フィルムカメラにおける電子化

篠田 信比古[†]

銀塩カメラにおける電子化の内容を、歴史的な流れの中で位置付けて、電子化の度合いの高い一眼レフカメラを例にとり、自動露出、自動焦点の簡単な技術的背景を紹介し、最近の話題と動向を解説する。

1. ま え が き

銀塩カメラの発展の歴史を振り返り、デジタル化、マイコン化への歩みをたどる。

当学会での興味の対象はいわゆるスチルビデオカメラにあると思うが、銀塩カメラの解像力、ラティチュードの広さ、ハードコピーの早さ、機器価格の安さなどの点から、まだまだ主力を短期に譲ることはないものと思われる。より使いやすいカメラへと改良が続けてきた足跡を、電子化という側面から眺めることとしたい。話題は電子化の程度の高い 35 mm 一眼レフカメラを特に取り上げて、その主要機能を解説して、最近の話題のカメラについて具体的な応用を考えていきたい。

2. カメラの電子化の歴史

カメラの電子化の歴史は意外に古く、1936 年に露出計付きのカメラが誕生し、1938 年にはコダック社より EE カメラが発売されている。

セレン光電池は光さえ当たれば直接電流計を駆動することができるので、1960 年位まで多くのカメラに用いられたが、大面積を必要とし、直線性・応答性に難があり、経年変化も激しい。メータを振らすには電池が必要であるものの、CdS が使用されるようになった。

1963 年にはポラロイド社より、トランジスタを用いて電子回路で通電時間を制御する電子シャッターカメラが製品化された。

メータ制御の時代は、メータの指針が制御出力であると共に、表示出力であった。目盛板を赤くでも塗っておけば警告表示も兼ねることができた。電子タイマを採用したカメラでは、低輝度被写体では長秒時露光となり、その警告のためレベルを検出する回路、その検出を撮影者に知らせるための、ランプとその駆動回路も必要とする。

CdS が実用化される頃から、一眼レフカメラでは TTL (Through The Lens) 測光が採用された。測光素子の置場所の制約から受光面照度が充分とれず、さらに高感度の測光素子として、SPD (Silicon Photo Diode) に期待が移った。しかし、低輝度下においては本質的に光電流が小さく、キャノン EF では 3 V の電源電圧で作動する BiMOS-IC を増幅回路に使用した。

TTL 一眼レフカメラにおいては、撮影時には受光素子への光束が断たれてしまうので、電子シャッターで秒時制御を行うためには測光量の記憶を行わなければならない。初期の絞り優先電子制御一眼レフカメラは主ミラーが跳上る時に記憶コンデンサとアンプを接続している SW を開放し、受光量をアナログ的に記憶する方法がとられた。

1972 年にはポラロイドより、SX-70 という即時印画のカメラで、大規模な IC 化によってメカニズムの電子的シーケンス制御を行うカメラが発表された。

1972 年に I²L が発表され、デジタル回路とアナログ回路がワンチップに搭載できる技術が発表された。カメラ用の IC にとって、このようなデバイスはうってつけであり、以後の LSI 化に大きな働きをした。

1976 年にはキャノンから AE-1 が発表された。生

[†] キヤノン株式会社 カメラ開発センター

“Electronics in Silver-Haloid Film Cameras” by Nobuhiko Shinoda (Camera Development Center, Canon Inc., Kawasaki)

産合理化のためカメラのユニット化を図り、これらのユニット間を3個のICと大型フレキシブル回路基板で繋ぎ、アナログ演算とシーケンスのデジタル制御をI²Lによって電子化を行った。

さらに1978年には、いっそう集積度を高めたI²Lにより演算・制御のすべてをファインダ内表示を完全なデジタル回路で構成したキャノンA-1が発表された。

露光演算・制御回路のデジタル化によりシャッタ優先、絞り優先に加えて、実現されたプログラム露光演算が80年代の一眼レフカメラの当然持つべき仕様のひとつとなってきた。

80年代にはCMOSの集積度が高められワンチップマイコンが大幅に普及してきて、専用のデジタル回路を設計することもなく、どのメーカーにとっても演算・制御のデジタル化が容易にできるようになった。また、回路方式や記憶の問題で悩むことなく、プログラム露光演算の多様化もできるようになった。測光方式も、単純な画面内の平均的な測光から平均・部分の切換え、さらには多点測光、評価測光といった複雑な演算も可能となってきた。

