デジタルカメラにおける画像処理

河村 尚登

宇都宮大学オプティクス教育研究センター

〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

E-mail: Kawamura.7010@gmail.com

あらまし デジタルカメラは風景や人物の写真を撮る他にも、モバイル系の3次元入力装置として工学・ 医学・天文分野等の様々な方面で利用されている。入力装置としての基本機能は、カラー画像を正確に読み 取り再現することで、その上でユーザの好みに合わせた画像を作る「絵作り」の機能や、綺麗な画像を撮影 する為の機能、失敗画像を防ぐための機能などが搭載され製品の付加価値を高めている。ここでは、入力装 置としての解像度, 階調性, 色特性等の基本特性/基本機能を達成する為の技術と, 絵つくりのための仕組み, 顔検出や様々な画像処理技術について解説する。

キーワード デジタルカメラ,デジカメ,入力装置

Image Processing Technology in Digital Camera

Naoto KAWAMURA

Utsunomiya University Center for Optical Research & Education

7-1-2, Yoto, Utsunomiya-city, Tochigi, 321-8585, Japan E-mail: Kawamura.7010@gmail.com

Abstract Digital Camera is used not only as an image capturing device for people and landscape, but also as an input device for 3-dimensional objects in engineering, medical and astronomical fields. Therefore, it is important to keep highly accurate capturing capability as a basic image capturing device , then to customize for user's favorite colors and textures. This means that sufficient resolution, gradation and colors should be obtained to reproduce high quality images, then achieved to introduce extended or additional functions. In this document, firstly fundamental image processing technologies in digital camera are described then, the extended technologies is introduced.

Keyword Digital camera, Input device, Image capturing device

1. はじめに

デジタルカメラは風景や人物の写真を撮る他にも, 立体物の入力装置として工学・医学・天文等,様々な 分野で利用されている。カラー画像を正確に読み取り 再現することを基本技術とし,その上でユーザの好み に合わせた画像を作る「絵作り」の機能や,綺麗な画 像を撮影する為の機能,失敗画像を防ぐための機能等 が搭載され製品の付加価値を高めている。

カラー画像を正しく再現するには入力時に画像を 正しく読み取る必要がある。このためには,解像度特 性,階調特性,色再現特性等の基本特性を満たす必要 がある。特に,三原色のセンサによる画像の読み取り は,原稿や被写体の色再現域を制限する為,測色的条 件を満たす必要がある。

2. 入力装置としての要件

2.1 色再現とルータ (Luther) 条件

カラー画像を正しく再現するには、入力時に画像を 正しく読み取る必要がある。3色のセンサによる画像 の読み取りは、原稿や被写体に忠実に色再現されるた めには測色的に以下の事項が守られなければならない。

1. 画素データが入射光量に比例していること

2. センサのホワイトバランスが取れていること

3.3センサの分光感度がルータ条件を満たすこと すなわち,入力系としてはγ=1のリニア系で,高輝 度でも飽和しない高ダイナミックレンジである必要が ある。また,ホワイトバランスは標準白色を入力した 時に正しい白が得られるように,3つのセンサのゲイ ンをコントロールする必要がある。画像入力(撮像)は, RGB センサの分光特性に依存するが,入力系のセンサ 分光感度を評価するルータ(Luther)条件は,次のよ うに言い表される。「センサによる測色の分光感度は, 錐体感度の線形変換になっていなければならない。」 通常,入力センサは,R,G,Bの三色系で用いられる。 このR,G,Bが厳密にどのような種類のものをとるのか で,特性が異なる。しかしながら,どのような色空間 を取ろうと,目標となる分光感度は錐体分光感度の線 形変換になっていなければならない。

2.2入力系の分光感度¹⁾

図1に様々な RGB 色空間を示す。通常, sRGB 色空間がデフォルトであるが,近年より広い AdobeRGB 色空間を用いることが多くなった。



(1) sRGB の分光感度

sRGB への変換式は以下の通り。

$$\begin{pmatrix} \overline{r}_{sRGB} \\ \overline{g}_{sRGB} \\ \overline{b}_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{x} \\ \overline{y} \\ \overline{z} \end{pmatrix}$$
(1)

等色関数を図2(A)に示す。また逆変換は,

$$\begin{pmatrix} x \\ \overline{y} \\ \overline{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \overline{r}_{sRGB} \\ \overline{g}_{sRGB} \\ \overline{b}_{sRGB} \end{pmatrix}$$
(2)

となる

(2) AdobeRGB 色空間の分光感度

AdobeRGB への変換式は以下の通り。

$$\begin{pmatrix} \bar{r}_{Adobe} \\ \bar{g}_{Adobe} \\ \bar{b}_{Adobe} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.0416 & -0.5650 & -0.3447 \\ -0.9692 & -1.8760 & 0.0416 \\ 0.0134 & -0.1184 & 1.0152 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix}$$
(3)

等色関数を図2(B)に示す。また逆変換は,



図2 色空間と等色関数

2.3 色補正法

実際のデジカメのカラーフィルタは負の領域は作れ ないので、補正が必要である。補正方法としては、以 下の方法が、通常行なわれる。

(1) 光学フィルタによる補正

sRGB 色空間での入力では、図3に示されるようにエ メラルドグリーン色のフィルタを用いて、赤の負領域 を検出し補償する方法が用いられることがある。



また, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ の等色関数による入力フィルタの場合は, \bar{z} の等色関数が \bar{x} の負領域を検出するので,これを用い ることもある。但し, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ フィルタは RGB 色空間へ変 換しなければならなくて,煩わしいので計測器のみ用 いられる。

