

## 焦点検出装置 I

Focus Detection

鈴木武臣\*

Takeomi SUZUKI

## 1. 緒言

一眼レフカメラの自動焦点検出はその使用者層の大衆性の割には技術的に高度なものが要求され、したがって問題点も多くいまだに本格的な実用の域に達していない。使用条件が限定される光学的な測定機や情報装置とは異なり一般用のカメラにおいては対象とされる被写体は多種多様にわたりまたその照明光源の分光分布、照度、偏光状態も広範に変化する。さらに一眼レフカメラにおいてはかなりの合焦精度が要求される上に撮影レンズも望遠用から接写用あるいは顕微鏡用まで用いられる。すなわち極言すれば本論が主題とする装置の外は何かも変わるのであって、しかもこの多様な状況下において十分に機能するものがすでに調密に組み立てられている小型のカメラの中にその形態を大きく変更することなく収納できる程度に十分小さく実現されねばならない。

幸いにも近年の IC 技術によって上述のような欲張った装置の実現も大きく前進しつつある。しかし一方では出発点に立ち戻った方法論からの検討もまた目的達成のためには必要とされている。本論ではこのような目的の装置の提案とその特性の検討結果について述べる。

## 2. 複合検出方式

図 1 は従来別々に提案され実現が計られている鮮鋭度法と相関法とによる合焦検出を統合し単一の装置によってその両者の良所を活用するために考えられたものである。図中分割レンズ  $S_1, S_2$  は撮影レンズ  $L$  を透過した光束を波面分割してレンズ  $L$  の光軸近傍の被写体像のほぼ同一部分  $A, B$  をそれぞれ別の受光素子列群  $D_1, D_2$  上に結像するものである。受光素子列群  $D_1, D_2$  はそれぞれ図紙面に垂直な方向に一樣な間隔で配列された 2 列の受光素子列  $D_{1A}, D_{1B}$  および  $D_{2A}, D_{2B}$  から成る。この構成において光束分割の方向(受光素子列に直交する方向)に関する光学像情報から相関法に基づく合焦信号を得、さらにこれと直交する受光素子列方向に関する光学像情報より鮮鋭度法に基づく合焦信号をも得ようとするものである。後に明らかになるように鮮鋭度法と相関法とは互いに相補的な特性を有するため両方法を活用することにより総合的な合焦検出能力を極めて高いものとする事ができる。なお図 1 において位相板  $P$  は受光素子列群

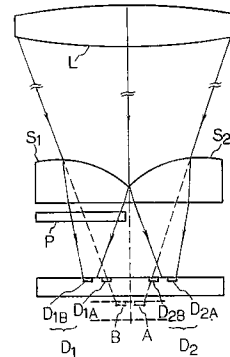


図 1 複合検出方式

$L$ : 撮影レンズ  $S_1, S_2$ : 分割レンズ  $D_{1A}, D_{1B}, D_{2A}, D_{2B}$ : 受光素子列  $P$ : 位相板

$D_1$  と  $D_2$  との間に光路差を設けるためのものでこれにより鮮鋭度に差を生ぜしめて合焦位置を検知するものである。

## 3. 相関法による合焦検出

まず相関法に基づく合焦検出の方法を説明する。図 2 は各受光素子列に入射する光束を受光素子列方向から見た様子を模式的に示したものである。同図において  $D_{1A}, D_{1B}, D_{2A}, D_{2B}$  は撮影レンズ  $L$  から見た各受光素子列の光学的位置を表している。ここで簡単のため各受光素子の拡がりは省略して点として表している。また撮影レンズ  $L$  を透過する光束は分割レンズ  $S_1, S_2$  により理想的にレンズ  $L$  の瞳において波面二分されるものとして示してある。すなわち受光素子列  $D_{1A}$  (または  $D_{1B}$ ) に入射する光束は  $D_{1A}$  (または  $D_{1B}$ )、 $M_1, D'_{1A}$  (または  $D'_{1B}$ )、 $L_c, D_{1A}$  (または  $D_{1B}$ ) を結ぶ直線で囲まれる領域にあり、受光素子列  $D_{2A}$  (または  $D_{2B}$ ) に入射する光束は  $D_{2A}$  (または  $D_{2B}$ )、 $M_2, D'_{2A}$  (または  $D'_{2B}$ )、 $L_c, D_{2A}$  (または  $D_{2B}$ ) を結ぶ線で囲まれる領域に存在する。ここで  $D'_{1A}, D'_{1B}, D'_{2A}, D'_{2B}$  はそれぞれ  $D_{1A}, D_{1B}, D_{2A}, D_{2B}$  のレンズ  $L$  に関する共役点、 $M_1, M_2$  は撮影レンズ瞳の最外郭点、 $L_c$  は撮影レンズ瞳の中心点である。いま仮に被写体が受光素子列の共役点  $D'$  と撮影レンズ  $L$  との中間の面  $O_1$  上にあるとすると、各受光素子列によって検出される光強度は面  $O_1$  と各受光素子列に層する上記光束とが交わる領域における被写体の照度分布の積分値に比例する(被写体表面の光散乱が完全拡散的と仮定して)。すなわち各受

\* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研 究 速 報

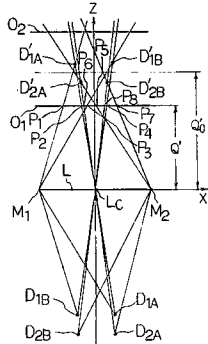


図 2 入射光束模式図

光素子列  $D_{1A}, D_{1B}, D_{2A}, D_{2B}$  における光強度信号は図 2 中に示される被写体上の領域  $\overline{P_1P_2}, \overline{P_3P_4}, \overline{P_5P_6}, \overline{P_7P_8}$  における平均照度に比例する。これにより明らかとなり  $D_{1A}$  および  $D_{1B}$  によって検出される被写体の光強度分布は  $D_{2A}$  および  $D_{2B}$  によって検出される光強度分布に比べて図中  $X$  方向 (受光素子列に直交する方向) にずれたものとなっている。同様の考察を撮影レンズ  $L$  から見て受光素子列の共役点  $D'$  より遠方の面  $O_2$  上の被写体についても行うと容易にわかるように、このずれ量の符号は  $O_2$  上では  $O_1$  の場合の逆となっている。したがってこのずれを何らかの評価関数に従って求めることにより被写体位置と受光素子列の共役点との位置関係、すなわち合焦に関する情報を得ることができる。

この評価関数としては、さまざまなものが考えられるが、演算の容易さ、評価値の符号が被写体照度分布に依存しないこと等を考慮してここでは次の関数を採用する。

$$E_R = \sum_{k=1}^N \{ |I_{1Bk} - I_{2Ak}| - |I_{1Ak} - I_{2Bk}| \} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $I_{1Ak}, I_{1Bk}, I_{2Ak}, I_{2Bk}$  は各受光素子により検出される光強度信号で、 $k$  は各受光素子列中における受光素子の番号、 $N$  は受光素子列中の受光素子数を表す。

式(1)は受光素子列群  $D_1, D_2$  における光強度信号の間の一種の相関を求めるものであるが、通常の相関の求め方とは考え方がやや異なるところがある。すなわちある関数の相関を求める際普通はある直線上の関数値をいくつかサンプルし、次にこの直線に沿って一定の横ずれが生じた後の関数値を同じくサンプルして両者間で相関量を評価する。しかしここではサンプルを行う直線 (受光素子列) と横ずれの方向とは互いに直交している。サンプリングの方向と横ずれの方向とが一致する場合のみが多く議論されているため式(1)は一見奇異に思えるかも知れないが、両方向が一致することは相関を求める上で必要条件ではないこともまた一考すれば明らかである

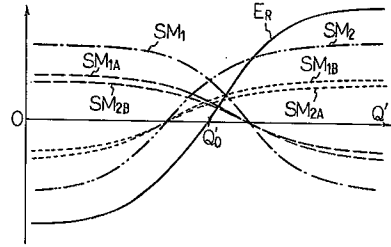


図 3 相関評価関数  $E_R$  と諸相似関数  $SM$

う。以下に示されるとおり式(1)のような相関評価を行って初めて鮮鋭度法との併存が簡単な光学系で無理なく実現できることになる。図3に  $E_R$  と被写体距離  $Q'$  との関係は模式的に示す。これにより  $E_R$  の符号により合焦位置が判定できることが明らかである。

4. 鮮鋭度法による合焦検出

受光素子列群  $D_1, D_2$  によって検出される光学像情報の中から受光素子列方向に関する像鮮鋭度を評価することで合焦位置を知ろうとするものである。

光学像の鮮鋭度の定義としては、さまざまなものが考えられるが、以下では鮮鋭度評価関数  $E_C$  として次式を用いる。

$$E_C = |I_{k_0} - I_{k_0+1}| + \frac{1}{2} |I_{k_1} - I_{k_1+1}| \dots\dots\dots (2)$$

