撮像管の走査ビーム量制御方式

株式会社日立製作所 中央研究所 佐藤和弘・江藤良純
長原脩 策
日立電子株式会社 石橋 静

撮像管の走査ビーム量を被写体の明るさに応じて制御する方法は、撮像管の光量範囲を広げるうえで効果がある。その方法のひとつに、信号成分を撮像管のビーム制御電極に帰還させる方式があるが、これには原因不明の発振現象が付随していた。本論文はその発振原因を究明するとともに、回路が正常に動作するための安定条件を示す。さらに撮像管のターゲット面からの戻りビーム成分を帰還させる新しいビーム量制御方式についても述べる。

1. ま え が き

撮像管では被写体のハイライト部分に対応して生じたターゲット上の電荷を充分中和できる走査電子ビームを流す必要がある。しかし、ビジコンやプランビコンなど光導電型撮像管の場合、ビーム量を増加させるとターゲット面に到達する電子ビームのフォーカス状態が悪くなり解像力の低下をまねく。このような欠点は周波数分離型の単管カラーカメラやインデックスを用いる位相分離型の単管カラーカメラには大きな問題となる。

すなわち、これらの単管カラーカメラでは色信号や、色信号を分離するためのインデックス信号等を高域搬送波にのせて取り出しており、ビーム量を増大させることによる解像力の低下が、色の飽和度や色均一性、色信号の S/N 等に直接影響を与える。ところが解像力の低下防止のため、あらかじめビーム量を制限しておく、被写体のハイライト部等でビーム不足現象をおこし、大きな色ひずみを発生する。

上述の欠点を解決する手段として、撮像管のビーム量を被写体の明るさに応じてコントロールする方法があり、信号電流に比例した電圧信号を撮像管のビーム制御電極に帰還させる方式が知られている¹⁾。しかし、この方式には従来より原因不明の発振現象があった。ここではその発振原因がビーム不足時に形成される正帰還回路に起因するものであり、安定動作条件が存在することを示す。

また、撮像管のターゲット面からの戻りビームを利用した新しいビーム量制御方式の提案と、その実現方法、実験結果についても述べる。後者の方式は原理的に負帰還回路を構成できる点で前者と異なり、常に安定したビーム量制御を行うことができる。

2. 信号電流を帰還させる従来方式の安定動作条件

信号電流に対応した電圧信号を撮像管のビーム量制御電極に帰還させ走査ビーム量を制御する方法を図1に示す。すなわち撮像管のターゲット電極から取り出した信号電流を加算回路で基準電流に加えて増幅し、電圧信号に変換したのちビーム量制御電極に加え、帰還回路を構成させるものである。この回路には(1),(2),(3)式が成立し、これらより I_B を求めると(4)式になる。

$$A(I_0 + I_s) = \frac{E_{G1}}{R} \quad (1)$$

$$E_{G1} = \frac{I_c}{g_m} \quad (2)$$

図 1 信号電流帰還ビーム量制御方式の等価回路
Equivalent circuit of beam control method with
signal current.

"A Method of Automatic Scanning Beam Control of Television Camera Tube" by Kazuhiro Sato, Yoshizumi Eto, Shusaku Nagahara (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tokyo) and Shizuka Ishibashi (Hitachi Electronics Co., Ltd., Tokyo)

$$I_C = \alpha I_B \quad (3)$$

$$I_B = G(I_0 + I_S) \quad (4)$$

ただし $G = \frac{Rg_m A}{\alpha}$, A : 増幅器の増幅率, I_0 : 基準電流,

I_S : 信号電流, E_{G1} : ビーム量制御電極電圧, R : 抵抗, I_C : カソード電流, g_m : 撮像管の相互コンダクタンス, α : 比例定数, I_B : 走査ビーム電流

(4) 式で示されるビーム電流 I_B は, $G=1$ であれば基準電流 I_0 と信号電流 I_S の和になり, 信号電流の変化に応じて常に適切なビーム量を供給することができる. ところが図2の回路は G を1にすると発振をおこすことがわかった. この原因は次のように説明できる.

ビジコンのビーム電流 I_B と信号電流 I_S との関係は光電変換面への入射光量をパラメーターにとると, その特性は図2になることが実測の結果明らかになった. 図2において入射光量が ϕ_1 の場合について考えると, I_S が I_B に関係なく ϕ_1 で定まる一定値になる範囲, すなわち $I_B \geq I_{B1}$ の領域では I_S と I_B の間に関数関係が成立せず, 図1の回路はオープンループ回路となり発振することはない. この場合には, まったく同じ被写体像を2本の撮像管のフェースプレート上に結像し, 1本の撮像管の出力信号での他方の撮像管のビーム量を制御することと等価になる.

