シリコンターゲットビジコンの高速 フレーム走査における特性

千葉大学工学部 加 藤 徳 治・磯 部 勝 芳
山 口 正 恒・小 郷 寛

シリコンターゲットビジコンが高速用のテレビカメラとして使用可能かどうかを検討するために高速フレーム走査における感度、残像特性等について理論的に考察し、実験的に確かめた。その結果、周波数帯域幅を標準方式と同一にし、移動物体の毎秒撮像数を増加する場合、走査面積を縮小すれば立上りおよび減衰の残像特性が改善され、さらに入射光量を補償すれば使用可能であることを明らかにした。それに基づいて毎秒 480 フレームの高速撮影の観測実験を行った。

1. ま え が き

高速度で移動する物体の現象を観測するためには高速撮像が必要であり、一般には毎秒 300 コマ程度のフィルム撮影法が用いられている。しかし、この法は多量のフィルムを消費するばかりでなく、画像再生に長時間を要し即時性に欠ける。そこで画像情報処理の面から即時性あるいは制御等を考慮すれば撮像、記録、再生の機能をもつテレビシステムが有効であろう。

高速撮像用の撮像管としては撮像蓄積管の利用が考えられるが、これは移動物体を連続して撮像することができない。連続撮像ができ、小型、軽量で取扱いが容易であるという実用面からみればビジコンが適当であり、残像が小さく感度が良いものとしてプランビコンがあげられる。一方、シリコンターゲットビジコン(以下 STV と記す)は残像、感度の点でも比較的すぐれているうえに安価、電子ズームが可能、焼付現象がないなどの特長をもつ。また残像も容量性のものが支配的であるので、これは走査方式によってある程度補償することができると考えられる。

本研究は、このような観点から STV が高速撮像テレビシステムの撮像管として使用できるか否かを調べたものである。

まず、信号伝送や市販の VTR への記録および再生が容易にできるように周波数帯域幅を標準の 4 MHz 程度

に制限することにして、フレーム周波数(フィルム撮影の場合のコマ数に相当する)を増加した場合の残像と感度について解析した。その結果、フレーム周波数の増加に比例して走査面積を縮小すれば、感度と解像度は悪くなるが、高速撮像に最も重要な残像は標準のフレーム周波数 30 Hz の場合に近い特性となることがわかった。ついでフレーム周波数を 480 Hz まで増加して残像、感度について実験を行ったところ、解析とかなり一致する結果がえられた。そこで高速移動物体として回転パターンを用いてフレーム周波数 480 Hz までの高速撮像を行った。フレーム周波数 30 Hz 程度の撮像ではぶれのために形状の判別が不可能な回転パターンを、ぶれがなく残像も少ない良好な画像として VTR に記録し静止画として再生することができた。したがって、STV は高速撮像テレビシステムの撮像管として実用上かなりの可能性をもつものと思われる。

2. STV の残像と感度および高速フレーム走査の方式

2.1 高速フレーム走査時の残像と感度

STV のターゲット中を流れている導電電流密度 i_t は

$$i_t = \begin{cases} i_p(L) + i_d & \text{光照射時} \\ i_d & \text{暗時} \end{cases} \quad (1)$$

ここで L は光電面照度である。

ターゲット電流すなわち出力電流 $\langle i_o(L) \rangle_t$ (= 光電流 $\langle i_o(L) \rangle_p$ + 暗電流 $\langle i_o \rangle_d$) は、1 フレームの期間に i_t によって 1 画素の静電容量に充電された電荷が、ビームランディング時間 T_e にビームによって放電される電流であ

"Some Properties of a Silicon Target Vidicon Used in High-speed Frame Scanning" by Tokuji Kato, Katsuyoshi Isobe, Masatsune Yamaguchi and Hiroshi Kogo (Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba)

るから、

$$\begin{aligned}\langle i_b(L) \rangle_t &= \langle i_b(L) \rangle_p + \langle i_b \rangle_d \\ &= \frac{s}{T_e f_p} \{ i_p(L) + i_d \} \quad (2)\end{aligned}$$

