

デジタルカメラにおける各種パラメータの相互関係
カメラの振動と大判カメラについて

守 啓 祐

北海道情報大学

A study of the relationship between the various parameters of a digital camera
For camera vibration and large format camera

Keisuke MORI

Hokkaido Information University

平成28年 3 月

北海道情報大学紀要 第27巻 第 2 号別刷

〈資 料〉

デジタルカメラにおける各種パラメータの相互関係
カメラの振動と大判カメラについて

守 啓祐*

A study of the relationship between the various parameters of a
digital camera

For camera vibration and large format camera

Keisuke Mori *

要旨

この論文ではデジタルカメラの各種パラメータの関係を考察し、目的に合った調整方法を検討した。まず撮像素子の特性と光学的な関係から基本的な特徴を考察した。次いで高精細撮像素子を使うに当たりミラーやシャッター等から発生する振動が撮影画像へ及ぼす影響について検討を行い、無視できないという結果を得た。最後に、大判カメラを用いて超高解像度撮影の手法と焦点面の制御法について実験を行った。

Abstract

In this paper, I described the relationship of the various parameters of the digital camera, and examined the optimal adjustment method of photography. I discuss the basic specifications of optics from the viewpoint of relation to the characteristics of image sensor.

Then, as a result of the measurement, with the high pixel image pickup device, the vibration which is generated from the mirror or the other (for example Shutters) can not be ignored. Finally, I examined the control of ultra-high resolution photography and the focal plane by the large format camera.

キーワード

レンズ 分解能(Resolution) 被写界深度(Depth of field) 錯乱円(Circle of confusion)
過焦点距離(Hyperfocal distance) 振動(vibration) 大判カメラ(Large format camera) あおり
(Movements)

* 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科教授, Professor, Department of Information Media, Faculty of Information Media (Dept. of IM), HIU

1. はじめに

カメラ映像機器工業会 (Camera & Imaging Products Association:CIPA) [1]が行っている統計の国内出荷台数において、2001年にデジタルカメラが銀塩フィルム式カメラより多くなり、2008年2月からは銀塩フィルム式カメラの生産・出荷台数の統計発表を停止した。出荷台数が逆転して7年でカメラ市場を席卷したことになり非常に早い世代交代となった[2][3][4]。音楽記録がLP等のアナログディスクからコンパクトディスク(CD)に変わった時に、アナログ、デジタルの各メディアの特性を見直されたように、本稿でも映像の記録についての基本特性の関係を考察し用途に合わせた適切な使用法を検討した。撮像素子の高画素化に伴い画像の明瞭度に大きな影響を及ぼすと思われるカメラの振動について、いくつかの予備実験を行い、高精細な画像を得るために考慮すべき条件、無視できる条件について考察を行った。加えて、写真撮影の基本に忠実に焦点空間制御の自由度が高い大判カメラについて触れ、安価なカメラで高精細の画像を制御する方法について解説した。

2. カメラの基本パラメータ

2-1 レンズの解像度

カメラの基本となるパラメータをまず考察する[5]。カメラはレンズに導かれた光を撮像面で検出することで映像を取得する。先ず撮影するレンズの基本的なパラメータを考える。像の解像能力を表すレンズの解像度は、天体望遠鏡で用いられるドーズ限界と呼ばれる経験則に基づき以下の式1で与えられる[6][7]。

$$\text{分解角 } \theta = 115.8 / D \quad \dots\dots\dots(1)$$

D: レンズ口径[mm]

式1より理想的なレンズでは口径が大きいほど分解角が小さく細かい線も分別でき、分解能が高いということになる。実際のレンズは光の波長により屈折率が異なるため、式1に光の波長によって変化する回折現象の項を追加したレイリー限界と呼ばれる式2を用いる。これは“点”である被写体が回折によって円盤状(エアリーディスク)に広がり隣接する点と分離できなくなる角度を表す。

$$\sin \theta = 1.22 \lambda / D \quad \dots\dots\dots(2)$$

D: レンズ口径[mm]
λ: 光の波長[mm]

エアリーディスクの次の暗部ピーク間の距離をxとすると以下のような式3になる。

$$x = 1.22 \lambda F \quad \dots\dots\dots(3)$$

F: F値 f/D
λ: 光の波長[mm]
f: 焦点距離[mm]
D: レンズ口径[mm]

この式3からレンズが無収差であってもこの式3以上に分解能が上がることはないということである。たとえば元素による吸収スペクトルであるフラウンホーファーのe線(546.1nm)に近い緑の光(550nm)、F値2.8のレンズでは $1.22 \times (550 \times 10^{-6} \text{ mm}) \times 2.8$ となり $1.879 \mu\text{m}$ となる。1mmあたり何本線が描けるかを計算すると約532本/mmである。これより細かい撮像素子間隔があってもレンズが解像できない。たとえば撮像素子サイズAPS-C(23.5mm×15.6mm)で6000画素×4000画素の解像度であったとすると1画素の間隔は $3.917 \mu\text{m}$ となる。線を1本表現するために黒白の線が1本ずつ合計2画素必要なので、理想のレンズであっても回折現象により絞りF11以上は必要な解像度が不足することになる。レンズ解像度の