ところが被写体が変化するか, またはカメラが移動したりして被写体中に明るい部分が出現しビーム不足状態になると, それを解消する方向に回路が動作する過程で正帰還回路が形成され発振をおこすことが判明した. すなわちビーム不足を起こしているときのビーム電流と信号電流の関係は, 図2で考えると $0 < I_B < I_{B1}$ の領域内で,

$$I_S = F I_B \quad (5)$$

F : 変換効率

が成立し, 信号電流 I_S は光の情報に関係なくビーム電

図2 走査ビーム電流に対する信号電流特性
Signal current vs scanning beam current.

流 I_B に比例して増加する. このため図1の回路には(4), (5) 式から求まる(6) 式が成立し, 図1の回路は増幅率 G なる増幅器と帰還率 F の帰還定数回路とからなる正帰還回路を形成する.

$$I_B = \frac{G}{1 - GF} I_0 \quad (6)$$

したがって, この帰還回路の発振は(6) 式の分母によって決定され $GF < 1$ なら発振しない.

すなわち信号電流に比例した電圧信号を撮像管のビーム制御電極に帰還させる方法は, 撮像管への入射光量が急激に変化したりしてビーム不足状態に陥いると正帰還回路を形成し発振を起こす場合がある. そのとき, この帰還回路のループゲインは, ビーム電流を信号電流に変換する際の能率 F (ここでは変換効率と呼ぶことにする) と帰還回路の総合利得 G の積で決定され, その積が1より小さくなるように G および F を定めれば発振のない回路を構成することができる. ただし F は撮像管固有の定数であり, 回路の総合利得 G に含まれる撮像管の相互コンダクタンス g_m , カソード電流とビーム電流の比 α とともに撮像管によって異なる値を示すため, そのつど動作条件を求めなければならない.

また, 発振を防止するため系全体の安定度を見込んで回路設計をする必要があり, ビーム制御の範囲が狭くなる.

3. 新ビーム量制御方式²⁾³⁾

ここで述べる新しいビーム量制御方式は, ビジコン等のターゲット面からの戻りビームを利用する点に大きな特徴がある. ここでいう戻りビームとは, 走査ビームのうちターゲット面で信号電流として消費されたものの以外の余剰ビームのことをいう.

この戻りビームはその値が0になればビーム不足を起こしていることを意味し, その値が増加すればビームを押しすぎていることがすぐ判別できる. したがって, 信号電流のいかにかわらず戻りビーム量が常に一定と

図3 戻りビーム電流によるビーム量制御回路
Equivalent circuit of beam control method
with return beam current from target.

なるような回路を構成すれば、信号電流に比例した電子ビーム量を供給することができる。

図3にその原理図を示す。ターゲット面で信号電流として消費されなかった残りの電子ビームは G_2 に向かって逆流するが、これをたとえば戻りビーム検出電極等で取り出し、比較増幅器で基準電流と比較増幅し、抵抗で電圧に変換したのち撮像管のビーム電流制御電極に加える。この負帰還回路系には (7), (8), (9), (10) 式が成立し、これらの式から I_R を求めると (11) 式となる。

$$A(I_0 - I_R) = \frac{E_{G1}}{R} \quad (7)$$

$$E_{G1} = \frac{I_C}{g_m} \quad (8)$$

$$I_G = \alpha I_B \quad (9)$$

$$I_B = I_R + I_S \quad (10)$$

$$I_R = \frac{G}{1+G} I_0 - \frac{1}{1+G} I_S \quad (11)$$

ただし、 I_R : ターゲット面からの戻りビーム電流

(11) 式において、信号電流 I_S は撮像管の性能で定まるある有限な値 I_{SM} を持つので $G \gg 1$ が成立し、かつ $I_{SM}/(1+G)$ が充分小さくなるような G を定めれば I_R を一定値 I_0 に近づけることができる。