ただし  $I_k$  はいずれか一つの受光素子列における第  $k$  番目の受光素子における光強度信号で、 $k_0$  は  $|I_k - I_{k+1}|$  が最大となるときの  $k$  の値、 $k_1$  は  $|I_k - I_{k+1}|$  が第2番目に大きい値を示すときの  $k$  の値である。

鮮鋭度法によって合焦位置を検出するには式(2)によって各受光素子列毎に評価値  $E_C$  を求め、これらを受光素子列群  $D_1, D_2$  の間で比較する。両受光素子列群の間には撮影レンズの光軸方向に光路差が設けてあるので、より高い評価値  $E_C$  を示す受光素子列群に寄った位置に合焦点が存在することが判明する。ところで各受光素子列群は2列の受光素子列より構成されているので各群ごとに二つの評価値が得られる。そこで最も単純な方法として各受光素子列における評価値  $E_{C1A}, E_{C1B}, E_{C2A}, E_{C2B}$  の各群ごとの平均値

$$E_{C1} = \frac{1}{2} (E_{C1A} + E_{C1B}) \dots\dots\dots (3)$$

$$E_{C2} = \frac{1}{2} (E_{C2A} + E_{C2B}) \dots\dots\dots (4)$$

を比較することが考えられる。

ところですでに相関法のところで述べたように第1および第2の受光素子列で検出される光学像は必ずしも被写体の同一部分に対応するとは限らず一般に  $X$  方向に横ずれが生じている。光強度は被写体上でさまざまに変化しているため被写体の互いに異なる部分の像鮮鋭度を

比較しては常に正確な合焦検出ができるとは部らない、このことを考慮して以下の方法によって評価値を比較すれば、いっそう正確な合焦検出が可能となる。まず受光素子列  $D_{1A}$  における評価値は  $D_{2A}, D_{2B}$  のいずれの評価値と比較するのが最適であるかを考える。このための一方法は  $D_{1A}$  における光学像が  $D_{2A}, D_{2B}$  のいずれにより似ているかを判定することである。これは例えば

$$SM_{1A} = \sum_{k=1}^N |I_{2Bk} - I_{1Ak}| - \sum_{k=1}^N |I_{2Ak} - I_{1Ak}| \dots\dots\dots (5)$$

の正負によって判断できる。同様のことを  $D_{1B}, D_{2A}, D_{2B}$  についても行うとそれぞれ、

$$SM_{1B} = \sum_{k=1}^N |I_{2Ak} - I_{1Bk}| - \sum_{k=1}^N |I_{2Bk} - I_{1Bk}| \dots\dots\dots (6)$$

$$SM_{2A} = \sum_{k=1}^N |I_{1Bk} - I_{2Ak}| - \sum_{k=1}^N |I_{1Ak} - I_{2Ak}| \dots\dots\dots (7)$$

$$SM_{2B} = \sum_{k=1}^N |I_{1Ak} - I_{2Bk}| - \sum_{k=1}^N |I_{1Bk} - I_{2Bk}| \dots\dots\dots (8)$$

上式の中符号の傾向を同じくするもの同志の線型結合をとることにより次式を合成する、

$$SM_1 = SM_{1A} + SM_{2B} = 2 \sum_{k=1}^N |I_{1Ak} - I_{2Bk}| - K \dots\dots\dots (9)$$

$$SM_2 = SM_{1B} + SM_{2A} = 2 \sum_{k=1}^N |I_{1Bk} - I_{2Ak}| - K \dots\dots\dots (10)$$

ただし、

$$K = \sum_{k=1}^N |I_{1Ak} - I_{2Ak}| + \sum_{k=1}^N |I_{1Bk} - I_{2Bk}| \dots\dots\dots (11)$$

以上の式(5)~(10)を図示すると図3のようになる。図から明らかかなように三つの関数の組 ( $SM_{1A}, SM_{1B}$ ), ( $SM_{2A}, SM_{2B}$ ), ( $SM_1, SM_2$ ) のいずれか一組を用いれば鮮鋭度評価値  $E_c$  を比較すべき受光素子列の対を決定できる。このうち最もすぐれている対称式 ( $SM_1, SM_2$ ) について以下説明する。式の対称性は実際の合焦検出装置を構成する上で処理回路や処理演算を対称に保ち、したがって総合的な検出性能にも不自然な偏りを排することができるので重要である。式(9), (10)および図2より明らかなおり  $SM_1$  が負の時は  $D_{1A}$  と  $D_{2B}$  とにおける光強度分布が最も相似であり、 $SM_2$  が負の場合は  $D_{1B}$  と  $D_{2A}$  とにおける光強度分布が最も相似である。したがって、

$$\left. \begin{aligned} SM_1 < 0 \text{ のとき } E_{C1} &= E_{C1A}, E_{C2} = E_{C2B} \\ SM_2 < 0 \text{ のとき } E_{C1} &= E_{C1B}, E_{C2} = E_{C2A} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12A)$$