(2) カラーマトリックス演算による補正

図4に示すように、出力値に3×Nのマトリックス 演算を施し、マトリックスの係数を選ぶことにより正 しい出力値に近似するように補正する方法である。マ トリックスの次元数として、3×3、3×6と、3×N のNの次元数を上げていくと精度は向上するが、演算 速度は下がる。式(5)は3×9の演算を示したもので、 二次の項までの補正を行なっている



(3) ルックアップテーブル(LUT)による補正

マトリックス演算を関数近似した場合,次数をどこ まで取るかで精度が異なる。高精度にするために高次 の関数近似を用いた場合,ハード化による高速処理が 難しくなる。一方,ルックアップテーブル(LUT)形式 にすることにより,実測データによる高次の補正が可 能となる。しかし RGB 3入力値の全空間をテーブルで 持つには大きなメモリ量となる。このため LUT のデー タ格子点は粗くとり補間処理が行われる。LUT 方式の メリットは,様々な目的に合った色調,色空間を選択 し目的にあったプロファイルを作成することができる 点にある。レンダリングインテントとしては,

Perceptual/ Colorimetric/ Saturation 等に対応した LUT が使われるが,その他 AdobeRGB や WideGamut 等の 色空間に変換機能を含ませた LUT も可能である。

2.4 入力系の測色的評価

ルータ条件では、測色の感度は等色関数の線形変換 になっていなければならないが、様々な制約から、実 際の分光感度は等色関数の線形変換から外れているこ とが多い。そこで、等色関数からのずれを定量的に評 価する指数として、Neugebauerの測色的品質係数

(quality-factor,通常 q-factor と呼ばれる)が良く 使われる。センサの分光感度が等色関数の線形変換か らどの程度近似できるのかを評価基準としている。 q ファクタが1に近いほど品質が良く, q>0.9 で良い 色再現をする。

(1) Neugebauer の測色的品質係数

等色関数は、41次元(可視域を10nm 事に41分割した場合)のベクトル空間内で、1つのベクトルとして表 される。3つの等色関数は、このベクトル空間で3つ のベクトルで表わされ、任意の色はこの3つのベクト ルにある加重をかけて合成したものであるので、この 3つの等色関数が張る部分空間に含まれる。この等色 関数が張る空間を「視覚空間」と呼ぶ。

今,41次元のベクトル空間の正規直交基底を, e₁,e₂,…,e_nとする。このうち,最初の3つの基底 e₁,e₂,e₃が,等色関数の部分空間に対応するものとす る。正規化された(つまりベクトル長が1の)センサ 感度をSとし,Sをこの直交基底で展開すると,

 $\mathbf{S} = a_1 \mathbf{e_1} + a_2 \mathbf{e_2} + a_3 \mathbf{e_3} + \dots + a_{41} \mathbf{e_{41}}$ (6) $\Xi \subset \mathfrak{C},$

 $|e_i| = 1, e_i e_j = \delta_{ij}, |S| = 1, a_i = S \cdot e_i$ (7) である。このとき, q-factor は以下の式で表わされる。

$$\mathbf{q} = \frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}{\sum_{i=1}^{41} a_i^2} = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2$$
(8)

この q-factor が 0.9 以上であれば,まずまずの色再現 が得られると言われている。実際にこの計算を行なう ためには,等色関数の張る部分空間の正規直交基底 *e*₁,*e*₂,*e*₃を求める必要がある。この求め方として,等色 関数*x*,*y*,*z*を用いて Gram-Schmidt の直交化法から,

$$\overline{\boldsymbol{e}_{1}} = \frac{\overline{\boldsymbol{x}}}{|\overline{\boldsymbol{x}}|}
\overline{\boldsymbol{e}_{2}} = \frac{\overline{\boldsymbol{y}} - (\overline{\boldsymbol{y}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}}{|\overline{\boldsymbol{y}} - (\overline{\boldsymbol{y}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}|}$$

$$(9)$$

$$\overline{\boldsymbol{e}_{3}} = \frac{\overline{\boldsymbol{z}} - (\overline{\boldsymbol{z}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}} - (\overline{\boldsymbol{z}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{2}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{2}}}{|\overline{\boldsymbol{z}} - (\overline{\boldsymbol{z}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{1}} - (\overline{\boldsymbol{z}} \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{2}}) \cdot \overline{\boldsymbol{e}_{2}}|}$$

のように求められる。つまり, \bar{x} は e_1 で, \bar{y} は e_1 と e_2 で, \bar{z} は e_1 , e_2 , e_3 で表わされ,等色関数の3つのベクトルは 基本ベクトル e_1 , e_2 , e_3 から成り立っており,それ以外の ベクトルは存在しない。



図5 等色関数の基本ベクトル展開

任意のベクトルS をこの基本ベクトルe₁,e₂,e₃で展開した式(6)は、このe₁,e₂,e₃のみで表現されておれば等色関数の線形変換であると言えるが、それ以外の e₄,e₅,e₆,……が含まれておれば、線形変換からずれてくる。従って、式(9)は展開係数のe₁,e₂,e₃に相当する部分の強度の割合を表すもので、等色関数の線形変換 の近似度を定量的に表す指数となっている。別の言葉で言うと、Neugebauerのq-factorは、センサ感度の ベクトルが視覚空間に射影したベクトルの二乗和であると言える。