ここで問題となるのは I_R の検出方法である。撮像管に戻りビーム検出電極を新設しても良いが、コスト上あまり好ましくない。メッシュ電極に流れ込むわずかな戻りビームを検出することも原理的には可能であるが、メッシュには高圧がかかっていること、同期性雑音の影響をさけるためメッシュ電極の交流インピーダンスを低くしなければならないこと、走査ビームがかなり流入すること等、検出困難な要素が多い。また加速電極から取り出すことも考えられるが、カソードから直接流入するビーム量が戻りビーム量の1,000倍以上もあるため事実上検出できない。

本方式の実現を一步前進させたのは I_R の検出方法であり、容易にえられるカソード電流と信号電流から等価的な戻りビーム電流を作り出す方法である。すなわち (9), (10) 式からえられる (12) 式がその可能なことを示している。

$$I_R = \frac{1}{\alpha} I_C - I_S \quad (12)$$

図4は等価戻りビーム電流により撮像管の走査電子ビーム量を制御する方法で、撮像管のカソード電極に可変抵抗器 R_C を挿入し R_C の途中から $(1/\alpha)R_C I_C$ なる電圧信号をえ、ターゲット電極から取り出した信号電流 I_S を負荷抵抗 R_S およびプリアンプで $I_S R_B$ (B はプ

図4 等価戻りビーム電流によるビーム量制御回路
Beam control circuit with equivalent current of return beam.

表1 信号電流帰還方式と戻りビーム電流帰還方式の特徴比較
Characteristics of the beam control system.

	信号電流帰還方式	戻りビーム電流帰還方式
ビーム電流を与える式	$I_B = G(I_S + I_0)$	$I_B = \frac{G}{1+G}(I_S + I_0)$
戻りビーム電流を示す式	$I_R = G I_0 + (G-1) I_S$	$I_R = \frac{G}{1+G} I_0 - \frac{1}{1+G} I_S$
理想的なビーム量制御を行う条件	$G=1$	$G \rightarrow \infty$
理想条件が与えられたときのビーム電流	$I_B = I_S + I_0$	$I_R = I_S + I_0$
理想条件が与えられたときの戻りビーム電流	$I_R = I_0$	$I_R = I_0$
回路の簡易性	戻りビーム方式よりやや簡単	信号電流帰還方式よりやや複雑
回路の安定性	ビーム量制御の理想状態を生み出す条件 $G=1$ が回路の発振条件になるため安定性に乏しい	回路系に位相ひずみがなければ発振することはない、安定で実用的

ただし、 I_B : ビーム電流、 G : 帰還回路のループゲイン
 I_S : 信号電流、 I_0 : 基準電流
 I_R : 戻りビーム電流

リアンプの増幅率) なる電圧信号に変換された信号との差信号、すなわち $(1/\alpha)P_C I_C - R_S B I_S$ を作る。このとき $R_C = R_S B$ を成立させれば戻りビーム電流に比例した電圧信号をえることができ、それを基準電圧と比較した後 G_1 電極に加えると図3と等価な回路を構成できる。

以上、信号電流帰還方式と戻りビーム電流帰還方式との特徴を比較すると表1になる。この表でわかるように両者の動作原理は異なるものの、理想条件が与えられた場合のビーム量制御効果には差がない。信号電流帰還方式は戻りビーム方式よりやや簡単な回路で実現できるが、回路が発振しはじめる限界がビーム量制御の理想状態を生み出す条件となるため、回路のゲイン設定がむづかしく、安定性に問題がある。

図5は両方式の回路動作の相違を示すもので、信号電流帰還方式の場合、ビーム不足をおこさない領域(図5〔I〕の領域)では回路は開回路となりビーム不足とな

	領域 (I)	領域 (II)
信号電流帰還方式	開回路	正帰還閉回路
戻りビーム電流帰還方式	負帰還閉回路	開回路

図 5 信号電流帰還方式と戻りビーム電流帰還方式の回路動作の比較
Circuit movement of beam control method with signal and return beam current.