実測には、ISO 規格 12233 準拠 CIPA チャートを用いる。この表では、2500 本まで測定できる[8]。

2-2 絞りと解像度

次に絞りと解像度の関係を考える。レンズの口径とは大きな口径を持つレンズを絞り機構で狭めた結果の大きさとなる。理想的なレンズであれば、口径は大きいほど解像度は高くなるが、現実にはレンズには収差と呼ばれる誤差が存在し、レンズ中心より周辺の解像度等の光学特性が低くなる。一般的に絞りを絞った場合、解像度が上がるのは F 値の増加の影響よりレンズ周辺の収差の影響が強いという理由である。個々のレンズのデータはレンズメーカーが提供している MTF 特性と呼ばれるデータから解像度とコントラストの特性を読み取る。より正確に露出を制御するためシネレンズはレンズ透過率 (Transmittance) を考慮した T 値が用いられ、ローデンシュトック社のソフトフォーカスレンズであるイマゴンでは穴の開いたフィルタを変えることで H 値 (Helligkeit : 輝度または明るさ) と呼ばれる F 値の相当値が示されている。ただし、実際に使っているレンズを通った光量を撮像素子の部分で測定する露出計では考慮する必要はない。

2-3 撮像素子の大きさと焦点空間

焦点はある点 (平面) に対して合わせるが、焦点が合う範囲はレンズの許容錯乱円の大きさに依存する。これはフィルムの場合感光材の粒子の直径、デジタルの場合撮像素子の間隔が錯乱円より小さければ焦点が合っていると見えるということになる。これはデジタルの場合で考えると同じ解像度であれば撮像素子が小さいほど焦点が合っている範囲が広く、つまり被写界深度が広いということになる。撮像素子やフィルムサイズが大きくなると、レンズに対して

必要とされる分解能が低くてもよいという関係となる。ただし、同じ画角で大きなフィルムサイズに対して焦点を結ぶためには相対的に大きな口径が必要となり工作精度が理想的なレンズより低下する現実がある [9][10]。一般的に 135 サイズ (フィルムサイズ : 36 mm×24 mm) 用のレンズ解像度の方がそれより大きな 120 サイズ (645:56 mm×42 mm) や 4×5 サイズ (102 mm×127 mm) と呼ばれるカメラで使用されるレンズ解像度より高い。(135, 120 という名称は Kodak 社のフィルムの名称であるが広く使われているので今回は Kodak 社のフィルムの名前で統一している。)

具体的には風景写真で近くから遠くまで焦点の合った写真を撮りたいのであれば撮像素子が小さく、焦点のより短いレンズを絞って使うこととなる。逆に一部にしか焦点を合わせないのであれば撮像素子が大きく、長い焦点距離を持つレンズを絞らず開放で使う方が焦点の合う範囲が狭い。ただし、レンズの特性により解放ではレンズ内の乱反射やレンズ周辺の収差等で解像度が落ちる、または小絞り時の回折現象で解像度が落ちるのでレンズにより適当な範囲が存在する。商品として出ている撮像素子の大きさが 1/2.3 型 (6.2mm×4.6mm) は F8 以上、135 フルサイズ (36mm×24mm) と呼ばれるレンズは F22 より大きな絞りの目盛がないのはそれ以上では撮像素子上で解像度が十分でないからである。たとえばフィルムサイズの大きな 4×5 サイズ (127 mm×102 mm) のレンズでは撮像素子のピッチを同じとすると 1/3 (36 / 127) 程度のレンズ解像度で問題がないこととなる。つまり撮像素子サイズが大きくなるとレンズ解像度が低くても同様に撮影できる。同じレンズに対して撮像素子サイズを色々変えて利用するのであればレンズを焦点距離ではなく画角で区別する方が理解しやすいと思われる。また、被写界深度は焦点距離が長いと、浅い

と言われているが正確ではない。同じ被写体を焦点距離が異なるレンズで同じ大きさに撮影する場合。例えば人間の顔の高さを200mmとしてこれが撮像素子上で様々な焦点距離のレンズを持って撮影するが撮像素子上20mmで撮影するように撮影距離を調整すると被写界深度はほぼ差がない。拡大率が同じ場合、拡大率が約1/50より小さな場合やF値が1に近く非常に小さな明るいレンズの場合以外はほとんど影響を受けない。現実には画角の違いによる近景、遠景の拡大率の差を利用し、撮影者が注目させる部分を強調していることになる。

撮像素子サイズは、大きく分けてフィルム由来の表現、ビデオ撮像素子（電子管）由来の表現がありそれぞれ縦横比率が異なる。また計量法の関係でインチ表現ができないため“型”という表現となっている。動画カメラのビデオ撮像素子はこの“型”の大きさと実際の撮像素子の大きさが異なる。これは1型の場合、1インチ（25.4mm）の電子管の中に撮像体があるので、外の電子管より小さく約12.8mm×9.6mmであり対角は16mmとなり1インチより小さい。動画を16mmフィルムで撮影していた時期（通常撮影範囲：10.26mm×7.49mm）のCマウントで用いる撮像素子が代表的であろう。ただし同じ1型でも有効素子サイズは異なるので確認が必要である。一方135サイズの例では、フィルム幅が35mmで撮像範囲が36mm×24mmとなっている。このようにフィルム、ビデオ（電子的）または放送、映画で規格を表現する基準が異なるので解像度の計算には注意が必要である。1例として解像度はフィルムでは白黒1セットで1本、放送ではこの場合白黒1本ずつと数え2本となり解像度は2倍異なる。

