

解説

オートフォーカスカメラ

浜田 正隆*・当山 正道**

*ミノルタ(株)カメラ開発部 〒590 堺市大仙西町 3-91

**キヤノン(株)レンズ開発センターレンズ第1技術開発部 〒146 東京都大田区下丸子 3-30-2

(1995年3月30日受理)

Automatic Focusing Cameras

Masataka HAMADA* and Masamichi TOYAMA**

*Camera Development Division, Minolta Co., Ltd.,
3-91, Daisen-Nishi-machi, Sakai 590

**Lens Products Development Div. 1, Lens Products Development Center, Canon Inc.,
3-30-2, Shimomaruko, Ohta-ku, Tokyo 146

1. はじめに

カメラは電子技術の発達とともに自動化を進めてきた。その中でオートフォーカス機能(以下AFと呼ぶ)は残されていた大きな課題の一つであった。AFは、オプティクス、エレクトロニクス、メカニクスの技術が融合して達成された。その中で重要な位置を占めるのが、距離、もしくはピントを検出する光技術である。そしてその実用化のキーエレメントがあるとすれば、光をセンシングする固体撮像素子と、情報を処理するマイクロコンピュータということになる。これらはAF性能を得るためだけでなく、カメラを大きくせず、また価格を抑えることにも貢献した。

AFカメラは、1963年に初めて試作品が発表され¹⁾、1977年に最初の製品が市場に出た²⁾。カメラはこの頃まで、一般の人にとって精密で難しいものという概念があり、各家庭には昔のカメラが一台あるかないかという普及度合であった。しかしコンパクトカメラが、フラッシュの内蔵に続いてAF化、フィルム巻き上げなどの自動化が進んだ結果、1970年後半から急激に需要が拡大した(図1)^{3,4)}。一般家庭でカメラの買い換えが進み、コンパクトカメラの生産台数は一眼レフカメラを大きくしのぐようになった。

一方、一眼レフカメラのAF化は1981年が最初で⁵⁾、コンパクトカメラから4年後である。しかし普及したのは、1985年の価格も大きさも手頃な製品⁶⁾の発売

以降となった。一眼レフカメラはAF化により、マニアだけでなく一般ユーザーにも普及し始めた。そして減少傾向にあった一眼レフ市場を一時盛り返した。AF一眼レフカメラはまず年配層に支持され、年齢で目が弱くなくても写真を撮り続けることができるという世界を築いた。そして今は若い母親層にも支持されるようになった。

一方、ビデオカメラのAF化は1980年に始まった。しかし当時はまだカメラとレコーダーが別体であり大きく重く、まだ家庭に入る製品とはいえなかった。その後急激な小型化とともにAFの高性能化が相まって今日の手軽に使えるビデオカメラが実現した。

いずれにしても現在のカメラ市場は、AF搭載機が大半を占めている。国内出荷台数をみると一眼レフカメラ('93年)89%、コンパクトカメラ('87年)84%('88年以降は統計上AF分類なし)〈日本写真機工業会統計より〉、ビデオカメラ('95年)92%(AF機種数比率)となっている。この解説ではAFが普及した現在までどのような技術によって課題を解決し、そして発展を遂げたかを紹介する。

2. 銀塩カメラのオートフォーカス

2.1 AF方式

AFの検出方式は古くから様々検討されてきたが、大きく分けると距離を測る方法と撮影レンズ結像面のピントを検出する方法がある。表1にこれらの特徴を示す。

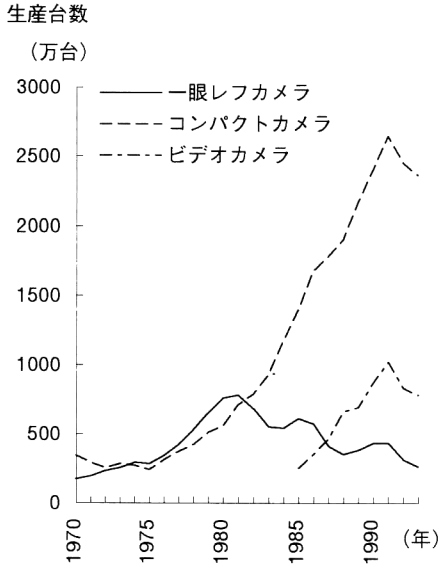


図1 カメラの生産台数 (日本写真機工業会統計およびフォトマーケットより)