として  $E_{C1}$  と  $E_{C2}$  との比較を行って合焦判定を行う。また、 $SM_1 > 0$  かつ  $SM_2 > 0$  の場合には  $D_{1A}$  と  $D_{2A}, D_{1B}$  と  $D_{2B}$  とがそれぞれ最も相似な対をなすから、

$$\left. \begin{aligned} SM_1 > 0 \text{ から } SM_2 > 0 \text{ のとき} \\ E_{C1} &= \frac{1}{2}(E_{C1A} + E_{C1B}), \\ E_{C2} &= \frac{1}{2}(E_{C2A} + E_{C2B}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12B)$$

として合焦判定を行う。なお、 $SM_1 < 0$  かつ  $SM_2 < 0$  の場合は物理的には存在し得ないが、被写体が周期的光強度分布を示すときなどに見かけ上生じることがある。これは合焦検出が誤動作をする例であるので実際には何らかの対策を施す必要がある。後に述べる計算例(図4のa, b)においてこの現象が生じているがこの際には鮮鋭度評価値として(12B)を採用している。

5. 各評価値の計算例

以上述べた評価関数  $E_R, E_{C1}, E_{C2}$  および相似関数  $SM_1, SM_2$  を実際の写真レンズについて計算した例を図4に示す。レンズは中川<sup>1)</sup>による  $F/1.4, f=50 \text{ mm}$  のガウス型である。被写体は2階調の格子、ステップ、デルタ状の1次元パターンおよびウエッジ状の階調を有する1次元パターンとし、これらが受光素子列に対して45度傾いて配置された場合の計算を行った。同図において各評価曲線の右肩に各被写体の光強度分布(横軸は像面座標に換算)を示してある。なおこれまでのように被写体距離  $Q'$  を変化させる代わりに被写体距離は固定(1.5 m)し観察像面距離  $Q$  を変数としている。光束分割は撮影レンズの瞳を中央で理想的に二分割するものとし、分割された半瞳を透過する光束による光軸上のポイント・スプレッド関数を各像空間面上で求めこれと上記被写体光強度とのコンボリューションを求めることで必要な光学像を計算した。なお図4においては新たな関数、

$$J_R = \sum_{k=1}^N (|I_{1Bk} - I_{2Ak}| + |I_{1Ak} - I_{2Bk}|) \dots\dots\dots (13)$$

も示されている。これは  $E_R$  が零に近い値を示したときのその有効性を判定するための関数で、 $J_R$  がある一定値以上であれば像面での光強度変化は十分に大きく、したがって  $E_R$  は有効であることを示す。なお同図d, e, fにおいて  $J_R$  は両端で増大している。これには被写体光強度分布の打ち切り(Truncation)も影響していると思われる。すなわち厳密には図4は同図右肩に示された範囲外の光強度分布は零とした場合の計算結果であって、デフォーカス量が大きいときには像中央部にまでこれが影響

