



# 視覚特性を考慮したカラーディスプレイモニターの設計・評価に関する研究

白松, 直樹

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-03-31

(Date of Publication)

2009-03-05

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2368

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002368>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

## 視覚特性を考慮したカラーディスプレイ モニターの設計・評価に関する研究

平成13年2月

神戸大学大学院自然科学研究科

白松 直樹

# 内容梗概

本論文は、陰極線管（Cathode Ray Tube：CRT）を用いたディスプレイモニターの表示性能を向上させるために必要な、設計および評価技術に関する研究成果をまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。本研究の対象であるディスプレイモニターは、コンピュータの表示端末として文字やグラフィック、自然画を中心とした静止画や動画を表示するための機器であり、現状では CRT と LCD（Liquid Crystal Display：LCD）が使用されている。LCD は最近の技術的進歩により近年急速に普及したが、20 インチ以上の大型機のクラスでは依然として CRT とのコスト差が大きく、普及には至っていない。CRT は LCD と比較して、材料・製造コストが安価であること、色再現性や時間応答性などの表示性能に優れること、電子ビームの走査による表示方式のため表示画素数の切り替えを画質の劣化が無く行えることなどの特徴を有する。しかしながらその一方で、モアレ、ミスコンバーゼンス（色ずれ）、文字の欠けなど、シャドウマスクやアパーチャグリルなどの色選別構造によるカラー表示の原理に起因する欠点を有する。ディスプレイモニターの高精細化が進む中で、これらの欠点はより顕著になる方向にある。

第2章以降では以上の背景を踏まえ、CRT の色選別構造によるカラー表示の原理上不可避な問題であるモアレの評価手法と、CRT の分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法について提案している。さらに、色選別構造から生じる画質劣化を解消するための表示方式について提案している。

第2章では視認性判定と画像シミュレーションによるラスタモアレの評価手法について論じている。電子ビーム分布とマスク開口分布の1次元モデルからラスタモアレのコントラストと周期を計算し、計算結果について主観評価実験による知見をもとに視認性（Visible or Invisible）を判定するとともに、モデル式と実測データから画像シミュレーションを行う手法を提案している。これにより、電子ビーム分布やマスク開口分布がラスタモアレの視認性に与える影響を、モデル計算と画像シミュレーションによって評価することができることを示している。

第3章では、逆相ラストモアレと呼ばれる第2章で述べた手法によって取り扱えない構造を持つラストモアレについて、電子ビームやマスク開口の分布がその視認性に及ぼす影響について論じている。電子ビーム分布とマスク上に形成された開口の2次元分布モデルによって画面上の輝度分布を計算し、これを視覚系のコントラスト感度の空間周波数特性関数によって重み付け、逆相ラストモアレの知覚強度のモデル式を構築している。そして、知覚強度に対する電子ビームとマスク開口の分布の影響を調べるとともに、シミュレーション画像による主観評価実験を行うことにより計算結果を実験的に確認している。その結果として、ラストモアレについて従来考慮されていなかった水平方向のパラメータに対して知覚強度が変化することを示している。

第4章では、CRTの分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法について論じている。まず、目視と同等の感度とダイナミックレンジを実現するために、ICCDカメラを用いた二段階感度による撮像法を提案している。その結果、カソード電流が極めて微弱な電流域から最高輝度に対応した大電流域に至るまでの広い電流範囲において電子ビームスポット輝度分布の測定が可能となったことを示している。さらに、従来の画像処理方法によるスポット形状の再構成においてジッターノイズに起因した測定結果のばらつきが生じる問題に対し、シフト量の誤差を補償した再構成アルゴリズムを提案し、繰り返し測定の再現性が向上することを示している。

第5章では、モアレや色ずれ、色純度劣化など従来のCRTが持つ色選別構造に起因する画質劣化を解消するための方式として、フィールド順次式カラー表示によるマスクレスCRTについて論じている。ここでは、強誘電性高分子液晶による液晶カラーシャッターを用いたフィールド順次式CRTにより、大画面超高精細ディスプレイが実現可能であることを示している。液晶カラーシャッターの電気光学効果をモデル化し、これに視覚特性による色知覚の評価式を組み合わせ、色再現性や透過率などの基本的な表示特性をシミュレーションによって評価する手法について述べている。さらに、インライン式電子銃による3ビーム同時走査方式におけるビーム輝度分布ばらつきの平均化手法を提案している。その結果として、従来のCRTと同等の色再現性と輝度を保ちつつ、従来比5倍以上のコントラスト比が得られ、モアレの発生や三原色の色ずれ、色純度の劣化などを解消したマスクレスCRTが実現可能であることを示している。

第6章では、本研究で得られた成果について総括している。



# 目次

## 第1章 序論

- 1. 1 研究の背景と目的 1
- 1. 2 本論文の構成 6

## 第2章 視認性判定と画像シミュレーションによる CRT ラスタモアレの評価手法

- 2. 1 序言 8
- 2. 2 ラスタモアレの数学的表現 9
- 2. 3 ラスタモアレ評価の従来手法 13
- 2. 4 提案手法 15
- 2. 5 本手法による評価例 22
- 2. 6 結言 27

## 第3章 逆相ラスタモアレの視認性

- 3. 1 序言 28
- 3. 2 逆相ラスタモアレの構造 29
- 3. 3 逆相ラスタモアレの知覚強度 31
- 3. 4 シミュレーション画像による主観評価実験 43
- 3. 5 結言 48

## 第4章 電子ビームスポット輝度分布測定法の高精度化

- 4. 1 序言 49
- 4. 2 電子ビームスポット輝度分布の光学的な特徴 51
- 4. 3 感度・ダイナミックレンジの向上 52

|  |     |
|--|-----|
| 4. 4 電子ビームスポット輝度分布の再構成法                      | 58  |
| 4. 5 結言                                      | 64  |
| <b>第5章 液晶カラーシャッターを応用したマスクレス<br/>超高精細 CRT</b> |     |
| 5. 1 序言                                      | 65  |
| 5. 2 フィールド順次式カラー表示の原理                        | 67  |
| 5. 3 強誘電性液晶パネルの光学特性                          | 69  |
| 5. 4 液晶カラーシャッターの設計                           | 72  |
| 5. 5 モノクロ CRT の電子ビーム走査方式                     | 82  |
| 5. 6 プロトタイプによる検証                             | 85  |
| 5. 7 結言                                      | 88  |
| <b>第6章 結論</b>                                | 89  |
| <b>参考文献</b>                                  | 93  |
| <b>著者発表論文リスト</b>                             | 100 |
| <b>謝辞</b>                                    | 105 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景と目的

本論文は、陰極線管 (Cathode Ray Tube : CRT) を用いたディスプレイモニターの表示性能を向上させるために必要な、設計および評価技術に関する研究成果をまとめたものである。

ディスプレイはその用途が多様化し、個人の生活や社会のあらゆる局面において、画像情報によるコミュニケーションを行うための機器やシステムに用いられるようになった。家庭におけるテレビ、ゲーム機器、オフィスにおけるプレゼンテーション機器、家庭とオフィス両方で普及の進むパーソナルコンピュータ、公共施設や工業設備における大型表示装置、あるいは最近急速に台数の伸びを示している携帯電話など、我々は常にディスプレイと接しているといっても過言ではない。

これまでに様々なディスプレイが発明され、現在も新しいディスプレイを生み出すための研究が盛んに行われている。それらは、デバイス構造、駆動方式、光学方式などにより分類することができる[1]。デバイス構造においては、自らが発光する発光型と光源光を変調する非発光型に分類され、前者には CRT、PDP (Plasma Display Panel)、EL (Electro Luminescence) ディスプレイ、LED (Light Emitting Diode)、FED (Field Emission Display) などが、後者には液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display : LCD)、ECD (Electro Chromic Display) などが属する。駆動方式においては、ビーム駆動式と電極駆動式に分類され、上の例では CRT が前者に属し、それ以外はマトリクス電極駆動によって表示を行う。光学方式においては、直視型、投射型、空間像型に分類される。直視型はデバイス上に形成された画像を直接観視するもので、上の例はすべてがこれに属する。投射型はデバイス上に形成された画像を光学系によってスクリーンに拡大投影する方法であり、CRT や LCD などの直視型のデバイスや、DMD (Digital Micro-mirror Device) など MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術に

よる反射型空間光変調デバイスが使用される。また、空間像型はデバイス上やスクリーン上ではなく、空間に形成された画像を観視する方法で、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) やホログラフィディスプレイなどがこれに属する。

以上に述べたように多くの種類のディスプレイが存在するが、用途、使用環境、要求される性能に応じた方式がそれらの中から選択されている。本研究の対象であるディスプレイモニターはコンピュータの出力画面を表示する機器であり、これまでの文字やグラフィックの表示に加えて、ソフトウェアのマルチメディア化に伴い自然画を中心とした静止画や動画が表示されるようになった。画素数は VGA (水平 640 ドット×垂直 480 ドット) から UXGA (水平 1600 ドット×垂直 1200 ドット) が、画面サイズは 14 インチ程度から 22 インチ程度が必要とされ、現在では CRT と LCD が使用されている。

14、15 インチの中型機クラスでは、LCD が部材や製造コストの低下や、技術的ブレークスルーによる狭視野角や応答の遅さなどの欠点の克服により、近年急速に普及した。しかしながら、20 インチ以上の大型機クラスでは依然として CRT とのコスト差が大きく、普及には至っていない。

CRT は LCD と比較して、材料・製造コストが安価であること、色再現性や時間応答性などの表示性能に優れること、ビーム駆動式による表示のため表示画素数の切り替えを画質の劣化がなく行えることなどの特徴を有する。その一方で、シャドウマスクやアパーチャグリルなどの色選別構造によるカラー表示の原理に起因したモアレ、ミスコンバーゼンス (色ずれ)、文字の欠けなどの表示性能上の問題を有する。ディスプレイモニターにさらなる高精細化が要求される中で、これらの問題はより顕著となる方向にあり、これらを解決するための技術開発の意義は大きい。

モアレは、電子ビームがシャドウマスクやアパーチャグリル (以下ではこれらを総称してマスクと呼ぶ) などの色選別構造の開口を通過し蛍光面に照射されて画像が形成される際に、電子ビームの分布が持つ周期性と開口の分布が持つ周期性の差によって生じる低周波の輝度変化である[2]。モアレの低減は、CRT のマスクや電子銃の設計における重要な課題としてこれまでに研究されてきた。そのメカニズムは Robbinsら[3]の 1 次元モデルによる定式化や Iwamoto[4]による 2 次元フーリエ光学系による再現などによって明らかにされた。また、Wittke[5]はマスクの開口分布や電子ビーム

の分布がモアレの周期や強度に影響することを示した。また、Myodo ら[6]は空間および周波数領域でのパラメータ計算法を提案し、Chen ら[7]はこれを高速で実行する計算ツールを開発した。

モアレの発生は CRT の表示原理上不可避の現象であり、発生したモアレを知覚レベル以下に抑制することが CRT の設計における目標である。Myodo ら[8]によるラスタモアレに関する検討を始めとし、これまでにその視認性に関する地道な研究が続けられてきた。ラスタモアレは水平方向の縞状のノイズとして知覚されるが、Myodo らは実機およびシミュレーション画像を使用した主観評価実験によって、ラスタモアレが知覚される周期とコントラストを明らかにした。

また、ラスタモアレには微視的な 2次元の特徴を有する逆相ラスタモアレと呼ばれる種類が存在することが山口ら[9]、Tanigawa ら[10]によって報告された。逆相ラスタモアレは従来の単純な明暗のパターンとしては評価ができず、蛍光体ドットの平均自乗誤差 (MSE コントラスト) [11,12]やガウス関数重み付け法[13,14]による定量化が提案されている。さらに、Sawahata ら[15]はビデオモアレについてもラスタモアレと同様に逆相型が存在することを報告した。

電子ビームの分布はモアレの視認性に影響すると同時に、ディスプレイモニターの分解能を決定する因子である[16,17]。電子ビームスポット分布は分解能の指標である MTF (Modulation Transfer Function) とフーリエ変換の関係にあり[18]、その分布径の目標値は分解能 (表示可能なドット数) の目標値から MTF を介して決定される[19,20]。また、CRT の MTF と視覚の空間周波数特性を組み合わせた分解能評価関数として、MTFA (Modulation Transfer Function Area) [21]や SQRI (Square-root Integral) [22-26]などが提案され、CRT の分解能が視覚特性とトータルで議論されている。しかしながら、電子ビームスポットはガウス分布やその他の関数で近似された形状として議論され、実測データに関する評価例がない。この理由として電子ビームスポットを精度良く測定する技術が確立されていないことがあげられる。

これまでに電子ビームスポットの評価手段として、画像処理を応用した輝度分布の測定手法が検討されてきた。これらは、マスクによってサンプルされた像から全体の形状を得るための手段において、(1) 補間処理による方法、(2) 電子ビームを移動させて全体像を観察する方法、(3) これらを組み合わせた方法に分類される。(1) には

Austin ら[27]、Veron ら[28]、Atwood[29]などの報告があるが、測定が容易である反面、細かな形状の再現には限界がある。(2)には Baur[30]、Bortfeld ら[31]の、(3)には浅野ら[32]、Bukal ら[33]の報告があるが、ジッターによる電子ビームスポットの揺らぎに起因する測定ばらつきの低減や、目視による観察と同等の感度とダイナミックレンジの実現が解決すべき課題として残されている。

ディスプレイモニターはパーソナルコンピュータの出力機器としての用途を中心に普及したが、新たな用途を想定してさらなる高精細化が要求されている。写真や絵画をデジタルデータとして保存・表示するデジタルアーカイブや、画像の電子データ化が進行している医療システムにおいて、水平画素数が 2000 ドット以上、画面サイズ 20 インチ以上の超高精細ディスプレイの実現に対する要求が強い[34]。しかし現状の CRT の構造のままでは、超高解像度化に伴ってモアレ、ミスコンバーゼンス(色ずれ)、文字の欠けなどの色選別構造による表示原理に起因する欠点が顕著となる。超高精細ディスプレイに対するアプローチとして、現行  $210\mu\text{m}$  のアパーチャグリルピッチを  $110\mu\text{m}$  に微細化した例も報告されたが[35]、色選別構造による欠点は本質的に解消されない。

色選別構造を使用しない CRT のカラー表示方式としては、ビームインデックス方式[36]やフィールド順次方式[37]などが知られている。しかし、いずれも大型の超高精細ディスプレイに適用されるまでには至らなかった。この理由として、前者においては、NTSC 以上の映像信号の周波数で走査・変調された電子ビームをインデックス信号により 20 インチ以上の画面上に精度良く位置決めすることの技術的な困難さを、後者においては、20 インチ以上の画面サイズで色フィールドの高速切り替えを行うことができるデバイスが存在しなかったことを挙げる事ができる。

本論文は、以上に述べた背景を踏まえ、CRT の色選別構造によるカラー表示の原理上不可避な問題であるモアレの評価手法と、CRT の分解能評価の基礎となる電子ビームスポットの測定手法について提案する。さらに、色選別構造から生じる画質劣化を解消するための表示方式について提案する。すなわち、本論文は、

- (1) 電子ビーム分布とマスク開口分布からラスタモアレの特性を計算し、人間の視覚特性に関する知見をもとにした視認性判定を行う評価手法の提案

- (2) 逆相ラスタモアレと呼ばれる(1)では取り扱えないモードのモアレの知覚強度のふるまいに関するモデル計算と主観評価実験による検証
- (3) 目視観察と同等の感度とダイナミックレンジを実現し、測定ばらつきの少ない電子ビームスポット分布の測定手法の提案
- (4) 色再現性や輝度などの表示特性を指標としたマスクレス CRT の設計とプロトタイプによる検証

についての研究成果をまとめたものである。

## 1.2 本論文の構成

本論文は6章から構成される。第1章の序論に続いて、第2章では視認性判定と画像シミュレーションによるラスタモアレの評価手法について論じる[38,39]。電子ビーム分布とマスク開口分布の1次元モデルからラスタモアレのコントラストと周期を計算し、計算結果についてMyodoら[8]の実験結果をもとに視認性 (Visible or Invisible) を判定するとともに、モデル式と実測データから画像シミュレーションを行う手法を提案する。これにより、電子ビーム分布やマスク開口分布がラスタモアレの視認性に与える影響を、モデル計算と画像シミュレーションによって評価することができることを示す。

第3章では、逆相ラスタモアレと呼ばれる第2章で述べた手法によって取り扱えない構造を持つラスタモアレについて、電子ビームやマスク開口の分布がその視認性に及ぼす影響について論じる[40,41]。電子ビーム分布とマスク上に形成された開口の2次元分布モデルによって画面上の輝度分布を計算し、これを視覚系のコントラスト感度の空間周波数特性関数によって重み付け、逆相ラスタモアレの知覚強度のモデル式を構築する。そして、知覚強度に対する電子ビームとマスク開口の分布の影響を調べるとともに、シミュレーション画像による主観評価実験を行うことにより計算結果を実験的に確認する。その結果として、ラスタモアレについて従来考慮されていなかった水平方向のパラメータに対して知覚強度が変化することを示す。

第4章では、CRTの分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法について論じる[42]。まず、目視と同等の感度とダイナミックレンジを実現するために、ICCDカメラを用いた二段階感度による撮像法を提案する。その結果、カソード電流が極めて微弱な電流域から最高輝度に対応した大電流域に至るまでの広い電流範囲において電子ビームスポット輝度分布の測定が可能となることを示す。さらに、従来の画像処理方法によるスポット形状の再構成においてジッターノイズに起因した測定結果のばらつきが生じる問題に対し、シフト量の誤差を補償した再構成アルゴリズムを提案し、繰り返し測定の再現性が向上することを示す。



第5章では、モアレや色ずれ、色純度劣化など従来のCRTが持つ色選別構造に起因する画質劣化を解消するための方式として、フィールド順次式カラー表示によるマスクレスCRTについて論じる[43,44]。ここでは、強誘電性高分子液晶パネルによる液晶カラーシャッターを用いたフィールド順次式CRTにより、大画面超高精細ディスプレイが実現可能であることを示す。そのために、液晶カラーシャッターの電気光学効果をモデル化し、これに視覚特性による色知覚の評価式を組み合わせ、色再現性や透過率などの基本的な表示特性をシミュレーションによって評価する手法について述べる。さらに、インライン式電子銃による3ビーム同時走査方式におけるビーム輝度ばらつきの平均化手法を提案する。その結果として、従来のCRTと同等の色再現性と輝度を保ちつつ、従来比5倍以上のコントラスト比が得られ、モアレの発生や三原色の色ずれ、色純度の劣化などを解消したマスクレスCRTが実現可能であることを示す。

第6章では、本研究で得られた成果について総括する。

## 第 2 章

# 視認性判定と画像シミュレーション

## による CRT ラスタモアレの評価手法

### 2.1 序言

モアレは、マスクの開口を通過した電子ビームが蛍光面に照射されて画像を形成する際に、走査された電子ビームの分布が持つ周期性とマスク開口の分布が持つ周期性との差によって生じる低周波の輝度変化である[2]。電子ビーム分布の周期性が走査線配列の規則性に起因するラスタモアレと、表示される画像の周期性に起因するビデオモアレに分類される。ラスタモアレは垂直方向の、ビデオモアレは表示される画像が周期性を示す方向の、数ミリから数十ミリ周期の縞状のノイズとして知覚される。

ラスタモアレのコントラストや周期は、電子ビームスポットのプロファイルや走査線間隔、マスク開口の形状・周期などによって変化する。例えば Yamauchi ら[45,46] は、電子銃のカソード表面の平坦性が電子ビームの分布に影響し、平坦度を上げることによってラスタモアレのコントラストを低減できることを示した。また、マスク開口の設計においても、ラスタモアレの低減を指針とした検討が行われている[19,47]。

本章では、視認性判定と画像シミュレーションによるラスタモアレの評価手法について論じる[38,39]。電子ビーム分布とマスク開口分布の 1 次元モデルからラスタモアレのコントラストと周期を計算し、計算結果について Myodo ら[8]の実験結果をもとに視認性 (Visible or Invisible) を判定するとともに、モデル式と実測データから画像シミュレーションを行う手法を提案する。これにより、電子ビーム分布やマスク開口分布がラスタモアレの視認性に与える影響を、モデル計算と画像シミュレーションによって評価することができることを示す。

## 2.2 ラスタモアレの数学的表現

まず、本節では、電子ビームによる走査線列とマスクの開口分布の重ね合わせからラスタモアレが発生する過程を数学的に表現し、ラスタモアレの特性を定式化する。

### 2.2.1 ラスタの輝度分布

今、電子ビームスポット分布を  $B(x,y)$  とする。ただし、 $x$ 、 $y$  は水平および垂直方向の座標である。 $B(x,y)$  はカソードから放出された電子が電子銃の電極部で集束・加速されて生成される電子ビームの密度分布に対応する。電子ビームは偏向ヨークによって形成される磁界により、図 2.1 に示すように画面上を走査線間隔  $P_r$  で走査される。点線は帰線消去期間に対応し、電子ビームの強度は 0 となる。本章ではラスタモアレについて議論するので、輝度が均一の画面を想定し、 $B(x,y)$  は映像信号による振幅変調は受けないものとする。

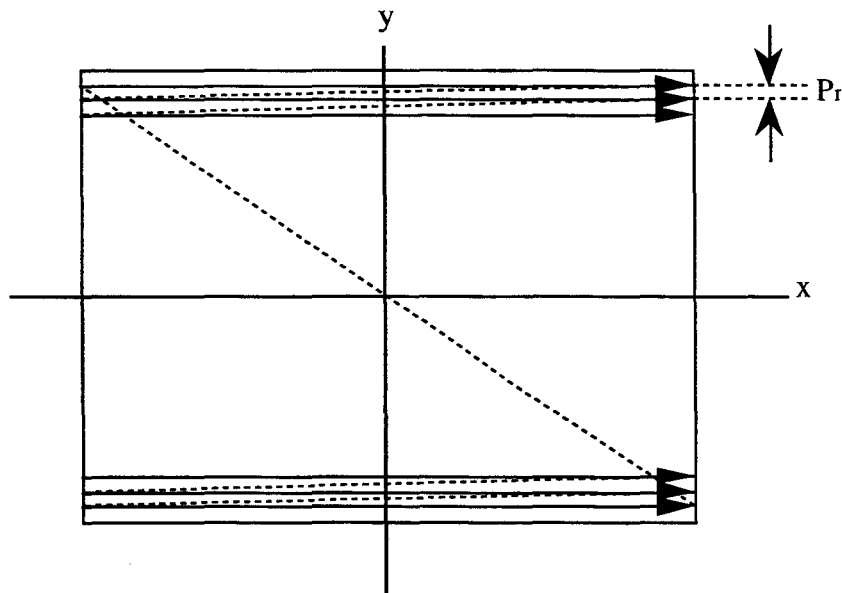


Fig. 2.1 Raster formation by electron beam scanning.

以下では垂直座標  $y$  による一次元空間で議論することとし、電子ビームスポット分布を  $B(y)$  とする。すなわち  $B(y)$  は  $x=0$  における  $B(x,y)$  であり、一本の走査線の断面に相当する。走査された電子ビームの分布を  $R(y)$  とすると、

$$R(y) = B(y) * comb(y) \quad (2.1)$$

で与えられる。ただし、式中の\*は畳み込み操作を表す。comb(y)は y 方向における走査位置を表し、

$$comb(y) = \sum_n \delta(y - nP_r) \quad ; n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2)$$

で示される。電子ビームは等間隔に配列したマスクの開口を通過した後、蛍光面に照射されて発光する。ここでマスク開口の分布 A(y)を透過率で表し、

$$\begin{aligned} A(y) &= 1 && ; nP_a - \frac{P_w}{2} \leq y \leq nP_a + \frac{P_w}{2}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ &= 0 && ; otherwise \end{aligned} \quad (2.3)$$

とする。すなわち、その値は開口部では1、その他の位置では0となる。ただし、 $P_w$ 、 $P_a$ は開口部の幅と配列の周期である。ここでは、電子ビームがマスクの開口を通過する際に生じる散乱などの現象は考慮しない理想状態を仮定している。画面上で観察されるラスタの輝度分布 L(y)は、

$$L(y) = R(y) A(y) \quad (2.4)$$

で与えられる。ここでは、マスクと蛍光面は近接しているので、電子ビームのマスクによる回折の影響は無視できると仮定している。また、蛍光面に照射された電子ビーム分布に対する発光分布の拡がりは無視している。以上に述べた B(y)、R(y)、A(y)、L(y)の関係を図 2.2 に示す。

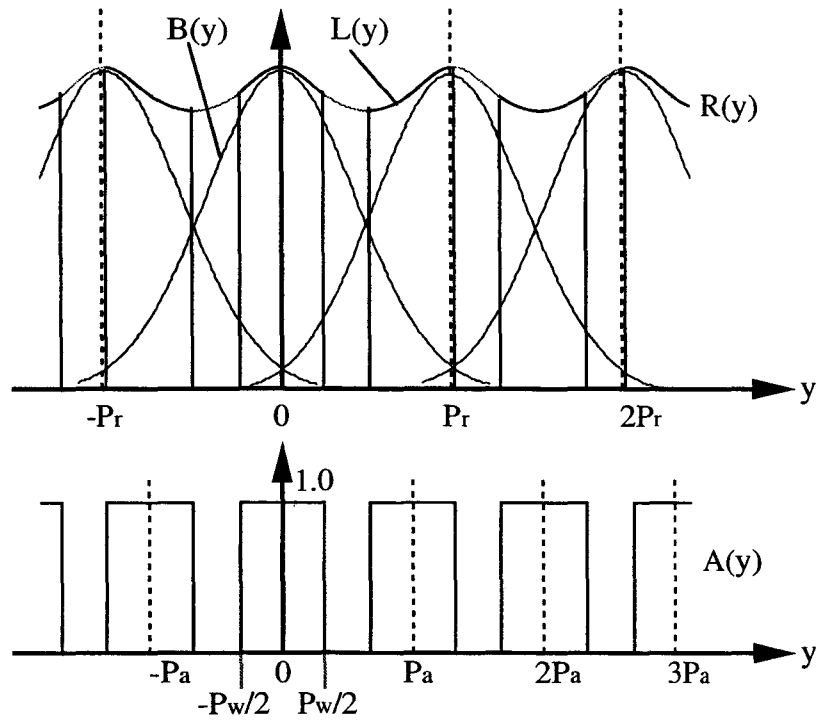


Fig. 2.2 Relation between the distribution of a single electron beam spot :  $B(y)$ , the luminance distribution of the raster :  $R(y)$ , the distribution of the mask apertures:  $A(y)$  and the luminance distribution observed on the CRT surface :  $L(y)$  . Vertically repeated arrangement of  $B(y)$  at an interval of  $P_r$  is sampled by shadow mask apertures  $A(y)$ .