この表のアクティブ AF とは、光を被写体に向けて投射し、三角測量原理に従い距離を測定する方法、もしくは超音波の反射時間を計測して距離を測る方式である。一方パッシブ AF とは、被写体のコントラストを測定しピント位置を求める方式、2つの被写体像を比較して三角測量原理で距離を求める方式、または撮影レンズの瞳を分割し2つの被写体像の位相差を測定してピントずれ量を求める方式である。

最初の AF カメラは、パッシブ AF 方式 (ハネウエル ビジトロニック AF 方式) を採用したコンパクトカメラであった²⁾。この方式は当初多く使われたが、可動部がありまた暗いところでの AF が苦手であったため、しだいにアクティブ AF 方式 (キヤノン LED 走査方式、ミ

ノルタ多素子アレイ方式など) へ移行しコンパクトカメラ用 AF として定着した。

これに対し一眼レフカメラは、その要求する精度が高く製品化は遅れていたが、まずコントラスト方式が製品化された。この方法は撮影レンズ結像面のコントラストの高さを検出し、最大コントラスト時にピントが合っているという原理に基づく。コントラスト方式はピントのずれ量とずれ方向を求めることが苦手なため、AF に要する時間が長くかかった。そこでこの方式は一眼レフでは発展せずに終わった。かわって予めピント位置からのずれ量 (デフォーカス量) がわかることを特徴とした位相差方式 (ニコン AF 方式、ハネウエル TCL 方式、ミノルタ AF 方式など) が発展を遂げ、現在一眼レフはすべてこの方式となっている。

そもそもカメラに使用すべき理想の AF とは、環境条件 (明るさなど) や被写体条件 (距離、大きさ、コントラスト、空間周波数、画面内位置、遠近競合状態、動体など) や、撮影レンズに依存しないでピントが合うことである。カメラの AF はこれらの課題に対し、理想状態に近づけるよう進化しているのである。

2.2 コンパクトカメラの AF

コンパクトカメラで主流となっているアクティブ AF は、赤外光を用いた可動部のない方式である。原理は図2のように投光部から出た光が、被写体から反射されて戻ってくる位置を検出し距離 L を求める。投光部と受光部との距離を B 、受光部側のレンズ焦点距離を f (おおむねレンズから f の距離に受光部を置く)、距離 L の被写体からの光の反射位置を X (無限反射位置基準) とすると、距離 L は、 $L=Bf/X$ で求めることができる。投光部の光源には赤外 LED (IRED; infrared emitting diode) が使用され、受光部には分割タイプのSPD (silicon photo diode) または PSD (position sensitive

表1 AF方式の比較

分類	距離検出		ピント検出		
	アクティブ AF		パッシブ AF		
	赤外 LED	超音波	位相差		コントラスト
外光パッシブ			TTL 瞳分割	前後ずらし	山登り
検出距離範囲	近接に限界		特になし		
	遠距離に限界				
精度依存	複写体距離		複写体コントラスト		
苦手条件	反射率, 遠距離		低コントラスト, 低輝度		
	けられ	障害物	遠近競合, 繰り返し	大デフォーカス	

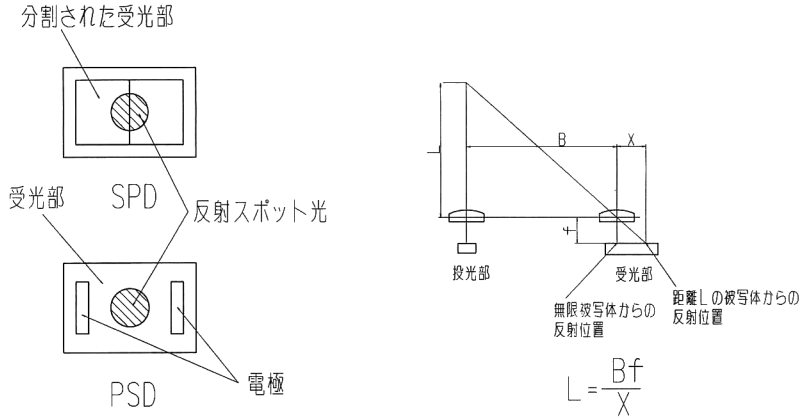


図2 アクティブAFの原理

device) (図2) が使用される。SPDのタイプは反射スポット光の受光量比で反射光位置を求める。検出距離範囲等によって、SPDの分割数は増やす場合もある。PSDのタイプは、2つの電極から得られる電流比で反射光位置を求める。

