

■8 群-4 編-2 章

2-8 光学系

2-8-1 撮像レンズ

(執筆者：矢作 智) [2011年4月 受領]

撮像デバイス上に被写体の像を結像させるためのレンズは原理的には一つの凸レンズと等価であり、長い歴史があるフィルムカメラ用レンズと同様、撮影レンズ (Taking Lens) と称される。撮像デバイス用に使われる場合は撮像レンズとも呼ばれる。

撮像レンズは、カメラによって要求される仕様が様々で、それぞれの用途に合わせて多様化してきた。また、硝材の進歩、設計・製造技術の向上により高性能化、小型化が進んでいる。初期の撮影レンズは固定焦点であったが、レンズ群の一部を移動させることにより焦点距離を変化させるズーム機構が登場し、様々な周辺技術の発達とともに高性能、高倍率化が進んだ結果、静止画及びシネ用の一部を除いて、ほとんどの用途で中心機材として使用されている。現在では民生用からプロ用まで、動画撮影ではほぼ 100 % がズームレンズによる撮影となっている。

カメラの用途は千差万別であるが、撮影レンズの発展は基本的には、より広い範囲を撮るためにより広角へ、あるいはより遠方を撮るためにより望遠へ、といった、被写体の空間範囲を広げる方向に進んできた。これは、ズームレンズではワイド側の焦点距離がより小さくなり、あるいはズーム比が大きくなっていくことを意味する。また、一般にレンズの大きさはデバイスの大きさに影響されるため、デバイスの小型化はレンズの小型化を推し進めた。一方で高画素化が急速に進み、それに対応してレンズの高解像化も進んでいる (表 2・10)。

表 2・10 撮影レンズの用途と主な特徴

用途	特徴	イメージサイズ
シネマ用	映画、CM撮影などで使用、PLマウント 固定焦点 ズーム 高画素 単板	シネフィルムサイズ が基準
放送用	TV番組撮影用 放送局、プロダクションで使用 ズーム 3板	2/3"
業務用	学校、結婚式場などでのビデオ撮影 ズーム 3板	2/3"、1/2"、1/3"
監視用	Cマウント ボードレンズ 高画素対応、近赤外対応 小型から大型長焦点ズームまで様々 固定焦点 パリフォーカル ズーム 単板(一部に3板)	1" ~ 1/4"
FA用	製造ラインの検査など、高画素対応、Cマウント、 固定焦点 単板(一部に3板)	1" ~ 1/4"
ムービー用	小型、ズーム、防振、カメラと一体	1/3"、1/4"
静止画用	携帯用、デジタルカメラ用等、固定、ズーム、一体型、 交換タイプなど多種多様 動画撮影機能あり	イメージサイズは小 から大まで様々

以下、動画撮影用レンズの代表として放送用レンズを中心に、その特徴を述べる。

(1) 放送用レンズとその特徴

(a) 撮像サイズ

放送用カメラの撮像デバイスは撮像管から出発し、その際、管の外径寸法でイメージサイズを表したため実際の撮像範囲と異なるが、現在もその表し方が使われ続けている。

放送用レンズの主流は 2/3" であるが 1/2" や 1/3" の撮像サイズのカメラもコストメリットがあるため使用されており、対応したレンズも用意されている (表 2・11)。

表 2・11 イメージサイズ

	対角	水平	垂直
2/3"	11.0	9.59	5.39
1/2"	8.0	6.97	3.92
1/3"	6.0	5.21	2.94

アスペクト比 16 : 9 単位 mm

(b) 構成

一般的な放送用ズームレンズはフォーカス群、ズーム群、リレー群、エクステンダ群から成り立っている。レンズ枚数は 30 枚から多いもので 40 枚に達する (図 2・115)。

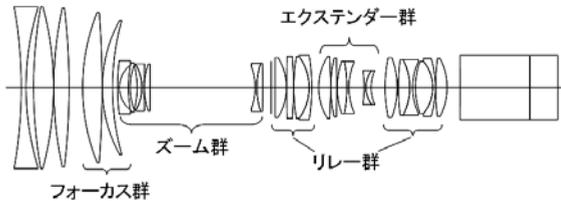


図 2・115 放送用ズームレンズの構成

フォーカス群：物体に焦点を合わせるため光軸方向に移動する。前に装着するフィルタが回転しないように固定群を前に置くインナーフォーカスとなっている。

ズーム群：通常 2 群 (バリエーター群とコンペンセータ群) が光軸方向にカムに従って移動して焦点距離を変える。ズーム比は大きい物で 101 倍に達する。

リレー群：ズーム群により形成された像を撮像面にリレーする。中間にアフォーカル部をもつ。リレー群の前には絞りがあり、カメラからオート制御される。

エクステンダ群：リレー群のアフォーカル部に挿入することにより全体の焦点距離を望遠側へシフトする。シフト量はほとんどのレンズが 2 倍。挿入時の F 値は同じ倍率だけ暗くなる。

図 2・115 ではレンズの後ろにカメラに内蔵されている分解光学系相当の補正ガラスが加えてあるが、光学設計では必ず補正ガラス分を考慮して設計が行われる。

(c) 種類

放送用レンズは、その形状から箱形タイプとハンディタイプに大別される。更に前群のレンズ構成の違いから、スタジオタイプとフィールドタイプに分けられる (図 2・116～図 2・119)。

箱型タイプ：高倍率だが大型で重く、カメラとともに三脚で利用。

ハンディタイプ：肩担ぎのカメラに装着される小型・軽量のズームレンズ。



図 2・116 箱形タイプ



図 2・117 ハンディタイプ

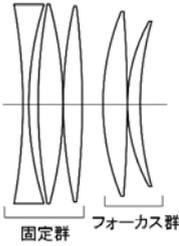


図 2・118 フィールドタイプ構成例

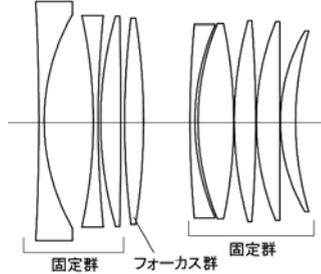


図 2・119 スタジオタイプ構成例

表 2・12

	構成	質量	距離による収差変動	フォーカスによる 画角変化
フィールドタイプ	固定群+フォーカス群	軽い	大	大
スタジオタイプ	固定群+フォーカス群+固定群	重い	小	小

フィールドタイプとスタジオタイプは主に箱形タイプのレンズで区別されて呼称される。すなわち、フィールドタイプはスポーツ中継など遠距離の被写体を撮影するために屋外で使用され、100倍を超える高倍率のものまでである。スタジオタイプは至近距離を短くできるため主に屋内のスタジオで使用される。それぞれの名前のとおりである。ハンディレンズでも両方のタイプの前群があるが、スタジオタイプはレンズ枚数が多く、重くなるため機動性の点では不利となる(表 2・12)。

(d) ズーム

ズームによる光線の通り方の変化を示す(図 2・120)。図 2・120 で示した典型的なレンズ構成の場合、光線の通り方は、絞りから後では、後述するランピングによる影響を除けば、基本的にズームで変化しない。フォーカスを含む前群での中心光束は、ズームによる入射瞳径の変化に伴い、広角側では細く、光軸近くを通るのに対し、望遠側では太くなり、ほぼレンズ全面を通ることになる。このため、前群のレンズの面精度や偏芯は望遠側の光学性能に大きな影響を及ぼす。

望遠側においてズームによる入射瞳径の増大が前群レンズの外径に制約されると、F値が低下することになる。これをランピング(Ramping)と呼ぶ。図 2・120 のようなタイプのズームレンズでは、ある焦点距離まではF値が一定で、ランピングポイントを境に下降する。小型化が重要なハンディタイプや高ズーム比のレンズではランピングは避けられない。

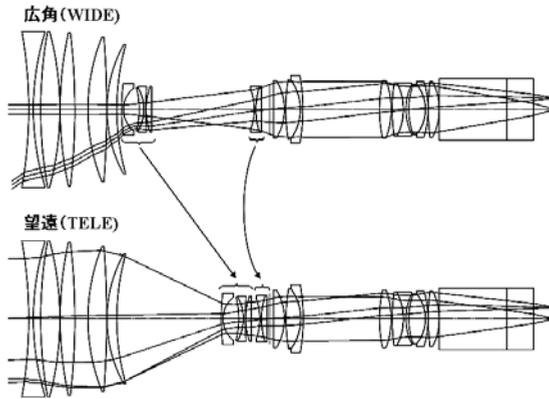


図 2・120 ズームレンズの光路図

図 2・120 の例はズーム群がそれぞれ負、負のパワー^{*1}をもつ構成であるが、負、正のタイプもある。このタイプは主に箱形タイプのズームレンズに使用される。負、正タイプはズーム比を大きくすることができるが、正の群を通過した光束は収束するので、レンズ全体の大きさと比較して長いバックフォーカスを出すのが困難となる。このため高倍率の要求が強く、大きさ、重さの制限が緩い箱形タイプのズームレンズに採用される。

(e) リアフォーカスタイプ

撮影におけるサブカメラとして小型軽量のハンドヘルドタイプと呼ばれるカメラが普及している。多くの場合、レンズは民生用ムービーで一般的なリアフォーカスタイプと呼ばれる構成となっており、防振、AF 機能が可能となっている (図 2・121)。

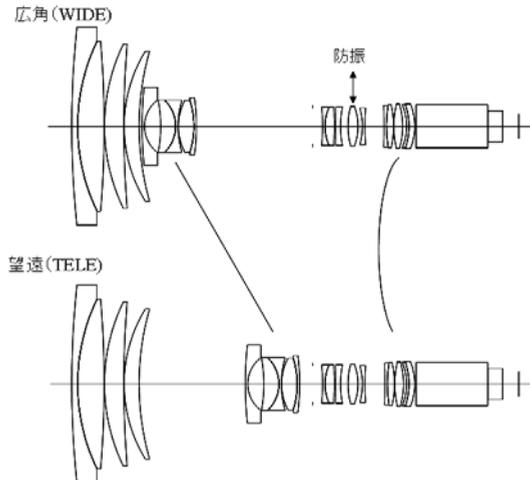


図 2・121 リアフォーカスタイプ構成例

^{*1} レンズ群の焦点距離が正のとき、正のパワーをもつという。

このタイプの特徴は、第1群、第3群が固定で、第2群がズームを担い、第4群がズームによる像面移動の補正（コンペンセーター）を行うとともに、フォーカスも同時に行うことにある。第4群の後にズーム、フォーカスで移動しない固定群がある場合もある。

絞りは第3群に含まれるが、絞り以降の光線の通り方が、ズームで異なるため、ズームによるF値の変化が広角側から望遠側まで連続的に低下する。

第3群のレンズの一部、または全部を光軸に垂直な方向に振動させて防振を行う場合が多い。第4群の質量は前群の径が大きいレンズに対して十分軽く、AFに有利となる。

(2) デジタルシネマ用レンズ

映画やコマーシャルの撮影で使われてきたフィルムカメラが、デジタル化されたビデオカメラに変わって、デジタルシネマと呼ばれ、専用のレンズが開発されている。開発の初期では放送用ハイビジョンの2/3"カメラが転用されたため、レンズも2/3"であったが、シネフィルムサイズのイメージサイズをもつ単板カメラが登場し、レンズは大きく重くなる傾向がある。また、デジタル1眼レフカメラでの動画撮影も盛んになっている（**図2・122**、**図2・123**）。

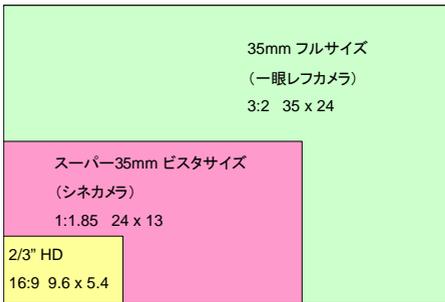


図2・122 イメージサイズ比較



図2・123 シネレンズ（PLマウント）

(3) 大画面化とその問題

一般にイメージサイズの拡大はレンズの大型化をもたらす。それでは高画素化と小型化を両立させるために画素サイズを小さくすればいいかという、そうはならない。画面サイズ

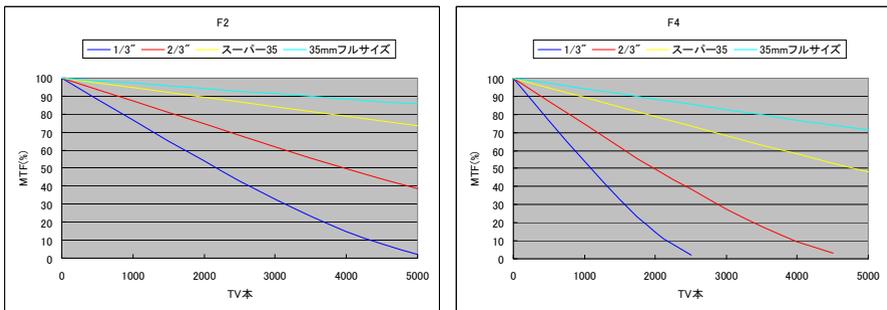


図2・124 イメージサイズの違いによる理想レンズのMTF

と理想レンズの周波数特性の関係を見ると、画素数が同じなら同じ TV 本を得るためには、画面サイズが小さいほど周波数が高くなるので、MTF は劣化する。F 値が暗いほどこの傾向は大きい (図 2・124)。

よって、高解像力を求めるなら大画面化は避けられない。実際、デジタルシネマでは米国の業界団体 Digital Cinema Initiatives, LCC (DCI) が 2K, 4K と呼ばれるフォーマットを策定し、また日本の NHK はスーパーハイビジョン (SHV) の実用化を進めている (表 2・13)。

表 2・13 画素数の比較

	デジタルシネマ			
	HD	2K	4k	SHV
垂直方向	1080	1080	2160	4320
水平方向	1920	2048	4096	7680

実用に耐える大きさ、質量で、いかに要求性能を満足させたレンズを設計していくかが、大画面化の流れの大きな課題である。

■参考文献

- 1) 岸川利郎, “ユーザーエンジニアのための光学入門,” オプトロニクス社, pp.252-275, 1990.
- 2) FUJINON TELEVISION LENSES 2011 総合カタログ.
- 3) FUJINON CCTV LENS カタログ, Ver.5.4, Feb. 2010.
- 4) 特許第 4210272 号.
- 5) 三谷公二, 島本 洋, 山下誉行, 塚本 拓, 松岡正人, 矢作 智, “スーパーハイビジョンカメラ,” 放送技術, vol.60, May. 2007.
- 6) “NE 用語,” デジタルシネマ, Tech-On!,
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20060310/114565/>

2-8-2 色分解光学系ダイクロイックプリズム

(執筆者: キヤノン株式会社放送機器開発センター) [2010年12月 受領]