2-4 デジタルカメラ内での処理と現像

デジタルカメラ内で行われている処理[11]は入力に使う撮像素子はRGBの各色を

2×2のベイヤー配列で並べている素子が多い。1点あたりは1色の撮像素子から得られた情報を処理し色画像をつくる。この場合、偽信号やモアレを低減するためにアンチエイリアスフィルタとして光学ローパスフィルタを入れる。近年では撮像素子で撮影後、画像処理で偽信号対策やモアレ対策を行い、光学ローパスフィルタを省略するカメラが出てきている。一方、通常撮像素子の濃度の分解能は12または14ビット程度である。これを処理してJPEGで8ビットの画像を作成する。撮影の時に留意するのは撮像素子のダイナミックレンジを超えないことである。記録できない明るい光を入れるとサチュレーションを起こす。デジタルカメラでISO感度とっているのは単にこの撮像素子から得られた信号をどれだけ増幅するかである。通常は雑音も増幅するためカメラ内の映像処理で雑音他を軽減する。これをカメラ内で処理せずそのままの形で記録したものを、撮影後コンピュータで現像する方式がRAW画像である[12]。撮影時に明るすぎる、または暗すぎ階調が保存されていない場合以外は撮影後様々な処理ができる。一般に、カメラ内での処理よりPCでの処理の方が高度な処理ができるため画質は良くなる可能性が高い。加えてRAW画像記録しているものは、未来により良い現像処理が出た場合、その時代の技術で現像処理が可能となる。通常は各カメラ会社から出されている現像ソフトを使うが、各カメラ会社以外の会社からAdobe PhotoshopのCamera RawまたはLightroom、SILKYPIX、DxO OpticsPro等の様々な特徴を持つ現像ソフトがある。これまでも写真を銀塩プリントする際に暗室で輪郭の鮮鋭化を行うアンシャープマスク、コントラストの調整を行うブリーチバイパス等の処理を行ってきたので現像ソフトと同様に調整する事はフィルム処理と同様であるが、処理可能な範囲がレタッチソフトに近くなってきたのでコンテ

スト等ではどこまで適応してよいのかコンテストによって異なるため確認する必要がある。しかし商用写真は方法如何にかかわらず結果だけなのでどのような処理を行っても問題ないと思われる。撮影後に積極的な画像調整を行うか否かにかかわらず RAW 画像記録が可能であれば、撮影時に決定するパラメータが減少するため撮影時の労力が軽減される。

映画の撮影のように、同一場所で周辺環境が異なった状態で撮影された映像をつなぐ必要がある場合にはより正確に露出やホワイトバランスを設定する必要がある。その場合は白と黒の中間の反射率をもつ標準反射板(通称 18% グレーカード)を撮影し、撮像素子の測定値が中間値を示すように調整する。ホワイトバランスの調整は、IT8(ANSI)等もあるが旧マクベスチャートの販売会社 GretagMacbeth 社が X-Rite 社と経営統合(2006年)したので現在では x-rite カラーチェッカー・パスポートを利用する。これを撮影し添付ソフトで補正する。

デジタルカメラの評価には様々な試みが行われているが広範囲でデータ公開が行われているサイトとして DxO mark[13]がある。本来は自社の映像ソフトの評価のためのサイトであるが広範囲に客観的な評価しているので非常に参考になる。基本的に高価なカメラは合焦精度とその合焦までの速度、加えて合焦調整ができ、1秒間に撮影できる枚数と連続撮影枚数および高感度特性が高いカメラである。合焦精度は撮影者の感覚と合わないことも多く調整が必要な場合が多い。合焦調整はメーカーへ調整に出してもよいが自分でスケールを映して調整するためにツール[14]や最初から調整を前提としたレンズアダプタ[15]も出ている。ただしスポーツ撮影のような速写性を求めないのであればより安価なカメラでも十分な場合があることがこのサイトのデータから読み取れる。そのため先の DxO のサイトでも評価

を行う写真の分野を、ポートレート、ランドスケープおよびスポーツとしている。

2-5 フィルムとデジタル撮像素子の比較

フィルム解像度はデジタルカメラでは何画素相当であるか様々な議論がある。ここでは、資料から推定してみる[16][17]。フィルム等を読み込むドラムスキャナでは Linotype - Hell/ Heidelberg Chromagraph S3900 の最高解像度は 24000dpi であるので画素幅 $1.06 \mu\text{m}$ である。135 サイズで換算すると 7.7 億画素となる。フォールの粒子の大きさがデジタルの 1 画素になるわけではないが、資料[16]の図から粒子の平均的な大きさは $0.5 \mu\text{m}$ となっている。この値とフィルムの大きさから計算すると 34.6 億画素である。ただしフィルムは RGB の色を検知する粒子が深さ方向に立体的に配列されているが、デジタルカメラは平面的に配置され 1 か所では通常 1 色しか検知されずこの点も同列に評価が困難である。デジタル撮像素子でも深さ方向に色を検知する FoveonX3[18]という素子もあるが主流とはなっていない。動画カメラの業務機種で用いられたダイクロイックプリズムで RGB に分離し 3 つの CCD で検知するモデルもあるが静止画用には業務の一部以外には普及していない。RGB 単独で 3 回撮影する方法も天文撮影には使われているが、一般撮影に適用された例は少ない (Leaf DCBII 他)。実際のデジタルカメラの撮像素子間隔は、撮像素子サイズが小さく画素数が多い機種 NIKON COOLPIX S9900 は約 $1.3 \mu\text{m}$ 、135 サイズの業務機では $5 \mu\text{m}$ 前後となっている。中判カメラのデジタルバックは $6 \mu\text{m}$ から $10 \mu\text{m}$ 程度で画素数の多いものは 8000 万画素程度である。この撮像素子間隔とレンズの解像度の関係を検討する。通常 135 サイズのレンズで解像度 150 本/mm は最高クラスのレンズである。これを画素間隔に換算すると $6.7 \mu\text{m}$ となる。これより小さい

