

Title	情報機器のレーザ走査系における走査位置の高精度化 に関する研究
Author(s)	安部, 文隆
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1113
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

情報機器のレーザ走査系における

走査位置の高精度化に関する研究

2007年12月

安部 文隆

目 次

第1章	緒言	
1. 1	本研究の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1. 2	本研究の目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1. 3	本論文の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
第2章	レーザ波長に依存しない $f \theta$ ミラー結像光学系の研究	
2.1	まえがき・・・・・	9
2. 2	単レンズのレーザ走査・結像系の理論的導出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
2. 3	鏡による走査歪補正法の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
2. 4	放物面鏡による光ビーム走査歪補正・・・・・・・・・・・・・・・	15
2.	4.1 像高······	15
2.	4. 2 歪曲収差······	18
2.	4.3 走查速度変化······	20
2.	4. 4 錯乱円と光ビーム径・・・・・・	21
2.5	実験検証·····	23
2.	5.1 像高••••••	23
2.	5. 2 像面光ビーム径・・・・・	24
2.	5.3 レイアウトに関する考察・・・・・	24
2. 6	fθ ミラー搭載レーザプリンタによる検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
2. 7	むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
第3章	走査光ビーム信号制御による回転多面鏡の走査誤差補正法に関する	5研究
3. 1	まえがき・・・・・	33
3. 2	走査歪補正法の理論的導出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
3.	 2.1 角度分割誤差の補正・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
3.	 2 平面度誤差の補正・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37

頁

3.	2.	3	回転数変動による走査誤差の補正・・・・・・・・・・・・	42
----	----	---	-----------------------------	----

- 3.2.4 fθ光学系を用いない走査速度補正の考察・・・・・・・・ 44
- 3.3 補正回路の設計······ 45
 - 3.3.1 平面度誤差の補正回路・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
 45
 - 3.3.2 走査速度歪の補正回路・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
- 3.5 むすび・・・・・ 50

第4章 半導体レーザ走査光学系のz軸方向位置の高精度化と

小型化に関する研究

4. 1	まえがき・・・・・	51
4. 2	半導体レーザ光のコリメート化に関する研究・・・・・	52
4.	2.1 LD モジュールの信頼性設計 ······	52
4.	2. 2 LD モジュール出射光の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	57
4. 3	走査光学系の小型化の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
4.	3.1 回転多面鏡の小型化の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
4.	 2 走査・結像レンズの小型化の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	61
4.	3.3 走査光学系の小型化の提案・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	65
4.	 4 集光ビーム径の最適化の検討・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	69
4.4	広域走査光学系の提案・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	71
4.5	むすび・・・・・	75
第5章	複数の走査光ビーム位置の高精度検出法に関する研究	
5.1	まえがき・・・・・	76
5.2	位置検出の原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	79
5.	2. 1 原理構成	79
5.	2.2 タッチ座標とサイズの検出・・・・・・・・・・・・・・・・	79

5. 3 走査光検出光学系の研究・・・・・ 81

5.3.1 基本構成·····	81
5.3.2 再帰性光学系の構成に関する検討・・・・・・・・・・・	81
5.3.3 光走査光学系ユニットの設計と製作・・・・・・・・・・・	84
5.3.4 信号処理による検出動作の安定化・・・・・・・・・・・	85
5. 4 タッチパネル動作実験による検証・・・・・・・・・・・・・・・	88
5.4.1 検出特性の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	88
5.4.2 誤入力の防止機能の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・	91
5.5 新しい描画インターフェイス機能の提案と検証・・・・・	91
5.6 むすび・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	97
第6章 結 言	98
謝 辞	101
参考文献 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	102
本論文に関する発表論文リスト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	108
本論文に関する特許リスト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	112

第1章 緒 言

1.1 本研究の背景

21世紀に入り、コンピュータと通信に係わる技術(いわゆる IT: Information Technology)の進展は、高度ユビキタス情報化社会の基盤を形成し、様々な情報の、より広範なフィールドでの活用を促して、新たな社会変革を生み出している。この IT 領域では、情報処理技術を中心に、処理に不可欠な記憶技術と通信技術に加えて、人とマシンが円滑に情報のやりとりをする入出力のマンマシンインタフェース技術が重要である。最近では、入出力技術を、人が「IT を介して」他の人との円滑なやりとりを促す意味で、ヒューマンインタフェース技術として捉え、活発な研究開発がなされている。コンピュータを中心に据えてペリフェラル(周辺機)という言い方があるが、人を中心に考えると、最も身近なところで IT 活用を促す鍵を握るのは、ヒューマンインタフェースに係わる情報の入出力技術である。