2-2 節「カラー撮像方式」で述べたように、カラー撮像方式は多岐にわたる。本項では、現在も主流である 3 板式のプリズムを使用した色分解光学系について説明する。

(1) 色分解光学系の構成

カラーTV カメラには、色分解のための光学系が内蔵されている。この光学系はカメラの色再現性を左右するばかりでなく、撮像素子の配置、したがってカメラのデザインにまで影響を及ぼす非常に重要な部分である。3 板式のプリズムには主に 2 タイプある。一つは、エアギャップがあるプリズムであり、もう一つはエアギャップがないプリズムである¹⁾。

(a) エアギャップがあるプリズム

フィリップス社で開発されたためフィリップスタイプと呼ばれているプリズムであり、概略図を図 2・125(a)に示す。特徴は、第 1 プリズムと第 2 プリズムの間に設けられたエアギャップであり、二つのダイクロイック膜による選択反射と第一面とエアギャップ面の全反射とを巧みに利用して 3 色に分解している。

図中、プリズムの出口には、余分な色をカットし、色再現性を向上させるためのトリミングフィルタを置いている。

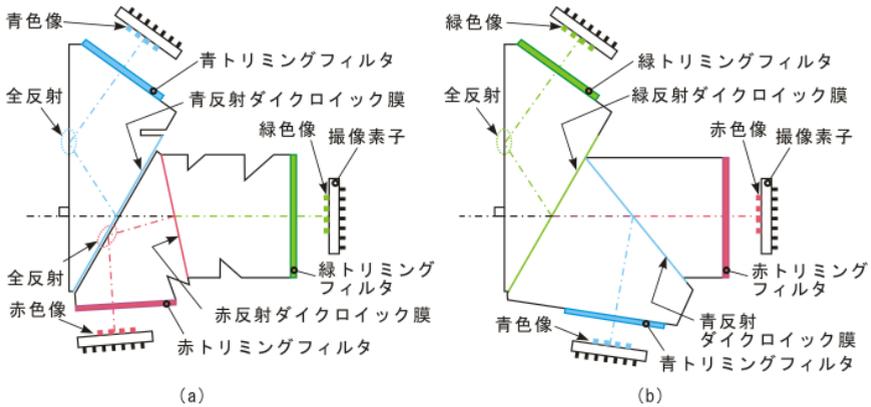


図 2・125 二つのプリズムタイプ

(b) エアギャップがないプリズム

フリップスタイプの特徴であるエアギャップがないので“ギャップレス”と呼ばれる。例として、緑、青、赤の順に色分解するプリズムの概略図を図 2・125 (b) に示す。

その特徴の一つは、第 2 プリズムから射出する青色像は、一度（奇数回）しか反射しないため、緑色像や赤色像のミラー（反転）像となることである。撮像管の時代、電子ビームの走査方向を反転させることで回避可能であったが、長い撮像管をどう配置するかなどレイアウトに考慮が必要だった。また、固体撮像素子の時代を築き上げた CCD においては、走査方向を容易に反転することはできなかった。しかし、電子デバイスの発展に伴い、信号処理回路にて像の反転を可能としているばかりでなく、昨今では MOS 型固体撮像素子を使い、信号処理回路の追加なくして像を反転することができるなど、このタイプのプリズムを搭載する技術的なハードルが低くなっている^{2),3)}。

なお、上記二つのタイプを含め、プリズム方式のカメラでは、その光学系を対象にガラス補正されたレンズを使用しなければならない。

(2) 色分解光学系の構成

色分解光学系の構成としては、図 2・126 のように、色分解プリズムの前面に、ターレットなどにより交換可能な色温度変換フィルタ（CC フィルタ）や、ND フィルタを設け、更に最前面には水晶フィルタを置く構成がほとんどである。カメラによっては色温度変換フィルタがなく、このフィルタの機能を電氣的に補う製品もある。また、水晶ローパスフィルタには、IR カットフィルタが一体化されているのが一般的である。

(3) HDTV カメラ用プリズム

HDTV システムでは、従来の SD のシステムに較べ 2 倍以上の高性能を要求される。そのため、レンズの性能を最大限に引き出すためにプリズムの規定も行われている。2/3 型 HD シ

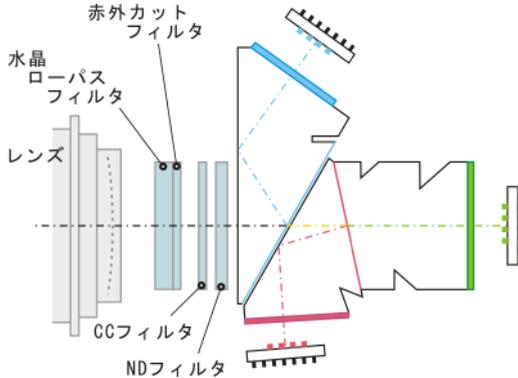


図 2・126 色分解光学系の構成

システムでは、色収差のずれが光学性能に大きな影響を及ぼすので、表 2・14 に示すように、プリズムの材質と厚みも規定された。また、HD プリズムの製作には加工精度が要求される。面精度、角度精度が MTF に影響するからである。

HDTV システム以前は、レンズマウントや電気インタフェースがカメラメカにより互換性がなかったため、ユーザの混乱があったが、HDTV システム以降では規格化を先行させることにより互換性を確保しユーザの利便が図られるようになった⁴⁾。

表 2・14 2/3 形 HDTV カメラ用プリズム

撮像面でのオフセット	R-G : +10 μm	B-G : +5 μm
ガラス長	46.2 \pm 0.5 mm ガラス 1 : 屈折率 1.52~1.75 標準値 1.612 (BaF 52) アッペ数 46.5 \pm 4.0 ガラス長 33.0 \pm 4 mm ガラス 2 : BK 7 相当 ガラス長 13.2 \pm 4 mm	
フランジバック	48.0 \pm 0.01 mm (空気換算)	

(4) 色分解特性

色分解プリズムの分光特性は、そのカメラの色再現性に多大な影響をもっている。

図 2・125 に示すように、色分解プリズムはダイクロイックミラーによる選択反射と全反射とを巧みに利用して、入射光を 3 色に分解する。

ダイクロイックミラーとは、透過帯と反射帯とを分ける境界に急激な変化を与え、可視光を 2 色に分解するエッジフィルタの一種であり、ダイクロイックフィルタなどの呼び方もある⁵⁾。またそれは、主に誘電体を材料とした屈折率の異なる層を数十層重ねて、複数の光路を通った光線の光路差に基づく光の干渉を利用した薄膜コーティングである (図 2・127(a))。その形成には、真空蒸着法が一般的ではあるが、近年では真空蒸着法を発展させたイオンアシスト法やイオンプレーティング法、スパッタを利用したスパッタ法などが使われている。

例として、図 2・127(b) に青反射ダイクロイックミラーの分光特性の一例を示す。

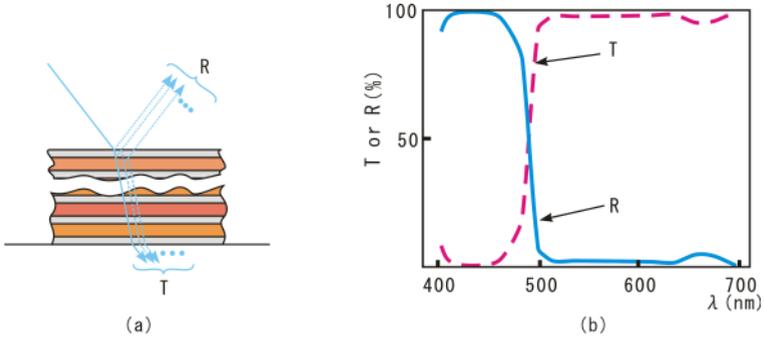


図 2・127 ダイクロイックミラー及び青反射ダイクロイックミラーの透過反射特性

ダイクロイックミラーは透過波長帯でも 100 % 完全に透過するわけではなく、わずかながら反射が残る。この残留分は、ほかの色チャンネルに混色し色再現性を低下させたり、ゴーストやフレアの原因となったりする。残留成分をカットしたり、ゴースト・フレアを防止する目的で、各チャンネルの出口にトリミングフィルタを配置したりするのが一般的である。また、トリミングフィルタに、分光特性を整形し、中間色の色再現性を良くする機能を合わせもたせることもある。このようにして得られる総合分光特性の例を図 2・128 に示す。

色分解光学系はダイクロイックミラーを使用しているため、ダイクロイックミラーの物理的な性質に起因する三つの現象をとまなう。以下では、簡単ではあるがそれらを紹介する。

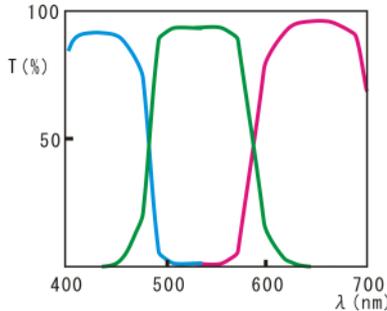


図 2・128 総合分光特性の例

(a) ホワイトシェーディング

画面中心でホワイトバランスがとれていても、画面の上端・下端にマゼンタまたは緑の色がつく現象であり、この現象はダイクロイックミラーへの入射角の違いにより生じる (図 2・129(a))。

ダイクロイックミラーは入射角が異なると薄膜コーティング中の光路差に違いが生じ、干渉の具合が変わって分光特性に変化が起こる。入射角が大きくなるほど特性は短波長側に移動する。例として図 2・129(b)に、図 2・127(b)に例示した青反射ダイクロイックミラーの角度特性変化を模式的に示す。図 2・130(a)を見て分かるように、画面中心に向かう光線 s は入射

面(面①)に垂直に入射するが、青反射ダイクロイックミラー(面②)及び赤反射ダイクロイックミラー(面③)には、角度をもって入射する。光線sが青反射ダイクロイックミラーに入射する角度を、図2・129(b)では基準入射角と表現した。図中aの光線は、面②へ基準入射角より大きい角度で入射するので、図2・129(b)では点線のようになる。また、図中bの光線のときは入射角が小さくなり、基準入射角の特性を挟んで反対側へ現れる。基準入射角が 0° のときは、物理的に、+と-に差異がないため、常に基準入射角の特性から短波長側への移動となる(角度を測る方向は、紙面上反時計方向をプラスとしている)。

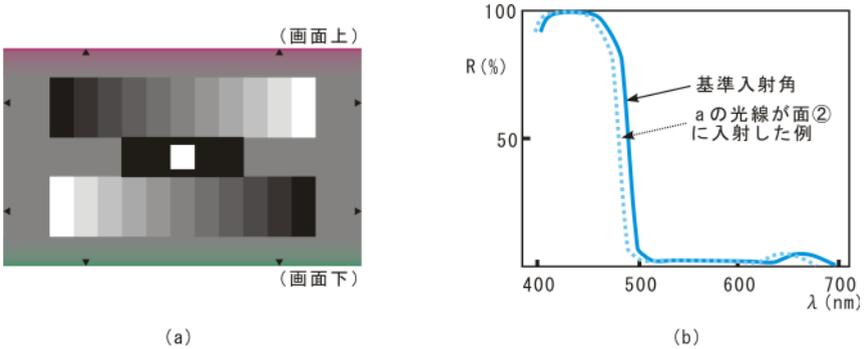


図2・129 ホワイトシェーディング現象と青反射ダイクロイックミラーの角度変化の例

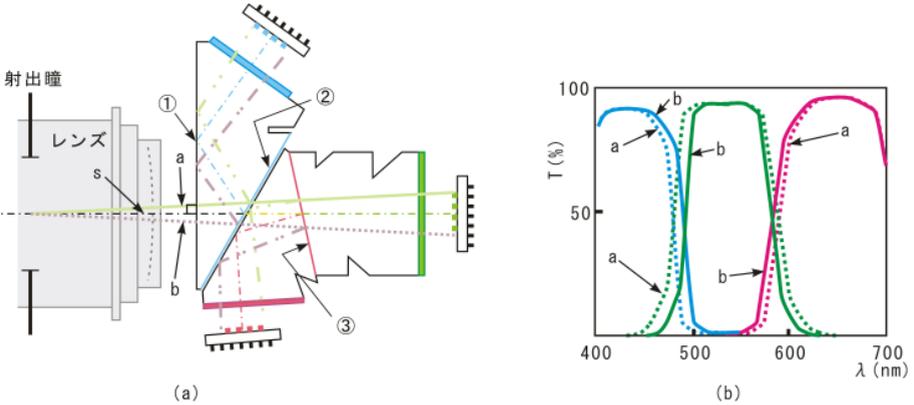


図2・130 レンズの射出瞳とホワイトシェーディングの関係

レンズからの光束は射出瞳から射出するように出てくるので、図2・130のように、画面の上端と下端とに向かう光線は色分解プリズムに入射する角度が異なり、特性が変化する。これにより、画面上下に緑あるいはマゼンタのシェーディングを生じるのである。

一般的にズームレンズは、ズーミングや絞りにより変化するビネティングの影響で、射出瞳は若干変動する。これにともないホワイトシェーディングも変化する。

このホワイトシェーディングはレンズの状態(ズーム位置、絞りの値、エクステンダの有

無など) が分かれば射出瞳の位置を把握できるため、カメラ側で電氣的に補正可能である。

(b) ボケ像の色づき

ピントの合っている状態では問題ないが、被写体にピントが合っていない場合に、ボケ像の上下に色づきが見える。これは、ホワイトシェーディングと同様に、ダイクロイックミラーへの入射角の相違によって分光特性が変化するためである。

図 2・131 に示すように、*a* と *b* の光線はダイクロイックミラーへの入射角が異なるために、*a* は緑、*b* はマゼンタに寄った色となっている。ピントの合った状態ではこれが一点に集まり平均化されて色づきはない。ピントが合っていない状態では、ボケ像の周縁に近いほど緑とマゼンタに色づきが濃くなる。

この現象は一点に集まる光線の開き角が大きいほど、すなわち *F* 値が小さいほど目立ちやすくなる。また、被写体の奥行き情報はカメラで認識するには困難であるため、ボケの状態を把握できない。そのため、電氣的な補正は困難である。

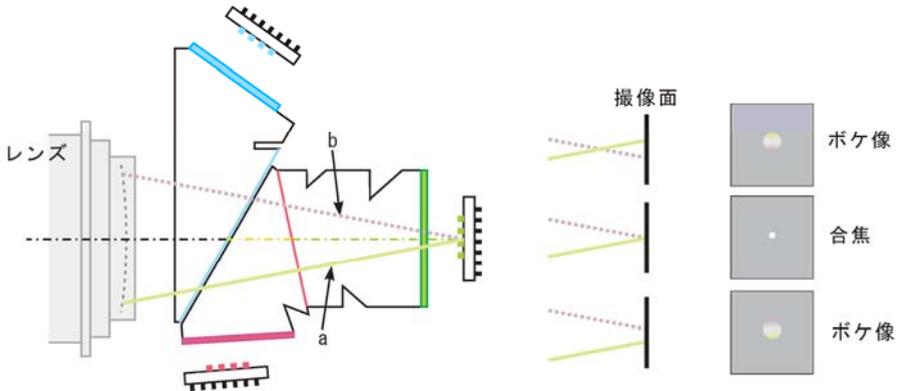


図 2・131 ボケ像の色ずれ

(c) 偏光による特性の変化

光は横波なので、振動方向が 90° 異なる *S* 偏光 (入射面に垂直) 成分と *P* 偏光 (入射面に平行) 成分が混合したものと考えることができる。自然光には *S* 偏光と *P* 偏光が均等に含まれるが、光沢のある被写体 (ガラス表面や水面など) で反射した光は、どちらかの成分に偏った光となる。

