光学ファイバー受像管とその応用

株式会社松下電器東京研究所

兼子昌彦・西田 準
前田晴雄

受像管のフェースプレートに光学ファイバープレートで構成すると、画面を高いコントラストで観察したり、感光紙を密着することによってテレビ画像の直接写真記録を行なうことができる。筆者らは高解像度電子銃をもった小形の光学ファイバー受像管を試作し、映像信号の記録を試みた。受像管の光出力と感光紙の感度等を検討し、テレビ画像の1フレーム記録の可能性を示し、受像管記録画像のレスポンス特性を測定することにより、記録画像の評価を行なった。また種々の記録例をあげ、その応用性について検討する。

1. ま え が き

伝送された画像などを高速で記録する研究が種々行なわれている。テレビ用陰極線管のフェースプレートに光学ファイバープレートにおきかえた受像管を用いると、テレビ画像などは光学カメラを使用しなくても直接感光紙を受像管に密着することによって容易に記録することができる。このことを利用した記録管や装置は高速ファクシミリの分野で開発が進んでいるが¹⁾、これらの多くは水平方向のみ電子ビーム走査を行ない、垂直方向は他の機械的な走査によるものであり、受像管も扁平形のものが多い。

筆者らは、通常のテレビ用受像管のスクリーン面に光学ファイバープレートで構成した受像管を開発した²⁾。

これを用いると水平・垂直方向とも電子ビーム走査が可能となる。しかし、ファイバープレートは真真空密、強度、コスト等の点で大面積のものは困難であり、写真1に示すように、小形の受像管に应用している。(a)は1.5形、(b)は3形である。一方、高解像度電子銃を開発して、単位面積当りの情報量の増加を試みた。これにより、従来の記録方法にくらべて高速化されており、取扱いも簡単である。

光学ファイバー受像管を用いると、よく知られているように受像管のスクリーン上で発光する光の利用率が良

(a) 1.5 形

(b) 3 形

写真1 試作光学ファイバー受像管
Optical fiber picture tubes.

い。たとえば、ファイバー受像管を用いた場合の記録紙上の明るさと、普通の受像管と写真機を使用した場合の感光紙上の明るさとの比 I_G は次式で与えられる。

"Development and Application of Optical-Fiber Picture Tube"
by Masahiko Kaneko, Jun Nishida and Haruo Maeda (Matsushita
Research Institute Tokyo, Inc., Kawasaki)

$$I_G = \frac{4F^2(1+M)^2(NA)^2R_f}{R} \quad (1)$$

ここで F は写真機レンズの F 値, M は像倍率, R は普通受像管のフェースガラスとレンズの光伝送損失, R_f はファイバースクリーンの光伝送損失, NA はファイバースクリーンの開口数である. いま $F=2.0$ 程度のレンズをもった像倍率 $M=1$ の写真機を使用する場合を考えると, $R \approx 0.42$ と仮定して, さらに, ファイバースクリーンの $R_f \approx 0.5 \sim 0.6$, $NA=0.88$ を代入すると, $I_G = 50 \sim 60$ を得る. すなわち, レンズ光学系にくらべて $1 \sim 2$ 桁程度の明るさが得られ, このことがテレビ画像の1コマ記録などを可能にする.

筆者らは, 光学ファイバー受像管の開発とその応用として, ビデオ信号記録装置を試作して, 光学ファイバー受像管による記録特性を検討した. さらに, 光学ファイバー受像管の画像記録以外への応用についても考察してみた.

2. ファイバースクリーン螢光面の光学的特性

光学ファイバースクリーンで受像管のスクリーン面を構成し, 直接感光紙をこれに密着して画像を記録しようとする場合の光学系は次の図1に示すようになると考えられる. この場合の電子ビームにより発光した螢光面から感光材までの光の伝達について考えてみる. すなわち, 電子ビームパワー P_b に対してファイバースクリーンからの光出力 E_L を求めると, 次の(2)式で表わされる³⁾.

$$E_L = \eta_p \cdot \eta_c (\alpha \cdot \beta \cdot \gamma) \frac{P_b}{A} \cdot \tau \times 10^7 \quad (\text{erg/cm}^2) \quad (2)$$

ここで, おおのこのファクターは次のようなものである.