## 2.2.2 ラスタモアレの発生メカニズム

$R(y)$ は周期  $P_r$  の周期関数であり、 $A(y)$ は周期  $P_a$  の周期関数であるので、それぞれ式 (2.5a)、(2.5b)で示すようにフーリエ級数に展開することができる。 $R(y)$ 、 $A(y)$ は偶関数であるので、 $\cos$  関数によって展開される。

$$R(y) = \sum_m R_m \cos \left( 2\pi \frac{m}{P_r} y \right) \quad (2.5a)$$

$$A(y) = \sum_n A_n \cos \left( 2\pi \frac{n}{P_a} y \right) \quad (2.5b)$$

これらを式(2.4)に代入すると、

$$L(y) = \sum_m R_m \cos\left(2\pi \frac{m}{P_r} y\right) \cdot \sum_n A_n \cos\left(2\pi \frac{n}{P_a} y\right) \quad (2.6)$$

を得る。式(2.6)は次のように書き換えることができる。

$$L(y) = \sum_m \sum_n \frac{R_m A_n}{2} \cos\left\{2\pi \left(\frac{m}{P_r} + \frac{n}{P_a}\right) y\right\} + \sum_m \sum_n \frac{R_m A_n}{2} \cos\left\{2\pi \left(\frac{m}{P_r} - \frac{n}{P_a}\right) y\right\} \quad (2.7)$$

すなわち、式(2.4)で表される輝度分布は、式(2.5a)と式(2.5b)によって表される基本波および高調波による周波数成分相互の和と差の周波数成分を持つ。視覚系の空間周波数特性は低域通過型を示すので、式(2.7)において周期が短い第1項は知覚されないが、周期の長い第2項は低周波の輝度変化として知覚される。

### 2.2.3 ラスタモアレの周期・コントラスト

式(2.5a)における第  $m$  高調波成分と式(2.5b)における第  $n$  高調波成分の積によって生じるモアレを次数( $m,n$ )のモアレと呼び、その周期  $P_{mn}$  は

$$P_{mn} = \left| \frac{m}{P_r} - \frac{n}{P_a} \right|^{-1} \quad (2.8)$$

で与えられる。また、コントラスト  $M_{mn}$  は

$$M_{mn} = \frac{R_m A_n}{2} \quad (2.9)$$

で与えられる。

## 2.3 ラスタモアレ評価の従来手法

本節では、従来の CRT の設計におけるラスタモアレの評価手法について述べる。これまでラスタモアレは、マスクの垂直方向の開口周期を決定することを主な目的として評価されてきた[19,47]。そこでは、マスクの開口周期に対するラスタモアレの周期のふるまいが注目される。従来の方法を説明するために、マスクの垂直方向の開口周期  $P_a$  とラスタモアレの周期  $P_{mn}$  の関係を図 2.3 に示す。ここで走査線間隔  $P_r$  は 0.48mm とした。図においては、次数(1,1)、(1,2)、(2,1)、(2,3)のラスタモアレの周期が描かれている。

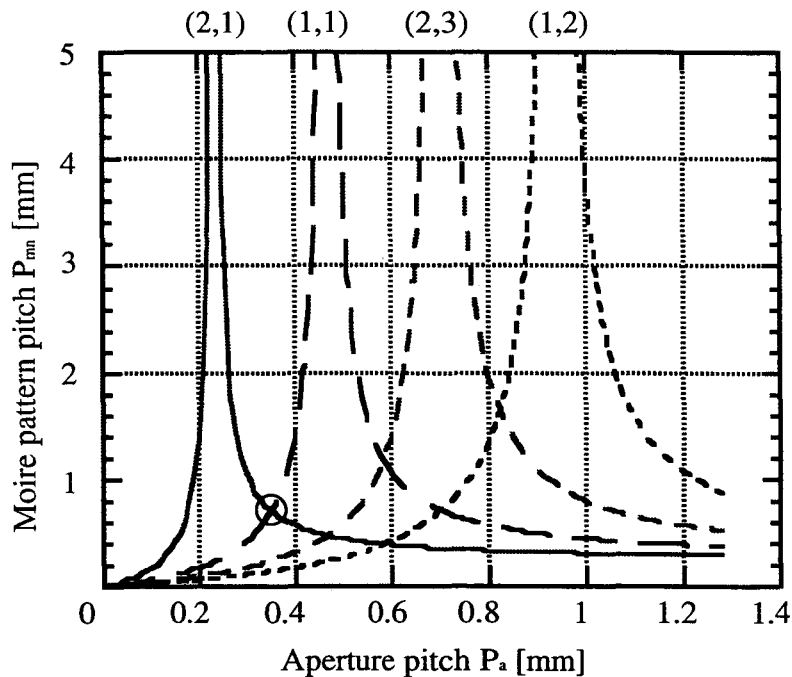


Fig. 2.3 Relation between aperture pitch  $P_a$  and moire pattern pitch  $P_{mn}$ . Scan line pitch  $P_r$ : 0.48mm. Each line corresponds to different modes of moire pattern. When the relation between  $P_a$  and  $P_r$  is integral multiple of each other,  $P_{mn}$  becomes infinite.

ここで、次数(1,1)と次数(2,1)のモアレが経験的に目立つと知られている場合、両者の周期が同時に短くなる条件を求める。すなわち、それぞれの周期を表す曲線の交点を求め、その時の  $P_a$  (この図では○印で表示した交点に対応する  $P_a = 0.32\text{mm}$ ) がマスクの垂直方向の開口周期として決定される。ところがこの方法は、以下の問題点を

有する。

- ・どの次数のモアレが目立つかの知識が必要なこと
- ・モアレのコントラストが定量化されていないこと
- ・電子ビーム分布やマスク開口幅の影響が評価できないこと



## 2.4 提案手法

### 2.4.1 評価の流れ

前節で述べた従来手法の問題点を解決するために、次に示す項目を考慮した評価手法を提案する。

- ・モアレの周期とコントラストを同時に評価できること
- ・電子ビーム分布の影響を定量的に扱えること
- ・人間の視覚系でモアレを観視した時の視認性が判定できること

本手法は以下のステップで評価を行う。

- [ステップ 1] 電子ビームの分布  $B(y)$  を測定する。
- [ステップ 2] マスクの開口分布  $A(y)$ 、走査線間隔  $P_r$  を決める。
- [ステップ 3] 各次数のラスタモアレの周期  $P_{mm}$  とコントラスト  $M_{mm}$  を計算する。
- [ステップ 4] 各次数のラスタモアレに対して視覚特性に基づいて視認性を判定する。
- [ステップ 5] 並行してフレームメモリ上で画像シミュレーションを行い、実画像で確認する。

以上に示した評価の流れを図 2.4 に示す。

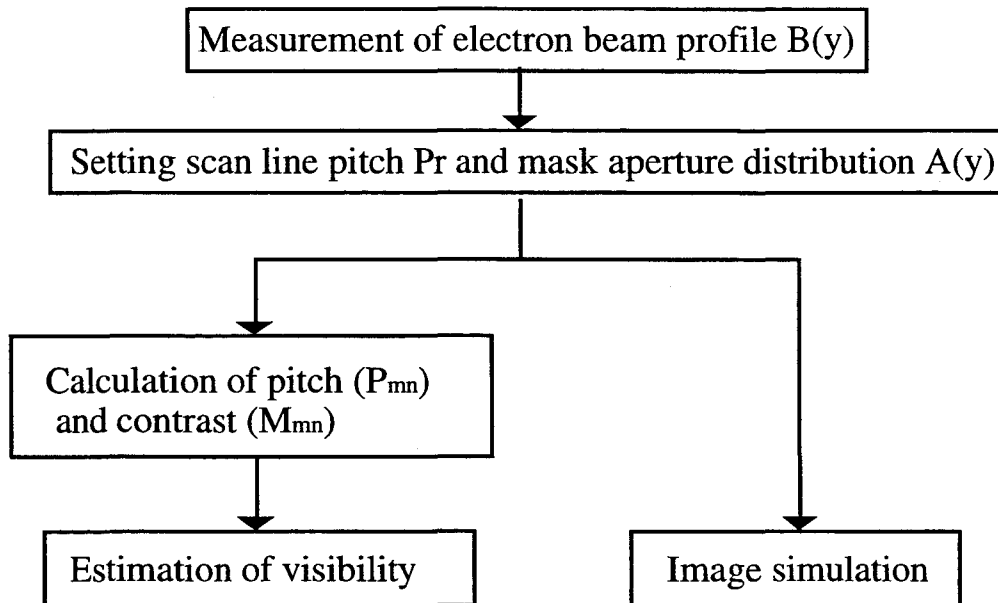


Fig. 2.4 Flow of evaluating moire pattern

## 2.4.2 電子ビーム輝度分布の測定方法

電子ビーム分布の実測データを得るために、走査線の輝度分布を測定する。最も測定が容易な方法は、マスクのない CRT を用いてその輝度分布を測定することであるが、特殊な CRT を製作する必要がある。通常の CRT を使用した測定を可能とするために、画像処理による電子ビーム輝度分布の測定方法がこれまでに検討されてきた。それらは以下のごとく分類することができる。

- (1) マスクによって遮蔽された部分の形状を補間によって推定する方法[27-29]
- (2) 電子ビームの位置をずらせて撮像した画像を組み合わせ、全体の分布を再構成する方法[30,31]
- (3) (1) (2) の方法を組み合わせる方法[32,33]

電子ビーム輝度分布の測定に関する新しい方法については第 4 章で論じるが、通常のマスクは垂直方向の開口率が高いので、走査線の水平方向の断面形状  $B(y)$  は (2) によって測定可能である。具体的には、1 本の走査線を上下に移動させるごとにその輝度分布を撮像し、それらを組み合わせることで分布全体を再構成した。本方法の原理を図

2.5 に示す。

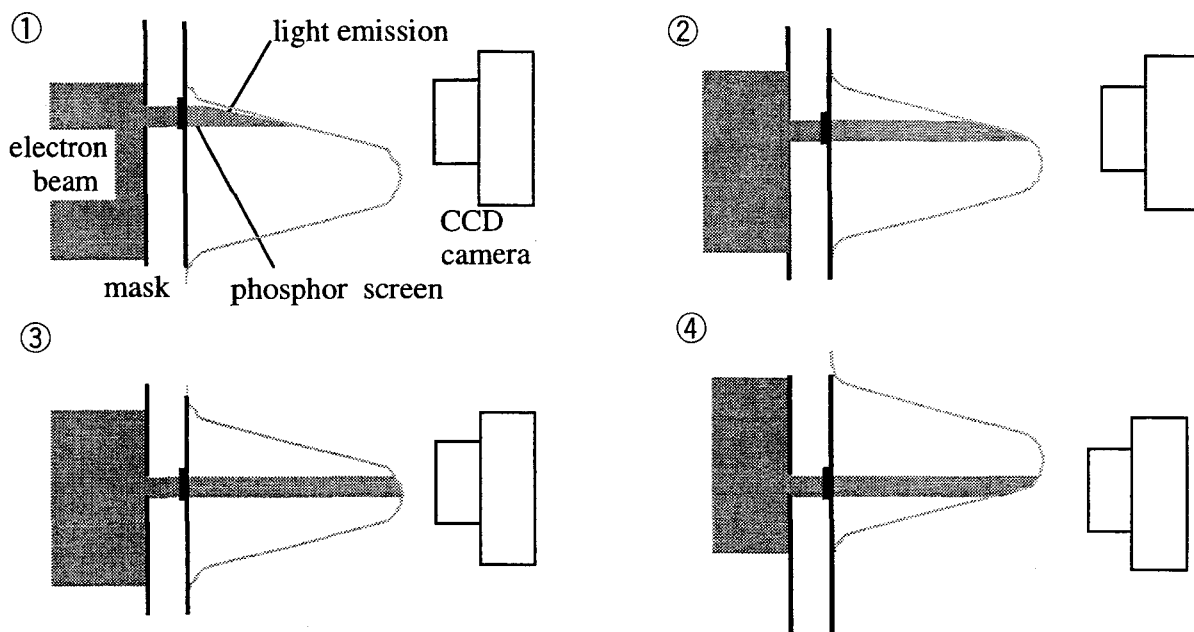


Fig. 2.5 Principle of measuring the electron beam profile. While the electron beam is shifted, the luminance distribution is repeatedly measured using a CCD camera.

1本の走査線をCRTの管面から観察した状態を図2.6に模式的に示す。2.2節における表現との整合を取るために、座標系を図に示すように決める。カメラによって撮像された画像を  $D_i(x,y)$ 、この時の走査線の垂直方向の分布中心を  $y_i$  とする。

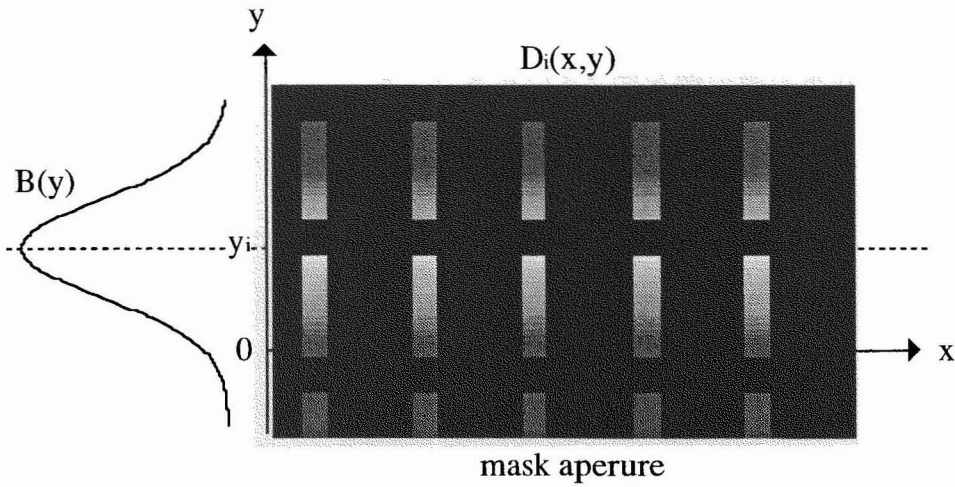


Fig. 2.6 Imaging data  $D_i(x,y)$

$D_i(x,y)$ の水平方向への投影分布  $B_i(y)$ は、

$$B_i(y) = \max_x \{D_i(x,y)\} \quad (2.10)$$

で与えられる。今、走査線位置を  $N$  回移動させて得られた画像を  $D_1(x,y), \dots, D_N(x,y)$  とし、それぞれの走査線の垂直方向の分布中心を  $y_1, \dots, y_N$  とする。それぞれの投影分布  $B_i(y)$  の分布中心を  $y=0$  に揃え、それらの最大値をとった分布を  $B_{\max}(y)$  とし、これを  $B(y)$  の推定値とすると  $B_{\max}(y)$  は、

$$B_{\max}(y) = \max_i \{B_i(y - y_i)\} \quad ; i = 1, \dots, N \quad (2.11)$$

で与えられる。 $y_i$  は、外部から磁界をかける方法や、垂直同期信号のフロントポーチとバックポーチの配分を変化させる方法によって制御することができるが、本研究では後者により  $y_i$  を制御した。走査線位置を移動させるピッチは、

$$|y_i - y_{i-1}| \leq P_w \quad (2.12)$$

に示すように、シャドウマスクの開口幅  $P_w$  よりも小さくすることが必要条件である。これを満たさない場合、再構成後のプロファイルに欠落部分が生じる。この方法による電子ビームの分布の測定例を図 2.7 に示す。

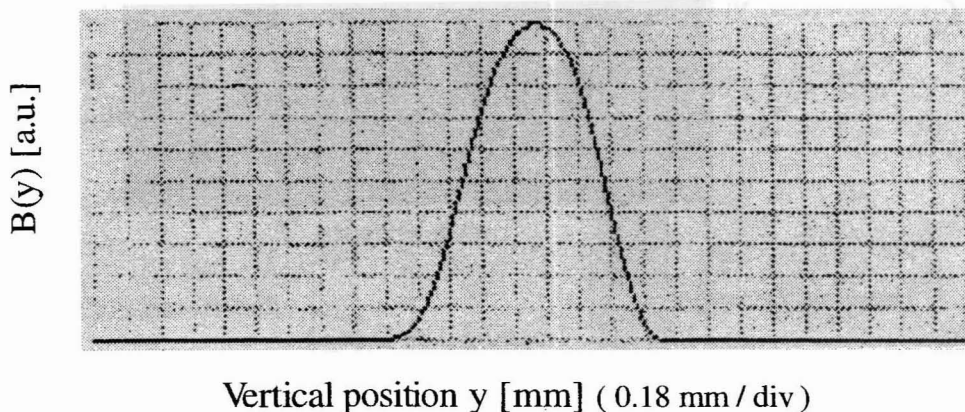


Fig. 2.7 Example of reconstruction results of a shadow mask CRT.

### 2.4.3 ラスタモアレの周期、コントラストの計算

以上に述べた方法により、電子ビームの分布  $B(y)$  を得ることができる。次に、式(2.9)に基づいて次数  $(m,n)$  のラスタモアレのコントラスト  $M_{mn}$  を計算するために、ラスタの輝度分布  $R(y)$  およびマスク開口分布  $A(y)$  のフーリエ係数  $R_m$ 、 $A_n$  をフーリエ変換とフーリエ級数展開の関係を利用して求める。すなわち、 $R(y)$  のフーリエ係数  $R_m$  は、

$$R_m = \int_{-\frac{P_a}{2}}^{\frac{P_a}{2}} R(y) \exp\left(-j \frac{2\pi m}{P_r} y\right) dy = FT\{R\}\left(\frac{2\pi m}{P_r}\right) \quad (2.13)$$

で与えられ、 $A(y)$  のフーリエ係数  $A_n$  は、

$$A_n = \int_{-\frac{P_a}{2}}^{\frac{P_a}{2}} A(y) \exp\left(-j \frac{2\pi n}{P_a} y\right) dy = FT\{A\}\left(\frac{2\pi n}{P_a}\right) \quad (2.14)$$

で与えられる。ただし、 $FT\{R\}$ 、 $FT\{A\}$ は $R(y)$ 、 $A(y)$ のフーリエ変換である。式(2.13)、式(2.14)を式(2.9)に代入すると、次数(m,n)のラスタモアレのコントラスト  $M_{mn}$  を計算することができる。また、周期  $P_{mn}$  は式(2.8)で計算することができる。

#### 2.4.4 視認性判定

次に、以上に述べた方法で得られた計算結果に対し、ラスタモアレの視認性を判定する。判定の基準は、Myodoら[8]によるラスタモアレの主観評価実験結果を用いる。そこで示されたラスタモアレの周期とコントラストで定義される平面におけるラスタモアレの視認領域を図2.8に表す。

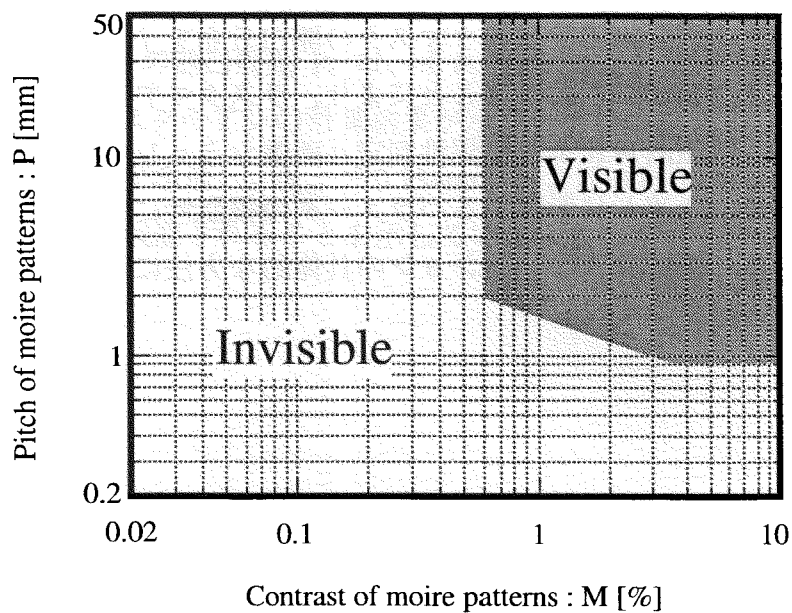


Fig. 2.8 Region where the moire pattern is annoying

濃い色で塗られた領域がモアレが視認される領域を示し、それ以外ではラスタモアレは視認されない。これらの領域の境界は、

$$M = 0.6 \quad (2.15a)$$

$$\ln P = -0.46 \ln M - 0.46 \quad (2.15b)$$

$$P = 0.9 \quad (2.15c)$$

で与えられる。次数(m,n)のラスタモアレのコントラスト  $M_{mn}$  と周期  $P_{mn}$  の計算結果を平面上にプロットする事により、各次数のモアレの視認性を判定することができる。

#### 2.4.5 画像シミュレーション

以上に述べた解析に加えて、同じデータを使用した画像シミュレーションを行う。ここでいう画像シミュレーションとは、画像処理装置のイメージメモリ上に実物を模擬したシミュレーション画像を作成することであり、本章における画像シミュレーションでは電子ビームの分布とシャドウマスクの開口分布をイメージメモリ上に描く。この画像をディスプレイに表示することにより、ラスタモアレの視認性を直接確かめることができる。数値計算による視認性判定と画像シミュレーションによって、新たな試作を行わずに、モアレに影響するパラメータの視認性に与える影響を容易に評価することができる。画像シミュレーションの具体的な方法については第3章において述べる。

## 2.5 本手法による評価例

まず、電子ビームの分布にガウス分布を仮定した時、すなわち、

$$B(y) = K \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.16)$$

とした時の計算結果を示す。ただし、式(2.16)における  $K$ 、 $\sigma$  はそれぞれ、分布中心の輝度、ガウス分布の標準偏差であり、 $\sigma$  は電子ビームスポット分布の 5% 強度径  $d_{0.05}$  と

$$\sigma = d_{0.05} / 2\sqrt{2\ln\left(\frac{1}{0.05}\right)} \approx (\sqrt{6}/12)d_{0.05} \quad (2.17)$$

で示される関係にある。

$d_{0.05}$  を 0.660mm、0.754mm、0.850mm とおいた時の結果を図 2.9 に示す。ここで、走査線間隔  $P_r$  とマスクの開口周期  $P_a$  は、それぞれ 0.754mm、0.382mm である。この図では次数(1,2)のラスタモアレの計算結果が示されている。電子ビーム径が小さくなるほどコントラストが増加し、 $d_{0.05}$  が 0.754mm および 0.850mm の場合は視認されないが、0.660mm では視認されることを示している。



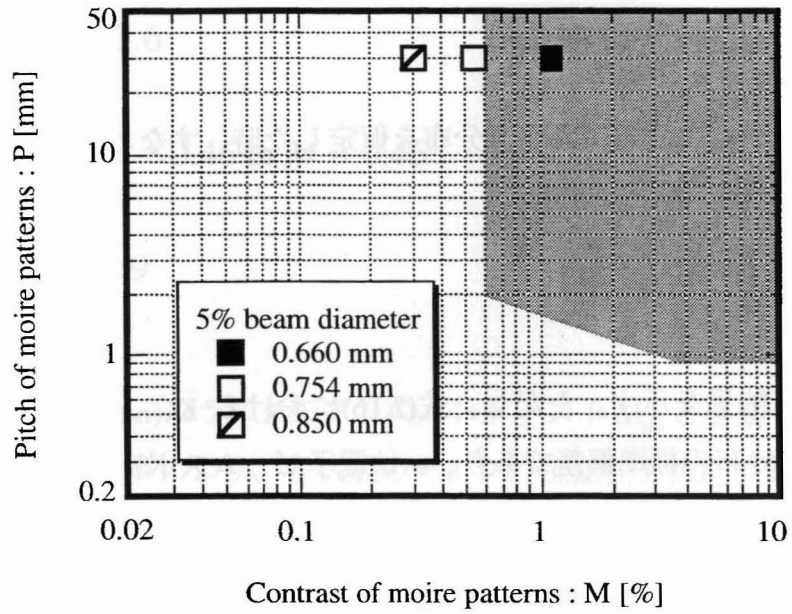
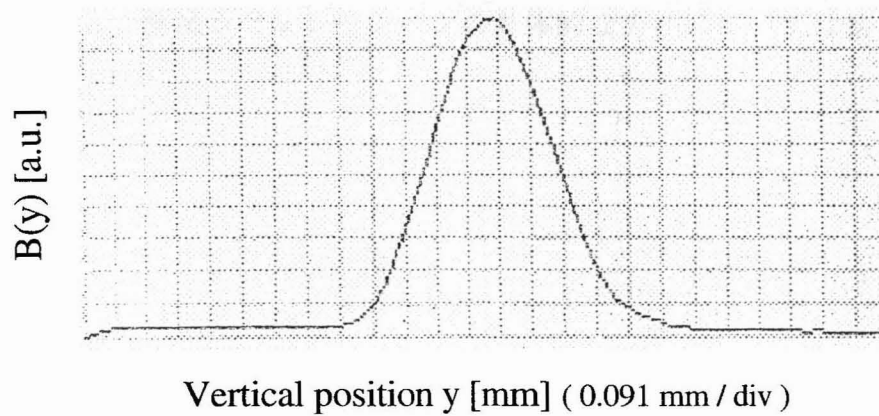
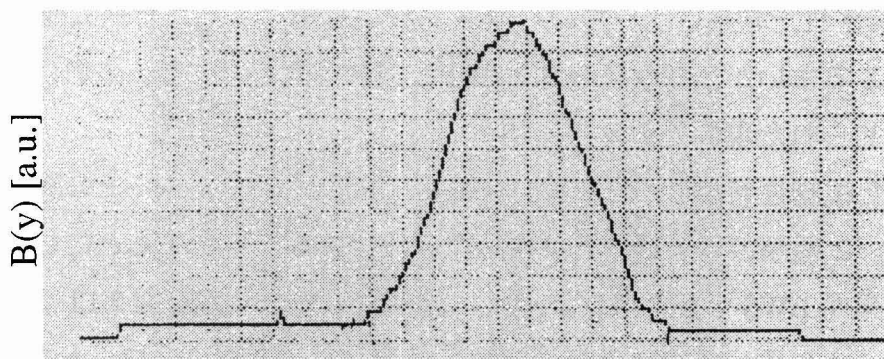


Fig. 2.9 Results of the moire pattern in mode (1,2) for simulation data. Each electron beam profile is a Gaussian distribution, has different 5% beam diameter. Scan line pitch  $P_r$  : 0.754 mm. Shadow mask pitch  $P_a$  : 0.382 mm.

次に、2.4.2 で述べた手法に基づいて測定した実測データに基づいた計算例を示す。電子ビーム分布  $B(y)$  には、図 2.10 に示す 2 種類の実測データを用いた。



(a) Beam A



Vertical position  $y$  [mm] (0.091 mm / div)

(b) Beam B

Fig. 2.10 Electron beam profiles. 5 % beam diameter : (a) 0.702 mm (b) 0.757 mm

ビーム A の形状はガウス分布に近いが B の形称性が悪く歪みを持つ。一方、5%強度径はビーム A (0.702mm) の方がビーム B (0.757mm) に比べて小さい。これらを  $B(y)$  とした計算結果を図 2.11 に示す。走査線間隔  $P_r$  とマスクの開口周期  $P_a$  は、それぞれ 0.293mm、0.143mm とした。

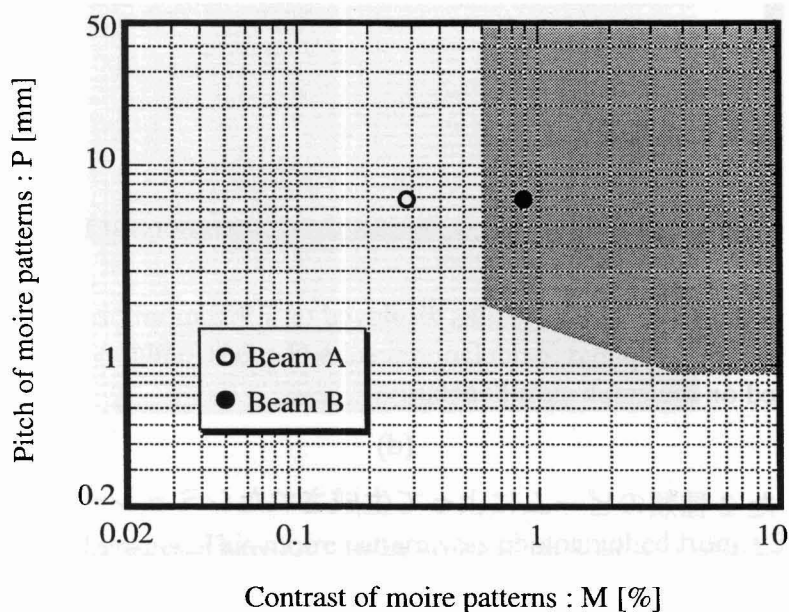


Fig. 2.11 Results of the moire pattern in mode (1,2) for actual data of two types of electron beam profiles. Scan line pitch  $P_r$  : 0.293 mm. Shadow mask pitch  $P_a$  : 0.143 mm.