また自動巻き上げ、巻き戻しといった機能も一般的となり、さらにモータの内蔵を進めて、キャノンT90では2つのマイコンにより制御される3つのモータを有効に使って、単3乾電池4本で秒間4.5コマの撮影ができることを示した。

電池を置く場所やモータの配置によって増加した空間を、ボディの軽量化のために採用されたプラスチックでその造型性を積極的に生かし、人間工学的に操作性・ホールディング性も非常に優れたフォルムを有し、視覚的にも斬新で鮮烈なデザインをも提供した。

気軽に撮れる一眼レフということで、80年代後半の一眼レフの大きな潮流は自動焦点の普及が挙げられよう。

1981年に発売されたアサヒMEFでは、MOSセンサーが、1982年のAL-1ではCCDラインセンサが使われた。

1985年に発売されたミノルタα7000は、CCDと汎用8ビットマイコンを用い、前2社の鮮鋭度検出方式のAFとは異なり、ずれを測る位相差検出方式のAFを採用し、一眼レフカメラとしての機能もマイコンを有効に使用したまとめあげを行い、ヒット商品となった。

測光素子から始まったカメラの電子化も、ここまで自動化が進み、多くの演算素子、アクチュエータを装備して、さらにモータやストロボを駆動するようにな

ると、電源の消耗も伴う。また、マンガン系の電池では自然放電もある程度避けられず、めったに使用することのないユーザの潜在的クレームでもある。そんなことから、大容量、長寿命のリチウム電池の採用も今後のカメラの流れとなっていくものと思われる。

3. 自動露出

3.1 測光

前章で述べたように、各種の光電変換手段が実用化されてきたわけであるが、現在ではSPDを利用した測光が一般的である。図1(a)で示すように、ゼロバイアスされたSPDの光電流は光量に比例して、この電流を対数圧縮した電圧出力として取り出す。 I_L は低輝度下では数pAと小さく、僅かなリーク電流でも露出誤差は大きくなる。したがって、低輝度まで測光の必要な高級カメラでは、受光素子と増幅器は一体のパッケージに納めることが望ましい(図1(b))。また、今春発表したキャノンEOSシステムでは、測光範囲を6つに分割したり選択したりと、多機能化を迫られ、受光素子と増幅器の1チップ化を実現した。

3.2 APEX 演算

カメラの露出制御を考えるのに必要な情報は、被写

図1(a) ゼロバイアス対数圧縮測光回路(整合の取れたダイオードをペアにして、 I_0 の影響をキャンセルする)

$$V_O = V_R - (kT/q) \ln(I_L/I_0) \\ = V_G - (kT/q) \ln(I_L/I_R)$$

図1(b) 2つの測光範囲を持つ測光素子(基準電圧発生器、増幅器、対数圧縮ダイオード等をBiMOS ICにして、分割センサと一体のパッケージに組込む)

体輝度(B)，使用フィルム感度(S)，レンズ絞り値(A)，シャッタ速度(T)であり，

$$B \times S / K = A^2 / T$$

を満たすとき適正露光を与える (K は定数)．このままでは乗除算，開平等の演算を必要とするうえに，光量のダイナミックレンジが広く測定上も困難なので，対数をとって扱うこととする．各々の2を底とする対数をとってAPEX値と呼ぶ (Additive System of Photo-graphic Exposure Value)．