η_p : 電子ビーム電力に対する螢光体の光出力の比で, P11あるいはP22(青)螢光体に対して約0.1である.

η_c : 螢光体の励起時間を τ としたとき螢光体の発光

図1 ファイバースクリーン螢光面の光学系
Optical system of the fiber plate screen.

の立上り時定数 τ_r と消滅の時定数 τ_d によってきまる螢光体の発光効率にかかわる係数で, Feinberg によって次式によって表わされている^{4)*}.

$$\eta_c = 1 - \frac{1 - (\tau_d/\tau_r)}{\tau/\tau_r} (1 - \varepsilon - (\tau/\tau_r)) \quad (3)$$

τ は電子ビームの走査幅 l_s , 電子ビームスポット径を d_s とすれば, 標準テレビ方式で走査する場合は次式で与えられる.

$$\tau = \frac{d_s}{15.75 \times 10^3 \cdot l_s} \quad (4)$$

したがって1.5形受像管については l_s を約35mm(若干過大走査) とすると $\tau \approx 0.09 \mu\text{s}$ となる.

τ_r, τ_d はP22(青)に関しては示されていないが, これと発光がきわめて類似している一般的な写真撮影用螢光体P11(ZnS・Ag)に対してはそれぞれ約 $\tau_r = 8.4 \mu\text{s}$, $\tau_d = 6.0 \mu\text{s}$ と与えられているので, これらを代入することによって η_c として,

$$\eta_c \approx 0.7$$

を得る.

α : 螢光体と感光材料の分光特性の違いによるエネルギー変換効率で, A_λ を螢光体の相対波長出力, B_λ を感光材料の相対波長感度とすると,

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \frac{A_\lambda}{A_{\max}} \frac{B_\lambda}{B_{\max}} d\lambda}{\int_0^\infty \frac{A_\lambda}{A_{\max}} d\lambda} \quad (5)$$

と表わされ, 使用している銀塩印画紙とP22(青)螢光面との組合せの場合,

$$\alpha \approx 0.9$$

となる.

β : ファイバースクリーンの入射面, 出射面の反射も考慮した光伝達損で, ここで用いた $25 \mu\text{m}$ 径, $NA=0.88$ のファイバーにおいて拡散光による測定値によれば,

$$\beta \approx 0.5$$

である.

γ : メタルバックを含む螢光面での粒度も考慮した損

* 定常状態での発光が LA , また発光の立上りと消滅の時定数を τ_r, τ_d の螢光体を, ある短時間 τ だけビームでエキサイトすると, その立上りおよび消滅の発光 L_r, L_d はそれぞれ,

$$L_r = LA(1 - \varepsilon - (\tau/\tau_r)), \quad t \leq \tau$$

$$L_d = LA(1 - \varepsilon - (\tau/\tau_r))\varepsilon - (t - \tau)/\tau_d, \quad t \geq \tau$$

この短時間 τ のエキサイテーションで考えられる定常状態としての発光量に対する実際のパルス状全発光量の比を η_r とすると,

$$\begin{aligned} \eta_r &= \frac{\int_0^\tau L_r dt + \int_\tau^\infty L_d dt}{\int_0^\infty LA dt} = \frac{LA[\tau - (\tau_r - \tau_d)(1 - \varepsilon - (\tau/\tau_r))]}{LA\tau} \\ &= 1 - \frac{1 - (\tau_d/\tau_r)}{\tau/\tau_r} (1 - \varepsilon - (\tau/\tau_r)) \end{aligned} \quad (3)$$

非常に短いエキサイテーション $\tau/\tau_r \ll 1$ に対しては,

$$\eta_r \approx \frac{\tau_d}{\tau_r} \quad (3)'$$

失で、用いたアルミバック蛍光面では、

$$\gamma \approx 0.5$$

A: 電子ビームによる励起面積で、ほぼ電子ビームの断面積と考えられ、いま $50\mu\text{m}$ の電子ビームとすると、
 $A = 6.25 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{)}$

