電磁集束・電磁偏向ビジコン形撮像管の電子ビーム分布

正会員 作左部 剛 視[†], 正会員 木 内 雄 二[†]

あらまし 直径 $6\ \mu\text{m}$ の微小なピンホールを用いて1インチビジコン形撮像管の走査ビームの電流密度分布を直接測定した。ベストフォーカスしたビームはガウス分布に近く、静電集束電磁偏向 (SM) 方式より電磁集束電磁偏向 (MM) 方式のほうがスポット径が小さく、ビームの広がりも少ない。G₂ に $30\ \mu\text{m}$ アパーチャーを用いた通常動作の場合、ターゲット上のスポット径の半値幅は $20\sim 30\ \mu\text{m}$ あり、このスポットに対する物点は G₂ のリミティングアパーチャーでなくアパーチャーごしにみたクロスオーバーである。またその半値幅は $20\ \mu\text{m}$ で、アパーチャーからカソード寄り $0.7\sim 0.8\ \text{mm}$ の位置にあることが明らかになった。

1. ま え が き

テレビジョンが発達し画像情報の利用が盛んになるにつれ、これらの入力装置である撮像装置には機能的にも性能的にも一段と高度な要求が課せられている。

現在、撮像デバイスに要求されている課題は、固体化と高品位・高解像度化および多種多様な応用に対する機能上・性能上の対応ということになる。固体化は当面、ビデオカメラ用の単板カラー撮像装置が中心課題であり、高品位・高解像度化は高品位テレビジョンや高密度画像情報の利用を目的として、撮像管の性能向上によってこれを達成すべく、種々の研究開発が進められている。

我々は撮像管の高解像度化の第一歩として、現在広く使われているビジコン形撮像管の走査ビームスポットを直接測定して、クロスオーバーの大きさ、位置を明らかにすることから始めた。

ビームスポットの大きさを知る方法として、撮像管の解像度特性から推定する方法¹⁾の他、ビームが細い針金を横切るときの信号から求める方法²⁾、ターゲットを帰線ビームで走査し、その帯電の模様を同じビームで読取って求める方法³⁾などが報告されている。

我々は、微小なピンホールを用いてビーム電流密度分布を3次元表示し、同時にスポットの大きさを求め

た⁴⁾⁵⁾。この方法は、集束方式や動作条件を変えた場合のスポットの変化を即時に直視でき、ビームの実体を握み、その性質を知るうえで大変便利である。さらに、物点と像点との関係からクロスオーバー付近の電子ビームの電流密度分布がわかり、集束レンズ系の結像倍率や収差が求められる。実験結果は計算と対応させて撮像管の解像度向上に有力な参考とすることができた。

現段階では電磁集束電磁偏向 (MM) 方式が高解像度化に適しているので、実験の対象としてこの方式の1インチビジコン形撮像管を使用した。ビームスポットの半値幅の測定のみ、静電集束電磁偏向 (SM) 方式についても測定したので合わせて結果を示す。

2. ビームスポットの測定

2.1 実験管および測定系

製作した実験管の構造を図1に示す。測定の対象と

図1 実験管およびターゲットの構造
Schematic construction of experimental tube and target.

[†] 東京農工大学 工学部

“Current Density Distribution in an M-M Vidicon Type Camera Tube” by Takashi Sakusabe and Yuji Kiuchi (Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo)

図 2 測定系系統図

Block diagram for measuring beam spot size.

写真 1 ビームスポットの 3 次元表示例 ($20 \mu\text{m}/\text{div}$)
Three-dimensional display of current density distribution of best-focussed beam ($20 \mu\text{m}/\text{div}$).

