

# 解説

## 一眼レフカメラのオートフォーカス技術

鈴木 謙二

キヤノン(株)カメラ開発センター 〒213 川崎市高津区下野毛 770

(1989年7月6日受理)

### Automatic Focussing Methods of SLR Cameras

Kenji SUZUKI

Photo Products Development Center, CANON INC.,  
770, Shimonoge, Takatsu-ku, Kawasaki 213

#### 1. はじめに

近年、一眼レフカメラは急速に AF (オートフォーカス) 化されつつある。現在、商品化されている一眼レフの AF の方法は、いわゆる位相差方式 TTL-AF と呼ばれるものである。この方法は容積、電源条件、コスト等の面についてカメラが手持ちであるという制約を受けながらも、相当に高度な光電的制御システムを構成している。

位相差方式 AF が導入された結果、カメラは固体イメージセンサーと、高集積化された 8 ビット級以上のマイコンを標準的に搭載するようになった。その内部構造は一昔前の一眼レフカメラに対し、制御システム上大きな変化が生じている<sup>1,2)</sup>。本解説では、位相差方式 TTL-AF を可能にしている構成要素として、AF 光学系、固体イメージセンサー、信号処理方法の概略と問題を中心に紹介する。

#### 2. 位相差方式 AF の光学システム

##### 2.1 光学原理

撮影レンズの周縁を通る 2 光束 A, B による結像を考える (図 1)。この図は撮影レンズの光軸上に物体として点光源がある場合のものである。図からただちに理解されるように、2 光束 A, B は次のような関係に従いながら像を形成する。

- (1) ピント面ではシャープな像ができ、A, B 両光束のつくる 2 個の点像は同じ位置にある。
- (2) デフォーカスした面ではボケた像ができ、かつ

A, B 両光束のおのおのがつくるボケ像は、瞳の形が投影され相対的に位置を変ずる。2 像の相対的左右関係はピント面の前後で反転する。また 2 像の相対的位置変化量は像面のデフォーカス量にほぼ比例する。図中に示した A, B 像重心間の矢印の長さがこれに対応する。

上記(2)の事実を利用すれば、2 像の位置関係からデフォーカス量を検出できる。合焦状態とは要するにデフォーカスが小さいことであるから、基本的には(2)の比例関係のみを用いて AF の検出制御を行なっているカメラが多いようである。

光軸上の点物体で説明した議論は軸外物点でも変わるところはない。2 光束 A, B から形成される 2 像の絶対的位置が全体としてずれること以外、2 像の相対的位置関係は軸上の場合と同様である。注目しているのは 2 像の相対的位置であり、像の形成される絶対的な位置は問題にしていない。

AF 視野内に連続的に分布している任意の一般被写体は点光源の無数の集まりにはかならないので、任意の被写体について上述の原理は成立する。一般被写体の場合に、2 光束 A, B のおのおのが形成する像強度分布を図 2 に示した。

このような方法を応用して AF 系を構成するためには、撮影レンズの異なる領域を通過した 2 光束 A, B を分離し、おのおの像を独立にサンプリングするやり方が行なわれている。そのひとつの方法が、いわゆるセパレータレンズ方式と呼ばれる図 3 の光学配置である<sup>3,4)</sup>。すなわち撮影レンズの予定結像面後方に一對の 2 次結像

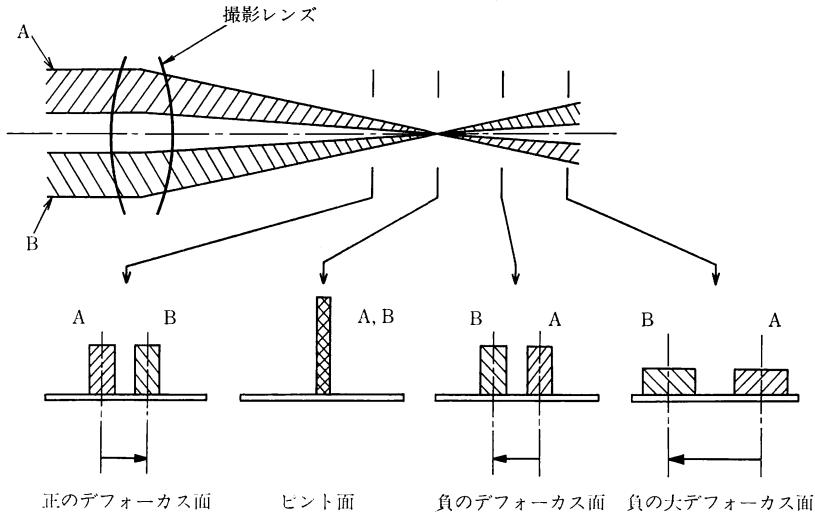


図 1 位相差方式の光学原理 (軸上物点)