P_d : 電子ビーム電力で、 5 kV , $5\mu\text{A}$ の電子ビームでは、

$$P_d = 2.5 \times 10^{-2} \text{ (W)}$$

以上の各項を(2)式に代入すると、ファイバープレート面から感光材料面に入る光のエネルギー密度として、

$$E_L \approx 2.0 \times 10 \text{ (erg/cm}^2\text{)}$$

を得る。これだけの光エネルギーが出力として期待されれば、一般に用いられている銀塩印画紙やパングロフィルムなどに1回の走査で感光され、十分な濃度が得られるものと考えられ、テレビ画像の1フレーム記録が期待できる。

3. 試作光学ファイバー受像管

受像管としては、光学ファイバープレートを除いて、通常のテレビ用受像管とだいたいにおいて同じであるが小形であり高解像記録に充分の性能をもつように設計されている。以下、簡単にその考え方について述べる。

3.1 解像力

光学ファイバー受像管の解像力は次のように考えることができる。すなわち、電子ビームのスポット径がガラスファイバーの太さにくらべて充分太い場合は、電子ビームの太さにより最高解像力がきまる。しかし、1.5形受像管のように電子ビームのスポット径が小さくなりガラスファイバーの径に比較されるような大きさになるか、さらには電子ビームのほうが細くなるような場合には、ファイバープレートの1本のファイバーの太さによって解像力が決定されてしまう。たとえば、電子ビームのスポット径をファイバーの太さより小さくしても、電子ビームの励起による蛍光面上の輝点で照射されるファイバーは一様な発光点とみなされるからである。

さらに輝点が隣り合ったファイバーにまたがる場合もあり、ファイバーの太さの2倍程度が分解能の限界となる。筆者らが用いたファイバープレートの大きさは1.5形で $35 \times 28 \times 5 \text{ (mm)}$ 、3形で $71 \times 56 \times 5 \text{ (mm)}$ であり、いずれも1本のファイバーの太さは $25\mu\text{m}$ であった。したがって、1.5形で500本の分解が可能と考えられる。一方、電子ビームの輝線幅が $50 \sim 60\mu\text{m}$ 程度であったため、約400本の解像度が得られている。この値はテレビ信号の特性からも妥当なところであろう。

3.2 蛍光面と明るさ

蛍光面は受像管の用途にしたがって最も適当なものを

図2 蛍光体 P22(青)と感光紙(銀塩記録紙)の分光特性
Spectral response curve of phosphorescent material, P-22 (blue) (1), and recording paper (2).

図3 輝度特性

Brightness vs beam current.

使用しなければならず、特に発光スペクトル、粒度、輝度等に注目する必要がある。まず、発光スペクトルは、直接写真記録の場合、感光紙の分光特性と一致することが望ましく、筆者らが用いた銀塩印画紙に対してはP22(青)が適当であった。図2に両者のスペクトルを示すがだいたい一致した傾向がみられる。

粒度はだいたい $7\mu\text{m}$ 以下のものを使用した。電子ビームの太さ、ファイバーの太さからみて充分と思われる。

輝度については、できるだけ発光能率の良いものが望ましく、記録の場合に電子ビームをしぼることができるので、ビーム解像力も良く都合がよい。主として、P22(青)を用い約 450Å のアルミバックをしたが、 5 kV の加速電圧で使用した場合、後述するように $2 \sim 5\mu\text{A}$ のビームで充分であった。この場合の視感度補正をした輝度特性を図3に示しておく。

3.3 電子銃

記録管の電子銃としては、できるだけ高解像力のものが望ましい。大形の磁界集束形を用いればよいが、記録

表 1 受像管規格
CRT specifications.

	最大定格	代表的動作例
陽極電圧 (V)	8000	5000
第3格子電圧 (V)	1000	750~900
第2格子電圧 (V)	250	40
第1格子電圧 (V)	-200	-40~-15*
ヒーター電圧 (V)	2.0±10%	2.0
ヒーター電流 (A)	0.08±10%	0.08

* ビーム遮断電圧

面積も小さく、後述するように記録装置としてもできるだけ小形かつ取扱も簡単にするために、静電集束電子銃とした。筆者らが先に開発した1.5形受像管の電子銃を原形とし、フォーカスをバイポテンシャル形になおし、また格子孔を小さくするなど、高精度な電子銃の組立てを試みた。その結果、加速電圧5kV、平均ビーム電流5 μ Aで1.5形で450本程度の分解能が得られ、初期の目的には充分であった。表1に代表的な動作規格を示しておく。