ここで f_p はフレーム周波数、 s は 1 画素の面積である。

一方、STV の残像は容量性のものが支配的であり、これが顕著に現われるのは 1 画素にランディングする電流が小さいときである。この場合の残像については木内、吉田がくわしく解析しており¹⁾、第 n フレーム目の立上り率 R_n 、減衰率 D_n は、

$$R_n = \frac{100 \ln \frac{1 - E_d^{n+1} E_p^{n+1} - E_d(1 - E_d^n E_p^n)}{E_p \{ 1 - E_d^n E_p^n - E_d(1 - E_d^{n-1} E_p^{n-1}) \}}}{\ln \frac{1}{E_p}} \quad (3)$$

$$D_n = \frac{100 \ln \frac{1 - E_d^{n+1} - E_d E_p(1 - E_d^n)}{1 - E_d^n - E_d E_p(1 - E_d^{n-1})}}{\ln \frac{1}{E_p}} \quad (4)$$

ただし E_d, E_p は $K_2/(C_T f_p) \equiv T_e/C^*$ の関係を用いると、

$$E_d = \exp\left(-\frac{A \langle i_b \rangle_d K_2}{C_T f_p}\right) = \exp\left(-\frac{A T_e \langle i_b \rangle_d}{C}\right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}E_p &= \exp\left(-\frac{A \langle i_b(L) \rangle_p K_2}{C_T f_p}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{A T_e \langle i_b(L) \rangle_p}{C}\right) \quad (6)\end{aligned}$$

ここで A はビームのランディング特性を表わす定数、 C_T および C はターゲットの全静電容量と面積 s の 1 画素の静電容量、 K_2 は水平、垂直の帰線率で定まる定数である。

ところで周波数帯域幅 B が一定となるように走査線数を減らして高速フレーム走査を行う場合には、等価的に s すなわち C が大きくなると考えられ、ビーム電流が一定ならばビジコンの CR 等価回路の概念によると残像特性が悪くなる。 C が大きくなることを避けるためには走査面積を縮小することが有効であると考えられる。

そこで(3)~(6)式を用いて走査面積を縮小して高速フレーム走査を行う場合の残像特性を定量的に検討する

まず基準走査時の走査面を図 1 に示すように $n_0 \times m_0$ (n_0 は有効走査線数であり、 m_0 は n_0 と等価な解像度を与える水平方向の画素数) の画素に分割する。高速フレーム走査時には基準走査時と同じ光学系を用いて走査面のみを縦、横ともに $1/a$ ($a \geq 1$ とし、 a^2 を走査面積縮小係数とする) に縮小するものとする。ここで基準走

* 文献¹⁾では $1/(C_T f_p) \equiv T_e/C (K_2=1)$ と仮定している。

図 1 画素の配列

The picture element array.

査とはライン周波数 $f_l = f_{l0} = 15.75$ kHz、走査線数 $N = N_0 = 525$ 本、順次走査で $f_p = f_{p0} = 30$ Hz としたものである。以下基準走査時と高速フレーム走査時の値を区別するために、おのおの f_{p0}, f_{ph} のように添字 0 または h を付す。

k を高速フレーム走査係数として次式で定義する。

$$f_{ph} = k f_{p0} \quad (7)$$

周波数帯域幅 B を基準走査時のおよそ 4 MHz に設定し、縦横比を一定とすると、 B, f_p, n (有効走査線数) との関係を用いて、

$$\frac{n_h}{n_0} = \frac{K_1 \sqrt{B/f_{ph}}}{K_1 \sqrt{B/f_{p0}}} = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (8)$$

$$\frac{m_h}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (9)$$

ここで K_1 は定数である。 s_h と C_h は(8)、(9)式を考慮すると、

$$\frac{s_h}{s_0} = \frac{S_0/a^2 n_h m_h}{S_0/n_0 m_0} = \frac{k}{a^2} \quad (10)$$

$$\frac{C_h}{C_0} = \frac{s_h C_s}{s_0 C_s} = \frac{k}{a^2} \quad (11)$$

S_0 は基準走査時の走査面積である。

T_{eh} についても同様に、

$$\frac{T_{eh}}{T_{e0}} = \frac{K_2/n_h m_h f_{ph}}{K_2/n_0 m_0 f_{p0}} = 1 \quad (12)$$