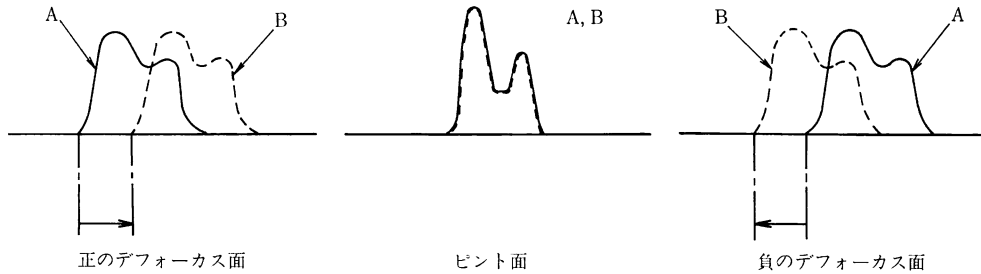


図 2 一般被写体の光学像の相対的位置変化

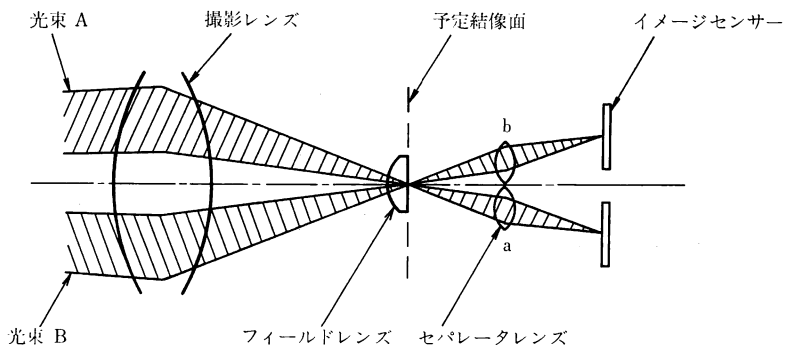


図 3 セパレータレンズ方式の AF 光学系

レンズ (セパレータレンズ) を置き、予定結像面近傍にできている空中像をイメージセンサー上に再結像する。

個々の再結像レンズは撮影レンズの光軸からずらして配置されており、予定結像面上の像を斜めに見るので、各二次結像レンズに入射する光束は撮影レンズの中心からずれた領域を通過したものになる。すなわち図で再結像レンズ a に入射する光は撮影レンズの上側を通過し

た光束 A であり、再結像レンズ b に入射する光は撮影レンズの下側を通過してきた光束 B である。したがって図の配置により、撮影レンズの異なる領域を通過してきた 2 光束を分離し独立に結像させることが可能となる。

フィールドレンズの機能は像高の変化によるケラレの防止である。フィールドレンズは、再結像光学系の入射瞳面を撮影レンズの射出瞳面にほぼ結像している。

なお、イメージセンサーは予定結像面と厳密に結像関係にある必要はない。像の相対変位量を検知する際、その原点を補正することでデフォーカス検出上は光学的なピント調整と等価な機能が得られる。

2.2 光学系の実際

AF 光学系の収差補正の考え方は撮影系とは異なり、結像スポットを小さくすることよりも、ディストーションをなくすことに重点が置かれている。二つの AF 光束 A, B おおのの主光線（重心光線）がなす角を  $\theta_0$ 、予定結像面からイメージセンサーへの結像倍率を  $M$  とすると、予定結像面付近でのデフォーカス  $d$  はイメージセンサー上の像の相対的位置変化量  $\Delta x$  と

$$d = \Delta x / M\theta_0 = k\Delta x \quad (1)$$

の関係にある。通常の一眼鏡レフ AF 系の構成では  $M \sim 1/3$ ,  $\theta_0 \leq 0.1$  ラジアン程度の大きさで  $k = 30 \sim 50$  になり  $1 \mu\text{m}$  オーダーの  $\Delta x$  が無視できない。AF 光学系のディストーション（設計値）は AF 精度にきわめて大きな悪影響を与える。ただし計測される量は相対的位