なる電子銃と 2 次電子増倍器がターゲットを挟み向かい合っている。ターゲットは金属棒にステンレスメッシュを張り、その上にピンホールをあげた金属片を数個、中心および周辺に配置した。ピンホールはターゲット中心に直径 $6 \mu\text{m}$ のもの、周辺部には $8 \sim 10 \mu\text{m}$ のものを使用した。

ビームスポット径および電流密度分布を測定するため微小偏向してピンホールを走査し、ピンホールを通過したビームの一部を 2 次電子増倍器に導き、信号を出力する。測定系の系統図を図 2 に示す。テレビ走査方式を取り、のこぎり波はオシロスコープ上で電流密度分布を 3 次元表示するために用いる。写真 1 に 3 次元表示例を示す。

2.2 測定法の検討

(1) ピンホールの大きさの影響

直径 $1 \mu\text{m}$ 程度の真円のピンホールは製作困難で、しかも出力電流が非常に少なく測定が難しい。実験では中心に $6 \mu\text{m}$ 、周辺に $8 \sim 10 \mu\text{m}$ のものを用いたが、ピンホール径により誤差が生じるため補正計算を行った。図 3 に測定値と真値の較正表を示す。ターゲット中心でビームが $10 \mu\text{m}$ の場合でも $6 \mu\text{m}$ のピンホールを用いれば 7% の誤差であり、また周辺部はスポットが $30 \mu\text{m}$ 以上と大きいため $10 \mu\text{m}$ のピンホールでも 2% の誤差となり、測定データは補正の必要がない。

図 3 ビームスポットの測定値と真値の関係
Relation between measured and calculated values of Gaussian distribution electron beam.

図 4 ピンホール付近の電位分布
Potential distribution in the vicinity of pinhole.

い。

(2) ピンホールによる電位分布の影響

ピンホールの断面形状にもとづいて求めた電位分布の計算結果を図 4 に示す。すりばちの穴径の小さい側を電子の入射側としたのでターゲット前面の電位の乱れは少なく、ピンホールに流入する電子に与える影響は少ないと思われる。

電子がピンホールへ大きな角度で入射すると、内壁 (SEM で測定した結果、角度は約 26°) に捕獲される恐れがあるので、ピンホールを通過できる限界の電子の軌道を計算した。ターゲット表面電位が 0 V のときは明らかにビームは通過できないが、1 V ではカソードから発散角 3° で出たビームの周辺の電子は約 23° の角度でターゲットに達し、壁に捕獲されることはない。しかし、内壁の角度の不確かさから、ターゲット表面電位 1 V 以下の測定には信頼性がない。

(3) ビームの速度分散の影響

使用した実験管のビームランディング特性は図 5 に示すように正常であり、ピンホールを通過する電子の

図5 測定管のランディング特性およびピンホールを通過する電流

Beam landing curves and current passing through pinhole.

特性もこれと相似である。したがって、ここで速度選択的な捕獲はないと考えられる。しかし、ターゲット電圧2V（印加電圧で接触電位差を含む。したがって表面電位は負になっている）以下では、非常に微小な電流測定でS/Nが低下し測定不能であった。この領域で速度分散の影響が生じる可能性は充分ある。

3. 中心ビームスポットの測定

直径6μmのピンホールを用い、製品化されているMM方式8541形の電子銃のターゲット中心のビームスポットの半値幅を測定した。

図6、図7にビーム電流およびターゲット電圧に対するスポットの大きさを示す。G₂アパーチャー（30μm）を除いた8541形は、アパーチャーを有するものと同じドライブ電圧をもって同じビーム電流とした。G₂アパーチャーがない場合、ビーム電流の増加につれスポットは大きくなるが、G₂アパーチャーがあると、これで制限されほぼ一定である。ターゲット電圧に対しては2V以下で大きくなるが、前述のようにこれ以下の測定は誤差が大きい。

SM方式8134形（30μmアパーチャー）の結果も参考に示すが、MM方式に比べてスポットが大きく、電流密度分布も裾が広がり円錐形に近い形をしている。また、アライメントの余裕度が少なくスポットが真円になりにくい。したがって、現段階ではMM方式が高解像度化に適している。

本測定では実験管の構造上、コイルアセンブリーが正規の位置より約1cmカソード側に寄っていた。集束磁界分布はガウス分布状であり、そのピーク位置に

図6 ビーム電流対スポットの半値幅（ターゲット電圧 $V_t = 5V$ ）

Half-width of beam spot versus beam current at $V_t = 5V$.