アクティブ方式の課題は、太陽光下の測距と遠距離の測距である。赤外光の反射位置を検出する際、光量の強い日中で反射光を検知するには光源にかなりのパワーが必要である。このパワーを得るため、IREDには1A程度の電流を流す場合もある。それでも検出すべき反射光の信号は微弱で、日中の定常光成分に比べると1/10000程度である。アクティブAFには大変微弱な信号を処理する回路技術が必要となる。また、S/N (信号/ノイズ) を上げるために距離検出時に妨げになる日中の定常光成分を取り除き、反射光成分すなわち距離情報成分の信号のみを増幅して取り出す回路構成をとる。これによって明るい環境でのAF精度を上げることができる⁷⁾。

ところがアクティブAFの完成度が上がる中、最近ではコンパクトカメラが長焦点距離化され、赤外光の到達距離が不足するという問題が顕著になってきた。そこで遠距離でも測距しやすいパッシブAFが再び見直されるようになった。最近のパッシブAFの特徴は、当初のものと異なり受光部の画素数が多く(100~300画素)、またマイコンを使ってデジタル処理をし、データの補正を行い測距に求められる精度(フィルム面換算で100μmオーダー)を確保していることである。検出原理は図3のように2つの被写体像の間隔の変化量を求め、距離Lを得る。アクティブAFの原理と同様に無限被写体位置を基準に、距離Lの被写体像の位置をそれぞれX₁とX₂とすると距離Lは、 $L = Bf/(X_1 + X_2)$ で求まる。

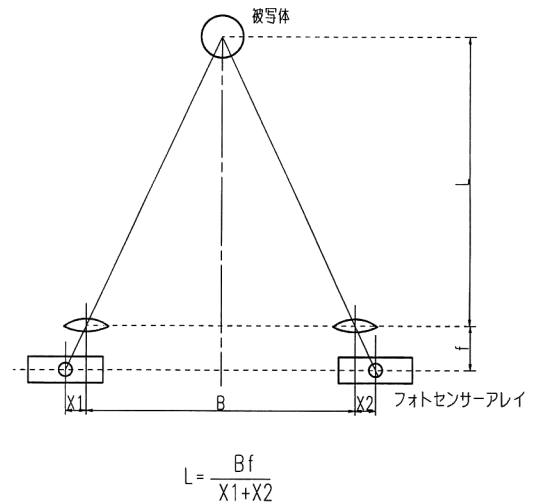
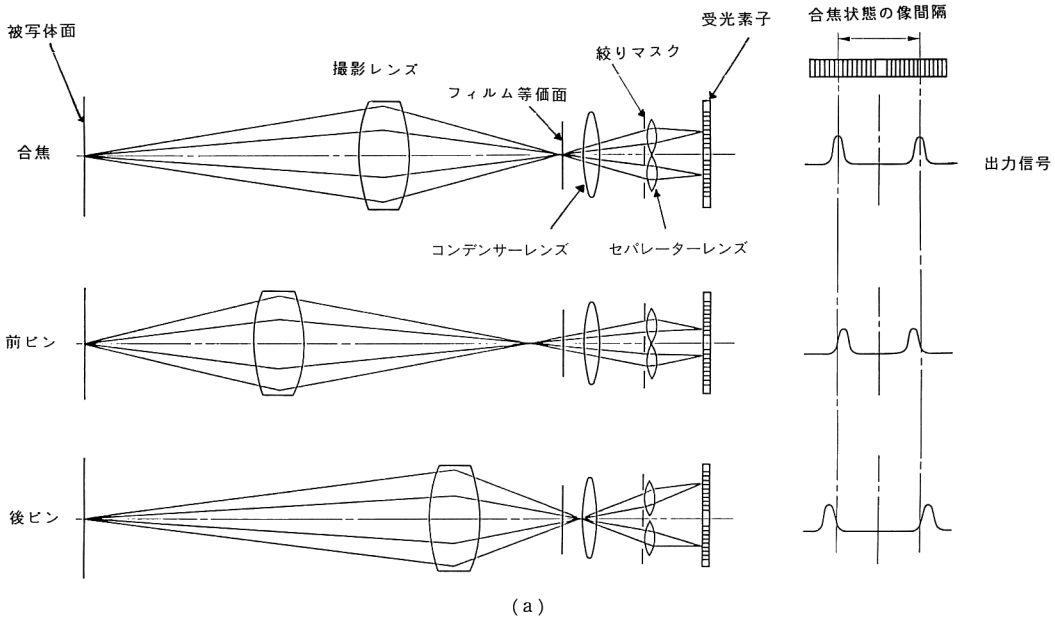