図 2・132 に示すように、ダイクロイックミラーは *S* 偏光と *P* 偏光とで特性が異なるため、このように偏光が偏った光に対しても実際とは異なった色に見えてしまう。これはプリズムの前に $\lambda/4$ 板を置き、入射してくる直線偏光を円偏光などに変えることによって防ぐことができる⁹⁾。

$\lambda/4$ 板として光学的に安定した性能を示す水晶フィルタを使用することが多いが、水晶フィルタは素材コストが高いのが欠点である。最近では、カメラの固体撮像素子化に伴いプリズム前面にローパスフィルタを配置する。このフィルタに水晶がよく使われることを利用して、これに $\lambda/4$ 効果を合わせもたせていることが多い。これにより、偏光の影響を抑制することができている。

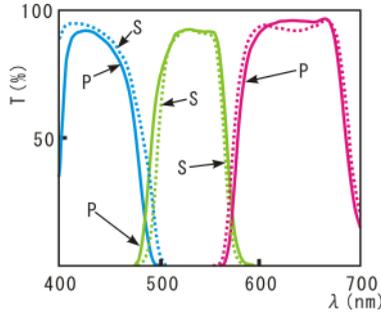


図 2・132 色分解プリズムの偏光特性例

■参考文献

- 1) 特開昭 50-159618, “三色色分解用プリズム,” トキナー光学株式会社.
- 2) “特集技術開発 30年のあゆみ(1) ビデオカメラ,” 松下テクニカルジャーナル, vol.51, no.2, pp.34-41, Apr. 2005. pdf.
- 3) 永井 正, 豊村浩一, 村上正洋, 上田祐士, 黒木健一, 床井雅樹, “デジタルハイビジョンムービーの高画質化技術,” パナソニックテクニカルジャーナル, vol.55, no.1, pp.45-50, Apr. 2009. pdf.
- 4) BTA-S-1005B, “高精細度テレビジョン方式スタジオ機器の相互接続,” 社団法人電波産業会, p.19.
- 5) 小椋山光信, “光学薄膜フィルター,” 株式会社オプトロニクス社, p.158, 2006.
- 6) 映像情報メディア学会(編), “テレビジョンカメラの設計技術,” コロナ社, pp.126-154, 1999.
- 7) 和久井孝太郎, “ITV カメラ,” 日本放送出版協会, pp.113-122, 1973.
- 8) “TV OPTICS,” キヤノン株式会社, pp.58-60, 2007.
- 9) 特開平 2-106703, “撮像光学系,” オリオン光学工業株式会社.

2-8-3 光学 LPF

(執筆: 長原脩策) [2010年12月 受領]

一般には光学 LPF として, 光波長領域における LPF, 及び空間周波数領域における LPF の 2 種類を指す. 本項では後者について論じる.

色信号を空間的にサンプリングする空間カラー多重化ビデオカメラ方式¹⁾では, 被写体像中に含まれる高域空間周波数成分はアーチファクト発生の原因となるので, 高域空間周波数成分を抑制する光学 LPF が必要である. 光学 LPF の要求条件としては, 低域空間周波数成分域での MTF が高い, 安定性が高い, 加工条件が容易, 低コスト, 及びレンズ絞りや挿入位置のマージンが大きいなどがある.

従来, 写真感光材料の粒状性や写真製版のアミ点などの光学雑音を除去するために, いろいろなフィルタが解析, 研究²⁾されてきた. しかし, これらのフィルタを空間カラー多重化ビデオカメラに直接利用することは光学 LPF の特性上好ましくない. 空間カラー多重化ビデオカメラ用として現在までによく知られている光学 LPF としては, レンチキュラーレンズを利用したフィルタ, 回折格子形位相フィルタ及び複屈折フィルタがあり, 視感度補正フィルタと組み合わせて使用している. また, 空間サンプリングの方向それぞれに対する LPF を組み合わせた複合フィルタとして構成している.

(1) レンチキュラーレンズ

レンチキュラーレンズを利用した光学 LPF は、レンチキュラーレンズによるボケを利用したもので、挿入位置、レンチキュラーピッチ、曲率をサンプリングフィルタに対応して適当に選択、設計でき、空間多重化ビデオカメラの開発初期にはよく使用されたが、現在ではほとんど使用されていない。

(2) 回折格子形位相フィルタ

回折格子形位相フィルタ³⁾はインコヒーレント光に対してレンズの MTF が瞳関数の自己相関関数であることを利用し、透明基板に位相差を与える縞状の薄膜を作って瞳関数が増加する位置に挿入する。位相フィルタの挿入による瞳関数の位相項の変化を利用して LPF 特性をもたせる。位相フィルタでは位相格子に入射した光束のいろいろな次数の回折光が重なり合い、LPF 特性を形成する。

位相差 $\Phi(x) = (2n\pi h(x))/\lambda$ を有する位相格子の MTF : $H(\xi)$ は

$$H(\xi) = \frac{\int H(x)H^*(x - \xi)dx}{\int |H(x)|^2 dx}$$

$$H(x) = \exp(j\Phi(x))$$

ただし、 f : 空間周波数、 λ : 波長、 $h(x)$: 格子形状(深さ)、 n : 基材の波長 λ での屈折率、 $\xi = \lambda \cdot L_{\text{opt}} \cdot f$ 、 L_{opt} : 位相格子から像面までの空気換算距離である。

回折格子形位相フィルタは、波長によって特性が本質的に変化するという色選択性を有しており、この特性を利用した光学 LPF の開発も行われている。また、格子形状をいろいろな形状に変化させる試みも行われている。

回折格子形位相フィルタの材料としては、非共役 2 重結合を有するメタクリル酸エステル系重合体に芳香族ケトンを加えた有機光学材料やプラスチック材料を使用したものなどの報告も多くなされている。

(3) 複屈折フィルタ⁴⁾

複屈折フィルタは所望帯域内の MTF の高さ、レンズ絞りの影響による特性変化、挿入位置のマーゲンなどの点で最も優れており、空間カラー多重化ビデオカメラ用として大勢を占めている。

複屈折フィルタは、基本的に二重像が一方にのみ生じることを利用しているもので、**図 2-133**に複屈折フィルタにおける垂直入射光の正常光、異常光分離の関係を示す。

正常光、異常光の屈折率が n_1 、 n_2 であれば、O-N の厚さの結晶中を進行する間に光のずれ C-B を生じる。C-B の間隔は n_1 、 n_2 、 β 及び O-N の関数である。結晶軸と面の成す角 β と光路の屈折角 α との間には、

$$\tan \alpha = \frac{(n_1^2 - n_2^2) \cdot \tan \beta}{(n_1^2 + n_2^2 \cdot \tan^2 \beta)}$$

の関係があり、 $\tan \alpha$ が最大になるように β を設計して O-N を最小にする。複屈折フィルタの

材料としては方解石、水晶に実用性があるが、安定性、加工性、材料の入手の難易から水晶が適当である。水晶では $n_1 = 1.553$, $n_2 = 1.544$ であるから $\beta \approx 45^\circ$ において $\tan \alpha$ が最大となり、 $\tan \alpha = 5.81 \times 10^{-3}$ となる。

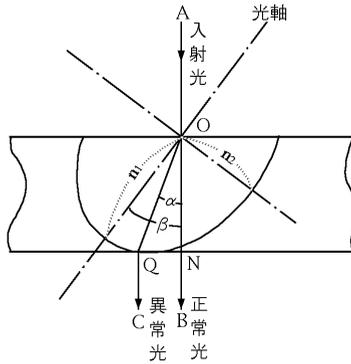


図 2・133 複屈折による二重像の生成

複屈折フィルタでは二重像を利用するので、MTF: $A(\nu)$ は余弦特性となり、

$$A(\nu) = \left| \cos \left(\frac{\pi \nu}{\nu_0} \right) \right|$$

である。ただし、 ν_0 : 複屈折によるずれの空間周波数である。なお、このフィルタを多重使用するときには偏光解消板を介することが必要である。

■参考文献

- 1) 長原脩策, “撮像面多重利用カラーテレビカメラの現状と動向,” 昭 48 連大, 273.
- 2) 佐柳和男, “Optical Noise Filter,” 応用物理, 27-10, pp.623-632, Oct. 1958.
- 3) R. L. Townsend, “Spatial-Frequency Filter for a Kell-Type Color Camera,” J. Appl. Opt, pp.2463-2472, 1972.
- 4) 長原脩策, 小林義和, 信時三郎, 高木俊彦, “周波数多重化単管カラーカメラの開発,” テレビ誌, 26-2, pp.104-110, Feb. 1972.

■8群-4編-2章

2-9 カメラ機能

2-9-1 露出制御

(執筆者：豊田堅二) [2011年3月 受領]

デジタルカメラやビデオカメラなどの露出制御は、銀塩カメラのそれと基本的には変わらない。すなわち、露出量を撮像素子の特性に応じた適正なレベルに調整することとすることができる。

(1) 適正露出の条件

露出量というのは、撮像面に入射する被写体光の強さに露出時間を乗じたもの、つまり像面照度の時間積分で表わされる。

像面の照度は被写体の明るさとレンズの明るさ（絞り値）に関連し、また良好な結果を得るための適正露出量は撮像感度に依存する。つまり、露出に関するパラメータは被写体の明るさ、撮像感度、絞り値、露出時間の四つのものであり、適正露出を得るための条件は次式で表わされることが知られている。

$$\frac{A^2}{T} = \frac{BS}{K}$$

ここに、 A ：絞りのF値、 T ：露出時間、 B ：被写体輝度、 S ：撮像感度、 K ：定数。

なお、被写体輝度は画面内で変化するわけだが、ここでは代表的な値をとる。

この適正露出の条件式の四つのパラメータのそれぞれ2を底とする対数をとって、変形したものがよく用いられる。すなわち

$$Av + Tv = Bv + Sv$$

ここに

$$Av = 2 \log_2 A$$

$$Tv = \log_2 \frac{1}{T}$$

$$Bv = \log_2 (k_1 B)$$

$$Sv = \log_2 (k_2 S)$$

ここで、 Av と Tv の和を Ev (Exposure Value) と呼び、同じ露出を与えるシャッタ速度と絞り値の組合せを表す数値として用いられている。

四つのパラメータのうち、被写体輝度は通常撮影者はコントロールできない。したがって、露出制御とは「被写体輝度」を測定し、その結果から「撮像感度」、「絞り」、「露出時間」を制御して適正露出を得るものと考えることができる。

(2) 露出時間とシャッタ

上記のパラメータのうち、露出時間について少々説明しておこう。銀塩カメラではフィルムに光を当てる時間を制御するシャッタが開いている時間が露出時間であるが、デジタルカメラなどで用いられる撮像素子の場合は入射光に応じて各画素に蓄積される電荷の量が露

出量に相当することになる。この電荷の蓄積時間が露出時間に相当する。

デジタルカメラやビデオカメラの場合、この露出時間をコントロールする方法としては、以下の3種類がある。

- (a) 銀塩カメラと同様に機械的に開閉するシャッタを用い、撮像素子への入射光が当たる時間を制御する。
- (b) 電荷をリセットした時点から読み出しの時点までの時間を制御して露出時間とする。
- (c) 露出の開始は電荷のリセット時点とし、露出の終了は機械的なシャッタを閉じて行う。

デジタル一眼レフやいわゆるミラーレスカメラでは(a)の方法をとっている。これはレンズ交換可能とするためにフォーカルプレーンシャッタを使用する必要があるからである。

(b)の方法はカムコーダなどの動画カメラで用いられているが、機械的なシャッタを省略できるというメリットの反面、インタレース読み出しのCCDやxyアドレス型の撮像素子では画面上の位置によって露出のタイミングが異なってくるという問題点がある。

つまり、インタレース読み出しのCCDではフィールドごとに読み出しのタイミングが異なることから、水平ラインごとの露出タイミングの違いが出てくる。またxyアドレス型の撮像素子ではローリング読み出しのため、画素ごとに少しずつ露出タイミングがずれる。

これは動体の歪みやずれ、ストロボの使用条件が限られるという問題につながり、動画ではある程度許容できるものの静止画では問題が大きいので携帯電話内蔵のカメラなど簡易な機種のみに用いられている。

ほとんどのコンパクトデジタルカメラでは(c)の方法を用いている。全画素の蓄積電荷を同時にリセットして露出を開始し、機械的なシャッタ(レンズシャッタ)を閉じることにより、露出を終了して光を遮断した状態で信号の読み出しを行う。こうすることにより、インタレース読み出しやローリング読み出しによる読み出しタイミングの違いの影響を回避している。

(3) 露出制御

実際にカメラの露出を制御する方法としては、シャッタ速度と絞り値をユーザが手動で設定するマニュアル露出と、カメラが自動的にシャッタ速度や絞り値を制御する自動露出とがある。現行のカメラではすべて自動露出(Automatic Exposure: AE)を基本としており、比較的高級機ではユーザの好みに応じてマニュアルで露出が設定できるようになっている。

被写体輝度の測定から B_v が求まり、設定された撮像感度 S_v とから適正露出を得る E_v が算出される。ただ同じ E_v でも絞り値とシャッタ速度の組合せは無数にあり、一義的に決まらない。そこで、例えばカメラが絞り値を自動的に制御するとすれば、シャッタ速度の方はユーザが動体の静止機能などを勘案して決めることになる。これを「シャッタ速度優先AE」と呼んでいる。

逆に、ユーザが必要とする被写界深度などから絞り値を設定し、カメラがシャッタ速度を自動的に制御するのが「絞り優先AE」である。

シャッタ速度にしても絞り値にしても、ユーザが設定するのは初心者には難しい。そこで各 E_v に対してはシャッタ速度と絞りの組合せを一つに限定し、ユーザが何も設定しなくても無難な値に両方を制御するようにしたものが「プログラムAE」である。

当初はシャッタ速度と絞り値のどちらか一方を制御するのがやっとだったので、必然的に

シャッタ速度優先 AE か絞り優先 AE となったが、やがて技術の進歩にともなって両方の制御機構を組み込むことが可能になり、特に高級カメラのデジタル一眼レフの分野では、両方の制御機構を組み込んでシャッタ速度優先 AE、絞り優先 AE、プログラム AE のなかから好みなものを選択できる、マルチモード AE が一般的になってきた。

(4) コンパクトデジタルカメラの露出制御

コンパクトデジタルカメラでは、通常は別途被写体輝度測定用の測光素子を設けることなく、撮像素子の出力を利用して露出制御を行う。撮像画像のモニタのために常時撮像素子から画像信号を読み出しているため、読み出した画像信号のレベルが適正かどうかをその都度判断し、その結果に応じて、絞り、積分時間、アンブレインなどのパラメータを修正して、また読み出す。これを繰り返して適正露出に追い込んでいくのである。

撮像素子の中で読み出した領域によって露出の判断への寄与率を変えたり、領域によるレベルの違いを適当なアルゴリズムを用いて処理することでより、正確な適正露出を得るような配慮がなされているが、更に進んで人間の顔に相当する領域を検出して、それが望ましいレベルになるように制御したり、読み出した画像の解析結果から撮影シーンを判断するなどして、より失敗のない露出制御の工夫がなされている。

プログラム AE が基本であるが、高級機ではシャッタ速度優先 AE、絞り優先 AE などの AE モードが切り換えられるものもある。

(5) デジタル一眼レフの露出制御

デジタル一眼レフでは、通常は撮像素子を測光素子として利用できないので、銀塩の一眼レフと同様にファインダ光路中に別途測光素子を配置して撮影レンズを通過した被写体光を測光している。また、露出の制御に関してはシャッタ速度優先 AE、絞り優先 AE、プログラム AE、マニュアルが切り換えて使えるマルチモード AE が一般的である。

ただ、いわゆるライブビュー機能を備えた機種については、ライブビューモード設定時にはこの TTL 測光素子が使えなくなるので、コンパクトデジタルカメラと同様に、撮像素子の出力を利用して露出制御を行っている。

■参考文献

- 1) 豊田堅二, “デジタル一眼レフがわかる,” 技術評論社, pp.153-178, 2008.
- 2) 豊田堅二, “図解カメラのしくみ,” 日本実業出版社, pp.128-167, 2004.