Neugebauer の測色的品質係数 q ファクタは, 各チャ

ンネル単独の評価値であり,カラー全体としての評価 はできない。通常カラーセンサは R,G,B3 チャンネルの セットで用いられるので,3センサの個別の q ファク $9q_1,q_2,q_3$ から,

 $q = (q_1 + q_2 + q_3)/3$ (10) と拡張する場合もある。

2.5 サンプリングとレスポンス特性

(1) サンプリングの定理

サンプリングの定理では、「原信号に含まれる最大 空間周波数成分を f とすると、2f よりも高い空間周 波数でサンプリングしなければならない。」とされて いる。2f より低い周波数でサンプリングした場合は、 折り返し雑音(折り返し歪み、エリアシングエラーとも 言う)が発生する。その結果モアレパターン (moiré pattern)が現れ、原信号には無い雑音が生じる。サン プリング定理では、画像のサンプリングピッチXは、 画像の最大空間周波数を B(cycle/mm)とすると、

X≦1/(2B) (11) を満たす必要がある。最大空間周波数 B を正弦波の波 とし1 周期の空間距離をλ(mm)とすると,B=1/λより, 式(11)は,

X≦ λ/2 (12) となる。即ち,図7の赤矢印に示されるように最大空 間周波数の山と谷にサンプリング点が来る。

(2) レスポンス特性²⁾

センサ幅はナイキスト周波数には直接は関係がない。 それではセンサ幅はどのような影響があるであろうか。 一般に、高域カットフィルタでナイキスト周波数以 上をカットすればモアレが全然発生しないとは言えな い。図6の青矢印はサンプリング点を、位相を変えた ときの状態を示したものである。



赤のサンプリング点では大きな変化が生じるが,位相 をずらした青のサンプリング点では出力信号に変化が 生じない。このように位相によって出力値に変化が生 じモアレ現象が起きる。これを図7に沿って定量的に 見てみよう。



図7 センサからの出力

空間周波数を変化させた正弦波パターンを1次元的に センサで読み取るとする。画像データをL(x),センサ の空間位置に対する光感度分布をS(x)とする(これを アパチャ関数とも呼ぶ)と、センサからの出力 V₀は以 下の式で表される。

$$V_0 = \int L(x) \cdot S(x) dx \tag{14}$$

今, L(x)を余弦分布と考えて,

$$L(x) = \frac{1}{2} \{ 1 + \cos(\omega x + \theta) \}$$
(15)

但し、 ω は L(x)の空間角周波数、 θ は位相差とする。 センサ受光セルのピッチを x_0 (=2 π/ω_0)、センサ開口 部の幅を x_1 とすれば、セル番号 n のセンサからの出力 V_{0n} は、以下の式で表される。

$$V_{0n} = \frac{1}{2} \int_{-\frac{1}{2}x_1 + nx_0}^{\frac{1}{2}x_1 + nx_0} \{1 + \cos(\omega x + \theta)\} dx$$

$$= \frac{x_1}{2} \{1 + \cos(\frac{\omega}{\omega_0} 2\pi n + \theta) \cdot \frac{\sin(\omega x_1/2)}{\omega x_1/2} \}$$

$$\frac{1}{7 + \sqrt{2}\pi \sqrt{2}} x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots$$
(16)

式(16)の余弦項は開口によるサンプル列を,正弦項 は開口による減衰項で,アパチャレスポンスと呼ばれ, 開口分布のフーリエ変換した形状となる。

次に、レスポンス特性を求める。今、角周波数ωの正 弦波形をセンサで読み取ったときの応答特性 R(ω) は、センサ出力コントラストと入力コントラストの比 で与えられ、入力コントラストを1とすると、

$$R(\omega) = \frac{\left| V_{0n}(\omega, \theta)_{\max} - V_{0n}(\omega, \theta)_{\min} \right|_{1 ||\underline{n}|\underline{n}\underline{n}\underline{n}\underline{n}|}}{V_{0n}(\omega, \theta)_{\max} + V_{0n}(\omega, \theta)_{\min}}$$
(17)

となる。ここで、分子の項で1周期中としたのは、ミ クロ領域でのコントラストを求めるためで、位相変化 により場所によって変化するためである。

$$R(\omega,\theta) = \frac{1}{x_1} \left| V_{0n}(\omega,\theta)_{\max} - V_{0n}(\omega,\theta)_{\min} \right|_{1 |\overline{\alpha}| \overline{\beta}| \overline{\beta}| \overline{\beta}|}$$
$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\omega x_1/2)}{\omega x_1/2} \cdot \left\{ \cos(\frac{\omega}{\omega_0} 2\pi n' + \theta) - \cos(\frac{\omega}{\omega_0} 2\pi n'' + \theta) \right\}$$
(18)

ここで、n', n" は、1周期中で V_{0n} のmax,minを与えるnである。式(6.15)に、 x_0 、 x_1 を与え、 ω 、 θ をパラメータとして計算するとセンサによるサンプリング・レスポンスが求まる。これをアパチャーサンプリングレスポンス(ASR)と呼ぶ。式(18)は矩形開口の場合であるが、それ以外の場合でもアパチャレスポンスを $F(\omega)$ とすると、

$$R(\omega,\theta) = \frac{1}{2} \cdot F(\omega) \cdot \left\{ \cos(\frac{\omega}{\omega_0} 2\pi n' + \theta) - \cos(\frac{\omega}{\omega_0} 2\pi n'' + \theta) \right\}$$