図3 外光パッシブAFの原理

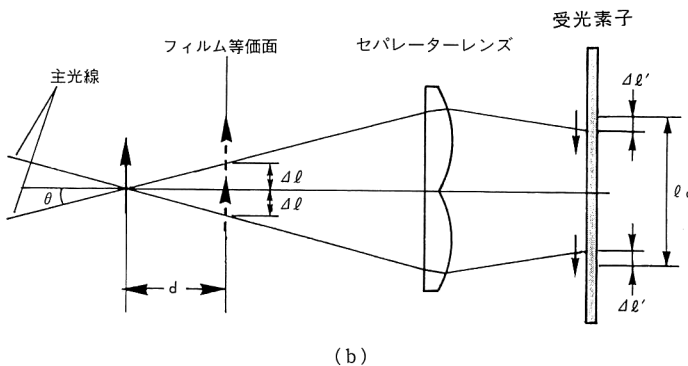
2.3 一眼レフカメラのAF

一眼レフカメラのAFで使用される検出系は、コンパクトカメラと異なり、撮影レンズを通過した光を利用するTTL (through the lens) 光学系である。一眼レフカメラは様々な交換レンズで撮影できることが特徴であるが、どのような焦点距離のレンズでもピント精度を確保するためTTL光学系をとる。これにより距離のパラメータはピントずれのパラメータに置き換わり、ピント精度は被写体距離に依存しなくなる。ここでは一眼レフカメラで主流となったTTL光学系の位相差式AFについて説明する。

位相差式AFの検出系(以下AFセンサーと呼ぶ)の原理を図4に示す。2つの被写体像の位相差、すなわち像間隔の変位量を測定してピントずれ量を求める。図



(a)



(b)

図4 一眼レフカメラ用位相差式AFの原理

4(a)でピントが合っているときは、像間隔はAFセンサーの設計時に決まる所定値であるのに対し、撮影レンズが前ピンなら像間隔が狭くなり、後ピンであれば広くなる。図4(b)でコンデンサーレンズを省いて簡単にモデル化し、ピントずれ量 d を求める原理式を求める。AFセンサーの主光線の角度を θ 、セパレーターレンズの倍率を β 、像の移動量を $\Delta l, \Delta l'$ とすると、 $d = \Delta l / \tan \theta = \Delta l' / \beta \tan \theta$ で表される。ここで $\beta \tan \theta$ はAFセンサー設計上のパラメーターであるから、 $\Delta l'$ が求まればピントずれ量 d が求まる。

ここでこの2つの像に寄与する光束が撮影レンズ内をさえぎられることなく通過しないと、2つの像の対称性が崩れてピント検出誤差が発生する。そこでコンデンサーレンズと絞リマスクを用いて、瞳分割される光束が撮

影レンズの有効領域内を通過するように規制している。この光学系をもつ位相差式AFは一眼レフカメラに要求される精度 ($10 \mu\text{m}$ オーダー) に応えられる方式として確立した。

しかし、一眼レフカメラでAF化するには次のような課題があった。それはいろいろな収差特性の交換レンズにおいても安定したAF精度を出せるシステムを構築することであり、その課題は交換レンズ内にその特性情報を書き込んだメモリーをもたせることで解決した。情報はピント位置の補正情報や、フォーカス制御情報で、レンズとカメラ間で通信する。カメラはその情報に基づいてAFする⁸⁾。

