輪郭強調を両立させる方法がある．

その具体的信号処理例が Fig. 9 に示した非線形輪郭強調処理である．

視覚的に，ノイズはハイライト部（明部）よりもシャドー部（暗部）で目立ち，輪郭はハイライト部で目立つ．その視覚特性を生かし，Fig. 9 に図示した非線形輪郭強調処理例では，シャドー部は解像度を犠牲にしてノイズを抑圧し，ハイライト部ではノイズ抑圧を犠牲にして輪郭強調する．

具体的には，ハイパスフィルタを用いてノイズを含むエッジ信号を抽出した後にコアリング（一定レベル以下をゼロとする）処理によってノイズのみを除去し，このエッジ信号を輝度信号レベルがある一定値以上の場合に限り，ローパスフィルタによってノイズ抑圧された画像信号に再度加算することで，視覚的に鮮鋭度が向上しノイズの抑圧された画像信号を得ることが出来る．

輪郭強調処理は，単に画像の鮮鋭度を上げるのみならず，撮像レンズ（小絞りによる回折の影響）や光学ローパスフィルタによる MTF 低下の補正，CCD 撮像素子の各画素の開口による MTF 低下の補正（アパーチャ補正）などを兼ねており必須の処理である．

参　考　文　献

1）乾谷正史，富士写真フイルム（株）に於けるデジタルカメラ開発，生産技術誌，**53**, 3, 33–39 (2001).
2）小沢直樹，ベイヤ配列の原色形単板カラーカメラにおける G 信号の補間，映像情報メディア学会誌，**57**, 9, 1119–1124 (1993).
3）朝　康博，白　雲峰，佐藤和弘，色情報相関を用いたディジタル電子カメラの画素補間方式，映像情報メディア学会誌，**54**, 2, 294–296 (2000).
4）村田治彦，森　幸夫，前中章弘，岡田秀史，千原國宏，PS-CCD における相関判別色分離方式，映像情報メディア学会誌，**55**, 1, 120–132 (2001).
5）佐藤　衡，松本千晶，佐藤和弘，ベイヤ配列の色フィルタを用いた単板式カメラの画素補間，映像情報メディア学会誌，**56**, 3, 463–468 (2002).
6）青木　淳，森末尚志，鈴木邦子，平成 16 年度情報処理学会関西支部大会予稿集，A-02 (2004).