図 2.11 で示された結果においては、分布形状の影響によってビーム径の変化に対するモアレのふるまいが、ガウス分布の場合と逆の傾向を示した。これは実機においても経験的に知られた現象である。

以上に述べた視認性判定手法を EWS (Engineering Work Station) 上の計算ツールとして実現した。2 種類の電子ビーム輝度分布の測定結果とそれをもとにしたラスタモアレの計算結果が EWS のディスプレイ上に表示されている例を図 2.12 に示す。それぞれの電子ビームについて複数種類の次数の計算結果が同時にプロットされている。左上と右上のウィンドウに電子ビーム分布が表示され、左下と右下のウィンドウにそれぞれについてのモアレの視認性判定のグラフが示されている。

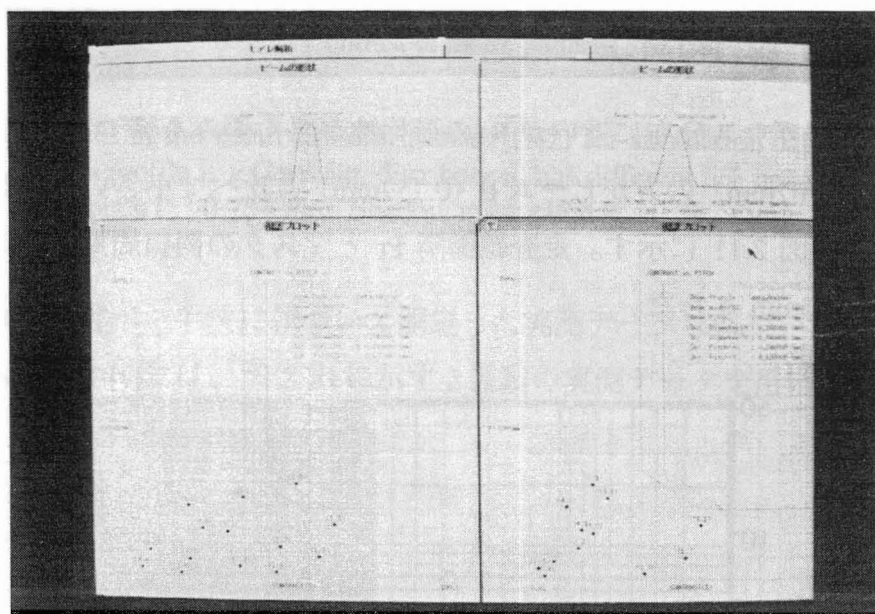
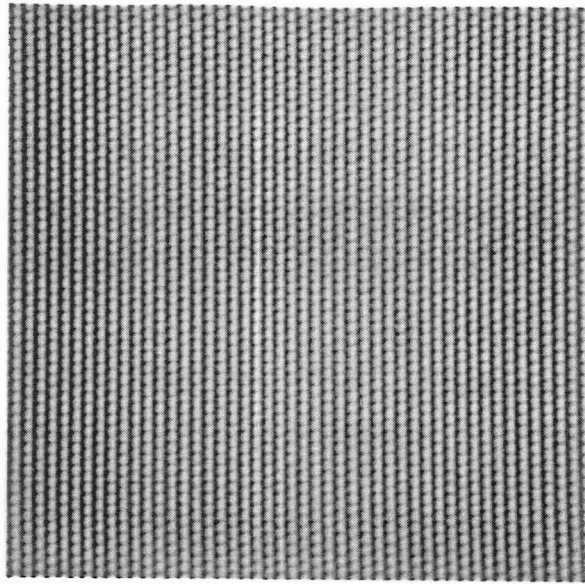
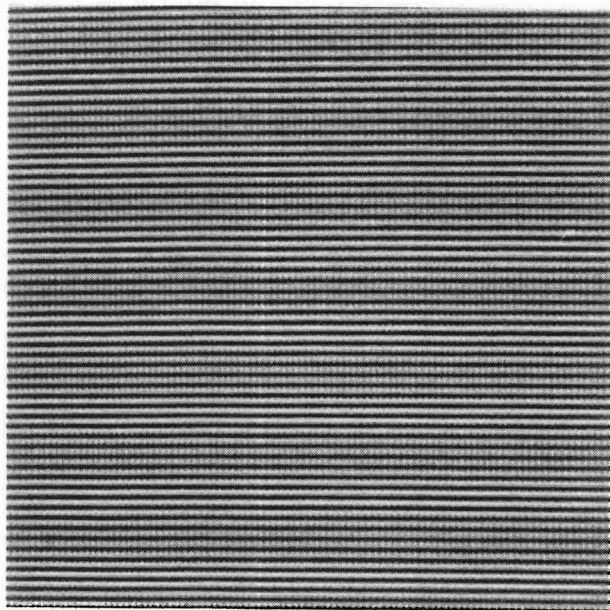


Fig. 2.12 Example of calculation results displayed on EWS monitor. Two kinds of beam profile are compared, calculation results of moire patterns in some modes are plotted on the graph simultaneously.

図 2.12 で示した 2 種類のビームによって生成されたシミュレーション画像を 20 インチのモニタ上に表示した例を図 2.13 に示す。(a)ではラスタモアレが視認されないが、(b)では次数(1,2)のラスタモアレが視認される。これらの結果は計算による結果と一致する。尚、(a)と(b)ではマスク開口の水平幅が異なった例を示したが、次数(1,2)のラスタモアレの視認性には影響がなかった。尚、次数(1,1)のラスタモアレが視認性される場合にマスク開口の水平幅が影響することについては、第 3 章において論じる。



(a)



(b)

Fig. 2.13 Simulated images. This moire pattern was photographed from a 20-inch display monitor at about ten times the actual size. (a) : moire pattern is invisible (b): visible

## 2.6 結言

本章では、視認性判定と画像シミュレーションによるラスタモアレの評価手法について述べた。電子ビーム分布とマスクの開口分布の1次元モデルからラスタモアレのコントラストと周期を計算し、計算結果について Myodo ら[8]の実験結果をもとに視認性 (Visible or Invisible) を判定するとともに、モデル式と実測データから画像シミュレーションを行う手法を提案した。

本手法にガウス分布および実測によるデータを適用し、以下に示す結果を得た。

- (1) ガウス分布の5%強度径を3段階に変化させたシミュレーションデータによる計算を行い、分布径が小さくなるほどラスタモアレの強度が増加するというこれまで知られていたラスタモアレの性質を確認した。また、ここで示した例では、3段階のうち径が最小の分布についてラスタモアレが視認されるという結果を得た。
- (2) 分布の形状が異なる2種類の電子ビーム分布の実測データによる計算を行い、径が大きくても分布の対象性が悪い場合は、径が小さい分布よりもラスタモアレが目立つという結果を得た。
- (3) 計算で評価したモアレの視認性を、画像シミュレーションにより実画像で確認することができた。

以上により、電子ビーム分布やマスク開口分布がラスタモアレの視認性に与える影響を、モデル計算と画像シミュレーションによって評価することができることを示した。

## 第3章

# 逆相ラスタモアレの視認性

### 3.1 序言

第2章において、電子ビーム分布とマスク開口分布から計算されるラスタモアレのコントラストと周期に対し、主観評価実験に関する知見をもとにして視認性を判定する手法を提案した。この手法において扱う電子ビームとマスク開口のモデルは、画面垂直方向の1次元分布である。

一方、Yamaguchi ら[9]はシミュレーションによってラスタモアレを再現し、垂直方向の緩やかな輝度変化だけでなく水平方向に細かな輝度変化を伴うラスタモアレが発生することを示し、これらの視認性を定量化するには微視的な2次元の輝度分布を考慮する必要があると報告した。また、Tanigawa ら[10]も同様のラスタモアレの構造について報告した。これらの研究において報告されたラスタモアレは、逆相ラスタモアレと呼ばれる[13]。一方、第2章で述べたラスタモアレの判定手法は、1次元モデルによって計算されるラスタモアレの特性について、垂直方向にのみ明暗を繰り返すパターンに対する主観評価データに基づいて視認性を判定するものであり、逆相ラスタモアレの視認性を判定することはできない。従って、逆相ラスタモアレの視認性についてさらに探求する必要がある。

本章では、逆相ラスタモアレの視認性に対して、電子ビームやマスク開口の分布が及ぼす影響について論じる[40,41]。電子ビーム分布とマスク上に形成された開口の2次元分布モデルによって画面上の輝度分布を計算し、これを視覚系のコントラスト感度の空間周波数特性関数によって重み付け、逆相ラスタモアレの知覚強度のモデル式を構築する。そして、知覚強度に対する電子ビームとマスク開口の分布の影響を調べるとともに、シミュレーション画像による主観評価実験を行うことにより計算結果を実験的に確認する。その結果として、従来考慮されていなかった水平方向のパラメータに対してラスタモアレの知覚強度が変化することを示す。

### 3.2 逆相ラスタモアレの構造

シャドウマスク式の 21 インチ CRT の画面上に発生したラスタモアレの例を図 3.1 に示す。この図はグリーンを画面全域に表示した際の例を示しているが、白色をはじめとする他の表示色においても同様なラスタモアレが発生する。画面中央部と周辺部でラスタモアレの周期が異なっているのは、マスク開口の垂直周期が画面中央部と周辺部で異なっているからである。

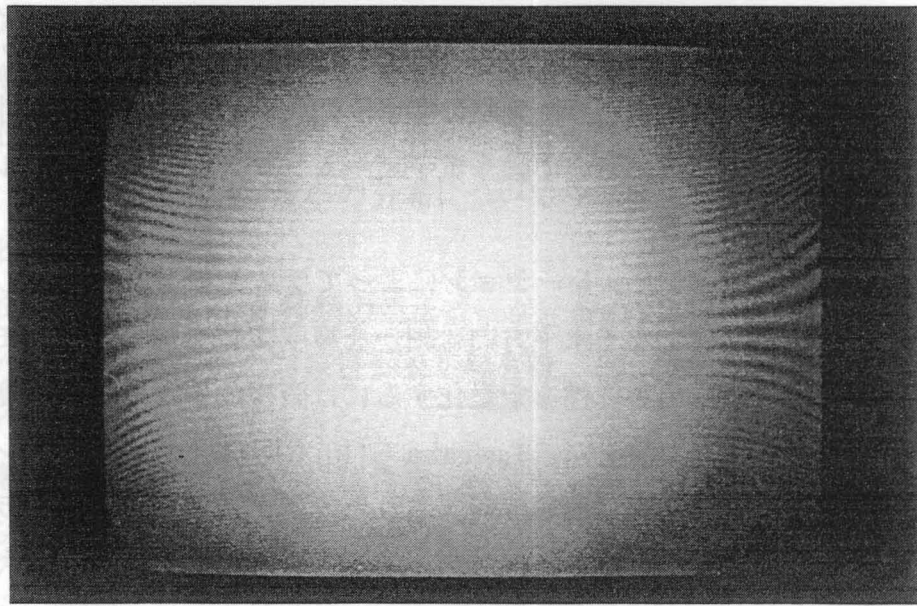


Fig. 3.1 Example of a raster moire pattern observed on a 21-inch shadow mask CRT.

このモアレを近接して観察した時の微視的な発光分布の模式図を図 3.2 に示す。この図では簡単のために、蛍光体ドットの輝度を 3 段階で表している。蛍光体ドットの各列において垂直方向の明暗の変化が生じており、さらにそれらの位相が列ごとに反転している。この時、水平方向にみて輝度変化が小さい領域が平坦なテクスチャとして、輝度変化が大きい領域がざらついたテクスチャとして知覚され、これら二種類の領域が垂直方向に繰り返している。その結果、通常の視距離では図 3.1 に示すようなパターンとして見える。このような特徴を示すラスタモアレを逆相ラスタモアレと呼ぶ。

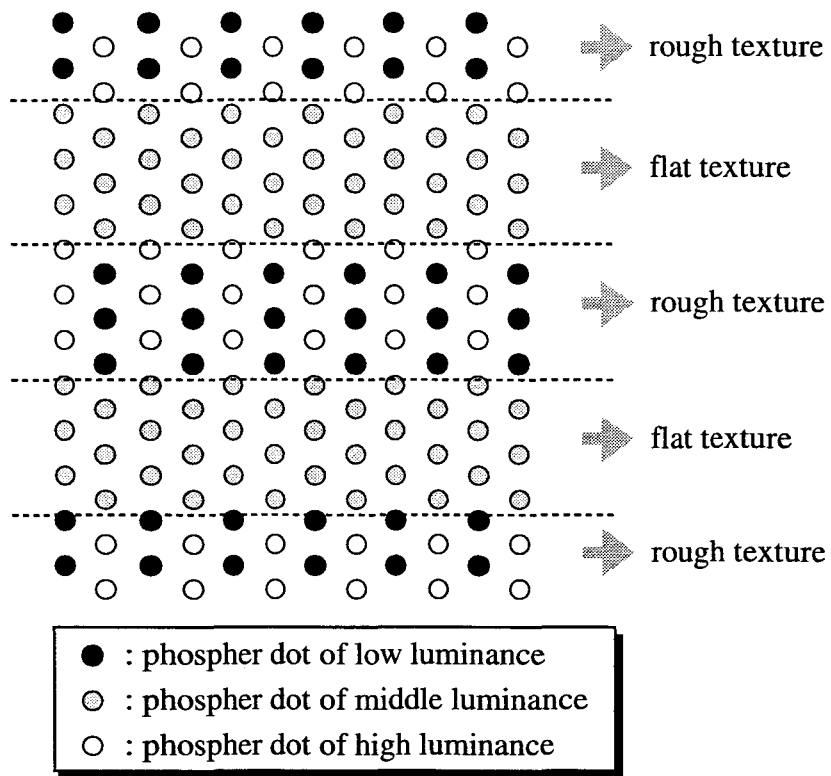


Fig. 3.2 Schematic representation of the microscopic structure of the luminance distribution of the raster moire shown in Fig. 3.1: The luminance of phosphor dots is represented in three grades.



### 3.3 逆相ラスタモアレの知覚強度

本章では、画面の輝度分布と視覚特性のモデルから逆相ラスタモアレの知覚強度を定式化し、CRTのパラメータが与える影響を調べる。

#### 3.3.1 画面の輝度分布

画面の水平および垂直方向の座標をそれぞれ  $x$ 、 $y$  とし、電子ビームスポット分布  $B_s(x,y)$  を式(3.1)で示すようにガウス分布と仮定する。

$$B_s(x,y) = K \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

ただし、 $K$ 、 $\sigma$  は分布中心の輝度、ガウス分布の標準偏差であり、 $\sigma$  は電子ビームスポット分布の5%強度径  $d_{0.05}$  と

$$\sigma = d_{0.05} / 2\sqrt{2\ln\left(\frac{1}{0.05}\right)} \approx (\sqrt{6}/12)d_{0.05} \quad (3.2)$$

で示される関係にある。ここでは輝度の一様な画面表示を行った際に生じるラスタモアレについて論じるので、電子ビームは水平方向に変調されないものとする。従って、画面上を走査された電子ビームの分布  $B(x,y)$  は

$$B(x,y) = B_s(0,y) * \text{comb}(y) \quad (3.3)$$

で与えられる。ただし、式中の\*は畳み込み操作を表す。 $\text{comb}(y)$  は  $y$  方向の走査位置を表し、

$$\text{comb}(y) = \sum_n \delta(y - nP_s) \quad ; n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.4)$$

で与えられる。ただし、 $P_s$ は  $y$  方向の走査線間隔である。式(3.3)で示される電子ビームの分布  $B(x,y)$ を 図 3.3 に示す。

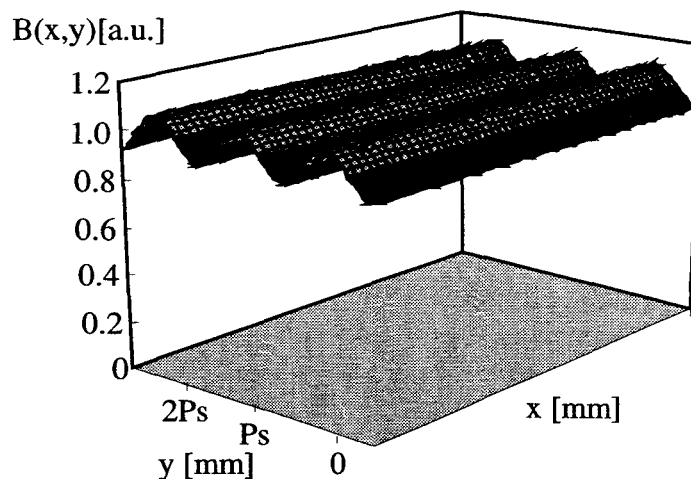


Fig. 3.3 Electron beam distribution  $B(x,y)$  expressed by equation (3.3).

マスクの開口分布  $M(x,y)$ は、

$$M(x,y) = A_p(x,y) * \left[ \sum_{m,n} \delta(x - mP_h, y - nP_v) + \sum_{m,n} \delta(x - mP_h + \frac{P_h}{2}, y - nP_v + \frac{P_v}{2}) \right]$$

$$; m,n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.5)$$

で与えられる。ただし、式中の\*は畳み込み操作を表す。 $A_p(x,y)$ は開口形状に対応した透過率で示し、

$$A_p(x,y) = 1 \quad ; mP_h - \frac{W_h}{2} \leq x \leq mP_h + \frac{W_h}{2}, nP_v - \frac{W_v}{2} \leq y \leq nP_v + \frac{W_v}{2}$$

$$A_p(x,y) = 0 \quad ; (m + \frac{1}{2})P_h - \frac{W_h}{2} \leq x \leq (m + \frac{1}{2})P_h + \frac{W_h}{2}$$

$$, (n + \frac{1}{2})P_v - \frac{W_v}{2} \leq y \leq (n + \frac{1}{2})P_v + \frac{W_v}{2} \quad (3.6)$$

で表される。すなわち、その値は開口部では1、その他の位置では0となる。ただし、

$P_h$ 、 $P_v$ は水平方向および垂直方向の開口周期である。また  $W_h$ 、 $W_v$ は水平方向および垂直方向の開口幅であり、開口形状は3.4節において述べる画像シミュレーションと整合をとるために長方形とした。ここでは、電子ビームがマスクの開口を通過する際に生じる散乱などの現象は考慮しない理想状態を仮定している。

マスク開口分布  $M(x,y)$ を図 3.4 に示す。開口は各列ごとに半ピッチずつのオフセットを持たせて配列されている。

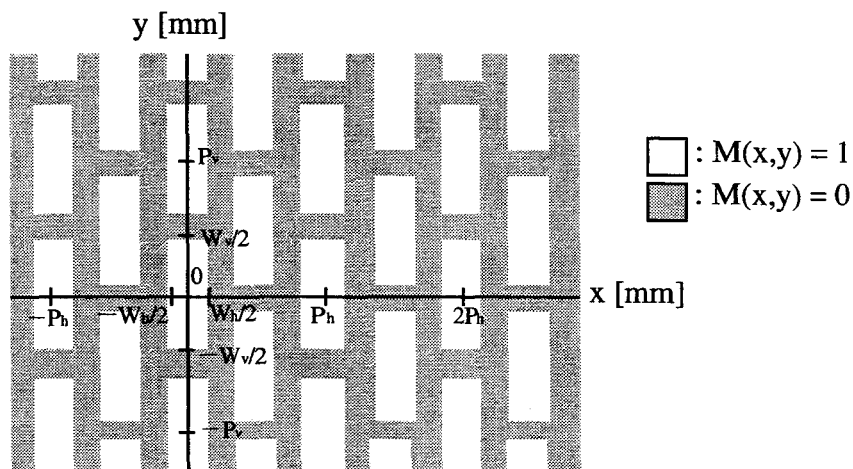


Fig. 3.4 Shape and distribution of shadow mask apertures.

マスクの開口部を通過した電子ビームの輝度分布  $I(x,y)$ は、

$$I(x,y) = B(x,y) \cdot M(x,y) \tag{3.7}$$

と表され、画面上にて観測される CRT の輝度分布に相当する。ここでは、マスクと蛍光面は近接しているため、電子ビームのマスクによる回折の影響は無視できると仮定した。また、蛍光面に照射された電子ビーム分布に対する発光分布の拡がりは無視している。

次に一定の視距離から  $I(x,y)$ を観察したときの輝度変化を表すために、 $I_d(x,y)$ を次

のように定義する。

$$I_d(x,y) = \frac{1}{W_v} \int_{mP_v - W_v/2}^{mP_v + W_v/2} I(x,y) dy$$

$$; mP_v - \frac{W_v}{2} \leq y \leq mP_v + \frac{W_v}{2}, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3.8)$$

すなわち、 $I_d(x,y)$ は各開口幅に渡って $I(x,y)$ の移動平均をとったものである。

$x = n \cdot P_h$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) における $I(x,y)$ および $I_d(x,y)$ 、すなわち輝度分布の $x = n \cdot P_h$ における垂直方向の断面を図3.5に示す。 $\sigma$ 、 $P_s$ 、 $P_v$ 、 $W_v$ の値は、それぞれ212、452、420、315 $\mu\text{m}$ とした。

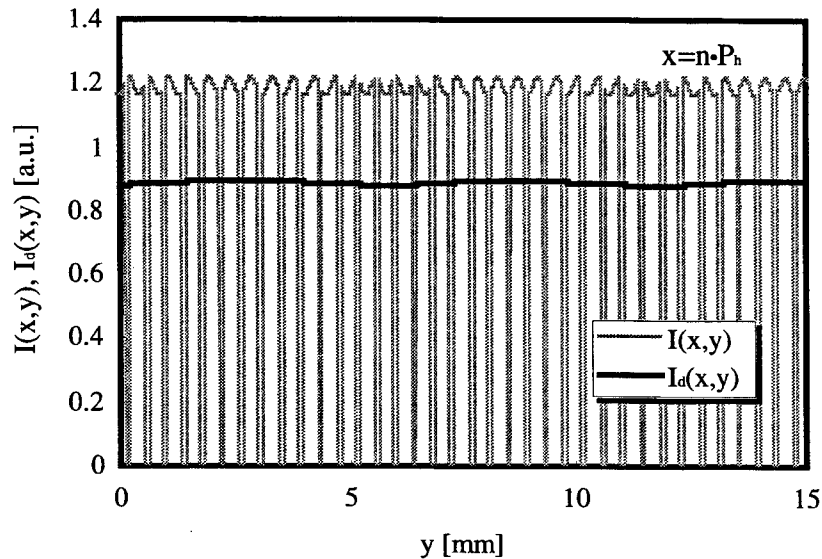


Fig. 3.5  $I(x,y)$  and  $I_d(x,y)$  values at  $x=n \cdot P_h$ ;  $\sigma=212 \mu\text{m}$ ;  $P_s=452 \mu\text{m}$ ;  $P_v=420 \mu\text{m}$ ;  $W_v=315 \mu\text{m}$ .

$P_s$ 、 $P_v$ 、 $W_v$ は図3.5と同じ値で、 $\sigma$ の値を147 $\mu\text{m}$ とした時の $I(x,y)$ 、 $I_d(x,y)$ を図3.6に示す。

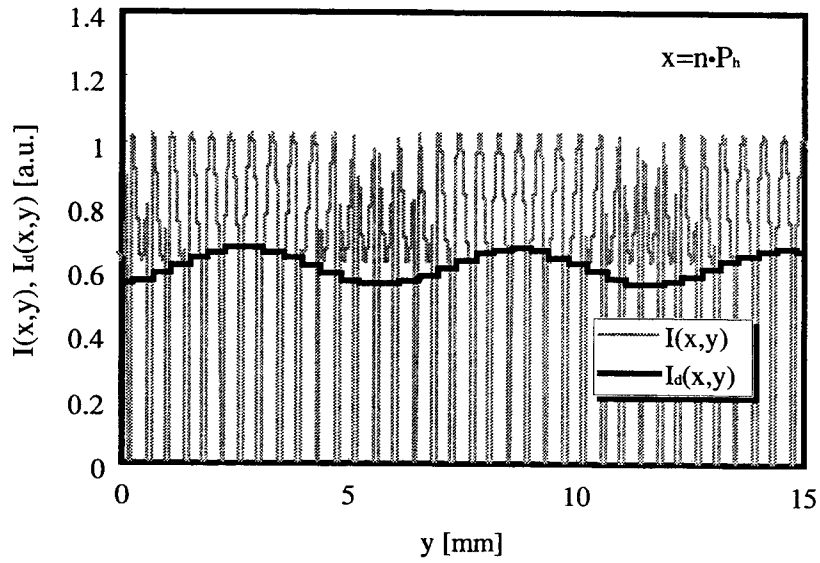


Fig. 3.6  $I(x,y)$  and  $I_a(x,y)$  values at  $x=n \cdot P_h$ :  $\sigma=147 \mu\text{m}$ ;  $P_s=452 \mu\text{m}$ ;  $P_v=420 \mu\text{m}$ ;  $W_v=315 \mu\text{m}$ .

図 3.5 と図 3.6 の比較から、電子ビーム径を小さくすると垂直方向に生じる低周波数の輝度変化が大きくなることがわかる。図 3.6 と同じパラメータの値で、 $x=(n+1/2) \cdot P_h$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) とした時の  $I(x,y)$  と  $I_a(x,y)$  を図 3.7 に示す。

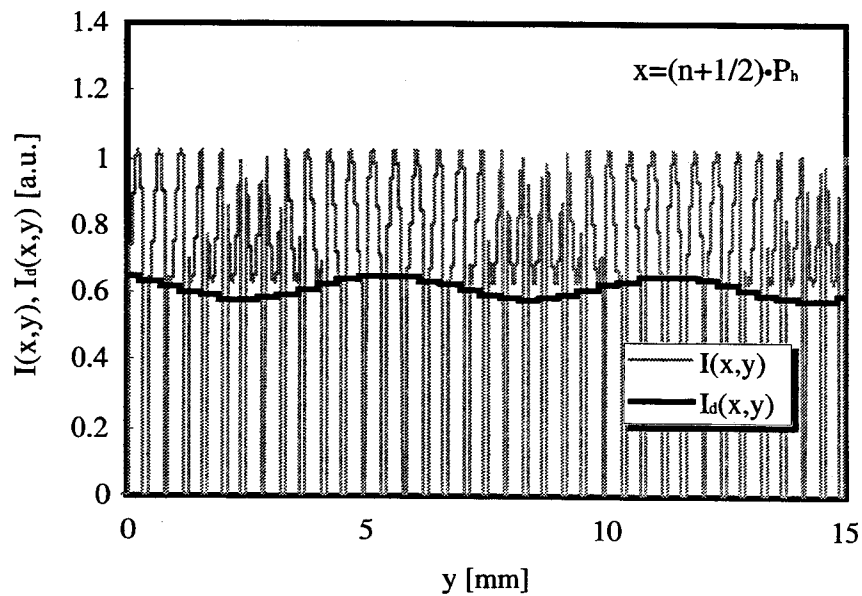


Fig. 3.7  $I(x,y)$  and  $I_a(x,y)$  values at  $x=(n+1/2) \cdot P_h$ :  $\sigma=212 \mu\text{m}$ ;  $P_s=452 \mu\text{m}$ ;  $P_v=420 \mu\text{m}$ ;  $W_v=315 \mu\text{m}$ .

図 3.7 は図 3.6 で示したマスク開口列に隣り合う開口列の位置における輝度分布の垂直方向の断面を示している。図 3.6 と図 3.7 の比較から、低周波数の輝度変化の位相が反転していることがわかる。これが逆相モアレの構造の要因となっている。

図 3.5～3.7 で確認した低周波数の輝度変化の振幅<sup>1</sup>と周期を以下に導出する。まず、 $B(x,y)$ 、 $M(x,y)$ を  $y$  方向における周期  $P_s$  および  $P_v$  の周期関数として、式(3.9)、式(3.10)に示すようにフーリエ級数に展開する。 $B(x,y)$ 、 $M(x,y)$ は  $x$  軸に関して対象であるので、 $\cos$  関数によって展開される。

$$B(x,y) = \sum_m B_m \cos \left( 2\pi \frac{m}{P_s} y \right) \quad (3.9)$$

$$M(x,y) = \sum_n M_n \cos \left( 2\pi \frac{n}{P_v} y \right) \quad (3.10)$$

式(3.9)、式(3.10)を式(3.7)に代入し整理すると、

$$I(x,y) = \sum_m \sum_n \frac{B_m M_n}{2} \cos \left\{ 2\pi \left( \frac{m}{P_s} + \frac{n}{P_v} \right) y \right\} + \sum_m \sum_n \frac{B_m M_n}{2} \cos \left\{ 2\pi \left( \frac{m}{P_s} - \frac{n}{P_v} \right) y \right\} \quad (3.11)$$

を得る。右辺第 2 項が低周波数の輝度変化成分を表し、 $B(x,y)$  および  $M(x,y)$  の各高調波成分の組み合わせについて存在する。ここでは、 $B(x,y)$  の第  $m$  高調波成分と  $M(x,y)$  の第  $n$  高調波成分の組み合わせで生じるラスタモアレを次数( $m,n$ )のラスタモアレと呼ぶ。次数( $m,n$ )のラスタモアレの周期  $P_{mn}$  は、

$$P_{mn} = \left| \frac{m}{P_s} - \frac{n}{P_v} \right|^{-1} \quad (3.12)$$

で与えられる。モアレ成分の周期  $P_{mn}$  と垂直方向の開口周期  $P_v$  の関係を式(3.12)に基づいて計算した結果を図 3.8 に示す。ただし、走査線間隔  $P_s$  は図 3.5～3.7 と同じ 0.452mm とし、次数( $m,n$ )が(1,1)、(2,2)、(1,2)、(2,1)の場合を示した。図 3.5～3.7 で観

<sup>1</sup> 第 2 章ではコントラストと呼んだ

察される低周波数の輝度変化は(1,1)次のラスタモアレ（周期  $P_{11}=5.9\text{mm}$ ）である。

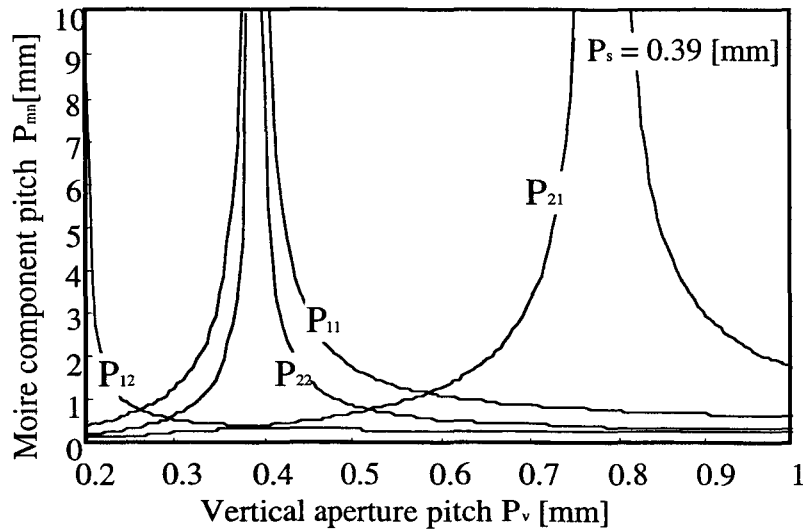


Fig. 3.8 Moire component's period  $P_m$  as a function of vertical aperture pitch  $P_v$ : (1,1), (2,2), (1,2) and (2,1)-order moire components were calculated using equation (3.12).