インターネットの普及で、コンピュータによる情報処理の大規模・グローバル化、 高速化、高度化に伴い、情報の入出力機器においても、幅広い知見を総合的に組み 合わせて、人に優しく、判りやすく、自然なかたちで、使い勝手の良いヒューマン インタフェースを実現することは、ますます重要となっている。例えば、タッチパ ネルやイメージスキャナの入力機器や、プリンタやディスプレイの出力装置では、 さまざまな形式の情報を、人間の五感に自然なかたちで訴えるヒューマンインタフ ェースの改善が進展している。

コンピュータ出力のプリンタに関しては、1975 年頃まで、活字やワイヤを打ち つけるインパクト型が主流であったため、文字数が限定される英数字の印刷しかで きなかった。これに対して、いろいろな文字・パターンの印刷を可能とするノンイ ンパクト型のプリンタが待望された⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。各種の方式の中で、サーマル(熱転写) 方式、インクジェット方式と、電子写真方式が有望視され、活発な研究開発が行わ れた。その結果、今日では、パーソナル向けにはインクジェット方式が、ビジネス 用途では電子写真方式が、主流となっている。

1

電子写真方式のレーザプリンタは、電子写真プロセスを基盤技術として、回転す る感光体ドラム上にレーザ走査によって、画素に分解したパターンを書き込むため、 任意のパターン印刷が可能となり、高速化と共に、用途は飛躍的に増大した。初期 段階では、カーボン紙を紙の間に入れて複数枚の複写が可能なインパクト方式に対 抗するために、同時複写ができないレーザプリンタには、複写枚数に匹敵する枚数 をくり返し印刷することで対処する高速性が要求された。また、その当時に使用で きるレーザ光源は、大型のガスレーザしかなく、高速化と相まって、装置は大型化 が必須であった⁽⁵⁾⁻⁽¹²⁾。

1980年代に入り、日本では、レーザプリンタが「漢字やひらかな」の印刷を可能とすることで、コンピュータによる日本語処置化を急速に促した。その後、超小型で可視光を出射する半導体レーザの実用化に伴い、アナログからデジタルへの時代の移行と共に、画像の階調表現やカラー化で、文字と画像を組合せたさまざまな 画面を見たままのイメージで印刷できるようになった⁽¹³⁾⁻⁽²⁰⁾。

21 世紀に入った今日では、装置が小型化して、プリンタ機能、読取・複写機能 に加えて、通信機能を備えた多機能な MFP (Multi-Functional Peripheral)装置が、 オフィスの中核マシンとして、グループで活用されている。また、人に判りやすく、 より自然なかたちで、セキュリティに配慮した情報を印刷するといったヒューマン インタフェース技術の向上が図られている。

ー方、入力装置では、キーボードやマウスに加えて、イメージ入力(スキャナと デジカメ)や、音声入力、タッチパネルやジェスチャによる入力など、さまざまな 方式の入力装置が展開されている。中でも、タッチパネルは画面に直接タッチして 入力するため、PDA(Personal Digital Assistant)やノート PC(Personal Computer)など、モバイル環境で多用されている⁽²¹⁾。また近年は、平面ディスプ レイ(FPD:Flat Panel Display)の大画面化に伴い、コンピュータの出力を大画面 の FPD に表示して、電子プレゼンテーションを行うケースが増えている。このた め、ヒューマンインタフェースの観点から、画面の情報に直接タッチして画面上で 情報を操作する大画面タッチパネルの要望が高まっている。

ノート PC の画面サイズでは、透明導電膜による感圧方式や、発光ダイオード

 $\mathbf{2}$

(LED: Light Emitting Diode) と光検知器(PD: Photo Detector) をマトリクス 状に配置した光方式が採用されているが、大画面化に対しては、表示画像の画質劣 化を起こすことや、高精細化に対応できないことなどの課題があり、大画面で高精 細なタッチパネルは未だ実現されていない。