ここでこのカメラ内のピント位置の補正原理を説明する。撮影レンズのもついくつかの収差のうち、ピント位

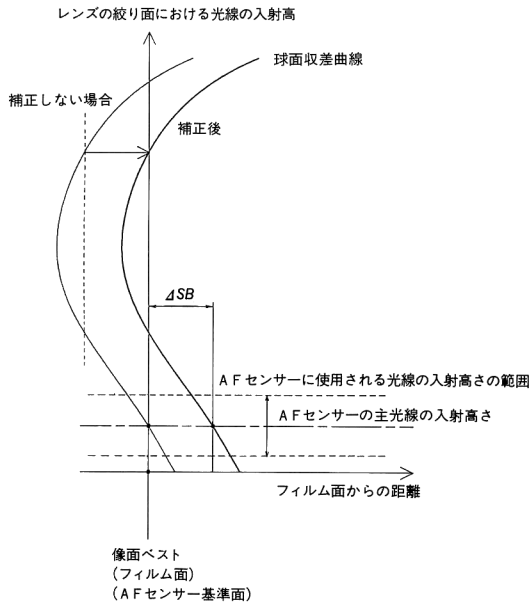


図5 撮影レンズの像面ベストとAFのピント位置

置に最も深く関わるのは球面収差である。図5は撮影レンズの球面収差を表した図で、AFセンサーをフィルム等価面においた場合である。撮影レンズの開放F値が5.6または6.7付近でもAF可能にするため、AFセンサーで使用する光束を、撮影光軸に近い狭い範囲とする。よってAFセンサーから得られるピントベスト位置は、撮影に寄与する光束で定義される撮影レンズの像面ベスト*1位置とは異なる位置にある。そこで実際にAFする場合はこの偏差量(ΔSB)を、すでに求めたピントずれ量に対し補正し、像面ベストをフィルム面に合わせるよう撮影レンズを制御する。このΔSBはズーム位置等の諸条件で変化するため、多次元の補正を行うことになる。多くの補正をして初めて、どのような交換レンズでもピントの合った写真が撮れるようになった。

以上のようにして一眼レフカメラのAFが成立した。最近では、画面中央以外でもピントを合わせることができるよう、図6のようにAFセンサーを複数組み合わせた多点AF化も図っている⁹⁾。さらに多点AFの複数エリアから使用するエリアを視線で選択するカメラも製品化され¹⁰⁾、今後さらに発展していく方向にある。

3. ビデオカメラのオートフォーカス

ビデオカメラのAFは当初は銀塩カメラのAFを応用

*1 像面ベスト：写真を撮ったときに、その撮影レンズの性能が十分発揮したと定義する平面。

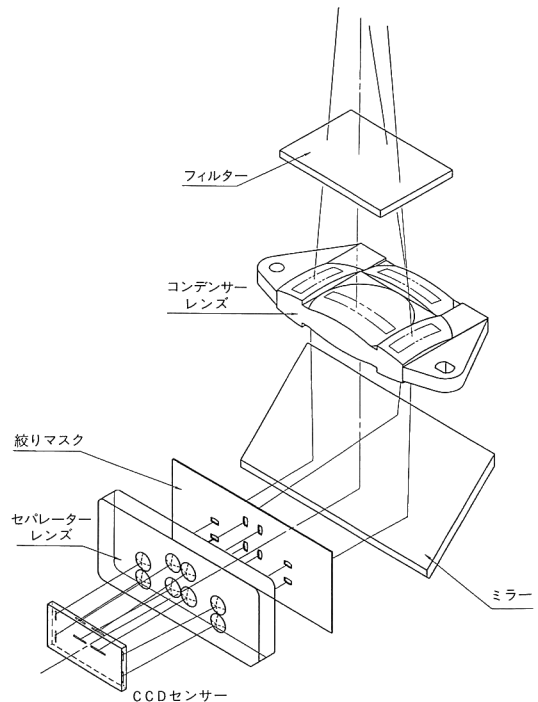


図6 一眼レフカメラの多点AFセンサー

するところからスタートした。銀塩カメラと同様、様々な方式のAFが製品化されたが、現在ではコントラスト方式(映像信号利用方式とも呼ばれる)に統一された。以下ここに至るまでの経緯について述べてみたい。