置変化量なのでセパレータレンズ系のディストーションの差異が問題である。なお、ここでいうディストーションとは通例、幾何光学で用いられるような、瞳で定義される主光線の変位ではなく、むしろ点像の重心で定義されるべきものである。図4は、セパレータレンズのディストーションの一例である。一对のセパレータレンズは対称形なので、視野座標の方向を同一にとると、A像、B像で左右反転する。

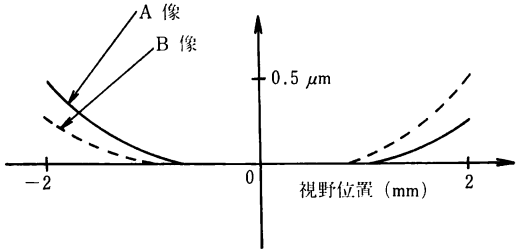


図4 セパレータレンズの歪曲収差の一例

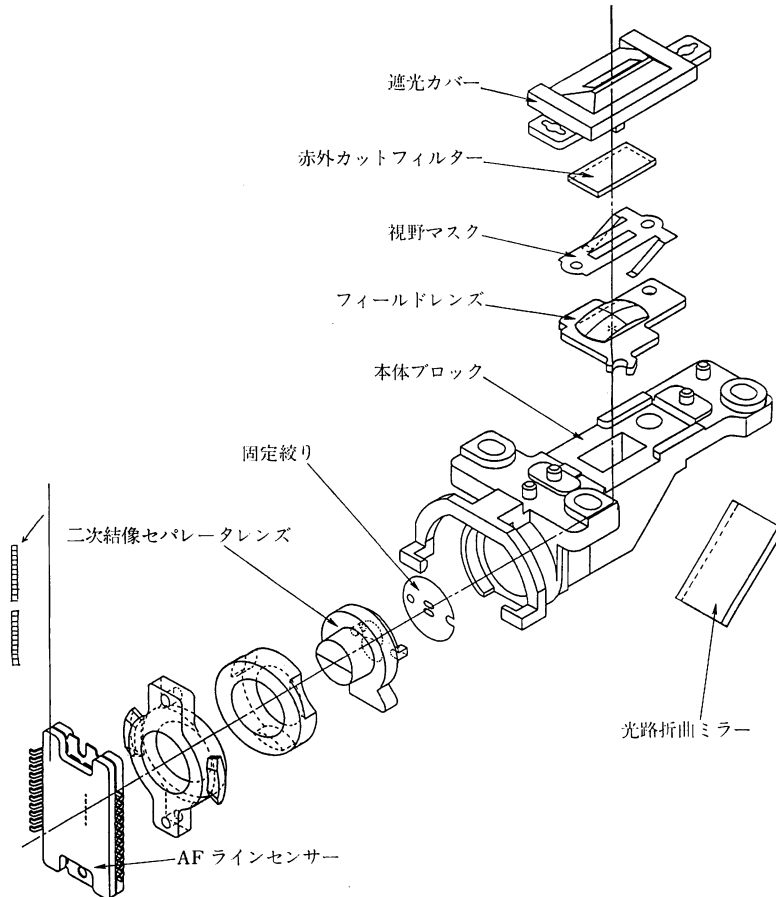


図5 AFユニットの構成

い. むしろ適度に光学像が広がっていると, 光学的ローパスフィルターとして機能し, イメージセンサーのサンプリング系で高周波折返し歪を拾わないようになるので望ましい. 位相差方式とはまさに光学像の空間周波数成分の位相情報 (シフト情報) を本質的には検知しており, 比較的低い空間周波数に着目している. この点は高周波成分の増減を見るコントラスト検知方式とは基本的に異なる点である.

実際図3の系において, イメージセンサーの出力を特定の空間周波数成分でフーリエ変換し, その位相差を用いて合焦制御する<sup>5)</sup> カメラも商品化されている.

実用される AF 光学系は2次結像パワー以外に, 絞りや IR カットフィルターを加えて, たとえば図5のように構成される. 絞りは AF 光束の断面形状と広さを決める重要な役割を持っており, 2個の絞りの形状や面積に差異があると2個の AF 光学像にレベル差等が発生し, 精度が著しく劣化する.