$$A_v = \log_2 A^2 \quad A_v \quad 0 \quad F1.0$$

$$T_v = \log_2 1/T \quad T_v \quad 0 \quad 1 \text{ 秒}$$

$$S_v = \log_2 0.3S \quad S_v \quad 0 \quad \text{ISO } 3$$

$$B_v = \log_2 B / 0.3K \quad B_v \quad 0 \quad 1 \text{ fL}$$

$$B_v + S_v = T_v + A_v = E_v$$

3.3 TTL一眼レフの露光演算

TTL 測光の結果は受光面は当然撮影レンズの F 値 A_{vo} に対応して，測光値を B_{vo} とすると，

$$B_v = B_{vo} + A_{vo}$$

したがって，

$$B_{vo} + S_v = (A_v - A_{vo}) + T_v$$

$A_v - A_{vo}$ というのは，撮影絞りと開放絞りの差，すなわち絞り段数に相当する．

絞り優先 AE 方式では，測光，フィルム感度，絞り段数を入力して加減算で，求める T_v に相当する実時間をシャッタ制御に使用すれば良い．

シャッタ優先方式では，与えられた T_v から逆に絞り段数を求め，その段数になるように絞りを制御してから，与えられたシャッタを制御すれば良い．

プログラム AE では，さらに，

$$T_v = \alpha A_v + \beta$$

との交点から $A_v - A_{vo}$ と T_v を求めて制御する．

実際には求めた $A_v - A_{vo}$ の答が，正の所定範囲に入っていなければ絞りの制御はできないし，シャッタ制御もその機械に与えられた最高速度，最低速度の範囲に入っていなければならない．

3.4 電子シャッタの概要

一眼レフカメラではフォーカルプレーンシャッタが用いられている．これはフィルム巻上時に先幕・後幕駆動用の2つのスプリングをチャージしておく．レリーズされると，普段はフィルムを遮光している先幕を釈放して露光を開始せしめ，所定秒後に後幕を釈放して，フィルム面を遮光することでシャッタ動作をさせる．

デジタル回路で指数伸長するには，以下のように近似して比較的簡単な回路構成にすることも提案されている．

$$T_v = m - i/n \quad (i=0 \sim n)$$

$$T = 2^{-T_v}$$

$$= 2^{-m} \times 2^{i/n}$$

$$\approx 2^{-m} \times (1 + i/n)$$

$$= 2^{-m} \times 1/n * (n + i)$$

ここで $n=8$ とすると，

$$T = 2^{-13} \times 2^{(10-m)} \times (8+i)$$

すなわち，基準とするクロック周期を 2^{-13} として，10- m 段分周したパルスを $8+i$ 回カウントする．この場合，近似誤差は最大でも約 0.085 段である．

3.5 絞り制御

TTL 開放測光一眼レフカメラにおいては 3.3 節で説明したように，段数制御である．一眼レフカメラでは，図 2 のように絞りの開角度を制御するためのレバー 84 と，実際の絞りを絞り込むための自動絞りレバー 88 とが独立に設けられるものがある．

84 のレバーの回転角度が開放絞りからの絞り段数に比例するように構成されているので，カメラボディの 94 のレバーを制御することで，所要の絞り段数を得て，98 の自動絞りレバーを叩き込み，実際の絞り値を得る．絞り開放時には 84，94 が最上位にあり，レリーズ動作に伴い 94 の係止が外れて，84 を付勢してえるバネの力で 94 を下方に押し下げる．この動きが，リンク機構により 326 を動かし，その先端のブラシが 336 の板上をこすり，メカ-電気の変換をして，84 の位置を検出する．336 がポテンショメータであれば絞り段数がアナログ的に読出されるので，あらかじめ演算された値と一致したら，このリンクを電磁機構

図 2 レンズとカメラの絞り機構の一例

によってロックする。336に櫛歯状電極をつけておけばON・OFFのパルスをカウントすることで、所望の絞り段数を読取ることができる。

EOSシステムでは、電子化マウントを採用し、レンズ内に組込まれた超小型ステッピングモータによるオープンループ制御を行っている。

3.6 情報入力

露光演算では、被写体輝度とフィルム感度とプリセットされるシャッタ速度または絞り値に応じて、適正露光を与える絞りまたはシャッタ秒時が得られる。フィルム感度は現在では急速に普及したDXコードの自動読取りが一般的である(図3)。フィルム缶のすずメッキ鋼板とペイントという、およそ電気接点とは考え難い材質のため、読取りには工夫を要する。

図3 DXコードの構成(12ビットのパターンをカメラ自動読取りに使用)

レンズシャッタカメラでは、フィルム感度入力にメカニカルに受光素子の前の絞りを動かしたりする例もあるが、露光演算に都合の良いアナログ値として可変抵抗器を動かしたり、デジタル演算用にコード板を使用したりしてきた。