画素間隔が全く無駄というわけではないが理論値として解像度に影響を与える要素として全体のバランスを考慮する必要がある。一方レンズ解像度上げる試みとしてレンズ材質やレンズの中に液体を満たし屈折率を上げ論理解像度を上げる試み[19], レンズ内乱反射を低減する試み[20]および後処理としてデジタル処理で超解像を可能とする試みがされている。このように新しい方法が提案されると, 目的とする画像を得るために用いる処理手法等が現在用いている手法と異なる新しい手法が必要となる。

3. カメラの振動

撮像素子が微細化するに伴い焦点の合焦精度や振動に留意しないと解像度の高い写真が得られない。手振れは, 手振れ補正等の機構により担保し, 焦点の合焦精度はオートフォーカスで担保するようになってきている。現実問題, 現行の最高機種においても手動で焦点をファインダー内で合わせることは困難を極め再調整しないと厳密な焦点合わせはできない。加えてミラーの動きのある SLR(Single Lens Reflex:通称一眼レフ)はミラーの無いカメラと比較してミラーの振動が無視できないといわれ, 上位機種には撮影時にミラーを上げてから撮影する機構, ミラーを上げてから一定時間露光開始を遅延させ振動を収束させてから撮影する, 露出ディレイモード等の機構を持つカメラがある。今回は正確な測定の前の予備実験として, 無視できない程度振動をしているのか測定し, 撮影への影響の可能性を検討した。比較的安価に振動測定ができる方法として2種類の方法を試みた。

1. アナログレコードのピックアップで検出する方法
2. ピエゾ素子(圧電素子)で検出する方法

対象とするデジタルカメラは NIKON D5300, 防振シートの上に垂直に置いた状態で撮影時の振動測定を行った。アナログレコードのピックアップは高出力タイプの SHURE M44-7 を用いた。上下方向の振動を検出するために, ピックアップの支持は微動送り付きマグネットベースを用いて前方から固定した。測定位置は, 撮像素子の位置を示す距離基準マークとできるだけ同一平面になるカメラ本体上面の水平な場所として D5300 の右肩の WiFi のマークの部分(前方より 49.3mm, 右方より 17.9mm) にスタイラスを水平に設置しリモートシャッター(1/20s)を用いて振動を測定した。増幅のためのプリアンプは Technics A6 を用い, rec out より出力された信号をオシロスコープ owoon SDS6082 で測定・記録を行った。図1に測定結果を示す。振動は約1秒続き収束をしている。最初の振動周期は約45Hzであり, 後半の振動周期は約10Hzとなっている。振幅は312 mVである。このピックアップの規格は1kHz 最大速度50 mm/secの時の出力電圧が9.5 mV, プリアンプのゲインが36dBであるので速度に対して比例して電圧が出ると仮定すると今回の振幅は0.605mmとなる。

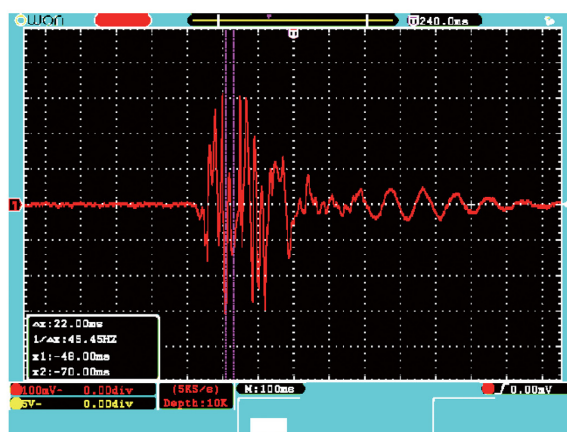


図1 シャッターを切った時の振動 ピックアップ (SHURE M44-7) 使用時

時間軸 100ms/div, 振幅軸 100mV/div

今回使用した増幅器はオーディオ用のプリアンプであるため 1KHz の入力に対しては係数がなくこの関係であるが、1KHz 以外の周波数では RIAA カーブ[21]で周波数特性を持ち、10Hz では 20dB であるので、補正を行った振幅は $6.05 \mu\text{m}$ となる。対して D5300 の撮像素子のサイズは $3.917 \mu\text{m}$ であるので振幅は 1 画素を超えている。基準信号の調整を厳密に行っていないので、厳密な値としては評価できないが誤差を考慮しても無視できない振幅幅であると思われる。