2-9-2 オートフォーカス

(執筆: 豊田堅二) [2011年3月 受領]

カメラのオートフォーカスの原理としては大きく分けて、被写体までの距離を測定する方法と、被写体像の分析から焦点調節の制御を行う方法とがある^{1), 2)}。マニュアルフォーカスでは前者は連動距離計を用いた焦点合わせに相当し、後者は一眼レフなどでファインダスクリーンの被写体像を観察しながら焦点調節をすることに相当する。

(1) 距離の測定によるオートフォーカス

被写体までの距離を測定してそれに応じてフォーカシングのためのレンズ位置を調整する方法だが、この距離の測定には三角測量の原理が用いられる。カメラ上で一定距離 l だけ離れた二つの位置から同じ被写体を見るときに、それぞれの位置から被写体を見込む角度を検出し、その角度と 2 点間の距離 L とから被写体までの距離が分かる (図 2・134)。

通常、一方の角は直角とするので、

$$L = \frac{l}{\tan \theta}$$

角度 θ を求めるのに上記の二つの位置からの被写体像をそれぞれの撮像素子で受け、両方の被写体像の相関から算出する「パッシブ方式」と呼ばれる方法³⁾と、一方の位置から被写体に向けて赤外光を発し、他方の位置にはポジションセンサを配置して、被写体に反射してこのポジションセンサに入射した赤外光スポットの位置から算出する「アクティブ方式」と呼ばれる方法⁴⁾がある。

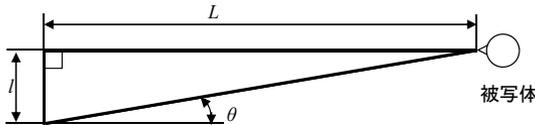


図 2・134 距離測定の原理

この、距離測定によるオートフォーカスは銀塩のコンパクトカメラに広く用いられたが、デジタルカメラではごく一部のコンパクトデジタルカメラで後述するコントラスト検出法の補助としてパッシブ方式が用いられるにとどまっている。

(2) 被写体像の分析 —コントラスト検出法

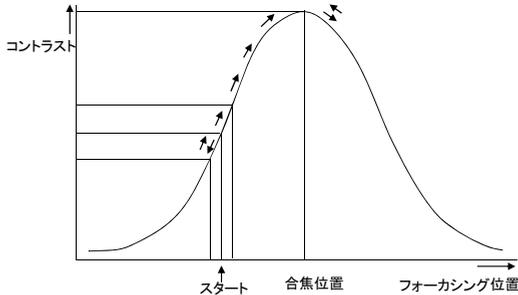
焦点合わせのもう一つの方法は、撮影レンズの焦点面あるいはそれに共役な面の被写体像を分析し、その結果から焦点が合っているかどうかを判定するもので、マニュアルフォーカスではレフレックスファインダによる焦点合わせがこれに相当する。

そのレフレックスファインダのファインダスクリーンのマット面で被写体像のボケをみながら焦点合わせをする動作を自動化したものが、「コントラスト検出法」のオートフォーカスと言えるだろう。

像の焦点が外れてぼけるということは、点の像に拡がりが生じて隣接する点の像と重なってしまう現象であるのでコントラスト、特に空間周波数の高いところでのコントラストが低下する結果となる。つまり、フォーカシングを調節してレンズを移動させながらその都度像のコントラストを調べ、コントラストが最大になったところでレンズを止めれば焦点を合わせることができる。レフレックスファインダのマット面による焦点合わせでは、目でコントラストをモニタしながら、この原理で合焦位置を探していると言える。

実際には撮像素子から信号を繰り返し読み出し、そのコントラストを算出する。簡単には信号の最大値と最小値の差の絶対値をとればよい。コンパクトデジタルカメラの場合は、いわゆるライブビューモード(プレビューモードともいう)で撮像素子の出力を繰り返し読み出しているため、その信号をオートフォーカスに使うことができる。

ただ、そのコントラストが最大になるところを探すのはそう簡単にはいかない。コントラストが最大であるかどうかを判定するには、フォーカスを少しずつずらしながらコントラストの変化を検出する方法をとる。コントラストが増大した場合は更に同じ方向に進め、減少した場合は逆方向にフォーカスを動かし、どちらの方向にずらしてもコントラストが減少する場合は、その点がピークと判定する(図2・135)。この方法は「山登り法」⁵⁾と呼ばれている。



フォーカシングを少しずつずらしながらコントラストのピークを探す

図2・135 山登り法の原理

コントラスト検出法は、主としてコンパクトデジタルカメラ、いわゆるミラーレスデジタルカメラ、ビデオカメラに用いられている。撮像素子の出力をそのままオートフォーカスに用いることができるので別途 AF 用のセンサを必要としないのが大きな特徴だが、上述のように双方向にフォーカスを動かす動作が必要なため、合焦速度が比較的遅いのが欠点である。

(3) 被写体像の分析 一位相検出法

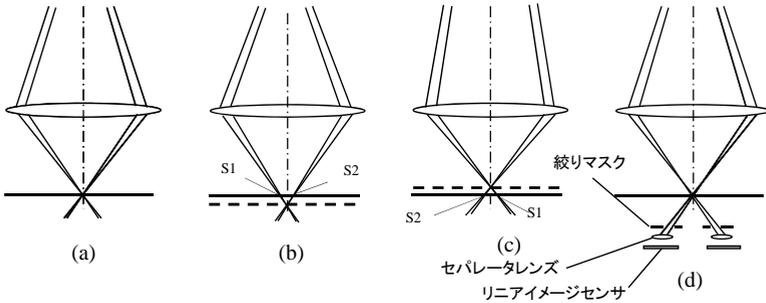
レフレックスファインダのマニュアルフォーカスにはスプリットイメージといって、像の上下のずれをみて焦点を合わせる方法がある。位相検出法⁶⁾のオートフォーカスは、この原理を応用したものとと言えるだろう。

撮影レンズの光軸から離れた、瞳の一部分のみを通った光でできた像は、フォーカシングに応じて横方向(光軸と直角方向)に動く。そこで光軸を挟んで対称の位置にある瞳からの像をそれぞれリニアイメージセンサで受けるようにすると、それらの像がフォーカシングによって互いに近寄る方向に動いたり遠ざかる方向に動いたりする。両方の像が同じ位置にきたときに合焦とすればよいわけである(図2・136)。

この方式のオートフォーカスのセンサは、通常は一眼レフのミラーボックスの床下に置かれる。メインミラーの一部をハーフミラーとし、そこを透過した光をサブミラーで底面にあるセンサに導くような光学系を用いている。

位相検出法のセンサは、上述のように2個のリニアセンサが一組となっており、個々のセンサに被写体像を再結像するとともに、入射光に対応する撮影レンズの瞳を制限するために、セパレータレンズと絞りが設けられている。当初は一組のみのセンサで画面中央部の被写体に焦点を合わせるものであったが、画面上のいくつかの点に対応する複数組のセンサを設け

た多点測距が登場し、その測距点も3点、5点といったものから数十点に及ぶものまで出現している。



有限距離の1点から出た光のうち、撮影レンズの射出瞳の左端を通過した光による像と右端を通過した光による像は、合焦位置(a)では像面上の1点に集まるが、後ピン(b)や前ピンになるとそれぞれ図のS1、S2で示すように左右にずれる。実際には、(d)に示すように絞りマスクとセパレータレンズで瞳上のそれぞれの位置からの光のみをイメージセンサで受けるような構成になっている。

図2・136 位相検出法の原理

位相検出法のオートフォーカスは、二つの像の位置と方向から合焦位置の方向と焦点外れの量が分かる。つまり、焦点合わせのためにレンズを動かすターゲットが明確になっており、コントラスト検出法のように合焦位置を行きすぎて戻るといったような動作が不要なため、合焦速度が速いという利点がある。反面撮影レンズの瞳の光軸から離れた部分を通過した光を使うため、瞳径が小さな暗いレンズでは使用できないという欠点がある。コントラスト検出法のように撮像素子の出力をそのままオートフォーカスのセンサとして利用することができず、別途センサとそれに付随する光学系が必要になるという点も欠点と言えよう。

(4) オートフォーカスの新たな技術動向

これまではカムコーダなどムービーカメラやコンパクトデジタルカメラにはコントラスト検出方式のAFが、デジタル一眼レフには位相検出法というように棲み分けがされていたが、一眼レフではないレンズ交換可能なデジタルカメラ、いわゆるミラーレス機の登場によって新たな変化が生まれてきている。

ミラーレス機は一眼レフファインダの光学系がないので、その途中から位相検出法のAFセンサに被写体からの光を分岐させる光学系を設けにくい。一方でレンズ交換可能というところから一眼レフ並のAFスピードが要求される。そこでコントラスト検出法のまま種々の改良を行ってAFスピードを上げたり、撮像素子に位相検出法のセンサを組み込んだりというような工夫がなされている⁷⁾。また、撮影光路中に大型のハーフミラーを置き、位相検出法のAFセンサに被写体光を分岐させるようにしたものも登場している。

■参考文献

- 1) 豊田堅二, “凶解カメラのしくみ,” pp.103-125, 日本実業出版社, 2004.
2) 豊田堅二, “デジタル一眼レフがわかる,” pp.179-200, 技術評論社, 2008.

- 3) 小西六写真工業カメラ技術部, “新型カメラの技術資料 コニカ C35AF,” 月刊写真工業, vol.36, no.1, pp.74-79, Jan. 1978.
- 4) キヤノン カメラ開発センター, “技術資料 キヤノン AF35M,” 月刊写真工業, vol.38, no.2, pp.69-74, Feb. 1980.
- 5) 石田順一, 藤村安志, “山登りサーボ方式によるテレビカメラの自動焦点調整,” NHK 技術研究, vol.17, no.1, pp.21-37, 1965.
- 6) 日本光学工業カメラ設計部, “技術資料 ニコン F3AF,” 月刊写真工業, vol.41, no.6, pp.82-86, May 1983.
- 7) 遠藤 宏, “撮像センサー位相差AF搭載コンパクトデジタルカメラの開発,” 日本写真学会第18回カメラ技術セミナー予稿, pp.28-31, 2010.

2-9-3 AWB

(執筆者: 猪熊一行) [2010年12月受領]

AWB (Auto White Balance) は, 異なる照明下における被写体の白い部分を正しく (白と) 再現するための技術である. また, より広義には異なる照明下における被写体の色再現を同一にするための技術も含まれる.

処理は, ①光源推定, ②WB (White Balance) ゲイン調整, ③色補正に大別され, 代表的な構成は図 2・137 のようになる.

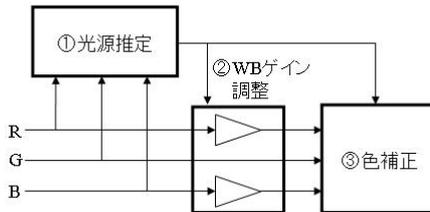


図 2・137 AWB 代表的構成図

光源推定は AWB 技術の要となるものである. かつては光源の光を直接受光するための専用センサを設ける方式 (外部センサ方式) も見られたが, 現在はコストの観点や処理技術の進化により映像信号から光源を推定する方式 (映像信号方式) が一般的になっている.

映像信号方式では, 直接光源の情報は得られないため, 一般的には被写体の中で無彩色と思われる領域を抽出し, そこから光源情報を得ている. そのため白抽出方式とも呼ばれる.

一般的な照明の分光は黒体放射軌跡の付近に分布することから, 色空間上で黒体放射軌跡を囲む適当な領域 (光源枠と名付ける) を設け, その領域内に入るデータから光源を推定する. 光源枠設定の一例を図 2・138 に示す. 色空間として R/G, B/G を使い, 色平面上で黒体放射軌跡の周辺に白熱灯, 夕日, 水銀灯, 白色蛍光灯, 昼光色蛍光灯, 晴天, 曇天, 日陰の各光源枠を設定している.

撮像された被写体データから上記光源枠のデータを抽出する具体的方法としては, 画素単位で光源枠に入るかどうかの判定を行う方法, 画面を適当なエリアに分割し, その中で積算されたデータから判定を行う方法, 更にはエリアごとに画素単位の判定を行いエリアごとに光源推定を行う方法などの様々な方法が取られている.