(11)、(12)式より、

$$\frac{T_{eh}}{C_h} = \frac{T_{e0} a^2}{C_0 k} \quad (13)$$

基準走査時のターゲット全容量 $C_{T0} = n_0 m_0 C_0$ および $T_{e0} = K_2/n_0 m_0 f_{p0}$ を(13)式に代入すると、

$$\frac{T_{eh}}{C_h} = \frac{K_2 a^2}{C_{T0} f_{p0} k} \quad (14)$$

ところで $\langle i_b \rangle_{ah}$ は(2)、(7)、(10)、(12)式より、

$$\frac{\langle i_b \rangle_{ah}}{\langle i_b \rangle_{a0}} = \frac{s_h/T_{eh} f_{ph}}{s_0/T_{e0} f_{p0}} = \frac{1}{a^2} \quad (15)$$

図2 高速フレーム走査時の残像の計算値

The calculated lag for a high-speed frame scanning.

$L=L_0$ のもとでは $\langle i_b(L_0) \rangle_{ph}$ も $\langle i_b \rangle_{dh}$ と同様に $1/a^2$ に減少する。しかし実用上は L を L_0 から L_h に増加して、

$$\langle i_b(L_h) \rangle_{ph} = \langle i_b(L_0) \rangle_{p0} \quad (16)$$

の条件のもとで STV を用いるものとする。

(14)～(16)式の T_{ch}/C_h , $\langle i_b \rangle_{dh}$, $\langle i_b(L_h) \rangle_{ph}$ をそれぞれ(5), (6)式の T_e/C , $\langle i_b \rangle_d$, $\langle i_b(L) \rangle_p$ に代入すると、

$$E_{dh} = \exp\left(-\frac{AK_2 \langle i_b \rangle_{d0}}{C_{T0} f_{p0} k}\right) \quad (17)$$

$$E_{ph} = \exp\left(-\frac{AK_2 \langle i_b(L_0) \rangle_{p0} a^2}{C_{T0} f_{p0} k}\right) \quad (18)$$

したがって(3), (4), (17), (18)式を用いれば走査面積を $1/a \times 1/a$ に縮小し、フレーム周波数を k 倍に増加した高速フレーム走査時の残像 R_{nh} , D_{nh} を計算できる。

図2は(17), (18)式で $A=3$, $C_{T0}=2,000$ pF, $f_{p0}=30$ Hz, $\langle i_b(L_0) \rangle_{p0}=150$ nA, $\langle i_b \rangle_{d0}=20$ nA, $K_2=0.79$ として R_{nh} , D_{nh} を計算した例である。図2(a)からわかるように、残像特性を基準走査時のそれに近づけるためには a^2/k をかなり増加しなければならない。また a^2/k が一定であっても図2(b)に示すように k の増加

に伴い残像特性は悪くなる。これは(17)式において k の増加により、暗電流が減少するのと等価となり E_{dh} が減少するためである。

一方、感度 S_p については S_p =光電流/光電面照度とすれば、(2), (7), (10), (12)式より、

$$\frac{S_{ph}}{S_{p0}} = \frac{\langle i_b(L_h) \rangle_{ph}/L_h}{\langle i_b(L_0) \rangle_{p0}/L_0} = \frac{L_0 i_p(L_h)}{a^2 L_h i_p(L_0)} \quad (19)$$