ただし、D5300 は光学ローパスフィルタがない機種で撮像素子はベイヤ配列であるので 2×2 画素で 1 セットとし、フルカラーの 1 色分とみなすと撮像素子の 2 画素分の大きさである約 $7.8 \mu\text{m}$ となる。単独の画素ではなくベイヤ配列 1 セット分を 1 要素とすると、振動が 1 要素以内になる最大振幅の半分程度に収束するまでの時間は約 300ms である。ベイヤ配列の 2×2 画素の 1 セット分の幅で振動周期が約 10Hz なので約 30 回振動していることになる。この状態で振動している場合と同様のデジタル処理は、直径 2 画素の移動平均となり画像の先鋭度が低下する効果がある。ただし影響を受けるのはシャッタースピードが約 $1/3\text{s}(333\text{ms})$ より長い場合である。シャッタースピードが短い場合は振動が最大振幅になる前にシャッターが閉まってしまうので影響が少ない。振動周期が約 10Hz なので振動の影響を受ける振幅を撮像素子の画素間隔以下となるように、今回の最大振幅の半分程度とすると、その 1 周期の $1/8$ となるのでシャッタースピード $1/80(12.5\text{ms})$ より短時間の場合は影響が少ないことになる。通常のカメラ手持ち撮影において、フィルムサイズ 135 サイズの場合、一般論として使用したレンズの焦点距離分の 1 より速いシャッタースピードを選択すると手振れが目立たないと言われている。この条件で撮影する場

合は、カメラのミラー等の振動が先鋭度に影響の出るシャッタースピードより短時間であるので影響は少ないと予想される。

次にピエゾ素子圧力センサで振動を測定した。圧力センサは Measurement Specialties Inc. LDT0-028K を使用し、設置はカメラ背面、撮像素子の裏面付近へ固定用クランプで固定し前後方向の振動を検出した。図 2 にピエゾ素子圧力センサで検出した振動の測定結果を示す。

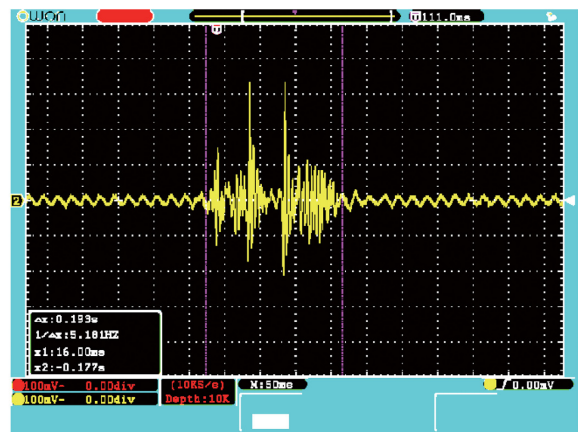


図 2 シャッターを切った時の振動 ピエゾ素子（圧電素子）使用時

時間軸 50ms/div, 振幅軸 100mV/div

図 2 より、紫のカーソルで測定した振動の持続時間は 0.193 sec であった。振幅は最大のピークピーク値で 544mV であったがこちらに関しては圧力に対して算定基礎データがないため時間軸方向の検討を行った。最初の振動が始まるまでは 12.4ms、次の始まりが 56.8ms、3 番目の始まりが 0.107s となっている。前後方向に振動は 0.2 秒程度で収束しているが、ピックアップで測定した上下方向には約 1 秒程度持続している様子が観察できる。カメラの動作の順番として、ミラーが上がり、シャッターが開閉し次の撮影のためシャッターをチャージする、最後にミラーが下りる順番で通常行われる。最初のピークはミラーアップ、2 番目のピークは

シャッターの開閉の始まり, 3 番目がミラーの下がる時間と予想される。カメラに搭載されている露出ディレイ機能の遅れ時間は1秒であるがこの計測結果から1秒待てばミラーの振動は十分収束すると思われる。ピックアップで測定した波形と比べると図1最初の0.2s程度の大きな振動の部分がミラー等の動作の部分で最後に残った低周波の振動はカメラ本体の残振動であると思われる。今回はカメラを防振シートの上に乗せ慣性モーメントの小さい状態で測定したが, より低減するためには質量の高い三脚等に固定する等の対策がとれると思われる。

ミラーはファインダー内で撮影画像を直接見るためにあるのであるが, そこでフレーミングの確認はできるが合焦している場所と範囲は正確に確認できないとすると, 機構的な複雑さや振動の問題を抱えるミラーは必要あるのか疑問が残る。ただし, 背面ディスプレイや電子ビューファインダーの表示の時間遅れの問題があるのでどこでバランスを取るとよいか利用者によって違いが出てくるのであろう。少なくとも速写性を必要としない撮影の場合はミラーの必要性は少ないと思われる。フィルムカメラの時代は現場で写り方が確認できないので焦点の範囲の確認のため絞り込みボタンやプレビューボタンと呼ばれるものがあつたがデジタルの時代では即時性が必要とされないのであれば試験撮影し, 撮影画像を確認するほうが確実であろう。そうすると直視ファインダーの必要性がより減る。

4. 大判カメラを用いた超高解像度撮影の手法と焦点面の制御

通常の撮影については, ほぼデジタルカメラで撮影できるようになってきた。大判プリントについてもブロックノイズを低減する処理が一般化してきたので大きな問題はなくなってきた[22]。しかし合焦した焦点

空間を制御することはアオリ撮影のできるパースペクティブコントロール(PC)レンズが各メーカーで用意されている(例:NIKON PC-E NIKKOR 24mm f/3.5D ED シフト量: $\pm 11.5\text{mm}$, ティルト量: $\pm 8.5^\circ$) が自由度という面ではモノレール型大判カメラ