で与えられる。図8は、センサのピッチ $x_0=50\mu m$ 、センサの開口幅 $x_1=40\mu m$ と $20\mu m$ の場合のセンサ・レスポンスを示す。センサ・レスポンスは、常にアパチャレスポンス以下であり、位相変化により出力値が変動する。このためモアレパターンとなる。ナイキスト周波数以下においてもモアレ領域があることに注意する必要がある。また、アパチャの幅 x_1 を小さくしていくとモアレの領域も増大することがわかる。



アパチャサイズの影響 (X0=50µm)

3. デジタルカメラの構造と機能

図9に一眼式デジタルカメラの構造を示す。デジタ ルカメラの構成は、大きく分けると

(1) イメージセンサ

(2) 光学系

(3) 画像処理エンジン

とから構成される。これらは、入力系の主要3コンポ ーネントと呼ばれ、入力装置に関する様々な技術が集 積されている。



図9 一眼レフ型デジタルカメラ

次に,これら主要コンポーネントについて説明する³⁾。

3.1 イメージセンサ(1) イメージセンサのサイズ

(19)

CCDやCMOSの固体イメージセンサのインチ系のサ イズは、イメージセンサの撮像面の実際のサイズを示 すものではない。古くはテレビカメラの撮像管が入力 装置の中心であったため、この撮像管の管径と等価な イメージセンサのサイズを表している。例えば、2/3 インチのイメージセンサは、2/3インチ撮像管に相当 するものを表し、対角 11mm のものを指す。図10に センササイズとインチ系の比較を示す。このようにす ることにより、従来の撮像管の置き換えができ、レン ズなどの光学系の共通化が図れる。



図10 センサのサイズの比較

(2) CCD と CMOS センサ

固体イメージセンサは、大別すると、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)センサと、 CCD(Charge Coupled Device)センサに分類できる。表1 にそれぞれのセンサの特徴を記す。

l		CMOS	CCD
ſ	感度	ノイズキャンセルにより感度アップ可能	高い感度
ſ	ノイズ特性	ノイズキャンセル回路でCCDと同等	ノイズ少
ĺ	同時性	スイッチングシフトによる時間差	時間差なし(同時性保証)
ſ	電源	低消費電力、単一電源(3.3V)	2電源(15V, 3.3V)必要
I	機能	ロジックSOC(System on Chip)可能	-

表1 CCD および CMOS センサの特徴

CCD センサは、感度が高くノイズが少ないという特 徴があるが、複数の電源電圧を必要とし、消費電力が 比較的高い。一方、CMOS センサはノイズの問題があ るが、消費電力が小さいこと、CMOS であるためロジ ック SOC の搭載が可能であるなどの特徴がある。以前 は、このノイズの問題から CCD センサが主流であった が、近年の技術革新によりノイズキャンセラー回路の 導入によりノイズ低減が図られた。CMOS センサは他 に様々な利点があるため今後が期待される。

(3) センサの画素配列

センサでのカラー読み出しは,センサ上にモザイク 状に配置されたカラーフィルタにより行なわれる。カ ラーフィルタの画素配列はメーカや機種により異なる。



図11 センサの画素配列

(A) は0°方向に並んだ Bayer 型,(B) は45°方向 に並んだ Honeycomb 型である。RAW データはこの水 平方向の信号を取り出したものである。両方式におい て,画素ピッチがまったく同じであれば両方式とも再 現帯域は同じであるが,人間の視覚感度が水平と垂直 方向に敏感なため,図12に示すように Honeycomb 配 列の方がその方向に帯域が広いため有利となる。



図12 両方式の再現帯域

(4) デ・モザイク処理

カラーフィルタを介して出力された生の画像デー タを RAW データと呼ぶ。これを RGB3 面の画像データに 変換する必要がある。この処理をデ・モザイク処理と 呼ぶ。このとき,空いた画素を埋めるための処理が必 要となる。この画素を埋めることは補間処理と呼ばれ る。図13(B)において,緑(G)のデータの補間は,周 囲4個の画素ブロックから中心の画素(X)の値を計算 により求める。4つの角の画素は外側のブロックから 求まる。補間方法としては,色間の相関を用いて高画 質化を図るものもある。補間処理の方法によってはエ ッジに色がついたり,画質が劣化したりする。補間方 法は画質に影響を与えるため,各メーカが独自の方法 で高画質化を競っている。このデ・モザイク処理によ り,画像データ量は R,G,B の3チャンネルの画像とな り,データ容量は RAW データの3倍に増大する。



図13 デ・モザイク処理

(5) センサ感度

センサ感度は年々向上している。このため従来は撮 影が不可能であった夜間の野生動物の観察や記録が可 能となってきた。高感度化を実現するため、センサや マイクロレンズの開口率を上げ、ノイズの低減などが 図られている。CMOS タイプのセンサで「裏面照射型」 により高感度を実現したものもある。これは CMOS セン サの配線層の遮光によって生じる光量ロスを防ぐため、 シリコン基板の裏面から光を取り込む構造になってい る。開口率が向上し、高感度化が図られる。