演算にマイコンを使用するようになってきたことから、最近ではUP/DOWNの2つのボタンで液晶素子を見ながら入力する方法もとられている。T90ではダイヤルでUP/DOWNを入力して、従来の入力感覚を保ちつつ多機能の入力部材として用いることが提案された。

3.7 情報出力

電子化したカメラには情報表示が不可欠である。単純な機能のカメラではランプの点滅による警告程度で済むが、一眼レフでは、プリセットした設定値、演算の結果を表すことが期待される。このためファインダの中に情報の表示が望まれる。人間工学的には、ファインダ下部に整然とした表示が行われ、しかも、ときにはその表示を消去しておきたいという声ファインダ内表示に要求されるというのが公約数かと思われる。これをコストや物理的制約から、カメラの性格を考えつつ省略できるものを省いて配置していく。LEDによるファインダ内表示が一般的であったが、近年、応答性・低温特性が改善されてきた液晶が採用されることも多い。

マイコンの普及と共に、先にも述べたように液晶が

図4 T90の回路ブロック図

種々の情報表示を行い、カメラの外部表示器として、設定秒時、絞り値、フィルム感度、撮影モード、撮影枚数を出力する役割も果たすようになってきた。

このように各種設定値を記憶するためには、マイコンのスタンバイ電流は極めて小さくしなければならない。また、撮影途上で電池が交換されることもあり、その間にフィルムカウンタのように記憶を失ってはいけぬデータもあり、不揮発性のメモリーが必要となる。リチウム電池でバックアップされた CMOS メモリーで実用上は充分な記憶を確保できるが、EOS システムではマイコンにオンチップされた EEPROM を利用することで、工場での調整データの電氣的記憶、フィールドでのサービス性の向上、ユーザの使用によるカメラの自己学習といった、新しい応用の展開を図り始めている。

図 4 に T90 のブロック図を示し、自動露出演算・制御の具体例とする。

4. 自動焦点

4.1 鮮鋭度検出方式

ピントの合った状態というのは、像面のコントラストが極大となる。コントラストに対応した出力は、例えばラインセンサを像面に置き、隣接ビット間の差を取り、その自乗和をとれば得られる。

一眼レフの場合には、ファインダに見える像と測距センサは対応しており、任意のレンズ位置で構図をしている時に、極大値を捜すためにレンズを動かしてみ

るわけにはいかない。そこで、焦点面近傍にピント面を狭んで 2 組のラインセンサを配置してコントラスト信号の差を求め、その極性により前ピンか後ピンかを判定し、0 の時が合焦とすれば、原理的には AF するための信号が得られる。ただし、被写体のコントラストというのは非常にダイナミックレンジが広く、くっきりした物の大きくぼけたコントラストは、影のようにぼやけた物のピントのあった状態より高いことも稀ではない。そこで、合焦の閾値を決定することが難しい。信号のレベルで正規化して閾値を設定しても、大きくぼけた所で偽合焦信号を発生してしまう。

そこでキャノン T80 では、さらにピント面のコントラスト信号が最大で、前後のコントラストが等しい点を合焦点とするアルゴリズムを採用した (図 5)。

被写体の結像面の近傍の像信号を評価するところから、撮影レンズの開孔 F 値が暗いレンズ (超望遠レンズ、拡大接写など) の合焦も精度良く判定できる。しかしながら、ピントが大きく外れてしまうと前後のコントラスト信号が共に 0 となり、合焦動作のための方向判別ができなくなる欠点を有する。

4.2 位相差検出方式

撮影レンズの左右で異なる光束で結像した像信号をいったん AD 変換してメモリーにしまい、2 像の一致度を計算する。比較する 2 像の信号を 1 ビットずつずらして、ちょうど一致する点を求めるのがこの方法である。画素数分の AD 変換と記憶と再帰的な演算が必要のため、価格的に急速に低下してきた CMOS

マイコンの普及がこの方式を支える基となった。実際には像信号が離散的で、ラインセンサの画素数も有限であるし、ループ演算は画素数が多くなると膨大な計算時間となり、各ビットずらし量の間を補間演算を行って零点を求める。このような演算には高速性、高精度が求められるので、近い将来にはハードウェア乗除算、16 ビット演算の機能までもが求められて行くものと考えられる。