また、次数(m,n)のラスタモアレの振幅  $C_{mn}$  は  $B(x,y)$  の第  $m$  高調波成分の振幅  $B_m$  と  $M(x,y)$  の第  $n$  高調波成分の振幅  $M_n$  から、

$$C_{mn} = \frac{B_m M_n}{2} \quad (3.13)$$

で与えられる。電子ビーム分布の標準偏差  $\sigma$  を変化させて、次数(1,1)と次数(2,2)のラスタモアレの振幅  $C_{11}$ 、 $C_{22}$  を式(3.13)によって計算した結果を図 3.9 に示す。電子ビーム分布としてガウス分布を仮定した場合、次数(2,2)のラスタモアレの振幅  $C_{22}$  は次数(1,1)のラスタモアレの振幅  $C_{11}$  の 1/100 のオーダーとなり、極めて微弱である。

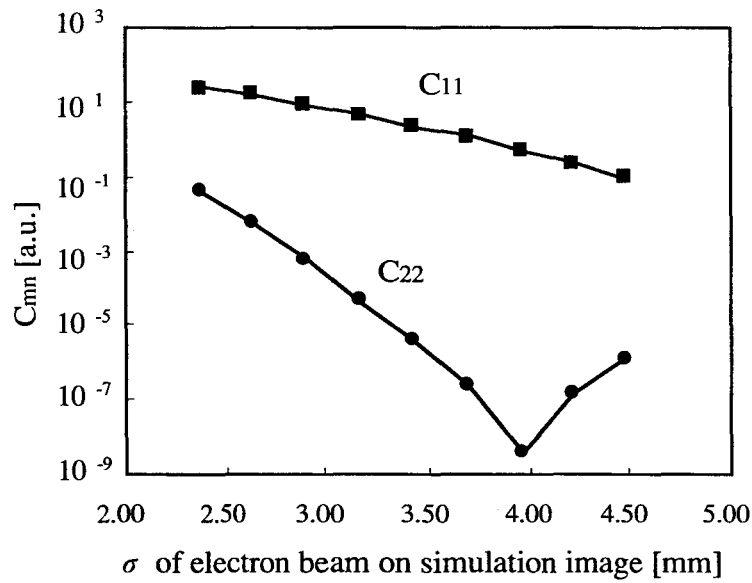


Fig. 3.9  $C_{11}$  and  $C_{22}$  as functions of standard deviations of the electron beam distribution  $\sigma$ .

### 3.3.2 知覚強度のモデル

3.3.1 において述べたラスタモアレの振幅をもとにして、逆相ラスタモアレの知覚強度のモデル式を以下に構築する。

まず、次数(1,1)のラスタモアレの2次元平面上での分布を図3.10に示す。図に示されたように相隣る列のラスタモアレ成分は位相が反転している。各列のラスタモアレ成分が平均値を切るy軸上の位置を直線A-A'で示し、奇数列の極小点と偶数列の極大点に対応するy軸上に位置を直線B-B'で示す。



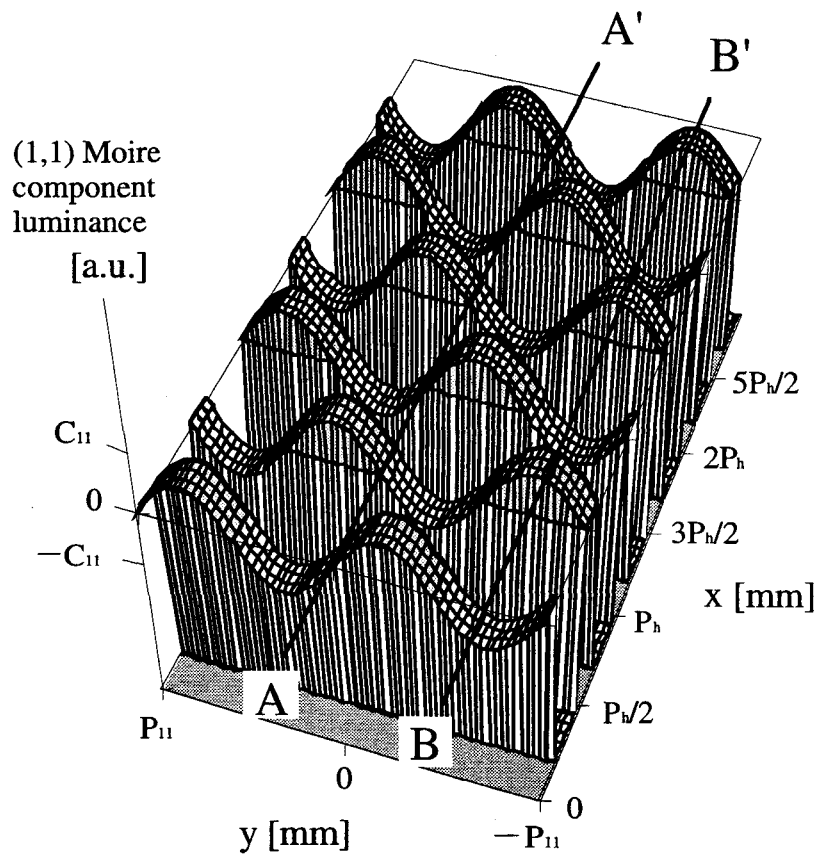


Fig. 3.10 Schematic representation of the luminance distribution of the (1,1)-order moire component on the xy-plane.

3.2 節で述べたように、A-A'の近傍の領域は水平方向の輝度変化が小さく平坦に見える、B-B'の近傍の領域は水平方向の輝度変化が大きくざらついて見える。このようなテクスチャが異なる領域が垂直方向に繰り返すことにより、縞状のラスタモアレとして知覚される。テクスチャの繰り返す周期は、構成要素である次数(1,1)のラスタモアレ成分の周期  $P_{11}$  の  $1/2$  となる。すなわち、逆相ラスタモアレの知覚される周期は  $P_{22}$  ( $= P_{11}/2$ ) に等しく、見かけ上は次数(2,2)のラスタモアレに見える。しかし、図 3.9 に示したように次数(2,2)のラスタモアレの振幅  $C_{22}$  は極めて微弱であり、次数(1,1)のラスタモアレが逆相で水平方向に配列した構造が支配的である。

ここで、次数(1,1)のラスタモアレの振幅が大きくなるほど B-B'の近傍の領域のテクスチャのざらつきが大きくなり、A-A'の近傍の領域とのテクスチャのコントラストが増大し、逆相ラスタモアレの知覚強度が増加すると考える。この考え方に基づいて、

B-B'に沿った水平方向の輝度変化の振幅に、視覚系の空間周波数特性による重みづけを行った式を、逆相ラスタモアレの知覚強度のモデル式とする。輝度変化の振幅は  $C_{11}$  に等しく、フーリエ係数  $B_1$ 、 $M_1$  から式(3.13)により計算される。視覚系の空間周波数特性はバンドパス特性を示すことが知られており、多くのモデル式が提案されている。ここでは、式(3.14)に示すコントラスト感度関数 CSF(Contrast Sensitivity Function)を用いる[49]。

$$CSF(u) = au \cdot \exp(-bu) \sqrt{1 + c \cdot \exp(bu)} \quad (3.14)$$

$$a = \frac{540(1 + 0.7/L)^{-0.2}}{1 + 12/w(1 + u/3)^2}$$

$$b = 0.3(1 + 100/L)^{0.15}$$

$$c = 0.06$$

式中的変数  $u$  は cpd(cycle per degree)を単位とする空間周波数、 $L[\text{cd}/\text{m}^2]$ は画面輝度、 $w[\text{degree}]$ は画面サイズと視距離によって決まる画角を表す。CSF の計算例を図 3.11 に示す。

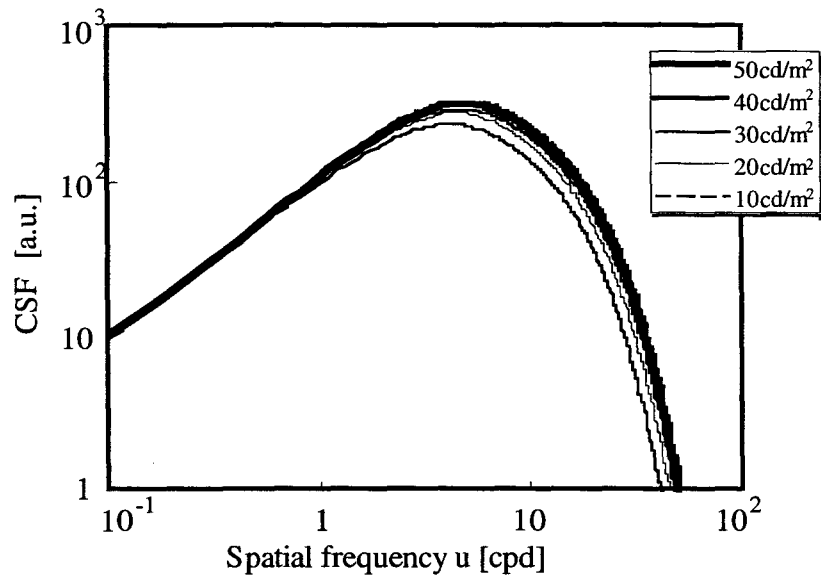


Fig. 3.11 Contrast sensitivity function.

逆相ラスタモアレの知覚強度  $PI$  は

$$PI = C_{11}CSF(u) \quad (3.15)$$

として、 $C_{11}$  と  $CSF$  の積で定義する。水平方向の輝度変化を伴う逆相ラスタモアレに関して、本研究以前には Yamaguchi らによる、蛍光体ドット輝度の 2 次元での分散に基づくモアレの評価関数[11]が提案されているが、マスク開口の寸法値や視覚特性が考慮されていない。

電子ビーム分布の標準偏差  $\sigma$  とマスク開口の水平周期  $P_h$  を変数として  $PI$  を計算した結果を図 3.12 に示す。ここで画面サイズは 21 インチ、視距離は 500mm、画面輝度は  $50 \text{ cd/m}^2$  とした。

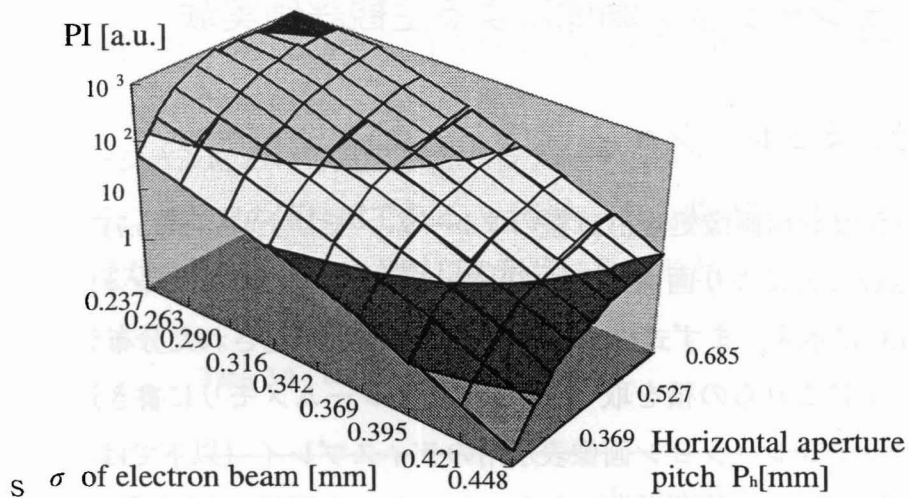


Fig. 3.12 PI values calculated for different values of the standard deviation of electron beam distribution  $\sigma$  and the horizontal aperture pitch of the shadow mask  $P_h$ .

この図から、電子ビームの径が小さくなるほど、また水平開口ピッチが大きくなるほど逆相ラスタモアレの知覚強度が増加することがわかる。

これまで、電子ビームの径を微細化すると分解能が上がる一方でラスタモアレの知覚強度が増加するという性質は、分解能とラスタモアレのトレードオフ関係としてこれまでも論じられてきた。分解能向上とラスタモアレ低減を両立させるためには、ラスタモアレが知覚可能な強度を超えない範囲まで電子ビームの径を小さくすることが必要であるが、マスク開口の水平周期が大きくなるほど、電子ビームの径の微細化に対する制限が厳しくなる。すなわち、できるだけマスク開口の水平周期を小さくすることが、分解能向上とラスタモアレ低減の両方に寄与するといえる。

## 3.4 シミュレーション画像による主観評価実験

### 3.4.1 画像シミュレーション

シミュレーション用画像処理計算機のフレームメモリ上に、式(3.7)で示した輝度の分布を書き込むことにより画像シミュレーションを行った。画像シミュレーションの流れを図 3.13 に示す。まず式(3.1)、式(3.3)によって記述された分布データをそれぞれ作成する。次にこれらの積を取り $\gamma^{-1}$ 乗してフレームメモリに書き込み表示する。ただし、 $\gamma$ はシミュレーション画像表示用のディスプレイ（以下では、シミュレータモニタと呼ぶ）のガンマ値である。シミュレーション画像のサイズは、シミュレーションの対象である CRT 表示面の 10 倍の拡大画面とした。シミュレーション画像のサイズを実機の 10 倍にするのは、限られたドット数のフレームメモリ上で分布形状を表すパラメータを細かいステップで変化させるためである。

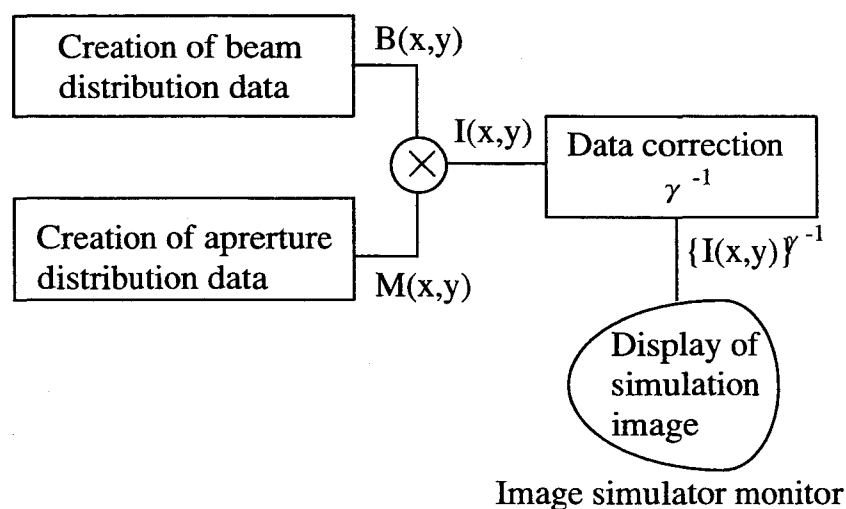


Fig. 3.13 Flowchart of the image simulation process.

計算機シミュレータには画像処理用ワークステーション（VICOM 社製 VME-S）を使用した。表示解像度は水平 1024 画素、垂直 1024 画素で、水平周波数は 64kHz である。尚、シミュレータモニタにカラー CRT を使用すると、シミュレーション画像とシミュレータモニタ自体のシャドウマスクとの重畳による不必要なモアレが発生する。これを防ぐために、シミュレーション画像はモノクロとし、シミュレータモニタ

タにはシャドウマスクを持たない 21 インチモノクロディスプレイ（ナナオ社製 Flex Scan 6500）を使用した。シミュレーション画像は水平 300mm、垂直 300mm のサイズで表示した。

画像シミュレーションにおいて設定したパラメータの値を表 3.1 に示す。表中の値はシミュレータモニタ上での実寸値である。パラメータの表記は 3.2 節と同じであり、電子ビーム分布はガウス分布、マスク開口の形状は長方形とした。

Table 3.1 Image simulation parameters.

| parameter     |          | value [mm]                                   |
|---------------|----------|--|
| electron beam | $P_s$    | 3.42   |
|               | $\sigma$ | 2.37 2.63 2.90 3.16 3.42 3.69 3.95 4.21 4.48 |
| mask aperture | $P_h$    | 2.83 3.40 3.96 4.53 5.10 5.66 6.23 6.79 7.36 |
|               | $W_h$    | $P_h - 1.41$                                 |
|               | $P_v$    | 3.69   |
|               | $W_v$    | 3.42   |

図 3.14 にシミュレーション画像の例を示す。ここで発生しているラスタモアレは逆相型である。

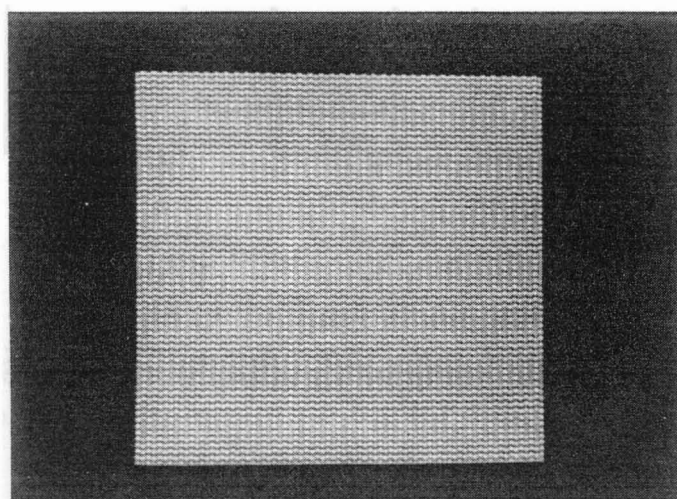


Fig. 3.14 Example of the simulated image.

### 3.4.2 主観評価実験

次に主観評価実験の条件と方法について述べる。

#### a. 被験者

裸眼もしくは矯正で 1.0 以上の視力と正常な色覚を有する 26~32 歳の男性 5 名が実験に参加した。

#### b. 評価環境

暗室にシミュレータモニタを設置し、被験者は 6m の距離からシミュレーション画像を観察する。

#### c. 実験手順

シミュレーション画像を被験者に提示するタイムシーケンスを図 3.15 に示す。シミュレーション画像はランダムな順序で各 5 秒間提示される。被験者は画像が消えている 8 秒間でシミュレータモニタ上にラスタモアレが見えたか見えなかったかをキーボードのキー (Y/N) を押すことによって答える。表 3.1 で示したパラメータの組み合わせによる 81 種類のシミュレーション画像を作成し、これらの画像を使用した 81 回の評価を 1 セットとし、これを各被験者について 2 セット実施した。1 セットの実験には要する時間は約 20 分であった。実験はすべてシミュレータを構成しているワークステーションでコントロールした。

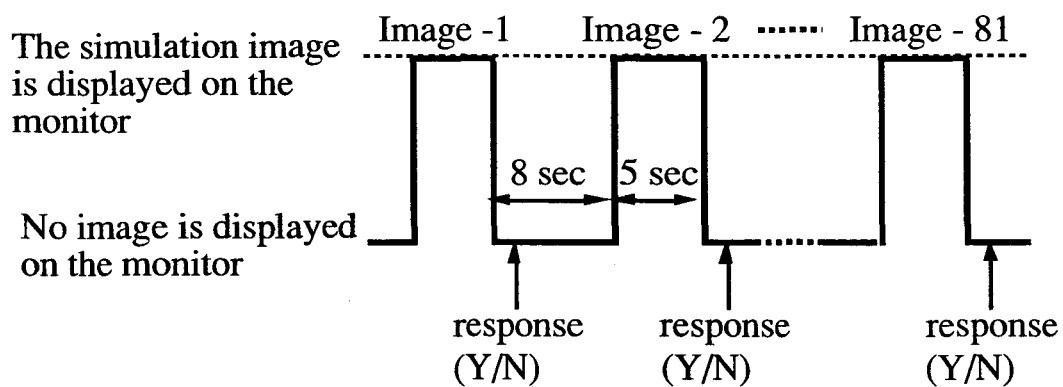


Fig. 3.15 Time sequence of the subjective evaluation test.

### 3.4.3 実験結果

主観評価実験の結果を図 3.16 に示す。ラスタモアレが見えると答えた確率を被験者を通して平均し、電子ビーム分布の標準偏差  $\sigma$  の関数として、マスク開口の水平周期  $P_h$  の値ごとにプロットした。この図から電子ビーム径が増加するに伴って、ラスタモアレが視認される確率が減少していることがわかる。すなわち、逆相型のラスタモアレにおいても、電子ビーム径の増加に対してラスタモアレの強度が低下することを示している。また、電子ビーム径が等しい条件においては、マスク開口の水平周期が大きいほどラスタモアレが視認される確率が増加している。これらの結果は、3.3 節で示した計算結果と同様の傾向を示している。

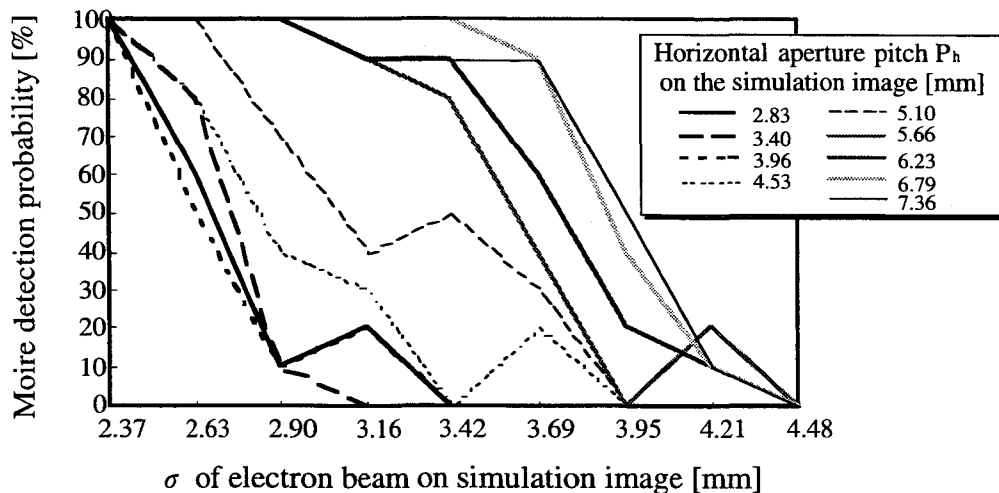


Fig. 3.16 Results of the subjective evaluation test: Average probabilities of moire detection for different values of horizontal aperture pitch were plotted as functions of the standard deviation of the electron beam distribution.

上の結果を電子ビーム径の標準偏差  $\sigma$  とマスク開口の水平周期  $P_h$  をそれぞれ縦軸、横軸とし、ラスタモアレの検出確率を等高線図で表したものを図 3.17 に示す。水平周期  $P_h$  が増加するに従って、ラスタモアレが視認される電子ビーム径の閾値が上昇していることがわかる。



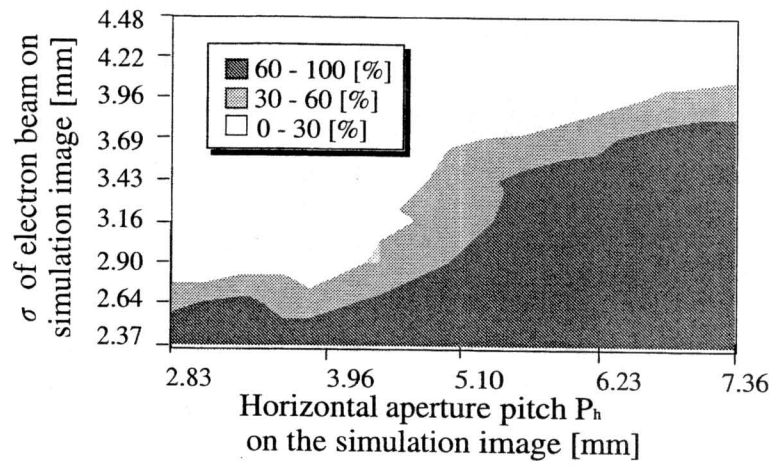


Fig. 3.17 Contour map of moire detection probabilities: The horizontal and vertical axes represent the horizontal aperture pitch and the standard deviation of the electron beam distribution respectively.