図14 通常のセンサと裏面照射型センサ

3.2 光学系

(1) レンズの特性

画像形成において光学系は,画質を決める重要なコン ポーネントである。光学レンズの役割は,

1. センサ面上での光学像の倍率を決める。

2. 被写界深度を決める。

図15は同じ光学系を用いてセンサのサイズが異なる 場合を示したもので,センササイズが異なると,小さ いサイズのセンサの方が,出力時の倍率が大きくなる。



図15 光学系と等価焦点距離

今,光学レンズの焦点距離をf,センサの像高をフル サイズの場合h,小サイズのセンサの場合h'とし (h'=Mh, 0 < M < 1 但しMは像高比),入射の画 角をそれぞれ θ , θ 'とした時,図に示されるように, 像高hの画角 θ は,像高h'の場合,画角が θ 'しか 取り込めない。これはフルサイズのセンサ像高hに対 応させると見かけ上の焦点距離が

f'=(1/M)f (20) となる。即ち,センササイズが M 倍になった場合,見 かけ上の焦点距離は 1 /M 倍となったように撮影され る。例えば, APS-C のサイズのセンサの場合,フルサ イズの約 2/3 になるため,見かけ上の焦点距離は式(7.1) から, 3/2 倍になる。従って 50mm のレンズでは 75mm 相当になる。

次に,結像面における点像スポットの大きさは,光 学収差のため,広がったものとなる。今,最小錯乱円 (最小点像の大きさ)の大きさをφ(直径)とすると, 像面での焦点深度d(両側)は,図16(B)より, 光学系のFナンバーをF,レンズの口径をDとすると,

F=f/D	(21)
であるので,	
焦点深度 d = 2 F φ	(22)

となり, 焦点深度は F ナンバーが大きいほど(つまり 絞りを絞っていくほど)深くなる。物体側の深度(被 写界深度)は, 縦倍率を L, レンズから物体までの距 離を a, レンズから像面までの距離を b とすると,

縦倍率 L=b²/a² (23) 従って,被写界深度 d'は,

$$d' = 2\left(\frac{a}{b}\right)^2 F\phi$$

$$= 2\left(\frac{a-f}{f}\right)^2 F\phi \cong 2\left(\frac{a}{f}\right)^2 F\phi$$
(24)

となり, F, φが一定であれば, fが大きいほど, 即ち 長焦点レンズほど被写界深度は浅くなる。被写界深度 が浅いと,背景や手前にあるものがボケて写るので, 奥行きが感じられる。



(B)焦点深度の計算

図16 光学レンズの特性

図17は焦点距離の異なるレンズで撮影したもので、 長焦点レンズでは背景がボケている。このためわずら わしい背景をボカして被写体を浮き立たせることが可 能である。





(B) 短 焦 点 レンズ

(A)長焦点レンズ図17被写界深度の違い

図17被写界深度の違いによる撮影例

レンズには様々な収差があり、光学スポット系は主に 収差によって決まる。許容される最小錯乱円は大体 $30-40 \mu m^{\circ}$ 程度である。一方、センサの画素サイズは、 $200 万画素のセンサ(1600 \times 1200 画素) として$

2/3 インチ →6.6mm/ 1200=5.5m μ *m* 1/3 インチ →3.6m m/ 1200=3 μ *m* フルサイズ→24m m/ 1200=20 μ *m* であり,圧倒的に光学スポット径の方が大きい。但し, フルサイズでベイヤー型の構造であれば隣の画素とは 40µm離れているので,唯一,解像できる。このように, センサの画素ピッチよりも光学スポット径のほうが大 きいため,むやみに高解像にしても意味が無い。200 万画素より高解像になるとこの問題は顕著になる。

(2) 光学ローパスフィルタ

センサの前面には、一般に光学ローパスフィルタが 入っている。図18に光学ローパスフィルタの構成と、 フィルタ特性を示す。



標本化定理により、センサの画素ピッチに相当するナ イキスト空間周波数以上の帯域をカットし折り返し歪 を除去するためのものである。このフィルタが挿入さ れないと、細かな繰り返しパターンのある画像を撮影 した場合、モアレ縞が生じる。これは、一般に、水晶 などの複屈折性の材料を用いて、所定量だけずらした 2 重の画像を作ることによってローパス特性を得る。

最初の水晶板 LPF1 を通った自然光は複屈折により 上下に光が分離される。このとき互いに直交した直線 偏光となる。次に λ/4 板により位相制御を受け,直線 偏光が円偏光にされ,第2の水晶版 LPF2 に入射する。 LPF2 は LPF1 と直交する方向に配置され,今度は光を 左右方向に分離する。LPF1, LPF2 の作用により,入射 光は上下,左右に分離され,2次元的にローパスをか けられた点像を形成する。変位量は水晶版の厚みtに 比例する。厚みtを調整し,光学点像が約2画素サイ ズ (Bayer 型配列の場合)になるように調整される。 高解像センサの場合センサピッチがスポット径よ りもはるかに小さくなれば、そのままで平滑化されて いるのでローパスフィルタは省略される。