図7 ターゲット電圧対スポットの半値幅（ビーム電流 $I_b = 0.2 \mu A$ ）

Half-width of beam spot versus target voltage at $I_b = 0.2 \mu A$.

より結像倍率が変わる。これに関する詳細は後報で述べるが、図6、図7のMM方式に関する測定値は通常の場合に対し1.2~1.5倍大きな値である。

4. 電子光学的な物点と結像倍率

1ループ全部にわたって一様集束磁界が得られる集束コイルを試作し、物点としてのクロスオーバーの大きさを求めた。直径30μmのG₂アパーチャーを有する実験管で測定した結果、ターゲット上のスポットの半値幅は20μmであった。アパーチャー径の測定値

と実際の値との比較により結像倍率は1であったから、実効的な物点の大きさは $20\ \mu\text{m}$ である。また G_2 アパーチャーを除いた電子銃の測定より、真のクロスオーバーの半値幅は $40\ \mu\text{m}$ であった。つまり集束レンズ側から見た大きさが G_2 アパーチャーで制限され、真のクロスオーバーの中心部分が物点として働いている。また、ビーム電流 $0.6\ \mu\text{A}$ 以下では、この制限されたクロスオーバーが物点となり、アパーチャーの開口自体が物点となることはない。

次に分離メッシュ、非分離メッシュ両方の条件より、メッシュ電圧 V_{G4} と集束電圧 V_{G3} の比が 450:300 のときコリメーションレンズの縮小率は 0.8 であった。

5. クロスオーバー付近の電流密度分布

MM 方式は収差が比較的少ないので、 G_2 アパーチャーの像をターゲットに結ばせることができる。スポットが最も小さくなるのは、それよりわずかずれた集束条件であり、この点がクロスオーバーと推定できる。このようにしてクロスオーバー付近の電流密度分布を測定した。これを図 8 に示す。この測定値には後に述べる集束系の収差によるほけが含まれる。曲線は等密度線で破線はビームスポットの半値幅を表す。1 ライン表示した波形を微分して立ち上がりの最も急峻な点をアパーチャー、電流密度の最も大きな点をクロスオーバーとすると、クロスオーバーはアパーチャーから $0.7\sim 0.8\ \text{mm}$ カソード寄りにあり、アパーチャーでわずかにレンズ作用が生じている。

図 8 クロスオーバー付近の等電流密度線図と各位置 (1~8) に対応する観測波形 ($I_b=0.2\ \mu\text{A}$)

Current density distribution and three dimensional shape of beam in the neighbourhood of cross-over.

図 9 観測波形より求めたビームの線広がり関数
Line spread function of beam determined from measured signal wave form.

6. 磁界集束レンズの収差

6.1 測定結果

アパーチャーの像を磁界集束レンズでターゲット上に結像し、1 ライン表示の波形から広がり関数を求めた。図 9 に示すように半値幅 $10\ \mu\text{m}$ の広がり求めた。SM 方式では微分信号が微小で S/N が悪く、はっきりと広がり関数を求めることができなかった。これは MM 方式と比べて収差が大きいと思われる。

6.2 計算による解析

ターゲット表面電位 $0\ \text{V}$ 近くで速度分散によるビームの広がりを計算した。簡単のためメッシュまで一定電位 V 、メッシュからターゲットまで一様な減速電界とし、空間電荷は無視、速度分散については軸方向、半径方向ともに残像の計算⁶⁾と同様に、速度の電圧換算値 v に対し $\exp(-av)$ とし、 $a=3$ として計算した。