### 3.5 結言

本章では、逆相ラストモアレと呼ばれる第2章で述べた手法によって取り扱えない構造を有するラストモアレについて、電子ビームやマスク開口の分布がその視認性に及ぼす影響について述べた。電子ビーム分布とマスク上に形成された開口の2次元分布モデルによって画面上の輝度分布を計算し、これを視覚系のコントラスト感度の空間周波数特性関数によって重み付けて、逆相ラストモアレの知覚強度のモデル式を構築した。そして、知覚強度に対する電子ビームとマスク開口の分布の影響を調べるとともに、シミュレーション画像による主観評価実験を行うことにより計算結果を実験的に確認した。

モデル計算と主観評価実験の結果、電子ビームの径が小さくなるほど、また水平開口ピッチが大きくなるほど逆相ラストモアレの知覚強度が増加することが明らかとなった。すなわち、従来は垂直方向のパラメータのみで議論されていたラストモアレの視認性が水平方向のパラメータの影響を受けることが明らかとなった。

今回の計算は単純化したモデルに基づいたものであり、定量的な議論を行うためには、より実際に近い定式化を行う必要がある。さらに、2次以上の高調波成分の小さいガウス分布を仮定した計算と画像シミュレーションを行ったが、高次のモアレ成分の影響を調べるためには電子ビームの分布の変化に着目した解析が今後の課題である。

## 第4章

# 電子ビームスポット輝度分布測定法 の高精度化

### 4.1 序言

CRT の高解像度化が進む中で、電子銃の性能に対する要求も一段と高くなっている。電子ビームスポットは1ドットすなわち表示の最小単位に相当し、その輝度分布はCRTの分解能の指標として電子銃の設計における重要な特性の一つである。また、第2章および第3章で論じたように、電子ビームの分布はモアレの主たる要因の一つである。

従来から電子ビームスポットの評価は、マスクによって部分的に遮蔽された発光を熟練した作業者が拡大鏡により観察し、ビームの垂直および水平の径を推定する方法がとられてきた。このような目視による方法では、測定結果に測定者間のばらつきや繰り返し測定のばらつきが含まれるというデータの信頼性上の問題がある。また、ビーム径以外の形状に関するデータが定量化されないという問題もある。電子ビームスポットの正確な分布のデータを得ることにより、周波数領域における分解能の定量的な指標であるMTF (Modulation Transfer Function) を求めることができ、さらにMTFA (Modulation Transfer Function Area) やSQRI (Square-root Integral) などの評価関数に適用することが可能となる。これまでに電子ビームスポットの評価手段として、画像処理を応用した輝度分布の測定手法が検討されてきたが、目視と同等の感度とダイナミックレンジの実現、再現性の向上という課題が残されている。

本章では、CRTの分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法について論じる[42]。まず、目視と同等の感度とダイナミックレンジを実現するために、ICCDカメラを用いた二段階感度による撮像法を提案する。その結果、カソード電流が極めて微弱な電流域から最高輝度に対応した大電流域に至るまでの広い電流

範囲において電子ビームスポット輝度分布の測定が可能となったことを示す。さらに、従来の画像処理方法によるスポット形状の再構成においてジッターノイズに起因した測定結果のばらつきが生じる問題に対し、シフト量の誤差を補償した再構成アルゴリズムを提案し、繰り返し測定の再現性が向上することを示す。

## 4.2 電子ビームスポット輝度分布の光学的な特徴

電子ビームスポットの輝度分布を精度良く測定するために考慮すべき光学的特徴として、次の項目が挙げられる。

- (1) 分布のピークと裾野の部分の輝度差が大きい。

分布の裾野部は極めて輝度が低く、目視により視認することができる一方、通常の画像計測で使用する汎用の CCD カメラで検出することができない。裾野部を検出するために高感度の撮像系を使用すると、ピーク部に対する出力が飽和する。すなわち、高感度かつ広ダイナミックレンジの撮像系が必要となる。

- (2) 色選別電極（マスク）の存在により、全体の形状を同時に観測することができない。

電子ビームはアパーチャグリルやシャドウマスクなどの色選別電極の開口を通過することによって、対応する位置の蛍光体に照射されて発光する。したがって、画面上から電子ビームスポットを観察すると、開口を通過した部分の形状のみが観測される。

- (3) ジッターにより、位置が細かく動いている。

画面上の同一の位置で 1 ドットを発光させても、偏向系におけるジッターノイズの影響で、発光位置が上下左右方向に常に細かく動いている。

これまでに目視検査によって行われていた広い範囲のカソード電流条件における電子ビームスポットの評価を画像計測によって行うためには、(1) に対応した高感度かつ広ダイナミックレンジの測定技術を確立することが必要である。また、(2) に対応した電子ビームスポットの全体形状の測定技術はこれまでも報告例があるが、(3) の影響により測定精度が低下するという問題がある。以下では、4.3 節において (1) に対応した高感度化と広ダイナミックレンジ化について、4.4 節において (2)、(3) に対応した測定精度の改善について述べる。

## 4.3 感度・ダイナミックレンジの向上

### 4.3.1 高感度化

大電流条件から小電流条件までの電子ビームスポット輝度分布の測定を目視検査と同等の検出力で可能にするために、高感度の撮像デバイスを使用し、さらにこれを広ダイナミックレンジ化する。本研究では、撮像デバイスとして Image Intensifier を CCD カメラに取り付けた ICCD カメラ（浜松ホトニクス製 ICCD-100、最低被写体照度  $1 \times 10^{-3}$  lx）を使用した。Image Intensifier は、入射光の光電変換による電子像を MCP（Micro Channel Plate）によって増倍した後、再び光学像に変換して CCD に入射させる機能を持つ。

通常の CCD カメラによる撮像結果と ICCD カメラによる撮像結果の比較を図 4.1 に示す。比較に用いた CCD カメラは汎用品（東京電子製）である。実験用に試作したマスクのない 17 インチ CRT においてカソード電流値を  $30 \mu\text{A}$ （グリーンラスタの表示時）に調整し、画面中央部におけるビームスポット輝度分布を測定した。グラフは撮像した分布の垂直方向の断面を示している。それぞれ、実線はカメラの出力値の生データであり、点線は最大値で規格化した結果である。CCD カメラおよび ICCD カメラともに  $\gamma$  値は 1 であり、カメラの出力は輝度に比例している。通常、ディスプレイモニターを使用する際のカソード電流値は 250 ないし  $300 \mu\text{A}$  であり、 $30 \mu\text{A}$  のカソード電流値は極めて小さく電子ビームスポットの輝度も極めて微弱である。CCD カメラでは明らかに感度が不足しているが、ICCD カメラでは分布の形状の測定が可能となることを示している。

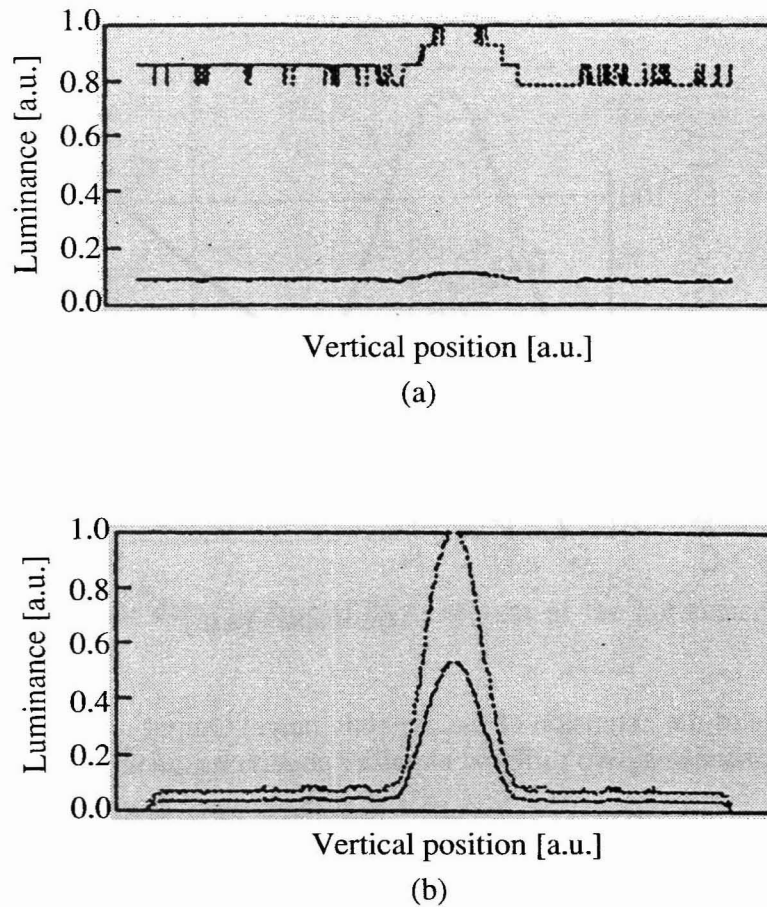


Fig. 4.1 Comparison of the measurement results by the conventional CCD camera (a) and the ICCD camera (b) : solid line shows the rare data and the dashed line shows the normalized data.

#### 4.3.2 ダイナミックレンジ拡大の原理

上に述べたように ICCD カメラによって低輝度条件での測定が可能となったが、電流値を増加させるとピーク部に対応する出力が飽和し、分布の全体形状を撮像することができない。そこで、Image Intensifier のゲインを 2 段階で切り替えることにより測定系のゲインを制御し、ダイナミックレンジの拡大をはかる。

この方法の原理を図 4.2 に示す。 $S_l$ 、 $T_l$  を ICCD カメラが低感度の条件における飽和輝度と閾値輝度とし、 $S_h$ 、 $T_h$  を ICCD カメラが高感度の条件における飽和輝度と閾値輝度とする。 $T_h$  以上  $T_l$  未満の入射光については高感度の条件 (図中の high gain)

による出力を、 $T_l$ 以上の入射光については低感度の条件（図中の low gain）による出力を用い、これらを組み合わせることによりダイナミックレンジを拡大する（図中の太線）。

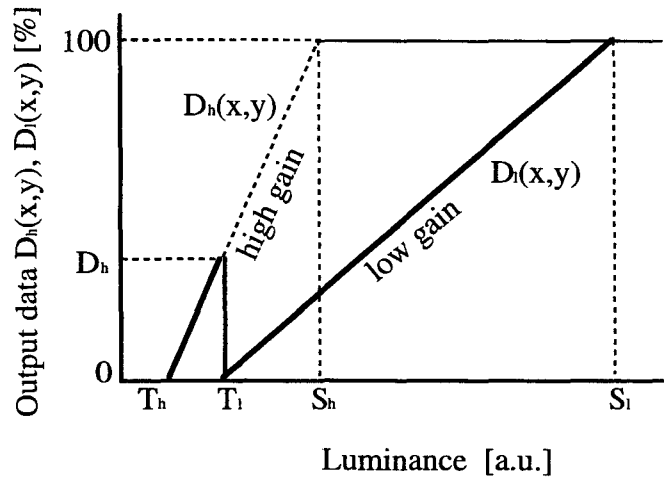


Fig. 4.2 Principle of the extension of the dynamic range: Output of the ICCD camera vs. input luminance at two different exposure conditions, gamma of the ICCD camera is 1.

本方法による撮像データ  $D(x,y)$  は  $D_l(x,y)$ 、 $D_h(x,y)$  をそれぞれ低感度および高感度の条件におけるカメラの出力とすると、

$$\begin{aligned}
 D(x,y) &= \frac{S_l - T_l}{S_l - T_h} D_l(x,y) + \frac{100(T_l - T_h)}{S_l - S_h} & ; D_h(x,y) \geq D_{th} \\
 &= \frac{S_h - T_h}{S_l - T_h} D_h(x,y) & ; D_h(x,y) < D_{th}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

で与えられる。ただし、

$$D_{th} = \frac{100(T_l - T_h)}{S_h - T_h} \tag{4.2}$$

このような2段階の感度条件によって得られたデータの組み合わせによる輝度分布を



図 4.3 に模式的に示す。

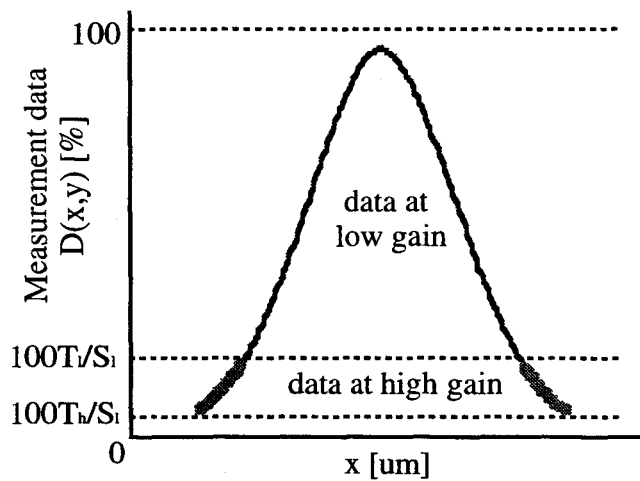


Fig. 4.3 Measurement data: horizontal cross section of the luminance distribution is shown.

以上に述べた高感度化と広ダイナミックレンジ化による測定結果の例を図 4.4 に示す。色選別電極のない単色 CRT の画面中央部の 1 ドットを表示し、カソード電流を  $5\mu\text{A}$  から  $300\mu\text{A}$  まで変化させて輝度分布を上述べた方法で撮像した。撮像の分解能は  $9\mu\text{m}/\text{ドット}$  である。グラフは輝度分布の水平断面を描いている。カソード電流  $5\mu\text{A}$  での発光は目視による視認限界 (数  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) に対応し、カソード電流  $300\mu\text{A}$  での発光は CRT の実使用条件の最高輝度  $120\text{cd}/\text{m}^2$  に対応する。カソード電流によって高感度の条件のゲインを変えたために、それぞれの分布のベースライン (図 4.3 中の  $100T_b/S_1$  に相当する) が異なっている。

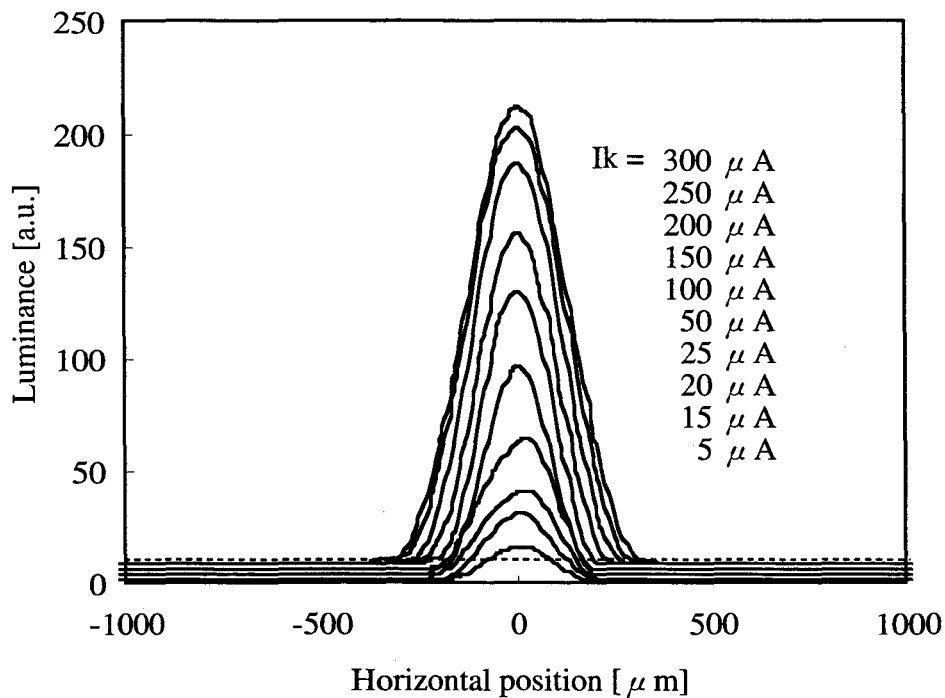


Fig. 4.4 Measurement results by the new method at cathode current  $I_k = 5, 15, 20, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 \mu\text{A}$ . Base line level of each distribution varies with  $I_k$  because  $T_h$  in Figure 4.2 differs according to the luminance of the beam spot.

図 4.4 において点線で示す輝度を閾値として求めたビーム水平径と、熟練者が通常使用する 25 倍の拡大鏡によって測定したビーム水平径の測定値の比較を図 4.5 に示す。ここで熟練者による測定は、カメラによる測定と同一の CRT を使用して行った。従来、大電流域においてはダイナミックレンジの不足により分布のテール部分が測定できなかつたためにビーム径の測定値が目視よりも大幅に小さくなつていたが、本方法によるダイナミックレンジの拡大により、目視と同等の測定値が得られた。また、従来は感度の不足により検出できなかった小電流域における分布を検出することもできた。

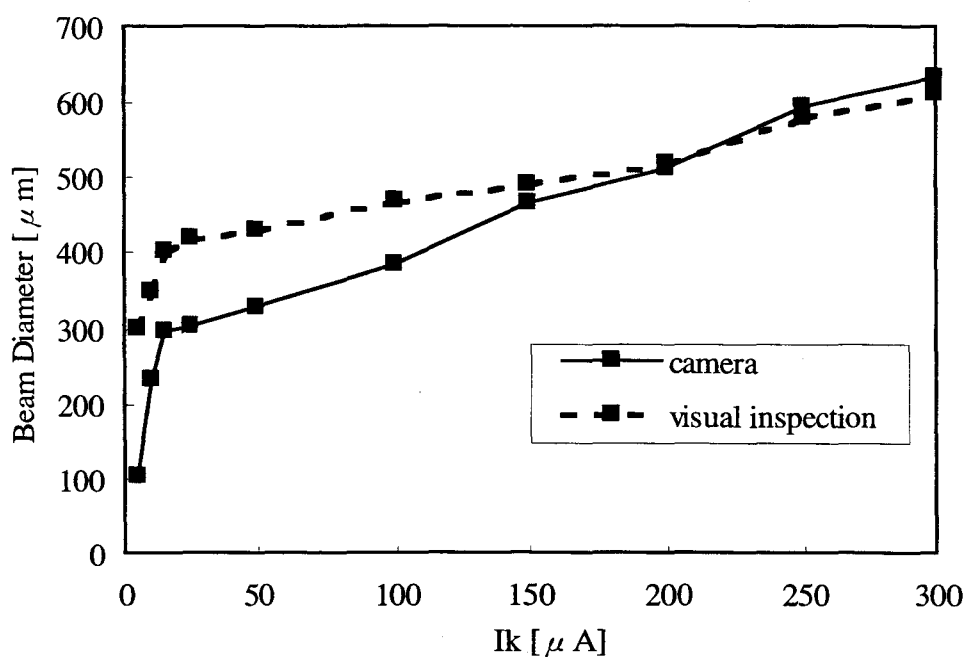


Fig. 4.5 Results of horizontal beam diameter from the new method and the visual inspection by the experienced engineer. Diameter by the new method is read at the same luminance level (dashed line in Figure 4.4).

大電流域でのカメラおよび熟練者による測定結果はほぼ一致しているが、小電流域では目視による測定結果の値が大きくなっている。この理由としては、カメラによる測定では全電流域においてビーム径を算出するための閾値輝度を一定（図 4.4 の点線）としたが、目視の場合は対象物の輝度が低下するに応じて視覚系の感度が上昇したことによるものと考えられる。従って、カメラによる測定結果からビーム径を算出する閾値を低く設定すると、小電流域ではカメラと目視による測定値が一致するが、大電流域ではカメラによる測定値が目視によるそれよりも大きくなる。

## 4.4 電子ビームスポット輝度分布の再構成法

### 4.4.1 従来の方法

電子ビームは色選別電極の開口を通過して、蛍光体に照射される。従って、電子ビームスポットを画面上から観察すると、開口部を通過した電子ビームに対応した蛍光面部分の発光が観察される。第2章で述べたように、画面上での発光を通して電子ビームの分布を測定する手段として以下の方法がある。

- (1) マスクによって遮蔽された部分の形状を補間によって推定する方法[27-29]
- (2) スポットの位置をずらして撮像した画像を組み合わせ、全体の分布を再構成する方法[30,31]
- (3) (1) と (2) を組み合わせる方法[32,33]

これらの中では (3) の方法が最も精度の良い測定を行うことが出来る。開口部がスリット状であるアパーチャグリル方式を例にとり、(3) による電子ビームスポット分布の再構成方法の原理を図 4.6 に示す。

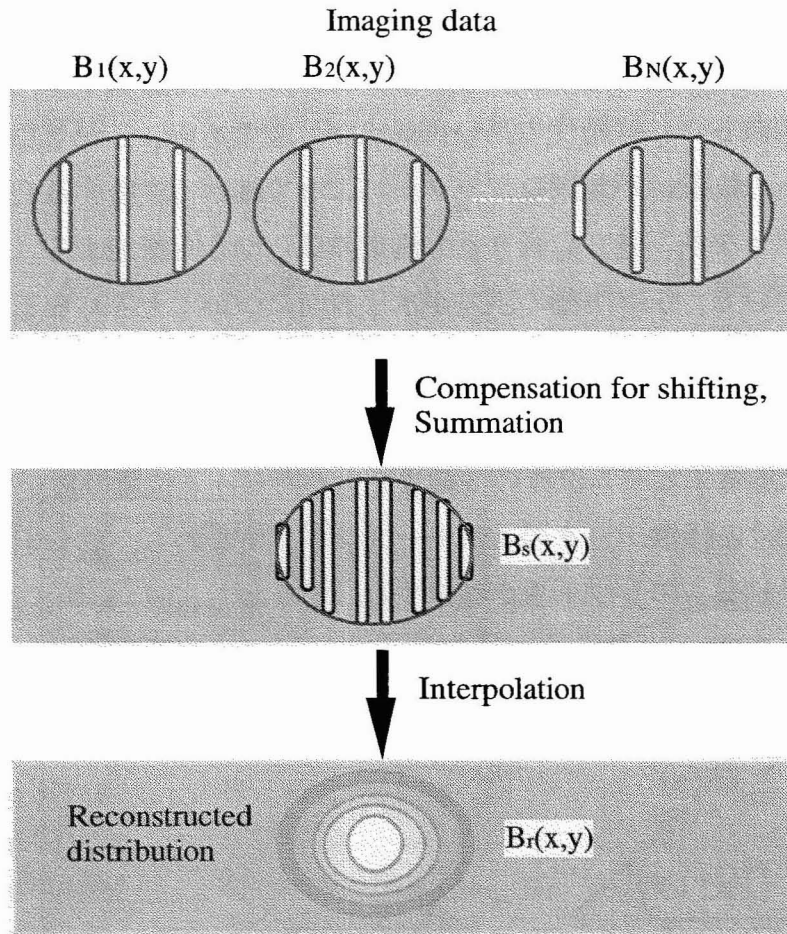


Fig. 4.6 Principles of the measurement.

$B_1(x,y) \cdots B_N(x,y)$ は水平方向に電子ビームスポットを  $N$  回ずらして撮像したそれぞれのデータである。各撮像データの中心を揃えて総和をとったものを  $B_s(x,y)$  とすると、 $B_s(x,y)$  は

$$B_s(x,y) = \sum_{i=1}^N B_i(x - x_i, y - y_i) \quad (4.3)$$

で与えられる。ただし、 $x_i$ 、 $y_i$  は各撮像データの中心であり、スポットの位置をシフトすることによって制御される。再構成像  $B_r(x,y)$  は、 $B_s(x,y)$  に対して補間処理を行うことによって得られる。補間にはスプライン補間や直線補間などの方法を用いる。

垂直方向の電子ビームのシフトは垂直同期信号のフロントポーチとバックポーチの

配分を変化させ、水平方向の電子ビームのシフトは水平同期信号のフロントポーチとバックポーチの配分を変化させることによって制御される。電子ビームのシフト量が目標どおりに制御されれば精度の高い再構成が可能である。しかしながら、実際にはビームスポットの位置は不規則なジッターによって細かく変動するため、再構成像が歪を伴った形状となり、さらに繰り返し測定のばらつきも増加する。特に、水平方向の変動が大きいので、シフト量の誤差が水平方向について大きくなる。

#### 4.4.2 重心によるビーム位置推定

ジッターによる電子ビーム位置の変動量を含めたビーム位置の推定を行う方法として、各位置における撮像データの1次モーメント、すなわち、重心を計算して各撮像データから電子ビームのシフト量を推定する。すなわち、

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_x \{H_i(x) x\}}{\sum_x H_i(x)} \quad (4.4a)$$

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_y \{V_i(y) y\}}{\sum_y V_i(y)} \quad (4.4b)$$

を  $(x_i, y_i)$  の推定値とする。ただし、

$$H_i(x) = \max_y \{B_i(x, y)\} \quad (4.5a)$$

$$V_i(x) = \max_x \{B_i(x, y)\} \quad (4.5b)$$

である。

重心計算による電子ビームのシフト量推定の精度を評価するために、シフト量推定のシミュレーションを行う。ビームスポットとしてガウス分布を仮定し、開口周期と5%強度径をパラメータとして重心計算によるエラー発生率を計算した結果を図 4.7 に示す。ここで、 $i$  番目の測定におけるエラー  $E_i$  の定義は、

$$\begin{aligned}
 E_i &= 1 && ; |\hat{x}_i - x_i| \geq d \\
 &= 0 && ; |\hat{x}_i - x_i| < d
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

とする。ただし、 $d$  は許容誤差であり、本シミュレーションではカメラによる撮像の分解能に相当する  $9\mu\text{m}$  とした。

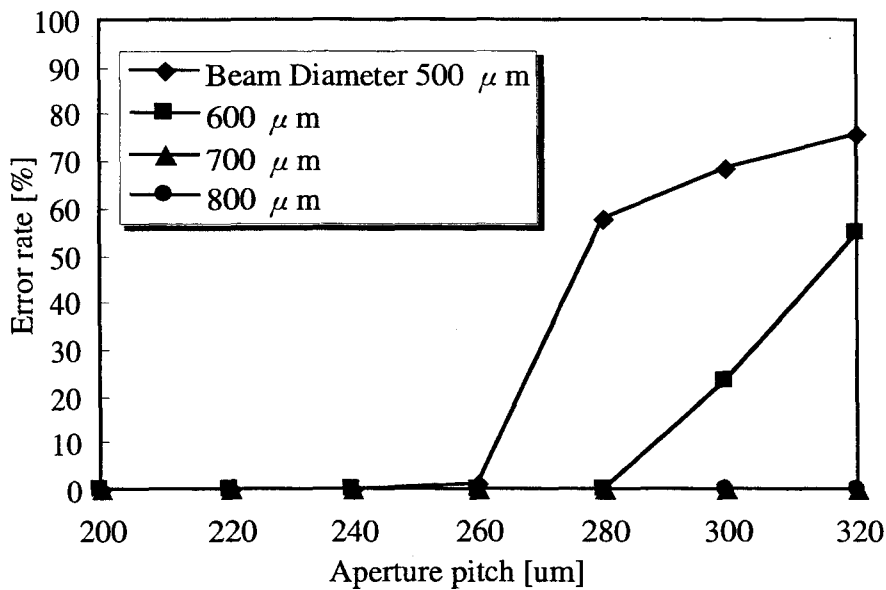


Fig. 4.7 Simulation results of error occurrences by the calculation of the center of gravity.

シミュレーションの結果から以下の事が明らかとなった。

- (1) マスク開口周期が大きく、電子ビームスポット径が小さくなるほど誤差発生  
の頻度が高くなる
  - (2) ビーム 5%径  $600\mu\text{m}$  以上、マスク開口周期  $260\mu\text{m}$  以下では誤差は発生しな  
い。
- (2) の条件は現在の CRT の設計において十分に満たすことができる条件であり、本  
手法がビームのシフト量の推定に有効であることが示された。

従来の手法および本手法によって測定した結果を図 4.8 に示す。再構成した電子ビ

ームスポットの水平断面を 10 回の繰り返し測定を重ねて描いた。

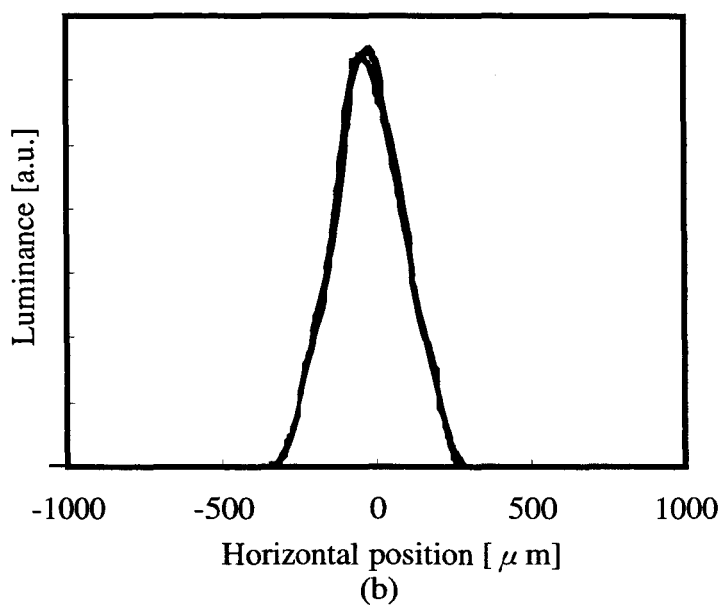
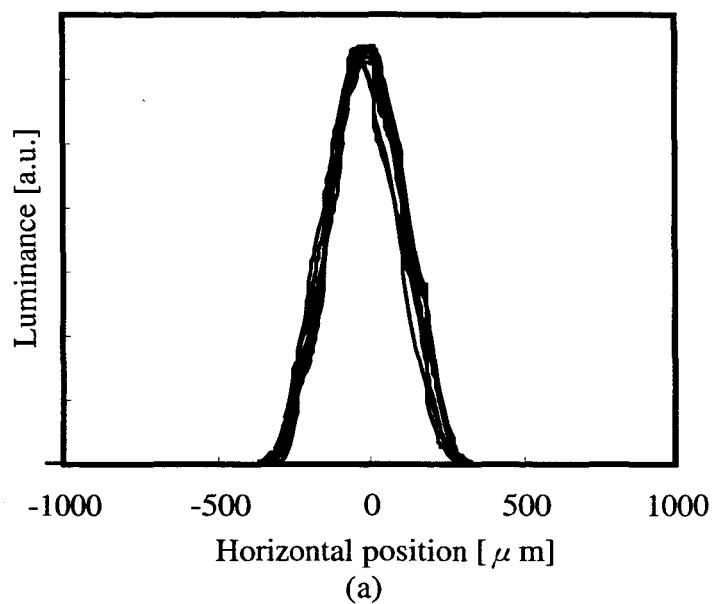


Fig. 4.8 Measurement results (a) conventional method (b) newly developed method. Each figure shows horizontal cross sections of the reconstructed beam spot by iterative measurements. Each center of the distribution of repetitions is put at the origin.