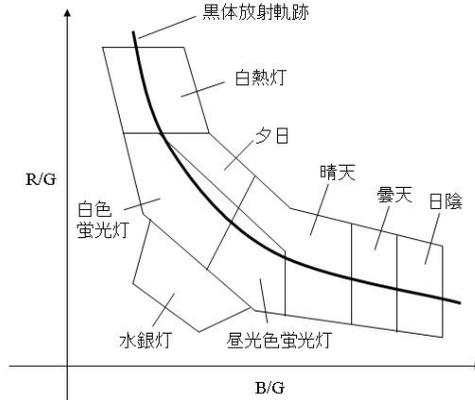


図 2・138 光源枠の一例

光源推定はあくまで推定であって、精度は確率的なものである。前記、光源枠内は無彩色の被写体のみが入るとは限らない。人の肌や茶系統の色は低色温度側の光源枠に入る可能性が高く、誤判定の原因となる。そのため、露光情報から求めた照度情報に基づき、照度が高い場合は屋外の可能性が高いと判断して高色温度側光源枠の重みを増すなど、ほかの情報を加味することで精度の向上を行っている。また、近年実用化された顔検出機能と連携して精度を高める方法や、シーン認識で使用される被写体距離情報、画面内輝度パターン情報などの各種情報を総合的に使って精度を高めるなどの試みもなされている。

光源推定が完了すると、無彩色の被写体を無彩色の画像データにするために WB ゲイン調整を行う。WB ゲイン調整により無彩色と判断された部分の R、G、B は同一レベルになる。光源推定の結果から WB ゲインが決定されるが、光源ごとに WB ゲインが固定的に決定される単純な方法から光源枠内のデータの分布から中間値を補間する方法など、これも様々である。

次に色補正について説明する。WB ゲイン調整によって無彩色の被写体は無彩色に調整されるが、その他の色については WB ゲイン調整だけでは不十分で、照明が変わると色が変わってしまう。これは、WB ゲインは R、G、B の量を調整しているだけで、R、G、B の分光の調整にはなっていないためである（この意味で理想の WB 調整は光学フィルタで行うことである）。

図 2・139 で典型的な例を用いて説明する。図(a)の左図は、模式的に描いたカメラと被写体の分光特性を表している。カメラの 3 原色の分光特性を台形形で近似し、例示被写体は B と G の中間、かつ一部に重なって一様に分布する分光特性とする。また、図(a)の右図に示すように、一様分光の照明を仮定してこのカメラの分光特性だけを反映してカメラに入力された例示被写体の B、G 成分は等しいとする。

図(b)の左図は、白熱灯下での、照明とカメラの総合分光特性、及びカメラに入力された例示被写体の B、G 成分を表している。図(b)の右図は、昼光下での同様な図である。明らかに、白熱灯下では $B < G$ となって緑に寄り、昼光下では $B > G$ となって青っぽくなる。

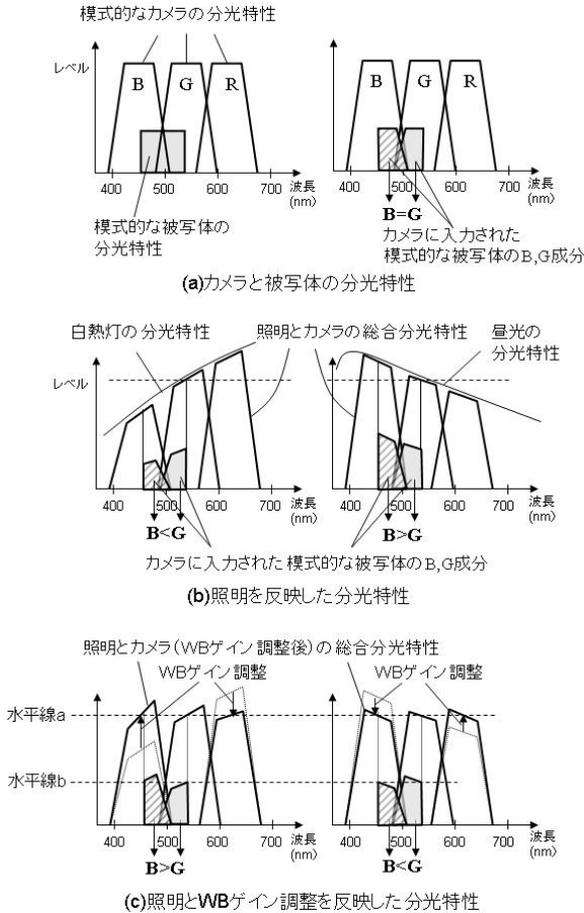


図 2・139 WB ゲイン調整による色再現変動の模式図

これに対して WB ゲインを調整した場合が図(c)である。左図は白熱灯下で WB ゲインを調整した場合であり、右図が昼光下で WB ゲインを調整した場合である。白い被写体に対しては照明とカメラの総合分光特性と等しくなり、 $R = G = B$ となるが、分光の形状が変化しているため、例示被写体に対しては白熱灯と昼光では異なる結果となる。左図の白熱灯の場合では、WB ゲイン調整により B が積分値として G と等しくなるようにゲインアップされるが、B の長波長側は分光形状の変化により水平線 a で表した平均レベルより過剰にゲインアップされることになる。また、G についても分光形状の変化により G の短波長側が平均レベルより低くなる。したがって、B の長波長側のみに重なっている例示被写体の短波長側は水平線 b で表した例示被写体の平均レベルより過剰にゲインアップされ、G の短波長側のみに重なっている例示被写体の長波長側は逆に低くなる。よって $B > G$ となり、例示被写体の成分は

一様分光照明下での $B = G$ とは異なってしまふ。同様の理由で昼光下では逆に $B < G$ となる。なお、例示被写体は狭い分光特性をもった極端な例ではあるが、有彩色の被写体は特定の波長に重みをもつ分光になるため、程度の大小はあるものの、上記の仕組みにより WB ゲイン調整をしても異なる光源下では色が異なる結果となる。

このように分光に偏りのある有彩色の被写体では必ず発生する問題であるが、同じ色の被写体でも分光が異なる場合があり（分光ではなく R, G, B の比が等しければ同じ色になるいわゆるメタメリズム）、ある照明下で同じ色でも照明が変わると色が異なってしまふことがあるため、すべての被写体で完全な補正を行うことは不可能である。したがって、重要な被写体（例えば人肌）の色を選択し、その色再現を優先して補正することが通常行われる。なお、上記メカニズムは人の眼においても同じであり、順応しても照明によって色変化が残る現象があるため、全く同じ色にするのが忠実なわけでもない。また、忠実な色再現よりも記憶色を重視する考え方もあり、色補正は絵作りの一環として行われるのが通常である。

補正は R, G, B にマトリクス演算を行う方法が一般的だが、単一のマトリクス係数の場合、複数の色を独立に補正できないので、 R, G, B の値に応じてマトリクス係数を切り替える方法や、ルックアップテーブルを使って非線形の変換を行う場合もある。これらの変換の係数を光源ごとに用意し、それを光源推定の結果で切り替えることにより色再現の調整を行う。

2-9-4 手振れ補正

（執筆者：林 孝行）[2011年1月 受領]

(1) はじめに

1980年以前から放送・業務用の防振装置としては、錘の慣性とバネを用いた慣性方式や、回転ゴマによるジャイロ効果を用いたもの、高価な回転ジャイロを用いた安定化雲台などが使用されていた。民生用のビデオカメラが1980年代後半に普及期を迎え、一般の人が撮影する機会が増加し、手振れによる撮影の失敗が問題となっていた。この問題を解決するために1980年前半から、民生用の手振れ補正機能の開発が始まっており、1988年に小型で安価な振動型ジャイロセンサの実用化と同時に、手振れ補正機能搭載の民生用ビデオカメラが商品化された。以降、技術開発により、様々な手振れ補正の方式が開発実用化され、交換レンズ、デジタルビデオカメラ、デジタルスチルカメラ、カメラ付携帯電話などに搭載された。今日では、ほとんどのカメラに、手振れ補正機能が搭載され、カメラの必須機能となっている。更に、手振れ低減モードと呼ばれる露出や感度制御により、シャッタースピードを高めることにより、被写体振れや、手振れを軽減するモードも搭載されるようになってきている。

以降、この手振れ補正の各種方式について、民生用に実用化されている代表的な方式について述べる。

(2) 手振れ補正方式と特長

手振れ補正方式の分類を図2-140に示す。以下、各方式について、その構成などの概要を述べる。



図 2・140 手振れ補正の分類

(a) 鏡筒駆動方式

この方式には、二つの制御方式がある。

第1は、撮影レンズと撮像素子を一体的に構成し、撮影レンズの略重心位置を2軸（ピッチ、ヨー）に可動可能とするジンバル機構で保持する。手振れを検出する振動型ジャイロも撮影レンズに搭載し、その出力がゼロになるように、アクチュエータにより駆動制御する方式である。これは、1988年に民生用として、世界で初めてムービーに搭載された方式^{1),2)}である。

第2は、撮影レンズと撮像素子を一体的にジンバル機構で保持し、手振れを振動型ジャイロで検出し、その出力に応じて撮影レンズを手振れしない方向に駆動制御することで手振れ補正を行う方式³⁾である。

これらの方式の特長は、撮影レンズと撮像素子を一体的に駆動制御するため、画像劣化がなく高画質な画像が得られるとともに、手振れ補正範囲（角度）も広くとることができ、歩行時や、車上撮影時でも安定した手振れ補正を行うことができる。一方、撮影レンズと撮像素子を一体的に駆動し、補正範囲を広くとろうとすると、カメラの小型化がしづらいという課題がある。

(b) 可変頂角プリズム方式

この方式は、ピッチ、ヨー補正用の2枚の平面ガラスを蛇腹で接続し、その中にガラスと屈折率の同じ液体を封入して構成された補正ユニットを撮影レンズの前、もしくは内部に配置し、手振れをジャイロで検出し、その検出力に応じて2枚のガラスの傾きを制御することで手振れを補正する方式⁴⁾である。1992年に、撮影レンズの前に配置する補正ユニットのものが、ムービーに初めて搭載された。特長としては、撮影レンズの前に配置する補正ユニッ

トを用いる場合は、汎用性が高いというメリットがある。一方、プリズム効果で色収差が発生するというデメリットがある。

(c) インナーレンズシフト方式

この方式は、撮影レンズ内の一部の補正用レンズを、ジャイロで検出した手振れ量に応じて、補正レンズを、手振れをキャンセルする方向に駆動制御することで、手振れを補正する方式である^{5),6)}。1994年に35mmコンパクトカメラに初めて搭載された。特長は、撮影レンズの一部の補正レンズを駆動するため、小型及び低消費電力化を実現しやすく、また、手振れ補正専用のレンズ設計を行うことから、手振れ補正時のレンズの移動に伴う光学性能の劣化を最小限に抑えることができ、かつ、焦点距離が長くなっても補正角度は一定にすることができる。一方、補正レンズの駆動機構（モータ含む）を撮影レンズ内に構成する必要がある。手振れ補正機構がないものに比べると、やや大きくなるというデメリットがある。1995年に交換レンズ、1998年にムービー、2000年にデジタルスチルカメラ、2003年に低倍率コンパクトデジタルカメラに順次搭載され、現在では、静止画撮影、動画撮影機器における光学式手振れ補正の主流となっている^{7),8),9)}。

(d) 撮像素子駆動方式

この方式は、CCDなどの撮像素子をジャイロで検出した手振れ量に応じて駆動制御することで手振れを補正する方式であり、2003年にコンパクトデジタルカメラやデジタル一眼レフカメラに搭載されている¹⁰⁾。

特長は、デジタル一眼カメラでは、過去の交換レンズも含めて手振れ補正を実現できるという利点がある。しかし、撮像素子のシフト量には、制約があることから、焦点距離が長く（望遠）なるにつれ、補正範囲が低減するという課題と、撮像素子を駆動するため、撮像素子からの放熱が難しいことから、動画などには対応しにくいという課題がある。

(e) 画像切り出し方式

この方式は、撮像素子に結像された画像から検出した動きベクトルに基づき、メモリ上の画像を切り出す方式や、ジャイロにより手振れ量を検出して、撮像素子の切り出し位置を制御することで手振れ補正を行うものがあり、1990年にビデオカメラに搭載された^{11),12),13)}。

特長は、手振れ補正が電子的に行えるため、光学式と比べ、ジャイロセンサや駆動機構が不要となり、小型・低コスト化が図りやすい。一方、露光時間内の手振れの補正ができないため、若干画質劣化するという課題と、切り出し領域を確保するため、やや大きめの撮像素子が必要となるとともに、レンズの焦点距離が大きくなると、補正範囲が十分確保できなくなるという課題がある。

このような点から、主に、ムービーの普及機に搭載され、デジタルカメラには搭載されていない。しかし、手振れ補正の高性能化として、光学式手振れ補正方式と、電子式手振れ補正方式のハイブリッド構成により、手振れ性能を向上させたものも実用化されている。

(f) 画像処理方式

この方式は、画像処理のみによって手振れ補正するものである^{14),15)}。具体的には、高速連写した複数枚の画像を位置あわせして合成する方式と、露光中の手振れの軌跡などから画質の劣化をモデル化し、このモデルの逆変換により元の画像を復元（回復）する方式がある。

特長は、ジャイロや、機構部品が必要ないため、小型・低コストで構成することができる。しかし、連写した複数枚の画像の位置合わせや、画質劣化モデルの逆変換などに相応の演算

が必要となり、処理に時間がかかることと、動画での適応が難しいという課題がある。

■参考文献

- 1) M. Oshima, T. Hayashi, S. Fujioka, H. Mitani, J. Kajino, K. Ikeda, and K. Komoda, "VHSCamcorder with Electronic Image Stabilizer," IEEE Trans. Consum. Electro, vol.35, no.4, pp.749-758, 1989.
- 2) 稲治利夫, 藤岡総一郎, 林 孝行, 梶野二郎, "ビデオカメラの画振れ防止技術の開発," テレビジョン学会技術報告, vol.11, no.28, pp.19-24, 1987.
- 3) 新谷 大, 三谷芳史, 真島拓士, 柴谷一弘, 糸原俊夫, "レンズユニットスイング方式手ぶれ補正ユニットの開発," KONIKA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, vol.3, 2006.
- 4) 石塚茂樹, 佐藤弘一, 佐藤 満, "カメラ一体型 VTR, プリズムと角速度センサで手振れを補正," 日経エレクトロニクス, no.558, pp.203-211, 1992.
- 5) 林 孝行, 山田 克, 日下博也, "3 板ビデオカメラ用防振レンズの開発," 映像情報メディア学会誌, vol.56, no.3, pp.417-423, 2002.
- 6) 日下博也, 土田幸孝, 下畠 剛, "光学式手振れ補正のための制御システム開発," 映像情報メディア学会誌, vol.56, no.3, pp.411-416, 2002.
- 7) 鷺巢晃一, "すの野を広げるカメラの手ブレ補正その歴史と技術を振り返る," NIKKEI ELECTRONICS, 2006.12.18 号, p.143, 2006.
- 8) 坂口 隆, 山根洋介, 林 孝行, 吉次慶記, 山本靖利, 勝浦宏典, "手振れ補正ジャイロ搭載コンパクト DSC「DMC-FX1/5」", Matushita Technical Journal, vol.50, no.4, Aug. 2004.
- 9) オリンパスニュースリリース, <http://www.olympus.co.jp/jp/news/2000a/nr000615c21uzj.cfm>, 2000.6.15
- 10) 高野万滋, 田中義治, 中村公彦, 開発 渉, "α-7DIGITAL の手ぶれ補正技術," KONIKA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, vol.2, 2005.
- 11) 中山正明, 森村 淳, "ビデオムービー Panasonic「ブレンビー」(NV-S1)," 電子写真, vol.30, no.1, pp.73-81, 1991.
- 12) 森村 淳, 魚森謙也, 石井浩史, 坂口 隆, 北村好徳, "純電子式画像揺れ補正システム," テレビジョン学会技術報告, vol.15, no.17, pp.43-48, 1991.
- 13) 日下博也, 中山正明, 猪熊一行, 井出達樹, "高画質手ぶれ補正システムの開発," テレビジョン学会技術報告, vol.18, no.8, pp.7-12, 1994.
- 14) L Yuan, et al., "Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs," SIGGRAPH 2007, Article, 1, 2007.
- 15) 蚊野 浩, "画像復元による静止画手ぶれ補正技術," 第 15 回画像センシングシンポジウム ダイジェスト集 OS4-01-2~4, 2009.
- 16) 大嶋光昭, "映像情報機器の脆弱性改善のための要素技術に関する研究," 早稲田大学学位論文, pp1-115, 2006.