る領域 (図 5 (II) の領域) では正帰還のかかった閉回路となる。これに反し、戻りビーム方式においては領域 (II) で開回路を形成し、領域 (I) では負帰還を施した閉回路になる。このことから両者の安定性に大きな相違があることがわかる。

4. 新ビーム量制御方式の動作実験

4.1 実験回路の動作条件

前章で述べた新しいビーム量制御方式は、(11)式で示されるように、帰還回路の増幅率 G が無限大であればどんなに強い入射光に対してもそれに比例したビーム電流を供給することができる。しかし G の大きさにはおのずから限界があり、回路系に位相ひずみがあると発振もおこしやすくなる。したがって効果的に回路を動作させるためには G の設定が重要となる。

G が有限な場合、ビーム制御回路には制御限界が存在し、戻りビーム電流 I_R が 0、すなわちビーム電流がすべて信号電流に変換されるところがその限界点となる。

一般に撮像管のビーム量制御電極電圧 E_{G1} は、その最大値が 0 V と規格で定められており、そのときカソード電極から取り出される電流は高々数 mA しかない。このため光電変換面に供給される走査ビーム量にもおのずから限界があり、制御回路の能力もその限界を満足させるものであれば良い。 $E_{G1}=0$ のときのビーム電流の値を I_{BM} とすれば、帰還回路の制御限界を決定する G は (11) 式に $I_R=0$ 、 $I_S=I_{BM}$ を代入してえられる式 (13) で表わされる。

$$G = \frac{I_{BM}}{I_0} \quad (13)$$

したがって G を決定するためには基準電流 I_0 と最大走査ビーム電流 I_{BM} を求めれば良い。

基準電流 I_0 は任意の値をとることができ、その値を

大きくすればするほど G を小さくできるが、 I_0 を大きな値に設定することは信号電流の大きさに関係なくビーム電流を多く流しておくことにほかならず、撮像管の解像度を劣化させるため好ましくない。また I_0 をあまり小さな値に選ぶとビーム制御の応答時間が長くなり、帰還回路の応答スピードを上げないと被写体の暗部と明部の境界でビーム不足を生じる。筆者の実験では標準信号電流を $0.3 \mu A$ とし、その 50% にあたる $0.15 \mu A$ を I_0 とした。

一方、 I_{BM} は直接測定することができないため $E_{G1}=0$ のときのカソード電流 I_{CM} を測定し、カソード電流とビーム電流の比 α を用いて算出した。

また α は図 6 から求めた。すなわち図 6 のグラフの点線で近似される部分は I_S と I_C がほぼ比例関係にあり、ビーム不足をきたしている領域である。したがって、この範囲で光電変換面からの 2 次電子放射等、特異な現象が存在しないかぎり信号電流 I_S は走査ビーム電流 I_B と等しいものと考えられ、図 6 の点線で示す近似直線から $\alpha=6 \times 10^2$ が求まる。

以上、 $I_0=0.15 \mu A$ 、 $\alpha=6 \times 10^2$ と筆者が測定してえた

図 6 カソード電流に対する信号電流特性
Signal current vs cathode current.

図 7 ビジコンの G_1 電極電圧とカソード電流の関係
Cathode current vs G_1 voltage.

図8 信号電流に対する戻りビーム特性
Return beam current vs signal current.

図9 カソード電流に対する解像度特性
Resolution at center of tube vs cathode current.

値, $I_{CM}=2\text{mA}$ を用いて G を求めると (9) 式より $I_{BM}=(1/\alpha)I_{CM}$ となるので $G=22$ となる. ここで $G=(ARg_m)/\alpha$ であるから図7のカソード電流と G_1 電極電圧の関係を示すビジコンの特性曲線から管の相互コンダクタンス g_m を求め, 増幅器の変換インピーダンス AR を計算すると $AR=440 \times 10^6 \Omega$ となる. g_m の値は図7のグラフでもわかるように約 $7\mu\text{S}$ から $38\mu\text{S}$ まで変化しているが, 上述の計算では $g_m=30 \times 10^{-6}\text{S}$ とした.

4.2 ビーム量制御時の I_R 特性

ビーム量制御回路を動作させた状態でビジコンの入射光量を変化させ, そのときのカソード電流 I_C と信号電流 I_S を測定し, (12) 式および前に求めた α の値を用いて I_R を算出した. その結果を図8に示す. この I_R の特性は $g_m=30 \times 10^{-6}\text{S}$, $RA=400 \times 10^6 \Omega$, $\alpha=6 \times 10^2$ として計算した理論特性と比較すればわかるように, ほぼ理論通り動作している. 実測値が直線にならないのは前述したように g_m 等の非直線性によるものと推定される.

4.3 単管カラーカメラを用いた撮像実験

新しいビーム量制御回路の効果を判定するため, 日立製ビジコン H 8374 を用いた周波数分離方式の単管カラーカメラによる撮像実験を行った.