次に、図 4.8 に示した従来手法および本手法による測定結果のばらつきを比較する。



10回の繰り返し測定によって得られたデータから算出した水平および垂直方向の1、5、50%強度径の標準偏差を図 4.9 に示す。本手法は水平径の測定ばらつきを低減する効果が極めて顕著であり、5%強度径の繰り返し測定においては、標準偏差を従来(0.02mm)の4分の1(0.005mm)に低減することができた。水平径における効果が大きい理由は、ジッターによるスポット位置のゆらぎが垂直方向よりも水平方向に大きいことによるものと考えられる。

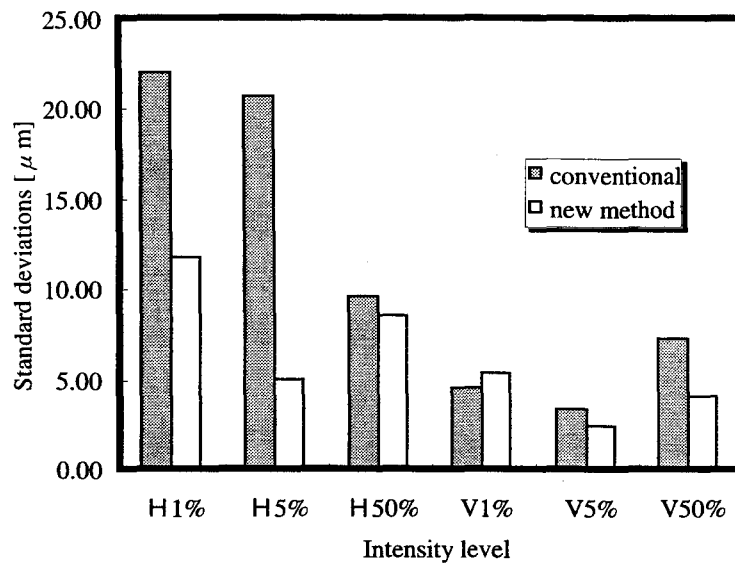


Fig. 4.8 Standard deviations of the repetition of ten measurements. Beam diameters are read at 1, 5, 50 % levels in the horizontal and the vertical directions respectively that are shown by H1%, H5%, H50%, V1%, V5%, V50%.

## 4.5 結言

本章では、CRT の分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法について述べた。まず、目視と同等の感度とダイナミックレンジを実現するために、ICCD カメラを用いた二段階感度による撮像法を提案し、カソード電流が極めて微弱な電流域から最高輝度に対応した大電流域に至るまでの広い電流範囲において電子ビームスポット輝度分布の測定が可能となった。具体的には、カソード電流が  $5\mu\text{A}$  から  $300\mu\text{A}$  に至る範囲のビームスポットに対し、輝度の絶対レベルを補償しつつ、裾野部からピークにいたる全体の形状を測定することが可能となった。

さらに、従来の画像処理方法によるスポット形状の再構成においてジッターノイズに起因した測定結果のばらつきが生じる問題に対し、シフト量の誤差を補償した再構成アルゴリズムを提案し、繰り返し測定の再現性が向上することを示した。具体的には、撮像画像の 1 次モーメントによって実際のシフト量を推定する機能をスポット形状の再構成アルゴリズムに組み込むことによって、再現性を向上させた。その結果、ビームスポットの 5% 強度水平径の繰り返し測定においては、標準偏差が  $0.02\text{mm}$  から  $0.005\text{mm}$  へと従来の 4 分の 1 に低減することができた。

## 第 5 章

# 液晶カラーシャッターを応用した マスクレス超高精細 CRT

### 5.1 序言

電子ディスプレイの用途が多様化する中で、高精細化と大画面化の両立に対する要求が強い。例えば、写真や絵画をデジタルデータとして保存・表示するデジタルアーカイブや、画像の電子データ化が進行している医療システムにおいて、水平画素数が 2000 ドット以上、画面サイズ 20 インチ以上の超高精細ディスプレイの実現に対する要求が強い[34]。

これらの要求に対して、各種方式のディスプレイデバイスによる研究開発が盛んである。例えば LCD (Liquid Crystal Display) では、現在画面サイズ 18 インチ、水平画素数 1280 ドットないし 1600 ドットが大型サイズの製品としての典型的な仕様であるが、超高精細ディスプレイへのアプローチとして、画面サイズ 22 インチ、画素数水平 2048×垂直 1536 ドット (QXGA) のパネルの試作[51]も報告されている。CRT (Cathode Ray Tube) では、画面サイズ 21 インチ、画素数水平 1600×垂直 1200 ドット (UXGA) がすでに大型サイズの製品としての典型的な仕様であり、LCD と同様に超高精細化への検討が行われている。

CRT の他のデバイスに対する優位性は、材料・製造コストが安価であること、色再現性や時間応答性などの表示性能に優れること、電子ビームの走査による表示のため表示画素数の切り替えを画質の劣化がなく行えることなどである。その反面、シャドウマスクやアパーチャグリルなどの色選別構造によるカラー表示の原理に起因するモアレ、ミスコンバーゼンス (色ずれ)、文字の欠けなどの欠点を有し、これらの欠点は超高解像度化に伴って顕著となる。

色選別構造を使用しない CRT のカラー表示方式としては、ビームインデックス方

式[36]やフィールド順次方式[37]などが知られている。ビームインデックス方式は小型の TV として実用化されたが、NTSC 以上の映像信号の周波数で走査・変調された電子ビームを 20 インチ以上の画面上にインデックス信号により精度良く位置決めすることが技術的に困難であったために、大型の超高精細ディスプレイに適用されるまでには至らなかった。一方、フィールド順次方式においては、20 インチ以上の画面サイズで色フィールドの高速切り替えを行うことができるデバイスが存在しなかったが、最近、高速に偏光を制御することが可能な大画面強誘電性高分子液晶パネルとそれを応用した立体ディスプレイが報告され[52]、フィールド順次方式への適用が期待された。

本章では、モアレや色ずれ、色純度劣化など従来の CRT が持つ色選別構造に起因する画質劣化を解消するための方式として、フィールド順次式カラー表示によるマスクレス CRT について論じる[43,44]。ここでは、上に述べた強誘電性高分子液晶パネルによる液晶カラーシャッターを用いたフィールド順次式 CRT により、大画面超高精細ディスプレイが実現可能であることを示す。そのために、液晶カラーシャッターの電気光学効果をモデル化し、これに視覚特性による色知覚の評価式を組み合わせ、色再現性や透過率などの基本的な表示特性をシミュレーションによって評価する手法について述べる。さらに、インライン式電子銃による 3 ビーム同時走査方式におけるビーム輝度分布ばらつきの平均化手法を提案する。そして、以上に基づいて作製したプロトタイプの性能評価を行い、本方式の有効性を検証する。

## 5.2 フィールド順次式カラー表示の原理

ディスプレイのカラー表示の原理は、RGB 画素の並置もしくは重畳による空間的な加法混色と RGB 映像の継時的な切り替えによる時間的な加法混色に分類される。これまで空間的な加法混色によるカラー表示が広く採用されてきた一方で、時間的な加法混色によるカラー表示はフィールド順次式と呼ばれ古くから知られていたが、一部のディスプレイに適用されるにとどまっていた。しかし、色フィールドの切り替えを高速に行うためのカラー光源や光変調素子の進歩や、ディスプレイの超高精細化への要求などを背景として、最近再び注目を受けるようになった。

フィールド順次式ディスプレイは、RGB それぞれの輝度成分によって変調されたモノクロ映像を順次に形成する要素と、RGB の光を順次に形成する要素から構成され、前者は表示体、後者は色フィールド形成体と呼ばれる。表示体と色フィールド形成体にはいくつかの組み合わせがあり、例えばフィールド順次式の LCD では、前者はマトリクス画素を有する液晶パネル、後者は LED など 3 原色で発光可能なバックライトであり、本章で述べるフィールド順次式 CRT においては、前者はモノクロ CRT、後者は液晶カラーシャッターである。

フィールド順次式 CRT の原理を図 5.1 に示す。モノクロ CRT は RGB のそれぞれの輝度信号によって変調されたモノクロ映像を順次に表示し、液晶カラーシャッターはモノクロ CRT の表示に同期して透過する波長帯域を RGB の順に切り替える。映像は CRT によって表示されるので、液晶カラーシャッターは通常の LCD のような画素構造を持たない。CRT によって表示されるモノクロ映像およびカラーシャッターの切り替え周波数（フィールド周波数）は、カラー映像のフレーム周波数の 3 倍となり、フレーム周波数が 60Hz の場合はフィールド周波数は 180Hz となる。

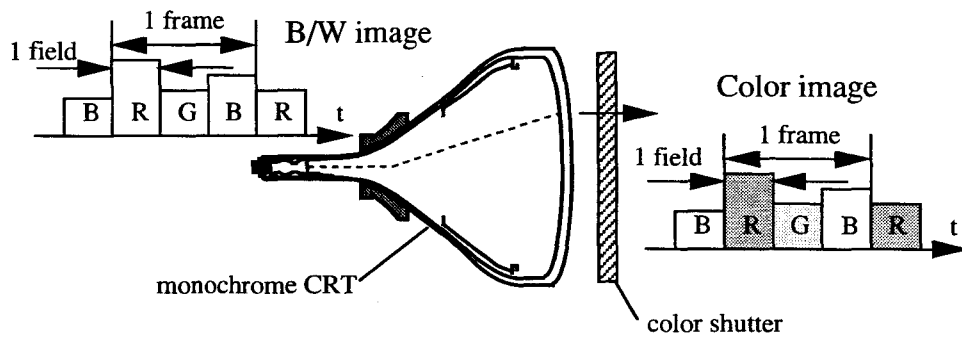


Fig.5.1 Principle of the field sequential color CRT: The monochrome CRT displays sequentially the black and white field images, each modulated by R, G or B luminance signal respectively. The white incident lights pass through the color shutter and then are converted into R, G and B field images, respectively.

## 5.3 強誘電性液晶パネルの光学特性

カラーシャッターを実現するためのスイッチング素子として、複屈折性による電気光学効果を示す強誘電性液晶パネル[52]を使用した。本節では強誘電性液晶パネルの構成と特性について述べる。尚、本論文では強誘電性液晶パネルを FLC(P(Ferroelectric Liquid Crystal Polymer)) と呼ぶ。

### 5.3.1 FLC の構成

透明電極 (ITO) が形成された対抗するプラスチック基板間に高分子量の強誘電性液晶層が形成される。液晶層の膜厚は約  $2.4\mu\text{m}$  で、透明電極間電圧を  $+15\text{V}$  もしくは  $-15\text{V}$  に切り替えることによって液晶分子の向きを制御することができる。電圧切り替えによる液晶の応答時間は  $1\text{msec}$  以下であり、フィールド切り替えに十分な高速応答性を有する。

### 5.3.2 FLC の分光透過率特性

一軸性媒質である強誘電性液晶の電気光学効果を説明するためのモデルを図 5.2 に示す。パネル面の法線方向すなわち光の伝搬方向を  $z$  軸とし、パネル面内に  $\xi$ 、 $\eta$  軸をとる。液晶分子はパネル面内で基板面に並行に配向し、液晶分子の異常光線偏光方向の光学軸  $e$  と  $\xi$  軸のなす角度を  $\phi$  とする。液晶分子の光学軸  $e$  方向の異常光屈折率を  $n_e$ 、 $e$  と直交する常光線偏光方向の軸  $o$  方向の常光屈折率を  $n_o$ 、液晶層の膜厚を  $d$  とする。今回使用した FLC では印加電圧の極性を  $+$  から  $-$  を切り替えることによって、 $\phi$  が  $0$  または  $\pi/4$  に制御される。

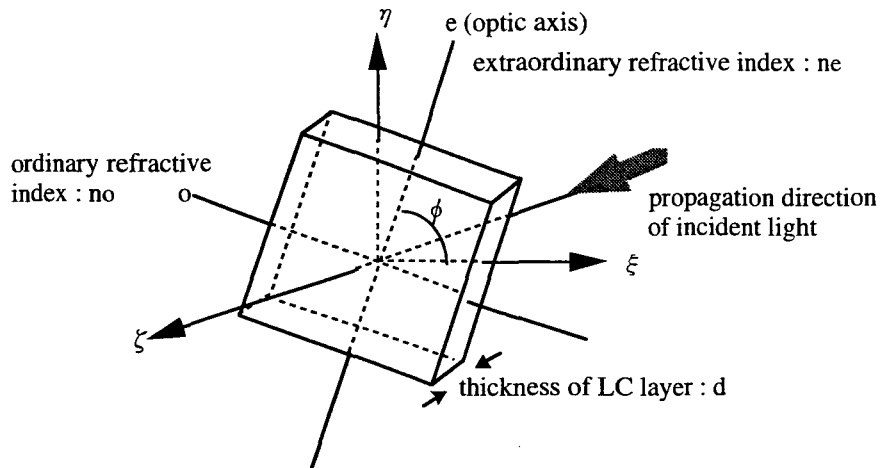


Fig.5.2 Light propagation model in uniaxial medium :Switching the polarity of applied voltage sets  $\phi$  to 0 or  $\pi/4$ .

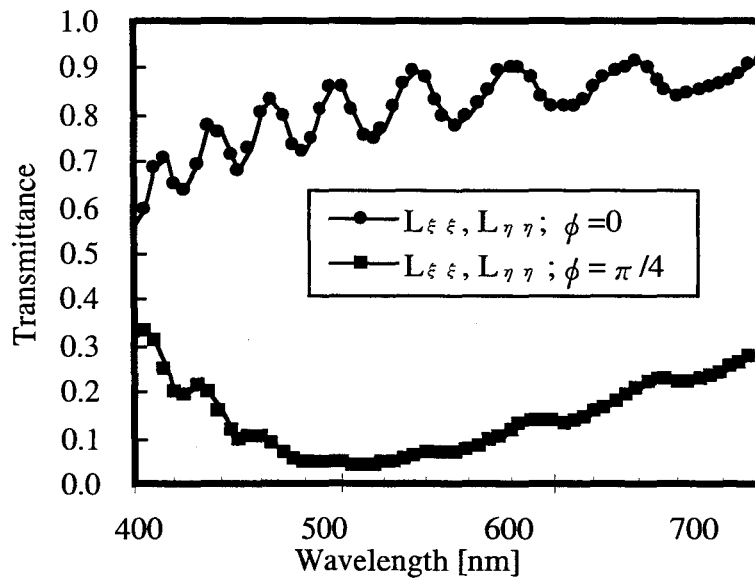
今、単位強度の  $\xi$  軸方向の直線偏光がパネルに入射した時の出射光の  $\xi$  軸方向および  $\eta$  軸方向それぞれの偏光成分の強度を  $L_{\xi\xi}$  および  $L_{\xi\eta}$  とし、単位強度の  $\eta$  軸方向の直線偏光の入射に対する出射光の  $\xi$  軸方向および  $\eta$  軸方向それぞれの偏光成分の強度を  $L_{\eta\xi}$  および  $L_{\eta\eta}$  とする。図 5.2 に対応したジョーンズ行列による強度成分の計算を行うと、 $L_{\xi\xi}$ 、 $L_{\xi\eta}$ 、 $L_{\eta\xi}$ 、 $L_{\eta\eta}$  は

$$\begin{aligned}
 L_{\xi\xi} = L_{\eta\eta} &= \cos^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right) && ; \phi = \frac{\pi}{4} \\
 L_{\xi\xi} = L_{\eta\eta} &= 1 && ; \phi = 0
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

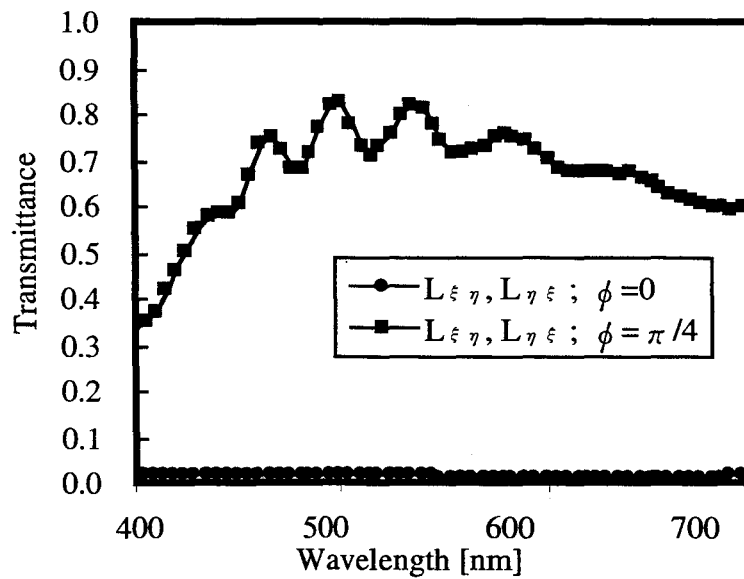
$$\begin{aligned}
 L_{\xi\eta} = L_{\eta\xi} &= \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right) && ; \phi = \frac{\pi}{4} \\
 L_{\xi\eta} = L_{\eta\xi} &= 0 && ; \phi = 0
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

で与えられる[54]。ここで、 $\lambda$  は波長、 $\Delta n = |n_e - n_o|$  である。 $\Delta nd$  は FLCP 内でのリタデーションである。式(5.1)、式(5.2)は電圧の印加による分光透過率特性の切り替えを表している。実際に使用した強誘電性液晶パネルにおけるこれらの実測値を図 5.3 に示す。図における曲線上の小さな波構造は液晶パネル内での繰り返し光反射による干渉に起因するものである。





(a)  $L_{\xi\xi}, L_{\eta\eta}$



(b)  $L_{\xi\eta}, L_{\eta\xi}$

Fig.5.3 Measured value of spectral transmittance characteristics FLCP: Transmittance was measured in the condition where the polarizer and the analyzer are in the positional relationship of paranicol (a) and crossnicol (b).

## 5.4 液晶カラーシャッターの設計

### 5.4.1 色フィールド切り替えの原理

FLCP と偏光板を組み合わせたカラーシャッターの構成と、色フィールド切り替えの原理を図 5.4 に示す。カラーシャッターは 2 枚の FLCP と 5 枚の偏光板から成る。2 枚の FLCP を入射面側から FLCP1、FLCP2 と表し、5 枚の偏光板を順に P1、P2、P3、P4、P5 と表す。各々の偏光板は吸収軸の方向と透過特性がそれぞれ異なり、うち 4 枚は吸収軸の透過特性が波長選択性を有するカラー偏光板であり、1 枚が吸収軸の透過率が全波長にわたって 0 となるニュートラル偏光板である。図中に各偏光板の垂直および水平偏光に対する透過色を RGB で記した。FLCP の機能は、カラーシャッターの原理を示すための簡単化のために、分光透過率分布は考慮せずに偏光面の回転のみとした。すなわち、 $\phi = 0$  の時は  $L_{\xi\xi} = L_{\eta\eta} = 1$ 、 $L_{\xi\eta} = L_{\eta\xi} = 0$ 、 $\phi = \pi/4$  の時は  $L_{\xi\xi} = L_{\eta\eta} = 0$ 、 $L_{\xi\eta} = L_{\eta\xi} = 1$  とした。

FLCP1 と FLCP2 における  $\phi$  をそれぞれ  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  とすると、カラーシャッターは  $\phi_1 = \phi_2 = 0$  の時に R 光を透過し、 $\phi_1 = 0$ 、 $\phi_2 = \pi/4$  の時に G 光を、 $\phi_1 = \pi/4$ 、 $\phi_2 = 0$  の時に B 光を透過する。これら 3 つの状態に対応して FLCP への印加電圧をフィールド周波数で順次に切り替えることにより、カラーシャッターとして機能する。尚、この図の場合は  $\phi_1 = \phi_2 = \pi/4$  の状態は使用しない。

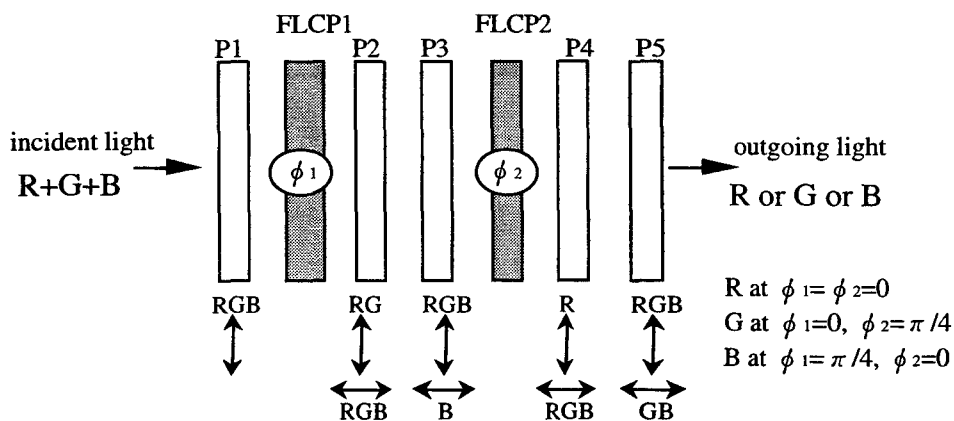


Fig.5.4 Configuration of the color shutter and the principle of color field switching: For simplicity, only the rotation of the polarization direction without considering

the distribution of spectral transmittance characteristics of FLCP shown in Fig.5.3.

#### 5.4.2 カラーシャッターの色再現性能

カラーシャッターを構成する最適な偏光板を決定するために、以下に FLCP と偏光板の透過特性をパラメータとしてカラーシャッターの色再現特性を定式化する。カラーシャッターへの入射光の  $\xi$  軸および  $\eta$  軸方向の偏光成分 ( $I_\xi$ 、 $I_\eta$ ) と出射光の偏光成分 ( $O_\xi$ 、 $O_\eta$ ) の関係は、

$$\begin{bmatrix} O_\xi \\ O_\eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{5\xi} & 0 \\ 0 & P_{5\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{4\xi} & 0 \\ 0 & P_{4\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\xi\xi} & L_{\eta\xi} \\ L_{\xi\eta} & L_{\eta\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{3\xi} & 0 \\ 0 & P_{3\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{2\xi} & 0 \\ 0 & P_{2\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\xi\xi} & L_{\eta\xi} \\ L_{\xi\eta} & L_{\eta\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{1\xi} & 0 \\ 0 & P_{1\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\xi \\ I_\eta \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

で与えられる。ただし、 $P_{1\xi} \sim P_{5\xi}$  および  $P_{1\eta} \sim P_{5\eta}$  は、図 5.4 における偏光板 P1～P5 の  $\xi$  軸および  $\eta$  軸方向の偏光に対する分光透過率特性を示している。行列の要素はすべて波長  $\lambda$  の関数である。カラーシャッターへの入射光  $I_\xi$ 、 $I_\eta$  は、無偏光のモノクロ CRT の発光光であるので  $I_\xi = I_\eta$  である。

カラーシャッターからの出射光の CIE1931XYZ 表色系における三刺激値 X、Y、Z は、

$$X = K \int O(\lambda) x(\lambda) d\lambda \quad (5.4a)$$

$$Y = K \int O(\lambda) y(\lambda) d\lambda \quad (5.4b)$$

$$Z = K \int O(\lambda) z(\lambda) d\lambda \quad (5.4c)$$

で表される。 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$  は等色関数、 $K$  は定数である。ただし、 $O(\lambda)$  は

$$O^2(\lambda) = O_x^2(\lambda) + O_y^2(\lambda) \quad (5.4d)$$

で与えられる。色度座標  $(x,y)$  は  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  から式(5.5a)、式(5.5b)で計算される。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (5.5a)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5.5b)$$

FLCP1、2 は印加電圧に応じてそれぞれ 2 状態をとるので、入射光に対し 4 通りの出射光の色度座標が得られる。

### 5.4.3 カラーシャッターの評価指標

カラーシャッターの性能を表す評価指標を以下のように定める。

#### a. 色再現範囲 $S$

4 通りの出射光の色度座標から、NTSC における 3 原色の色度座標  $R$  (0.67、0.33)、 $G$  (0.21、0.71)、 $B$  (0.14、0.33) との距離が最も近い座標をそれぞれ選択し、これらを  $RGB$  の座標点と定める。 $xy$  色度図上で  $RGB$  の座標点によって囲まれた領域の面積  $S$  を色再現範囲と呼び、色再現性の指標とする。

#### b. 平均透過率 $T_w$

$RGB$  光それぞれを出射する際の視感透過率の平均値をカラーシャッターの平均透過率  $T_w$  は、

$$T_w = \frac{100}{3} \left( \frac{K \int O_r(\lambda) y(\lambda) d\lambda}{K \int I(\lambda) y(\lambda) d\lambda} + \frac{K \int O_g(\lambda) y(\lambda) d\lambda}{K \int I(\lambda) y(\lambda) d\lambda} + \frac{K \int O_b(\lambda) y(\lambda) d\lambda}{K \int I(\lambda) y(\lambda) d\lambda} \right) \quad (5.6)$$

で与えられる。ただし、 $O_r(\lambda)$ 、 $O_g(\lambda)$ 、 $O_b(\lambda)$ はRGBそれぞれの光を出力する状態において式(5.3)および式(5.4d)によって得られる出射光である。

#### c. 白色色度偏差 $d_w$

RGB 光の色度座標とそれぞれを出射する際の視感透過率から白色表示の色度座標を計算し、これと目標白色色度との距離を白色色度偏差  $d_w$  とする。尚、目標白色色度は従来方式による CRT モニターの白色色度の (0.28,0.31) とする。

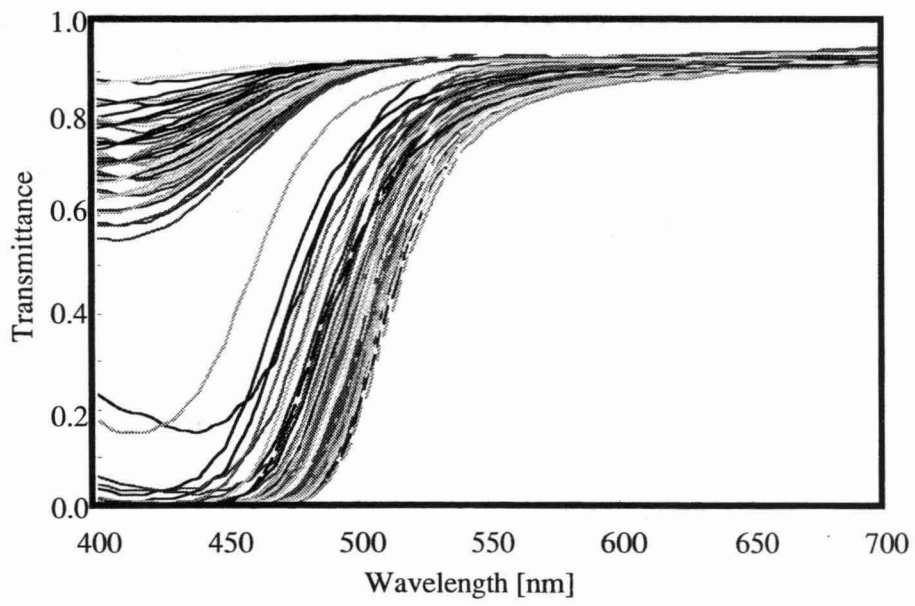
### 5.4.4 カラー偏光板の決定方法

#### a. カラー偏光板の色相

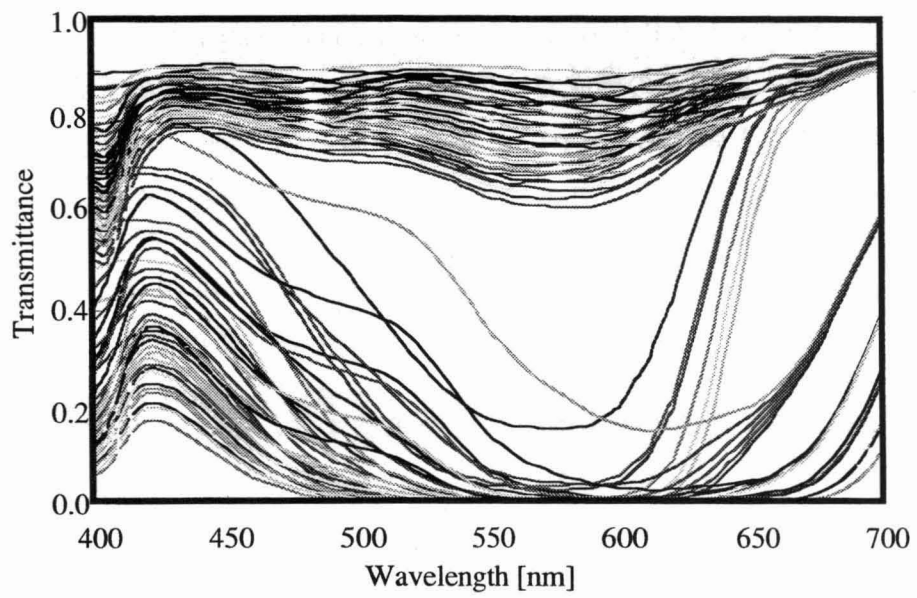
色フィールド切り替えの原理を示した図 5.4 においては、P2~P5 にそれぞれ Yellow (吸収軸  $\eta$  軸)、Blue (同  $\xi$  軸)、Red (同  $\eta$  軸)、Cyan (同  $\xi$  軸) の色相を有する偏光板を配置しているが、FLCP の偏光に対する透過特性は図 5.3 に示したように波長依存性を有するため、図 5.4 の構成では色純度の高い RGB の出射光が得られない。FLCP の波長依存性を考慮すると、P3 に Violet (吸収軸  $\xi$  軸) の色相を、P5 に Blue (同  $\xi$  軸) の色相を選択するとより色純度の高い RGB の出射光が得られる。尚、P1 には  $\xi$  軸を吸収軸とするニュートラル偏光板を使用する。

