2. 電子ビーム走査の問題点

2-1 概 説

NHK総合技術研究所 高 橋 正 彦

1. ま え が き

画像における走査で、電子ビーム走査は主としてテレビジョン工学の分野で発達してきた技術であるが、最近ではグラフィックディスプレイなどコンピュータの分野でも用いられている。テレビの入出力である撮像・受像装置でも、現在最も普及した走査法として用いられ、今後とも相当な期間、主座を占めるであろう。最近開発されている新しい走査技術の紹介に興味をもって迎えられるであろう本号にあって、電子ビーム走査についてふりかえって見るとともに、この分野の中にも新しく注目されつつある諸点について述べてみるのも意義のあることと考える。

2. 電子ビーム走査系の構成

図1に示すのは電子ビーム走査系の構成である。電子ビームの通路は一般に高い真真空度に保たれた容器内にある。集束系および偏向系は、電界によるもの場合は真空中にあり、磁界を伴うもの場合は、その磁界を発生する装置は真空容器外にあるのが普通である。

電子銃は電子ビームを発生させ、その強度（普通は電子流密度）を制御する機能を備えている。集束系は電子銃より発生した電子ビームをターゲットに集束させ、走査点（ビームスポットまたは輝点）を得るための機能を備えている。偏向系は電子ビームを偏向し、走査点を移

図1 電子ビーム走査系の構成

動させる機能を持っており、多くの場合、ターゲット上で直角方向に偏向させる（テレビの場合の水平・垂直偏向）ために、2組の偏向器が用意されている。

ターゲットは、撮像管の場合には、あらかじめその上に与えられた情報を走査点から取出す機能を備えており、受像管の場合には走査点に与えられたビームに含まれる情報に応じて発光を起こす（または光量を制御する）機能を備えている。

3. 高速度走査と低速度走査

現在、高速度走査は受像管で、低速度走査は撮像管で用いられている。その理由は次のように考えられる。

受像管は高速度電子ビームの入射によって、その輝度を増す螢光面を用いている。輝度は加速電圧とともに増加するので、ビーム電流を増して輝度を高めるより、加速電圧を上げるほうがスポットの鮮鋭度の点から有利である。

撮像管は高速度電子ビームの入射により発生する過剰の2次電子（一般にシェーディングの原因になりやすい）の処理が困難なため、ターゲットの2次電子放出比（ δ ）が1以下になる第1クロスオーバー電圧以下の低加速ビームを利用するのが普通である。

大勢としては上述のとおりであるが、過去において、撮像管にも高速度走査が用いられたことがあり、また、蓄積管においては、現在も高速度走査を用いる種類がある。これらの詳細は電子ビーム入射に対するターゲット表面電位変化の特性によるところが大きく、図2に示すKnollとKazanの図表に集約される¹⁾²⁾。

第2クロスオーバー電圧以上の加速で行なわれる高速度電子ビーム入射でも、ターゲットは $\delta < 1$ となるが、螢光体にとってこの領域を用いることはむしろ不利であり、螢光面の電位降下を起こし、輝度低下やイオン焼けの原因となるので、その防止策として受像管の螢光面にはメタルバックングが必須である³⁾。この領域を効果的に用いる例として静電記録管がある。ピンヘッドが電子

"2. Problems in Electron Beam Scanning: 2-1 General Review"
by Masahiko Takahashi (NHK Technical Research Laboratories,
Tokyo)

図 2 電子衝撃によるターゲット面電位の移動方向
(コレクタを 0V, 電子銃陰極を $-V_K(V)$ として絶縁ターゲットを衝撃したときのターゲット面電位 V_T の移動方向. V_{eq} が平衡する. C, D はターゲットの 2 次電子放出比 1 の点を示す)

ビーム衝撃を受けると記録ピンが電位降下を起こし、静電記録紙に負電荷を与える。

4. 走査点および集束系

ターゲットの中央部での走査点の特性 (大きさ, 電子流密度分布, 収差) は電子銃および集束系によって主として定まると考えられる。

受像管の例を略図的に図 3 に示す。近軸軌道のみを考えた第 1 近似としては、電子銃より発生する電子ビームのクロスオーバー (軸に垂直なビーム断面が最小となる部分) を物体とし、集束電子レンズの位置とターゲットの位置とを図のようにすれば、最小スポット径を得る集束条件では、クロスオーバー径に対するスポット径の倍率 m は、

$$m = b/a \quad (1)$$

で表わされる*。したがって、所要のスポット径 d_s とクロスオーバー径 d_c との関係は、

$$d_s = m \cdot d_c \quad (2)$$

であり、微小なスポットを得たいならば、 d_c および m を小とするのがよい。 d_c は電子銃の設計によって左右される。 m については、受像管では集束レンズとターゲットの間に偏向器が入るので、 b の下限に制約がある。さらに偏向角と画面の大きさによって b が定まる。