前述のように, ビジコンはビーム量を増加すると解像度の劣化をきたす. 図9は H 8374 と類似したビジコンのカソード電流とビジコン中心部の解像度特性の関係を示す図であるが, カソード電流すなわちビーム電流を3倍程度増加させると約 38% の解像度劣化となる. このような解像度の劣化は周波数分離型の単管カラーカメラの画質に大きな影響を与える.

すなわち, 実験に用いたカメラは赤および青の信号を, それぞれ 3.9 MHz, 5.1 MHz の高域搬送波にのせて取り出すようになっており, ビーム量の増加による解像度の劣化が赤および青の信号のレベル変化となって顕著にあらわれ, 画面の色均一性を損う. また被写体のハイライト部でビーム不足を生じると, その部分の搬送波成分すなわち赤と青の信号成分が失われ, 緑だけの再生像となる. このため周波数分離方式の単管カラーカメラはビーム量制御の効果を判定するには都合が良い.

図10はその実験回路である. 点線で囲まれた部分は周波数分離方式単管カラーカメラの大ざっぱな機能を示したもので, 点線外が図4を具体化したビーム量制御回路である. カソード電流の検出に用いられている MOSFET によるスイッチング回路は, 大振幅のブランキングパルスがカソード電流検出力に混入するのを防いで

図10 実験回路構成
Test circuit of beam control method.

いる。

実験では信号電流 $0.3\mu\text{A}$ を標準電流と仮定し、従来方法 (G_1 電極に直流電圧を与えるだけ) で3倍の信号電流が取り出せるようにビーム量をセットした場合と、戻りビーム電流を帰還させるビーム量制御回路を動作させた場合の色均一性の変化をカラーモニター上で比較観察した。その結果、従来方法ではビーム量を増加させたことによる解像度の低下が色搬送波のレベル変化となっており、再生画面の一部、特に画面の4隅を緑色に変色する。しかしビーム量制御を行った場合には上述の欠陥は認められず、撮像管の入力光に対するダイナミックレンジを拡大することができた。

5. む す び

従来より懸案であった撮像管のビーム不足現象を解消するため、走査電子ビーム量制御による撮像管のダイナミックレンジ拡大法について論じた。この方法のひとつに、信号成分を直接撮像管のビーム量制御電極に帰還させる方法が知られている。本報告はこの方式の致命的欠陥である発振現象に着目し、その原因を究明するとともに、撮像管の光電変換面からの戻りビーム電流と等価な信号をカソード電流と信号電流から作り、その信号によってビーム量を制御する新しいビーム量制御方式を提案した。

前者は帰還回路のループゲインを1以下におさえれば制御動作を行わせることができるが、制御回路が正帰還

回路を形成するため、発振しやすく安定動作条件を定めるのが非常にむずかしい。それに反し、後者は負帰還回路であるため安定で、かつ有効なビーム量制御を行わせることができる。この新しいビーム量制御方式は簡単な回路で実現できるうえ ACT (Anti-Comet-Tail) 管⁴⁾のように特殊な電極構造も必要とせず、かつ、解像度の低下を極力抑えながら撮像管のダイナミックレンジを拡大することができるので、あらゆるカメラに利用できる。

特にビームフォーカスの良好なことが要求される周波数分離型の単管カラーカメラや、インデックスを用いる位相分離型の単管カラーカメラには大きな効果がある。

また、3管式のカメラ等においても、常時多大なビーム電流を流しつづける従来方式にくらべ、撮像管の長寿命化にも役だたせることができる。

なお、本研究を遂行するにあたり、御協力をいただいた当社茂原工場特殊管開発部の信時主任技師、日立電子 渡辺副技師長に感謝いたします。

(昭和49年9月7日受付、昭和49年11月27日再受付)

(参 考 文 献)

- 1) 坂井：プランピコンのビームづまりの軽減，テレビ学会電子装置研資 (1968.7)
- 2) 佐藤，江藤ほか：撮像管の走査電子ビーム量制御方式，テレビ学会電子装置研資 (1971.1)
- 3) 長原，佐藤ほか：撮像管の走査電子ビーム制御方式，テレビ全大，4-9 (1974)
- 4) ACT (Anti-Comet-Tail) 管に関するフィリップス社の技術資料

お 詫 び と 訂 正

本会誌7月号の表紙に論文「撮像管の走査ビーム量制御方式」の題目を印刷いたしましたが、本8月号の掲載でしたので、ここにお詫びし、訂正を申し上げます。