IR カットフィルターは, Si イメージセンサーの赤外感度を削り落とすためである. 通常の撮影レンズは可視域で色収差が最適化されており, 赤外では急激に色収差が出るので AF 光束から赤外成分を取り除く必要がある.

AF 系を構成する光学部品は量産性を考慮して, 射出成形で製造される. 面精度は少なくともニュートン2本程度にはおさまることが望ましい. 図6はセパレータレンズのティルトを入れた干渉計測定値の一例である. ニュートン1本以下, ワンカラーに近い仕上がりとなっている.

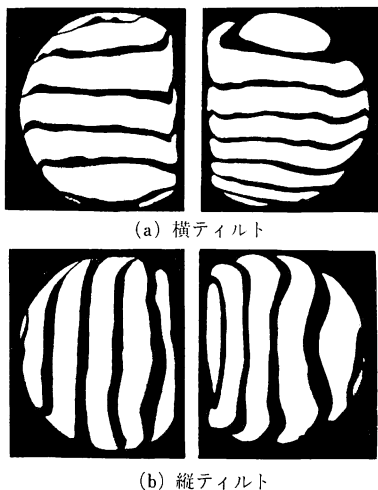


図6 セパレータレンズの干渉測定

### 3. 電気的システム

#### 3.1 デフォーカス演算原理

イメージセンサーによりサンプリングされた像強度分布情報を演算処理する方法は, 何通りか知られている. これは単に演算の内容が異なるだけではない. 出力結果にしても合焦, 非合焦の判定を行なうだけのもの, 撮影レンズを合焦状態に近づけるための駆動の方向を示すもの, さらに撮影レンズを合焦状態に至らせるための駆動の量を指示するもの等が提案されている. 演算の目的と内容をどのように設定するかにより, システムの挙動は著しく異なったものになる. ここでは文献上知られている一方法<sup>3,6)</sup>を紹介する.

先に示したように2像の相対的位置変化量とデフォーカスは比例するので, 像情報をデフォーカス情報に変換し, さらに, 撮影レンズの合焦点までの駆動量が決定できる. 上記文献によると, 2像の一致の程度を表わす量として

$$U_0 = \sum_{j=1}^N |a_j - b_j| \quad (2)$$

を用いることができる. ただし  $a_j, b_j$  はイメージセンサーによりサンプリングされたA, Bのおおのの像の強度データであり,  $N$  は視野に含まれる画素の数である. (2)式の  $U_0$  は図7に示すように, 2像の一致が良いほど小さく, 合焦時に最小となる. しかし, これだけではデフォーカスの検出はできない.

デフォーカスの決定は次のように考える. 像Bに対し, Aの像のサンプリングデータを相対的に  $p$ 画素ずらして(2)式の  $U_0$  の値を計算し, それを  $U_p$  とする.

$$U_p = \sum_{j=1}^{N-p} |a_{j+p} - b_j| \quad (p \text{ は整数}) \quad (3)$$

像が最も良く一致するシフト量で,  $U_p$  は最小となるはずなので, そのような  $p$  を見つけることにより, 2像の相対的位置変化量が計算できる (図8). 1画素のシフトに対応するデフォーカス量の変化は 1mm くらいあり, このままでは一眼レフカメラの焦点合わせには

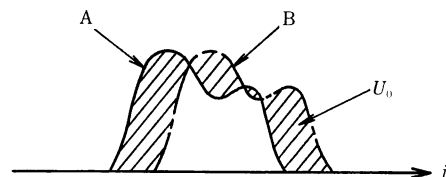


図7  $U_0$  の図形的意味  
A, B は各光学像の強度分布,  $U_0$  は図中斜線部面積に相当する.

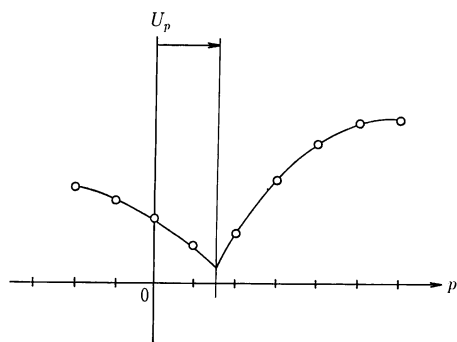


図8  $U_p$  とシフト量  $p$  の関係  
矢印が相関最良のシフト量, すなわち2個のAF光学像の相対的位置変化量に相当する.