研 究 速 報

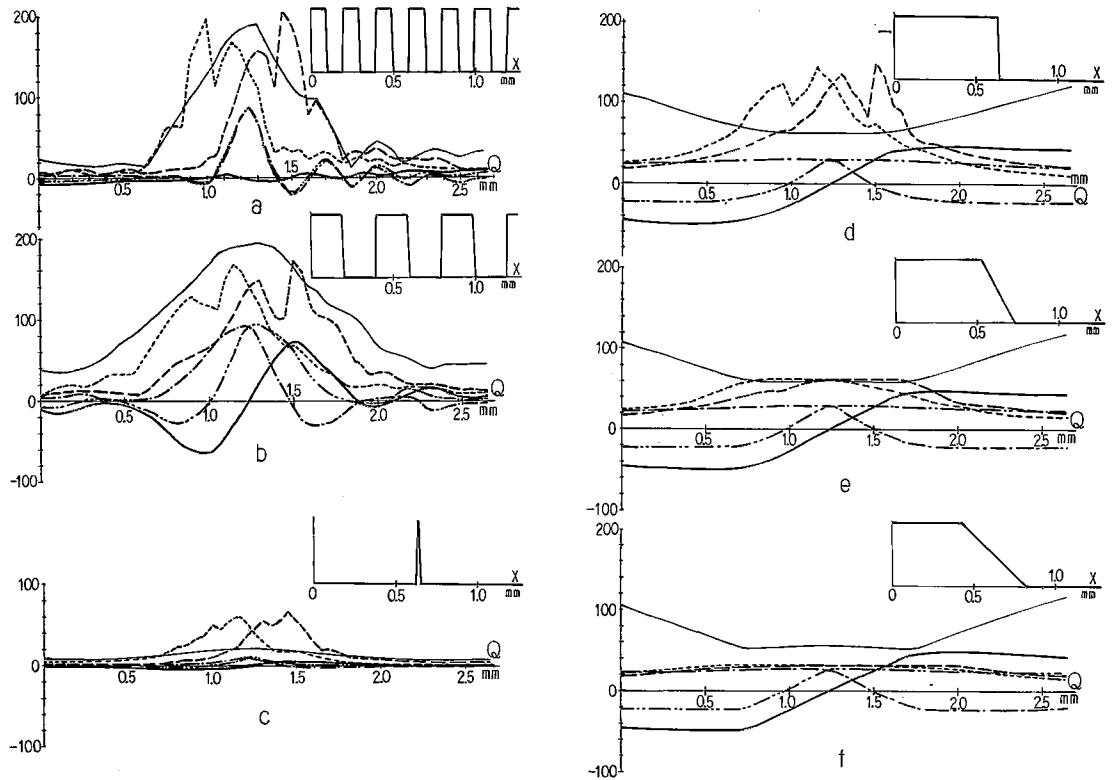


図 4 評価関数等の計算例

受光素子列定数 (像面換算) はそれぞれピッチ  $60 \mu$ , 幅  $60 \mu$ , 列間隔  $150 \mu$ , 位相差  $350 \mu$ ,  $N = 16$ .

—  $E_R$ , ...  $E_{C1}$ , ---  $E_{C2}$  - - - -  $SM_1$ , - - - -  $SM_2$ , —  $J_R$

すると考えられる。

図 4 により相関法, 鮮鋭度法それぞれの得手不得手および両者の特性が互いに相補的であることが一目瞭然であろうが念のため主な特徴を以下に列挙する。

- i) 鮮鋭度評価関数は合焦点近傍において大きく有効であるが合焦点から大きく外れると評価値およびその差が小さくなり合焦判定が困難となる。一方相関評価関数は合焦点から大きく外れた領域も含め広い範囲にわたり有効であることが多い。
- ii) 厳しい合焦精度が要求されがちな先鋭な光強度変化を伴う被写体に対して, 鮮鋭度評価関数は十分かつ鋭敏な値を示す。相関評価関数はこれに対して感度が低い。また周期的強度変化の場合には誤動作を伴い勝ちである。
- iii) ゆるやかな光強度分布を有する被写体に対しては鮮鋭度法はほとんど無力である。相関法はこの場合に極めて有効である。
- ii) および iii) は鮮鋭度法, 相関法が互いに相補的であることを良く示している。

i) については一見相関法が有利と思われるが必ずし

もそうでない。一般に合焦検出のための検出視野は有限な広がりを持つから, 検出視野内には遠近様々の被写体が含まれるのが普通である。この場合相関法においては i) の特徴からすべての視野内の被写体が遠近にかかわらずに評価値に影響し結果として視野内の平均の合焦点が検出結果として示される。多くの場合これで差し支えはないが例えば大きく離れた遠近二様の物体が視野内にある時には両者の中間が合焦点と判定され, けっきょくいずれの物体にもピントが合わない。これに対し鮮鋭度法では大きく合焦点から外れた物体は評価値にほとんど影響しないため, 目的とする被写体近傍まで人為的に合焦点を移動させれば他の余計な物体はたとえ検出視野内にあってもほとんど影響することなく正確に合焦判定が行える。これらを考えると対象あるいは使い方によって相関法が良いこともまた逆に鮮鋭度法が良いこともあるわけでこの意味で i) もまた両方法は互いに相補的であることを示すものと言えよう。

(1982 年 7 月 16 日受理)

参 考 文 献

- 1) 中川治平: 特願昭 44-103628