ターゲットの表面電位 V_t のとき、軸方向および半径方向に初速度の電圧換算値それぞれ V_z および V_r をもつ電子の、初速度 0 の電子に対する広がり半径 r は次のように近似される⁷⁾。

$$V_t \geq 0 \text{ のとき} \\ r \cong \frac{2l_{MT}\sqrt{V_r}(\sqrt{V_t+V_z}-\sqrt{V_t})}{V} + \frac{l_{CM}\sqrt{V_r}V_z}{2V^{3/2}} \quad (1)$$

$$V_t \leq 0 \text{ のとき} \\ r \cong \frac{2l_{MT}\sqrt{V_r}\sqrt{V_r+V_z}}{V}$$

表1 種々の初速度に対するビームの広がり半径 $r(\mu\text{m})$
Characteristics of beam spread for several initial velocities.

		$V_z(\text{V})$		$V_r(\text{V})$	
ターゲット電圧		0.23	0.76	0.23	0.76
高速度	$V_t = V = 300(\text{V})$	0.96	1.73	3.2	5.7
低速度	$V_t = 2(\text{V})$	2.9	5.4	9.3	16.9
	1	3.7	6.8	11.4	20.6
	0.5	4.7	8.6	13.6	24.7
	0	13.2	24.0	25.3	45.9
	-0.1	9.9	18.1	23.6	42.8
	-0.5	—	—	14.8	26.9
等電位領域のみ		0.91	1.66	3.0	5.4

$$+ \frac{l_{CM} \sqrt{V_r} (V_t + V_z)}{2V^{3/2}} \quad (2)$$

ここで l_{CM} , l_{MT} は、それぞれクロスオーバーからメッシュ、メッシュからターゲットまでの距離で、 $V_t < 0$ では $V_z > -V_t$ の電子のみターゲットに到達する。両式の右辺の第1項は減速領域の、第2項は等速領域での広がりを示し、 $V_t = 0$ に近くなるほど第1項が支配的になる。

表1に初速度分布が1/2および1/10になる初速度、それぞれ0.23 Vと0.76 Vについての広がり半径 $r(\mu\text{m})$ を示す。管軸方向および半径方向初速度、それぞれ v_z と v_r が共に0.23 V、ターゲット電圧が2 Vのとき $3 \mu\text{m}$ の広がりとなった。

実際の動作条件では、電子の初速度分散による色収差の他、非点・球面収差等が含まれ、さらにフィールドメッシュでの散乱も考えられる。したがって、測定値の $10 \mu\text{m}$ は妥当な値と考えられる。

7. 偏向時のスポットひずみ

7.1 測定結果

アライメントを調節しターゲット中心でジャストフォーカスした後、周辺部のビームの電流密度分布を測定した例を写真2に示す。SM方式では必ず偏向方向

写真2 ターゲット周辺部のビームスポット形状
Shape of deflected beam spot at corner of target.

偏向領域の長さ

図10 偏向領域の長さによって変化するスポットの広がり (ビーム1ループの長さを1に規格化、ターゲット前面での $x-y$ 面の断面を示す)

Cross section ($x-y$ plane) of beam spreading in varying deflecting length (1 loop length of beam is normalized to unity).

に細長くなる。これは速度分散をもった幾何収差として説明できるが、MM方式では普通横長となり偏向する方向によって回転を生ずる。

7.2 計算による解析

(1) 一様集束磁界の場合

一様集束磁界中でループ全体に一様偏向磁界をかける場合を計算すると、ビームは必ず偏向方向に縦長になり、実験事実もこれを支持する。これはトランスバース軌道とメリジナル軌道の広がりの違いによる効果と、軸方向初速度が大きい順に偏向方向に大きく偏向される効果による⁷⁾。

次に、ループの一部に一様偏向がかかった場合について計算した。1ループのビームは 360° 回転してターゲットに集束する。偏向による電子ビームのひずみも集束磁界で回転するが、偏向領域がループ長に等しければ 360° 回転してターゲット上では普通の非点収差と同じく縦長のスポットとなる。もし偏向領域が短

図11 ガウス関数で表した集束磁界分布

Focussing magnetic field distribution assumed to be Gaussian.