使えない. 図8の  $U_p$  の最小付近から, 補間的に1画素最小寸法より細かい像変位量を演算する手法が用いられる. S/N が比較的良好な状態では, 画素寸法よりずっと細かい精度で, 真の変位量の補間推定ができるようである.

図8の演算は, 基本的に2重積分であるので  $N^2$  のオーダーの基本演算回数を要するが, リアルタイム性が損なわれない時間内 ( $\sim 10$  ms) で実行しなくてはならない. これにはかなり高速のマイコンが必要とされる. どのような演算手法がとられるにせよ位相差方式 TTL-AF が実用化された大きな要因は, このような能力を持つ, 1チップマイコンが民生品に搭載できるコストにこなれたという点が大きいの. 2像の相対的位置変化量をデフォーカスに変換する演算は前出(1)式に基づく.  $k$  の値の良否により, 合焦点に収束するまでの収束性が異なってくるのでカメラ1台ごとに測定値が設定される場合が多い.

以下, レンズの駆動方法について簡単にふれる. 何らかの演算手法により, デフォーカスもしくは合焦点へ向かうべき方向が測定されると, この結果をもとにレンズが駆動される. レンズをどのように駆動するかは, 各社各様で腕の見せどころである. たとえばキヤノン EOS シリーズではレンズごとに最適のアクチュエータを搭載できること, 駆動力の伝達ロスが少ないこと等の理由から, レンズ側にアクチュエータと制御用 IC を載せている<sup>2)</sup>. カメラからの指示はすべて電気的に行なわれる.

実際の駆動制御は動力伝達系の一部に組み込まれたエンコーダのパルス数を規定する形で行なわれるシステムが多い. カメラの演算装置は上記パルス数信号の形成に先立ち, レンズからデフォーカス量と, エンコーダパルス数の変換定数を受け取り, エンコーダパルス数に変換

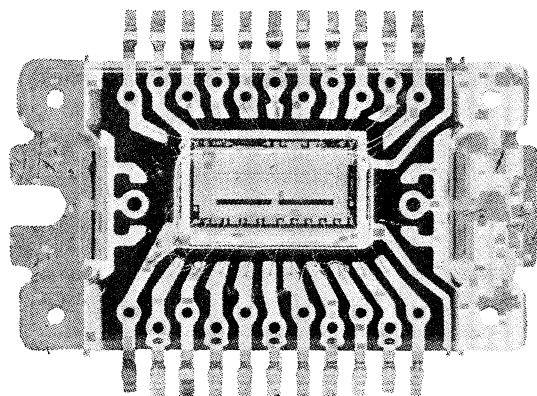


図9 AF センサー BASIS

する. この変換定数は, レンズの種類により, またズームレンズではズームステートごとに異なるので, 一眼レフではレンズ側に持つシステムが多いようだ.

### 3.2 電気システムの実現

AF用光学像を光電変換する固体イメージセンサーは, 1像につき20~50個程度の画素数を持つラインセンサーである. 画素数が少ないと, 大デフォーカスの際にAF光学像が変位しすぎて演算処理に支障をきたすので, 最低でも20~30個は必要である. 図9は, EOSシリーズのAFセンサーである. 1像分の画素数は48個ある.

AFセンサーは, カメラのAFシステムの精度, 低輝度動作限界, 低コントラスト動作限界等を定める最も重要なデバイスである. 通例 CCD ラインセンサーが用いられる. EOS シリーズでは, 画素ごとに増幅作用を持つセンサー BASIS<sup>7)</sup> (base stored image sensor) を開発し, 感度の向上を図っている.

センサーのピッチは細かいほど位置の検出分解能は高まるが, 一方, 演算処理時間の増大, 各画素の S/N 低下を招来するので, 各社 20~30  $\mu\text{m}$  程度のものが多い. AFセンサーの扱う信号レベルは低いので, センサー固有のノイズだけでなく実装ノイズにも十分な配慮が必要である.