#### b. 各色相の分光透過率特性の調整

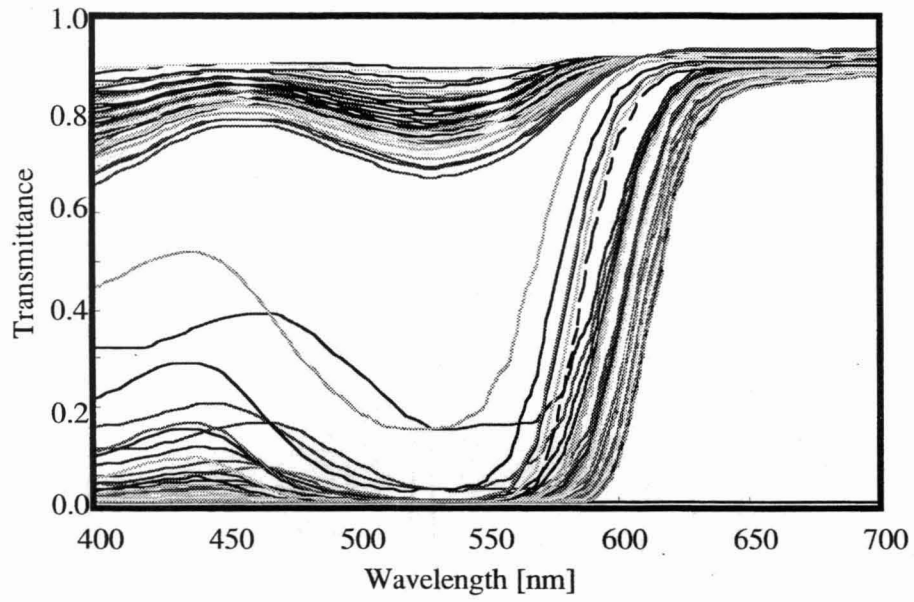
次に、P2~P5 の偏光板の分光透過率特性を調整することにより、カラーシャッターの性能を最適化する。P2~P5 の各色相について、分光透過率特性を段階的に変化させたデータによる評価指標のシミュレーションを行い、そこから最適なカラーシャッターの性能を与えるデータを選択する。シミュレーションに用いるデータは、その色相に属する吸光特性の異なる二つの色素の比率を変えながら混合することを想定して作成した。ただし、Blue については単一の色素の濃度を段階的に変化させたデータとした。シミュレーションに用いた Yellow、Violet、Red、Blue のデータを図 5.5(a)~(d)に示す。



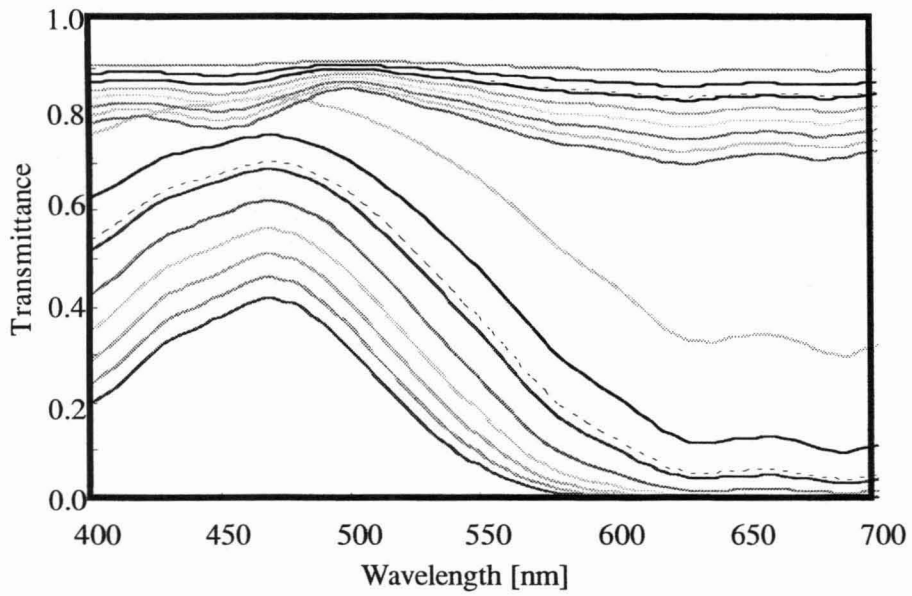
(a) Yellow



(b) Violet



(c) Red



(d) Blue

Fig.5.5 Spectral transmittance characteristics of the polarizer used in the simulation: Mixing ratio between color elements was assumed to be changed in steps at (a),(b) and (c). Density of blue element was assumed to be varied at (d).

カラーシャッターへの入射光の分光特性である P45 蛍光体の発光強度分布を図 5.6 に示す。FLCP の特性  $L_{\xi\xi}$ 、 $L_{\xi\eta}$ 、 $L_{\eta\xi}$ 、 $L_{\eta\eta}$  としては、図 5.3 に示した実測値を用いた。

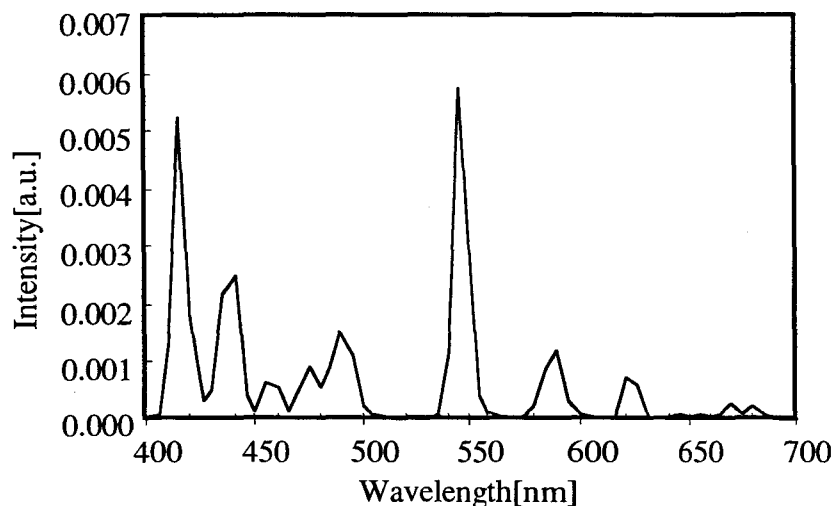


Fig.5.6 Spectral intensity distribution of P45 phosphor

以上に述べた分光透過率データを用い、すべての組み合わせについてカラーシャッターの色再現範囲  $S$  と平均透過率  $T_w$  および白色色度点偏差  $d_w$  を計算した。白色色度偏差  $d_w$  が 0.046 以下となる組み合わせについて、 $S$  と  $T_w$  の計算結果をプロットした結果を図 5.7 に示す。この図から、カラーシャッターの色再現範囲  $S$  と平均透過率  $T_w$  がトレードオフ関係にあることがわかる。5.6 節において述べるプロトタイプの構成として、図中の黒丸で示した点を与える偏光板の組み合わせを選択した。



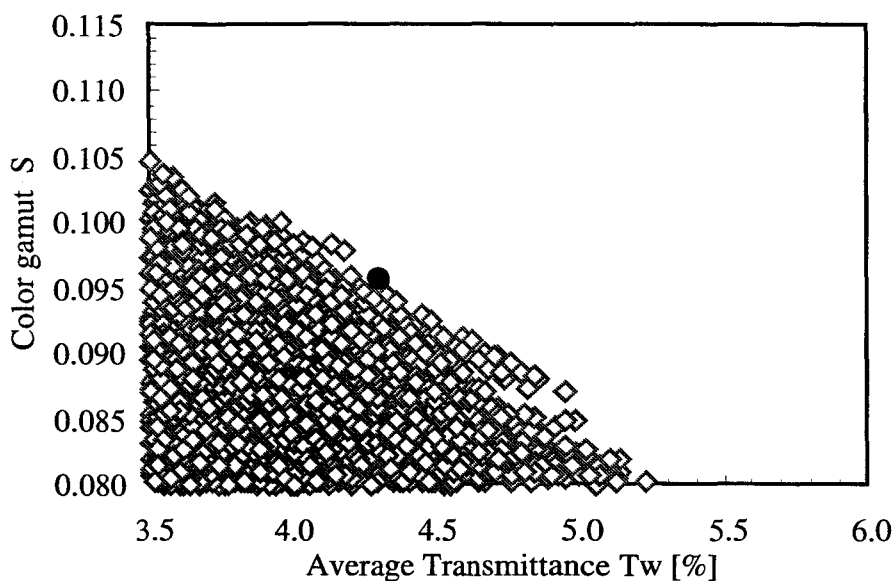
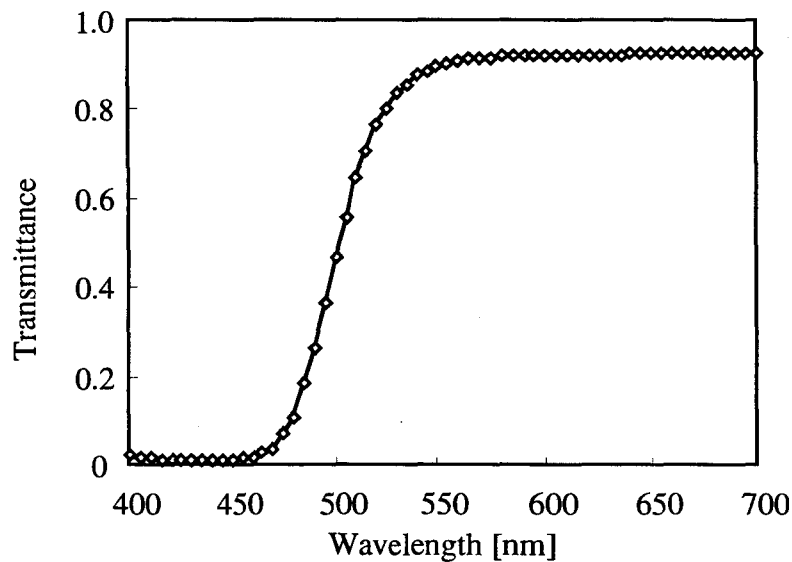
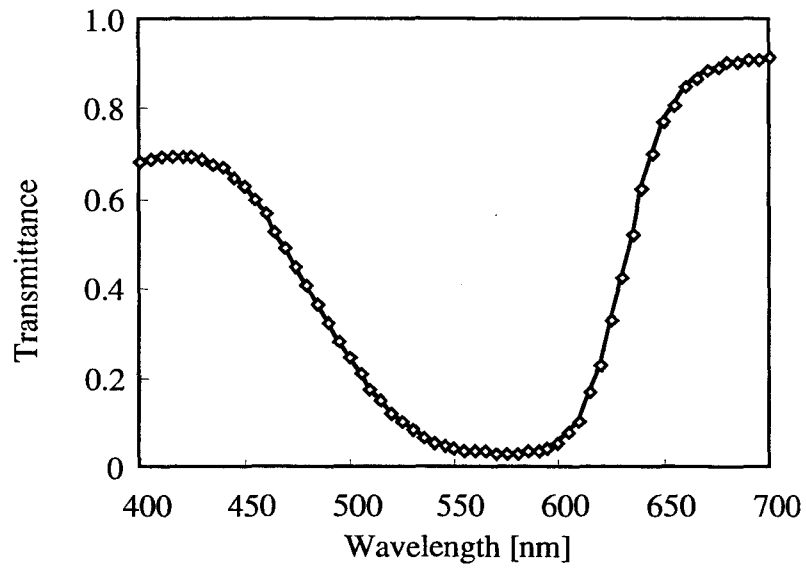


Fig.5.7 Calculation results of the transmittance and the color gamut : The combination of polarizers selected for the prototype falls at the black point.

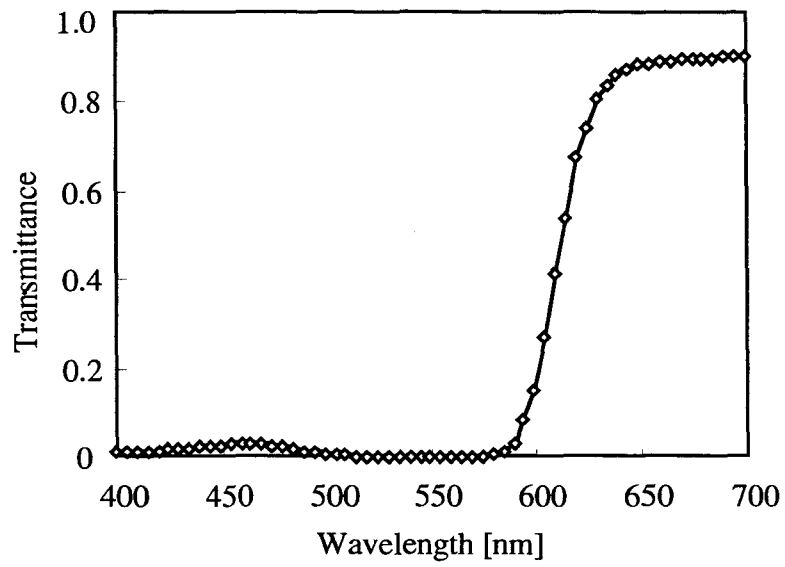
選択した Yellow、Violet、Red、Blue 各色相の偏光板の分光透過率特性データを図 5.8(a)~(d)に示す。この構成における色再現範囲  $S$  は 0.096 (NTSC 比 63%)、平均透過率  $T_w$  は 4.3%、白色色度点偏差  $d_w$  は 0.046 であった。



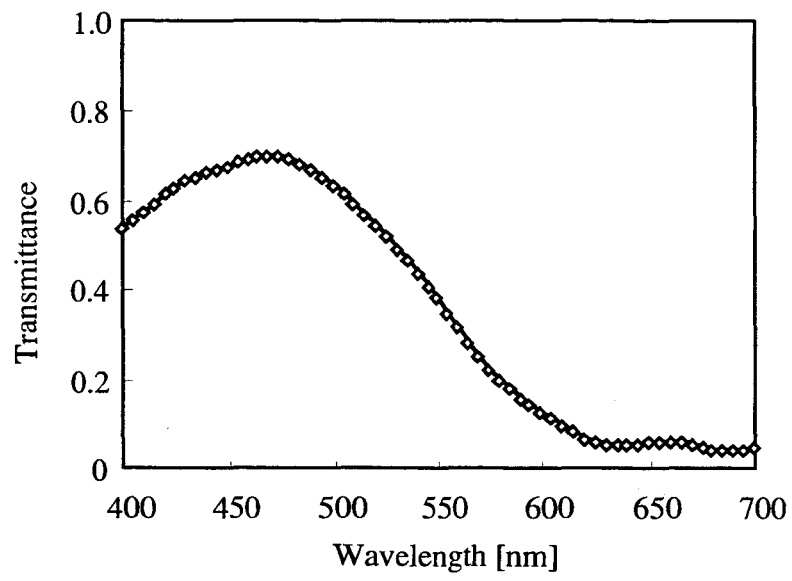
(a) Yellow



(b) Violet



(c) Red



(d) Blue

Fig.5.8 Spectral transmittance characteristics of the polarizer determined by the simulation:

## 5.5 モノクロ CRT の電子ビーム走査方式

### 5.5.1 3ビーム同時走査方式

フィールド順次方式では、RGB の各フィールドに対応するモノクロ映像をフレーム周波数の3倍のフィールド周波数で順次に形成する。従って、通常の単一ビーム方式のCRTを使用するとマスク式カラーCRTの3倍の周波数で電子ビームを走査しなければならない。また、マスク式カラーCRTに比べて1/3の輝度しか得られない。これらの問題を解決するために、カラーCRT用インライン型3ビーム方式の電子銃を使用し、3本の電子ビームを垂直方向に走査線間隔を保ちながら蛍光面を同時に走査する3ビーム同時走査方式[55]を適用した。3ビーム同時走査方式によって1フィールドに対応する画面を形成する基本的な方法を図5.9に示す。走査線の本数を $m$ とした時、 $m/3$ 回の水平走査で1フィールドが形成される。従って、電子ビームの水平走査周波数は単一ビーム方式の1/3、すなわちマスク式カラーCRTと同じ水平走査周波数となる。

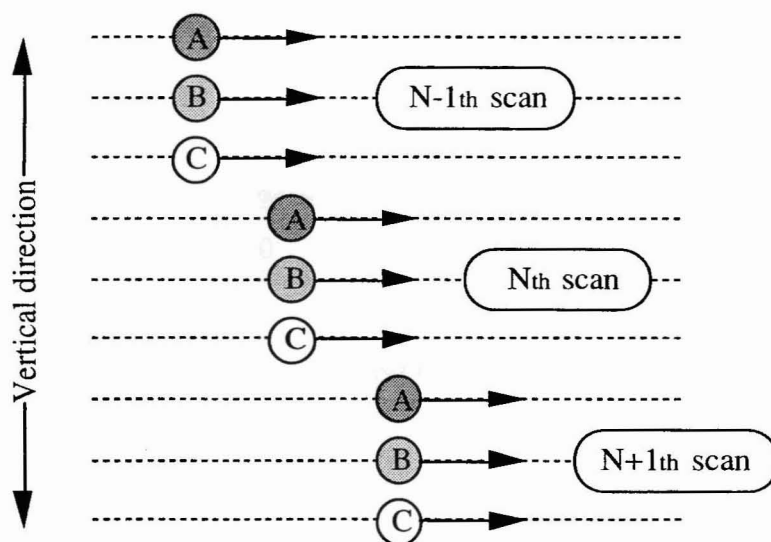


Fig. 5.9 Principle of the formation of one field by three-line simultaneous scanning.

カラーCRT用インライン型3ビーム方式の電子銃では水平方向に一定の間隔をおいて3本の電子ビームが放出される。水平方向に並んだビームを垂直方向に配置させ

る原理を図 5.10 に示す。ビーム制御コイルにて形成される 4 極の磁界分布(a)(b)を発生させ、(a)の磁界によってビームの軌道を重ね、(b)の磁界によって上下にそれぞれシフトさせる。これによって、電子ビームを垂直方向に一定間隔に配置させることができる。

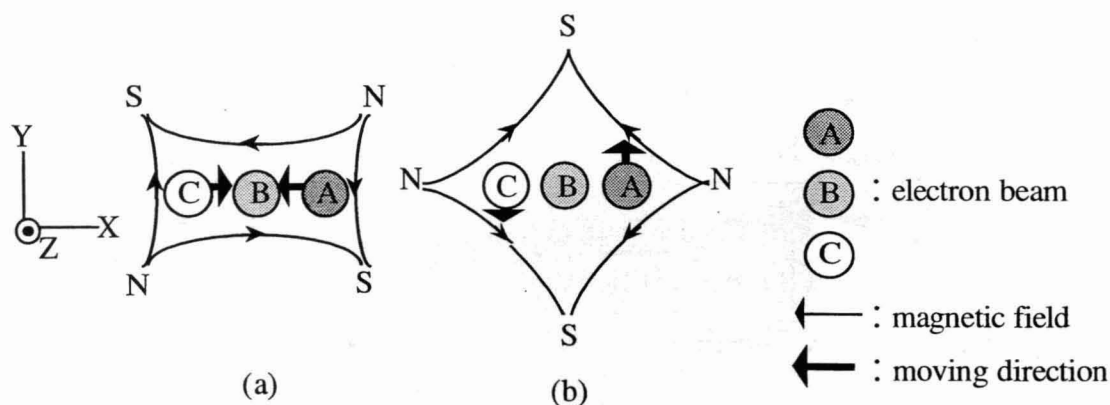


Fig. 5.10 Theoretical description of vertical alignment of beams: Magnetic fields (a) and (b) are combined.

## 5.5.2 ビーム輝度分布の平均化法

以上に示した 3 ビーム同時走査によるフィールド画面形成方法では、3 本の電子ビームの輝度分布の違いに起因し、画面上に 3 走査線ピッチごとの周期構造を持つ妨害が知覚されるという問題が生じる。この問題を解決するための方法を図 5.11 に示す。

奇数番目のフィールドにおいては、 $N$  回目の水平走査におけるビーム C と  $N+1$  回目の水平走査におけるビーム A が同じ位置を走査する。次の偶数番目のフィールドにおいては、垂直方向に 1 走査線ピッチ分のオフセットを持たせて走査する。この様に電子ビームを走査すると、それぞれの走査線位置は奇数番目と偶数番目の 2 フィールドに渡り 3 本の電子ビームによって 1 回ずつ走査される。このため各走査線位置の輝度分布は時間的な積分効果によって見かけ上平均化されて等しく見え、上に述べた走査線妨害の問題を回避することができる。走査線の本数を  $m$  とした時、この方法では  $m/2$  回の水平走査で 1 フィールドを形成するため、水平走査周波数は単一ビーム方式の  $1/2$ 、すなわちシャドウマスク式カラー CRT の 1.5 倍となるが現在の回路技

術では問題のない範囲である。今回は、本方式によってモノクロ CRT の走査線制御を行った。

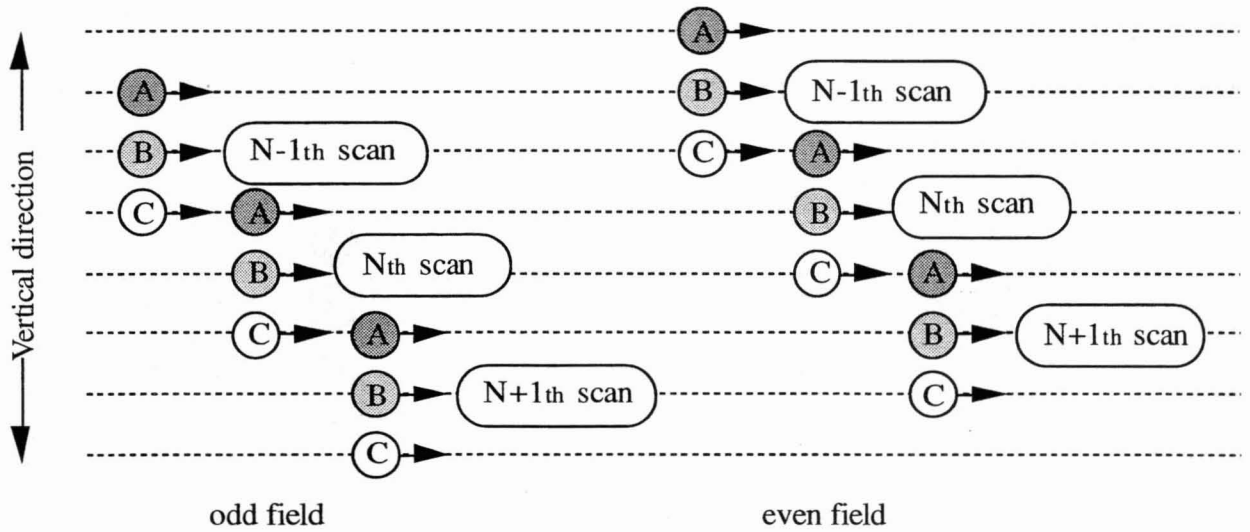


Fig. 5.11 Reduction of the raster modulation: Starting position of the scanning in two adjacent fields differ by 1 line with each other. All lines are scanned once per odd-even field cycle by three electron beams.

## 5.6 プロトタイプによる検証

5.4 節で述べた構成のカラーシャッターと 5.5 節で述べた電子ビームの制御方法による 21 インチサイズのモノクロ CRT を組み合わせたプロトタイプを作製した。プロトタイプの外観を図 5.12 に示す。以下ではプロトタイプの基本的な表示性能の評価結果について述べる。



Fig. 5.12 Photograph of a 21-in. field sequential color CRT prototype.

色再現範囲の実測結果を図 5.13 に示す。測定はトプコン社製色彩色差計 BM-7A を用いて暗室にて行った。点線は 5.4 節で述べた設計値であり、実線は実測値である。実測はフィールド切り替えを行わずに直流電圧の印加によって各 3 原色を表示した時（スタティック駆動）の測定結果と、180Hz のフィールド周波数でフィールド切り替えを行いながら各 3 原色を表示した時（ダイナミック駆動）の測定結果である。色再現範囲は設計値 0.096（対 NTSC 比 63%）に対し、スタティック駆動では 0.102（同 67%）、ダイナミック駆動では 0.096（同 63%）であった。

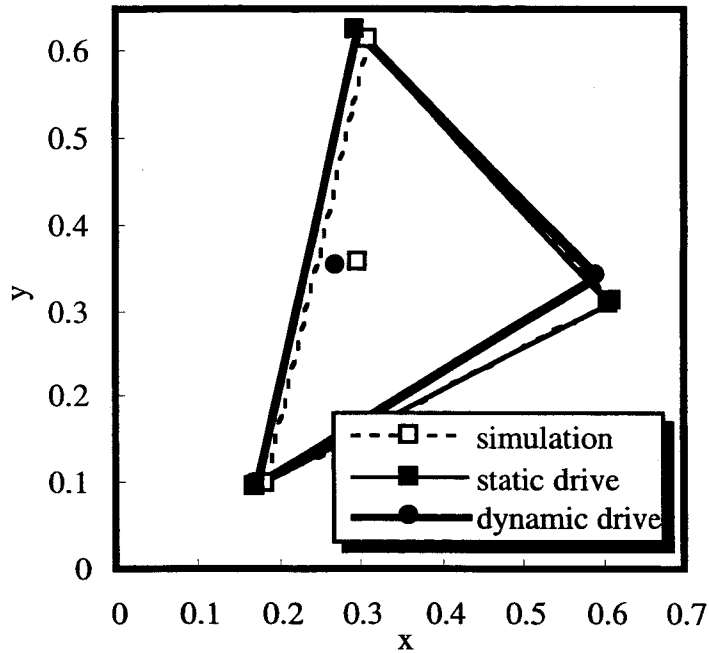


Fig. 5.13 Measurements of color gamut: Chromaticity of white is excluded from the static drive plot because white cannot be displayed by the static drive.