3.1 技術開発の時代(1944~1979年)

技術開発の時代はパテント出願からその様子がうかがえる。コントラスト方式の試行法(山登り方式とも呼ばれる)は1944年にRCA社から出願されている¹¹⁾。ピントが合うにつれて映像信号内の高周波成分が大きくなり合焦時に最大値をとるという原理に基づく。レンズを試行的に一方へ動かす、高周波成分が増加すれば同一方向へ動かす続ける。逆に高周波成分が減少するならばレンズを反対方向へ反転させる。ピークを過ぎると反転してピークで停止する。試行的に起動するため、試行法とよばれている。また合焦に至る信号変化の様子が山を登っているようなので、山登り方式とも呼ばれる。また合焦に至る信号変化の軌跡を山登り曲線という。この特許は現在のコントラスト方式の基本が表現されている先駆的な特許である。

1958年出願の米国特許¹²⁾も重要な特許である。試行法(山登り方式)を改善する変調法(前後ずらし方式とも呼ばれる)という技術が開示されている。図7のカメ

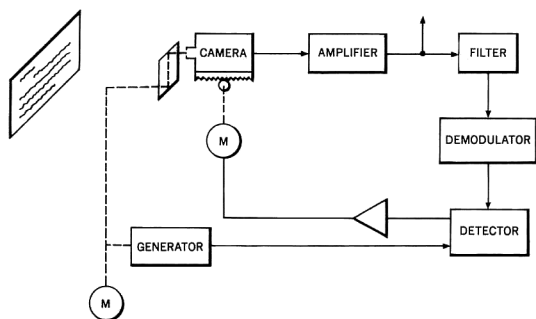


図7 変調法

ラの前のプリズムを上下に振動させて光路長を変化させピントを前後に振って AF 信号を変調している。変調の位相と変調により変化する AF 信号の位相を比較することにより、前ピンか後ピンか合焦かの区別ができ、また山登り曲線の傾斜を検出できる。図8のピエゾオートフォーカスがこの方式である。この技術により、フォーカシング時のハンチングやピントが合わないままの不動作などが改善される。

1965年NHK総合技術研究所から研究レポート「山登りサーボ方式によるテレビカメラの自動焦点調整」が発表された¹³⁾。実際に試作品を製作するとともに、アナログコンピューターを用いてサーボ動作のシミュレーションおよび検討を行ったもので、日本メーカーによる製品化の指針となった重要な論文である。

3.2 製品化の時代 (1980年以降)

これまでに4つの方式のAFが製品化された。パッシブ位相差方式、アクティブ三角測量方式、超音波方式、コントラスト方式である。

ビデオカメラで最初に製品化されたAFは位相差方式(外光パッシブタイプ)である。1980年発売の日立のVK-C800であり、スチルカメラで多用されたハネウエル社のピジトロニクモジュールを用いている。パッシブ位相差方式にはこのほかにもキャノンのSST¹⁴⁾方式があり、東芝やアカイのビデオカメラに用いられた。ビデオカメラに用いられるパッシブ位相差方式は1983年以降、ハネウエル社のTCL方式に絞られていった。TCL方式はAF光学系がTTL化(撮影レンズを通してピントを合わせる)されており小型化が可能なのである。TCL方式は1990年頃まで用いられたが、コントラスト方式に変わっていった。コントラスト方式はAF専用のセンサーや光学系が不要のため、より小型化が実現できたためである。

アクティブ三角測量方式は1981年に発売された。シ

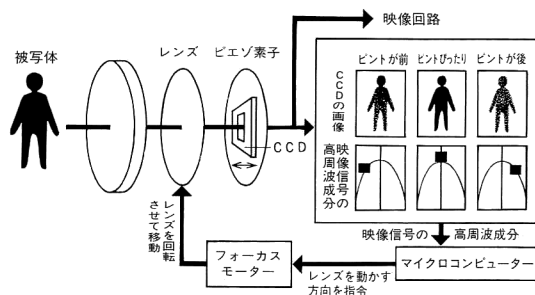


図8 ピエゾオートフォーカスの仕組み(松下NV-M3)