さて、レーザ光源は、通信のみならず工学全般において、20世紀における最も 重要な発明の1つとされている。1960年に、レーザが初めて発振し、その後、超 小型で低消費電力駆動が可能な半導体レーザが、赤外から可視まで広範な波長域で 実用化された。レーザは、時間と空間のコヒーレンシィの良さから、IT分野の光 通信、POS (Point Of Sales)端末、プリンタやディスプレイなど、さまざまな産業 応用へ展開された。入出力機器への応用では、ガスレーザを用いたレーザプリンタ を皮切りに、半導体レーザを用いた小型プリンタ装置、POS端末や、記憶装置の 光ディスクなど、レーザ光源の進化と共に適用領域が拡大した⁽²²⁾。

レーザを活用したこれらの入出力機器では、レーザ走査光学系における光ビーム の走査位置精度を高める技術開発が鍵を握る。走査光ビームの走査誤差を生じる要 因として、①光学収差、②製作加工、③温度などの外部環境がある。これらの要因 で生じる課題に対して、オプトメカトロニクス技術を駆使してトータルシステムと して対処することが重要である⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。レーザ波長や波面を制御する光学系、レー ザ光強度やタイミングを制御する電気系と、光学系を支える機械系、それぞれの特 性をフルに活用してシステム化を図る必要がある。特に、光学系では、3次元空間 におけるビーム形状を決める波面と波長(周波数)を制御する技術、信号処理系で は、時間軸での正確なタイミングで強度変化を検出し制御する技術が要求される。

1.2 本研究の目的

ヒューマンインタフェースの鍵を握る入出力技術の重要性に鑑み、特に具体的な 情報機器として、出力機器のレーザプリンタと、入力機器の大画面タッチ入力パネ ルを実現する上で、レーザ走査光学系における走査位置の精度を高めるための課題 を解決することを目的とする。

3

レーザ走査光学系における走査位置の高精度化の課題として、①光学系設計に関 連する収差の改善、②光学部品の加工精度に起因する歪の改善、③部材の温度特性 に起因する偏差の改善がある。また、複数のレーザ走査系を用いるシステムでは、 システムの整合をとる必要がある。

①光学収差に関しては、高速・高解像度のレーザプリンタを実現するために、高価で大型のガスレーザ光源を使いこなす必要があり、波長の異なるガスレーザ光源に対して、光学系の配置を変えずに光学収差を改善することが重要である。そこで、波長に依存しない鏡による走査・結像光学系を実現する必要がある。光学収差(歪曲収差)の設計目標は、絶対位置を補償するため0.1%以下とする。

②高い精度が要求される回転多面鏡は、僅かな加工誤差が残存し、諸々の走査歪 によって印字品質を劣化させる。回転多面鏡に起因する走査歪の特性を分析し、加 工精度を極めるのではなく、電気信号の制御によって走査光ビームの位置精度を向 上する補正法を見出す必要がある。目標とする走査位置の精度は、一般の人間の目 には目立ちにくい±1/4 画素以下とする。

③新しい光源として可視域の半導体レーザが実用化されたが、半導体レーザ光は 縦0.1µm 横 10µm の極めて小さな導波路端から出射される発散光(点光源)であ る。このため、コリメートレンズに対する位置決め精度が厳しく、温度変化や機械 的振動で容易に結像特性が劣化するという課題がある。そこで、光学部品ホルダ部 材を含めて、温度変化や振動・衝撃に対しても安定な構造を実現することが重要で ある。目標とする走査面上での集光ビーム径の許容変化は、電子写真プロセス裕度 から±10%とする。

④各種の応用展開に際しては、走査光学系の小型化が不可欠である。このため、 作動距離の短い結像光学系に着目して、走査光学系をコンパクト化することで走査 位置の高精度化を図ることが重要である。さらに、小型化したレーザ走査光学系の 応用展開では、複数の走査ビーム位置を高精度に制御する必要がある。このため、 再帰性光学系と複合機能部品による検出光学系に着目して、複数の走査ビーム位置 を高精度に検出する必要がある。目標とする検出位置の精度は、結果を FPD 上に 表示することから、FPD の表示画素ピッチ以下とする。

4

これらの事柄を達成するために、以下に示す方式と技術の研究が必要である。

- (1) 光波長依存性のない走査・結像光学系
- (2) 電気信号による走査誤差の自動補正制御法
- (3) 温度変化の影響を受けない小型走査光学系
- (4) 複数光ビーム走査位置の高精度検出法

1.3 本論文の構成

第1章は、本章であり、高度ユビキタス情報化社会を形成するIT基幹技術の一 翼を担う、人に最も身近な入出力装置の開発意義・重要性について触れる。新しい レーザプリンタや大画面タッチパネルを実現するためのレーザ走査光学系の役割、 特に、走査光ビームの位置精度を高めるために、収差設計、加工誤差、温度環境と、 複合検出系に対する取り組みについて概説し、本研究の目的を記述した。