プロトタイプと従来型 CRT の輝度、コントラスト比、色再現範囲の比較を表 5.1 に示す。従来型 CRT は 21 インチサイズの典型的な仕様 (0.26mm マスクピッチ、アパーチャグリル方式) の市販品である。超高精細ディスプレイは暗輝度が低く高コントラスト表示が要求されるので、両者ともコントラスト比を優先した駆動条件の調整を行った。具体的には、次のように調整した。

- (1) 最低輝度すなわち黒を表示した時に微弱な発光が視認されないレベルまで平均駆動電圧を下げる
- (2) 最大輝度すなわち白を表示した時に輝度が飽和しないレベルまで駆動電圧振幅を上げる

この状態で、管面照度約 400lux の室内光環境で色彩色差計 BM-7A を用いて輝度を測定した。表中の輝度は画面全面に白色を表示した際の画面中央部の輝度であり、コントラスト比は同様に測定した黒色輝度に対する白色輝度の比である。色再現範囲は上述したダイナミック駆動の実測値である。プロトタイプは従来型 CRT と比較して、色再現性、輝度はその差が弁別できない同等の水準に達していると同時に、極めて優れたコントラスト特性を示している。尚、白色表示の輝度を上げるために、黒色表示



を行った際の微弱な発光によるいわゆる「黒浮き」を容認した調整を行うと従来型の CRT は  $100\text{cd/m}^2$  以上の輝度が得られるが、コントラスト比 20:1 程度にまで低下する。

Table 5.1 Performance comparison of the prototype and the conventional CRT

|                       | Prototype          | Conventional CRT   |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Luminance             | $71\text{ cd/m}^2$ | $79\text{ cd/m}^2$ |
| Contrast ratio        | 146:1              | 27:1               |
| Color gamut (to NTSC) | 63 %               | 71 %               |

本プロトタイプおよび従来型 CRT による # 文字 (フォントサイズ: 水平 5 ドット、垂直 7 ドット) の表示を撮影した例を図 5.14 に示す。この図からも明らかなように、従来型 CRT では RGB の蛍光体ストライプが分離しているために、文字の視認性が低下し色ずれなどの現象も目立ち易くなるが、フィールド順次式ではこのような問題は全く生じない。図は従来型の方式と比較するために UXGA( $1600 \times 1200$  ドット)のモードでの表示結果を示しているが、QXGA( $2048 \times 1536$  ドット)のモードにおいてはこの差が顕著となる。

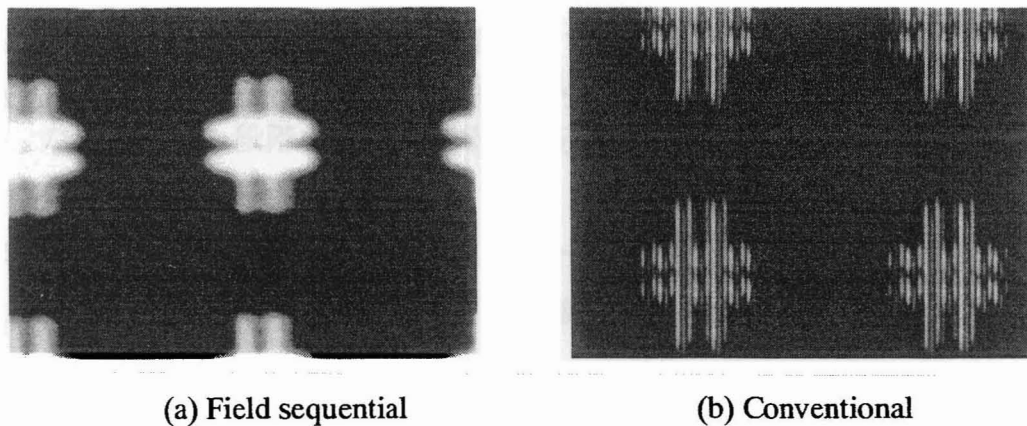


Fig. 5.14 Comparison of displayed characters: Close-up picture of characters of standard font size.

## 5.7 結言

本章では、モアレや色ずれ、色純度劣化など従来の CRT が持つ色選別構造に起因する画質劣化を解消するための方式として、フィールド順次式カラー表示によるマスクレス CRT について述べた。

まず、高速応答可能な強誘電性高分子液晶による液晶カラーシャッターの電気光学効果をモデル化し、これに視覚特性による色知覚の評価式を組み合わせ、色再現性や透過率などの基本的な表示特性をシミュレーションによって評価する手法を構築した。その結果、透過率と色再現範囲はトレードオフ関係を示すことが明らかとなり、それらの中から色再現範囲 0.096 (NTSC 比 63%)、平均透過率 4.3%を与えるシャッター構成を選択した。

さらに、インライン式電子銃による 3 ビーム同時走査方式におけるビーム輝度ばらつき平均化手法について検討し、一つの走査位置を 2 フィールドにわたり各ビームによって走査することにより、見かけ上のビーム輝度分布を平均化する走査方式を提案した。

以上に基づいたプロトタイプを作製し、室内光環境下で輝度  $71\text{cd/m}^2$ 、コントラスト比 146:1、色再現範囲 0.096 (NTSC 比 63%) の基本的な表示特性を得るとともに、色ずれのない超高精細表示ができることを確認した。

シャッターを構成する液晶パネルとカラー偏光板の透過特性および CRT の発光スペクトルを改善することにより、さらなる輝度と色再現性の向上をはかることが今後の検討課題である。

# 第6章

## 結論

本章では、本研究で得られた成果を要約する。

### 1. 視認性判定と画像シミュレーションによる CRT ラスタモアレの評価手法 (第2章)

CRT のラスタモアレについて、計算と画像シミュレーションにより評価する手法について論じた。

電子ビーム分布とマスクの開口分布の1次元モデルからラスタモアレのコントラストと周期を計算し、計算結果について Myodo ら[8]の実験結果をもとに視認性 (Visible or Invisible) を判定するとともに、モデル式と実測データから画像シミュレーションを行う手法を提案した。

本手法にガウス分布および実測によるデータを適用し、以下に示す結果を得た。

- (1) ガウス分布の 5%強度径を 3 段階に変化させたシミュレーションデータによる計算を行い、分布径が小さくなるほどラスタモアレの強度が増加するというこれまで知られていたラスタモアレの性質を確認した。また、ここで示した例では、3 段階のうち径が最小の分布についてラスタモアレが視認されるという結果を得た。
- (2) 分布の形状が異なる 2 種類の電子ビーム分布の実測データによる計算を行い、径が大きくても分布の対象性が悪い場合は、径が小さい分布よりもラスタモアレが目立つという結果を得た。
- (3) 計算で評価したモアレの視認性を、画像シミュレーションにより実画像で確認することができた。

以上により、電子ビーム分布やマスク開口分布がラスタモアレの視認性に与える影響を、モデル計算と画像シミュレーションによって評価することができることを示した。

## 2. 逆相ラスタモアレの視認性 (第3章)

逆相ラスタモアレと呼ばれる第2章で述べた手法によって取り扱えない構造を有するラスタモアレについて、電子ビームやマスク開口の分布がその視認性に及ぼす影響について論じた。

電子ビーム分布とマスク上に形成された開口の2次元分布モデルによって画面上の輝度分布を計算し、これを視覚系のコントラスト感度の空間周波数特性関数によって重み付けて、逆相ラスタモアレの知覚強度のモデル式を構築した。そして、知覚強度に対する電子ビームとマスク開口の分布の影響を調べるとともに、シミュレーション画像による主観評価実験を行うことにより計算結果を実験的に確認した。

モデル計算と主観評価実験の結果、電子ビームの径が小さくなるほど、また水平開口ピッチが大きくなるほど逆相ラスタモアレの知覚強度が増加することが明らかとなった。すなわち、従来は垂直方向のパラメータのみで議論されていたラスタモアレの視認性が水平方向のパラメータの影響を受けることが明らかとなった。

## 3. 電子ビームスポット測定法の高精度化 (第4章)

CRTの分解能評価の基礎となる電子ビームスポット輝度分布の測定手法における従来の問題点を改善する方法について論じた。

まず、目視と同等の感度とダイナミックレンジを実現するために、ICCDカメラを用いた二段階感度による撮像法を提案し、カソード電流が極めて微弱な電流域から最高輝度に対応した大電流域に至るまでの広い電流範囲において電子ビームスポット輝度分布の測定が可能となった。具体的には、カソード電流が $5\mu\text{A}$ から $300\mu\text{A}$ に至る範囲のビームスポットに対し、輝度の絶対レベルを補償しつつ、裾野部からピークにいたる全体の形状を測定することが可能となった。

さらに、従来の画像処理方法によるスポット形状の再構成においてジッターノイズに起因した測定結果のばらつきが生じる問題に対し、シフト量の誤差を補償した再構成アルゴリズムを提案し、繰り返し測定の再現性が向上することを示した。具体的には、撮像画像の1次モーメントによって実際のシフト量を推定する機能をスポット形

状の再構成アルゴリズムに組み込むことによって、測定結果の再現性を向上させた。その結果、ビームスポットの 5%強度水平径の繰り返し測定においては、標準偏差が 0.02mm から 0.005mm へと従来の 4 分の 1 に低減することができた。

#### 4. フィールド順次方式超高精細 CRT の開発（第 5 章）

モアレや色ずれ、色純度劣化など従来の CRT が持つ色選別構造に起因する画質劣化を解消するための方式として、フィールド順次式カラー表示によるマスクレス CRT の実現可能性について論じた。

まず、高速応答可能な強誘電性高分子液晶による液晶カラーシャッターの電気光学効果をモデル化し、これに視覚特性による色知覚の評価式を組み合わせ、色再現性や透過率などの基本的な表示特性をシミュレーションによって評価する手法を構築した。その結果、透過率と色再現範囲はトレードオフ関係を示すことが明らかとなり、それらの中から色再現範囲 0.096（NTSC 比 63%）、平均透過率 4.3%を与えるシャッター構成を選択した。

さらに、インライン式電子銃による 3 ビーム同時走査方式におけるビーム輝度ばらつきを平均化手法について検討し、一つの走査位置を 2 フィールドにわたり各ビームによって走査することにより、見かけ上のビーム輝度分布を平均化する走査方式を提案した。

以上に基づいたプロトタイプを作製し、室内光環境下で輝度  $71\text{cd/m}^2$ 、コントラスト比 146:1、色再現範囲 0.096（NTSC 比 63%）の基本的な表示特性を得るとともに、色ずれのない超高精細表示ができることを確認した。

以上のように本論文は、CRT の原理上不可避な問題であるモアレと、CRT の基本的な表示特性である分解能とを評価する手法について新しい提案を行うとともに、色選別構造から生じる画質劣化を解消するための表示方式の可能性について検討した。

ディスプレイの画像表示性能の改善あるいは劣化要因の低減を効率的に行う上で、

計算を主体とした設計・評価技術は今後さらに重要になると考えられる。さらに、そこに視覚特性を考慮することによって極めて実機に近い事前評価が可能となる。本論文は CRT を対象とした研究成果について述べたが、今後性能の向上が期待される田の方式のディスプレイに対しても、本論文で示した事前評価手法が十分適用できると考える。

## 参考文献

- [1] 谷千束, ディスプレイ先端技術, 共立出版株式会社, 1998.
- [2] N. Shiramatsu and A. Inoue, "Removing moire patterns from shadow-mask CRTs", Information Display, Vol. 10, No. 6, pp. 12-16, 1994.
- [3] J.D.Robbins and D.G.Mackey, "Moire pattern in color television", IEEE Trans. Broadcast and TV Recievers, Vol. BTR-12, pp. 105-121, 1966.
- [4] A.Iwamoto, "Two-dimensional imaging properties of shadow masks for color television tubes", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, No.5, pp. 884-889, 1982.
- [5] J.P.Wittke, "Moire consideration in shadowmask picture tubes", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.347-349, 1987.
- [6] O.Myodo, K.Kurahashi, M.Karino, M.Yamanoshita and H.Kobayashi, "An analytical Evaluation of moire pattern for color CRT displays", Proceedings of the 6th International Display Research Conference, pp.52-56, 1986.
- [7] E. Chen, T.F. Chan and Y.K. Hsu, "Improved computer simulation system of moire pattern for color CRT displays", ITE Technical Report, Vol. 17, No. 64, pp.103 - 108, 1993.
- [8] O.Myodo, K. Kurahashi, M. Karino and H. Kobayashi, "Practical evaluation method for visibility of moire pattern on color CRT displays", The 7th International Display Research Conference, pp.212 - 215, 1987.
- [9] 山口高弘, 永山友紀, 御子柴茂夫, 白井正司, "視覚特性を考慮した CRT ラスタモアレパターンのシミュレーション", TV 技報, IDY94-174, 1994.

- [10] M. Tanigawa, N. Shiramatsu and S. Iwata, "Visibility of raster moire patterns of CRT by Image simulation", Proceedings of the 15th International Display Research Conference, pp.515-518, 1995.
- [11] 山口高弘, 櫛田隆行, 佐野雅人, 御子柴茂夫, 白井正司, "カラー CRT における微視的発光パターンとラストモアレの視認性", TV 技報, IDY95-71, 1995.
- [12] M. Sawahata, S. Mikoshiba, S. Shirai and K. Oshita, "Tailoring of an electron beam shape for reduction of CRT moire fringes", Proceedings of the 6th International Display Workshops, pp.221-224, 1996.
- [13] 澤畑正人, 佐藤学, 御子柴茂夫, 白井正司, 尾下一尚, "ガウス関数重みづけ法を用いた高精細 CRT ラスタモアレの評価", TV 技報, IDY97-218, 1997.
- [14] 小野沢, 御子柴茂夫, 白井正司, 奥健太郎, 尾下一尚, 澤畑正人, "高精細 CRT におけるラスタモアレ低減のためのビームプロファイルの検討", 映情学技報, IDY99-158, pp.29-32, 1999.
- [15] 澤畑正人, 岡村哲, 櫛田隆行, 山口高弘, 御子柴茂夫, 白井正司, 尾下一尚, 奥健太郎, "視覚特性を考慮した CRT ビデオモアレパターンの再現とモアレ視認性の定量的評価", TV 技報, IDY96-102, pp.1-6, 1996.
- [16] P.G.J. Barten, "Resolution of data display tubes", Proceedings of the SID, Vol. 25, No. 1, pp. 35-42, 1984.
- [17] C. Infante, "On the resolution of raster-scanned CRT displays", Proceedings of the SID, Vol. 26, No. 1, pp. 23-36, 1985.
- [18] R. Beaton, "Display measurements", SID International Symposium Seminar Lecture Notes, Vol. II, No. 9.4, 1989.
- [19] T.Kubo, "Development of high-definition TV displays", IEEE trans. Broadcasting,



Vol. BC-28, No. 2, pp. 51-64, 1982.

- [20] 平林一昭, 北川修, 夏原眞佐男, "インライン高精細度カラーディスプレイ管", National Technical Report, Vol. 28, No.1, pp. 94-106, 1982.
- [21] H.L.Snyder, "Image quality and observer performance", Chapter 3 in "Perception of displayed information", edited by L.M.Biberman, Plenum Press, New York and London, 1973.
- [22] P.G.J. Barten, "The SQRI method : a new method for the evaluation of visible resolution on a display", Proceedings of the SID, Vol. 28, No. 3, pp. 253-262, 1987.
- [23] P.G.J. Barten, "Evaluation of CRT displays with the SQRI method", Proceedings of the SID, Vol. 30, No. 1, pp. 9-14, 1989.
- [24] P.G.J. Barten, "The square-root integral (SQRI) : a new metric to describe the effect of various display parameters on perceived image quality", SPIE Vol. 1077, pp. 73-82, 1989.
- [25] P.G.J. Barten, "Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method", J. Opt. Soc. Am. A Vol. 7, No. 10, pp. 2024-2031, 1990.
- [26] P.G.J. Barten, "The SQRI as a measure for VDU image quality", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 867-870, 1992.
- [27] R.L. Austin and H.J. Otto, "A Technique for precision measurement of display spatial profiles", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 206-210, 1987.
- [28] H.Veron and P.O'Callaghan, " A Technique for automated measurement of the resolution of shadow-mask CRT displays", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 211-213, 1987.

- [29] S.P.Atwood, "Bandlimited reconstruction techniques for color CRT spatial data", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 79-82, 1993.
- [30] B.Baur, " An advanced CRT-spot-contour measurement system", Proceedings of the SID, Vol. 26, No. 1, pp. 55-57, 1985.
- [31] DP. Bortfeld and JP. Beltz, "Semi-Automatic Measurement of the Two-Dimensional Intensity Distribution of a Color CRT Electron-Beam Spot", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 225-227, 1987.
- [32] 浅野敏郎, 望月淳, 太田隆司, 福原信雄, "カラー CRT のビーム形状高速計測とフォーカス評価への応用", 電学論, Vol. 115-C, No.3, pp. 481-487, 1995.
- [33] B.Bukal, K.Nemeth and R. Safaee-Rad, "Accurate display measurement in high-volume-production environments", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 225-227, 1999.
- [34] 小野定康, "超高精細 (SHD) 画像の医療・美術館・教育応用について", 1997 映情学年大, S1-4, 1997.
- [35] N.Okano, M.Maeda, K.Saita and Y.Horiuchi, "Development of the Ultra-High-resolution 17- and 21-in. CRTs", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.254-257, 1999.
- [36] 湯川孝博, "ビームインデックス管", ディスプレイ&イメージング, Vol.3, pp.35-42, 1994.
- [37] P. Bos, T. Buzak and R. Vante, "A Full-Color Field Sequential Display", Proceedings of the 4th International Display Research Conference, pp.7-10, 1984.
- [38] N. Shiramatsu and S. Iwata, "An evaluation method for CRT moire patterns by visibility estimation and image simulation", IEICE Trans. Electron, Vol. E80-C, No.

8, pp. 1095-1100, 1997.

- [39] N. Shiramatsu, M. Tanigawa and S. Iwata, "Practical method for evaluating the visibility of moire patterns for CRT design", SPIE Vol.2408, pp. 255-262, 1995.
- [40] N. Shiramatsu, S. Iwata and T. Minemoto, "Visibility evaluation of the inverse-phase CRT raster moire pattern", IEICE Trans. Electron, Vol. E83-C, No. 10, pp. 1594-1601, 2000.
- [41] M. Tanigawa, N. Shiramatsu and S. Iwata, "Visibility of Raster Moire Patterns of CRT by Image Simulation", Proceedings of the 15th International Display Research Conference, pp.515-518, 1995.
- [42] N. Shiramatsu and S. Iwata, "Improvement in measuring the luminance distribution of the CRT electron beam spot", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 225-227, 2000.
- [43] 白松直樹, 岩崎直子, 山川正樹, 岩田修司, 熊均, 長瀬隆光, 林成年, "液晶カラーシャッター応用フィールド順次式高精細 CRT ディスプレイ", 信学技報, EID2000-26, pp .19-24, 2000.
- [44] N. Shiramatsu, N. Iwasaki, M. Yamakawa, S. Iwata, H. Kuma, T. Nagase and N. Hayashi, "A 21-in. field sequential high-resolution CRT using liquid crystal color shutter", IEICE Trans. Electron, ( in press).
- [45] M. Yamauchi and H. Suzuki, "Spot Profiles in Color Monitor CRTs at Lower Current", Proceedings of the 15th International Display Research Conference, pp.771-774, 1995.
- [46] M. Yamauchi, "Moire reduction by shaping the spot profile in color CRTs", Proceedings of the 5th International Display Workshops, pp.381-384, 1995.

- [47] N. Aibara, A. Shishido, Y. Yanai and A. Kamada, "The higher legibility color display tube", Proceedings of the 16th International Display Research Conference, pp. 137-140, 1995.
- [48] 山中雅之, 龍福進, 中倉好朗, 玉井雅人, 佐古田純哉, 鳥越靖浩, "奥行き短縮大型カラーブラウン管の開発", TV 技報, IDY93-166, 1993.
- [49] P.G.J. Barten, "Contrast sensitivity of the human eye", Proceedings of the 12th International Display Research Conference, pp. 751-754, 1992.
- [50] K. Chellew and I. Mallender, "Getting behind the shadow mask", Information Display, Vol. 10, No.1, pp. 8-13, 1994.
- [51] Y. Nishiyama, T. Nakayama, N. Suzuki, M. Ohta, S. Endoh and Y. Iwakabe, "Development of a 19-in.-Diagonal UXGA Super TFT-LCM Applied with Super-IPS Technology", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.260-263, 2000.
- [52] K. Okoshi, K. Yuasa, F. Moriwaki and T. Kofuji, "FLC Polymer and Plastic Substrates for Use in a Large-Area Optical Shutter for 3-D TV", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.1135-1138, 1998.
- [53] 熊均、長瀬隆光、岩崎直子、山川正樹、白松直樹、林成年、"強誘電性高分子液晶を用いたカラー液晶シャッターの光学特性", 信学技報 EID2000-25, pp.13-18, 2000.
- [54] 吉野勝美, 尾崎雅則, 液晶とディスプレイ応用の基礎, コロナ社, 1994.
- [55] H.Reiter, P.Quadflieg, G.Spekowius and M.Weibrecht, "A High-resolution (2K) Monochrome Monitor based on the Triple-Gun Principle", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.262-265, 1999.

[56] 太田登, 色彩工学, 東京電機大学出版局, 1993.

# 著者発表論文リスト

## A. 本論文に関係の深い発表論文

### A.1 原著論文

- (1) N.Shiramatsu and S.Iwata, "An Evaluation Method for CRT Moire Patterns by Visibility Estimation and Image Simulation", IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E80-C, No.8, pp.1095-1100, 1997.
- (2) N.Shiramatsu, S.Iwata and T.Minemoto, "Visibility Evaluation of the Inverse-phase CRT Raster Moire Pattern", IEICE TRANS. ELECTRON., Vol.E83-C, No.10, 2000.
- (1) N.Shiramatsu , N.Iwasaki, M.Yamakawa, S.Iwata, H.Kuma, T.Nagase and N.Hayashi "A 21-in. Field Sequential High-Resolution CRT using Liquid Crystal Sutter", IEICE TRANS. ELECTRON. (in press) .

### A.2 国際会議（査読付き）

- (4) N.Shiramatsu, M.Tanigawa and S.Iwata, "Practical Method for Evaluating CRT Moire Pattern", SPIE, Vol.2408, pp.255-262, 1995.
- (5) M.Tanigawa,N.Shiramatsu and S.Iwata, "Visibility of Raster Moire Patterns of CRT by Image Simulation", The 15th International Display Research Conference, pp.515-518, 1995.
- (6) N.Shiramatsu and S.Iwata, "Improvement in Measuring the Luminance Distribution of the CRT Electron Beam Spot", SID International Symposium Digest of Technical Papers,

pp. 624-627, 2000.

### A.3 国内発表

- (7) 白松直樹, 岩崎直子, 山川正樹, 岩田修司, 熊均, 長瀬隆光, 林成年, "液晶カラーシャッター応用フィールド順次式高精細 CRT ディスプレイ", 信学技報, EID2000-26, pp. 19-24, 2000.
- (8) 熊均, 長瀬隆光, 岩崎直子, 山川正樹, 白松直樹, 林成年, "強誘電性高分子液晶を用いたカラー液晶シャッターの光学特性", 信学技報, EID2000-25, pp.13-18, 2000.

### A.4 解説論文

- (9) N.Shiramatsu and A.Inoue, "Removing Moire Patterns from Shadow-Mask CRTs", Information Display, Vol.10, No.6, pp.12-16, 1994.

## B. その他の発表論文

### B.1 原著論文

- (10) N.Shiramatsu, M.Nakano, S.Iwata, M.Sanou, N.Terazaki and S.Futatsuishi, "A High-resolution High-brightness Color Video Display for Outdoor Use", Proceedings of the Society for Information Display, Vol.30, No.4, pp.309-312, 1989.
- (11) 長谷智弘, 白松直樹, 富田悟, "表示画面におけるモザイク状画素構造の効果", TV 誌, Vol.47, No.3, pp.356-363, 1993.
- (12) 原善一郎, 寺崎信夫, 白松直樹, 岩田修司, "大画面ディスプレイにおける画

素構造と画質”，信学論 C-II, Vol.J77-C-II, No.3, pp.148-159, 1994.

- (13) Z.Hara and N.Shiramatsu, "Improvement in the Picture Quality of Moving Pictures for Matrix Displays", Journal of the SID., Vol.8, No.2, pp. 1-9, 2000.
- (14) 原善一郎, 白松直樹, “画像の時空間モデルによる平面ディスプレイの画質解析”, 映情学誌, 掲載予定.

## B.2 国際会議（査読付き）

- (15) N.Shiramatsu, M.Nakano, S.Iwata, M.Sanou, N.Terazaki and S.Futatsuishi, "A High-resolution High-brightness Color Video Display for Outdoor Use", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 102-105, 1989
- (16) N.Ichikawa,S.Iwata, N.Shiramatsu, N.Terazaki, Z.Hara, H.Kamogawa and K.Tatsuda, "A Lighting Element Having a New Structure of X and Y Backplane Control Electrodes", The 9th International Display Research Conference, pp. 276-279, 1989
- (17) A.Kojima and N.Shiramatsu, "A Psychophysical Analysis of the Effects of CRT Mask Structure on Image Quality ", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 100-104, 1998.

## B.3 国際会議（招待）

- (18) N.Shiramatsu, M.Nakano, S.Iwata, K.Shibayama and K.Maeshima, "Large Screen Mosaic Displays Using CRT Technology", Korea-Japan Joint Symposium on Information Display, pp.41-46, 1990.
- (19) S.Iwata, N.Shiramatsu, Z.Hara and H.Arai, "Improvement of the Picture Quality of the Large Screen Mosaic Display", SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp. 909-1002, 1997.



## B.4 国内発表

- (20) 長谷智弘, 白松直樹, 富田悟, “モザイク状表示面に関する一考察”, 1988 TV 全大, 1988.
- (21) 市川典弘, 中野雅章, 白松直樹, 岩田修司, 二石俊一, 原善一郎, “屋外用大画面ディスプレイの高画質化”, 1989 TV 全大, 3-9, 1989.
- (22) 白松直樹, 中野雅章, 岩田修司, 佐能宗治, 二石俊一, 原善一郎, “フラットマトリクス CRT を配列した大画面ディスプレイの高画質化” 信学技報, EID89-33, 1989.
- (23) 白松直樹, 岩田修司, “パネルディスプレイの輝度補正方式に関する基礎検討” 1990 信学春季全大 D-319, 1990.
- (24) 岩田修司, 中野雅章, 中西邦文, 白松直樹, 松川文雄, 布下正宏, “CRT 光源を用いた液晶プロジェクタによる大画面化の検討” 1993 信学春季全大 C-495, 1993.
- (25) 白松直樹, 小嶋章弘, “CRT のマスク構造が視認性に与える影響の心理物理的解析”, 画像電子学会研究会, 98-05-02, pp.7-10, 1998.

## B.5 解説論文ほか

- (26) Z.Hara, N. Terazaki, N.Shiramatsu and S.Iwata, “Picture quality of different pixel arrangements for large-sized matrix displays”, Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol.77, No.7, pp. 105-120, 1994.
- (27) 白松直樹, 綿貫晴夫, 越智与志夫, 高橋知恵, 滝沢智紀, 阿部文夫, 柳井啓二, “アパーチャグリル方式 50cmCRT の開発”, ディスプレイ&イメージング, Vol.3, No.1, pp.11-21, 1994.

- (28) 白松直樹, 前川武之, 滝沢智紀, “表示装置と色再現 -CRT-”, TV 誌, Vol.48, No. 9, pp. 1088-1093, 1994.
- (29) 白松直樹, “表示画面におけるモザイク状画素構造の妨害感”, 電子写真, Vol.33, No.4, pp.40-45, 1994.
- (30) 白松直樹, “1998SID 国際シンポジウム報告 - (10) CRT Technology -”, 信学技報, EID98-44, 1998.

# 謝辞

本論文は、神戸大学大学院自然科学研究科 峯本工教授の御指導のもとに、筆者が三菱電機株式会社先端技術総合研究所にて行った研究成果をまとめたものである。終始、多大かつ有益なるご指導を賜りました峯本工教授に謹んで感謝すると共にお礼申し上げます。

同じく本論文をまとめるにあたり御教示を賜りました神戸大学大学院自然科学研究科 三好旦六教授 ならびに 北村新三教授に感謝いたします。さらに御指導、御討論いただきました同大学情報知能工学科情報認識講座の関係各位に感謝いたします。

日頃ご指導頂くとともに本研究の機会を与えて頂きました三菱電機株式会社先端技術総合研究所所長 山中晤郎博士、同研究所開発戦略グループマネージャー 肥塚裕至博士、同研究所表示技術部部長 山本卓博士、同次長 奥田荘一郎博士、同グループマネージャー 結城昭正博士に感謝いたします。

本研究を遂行するにあたって、筆者が入社以来御指導頂きました三菱電機株式会社先端技術総合研究所表示技術部 岩田修司主席研究員に深謝の意を表します。同じく御指導頂きました同研究所 安西良矩元部長、山本泰元部長、吉崎浄元次長に感謝いたします。さらに、御指導頂くとともに終始励ましの言葉を頂きました元グループマネージャー 松川文雄博士に感謝いたします。

本研究は多くの方々の御指導、ご協力のもとに行うことができました。特に、三菱電機株式会社映像表示デバイス製作所 岩崎安男技術部長、同社映像情報開発センター 山川正樹主席研究員、中村芳知研究員、同社先端技術総合研究所 岩崎直子主任研究員をはじめとする関係各位に感謝いたします。さらに、本研究を遂行する上で御討論頂いたソニー株式会社ディスプレイカンパニー、出光興産株式会社中央研究所の関係各位に感謝いたします。

また、表示技術全般において入社以来御指導頂きました姫路獨協大学 倉橋浩一郎教授、三菱電機株式会社電力・産業システム事業所 原善一郎主席技師に感謝いたします。

本研究は以上の他、多くの方々の御指導のもとに遂行することができました。ここに謹んで感謝いたします。