ャープのXC-3SAである。赤外線を投射して戻り光の角度を測定するこの方式(図2参照)はシンプルでローコストなため重用された。しかし赤外線を投射するレンズと受光するレンズが必要で小型化には不向きであるため、1994年頃コントラスト方式にとっかわられた。

超音波方式は1982年に発売された。松下のVZ-C80である。指向性を鋭くしようとするとホーンが大きくなり小型化に不向きで短命に終わった。

コントラスト方式は1982年末に発売された。日立のVK-C3000である。先行した3方式がスチルカメラのAFをベースにして動画対応をはかったものであるのに対し、これは初のビデオカメラならではのAFであった。試行法(山登り方式)である。手動フォーカスは前玉レンズにて行いAFは後玉レンズにて行う特殊な方式であった。その後、1987年から三洋、ソニー、日本ビクターから前玉フォーカスによる試行法(山登り方式)のAFの製品化が相次いだ。

変調法の製品化は1985年松下のNV-M3に始まる。CCD(charge coupled device)をピエゾバイモルフの円盤型アクチュエーターで振動させている(図8¹⁵⁾)。1988年に松下寿電子からリアフォーカスズーム(RFZ)レンズを用い、フォーカスマーターで変調を兼ねる方式が製品化された。PV-460である。これは手振れ補正機能の関係でレンズの重心移動を避けるためにRFZレンズが採用されている。同じく1988年日本ビクターより小型RFZレンズと映像信号方式を組み合わせた変調法のAFカメラ、GR-A30が発売された。このカメラやその後の松下のNV-MV1あたりが現在の各社のAFシステムの先駆けであろう。

現在の各社のコントラスト方式のAFはほとんどすべてがRFZレンズとの組合せとなっている。その理由について簡単に触れておく。前玉フォーカスはワイド側でピントがほとんど変化せず、したがってレンズによる変

調が困難である。またテレ側ではレンズを正逆転させ変調を行うと像の倍率変化が目立ち、記録画像の品位を損なう。これに対してRFZレンズでは上記の問題がない。またフォーカスレンズが小さく軽量である。このためAFの高速化とレンズによる変調が可能となった。また単一のフォーカシングモーターでフォーカシングと変調ができるため小型化にも寄与している。ちなみにRFZレンズは1987年にミノルタのビデオカメラ、C-1により初めて製品化され、パッシブ位相差方式(TTL瞳分割)のAFと組み合わせられていた。

一方、フォーカシングモーターの面でも変化があった。当初はDCモーターを使用していたが、レンズのRFZ化に伴い、制御性のよいステッピングモーターに変わっていった。またAFの高速化を狙ってリニアモーターを採用する動きも一部にある。前述のPV-460や1991年発売の日立のカチャミリE25や、最近ではソニーのCCD-TR1がそれである。

AFを別の観点から考えたものとして、1991年キヤノンから発売されたLX-1およびその交換レンズ群がある。これはコントラスト方式のAFによるレンズ交換可能なシステムで、ソニー、日立、松下およびキヤノンに

より開発されたフォーマットに基づいている(図9)。また1994年のキヤノンのMovie boy E1は、コントラスト方式AFに視線検知機能を組み合わせ、画面内の任意の被写体にピントを合わせることができるものである(図10)。

最後にキヤノンのビデオカメラ用AFレンズシステムの軽量化の実績をご紹介します。1983年のアクティブ三角測量方式AF付きレンズは約510gであった。10年後の1993年のコントラスト方式のシステムではレンズとAF回路合わせ約55gである。約1/10に軽量化された。これは、コントラスト方式AFの搭載、RFZレンズへの変更、CCDの画面サイズの半減に伴うスケールダウンなどにより達成された。ビデオカメラの軽量化に大きく貢献している。