第2章では、波長の異なるガスレーザ光源を用いるために、レーザ波長に依存し ない走査・結像光学系について新しい方式を提案する。

従来のレンズを使った走査光学系では、レンズの屈折率に波長分散があるため、 波長の異なる大型のガスレーザ光源⁽²⁸⁾⁻⁽³⁰⁾に対して、同一の光学系配置を適用する ことができず、光源が変わるとその都度、光学系全体の大幅な変更を余儀なくされ るという課題がある。この課題に対して、レーザ波長に依存しない、反射による新 しい走査光学系を検討し、走査角に比例して結像位置が決まる $f \theta$ ミラー光学系の 条件を提案する。さらに、 $f \theta$ ミラー走査光学系をレーザプリンタ試作機に搭載し て、正確な位置決めと高解像度な印字を検証して、新たなレーザ走査光学系の実用 化に対する手法について記述する^{(9),(10), (31)}。

第3章では、回転多面鏡の製造誤差に起因する走査歪とその補正法について記述 する。

レーザ走査を利用した画像の入出力機器では、光ビームの走査手段として、回転

多面鏡が使用される。しかし、多面鏡の各面は、非常に高い加工精度が要求される が、必ずしも実現されておらず、プリンタの画質劣化に大きな影響を与える。

そこで、回転多面鏡の製造誤差のうち、面間の分割角度誤差と反射率誤差を補正 するために、新たに走査光ビームの中心位置を正確に検出する方式を提案する⁽³²⁾。 また、各鏡面の平面度誤差については、光ビームの走査時間を測定し、画素データ 処理用クロック信号の周期を操作して補正する新しい方法を提案する⁽³³⁾。以上の 2つの提案方式をレーザプリンタ試作機に適用して、回転多面鏡の製造誤差による 影響を受けない高解像度の印字品質を検証する⁽³⁴⁾⁻⁽³⁶⁾。

第4章では、ガスレーザから半導体レーザへ光源の進化⁽³⁷⁾⁻⁽⁴⁵⁾に伴って、新たに 発生したレーザ光源のz軸方向の位置決め精度の課題と、プリンタ装置の多機能化 の課題について、走査光学系の解決策を提案する。

半導体レーザは、縦0.1µm×横10µmの極めて小さな導波路から出射される発 散光のため、コリメートレンズに対する位置決め精度が厳しく、温度変化や機械的 振動で容易に結像特性が劣化するという課題がある。この課題に対しては、温度と 振動に対する動作裕度を広くとる構造の半導体レーザとコリメートレンズを一体 化した LD モジュールを提案する。

さらに、プリンタの多機能化が要望され、電子写真プロセスのアナログ複写光学 系とレーザ走査光学系の露光を感光体ドラム周りの狭い空間で両立させることが 課題である。走査光学系の各構成要素のスペックを、設置スペースの小型化に重点 をおいて見直し、回転多面鏡の筐体に LD モジュールとf θレンズを一体化した構 造を提案する^{(17),(20)}。本走査光学系により、小さな空きスペースに搭載可能として、 プリンタ機能と複写機能を持つ MFP として検証する。

第5章では、小型レーザ走査光学系の新たな応用展開として、複数の走査光学系 を用いた、サイズ検出機能を有する大画面・高精細タッチパネルを提案する。

小型レーザ走査光学系を FPD 筐体枠の一辺2ヶ所に設置し、表示画面上を走査 した光を三角測量の原理で検出する方式で、複数の走査ビーム位置を高精度に検出

6

する光学系が課題である。この課題に対して、複数の走査光ビームの混信を防ぐた めに再帰性光学系による分離と、ビーム整形機能を有する複合機能部品による検出 光学系に着目し、信号処理系で S/N の向上を図って、タッチ位置とサイズを同時 に検出できる方式⁽⁴⁶⁾⁻⁽⁴⁹⁾を提案する。

本方式を搭載した大画面 FPD では、走査レーザ光の高精度な位置検出が可能な ため、タッチ位置とサイズ検出機能によって、手を使ったり毛筆を使って入力する など、新しいヒューマンインタフェース機能を検証し、その有効性を示す⁽⁴⁹⁾。

最後に、第6章では、第2章から第5章までの研究成果を統括し、本研究で得ら れた主要な結論をまとめる。

全体の研究と各章の役割のフローチャートを Fig.1-1(次ページ)に示す。



Chapter 6 Conclusion

- The conclusion of the research on an evolved laser scanning system is described.