図 12 サイドビーム軌道 ($V_x=0.5$ V, $V_z=0$ V)
Electron trajectories of side beam ($V_x=0.5$ (V)) in
Gaussian focussing field.

ければ、ひずみの回転は 360° より小さくなり、ひずみの長手方向が偏向方向と一致しない。図 10 にこれらの様子を示す。

(2) ガウス分布状集束磁界の場合

実際にビジコンに用いられている集束磁界はガウス分布に近い。そこで図 11 に示す実測から近似したガウス関数で解析を行った。図 12 に軸と直角な面 ($x-y$ 面) に投影した軌道を示す。ガウス分布の場合は磁界の軸方向成分 H_z のほか、半径方向成分 H_r が存在する。仮りに H_z あるいは H_r のみによる電子軌道を考え、それぞれ破線および点線で示してある。特に H_r の作用は、初め磁界が強くなっていくとき同方向の回転を、あとで磁界が弱くなるとき逆方向の回転を与える。この回転は等速領域で軸上ではキャンセルするが、コイルの軸を中心としているから電子ビームの軸がコイルの軸とずれている時には H_r の成分が残る、ひずみが生じる。

実際のコイルアセンブリは集束磁界、偏向磁界ともガウス分布に近く、偏向領域も短いものが多い。したがって、集束磁界分布の状態、偏向コイルの長さや位置などでスポットのひずみの方向が変化する。アライメントが合っていないときは、さらに現象は複雑になり、計算による解析は困難である。

8. む す び

ピンホールを用いてビジコン形撮像管の走査電子ビームの電流密度分布の直接測定を行い、電子ビームの性質を知ることができた。

同じ直径のリミティングアパーチャーを用いた場合、SM 方式より MM 方式の方がスポットが小さい。また $30\text{ }\mu\text{m}$ 径のアパーチャーをもつ MM 方式 1 インチビジコンのターゲット上のスポット径は集束磁界分布により影響され、 $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ である。このスポット

に対する物点は G_2 アパーチャーで制限されたクロスオーバーで $20\text{ }\mu\text{m}$ の大きさをもつ。

クロスオーバー前後の電子ビームの電流密度分布が求まり、MM 方式の電子ビームの $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の広がりも実測できた。また軌道計算による解析から MM 方式で周辺のビームスポットが細長くひずみ、回転する主な原因は速度分散を含んだ非点収差で、長細くひずんだビームが偏向領域内で集束磁界によって回転するためとわかった。

この測定法は、ターゲット電圧が 2 V 以下では測定が不可能であったばかりでなく、原理的にも問題がある。計算により、 2 V 以下の領域では速度分散のためスポットが広がることが予想された。

しかし、スポットとは何か、解像度とは何かという問題に立ち帰って考えると、解像度は光の縞パターンによってターゲット表面にできた電位の縞をビームで読取ることによって測定されるので、スポットは平らな等電位面に入るときと異なり変形している筈である。暗部のターゲット電圧が 2 V 以上であれば、今回の結果よりビームの変形は少ないと思われる。これ以下の所では縞パターンであればビームベンディング⁸⁾ が起こり、さらにターゲットの充放電によりセルフシャープニング効果⁹⁾ が起こり、ビームは変形する。

しかし、ここで述べた結果はターゲット到着寸前までの電子ビームとしてみれば充分意味はあり、また、実際にここで得た知識を基にして電子ビームを細くし、高解像度の撮像管を開発したので、続いて発表する予定である。