左右の像を分けるのに、ハネウェルの TCL モジュール (Through Camera Lens) では、1 次結像面に置いたハエの眼レンズを用いている。ミノルタ a シリーズ、キャノン EOS シリーズでは、2 次結像光学系を用いて像分離をしている。TCL 方式は構成上単純なのであるが、センサピッチが粗く、細い線などを見るとセンサ間に結像してしまい、ピント検出ができなくなることもある。

位相差検出方式は、2 つのセンサが撮影レン

図 5 鮮鋭度検出方式 AF 作動説明 (実線は実際のフィルム面に等価な位置に結像する光線、点線は 3 本のセンサのどれかに結像する光線を示す)

ズの各々異なる領域を通る光束を拾うため、あまり小口径のレンズでは像が非対称に蹴られてしまうので、使用できるレンズの口径に制約がある。

4.3 ラインセンサの制約

どちらの方式にしても、1本のラインセンサにとってはF11位に相当する光以外は取り込めない。しかも、AFに使用する中心付近の光束はファインディングにとっても重要なので、全面的にAF光学系に配分するわけにはいかず、実際の光量はさらに小さくなる。

例えば、 $E_v 5$ の被写体を、F11の光束で見た時の像面照度は $2.24 \times 10^{-2} \text{ lx}$ となる。単純化して555 nmの波長の光電変換効率を100%としても 1.48 nA/cm^2 の光電流となる。したがって、測距素子に求められる暗電流の規格の厳しさがここから想像できよう。また、この明るさで例えば100 msで飽和出力が得られるセンサがあったとしよう。 $E_v 18$ の時には8192倍の光が当たるのであるから、 $12 \mu\text{s}$ の蓄積時間を制御しなければならず、読出し方式に工夫を凝らさなければならない。さらに、現在使用可能な測距センサは、信号のダイナミックレンジが非常に小さく、カメラの使用される光量をカバーするためには蓄積時間をきめ細かく制御しなければならない。

T80では1回前の信号処理に使用した出力を基に次の蓄積時間を決定し、ペンタックスMEFやミノルタ $\alpha 7000$ では測距素子近傍の測光素子の出力により蓄積時間を決定している。共に実用的には大きな問題はないものの、実際の像の条件とは異なる情報による制御方式であることは否定できない。TCL方式では全体の画素に当たる明るさに対応したAGC出力を有する。EOSシステムでは、BAS/Sという独自の技術による高感度センサを開発し、その中でも各画素の出力のうち最大の出力にあたる電圧が、常にモニタできるように構成した。このため、ダイナミックレンジを

充分に生かしたセンサの使用が可能となった。

4.4 レンズ駆動方式

レンズを駆動するためには動力が必要で、ペンタックスMEF、キャノンT80、ニコンF3AFでは、レンズに効率の高いコアレスモータを搭載してヘリコイドを駆動した。コンパクトなレンズにモータをのせると、どうしても異形になってしまい、レンズの重量も増加してしまう。ボディー内に搭載したモータをマウント部に設けたカプラーでレンズに結合してヘリコイドを駆動する方式がだんだん増加している。ただ魚眼レンズのようにピント合わせの不要なレンズから、超望遠レンズまでカバーする一眼レフで、1個の駆動源で真に最適なものを設計することはできない。

レンズ鏡筒駆動に最適な形状のアクチュエータが適切なコストでできれば、駆動源を個々のレンズに持たせて電気的な信号の授受のみで駆動できるシステムの方が、AFの速度・精度を高め、将来のシステム的な発展性が優れることは論をまたない。

5. おわりに

紙面の関係上、かなり説明が舌たらずになり、レンズシャッターカメラや付属品の電子技術の紹介ができなかった。また、原稿の締切が、今春発売の我々の新製品技術を発売するのに微妙なタイミングであり、説明に若干のあいまいさが残ってしまったことをお詫びいたします。

(昭和61年12月1日受付)

しのだ のぶひこ
篠田 信比古 昭和46年、東京工業大学工学部電子工学科卒業。同年、キャノン(株)入社。計算機開発部にて電卓用LSIの応用製品の設計に従事。51年より、カメラ開発部にてデジタルカメラの開発、一眼レフカメラのAF化の検討に従事。現在、同社カメラ15設計室長。