(例: Sinar P シフト量: $\pm 30\text{mm}$ 以上, ティルト量: $\pm 40^\circ$ 以上 レンズと撮影状態に依存) の代用はできないのが現実である。また, 通常のレンズ装着面から撮像素子までの距離(フランジバック)が固定されているカメラは設定の自由度が制限されストップモーションのアニメーション等の近接撮影をする場合に制約が出る。

現在では, 撮影後の現像処理またはレタッチはほぼデジタルで行われるため, 大判カメラでフィルム撮影しフィルムスキャナでデジタル化をすることも可能であるがコストがかかる。大判カメラで直接デジタル撮影するためのカメラバックは645サイズ($53.7\text{mm} \times 40.4\text{mm}$)サイズまでしか通常出しておらず数百万円と高価である。フラットベットスキャナーを併用したタイプ[23]もあるが操作に時間がかかるためより撮影に困難さが伴う。

今回は安価に業務レベルの撮影が可能となる方法として, 大判カメラの Sinar P タイプに比較的安価な SLR として前出の D5300 をカメラボードで接続し, 高解像度撮影と商品撮影等の近接撮影を試みた。図3に撮影機材の右側面像の写真を示す。Sinar P タイプ[24][25]は主に4×5サイズの大判フィルムを用いるカメラであり1970年代から発売されリアフレームを交換することでフィルムサイズ8×10サイズまで対応する。現在のモデル P3 タイプも基本的な構造は同じでそのまま入れ替えて使える。本体だけで当時百万円を超える大判カメラ最高クラスであるが現在では写真館等, 業務で利用しなくなった古いタイプの中古が安価に手に入る。古いタイプとはいえカメラの構造

は全く変わっていないため画質にはほとんど影響がない。大判カメラは主にフィルムサイズ 135 サイズのカメラと異なり国際規格があるのでどのメーカー製の周辺機器でも規格が合う範囲は利用可能である自由度がある。主要な 135 サイズカメラを取り付けるアダプタもほぼ全メーカー出ておりマイクロフォーサーズ(MFT または M4/3)サイズも対応可能である。ただし、アダプタの長さが付加されるため広角レンズでは無限遠に対して焦点が合わなくなる可能性が上がる。今回の組み合わせでは 105mm が無限遠に焦点の合う最も焦点距離の短いレンズであったが、この場合、中間の蛇腹にほとんど余裕がないためアオリの自由度はほぼない。



図 3 Sinar P と NIKON D5300 を設置した撮影機材の右側面像

今回利用するカメラが D5300 と撮像面が APS-C (23.5mm×15.6mm) サイズであるため 1 回では撮影できないが動きの少ない被写体であればカメラを平行移動し複数回撮影した画像を Adobe Photoshop の画像合成機能コマンドの Photomerge で合成することで高解像度の画像作成が可能となる。カメラ撮像素子の縦横比率を維持する 73.5mm

×48.6mm の範囲、縦横 4 枚ずつ 16 枚撮影し連結すると約 2.3 億画素となる。画像の比率は異なるがカメラの移動機構の動作限界である 73.5mm×95.6mm の範囲で撮影すると最大 4.6 億画素まで撮影が可能である。隣接する撮影画像間に重なりがあるように撮影し、画像を同じディレクトリに入れて Adobe Photoshop Photomerge 処理を行うと手動で位置を調整しなくても自動的に画像が合成される。図 4 にその処理画面を示す。

処理は Windows 7 64bit, Intel i7 2.67GHz, メモリ 9G で Photoshop CS6 を用いて約 4 分であった。今回の画像は 10 から 20%程度重なるようにし、この例では出力が 2.4 億画素、ファイルサイズ 1.8GByte となった。図 4 の矢印の電柱接続部を拡大した画像を図 5 に示す。表示部分で約 60 万画素程度となり撮影後の画像に行う出力に合わせた画像調整を適用してないのでまだコントラスト等が適性ではないが電柱の構造が判別できる解像度がある。デジタルカメラではこのような複数枚撮影することで高解像度や色方向にダイナミックレンジを上げる手法や焦点位置を変えて複数枚の画像を撮影し、焦点の合っている領域を合成し被写界深度を増やすといった手法も容易になる[22]。

焦点合わせは自動焦点ではないためカメラ側のライブビューを使って適宜拡大し手動で調整をした。現在のデジタルカメラは HDMI の外部出力がついていることが多いためライブビューの出力を大きなディスプレイに映して確認しより正確な焦点合わせができる。この例では被写体まで約 30m で合焦位置のレンズから撮像素子までの距離を 1mm 動かすと被写体の合焦面は約 2.5m 動くこととなる。ただし錯乱円を考慮すると過焦点距離は焦点距離の平方距離より遠い場合を無限遠とみなして問題は少ない。フィルム撮影の場合、被写界深度を確保するため絞り込むとピントグラスでは冠布をかけても非常に暗くなりほとんど見えない