3.4 気密性、その他

ファイバー付き受像管では真空気密性が最も大きな問題となるが、1.5形のような小面積のものでは、おのこのガラスファイバーの圧着も充分であり、ガラスバルブとのフリット封着部にも問題がなかった。5mmの板厚のファイバープレートを用いているが、さらに薄くすることも可能と考えられる。試作管のガス比は常に0.1以下であった。

4. 画 像 記 録⁵⁾

4.1 試作記録装置

ファイバー受像管の応用の一例として、標準テレビ方式の1フレーム印写可能な記録装置を試作した。図4に記録装置の系統図を示す。映像信号は通常のテレビ受信機と同様に増幅され受像管に加えられるが、画像のぼけをなくすため、受像管の動作は記録したい映像信号の1フレームだけがスクリーンに写し出されねばならない。このためには、映像信号の1フレームゲート回路を用い

図 4 映像記録装置系統図

Block diagram of recording system.

この時間のみ受像管を動作させてやればよい。それには種々の方法が考えられるが、シャッタースイッチをONにすることにより垂直同期信号でトリガーして第2格子に1フレーム時間のみ電圧を印加し、受像管をアンブランクングさせる方法を用いた。

1.5形受像管用として設計した電子銃は第2格子が低電圧(50V以下)で動作するので都合がよい。また、連続動作を行なうことによってテレビ画像などの連続記録が可能である。また、映像信号の極性は、入力信号あるいは感光材料の種類により変える必要があるが、映像信

(a) 銀塩印画紙用カメラ部 (連続コマどり)

(b) ポラロイド印画紙用カメラ部 (3枚どり)

(c) 駆動装置

写真 2 記録装置

Video signal recording apparatus.

号は容易に極性変換ができるので、むしろネガ・ポジ像がいずれにでも容易に記録できる長所がある。入力信号としてはテレビ放送の受信信号のほか、ビジコンITV、VTR、FSS等からのビデオ信号をも使うことができる。

銀塩印画紙を用いる記録装置を写真2(a)に示す。モニターで記録したい画像を判断し、1フレーム露光による記録をするか、あるいは連続記録も可能な装置とし

テレビ放送

フライングスポットスキャナー

フライングスポットスキャナー

(a) 1.5 形受像管による記録(クイックコピー紙使用)

た。現像定着時間はこの場合約10secでよいので、簡単に容易に記録できる装置となった。また、(b)にポラロイド写真機を応用した直接写真装置を示す。

後に示す記録写真例にも見られるとおり、1枚に3コマ記録可能なもので、感度の良いフィルムにファイバー受像管を直接密着して記録できる光学レンズのないカメラである。ポラロイド印画紙の感度が高いため、この場合、受像管のビーム電流はきわめて少なくてもよい。(c)は駆動部で、映像信号を画像、波形ともにモニターとして記録したい画面を選択して信号レベルの調節を行なう。

4.2 記録特性

種々の感光紙に記録した例を写真3にあげる。(a)はクイックコピーと呼ばれる銀塩印画紙、(b)はポラロイド印画紙、(c)はネオパンに記録したものを銀塩印画紙に再び引伸ばし焼付けたものである。また陽画として記録することにより容易にスライドコピーが得られる。信号源はフライングスポットスキャナー、テレビ放送など、画面の陰陽、大きさ、 γ 特性の補正なども容易に行

(b) 1.5 形受像管による記録(ポラロイド写真紙使用) テレビ放送

(d) 3 形受像管による記録
(クイックコピー紙使用)

(c) 1.5 形受像管による記録を引き伸ばした画面
(パンクロフィルム使用)

写真3 記録例
Recording pictures.