2-9-5 自動追尾

(執筆: 羽下哲司) [2011年1月 受領]

最近のデジタルカメラやデジタルビデオカメラには被写体の中から顔の領域を自動的に抽出する顔検出機能だけでなく、動いている物体を追跡してフォーカスを合わせ続ける自動追尾機能が搭載されており、使いやすさが大幅に向上している。

一枚の画像中から目的の画像領域を抽出する処理が検出処理であるのに対して、自動追尾の中で行われる対象追跡は、動画像を対象として、ある時刻で検出された、あるいは指定された対象の領域と最もよく類似する領域を次の時刻の画像中から探し出す処理である。

対象追跡の方法には大きく分けて、(1)対象の見え方(テクスチャパターン)の類似性を用いて探索する方法であるテンプレートマッチング、(2)対象内部の色ヒストグラムの類似性を用いて探索する方法である Mean Shift、(3)対象の位置、姿勢、色、輪郭情報などのモデルパ

ラメータ空間での類似度を用いて探索する方法である Condensation, の三つがある. 以下これらの各手法を解説する.

(1) 対象の見え方(テクスチャパターン)の類似性を用いて探索する方法

対象の見え方の類似性を用いて探索する方法としてテンプレートマッチング¹⁾が最も代表的な手法であり, 多くの分野で実用化されている. テンプレートマッチングでは, 図 2・141 に示すように, 対象のテクスチャパターンをテンプレート画像 T_{ij} (ただし $0 \leq i < M_x, 0 \leq j < M_y; M_x, M_y$ はテンプレートの幅及び高さ) として登録し, 次の時刻の入力画像である参照画像 S に, 位置を (x, y) だけずらしながら重ね合わせ, 類似度が最大になる位置を求める方法である.

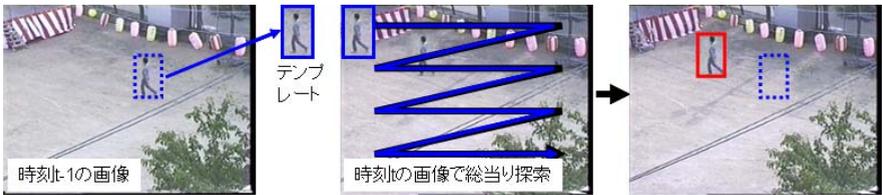


図 2・141 テンプレートマッチングによる対象追跡のアルゴリズムと追跡結果

類似度の尺度として, 以下の三つが用いられる. (a), (b) は評価式を最小化する x, y を求める一方で (c) については評価式を最大化する x, y を求める点に注意が必要である.

(a) SSD (Sum of Squared Difference) を最小化する

$$SSD(x, y) = \sum_i \sum_j (T_{ij} - S_{i+x, j+y})^2$$

(b) SAD (Sum of Absolute Difference) を最小化する

$$SAD(x, y) = \sum_i \sum_j |T_{ij} - S_{i+x, j+y}|$$

(c) NCC (Normalized Cross Correlation) を最大化する

$$CORR(x, y) = \frac{\sum_i \sum_j \{(T_{i,j} - T^-)(S_{i+x, j+y} - S^-_{x,y})\}}{\sqrt{(\sum_j \sum_j (T_{i,j} - T^-)^2)(\sum_j \sum_j (S_{i+x, j+y} - S^-_{x,y})^2)}}$$

ただし, T^- 及び $S^-_{x,y}$ は, それぞれテンプレート及び参照画像の平均.

テンプレート画像及び参照画像をベクトルとすれば, SSD はベクトル間の距離の 2 乗に相当する. しかし, 外れ値 (Outlier) が存在するときに大きな影響を受けるため, 単純化した SAD が用いられることも多い. NCC はベクトル間の余弦に相当し, 一樣な明度変化に対してロバストであるが, 実現するための演算コストが最も高くなる. これらの方法は, いずれも追跡対象のモデル化をほとんど行う必要がなく, 画像上のある領域を指定すれただけですぐに追跡を開始できるという利点がある. このため古くから用いられてきており, また SIMD 型プロセッサによる高速なハードウェアや, ソフトウェア処理による高速化などが研究されてきた.

しかし, 追跡対象が奥行きのある三次元対象の場合は対象の見える方向によって見え方が大きく変化するため, 追跡を継続することが困難になる. これを解決するために毎回, 最も類似度が一致した領域でテンプレートを切り出して更新する可変テンプレートマッチングが

提案されている。しかし、この可変テンプレートマッチングでも、テンプレート位置のわずかな切り出しのずれが時間的に累積していずれ追跡を外してしまうため、常にテンプレートの中心と追跡対象の中心を合わせ込む必要がある。特にテンプレート内に対象以外の背景が存在する場合に顕著に発生する。このため、テンプレートマッチングによる対象追跡処理を長時間安定して行うためには、例えば顔検出処理や、背景差分など移動物体検出処理と並列して行う必要がある。

(2) 対象内部の色ヒストグラムの類似性を用いて探索する方法

対象内部の色ヒストグラムの類似性を用いて探索する代表的な手法に Mean Shift^{2),3)}がある。

対象画像のテンプレート T 内部の色ヒストグラムを $q(u)$ 、次の時刻の入力画像 S の位置 (x, y) を中心とする楕円領域内のヒストグラムを $p_{x,y}(u)$ とする。ただし、 u はヒストグラムのインデックスで、RGB 各 5 ビット (32 レベル) のカラー空間であれば u は $0 \sim 32767$ ($= 32 \times 32 \times 32 - 1$) の値をとり得る。



図 2・142 Mean Shift による対象追跡のアルゴリズムと追跡結果

Mean Shift では、図 2・142 に示すように、このときテンプレートの位置 (x, y) をずらしながらヒストグラムの類似度を全探索範囲にわたって計算するのではなく、

$$w(u) = \sqrt{\frac{q(u)}{p_{x,y}(u)}}$$

によって求められる各インデックスの重みテーブルをある時刻で 1 回のみ計算する。そして、入力画像の S の各画素値を u から $w(u)$ に置き換えるルックアップテーブル処理を行い、新しい画像 S' が得られる。このとき、元の画像 S において追跡対象に含まれている色を有していた画素は S' において高い値に変換され、逆に S において追跡対象に含まれていなかった色を有していた画素の値は S' において低い値に変換される。求めるべき追跡対象の中心位置は、この画像 S' の重心位置 (g_x, g_y) の付近にあるはずである。初期探索位置 (x, y) からのずれ量

$(u, v) = (g_x - x, g_y - y)$ は Mean Shift ベクトルと呼ばれ, 探索位置の中心 (x, y) を Mean Shift ベクトル (u, v) だけ更新しながら繰り返し収束演算を行い, 最終的な対象の位置を求める.

このように Mean Shift は, 探索範囲内を総当りで探索しながら類似度を求めるのではなく, 初期位置からの山登り法によって探索を行うため, 演算量が格段に少なく, 高速に追跡が行えることが特徴である. また色ヒストグラムを用いるため, 対象の変形に対してロバストである. 実際には山登り法の探索をスムーズに行うため, 画像 S' に想定される追跡対象のサイズかそれよりもやや大きめのバンド幅の等方性の重み付け (例えばガウシアンカーネル) を作用させることが多い. このため, Kernel based トラッキングと呼ばれることもある.

(3) 対象の位置, 姿勢, 色, 輪郭などのパラメータ空間での類似度を用いて探索する方法

対象の見え方や色ヒストグラムの類似度だけでなく, 対象のモデルパラメータを探索する方法の代表は Condensation^{4),5)} である. Condensation では, 例えば人の頭部をその中心 (x, y) , サイズ k , 傾き θ の楕円モデルで表現したり, あるいは変形しながら移動する物体の輪郭を B-spline で近似して, 連続する入力画像の中で, 上記パラメータの確率分布を連続的に推定することにより追跡を実行する手法である.

テンプレートマッチングや Mean Shift との最も大きな違いは, 追跡のある時刻において, 対象のパラメータを一意に定めるのではなく, パラメータ空間内の確率分布を推定することである. これにより, ある時刻 t における推定が誤った場合, 時刻 $t+1$ 以降の推定も誤ってしまうという追跡の問題点を回避することができ, 例えば図 2・143 に示すように複数対象の交差や一時的な隠れに対しても対応することができる.

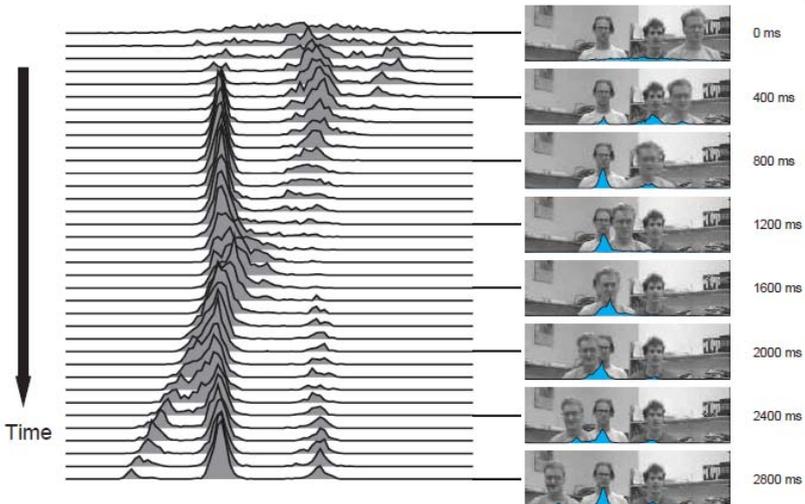


図 2・143 Condensation による複数対象の対象処理例 (文献 5) より抜粋)

具体的なアルゴリズムを以下に示す. まず初めに幾つかの式を定義する.

時刻 t における対象のパラメータを X_t とする. これは, 例えば位置 (x, y) に相当する. 次

に時刻 t における画像から得られる特徴を Z_t とする。これは例えばエッジや色に相当する。

求めるべき追跡パラメータの分布、すなわち X_t の事後分布は $p(X_t|Z_t)$ で表される。これは時刻 t までに観測された画像特徴 Z_1, Z_2, \dots, Z_t が知られているとき、 X_t がどれだけ妥当かを示す確率分布に相当する。ここでベイズの定理により、 X_t の事後分布 $p(X_t|Z_t)$ は、パラメータ X_t の尤度 $p(Z_t|X_t)$ と X_t の事前分布 $p(X_t|Z_{t-1})$ から以下のように求められることが知られている。

$$p(X_t|Z_t) = k_t p(Z_t|X_t) p(X_t|Z_{t-1})$$

ただし、 k_t は正規化のための係数で、尤度 $p(Z_t|X_t)$ はパラメータ X_t がどの程度、画像上の対象と合致しているかを示す確率密度に相当する。また、事前分布 $p(X_t|Z_{t-1})$ は、時刻 $t-1$ までの画像特徴 Z_1, Z_2, \dots, Z_{t-1} から推定される X_t の確率密度に相当する。

ここで、事前分布 $p(X_t|Z_{t-1})$ は、前の時刻 $t-1$ での事後分布 $p(X_{t-1}|Z_{t-1})$ と、時刻 $t-1$ から時刻 t におけるパラメータ分布の推移確率 $p(X_t|X_{t-1})$ から以下のように計算できる。

$$p(X_t|Z_{t-1}) = \int_{X_{t-1}} p(X_{t-1}|Z_{t-1}) p(X_t|X_{t-1}) dX_{t-1}$$

Condensation では、この計算を、前の時刻に求められた事後分布 $p(X_{t-1}|Z_{t-1})$ に従う乱数を発生させて、推移確率 $p(X_t|X_{t-1})$ の期待値を求める方法により求めている。更に、この結果に尤度 $p(Z_t|X_t)$ を掛けることにより、次の時刻の事後確率 $p(X_t|Z_t)$ を求める。このような繰り返しにより、**図 2・144** に示すように、求めるべき追跡パラメータの分布、すなわち X_t の事後分布 $p(X_t|Z_t)$ が順次求められる。

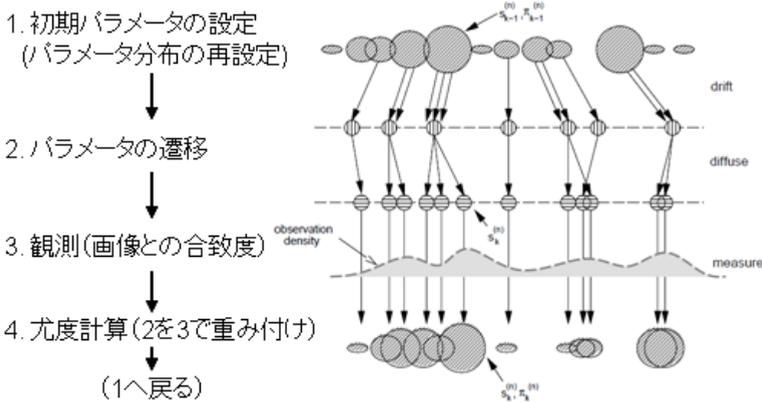


図 2・144 Condensation による対象追跡のアルゴリズム (文献 5) より抜粋)

以上の三つの方法を探索方法のみで比較すると、**図 2・145** に示すように、縦軸に追跡点の位置を、横軸に追跡モデルと候補領域の一致度をとれば、(1) テンプレートマッチングは全探索をするので正確である反面、処理コストが高い。(2) の Mean Shift は全探索を行わず、山登り法により探索を行うため、処理コストが低い。しかし、局所解に陥る可能性がある。(3) の Condensation は確率的なランダムサンプリングを行うため、処理コストはサンプリング点数によって自在にコントロールすることができる。ただし、サンプリングが密でない箇所が生じた急峻な解を見落とす可能性がある。

性能的には、変形が少ない対象に対して高速な処理が必要な場合は(1)のテンプレートマッチングが有効である。変形が生じるがカラー情報が安定している対象は(2)の Mean Shift が有効である。また、より多くの特徴を用いたい場合や、複数対象の存在、対象の隠れが発生する場合には(3)Condensation が有効である。

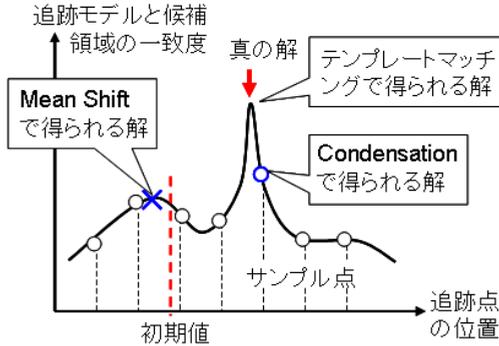


図 2・145 各追跡手法の比較

これらの手法以外にも物体検出やクラスタリング手法と組み合わせられた様々な追跡手法が発明されており、処理コストや対象の特性に応じて最適な手法を選択することが必要である。

■参考文献

- 1) H. D. Crane and C. M. Steele, "Translation-tolerant mask matching using noncoherent reflective optics," Pattern Recognition, vol.1, no.2, pp.129-136, 1968.
2) D. Comanciu, V. Ramesh, and P. Meer, "Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects Using Mean Shift," Proc. of CVPR'00, vol.2, pp.142-149, 2000.
3) D. Comanciu, V. Ramesh, and P. Meer, "Kernel-Based Object Tracking," IEEE Trans. PAMI, vol.25, no.5, pp.564-577, 2003.
4) M. Isard and A. Blake, "Contour tracking by stochastic propagation of conditional density," Proc. of ECCV, vol.1, pp.343-356, 1996.
5) M. Isard and A. Blake, "CONDENSATION-conditional density propagation for visual tracking," Int. J. Computer Vision, vol.29, no.1, pp.5-28, 1998.