問題があったが、デジタル撮影の場合は、撮像素子の感度の向上や外部ディスプレイの設置等で焦点の調整が容易になっている。

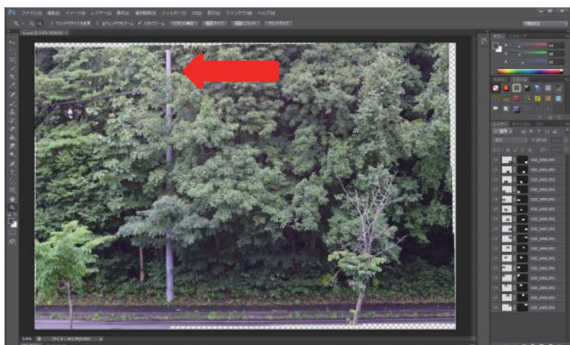


図 4 16 枚の画像(2400 万画素/枚)を統合している画面 レンズ：
Schneider Symmar-S F5.6/180mm
F22 シャッタースピード 1/10

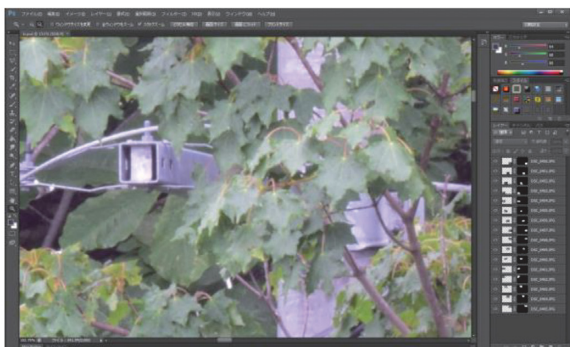


図 5 電柱の一部を拡大した画像

また今回対象としている動きの少ない被写体ではデジタルカメラの ISO 感度を高精細な低感度設定にし、十分な露光時間を与えることで雑音を低く抑えた状態で適正な露光が可能となる。加えて、フィルムでは長い露光時間では相反則不軌と呼ばれる感度の非線形性でカラーバランス等が乱れる問題があったが、デジタルカメラの撮像素子では基本的に露光時間による相反則不軌は発生しない。長時間露光というのが何秒であるかは時代やフィルムの種類により異なるが富士フィルム フジクローム PROVIA100F プロフェッショナル[RDPHIII]では 1/4000~128 秒の範囲では補正の必要

はないとデータシートに書かれている。ただしデジタル撮影での長時間露光は別の問題が発生する。まず長時間のライブビューや露光でカメラ本体が過熱し熱雑音が発生しやすくなる問題である。ただし熱が発生しないように積極的に冷却するデジタルカメラを用いる場合は、熱雑音が無い状態で時間方向に同期加算が行われるのでランダムノイズはかえって低減する場合もある。一例として天体撮影用の冷却 CCD がある。このようなデバイスを使わない場合の熱雑音対策として、30 秒の露光を 1 回で行うのではなく、5 秒ごと時間を空けてカメラを冷やして 6 回撮影したものを Photoshop 等でデジタル合成するという方法がある。また色再現性向上のため、RGB 等の外部フィルタを交換して複数回撮影し、デジタル合成するマルチスペクトル画像撮影手法もある。加えて次の問題は長時間の露光のためバッテリー充電容量が十分でない問題である。対策には十分な充電を行った容量の大きなバッテリーを用いるか商用電源等から直接供給する。

次に、ティルト（レンズボードを傾ける）を行って焦点面の制御を行った例を示す。図 6 に撮影環境全景を示す。大判カメラはフランジバック長が固定されていないため蛇腹を延ばすだけで高倍率近接撮影が可能となる。また、レンズから被写体までの距離（ワーキングディスタンス）がフィルムサイズ 135 より長く取れ、照明方法に自由度があり近接撮影や高倍率撮影は 135 サイズに対して優位性がある。

図 7 に撮像面とレンズ面が平行の場合の撮影例を示す。撮影対象として 18%標準反射板の上に引き伸ばしレンズおよびノギスを設置し撮影した。次にティルト（レンズボード上部を前に傾ける）を行い焦点の制御を行った撮影例を図 8 に示す。図 8 では図 7 では焦点があっていない手前の枠線の部分まで焦点が合っている。撮影範囲はレ

レンズボードをティルトとすると移動するのでできるだけ同じ撮影範囲となるようにカメラの角度を調整している。またレンズをあおった場合はイメージサークルの周辺部を使うことになり光量が減少する。この光量減少（周辺減光）を調整し同じ露光状態とするためにシャッタースピードを長くしている。このように絞りを絞らず、回折現象による解像度劣化を抑えた状態で焦点の合った平面を移動させ、焦点を積極的に制御した画像を得ることが可能になる。



図 6 図 7, 8 の撮影環境全景

あおり機能のないカメラでは広い焦点範囲を得るには絞りの値を大きくし、概ね手前に 1, 奥に 2 の比率で被写界深度を広くする調整しかできない。大判カメラは机の表面等に焦点面を傾けることで絞りを絞らずに焦点の合う空間を調整できる。また逆に焦点が合わない方向に調整し独特な効果を得ることが可能で表現範囲が広がる。イメージサークルの大きさが撮像素子とほぼ同じ大きさである 135 サイズのカメラと違い、大判カメラ用のレンズを用いて APS-C の撮

像範囲で撮影することは 10 倍程度大きなイメージサークルを持つレンズの収差の少ない中心部を使っていることとなるので小絞りの影響を相対的に受けにくい利点もある。大判レンズに F45 や F64 まで絞りの目盛があるのはそのためであるが、今回のように撮像素子サイズが小さい場合は 4×5 フィルムに比べて小絞りの影響を早く受け、今回の例では F32 程度から影響があるようであった。