なえる。(d)は3形の実像管を用いた場合のクイックコピー紙の記録であるが、画面サイズが大きくなると走査線が目立ち、通常の写真などと比較する場合、さらに走査線の増加が望まれる。

得られた記録写真の調子は、クイックコピー紙が最も良い結果を示した。これは受像管の直線性の良い動作範囲が、記録紙のそれと合致しているためと考えられる。そこで、電子ビームエネルギーと得られた感光材料の濃度の測定を図5に示す。これから加速電圧 5kV、平均 1~3 μ A という電子ビームが良い結果を与えることがわかる。解像度の測定は受像管の特性も含めて検討した。

画面の評価としては、輝点の大きさ、テストパターンによる観察、レスポンス関数の測定などを行なった。特に記録された画像も同一の基準で評価するためには、レスポンス関数の測定が適当と思われる。すなわち、画像表現能力を客観的に物理量として表わすことができ、テストパターンなどによる限界解像本数の判定などに起こりがちな主観的な誤差を除くことができる。

筆者らは、まず受像管のそれを測定しておき、次に同一の条件で記録実験を行ない、記録された画像の特性を測定して比較した。受像管のレスポンス関数の測定に関しては、大石のくわしい報告がある⁶⁾。すなわち、格子に電子ビーム走査周波数と同じ繰り返しで、きわめて短いパルスを加えると、スクリーン上に輝点列が現われる。これは光学系における線像の強度分布に対応する。

また、受像管のスクリーンは残光を利用して画像を組立てているので、実効的に残光が残っていると考えられる範囲を考えればよい。このような輝点列の出力強度分布のフーリエ変換が受像管のレスポンス特性を表わす。

さらに受像管の場合は、格子に加えられる電気的信号とスクリーン上の輝度との間には一般に直線性は成立しないが、ここでは多くの実験によりほぼ直線とみなされ

図5 銀塩印画紙の感光特性 (P22-B1 螢光面をもつ FOT 使用)
Photographic sensitivity of silver halide printing paper.

る領域で格子に加える振幅をできるだけ大きくとった。

実際の測定は、入力信号として正弦波を格子に与えた場合の輝度出力の極大値 $I_{\max}$ 、極小値 $I_{\min}$ を正弦波周波数 f についてマイクロフォトメーターで測定すると、レスポンス関数は次式で表わされる。

$$R(f) = \frac{(I_{\max} - I_{\min}) f = f}{(I_{\max} - I_{\min}) f = 0} \quad (6)$$

筆者らの測定には正弦波信号は 100 kHz より 10 MHz までを陰極に与え、水平繰返し周波数 10 kHz、垂直 50 Hz であった。これにより空間周波数を求めることができる。

一方、格子には輝線消去信号を含んだバイアス電圧を与え、オシロスコープで観測した。その結果を図6に示す。図中(1)は通常のガラスフェースプレートで同一電子銃付きのブラウン管、(2)はファイバープレート付きのものである。後者は若干高域特性が悪いが、これはファイバープレートの特性によるものと考えられる。

次に記録された特性は、光学的濃度を反射形のマイクロフォトメーターで測定し、それを実効的な感光量に換算した。その結果は図6の(3)および(4)で、(3)は銀塩印画紙、(4)はポラロイド印画紙である。記録による劣化がわかる。ポラロイド印画紙のほうが感度は高く、前に述べたように、電子ビームをしばらく、きわめて細いビームで露光できるが、感度の悪い銀塩印画紙よりも特性が悪いのは、主としてその粒状性の悪さによるものと考えられる。

以上、特性測定について簡単に述べたが、受像管を含むレスポンス特性は純光学系とは異なり、直線性が保証されない。電子ビームの変調度の影響を受けるような広

- (1) 1.5 形受像管 ($I_b = 2.5 \mu A$) 1.5 inch CRT with glass face plate.
- (2) 1.5 形 FOT ($I_b = 2.5 \mu A$) 1.5 inch fiber optics CRT.
- (3) 銀塩印画紙に記録した場合 Recorded on silver halide paper.
- (4) ポラロイドフィルムに記録した場合 Recorded on Polaroid film.

図6 レスポンス特性
Response characteristics.