(昭和 57 年 8 月 10 日受付, 昭和 58 年 5 月 31 日最終受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 木内: “1 インチビジコンの解像度”, 東芝レビュー, **16**, 7, pp. 859-864 (1961)
- 2) 中山, 長谷川: “撮像管における電子ビームスポットの大きさ”, 東芝レビュー, **15**, 9, pp. 1017-1024 (1960)
- 3) 三田: “シリコンビジコンの解像度の検討”, “信学会電子装置研資料, ED75-26, pp. 37-44 (1975)
- 4) 作左部, 井上, 木内: “ビジコンの電子ビームスポットの直接測定”, テレビ学会電子装置研資料, 第 238 号 (Nov., 1975)
- 5) 木内, 作左部: “ビジコンの電子ビームの直線測定 II”, テレビ学会電子装置研資料, 第 300 号 (Dec., 1976)
- 6) 吉田, 木内: “ビジコンの容量性残像の計算”, テレビ誌, **24**, 1, pp. 20-28 (Jan., 1970)
- 7) 作左部, 木内: “電磁集束電磁偏向形ビジコンの電子ビーム”, テレビ学技報, ED-350, **1**, 6, pp. 7-12 (Dec., 1977)
- 8) 沼田, 作左部, 木内: “撮像管の解像度に及ぼすビームベンディングの影響 (I)”, テレビ学技報, ED-582, **5**, 5, pp. 41-46 (June, 1981)
- 9) 倉重: “低速度ビームランディングにおけるセルフシャープニング効果・第 5 報”, テレビ学技報, ED-507, **4**, 5, pp. 9-16 (June, 1980)

**Current Density Distribution in an M-M Vidicon
Type Camera Tube**

by Takashi Sakusabe, Yuji Kiuchi

The beam current density distribution of 1 inch M-M type vidicon is investigated. A portion of the beam current passing through a fine pinhole in a metallic target with slight beam scanning is detected by an electron-multiplier and three-dimensionally displayed as a current density distribution on an oscilloscope screen. As a result, it becomes clear that the beam spot size of a 1 inch vidicon using a conventional magnetic focus and deflection coil assembly is to 20 to 30 μ m in diameter, and the current density distribution is very similar to the Gaussian shape. The actual crossover is about 40 μ m in diameter, but the size of the image at the target is reduced to 20 μ m due to anode 62 aperture interception.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 37, No. 9 (1983) 717~722

**Improvement on Resolution of Vidicon Type
Camera Tube by the 2-Loops CMF Method**

by Takashi Sakusabe Yuji Kiuchi

This paper describes a new focusing and deflecting method, called the 2-loop CMF (Concentrated Magnetic Flux) method, which improves the resolution of the 1 inch vidicon type M-M camera tube. Beam electrons in this method revolve through two loops to cross the axis at the target. In the first loop, only the CMF focusing field which reduces the magnification by half is applied. In the second loop, the uniform focusing and Gaussian deflecting fields are applied so that minimum beam spreading and deflection aberration are achieved. As a result, the beam spot half-width is reduced to 10 μ m in diameter and the AR value at 400 TV lines is 92% below the 1400 V mesh and 1000 V wall electrode voltages. Further, the resolution uniformity over the target is so good that an 85% AR value is retained at the corners as compared with that of the center when dynamic focusing is used.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 37, No. 9 (1983) 723~729

**Readability of Japanese Characters on CRT
and Visual Fatigue**

by Takeshi Nishimura, Kazunari Morimoto

Readability of Japanese characters (Kanji and Katakana) and visual fatigue caused by the reading task were measured. Readability was determined by quickness and accuracy of character reading, while visual fatigue was presumed from measurements of lowering CFF and accommodation abilities. The results indicate that Kanji is read more quickly and accurately than Katakana, and further, that a lesser degree of visual fatigue is induced with Kanji.

J. Inst. TV Engrs. of Japan, Vol. 37, No. 9 (1983) 730~735