さらに(1)式で $i_p(L)=\alpha L$ (α は定数) と仮定できれば、

$$\frac{S_{ph}}{S_{p0}} = \frac{1}{a^2} \quad (20)$$

すなわち走査面積を $1/a \times 1/a$ に縮小した場合には S_{ph} は k によらず常に S_{p0}/a^2 になる。

2.2 高速フレーム走査の方式

図2(a)より明らかなように、 k に対して a^2 を増加すれば高速フレーム走査時の残像を基準走査時のそれに近づけることができる。しかし(20)式に示すように a^2 を増加すると感度が下がり、(16)式を満足するために a^2 に比例して L も増加しなければならない。また解像度の点からも a^2 を極端に大きくすることは不利である。本研究ではこれらの点を考慮して、

$$a = \sqrt{k} \quad (21)$$

とする方式を用いることにした。

(21)式の方式による残像は k にもよるが、図2(b)の計算例に用いた程度の $k \leq 10 \sim 20$ の範囲では、第2フレーム以後の R_{nh} , D_{nh} はかなり基準走査時のそれに近づくものと考えられる。

一方、(8), (9)式より解像度は縦、横ともに基準走査時の $1/\sqrt{k}$ になる。

3. 残像と光電変換特性の実験結果

実験を行ったフレーム周波数 f_p , 高速フレーム走査係数 k , ライン周波数 f_l , 走査線数 N , 走査面積縮小係数 a^2 を表1に示す。 N は基準走査の525本に対して正確には $1/2$, $1/3$, $1/4$ にはなっていないものがあるが、これは分周器に都合の良い値を選んだためである。なお表1の○, □, △, ×は図3～図5のグラフ上の測定値

表1 実験に用いた走査の種類

The scanning conditions used in the experiment.

フレーム周波数 f_p	高速フレーム走査係数 k_l	ライン周波数 f_l	走査線数 N	走査面積縮小係数 a^2	測定値と対応した印
Hz		kHz	本		
30	1	15.75	525	1	○
120	4	31.50	270	4	□
270	9	47.25	175	9	△
480	16	63.00	125	16	×

図3 光電変換特性

Photoelectric conversion properties.

図4 高速フレーム走査時の残像の実測値

The measured lag for a high-speed frame scanning.

と対応している印である。

3.1 光電変換特性

図3は光電面照度 L に対する光電流 $\langle i_b(L) \rangle_p$ の関係を示した光電変換特性である。実験では外部光源を直接加減して L を変化させる代りに、レンズ前面の照度を一定にしておきレンズの絞りを加減して L を変化させた。

図3に示すように、走査方式を変えても $\langle i_b(L) \rangle_p$ が飽和しない範囲での光電変換特性は互いに平行である。一定の $L = L_c$ (図3参照)のもとでは $\langle i_b(L_c) \rangle_{ph} \approx \langle i_b(L_c) \rangle_{p0} / a^2$ となり、 L を a^2 に比例して増加して $L = a^2 L_c$ とすると $\langle i_b(a^2 L_c) \rangle_{ph} \approx \langle i_b(L_c) \rangle_{p0}$ となる。すなわち感度 S_{ph} は使用光量範囲において(20)式で示したように常に S_{p0} / a^2 に低下している。実用的には走査面積を $1/a \times 1/a$ に縮小した高速フレーム走査時には、単に L を a^2 に比例して増加することによって $\langle i_b(L) \rangle_{ph}$ の減少を補償できることが実験的にも確かめられた。

3.2 残像特性

図5 残像のターゲット電圧依存性

The dependence of the lag at the 1st frame on the target voltage.

図4は測定した高速フレーム走査時の残像特性である。測定にあたっては $\langle i_b(L_n) \rangle_{ph} = \langle i_b(L_0) \rangle_{p0}$ をほぼ 200 nA (=一定) になるように L を加減した。残像特性の測定は光源として応答速度のすぐれた発光ダイオード (ピーク波長 6,600 Å) をレンズの下端に配置し、これを垂直同期信号で駆動し、1フレーム走査の終わった時点で点灯あるいは消灯し、出力信号をメモリスコープ上に描かせて行った。

k を一定にしても (本実験では $a^2/k=1$) f_p の増加に伴って残像特性は基準走査時のそれにくらべて悪くなり、この傾向は2.1節の計算結果とよく一致する。しかし定量的に図2、図4を比較すると、図4の実験値では $\langle i_b(L_0) \rangle_{p0}$ を図2の計算値の 4/3 倍としているにもかかわらず、実測値は計算値よりも一般に悪くなっている。実験値が理論値と一致しないのは計算に用いた(17)、(18)式の A, K_2, C_{T0} の値の選び方やビーム径の大きさ、ラスタの変動などにも原因があると推測される。