2-9-6 顔認識

(執筆者：青木博松) [2010年12月受領]

顔の情報を解析し理解することにより、様々なアプリケーションでの応用が期待されることから、画像中の顔を認識するための顔画像処理の研究は、コンピュータビジョンの分野で広く研究されてきた。

顔認識の要素技術の例を図 2・146 に示す。これらの要素技術の実現には、いずれも大量の顔画像を機械学習し、様々な顔画像に共通する特徴を抽出するパターン認識のフレームワークが適用される。技術的には、画像中から顔の位置や大きさ、更には、目や口など顔の特徴づける情報(特徴点)の位置を特定する「検出」技術と、検出された特徴点に基づき、顔の

属性（個人，年齢，性別，人種，…）や状態（表情，目や口の開閉状態，視線方向，…）を特定する「認識」技術に分類できる。

顔検出（Face Detection）は，入力した画像の中から位置，大きさ，顔の傾きや向き，画像の回転，照明変化，隠れにかかわらず，人の顔の位置と大きさを特定する技術¹⁾を指し，顔認識の中で最も基本的で重要な要素技術である．顔検出を用いた代表的なカメラ機能としては顔認識 AF があげられる。

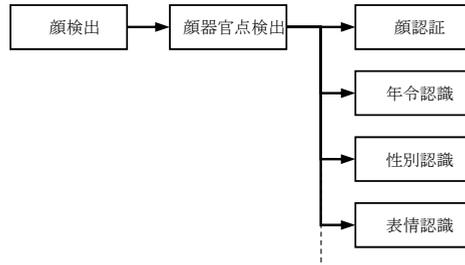


図 2・146 顔認識の要素技術例

コンピュータで顔を検出するには，特定の大きさの領域を入力画像から切り出して顔／非顔を判定する処理をすべての位置と大きさの組合せに対して順次行う必要があり，計算量が膨大となる．しかし，2001 年に，単純な局所特徴量（Haar-like 特徴量）と AdaBoost（弱識別器を線形結合して強識別器を構築する手法）を組み合わせると同時に，多段フィルタを用いて非顔領域の計算を途中で打ち切る手法²⁾が提案され，リアルタイムに顔検出することが可能になった．この手法を改良した顔検出技術は，2006 年以降，顔認識 AF を実現するための要素技術としてデジタルカメラ，デジタルビデオカメラ，カメラ付携帯電話で急速に普及した．

顔認識 AF の基本動作は図 2・147 に示すとおりである．ここでは顔認識 AF の説明に必要な部分のみを説明する（カメラ全体の構成は本章 2-4 節，2-5 節参照のこと）．撮像デバイスから入力された信号は，信号処理されて YUV 信号が生成される．この YUV 信号は，ライブビュー用に表示部で表示されるとともに，顔検出部に入力される．顔検出部では，入力された画像に対し，顔の有無を判定し，顔が検出された場合には，検出した人数分の顔の位置と大きさの情報を出力する．その情報を用いて，カメラ制御部では顔にフォーカスが合うようにカメラ設定を自動的に変更する．

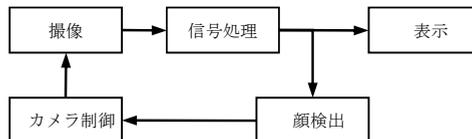


図 2・147 顔認識 AF の処理例

顔認識 AF 以外にも、以下に示すように、顔認識を用いたカメラ機能がデジタルカメラ、デジタルビデオカメラ、カメラ付携帯電話に搭載されている。

(a) 個人認識 AF

顔認識 AF を拡張したものであり、複数人が同時に写っているときに、その中に特定の個人がいればその人に自動的にフォーカスを合わせる機能である。本機能は、予め個人認識したい人の顔画像を DB に登録しておき、顔検出により検出された顔と DB に登録されている顔とを照合して、同一人物かを判定する顔認証技術を用いて実現する。

(b) 子供優先 AF/大人優先 AF

顔認識 AF を拡張したものであり、大人と子供が同時に写っているときに、子供(大人)に自動的にフォーカスを合わせる機能である。本機能は、顔検出により検出された顔の年令を認識する年令認識技術を用いて実現する。

(c) 笑顔シャッター

顔検出により検出された人物が笑っているときに自動的に撮影する機能である。本機能は、顔検出により検出された顔の表情を認識する表情認識技術をベースとしており、表情のうち笑顔のみに特化して識別することで実現される。

(d) 赤目補正

赤目軽減フラッシュが、赤目現象を防止することを目的とするのに対し、本機能は、撮影して得られた顔画像の瞳が赤目現象のために赤くなった場合に、画像処理により赤みを低減させることを目的とする。本機能は、顔の特徴点を検出する特徴点検出技術(特に目及び瞳の検出技術)をベースにした機能である。

(e) その他

一部の機種には、撮影した顔画像に対し、美肌処理、小顔処理などの補正をする機能が搭載されている。これらの機能も顔検出や特徴点検出技術で出力された位置情報が要素技術として用いられている。

なお、ここではページ数の関係で記載できなかったが、顔検出、顔器官点検出、顔認証、年令認識、笑顔認識技術の詳細は文献 3) を参照していただきたい。

■参考文献

- 1) M.-H. Yang, D. J. Kriegman, and N. Ahuja, "Detecting Faces in Images: A Survey," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.24, no.1, pp.34-58, 2002.
- 2) P. Viola and M. Jones, "Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features," Proc. IEEE CVPR, vol.1, pp.511-518, 2001.
- 3) 蚊野 浩(監修), "デジカメの画像処理," 映像情報メディア学会編, pp.45-76, オーム社, 2011.

■8群-4編-2章

2-10 リニアセンサ, カメラ

(執筆: 物井 誠) [2011年2月 受領]

2-10-1 センサ (CCD, 密着型)

(1) CCD リニアイメージセンサ

CCD リニアイメージセンサは, 1970 年代の終わりにころからファクシミリなどの画像入力装置の読み取りデバイスとして使われ始め^{1),2)}, その後現在では, スキャナや PPC (Plain Paper Copier : 普通紙コピー) などの各種画像読み取り機器に広く用いられている. これもひとえに, コンピュータとデジタル通信の進歩にともない画像を電子情報として取り扱うことが一般化し, そのインタフェース技術として成長した結果であり, また, イメージセンサの技術的側面で見れば, 半導体技術の微細化や Si の低欠陥化技術が進み, その性能が飛躍的に向上しているためとも考えられる.

ここでは, スキャナに使用される 3 ラインカラーセンサを例に, 縮小光学系で用いられる CCD リニアイメージセンサについて説明する (図 2・148). このセンサは解像度 600 DPI (A4 原稿) の読み取り用で, 1 画素列当たり有効画素数は 5340 である. 3 本の画素列上には各々 RGB の色フィルタが形成され, 色分離を行う.

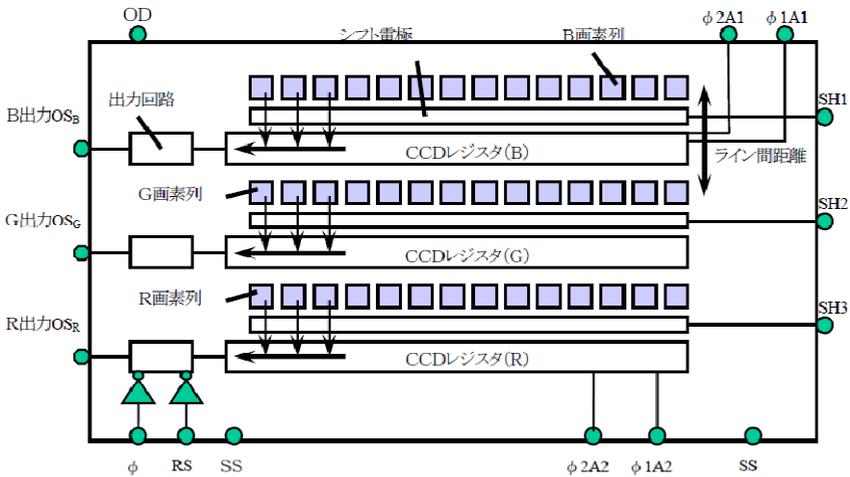


図 2・148 3 ラインカラーリニアイメージセンサの構成図

図 2・149 に 1 画素部分の断面構造図, 図 2・150 はセンサの駆動タイミング図を示す. 画素に入射して発生した信号電荷は, シフト電極が閉じている期間 (信号蓄積期間: T_{in}) の間, 画素中に蓄えられる.

SH パルスが印加されシフト電極が開くと電荷は画素から CCD レジスタへ一斉に移り, レジスタ中を順次出力部へ転送され, 電荷は出力信号電圧に変換される. CCD は 2 層電極・2 相駆動で埋め込みチャンネル構造を採用している. 画素サイズは 7×7 μm である. 画素では, Si の低欠陥技術や Si 界面で発生する発生-再結合電流を抑える技術の進歩により, 暗時の偽

信号（暗電流）が小さく、低ノイズ・高ダイナミックレンジ化に寄与している。また、画素は完全空乏構造（電荷は完全に空乏化した電位の井戸に蓄積され、そこからは完全に転送される）であるため、残像は通常問題とはならない。

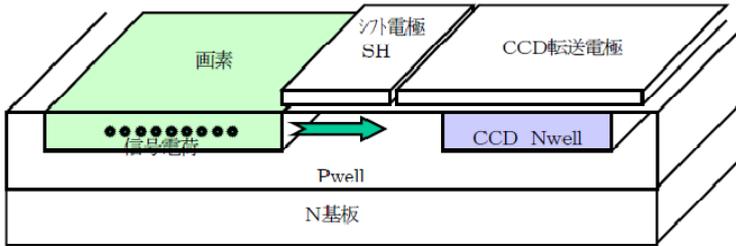


図 2・149 画素部の断面構造図

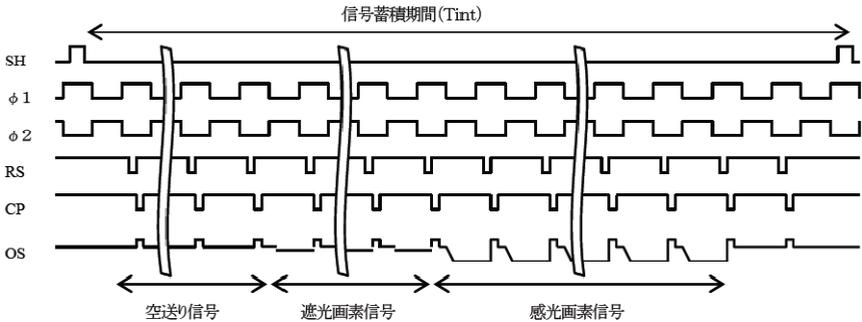


図 2・150 駆動タイミング図

(2) 縮小結像光学系用 CCD センサ

リニアセンサを用いた画像読み取り機構は、大別して2とおりのある。

図 2・151 にそのうちの一つの縮小結像光学系の読み取り部分の構成を簡単に示す。線状光源で原稿に光を照射し、その像をミラーとレンズを組み合わせで CCD リニアイメージセンサ上に縮小結像する。この読み取り部をモータで移動させ、センサの出力は AD 変換されコンピュータへ送られる。このように実際のスキヤナを開けてみると極めてシンプルな構造となっており、その中で CCD イメージセンサはキーデバイスとなっている。

縮小光学系は、光学系の焦点深度が比較的深く設計できるので、凹凸のある原稿（被写体）に対しても、解像度の良い画像が得られる。また、単一のイメージセンサで読み取るため、画面内でむらのない高い画質が得られる。ただし、一定の光路長が必要となるため、読み取り系全体の小型化がやや難しいという欠点がある。

縮小光学系用のイメージセンサでは、画素列の総延長が一般に 20~30 mm 程度になる。解像度 600 dpi では $7\mu\text{m}$ ピッチ画素で 5000 画素、1200 dpi では $4\mu\text{m}$ ピッチ 10000 画素で 1 画素列を構成する³⁾。2400 dpi 以上では、画素ピッチが小さくなり感度の低下が著しいため、2本の画素列を半ピッチずらして千鳥状に配置したものを一組として 1 色を読み取る (図 2・152)。

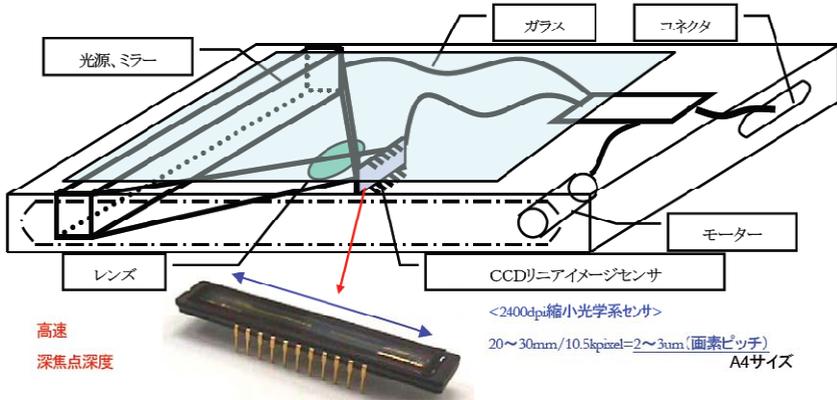


図 2・151 縮小結像光学系

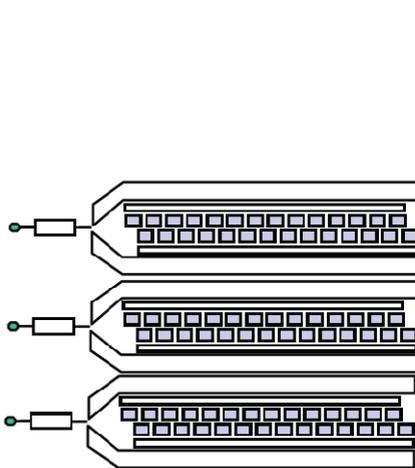


図 2・152 千鳥配列カラーセンサ

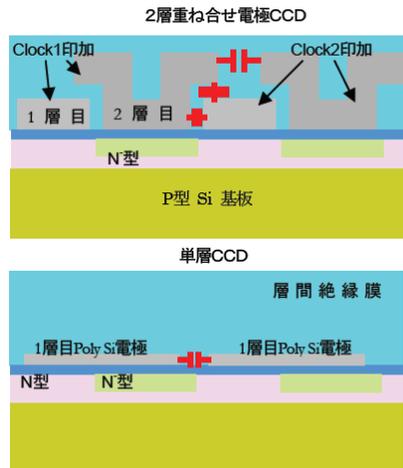


図 2・153 単層 CCD 構造

高解像度化にともない画素数が増加すると、それを転送するための CCD の静電容量が増加し、更に多画素を高速で転送する必要もあるため、消費電力の増加が問題となる。従来の 2 層ポリシリコンを重ね合わせた CCD 構造は、電極間の結合容量が大きい。そこで、電極を単層のポリシリコン電極で形成して CCD の駆動容量負荷を低減するセンサが報告されている⁴⁾ (図 2・153)。