図 7 撮像面とレンズ面が平行の場合
絞り F8 シャッタースピード 1/125 s



図 8 撮像面とレンズ面のボードを前面にティルトした場合
絞り F8 シャッタースピード 1/30 s

5. まとめ

デジタルカメラについて考慮すべきパラメータとその関係を記し、カメラのミラー

やシャッター振動が撮影画像に及ぼす影響の予備実験を行った。先ず原理より風景写真のように広い範囲に焦点が合っていることが望ましい写真は撮像素子が小さい場合の方が有利であることを示した。また、SLR撮影時に考慮するミラーの振動はどの程度で、どのような場合に考慮する必要があるのかについて実験を行った結果、全く無視してよいわけではないことを示した。また大判カメラの複数枚撮影での超高画素化と焦点面の制御を示した。現在では、カメラ任せになっている部分をすべて手動で行うことで自分の意図にあった映像の制御方法の基本を学ぶには非常に助けになる。また今回は固定治具の関係で行わなかったが、レンズシャッターを使った振動測定実験を行いたい。大判カメラのシャッターは基本的にレンズにシャッターがある。Sinar社製が例外的に大判カメラボディ側（蛇腹の間、レンズの後ろ）に電子シャッターを搭載可能であるが撮像素子から遠いレンズ側にシャッターがあることで機械的振動が伝わりにくいと考えられるためである。実験はデジタルカメラ本体のシャッターを開け振動が止まったところでレンズシャッターを使って撮影し、その場合の振動を測定し、測定値より撮影画像への影響を検討する。加えてミラーレス機のシャッター開閉だけの振動や手振れの影響[26][27]の検討も合わせて行うことを計画している。

参考文献

- [1] http://www.cipa.jp/index_j.html, (2015年8月6日アクセス)。
- [2] 日本写真学会編集委員会(1995), 1994年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 58 (1995) No. 3 P 209-241。
- [3] 日本写真学会編集委員会(2010), 2009年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 3 P 147-174。
- [4] 日本写真学会編集委員会(2011), 2010年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 74 (2011) No. 3 p. 121-150。
- [5] 日本写真学会(1998)『改訂 写真工学の基礎』, コロナ社。
- [6] 日本写真学会(2001)『ファインイメージングとデジタル写真』, コロナ社。
- [7] 青野 康廣 (2010), デジタル写真の基礎 (5) 4. デジタルカメラの光学系 (I), 日本写真学会誌, Vol. 73 (2010) No. 3 P 175-179。
- [8] CIPA, 解像度チャート使用説明書, http://www.cipa.jp/dcs/hyres/parts/TCPF_070502_j.pdf, (2015年8月6日アクセス)。
- [9] 須川 成利(2009), デジタルカメラ用イメージセンサの最新技術, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 4 P 300-305。
- [10] 青野 康廣 (2010), デジタル写真の基礎 (6) 5. デジタルカメラの光学系 (II), 日本写真学会誌, Vol. 73 (2010) No. 4 P 211-217。
- [11] 乾谷 正史 (2009), 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) 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 5 P 360-365。
- [12] 市川 芳邦(2010), RAW 現像で広がる写真と撮影の可能性, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 5 P 249-251。
- [13] DxOMark's EXPLORE CAMERAS SCORES & REVIEWS, <http://www.dxomark.com/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [14] Spyder Lenscal, <http://www.datacolor.jp/products/camerasolutions/spyderlenscal.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [15] USB DOCK, <http://www.sigma-global.com/jp/lenses/cas/product/accessories/usb-dock/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [16] 原口 暢之, 長岡 克郎, 首藤 定伸, 池田 秀夫, 坂東 信介 (2000), 粒状性に優れ

- たカラーリバーサルフィルムの開発, 日本写真学会誌 Vol. 63 (2000) No. 6 P 283-290。
- [17] 豊田 堅二(2009), デジタル写真の基礎 1. 銀塩写真とデジタル写真, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 2 P 116-119。
- [18] Foveon X3 image sensor technology, <http://www.foveon.com/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [19] 富士写真フイルム株式会社, 岩戸 薫, 液浸露光用液浸液及びそれを用いたパターン形成方法, 特許登録番号 4377271, 2009登録。
- [20] 村田 剛(2010), ナノ粒子を用いた高性能反射防止膜“ナノクリスタルコート”の開発, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 5 P 243-248。
- [21] AES Standard Playback Curve, Audio(1951) Engineering, Vol. 35, No. 1, January 1951, pp. 22-45.
- [22] 杉山 徹 (2009), 「デジタルカメラ入稿ガイド」について—何故このガイドを作る必要があったか—, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 2 P 65-71。
- [23] Digital Scanning Backs for Large Format Photography, <http://www.betterlight.com/products4X5.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [24] ザ・ラージフォーマット, 絶版の書籍の flash 版, <http://www.a-stage.jp/sinar/lesson/lesson01.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [25] Creative Large Format / Volume1 (日本語版), 絶版の書籍の flash 版, <http://www.a-stage.jp/sinar/lesson/lesson02.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [26] 西 一樹(2007), 手ブレ補正向け測定技術を開発: 効果を定量的に評価, 日経エレクトロニクス 963(2007), pp.131-139。
- [27] Kazuki NISHI and Tsubasa ONDA(2010), Evaluation System for Camera Shake and Image stabilizers, Proc. of IEEE Int. Conf. on Multimedia & Expo (ICME) pp.926-931。