一方、STV のターゲット全容量 C_{T0} は pn 接合の空乏層の容量であるから、これは逆バイアス電圧によって変化する。すなわち C_{T0} はターゲット電圧 V_T を高くすることによって減少し、(18)式からわかるように等価的に a^2/k を大きくし、残像特性が改善されると考えられる。

図5は R_1, D_1 の V_T 依存性を測定したものであるが、 V_T を高くすることによって R_1, D_1 とともに顕著に改善されている (V_T は一般の使用法ではおよそ 10 V に設定する)。単純に V_T を高くするとターゲットが破壊したり、ブルーミングが生じやすくなることもあるが、実験を行った $V_T=20V$ 程度までは特に問題はなかった。実験を行った $k \leq 16$ の範囲では走査面積の縮小と V_T の増加によって高速フレーム走査時の残像を基

図 6 モニターの構成図

The block diagram of the monitor.

写真 1 毎秒 60 フレーム基準面積走査 (被写体は毎秒 4 回転の高速移動画)

The reproduced picture of an object rotating at the rate of 4 rps.

Frame frequency; 60 Hz. Scanning area; standard one.

写真 2 毎秒 480 フレームの 1/16 縮小面積走査 (被写体は毎秒 4 回転の高速移動画)

The reproduced picture of an object rotating at the rate of 4 rps.

Frame frequency; 480 Hz. Scanning area; 1/16×(Standard one).

準走査時のそれと同程度にできることがわかった。

4. 高速度撮像実験

フレーム周波数 f_p を 480 Hz まで増加して高速移動物体を撮像し、VTR に記録してそれをモニターで再生

した。

記録には手持ちの標準の回転 2 ヘッド式 VTR を用いた。 $f_{p0}=30$ Hz の場合は磁気テープ上では 1/2 フレーム分が 1 本のトラックとして記録されるが、 $f_{ph}=kf_{p0}$ の高速フレーム走査時には $k/2$ フレーム分を 1 本のトラックとして記録した。

再生は VTR 用モニターを改造して図 6 に示すような構成とした。 f_p を最大 480 Hz としたので垂直偏向周波数は 30~480 Hz、水平偏向周波数は 15.75~63 kHz まで可変とした。各偏向のこぎり波の振幅を加減して、モニター上ではその中の 1~2 フレーム分のみを静止画として再生できるようにした。なお k が奇数のときには静止画として再生すると 1/2 フレームしか再生できない部分が生ずる。特に基準走査 ($k=1$) では 1/2 フレームのみ再生される。

写真 1 は 4 rps で右まわりに回転するパターンを $f_{ph}=60$ Hz で走査面積を縮小せずに撮像したものである。残像もあるが、特にぶれのために被写体の形状を判別することができない。そこで $f_{ph}=480$ Hz ($k=16$) として走査面積を 1/16 ($a^2=16$) に縮小して撮像を行った。

写真 2 に示すように、ぶれや残像の少ない良好な画像がえられた。しかし写真 2 では解像度が縦、横ともに 1/4 になり、視野が狭くなっている。

5. む す び

STV の高速フレーム走査時の残像と感度を理論的および実験的に検討し、高速度撮像実験を行った。フレーム周波数 30 Hz 程度の走査方式に適した設計がなされている STV においても、走査面積を縮小することによってフレーム周波数 480 Hz 程度の高速度撮像が可能であった。これは STV が高速度撮像テレビシステムの撮像管として実用上かなりの可能性を示すものであると思われる。

本研究で述べた方式では視野が狭くなるので、現在 STV を複数個並列して用いる方式や、残像を積極的に低減するための研究を進めている。

実験を行うにあたり御協力をいただいた昭和 47 年度修士課程の中村太一君に深く感謝する。

(昭和 50 年 3 月 3 日受付, 昭和 50 年 12 月 17 日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 吉田, 木内: ビジコンの容量性残像の計算, テレビ誌, 24, 1 (1970) 280-288