(3) オートフォーカス機構

オートフォーカスを行なう方式は様々な方式がある。図19は,一眼デジタルカメラにおけるオートフ オーカス機構の代表的な構成図を示す。



図19 オートフォーカス機構

まず,補助ミラーを介して光学像を焦点検出ユニットに導く。焦点検出ユニットでは空間分割された一対 のラインセンサ上に光学像を二次結像させる。一方の 画像信号値を,画素位置を相対的にずらしながら,他 方の画像信号との差分の絶対値の合計を求め,その合 計が最も小さくなる位置をピント位置とする(即ち,相 関を求める)。焦点が合っていない場合は位相差が生じ る。この位相差を計測することにより,ずれた方向と 量を求め,焦点を合わせることができる。

(4) 手振れ補正(防振)光学系

望遠レンズ等の長焦点距離のレンズで撮影した場 合や,乗り物の上で撮影した場合,手振れが生じ,撮 影画像が流れることが多い。手振れ補正は大きく分け て光学方式と本体方式とがある。光学方式は,図20 に示されるように,ジャイロセンサ(角速度センサ) で,2軸分の角速度を測定し,検出した手振れ量に応 じて撮影中に,光学レンズの内部の一つを光軸と垂直 面の方向にシフトさせ補正を行なう。センサや機構部 品などが必要となり部品コストがかさむ事と,鏡筒内 にレンズを動かす機構部品を備えるので鏡筒が大きく なるのが課題である。一方,本体方式はジャイロセン サでカメラのぶれの量と方向を感知し,高速演算した 補正値に基づき撮像素子をシフトする。レンズに応じ てシフト量を計算されるが,望遠レンズで長焦点距離 となるとシフト量が大きくなり,機構の負担が大きく なるという課題がある。表2に両者の比較を示す。



図20 光学式手振れ補正方式

	レンズ方式	本体方式
長所/短所	・長焦点レンズほど効果大 ・レンズ毎に最適設計可 ・レンズコストUp。レンズが大型化 (小型化が進行→コンパクト機)	 レンズに搭載不要 本体価格Up 長焦点レンズではシフト量大で負担大 本体にレンズ情報伝達必要 センサごみ取り機構との連携も可能

表 2 手ぶれ補正方式の比較

(5) Diffractive Optics

図21に示すような回折格子を組み込んだレンズ をD0レンズ:Diffractive Opticsレンズ)と呼ぶ。



光学レンズはガラス材料の色分散性から色収差が発生 する。通常は光学設計において正負の色収差を互いに 打ち消しあうように設計してこれを補正するが、レン ズ枚数が多くなりコストアップや体積・重量のアップ に繋がる。一般に、光学レンズにおいては短波長(青) に対して色分散性から屈折率が高くなり屈折角が大き くなるが、回折格子では、長波長(赤)に対して回折 角が大きくなる。従って、両者を組み合わせることに より互いに打ち消しあい、色収差を補正することがで き小型軽量化を達成している。

(6)ミラーレス方式

ー眼レフカメラでは、跳ね上げミラーの空間を保つ ため、フランジバックを大きくすることが必要で、交 換レンズのバックフォーカスが決められている。しか しながらデジタル化によりミラーレス方式が可能とな り、レンズをセンサ直前まで配置した設計をすること が出来、小型・軽量化が可能となる。特に広角レンズ では、従来、バックフォーカスを大きくとるためにレ ンズ前群に凹レンズを配置する所謂レトロフォーカス 型が必須であったが、ミラーレスにすることにより凹 レンズを取り去ることが可能となり、レンズの小型化 軽量化が可能となる。

3.3 画像処理エンジン

デジタルカメラの中では、画像処理エンジンと称す るコントローラ部が、様々な画像・信号処理を行って いる。画像データに対する信号処理としては、

A/D 変換→ゲイン調整→デ・モザイク処理→ガンマ 補正→色変換・色補正→解像度変換→JPEG 圧縮 といった一連の処理が画像処理エンジンによって行な われる。その他,自動露出(AE)処理,オートフォーカ ス(AF)処理,オートホワイトバランス(AWB)処理,メモ リ IO,メカ制御,通信,USB インタフェースなど様々 な制御が行なわれる。図22にその構成を示す。



図23は、一眼レフのデジタルカメラにおける、画像

処理フローを示す。



図23 一眼デジタルカメラの画像処理フロー

カメラ内部での処理を画像処理エンジンが担う。コン パクトデジタルカメラとの大きな違いは、RAWデータ を出力する点である。RAWデータは通常、12~16ビッ ト/画素の非圧縮の高階調なデータで、デ・モザイク処 理を施しておらず"生"で出力する。RAWデータはそ のままでは使えないため、PC上で信号処理が必須とな る。これを銀塩フィルムになぞらえて現像処理と呼ぶ。 そのため一眼デジタルカメラの画像処理フローは、カ メラ内部での処理と PC での処理の両方が必要となる。

(1) カメラの絵作り

デジタルカメラは、通常、sRGB標準色空間がデフォ ルトの色空間となっており、直接ディスプレイで見た り、プリンタで印刷したりできる。さらに広色域の AdobeRGBをサポートするものもあり、より鮮やかな色 再現が可能で、カラー印刷における RGB入稿ワークフ ローでの広色域入力装置として用いられる。また、コ ンパクト型でも色や階調の再現を選択し、撮りたいシ ーンを撮りたいイメージで簡単に撮れる仕組みが充実 してきている。通常のスタンダードのほか、肌色を重 視したポートレートモード、空や草木の色を重視した 風景モード、被写体の色そのものを重視した「忠実再 現モード」など、被写体に応じて細かな設定が出来る ようになり、素人でもプロ並みの画像を簡単に撮影で きるようになってきた。更に、自分の好みに合わせた カスタマイズ機能も搭載されているものもある。