(3) 等倍結像光学系 (密着センサ)

読み取り系のもう一つの種類を図 2・154 に示す。原稿像を特殊なレンズでセンサ上に等倍結像しており、原稿に密着して読み取るので、密着センサ (CIS : Contact Image Sensor) とも呼ばれる。

密着センサはセンサ・光源・導光体・筐体を一体化したモジュールの形態で商品化されており、光学系を含めた読み取り系を小型化できることが大きな特徴である。スキャナ用のモジュールでは、光源に LED を用い R/G/B を順番に点灯する光源切り替え型である。レンズにはセルフオックレンズアレー（日本板碍子商標）を用い、原稿と等しい長さのセンサ上に等倍結像する。等倍結像レンズの焦点深度が比較的浅いため、凹凸のある被写体の焦点が合いにくいことが欠点であるが、現在では実用上問題はない。

センサには A4 サイズで一般に十数個のセンサチップを一直線状（インライン）に並べて配置する。

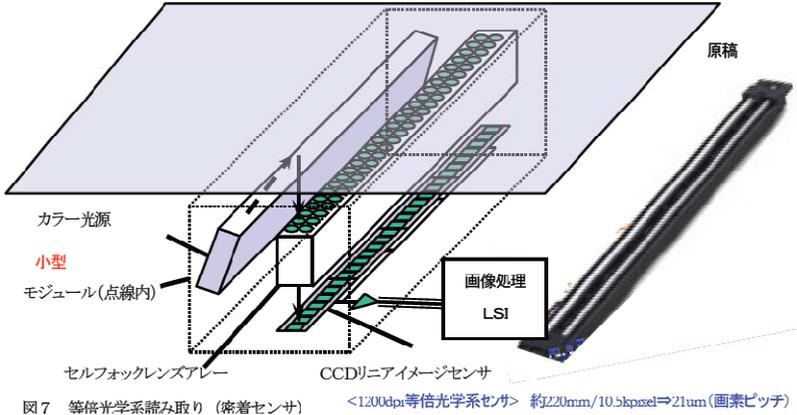


図 2・154 等倍光学系読み取り（密着センサ）

密着センサのセンサ部分の構成図を図 2・155 に示す。センサは白黒 1 ラインの CCD センサ構造で、隣接したチップの出力が終了すると次のチップの出力がオンし、センサ外部にはセンサ基板上的エミッタフォロワ回路を通して連続して出力される。電源・パルスは 5 V、読み出しデータレートは現状 2.5~5 MHz 程度である。

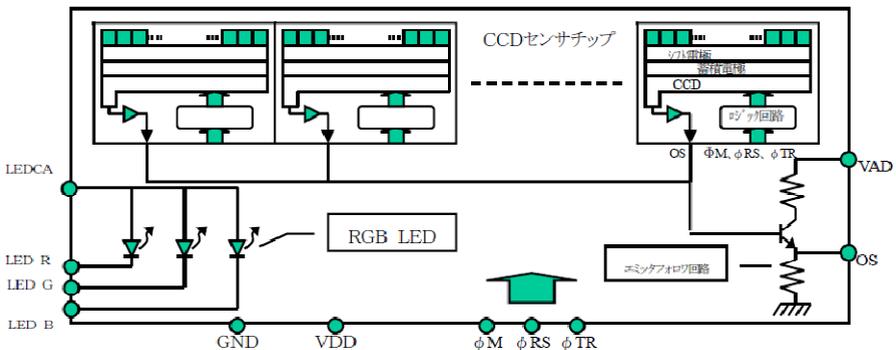


図 2・155 密着センサのセンサ構成

密着センサの解像度は、現状では 1200 dpi と 2400 dpi が主である。1200 dpi では画素ピッチは $21.15 \mu\text{m}$ となる⁵⁾。画素ピッチが小さくなるとチップ間の距離が問題となる(図 2・156)。チップ間の距離は通常の画素ピッチの約 1.5 倍以下が目安と言われており、高精度の組立技術が高解像度化には必須となる。

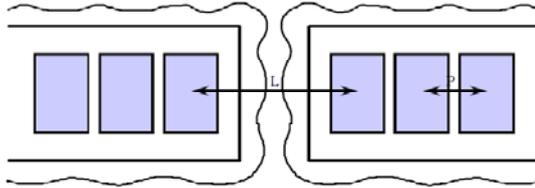


図 2・156 インライン密着センサのチップつなぎ部分

2-10-2 リニアセンサの応用機器

現在の CCD リニアイメージセンサの主なアプリケーションを、読み取り原稿サイズと読み取り解像度より、図 2・157 にまとめてみた。1980 年代の後半から 1990 年代の前半にかけてはファクシミリでの使用が最も多かった。その後はコンピュータへの入力装置としてスキャナが伸長し、現在では最大の応用分野となっている。また、スキャナを中心にカラー化も急速に進み、3 本の画素列上にオンチップでカラーフィルタを載せたカラーセンサが使用されている。現在は単機能のスキャナは少なくなり、プリンタ、コピー、ファクシミリと機能を融合した多機能の複合機として広く普及している。

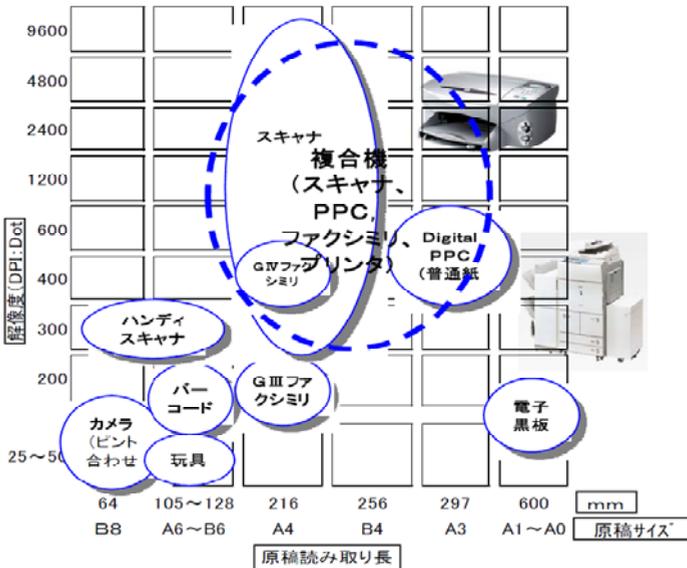


図 2・157 リニアセンサの応用システム

PPC (普通紙複写機) もデジタル化が進み, その読み取り素子としても一般に使用されている. A3 原稿を読み取る PPC をベースとして, こちらもスキャナ, プロント, ファクシミリとしても使われる複合機として発展している. ほかにカメラのピント合わせ用の測距センサーや, バーコード読み取りにも応用されている.

アプリケーションの解像度の動向を **図 2・158** で見ると, まず現在主流の複合機型スキャナでは 1200~2400 dpi が主流で, 更に 4800 dpi から 9600 dpi の機器も出ている. ファクシミリは単機能機種も残っているが, 複合機に融合されてきている. デジタル PPC (普通紙複写機) はカラー化が進んでいる. 解像度は A3 原稿を 600 dpi で読み取る.

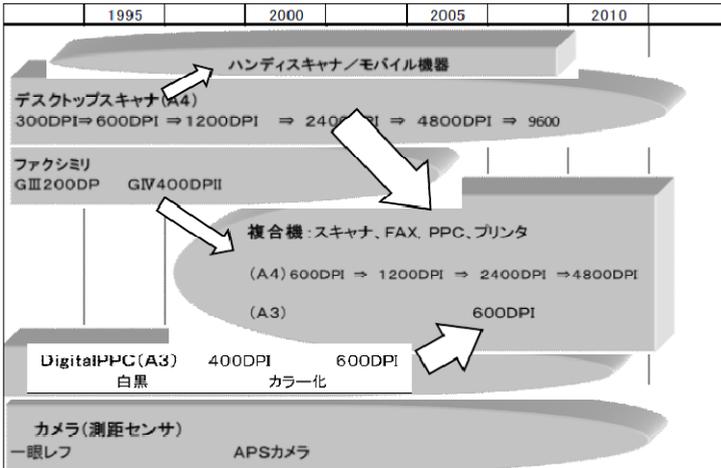


図 2・158 応用機器の解像度の動向

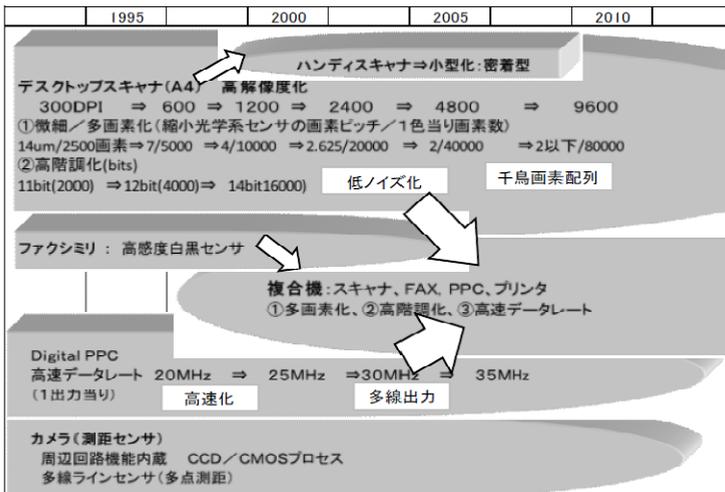


図 2・159 センサの性能動向

応用機器の高解像度化に対応したセンサの性能の動向を図2・159に示す。ハンディディスクナは小型化が必要なため、小型の密着センサが開発されたことがあるが、現在はあまり普及していない。スキャナ（複合機）は、高解像度化に伴い画素数の増加と画素サイズの縮小が進んでいる。また、高画質化のために14ビットまで高階調化も進んでおり、イメージセンサの高感度化と低ノイズ化も必要である。イメージセンサの出力回路では、相関2重サンプリング回路が一般に用いられ、読み出しノイズを抑えている。

PPCでは、解像度こそ600 dpiで変わりがないが、読み出し速度の高速化が進んでいる。回路ゲインが低い時代は50 MHzの報告もあるが⁶⁾、ゲインが高い現在では出力データレートは30～35 MHzが一般的である。更に1色を2ないし4出力で並列に出力して、最大140 MHzで読み取ることもある。

カメラの測距用センサでは、センサの蓄積時間制御や駆動パルスを発生する回路が内蔵されている。また、多点で測距するために、複数の画素列のブロックを有しているのが一般的である。

図2・160には各種システムに対応した主なイメージセンサの形態を示す。ファクシミリやバーコードには、白黒1ラインの画素列を備え、画素の偶奇で画素列両側のCCDレジスタに電荷を振分けて転送し（バイリニア構成）、出力で一つの検出部にマルチプレクスして統合する構成が一般的である。PPCに対しては白黒の1ライン、またはカラー用の3ラインのバイリニア構成のセンサが用いられ、高速化のため各CCDの出力は統合されず並列に出力する。スキャナ用はほとんどカラー用のリニアセンサで、CCDはバイリニア構成のものとなっていないものがある。CIS（密着センサ）はその小型化ゆえにスキャナ、複合機の主流となっている。また、複数のセンサの出力を並列処理することにより高速読み取りも可能である。PPCで、本体に縮小型センサ、蓋側にCISセンサを内蔵して、両面を同時に読み取る使われ方もされている。

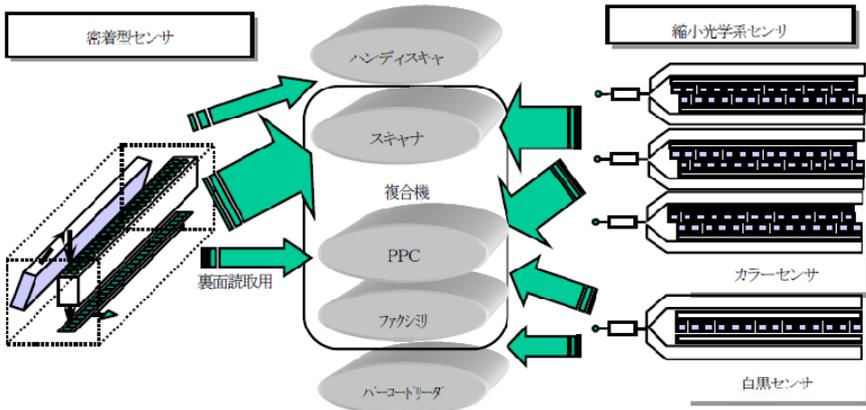


図2・160 各種システムで使用されるセンサ形態

■参考文献

- 1) 石原 他, “2048 素子 CCD 一次元センサ,” SSD76-17, 1976.
- 2) 鈴木 他, “1024 画素 CCD イメージセンサ,” 電子通信学会, ED77-33, 1977.
- 3) 松浦正和, 物井 誠, 藤井 潔, 佐野文昭, 早川良広, “4 μm セル CCD リニアイメージセンサ,” 映像学技報, vol.23, no.60, pp.27-32, Oct. 1999.
- 4) Makoto Monoi, Syu Sasaki, Yasuhiro Nakano, Hiroo Tsuruta, Takuji Yoshida, Yoshihiro Hayakawa, Masakazu Matsuura, Masao Takahashi, and Minoru Kashiwagi, “Low-capacitance CCD image sensor with thin single-layer structure,” SPIE, vol.5677, pp169-176, 2005.
- 5) 益子聖一, 大木正幸, 馬場俊彦, 時任良彦, 伏見武志, 仁田真一, 長栄 勲, 物井 誠, “1200DPI-CCD 密着センサモジュールの開発,” 映像情報メディア学会研究会, 2000 年 11 月, pp.21-26, 2000.
- 6) Miyada, et al., “A 100MHz Data-Rate, 5000-element CCD Linear Image Sensor with Reset Pulse Level Adjustment Circuit,” ISSCC 1992.