い範囲での測定は困難であるが、前述したように、これまでの使用範囲では直線性も良く、充分実用性があると考えられる。直線性の充分でない場合は、輝度を入力信号電圧に換算して求める方法がある⁶⁾。

5. 光学ファイバー受像管のその他の応用

発散角の小さいファイバースクリーンを用いると、視野角制限の受像管ができ、別の応用が考えられる。

通常ファイバースクリーンは、おのおののファイバー間における光漏洩を除くために、コアとなる光伝達ファイバーの外側の低屈折率ガラスクラッドの上をさらに光吸収層で覆っている。コアとクラッドの屈折率の比を適当に選び、また光吸収層の効果を確実にすることによってファイバーを通して伝達される光の臨界反射角を制御すれば、発散角の小さいファイバースクリーンができる。また、このファイバーを使用すれば、受像管スクリーンから発光する光の発散角を制限した、いわゆる観察視野の狭い受像管が得られる。現在、表2に示すような種々のファイバースクリーンが試作されている。

これらを受像管のフェースプレートとして使用した場合、発光角度特性を測定したものを図7に示す。図中(1)のように発散角の小さいファイバースクリーンを用いると直進光以外はほとんど吸収され、ガラスプレートの場合とくらべると、発光面として強い指向性が得られる。このことを利用し、さらに、ファイバースクリーンの外面に無反射処理を行なった受像管の画像は、明るい外光の影響を受けることが少なく、強いコントラストで見ることができる。このように光学ファイバー受像管は他の特殊

表2 実験した各種ファイバースクリーン
(n_1 : ファイバー, n_2 : 外部クラッドの各屈折率)
Various fiber plate specifications.

n_1/n_2	1.75/1.51	1.62/1.51	1.59/1.51	1.57/1.51	1.53/1.52
NA	0.8844	0.5866	0.4979	0.4297	0.2450
発散臨界角	62°	36°	30°	25°	14°

図7 光学ファイバースクリーン発光角度特性
Angular distribution of light transmitted through fiber optics plates.

な用途に応用できる可能性がある。

6. む す び

以上、光学ファイバー受像管の特性、および応用について述べた。従来の受像管と異なる種々の応用が考えられる。

適当な感光材料と組合せて直接写真記録の分野として簡単にまとめてみると、

- (1) 水平、垂直両方向とも電子ビーム走査であり、高速記録ができる。
- (2) 小形にして単位面積当りの情報量の増加を試みたが、ファイバー径をさらに細くし、高精度の電子銃と組合せて、さらに情報量の増加を行なうことができる。
- (3) 赤外線、X線用など各種ビジコンの撮像カメラを用いると、感光材料は変えずに直接画像記録ができる。
- (4) 電気信号の取扱いにより極性反転、ガンマ補正、画像の拡大、縮小、合成、トリミング等が中間映像信号処理の段階で容易に行なえる。
- (5) 電子計算機のグラフィックディスプレイなどのアウトプットなどに、高速プリンターとしての応用も考えられる。

以上のように、光学ファイバー受像管を介して、電気信号を記録する直接写真法の原理と展開を述べたが、高速超小形という特長を生かして種々の応用が考えられ、さらにまた、その他の特殊な観測用受像管としても種々の展開が考えられる。

最後に、討論に加わっていただいた当研究所 宮崎主任研究員、富井研究員、受像管の製作に協力された試作課の諸氏、電子銃設計の松田氏、記録実験に協力された深山氏、螢光面製作の花岡氏、装置製作にご協力いただいたEDR社下野氏、種々の仕様のファイバースクリーン製作にご協力いただいたキャノン株式会社の長尾、桂両氏に感謝の意を表す。

(昭和45年1月7日 受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 宮崎栄一、富井 薫：ファイバースクリーン受像管の諸特性，昭42年電気学会論文，1589
- 2) 西田 準，前田晴雄：光学ファイバー受像管，テレビ全大予，9-3 (1968)
- 3) L. Beiser: A Unifield Approach to Photographic Recording from the CRT, P. S. E., 7, 3, May (1963) 204
- 4) R. Feinberg: The Screen Efficiency of Sealed-Off High Speed Oscillograph Cathode-Ray-Tube, PIEEE, 105, 22, Pt. B, July (1958) 370
- 5) 前田晴雄，西田 準：ファイバースクリーン受像管による直接写真，日本写真学会秋季研究発表会講演要旨，昭和44年11月13/14日 (広島)
- 6) 大石 巖：受像管のレスポンス特性，テレビ学会電子管研究奨励，186号およびテレビ誌，18, 4 (1964) 203