演算処理に用いられる1チップマイコンは, 少なくとも8ビットレベルのものを1~2 MHz以上のクロックで動かさないと, 演算時間が長くなり実用に耐えない. また, このマイコンには IC の数を減らすために, AFセンサーの出力をデジタル化する A/D 変換器, それをストアする RAM, プログラムメモリーとしてのマスク ROM, 他の IC と情報交換するための通信機能等が集積されている. 現在の技術は AF センサーの画素数

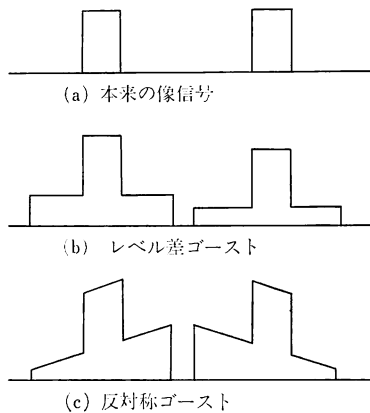


図 10 ゴースト光を被った AF 光学像の強度分布

の不足をデジタル演算の力でカバーする方向に最適化されており、演算力の大小は性能に与える影響が大きい。

たとえば、位相差方式 AF のアルゴリズムにデジタルフィルタが採用されることがある<sup>9)</sup>。前出の議論のように 2 個の像の相対的位置変化からデフォーカス情報を抽出するためには、2 個の AF 光学像の強度分布が同じで位置のみが変位するものでなくてはならない。しかし現実の系では、この要求はしばしば満たされない。とくに逆光時のゴーストがあるときや、測距対象が低コントラストの場合には 2 像の形状不一致が著しくなり、原理的な演算のみでは必要な精度が得られない場合が発生する。図 10 は、ゴーストの影響を受けた光学像の典型的な強度分布の形状である。図 10(a) は本来の光学像、同(b) は DC 的なレベル差を生じた場合、同(c) は反対称の傾いたゴースト光を受けた場合である。

一般にゴースト光の空間周波数成分は測距対象成分に比較して低いことが多いので、フィルタリングで S/N を改善する余地がある。最も単純なフィルタリングは差分処理と呼ばれている方法である。AF センサーから出力される 2 個の像信号を  $a_j, b_j (j=1, 2, \dots, N)$  とするとき、

$$\begin{aligned} a'_j &= a_{j+1} - a_j \\ b'_j &= b_{j+1} - b_j \end{aligned} \quad (l \text{ 整数}) \quad (4)$$

で定義される  $a'_j, b'_j$  を新たな像信号として、これによりデフォーカスを求める。上式(4)は、離散的微分処理であるから一種のハイパスフィルター効果を持ち、ゴースト光寄与分を選択的に取り除くことができる。

表 1 AF システムの実力

|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| ピント精度     | $\pm 0.03 \sim \pm 0.1 \text{ mm}$ |
| 低輝度作動限界   | EV-1~EV+3                          |
| 低コントラスト限界 | 90 : 75~90 : 64                    |
| 合焦速度      | 0.2~2 s (レンズによる)                   |
| AF 視野長    | 4~2 mm                             |

$l$  は 1 に近いほどハイパス効果は強いが、電氣的 S/N が悪化する。通常は  $l=1\sim 4$  くらいにとる。もう少し進んだデジタルフィルターとしては、

$$\begin{aligned} a''_j &= 2a_j - a_{j-1} - a_{j+1} \\ b''_j &= 2b_j - b_{j-1} - b_{j+1} \end{aligned} \quad (5)$$

のようなラプラシアンタイプの形も提案され、一部実用されているようである。

### 3.3 TTL-AF システムの現在の実力

現在実現している TTL-AF システムの実力はメーカーにより多少異なるが、おおよそ表 1 に示される程度である。

## 4. おわりに

以上、位相差方式 TTL-AF の概略を紹介した。関連する分野の方々の参考になれば幸いである。

AF の基本とは、撮影者の意図する被写体に対し、瞬時にその位置や条件を問わず合焦することであろう。とくに AF は機能する対象がスポット的であるためか、その要求が強いようである。現代のカメラといえども理想には遠く、今後の技術開発に期待したい。

本解説の執筆に際し、ご助力いただいたキヤノン(株)カメラ開発センター池澤部長はじめ各位に感謝いたします。

## 文 献

- 写真工業, 43, 3 (1985) 62.
- 写真工業, 45, 3 (1987) 27.
- MINOLTA TECHNO REPORT 特集号 (1986).
- 写真工業, 45, 3 (1987) 99.
- 公開特許公報, 特開昭 55-98710.
- 公開特許公報, 特開昭 54-61921.
- T. Tanaka, *et al.*: IEEE Trans. Electron Devices, 36 (1989) 31, 39.
- United States Patent 4561749 (1985).