4. おわりに

このようにカメラのAFは、理想のAFに向け、各種カメラにふさわしい性能を得るために、またカメラを小さく安くするために、数々の課題を解決し発展してきた。今回は普及の背景にあるその解決法を、主として光学的視点で解説した。しかしAFはこれ以外にもアクチュエーター技術やセンサー技術、精密加工技術の開発を伴って成り立っている。すなわちAF技術は光技術、電子技術、精密機械技術、制御技術それぞれの最先端の技術を基盤として発展した、いうならば最先端技術を融合させた日本ならではの技術といえよう。

今後のAFは、可能な限り検出領域を拡げ、任意の位置でAFでき、どんな状況やレンズでもピントが合うAFに向けてさらに進化させ、カメラを使用するユーザーの要望に応じていく必要があると感ずる。

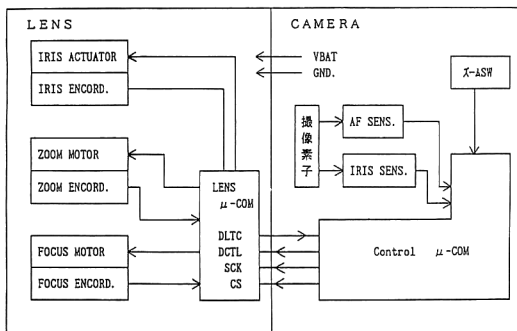


図9 変換レンズシステム

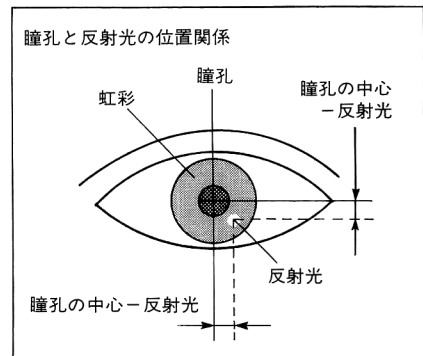
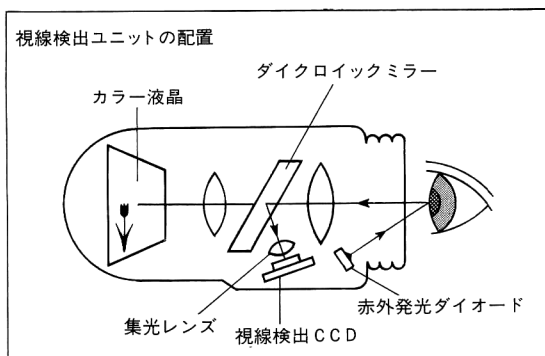


図10 視線検知

文 献

- 1) 山本 晃: “カメラの自動化がもたらすもの”, 写真工業, 303 (1976) 31-34.
- 2) 小西六写真工業: “コニカ C35AF”, 写真工業, 332 (1978) 74-79.
- 3) 日本写真機工業会: 日本の写真産業 JCIA REPORT '94, 平成6年版 (1994) p. 7.
- 4) フォトマーケット: フォトマーケット増刊号, 1994年度版, 188 (1994) 22.
- 5) 旭光学工業技術本部: “ペンタックス ME-F”, 写真工業, 392 (1982) 67-74.
- 6) ミノルタカメラカメラ開発部: “ミノルタ α -7000”, 写真工業, 432 (1985) 80-92.
- 7) 松田元伸: “クロストーク応用の位置センサを備えたオートフォーカス”, Minolta Techno Report, 1 (1984) 22-29.
- 8) ミノルタカメラ: “ α システムの技術”, Minolta Techno Report, 特集号 (1986) 16-73.
- 9) 浜田正隆: “一眼レフカメラにみる AF 技術”, 日経メカニカル, 377 (1992) 84-92.
- 10) キヤノンカメラ開発センター: “キヤノン EOS 5”, 写真工業, 525 (1993) 58-72.
- 11) G. L. Beers, *et al.*: “Television pickup control system,” U. S. Patent No. 2,403,628 (1946).
- 12) F. N. Gillette, *et al.*: “Automatic focusing system,” U. S. Patent No. 2,964,590 (1960).
- 13) 石田順一, ほか: “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, 17 (1965) 21-37.
- 14) 八木信忠, ほか: “キヤノン AF 514 XL-S”, 写真工業, 369 (1980) 93-96.
- 15) 松下電器産業(株): “ピエゾオートフォーカス”, 読売新聞, 1987年4月16日.