図 3 受像管の走査系

* 実際の電子銃では補助レンズを併用するので、その効果を考慮して a を補正する必要がある。

$$W = 2b \cdot \tan(\theta/2) \quad (3)$$

広角偏向管は b を小さくできるので、スポットサイズをある値に定めれば、 a も小さくできる。これらの事実では受像管の扁平化の傾向を促進したといえるであろう。

a を長くすることによってスポットを小さくする例としては記録管 (静電記録管, ファイバー管) がある。しかし、この場合には、集束器 (集束コイルまたは集束電極) 内であるべく近軸ビームとしておかないと集束の収差が増す。非点収差は集束器やビーム自体の調整によって軽減することができるが、球面収差は制限アパーチャーなどを設けて防ぐなどの手段が必要となる場合がある。より本質的には、電子銃より発生する電子ビームの拡散角を小さくするような設計が望ましい。

受像管では数十～数百 μA のビーム電流が必要であるが、撮像管では数 μA 以下でよい。しかしスポットサイズは受像管の場合の 1 桁下で数十 μm 径以下を用いる。このために電子銃のトップには微細孔 (一般に $50 \mu m$ 以下の径) を設け、これによってクロスオーバーよりもターゲット側に人工的に電子ビームの最小断面部を作り、この像をターゲット上に結ばせて走査点とするのが普通である。光学との類似でいえば“フラッドライトで照らされた”物体⁴⁾に相当する。

集束系が電界である場合 (電界集束, 磁界偏向によるものを SM 形という) には、ビームのターゲットへの垂直入射を確保するための電界コリメーターが付加されるが、走査点の制限孔に対する倍率についての議論は、受像管とはほぼ同様なことがいえるようである。

低速度走査を用いる撮像管で一般に利用されている磁界集束磁界偏向の方式 (MM 形) では図 4 のように、ビームはいくつかのループを構成し、この領域内の電位が一定で集束磁界が均一であるならば、スポットの制限孔に対する倍率は収差がないとして 1 である。また近似的にターゲットへの垂直入射が可能である。

5. 偏 向 系

大別して電界偏向と磁界偏向があるが、管軸方向に磁

図 4 磁界集束磁界偏向 (MM 形) の走査系

界があって、これが偏向場に重畳している場合を含めて4種類がある。

電子ビームが電界により加速され、次に、等電位空間(フィールドフリー領域)に入る。ここで、横方向の様な電界または磁界が加えられるとビームは偏向される。このとき描く軌道は、電界では放物線、磁界では円弧である。この後、さらにフィールドフリー領域が続けば、再び直線に進む。この直線を軸上に延長した交点が偏向中心である。一般に偏向角の増加とともに偏向中心が前進する。

中心軸上の主ビームに対し、軸からわずかに離れてターゲット中心に集束するように入射するビームは、偏向系を出てから主ビームに近づき交わる傾向を示す。これを偏向集束作用といい、偏向角の増加とともにその作用は強まる。ターゲット上では、その中央部で集束調整した状態で偏向すると周辺でデフォーカススポットとなる。これを偏向デフォーカス作用という。これを防ぐために偏向に伴って集束系を変調する集束変調技術がある。また、偏向集束作用を積極的にビームの集束に利用するものが扁平受像管の中にある(Aiken 管, Gabor 管など)。磁界偏向では偏向コイルの出口の端縁磁界により偏向方向に垂直な方向に偏向集束作用が付加され、この作用のほうが、偏向方向に起こる作用より一般には強い。

偏向器のフィールドラインの方向に対してビームが偏向を受ける方向は、電界偏向では一致し、磁界偏向では垂直となることは周知であるが、管軸方向に磁界があって、偏向場に重畳している場合にはこれが逆転する。

図5 偏向系の構成

図5に示すように、偏向については電界偏向の場合、

$$h = (E_d \cdot l \cdot L) / (2 \cdot E_b \cdot d) \quad (5)$$

磁界偏向の場合、偏向角 θ が小さければ、単位を volt, gauss, cm で表わすと、

$$h = \frac{BlL}{3.372\sqrt{E_b}} \quad (6)$$

となり、ビーム電圧 E_b の高い場合に磁界偏向が有利である。 h/E_d および h/B を偏向感度といい、これらの逆数を偏向率という。

(6)式は近似式で、正確には、

$$\sin \theta = \frac{Bl}{3.372\sqrt{E_b}} \quad (7)$$

となる。磁界 B は偏向コイルに流れる電流 I に比例するから、偏向電流 I と $\sin \theta$ とが比例することになる。そこで偏向量 h は実は偏向角 θ の正切に比例して、

$$h = L \cdot \tan \theta = L \cdot \sin \theta / \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = k_1 I + k_2 I^3 + \dots \quad (8)$$

ここに、 k_1, k_2 は定数。偏向中心の移動は L に対して無視してある。このようにターゲットが平面の場合、偏向量は偏向電流に比例する成分の他に三乗の項以上が含まれ、一般に水平・垂直偏向をした場合、ピンクッションの偏向ひずみを生ずる⁵⁾。