色再現には一般に以下の3つの方法がある。

- 好ましい色再現 (Perceptual):記憶色に基づき, 鮮やかで階調性を重視した色再現。コンパクトデ ジタルカメラではこれがデフォルトとなっている。
- 忠実なる色再現 (Colorimetric): 色差を重視した 色再現で被写体の色を忠実に再現。報道カメラな ど利用。
- 3. 色分離性を重視した色再現 (Saturation): グラフ ィックスを出力するとき,鮮やかで色分離性の良 い色で出力する。CAD の色パッチや線を区別するの に必要だが,デジタルカメラでは用いられない。

図24は好ましい色再現の例で,記憶色としては人の 肌色,空の青色,草木の緑色などがきれいに見えるよ うに設定される。



図24 好ましい色再現の例

好ましい色の設定は、メーカごとに独自の色作りに基 づいており公開はされていない。この色作りはデジタ ルカメラの画像品質を決めるため、各社とも、より美 しく色再現できるよう設計を行っている。好ましい色 は主観的なもので人により異なるため、一般に多くの パネラーを集めたパネルテストを行い,統計的に決定 する。また,時代の流行等もあるため,恒常的なパネ ルテストを実施し,修正していく必要もある。

(2) sRGB への変換

通常のデジタルカメラでは sRGB 標準色空間がデフ オルトの色空間となっている。このため出力デバイス が sRGB 対応であれば自動的につながり,特別なプロフ ァイルも不要である。sRGB 出力のため, γ=0.45 が乗 じられたデータが出力される。

(3) JPEGと RAW データ

通常のデジタルカメラは, JPEG で画像圧縮し出力す る。このためデータ量は 1/10~1/20 に圧縮される。一 方, RAW データは非圧縮, またはロスレス圧縮で, デ ータ量はとてつもなく大きい。

それでは RAW データの魅力はどこにあるのであろう か。図25は露出アンダーの画像を JPEG と RAW データ で撮影後,処理したものである。



露出アンダーなRAWおよびJPEG画像



図25 JPEGと RAW の画像処理の違い

両者の画像を比較してみると,図から明らかなように, JPEGの場合階調性が良くないが、RAWの場合は階調性 の崩れもなく高画質に処理されている。

この理由は JPEG の圧縮アルゴリズムに起因する。図 26は JPEG の圧縮フローを示したもので,画像データ はダウンサンプリング後,8×8画素のブッロク単位 でDCT(離散コサイン変換)を施され,量子化,Huffmann 符号化される。このうち,画質を決定する要因はダウ ンサンプリングと量子化の部分である。



図26 JPEGによる圧縮原理

量子化では, DCT 変換後の数値が, 量子化幅 q のステ

ップで量子化される。これを,実際の画像ヒストグラムで見てみよう。原画データを8ビット/画素の画像とする。RAWデータのヒストグラムは図27の左の連続したヒストグラムとなっているのに対し,JPEGデータでは,同図右側に示すように量子化により離散的なデータとなっている。



図 2 7 RAW と JPEG の比較(ヒストグラム)

このため RAW データと JPEG データとでは画像処理 結果に大きな違いが出る。このように RAW データは画 像編集に対応可能な十分なビット長と階調性を保持し ているため, RAW データは画像編集することを前提と したデータ, JPEG は最終的な画像を高圧縮にして保存 することを前提としたデータであると言える。

(4) 顔検出機能

最近のデジタルカメラで は,顔検出機能が搭載され, フォーカス,露出,カラー バランス等を自動最適化し, 素人でも簡単に美しい画像 を撮影することが出来るよ うになった。顔検出技術は,



図 28 顔検出

初期の頃は正面を向いた顔だけであったが,適用範囲 も横顔や回転まで可能となり,集合写真のように多く の人の顔を同時検出できるようにもなった。更に顔検 出に加え,表情の認識も行い,笑顔の時に自動的にシ ャッターが落ちるスマイルシャッター機能や,ペット 検出機能を搭載したものも登場している。

画像中の顔を検出するには、図28に示されるよう に画像を矩形ウィンドウにより走査を行う。各走査位 置においてウィンドウ内に顔が含まれるか否かを判別 器により判定する。顔の大きさが異なるので、ウィン ドウ走査はサイズを変えて何度も走査する。また回転 がある場合はさらに回転したウィンドウで走査する。 処理を高速に行うため粗く走査する方法や、前処理と して顔の肌色に近い領域を求め、探索範囲を狭めるこ ともある。判別器は、注目しているウィンドウ内の顔 の有無を判定する。判定のための判定ルールは、多数 の顔画像と非顔画像から学習する。個人差や照明変動 などの変動要因があるので、それらを吸収するため、 様々な方法が提案されている^{4,5)}。

(A) テンプレートマッチングによる検出

ウィンドウに対応した顔テンプレートとウィンドウ 内の画像データとの類似度を比較し、規定値より大き ければ顔と判定する。画像データは照明や肌の色など により輝度が変動するため、事前に濃度(輝度)をノー マライズする。ノーマライズの方法としてはヒストグ ラム均等化などがある。