一般の受像管の場合、フェースプレートは平面ではないが、平面に近く、斉一な偏向磁界で偏向してもピンクッションぎみのラスタとなる。しかし斉一磁界が規準となり、ピンクッション磁界かパレル磁界かによって、一般に図6のようなラスタひずみとなる。斉一磁界を得るための偏向コイルの巻線分布は、コサイン巻きであ

図6 ラスタひずみ、スポットひずみと偏向磁界

る。しかし実際のコイルでは内部の磁界が斉一であっても入口、出口の磁界はバレルになりやすい。入口ではビームが偏向されていないのでラスタースポットのひずみへの影響は少ないが、出口ではその作用が無視できない。その結果、磁界は全体としてバレルに、ラスタースポットはよりピンクッションになる。

コイルの巻線分布を内部と出口部分とで変えて内部をバレル、出口をピンクッションとし、ラスタースポットの補正し、スポットの非点収差も軽減させることは原理的に可能である。周辺でスポットはデフォーカスとなるがダイナミックフォーカスで真円にしよう。偏向による非点収差を除いたコイルは、記録管など高性能受像管用として開発された⁶⁾。

6. コンバーゼンスとレジストレーション

シャドウマスク等を用いる3電子銃カラー受像管のコンバーゼンス、それもダイナミックコンバーゼンスは、3本のビームのスクリーン中心でのコンバーゼンス(スタティックコンバーゼンス)が確保された場合の周辺での偏向デフォーカシングを動的に補正することである。偏向角の増加とともに偏向中心は前進し、またダイナミックコンバーゼンスのために周辺へ移動するが、これらに対してはシャドウマスクの孔を利用して、3色ドット螢光面を露光によって作るときの補正レンズによって、あらかじめ位置の補正ができています。

一般に偏向デフォーカシングは偏向コイルのみでは零にできないので、スクリーン周辺でダイナミックに補正しやすい形にずれるような設計とする。実際には簡単なダイナミックコンバーゼンスで補正できない横方向のずれや、コーナーエッジのクロスタームを減らす設計が偏向コイルに対して必要で、結果として水平コイルに対しては斉一に近い弱いバレル、垂直コイルに対しては弱いピンクッション磁界とする⁶⁾。ラスタースポットはピンクッションになりやすいが、これは別に回路補正などをする。

このようにして、ラスタースポット中心を通る水平・垂直軸上の調整のみで、四隅は自動的に合うような偏向コイルが得られるが、最近、広角偏向化に伴って補正量が増大し四隅での条件がきびしくなり、これを補正する方法があまり出されていない⁷⁾。

1列電子銃配列(インラインガン)では、水平偏向コイルをかなりピンクッション、垂直偏向コイルをかなりバレルの磁界にすると、偏向デフォーカシングの第1次誤差を零にできる。実際は第2次項以下があるので周辺でのダイナミックコンバーゼンスは必要だが、少量ですむ⁶⁾。

カラーカメラで撮像管を複数本用いた場合のレジストレーションは、コンバーゼンスの問題とは異質であり、たとえば3管式カラーカメラで、同一種類の撮像管を3本用いる場合、3チャンネルともまったく同一のものであれば満足されることになる。したがって、管、コイルアセンブリー、各チャンネルの光学系および回路が、精度的に厳重に押えられることが第一である。しかし、現実には限度があり、必要かつ充分な線を出すことが重要である。

管の寸法精度は、レジストレーションのために特別に制御されねばならないし、とくに、コイルアセンブリーでは、偏向コイルの精度にまだ向上の余地が残されている⁸⁾。

7. む す び

各項の特色を出すために、詳細な記述をさけた。したがって、いささか論じたりない感があるが、引続く各論に詳細は譲ることとしたい。本稿について種々の意見をいただいた NHK 総合技研 大石 巖、小楠千早両主任研究員に謝意を表して筆を置く。(昭和46年7月10日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) M. Knoll and B. Kazan: Storage Tubes and Their Basic Principles, John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 5.
- 2) B. Kazan and M. Knoll: Electron Image Storage, Academic Press., p. 18
- 3) テレビジョン工学ハンドブック, p. 139
- 4) J. R. Leaman: Electron Optics of Vidicon, Information Display, Feb., (1970) 13-20
- 5) Cathode Ray Tube Display, MIT Radiation Lab. Series, p. 339
- 6) 別所, 大石: 偏向磁界設計上の諸問題, テレビ誌, 20, 5 (1966) 316-317
- 7) Die Realisierung der 110°-Ablenkung bei der Lockmasken Farbbildröhre, RADIOSCHAU, Heft 7 (1967)
- 8) 高橋, 山下, 小林: 拡大ターゲット形イメージオルシコンの3IOカラーカメラへの適用, NHK技研月報, 13 (1970) 432-437