(B) Haar WaveletやGabor Wavelet による特徴抽出 Waveletフィルタにより顔パーツの存在から判定を行 う方法である。特定周波数を抽出する複数のフィルタ をウィンドウ内の所定の位置に張り付け,そこからの レスポンスを求める。フィルタとしてHaarやGaborの Waveletを用いる。複数のフィルタのレスポンスが同時 に起こる場合(共起性のある場合)顔であると判定する。

ウィンドウ内のフィルタの大きさや位置等は, Boosting という学習アルゴリズムを用いて決定する。 具体的には,位置や大きさを変えた Wavelet フィルタ を生成し,様々な組合せの中で学習サンプルを識別す る確率がもっとも高い組を選ぶ。但し,選んだ組合せ だけでは正しく識別できないサンプルも残るので,識 別できなかったサンプルに対して別の特徴の組を選び これを追加する(これを AdaBoost と呼ぶ)。これを何 度も繰り返すことで,誤りの少ない強力な判別器を作 ることが可能である。

(参考)

Wavelet フィルタによる顔パーツの判定を, Gabor Wavelet で説明する。Gabor Wavelet フィルタは,

 $Filter(\vec{k}, \vec{x}) = \frac{\vec{k}^2}{\sigma^2} \exp(-\frac{\vec{k}^2 \vec{x}^2}{2\sigma^2}) [\exp(i\vec{k}\vec{x}) - \exp(-\frac{\sigma^2}{2})]$

で現されるフィルタで、図29に示されるように局所 化された波数フィルタである。波数ベクトル \bar{k} と広が り σ を変えることにより特定の方向の特定の周波数成 分のみを取り出すことができる。



図 2 9 Gabor Wavelet フィルタ

図30に顔画像の抽出結果を示す。横方向のある特定 周波数のエッジを抽出し、目や睫毛の抽出を行なう。 図31にこのフィルタの特性を説明するため、放射状 チャートに適用した場合を示す。Gabor Waveletフィ ルタのパラメータを変化させ放射状チャートの特定周 波数成分だけを抽出していることが分かる。



図30 顔画像のパーツの抽出結果

図32に複数のフィルタを検出すべき点に張り付けて 共起性判定器を示す。顔パーツが所定の位置にあれば 強い応答があり,すべてのパーツが同時に反応を起こ せば共起性が満たされ,顔であると判定される。



図31 フィルタを変化させた時の検出結果



図32 テンプレートと共起性抽出

Gabor フィルタに比べて, Haar Wavelet の場合はフィ ルタ演算がより簡素になるため,よく用いられる。

(5) その他の処理・機能

①動画機能

今やデジタルカメラでも動画対応が普通になって来 た。これまではデジタルカメラでの動画は,静止画の 延長戦として主に MotionJPEG であったが,MPEG-4 AVC/H. 264 対応も登場し,ビデオカメラとの境界がな くなってきている。しかも,レンズ交換式の一眼レフ タイプでは,マクロレンズや超望遠レンズの使用によ り,ビデオカメラとは違った特殊な演出効果も得られ る。また,1200fps のハイスピード撮影できるものも ある。従来は高価な業務機材でしか撮影できなかった ものが,これを一般的な価格のデジタルカメラで超ス ローモーション動画が楽しめるようになると同時に, 入力装置としての応用範囲も拡大した。高速度撮影が 可能となったことから様々な応用が生まれている。 ②パノラマ撮影

カメラを左右や上下に振るだけでパノラマ写真が 撮影できるものもある。多数の撮影画像から,自動で パノラマ画像が生成される。従来,撮影後にスティッ チ・ソフトを用いて画像をつなぐという面倒な後処理 が不要となった。

③各種フィルタ処理

被写界深度を薄くし、特定位置のみピントを合わせ 周辺をぼかすことによりジオラマ感を出す処理や、写 真を線画で描写し、スケッチ風に仕上げる処理、その ほかにも様々な画像変換や処理がカメラ内で出来るよ うになった。

③レンズの収差補正

これまでレンズに頼ってきたインパルス応答特性 向上を画像処理補正で行なう。光学レンズによって引 き起こされる僅かな収差を、メーカ独自の画像処理で 補正する「現像処理」が可能となった。レンズで発生 する倍率の色収差などを、画像処理により自動補正を 行なうことにより色のにじみを大幅に軽減し、周辺ま でシャープに補正する。この処理により、従来の銀塩 写真以上の画質が得られる。

4. 最後に

デジタルカメラは、立体画像入力装置として、表示 系や出力系へのデータを提供する。これは単に画像を 撮影して楽しむだけでなく、計測の分野でも使われて いる。このため、統合画像処理の入力部分として重要 な位置にあると言える。

参考文献

- 1) 画電学会編,河村,小野監修:カラーマネジメント 技術,東京電機大出版局(2008)
- (1) 時国,小宮; "ファクシミリ用固体イメージセンサの解像度特性評価法",信学論文誌,79/2, Vol. J61-A, No. 2, pp. 81-88 (1978)
- 3) 画電学会編,小松,河村監修:"カラー画像処理とデバイス",東京電機大出版局(2004)
- 4)三田雄志; "AdaBoostの基本原理と顔検出への応用", 情報処理学会研究報告, CVIM, 2007(42), pp. 265-272 (2007)
- 5) 堀田,三島,栗田;"未知の画像に対する識別率を用 いた顔検出のための特徴点の順序付け",信学論文誌, D-Ⅱ, Vol. J84-D-Ⅱ, No. 8, pp. 1781-1789 (2001)