Fig.1-1 Flow chart of this doctoral thesis.

第2章 レーザ波長に依存しない $f\theta$ ミラー結像光学系の研究

2.1 まえがき

レーザ走査光学系⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾の基本要素は、レーザ光源、光変調器、光走査系、結像 光学系に加えて、光制御系である。走査光学系の機能別フローチャートを Fig.2-1 に示す。

レーザ光源から出射されたビームは、光変調器で画像データに従って ON/OFF の変調を受け、光走査系(ex. 回転多面鏡)で偏向走査された後、結像光学系(ex. レ ンズ系)で、照射面上の所定位置に集光されて画像を形成する。光制御系は、照射 面上のビーム位置情報と光走査系の情報を使ってタイミングを制御し、画像データ に従って光変調器を駆動する役目を担う。

レーザ走査光学系の最終仕様である「解像度と走査幅」は、これらの各機能を組み 合わせて決定される。解像度は、結像光学系の焦点距離とレーザ光源の波長に比例 し、走査幅は、焦点距離と光走査系の走査角に比例する。したがって、レーザ波長、 焦点距離、走査角の3要素が、レーザ走査光学系の仕様を決定する。これら3要素 の中で、結像光学系の焦点距離と、光走査系の走査角は設計要因であるが、レーザ 波長は最初に決めなければならない選択要因であるため、まず本研究の背景となる レーザ光源(波長)について述べる。



Fig.2-1 Flow chart according to function of a laser scanning system

レーザ光源としては、諸々の特性(光波長、寿命、出射ビーム分布、出力の安定 度、雑音など)評価から、青色の He-Cd レーザ(441.6nm)⁽³⁰⁾、緑青色の Ar レー ザ(488.0nm、514.5nm)と、赤色の He-Ne レーザ(632.8nm)が採用できる。 いずれもレーザビーム形状は、ガウス分布であり、波面の特性は同じである。他の 特性に関しても一長一短があり、どのレーザも採用の可能性がある。

しかし、従来のレンズによる結像光学系⁽⁵⁰⁾⁻⁽⁵⁶⁾では、レンズの屈折率に波長分散 があるため、波長の異なるガスレーザ光源に対して、同一の光学系配置を適用する ことができず、光源が変わるとその都度、光学系全体に対して大幅な変更を余儀な くされるという課題がある。この課題を解決するには、すべてのレーザ波長に対応 できるように、波長分散のない、反射による新しい走査・結像光学系を見出す必要 がある。

研究の進め方としては、まず、走査・結像系における種々の評価項目を考察して、 要因を分析することによって、理論的に新しい走査・結像光学系を導出する。さら に、新方式における実装上の課題を補う補正法を考案する。最後に、この新光学系 をレーザプリンタ試作機に搭載して印字実験により、新方式を検証する。

2.2 単レンズのレーザ走査・結像系の理論的導出

走査・結像光学系に対する要求は、走査中心部から両端部まで、像面におけるビ ーム走査速度と光ビームスポット径を均一にすることである。考慮すべき項目とし て、①走査角、②走査の線形性、③走査幅、④光波長、⑤集光ビーム径、⑥焦点深 度、⑦サイズなどがある。

まず、単レンズの走査・結像系を使って全体理論を導出する。光スキャナの集光 レンズに対する位置関係によって、post-objective 形と pre-objective 形に分けられ る(Fig.2-2(a), (b)参照)。post-objective 形の場合、集光ビームの焦点軌跡は光スキ ャナの偏向点を中心とする円弧となり、 pre-objective 形の場合は直線となる。受 光面が走査中心点で焦点を含む平面であると考えると、いずれの場合も、その像高 x_0 は走査角 θ 、Fig.2-2に示す受光面までの距離をfとして、

$$x_0 = f \cdot \tan \theta \tag{2-1}$$

で表される。一方、理想的な像高*X*は、走査角*θ*に比例することが望ましく、比例 定数を距離 *f* で表し、

$$X = f \cdot \theta \tag{2-2}$$

とする。実際の像高 x_0 の理想像高Xに対する位置ずれを百分率で表し、これを歪曲 収差と定義すると、

(歪曲収差) =
$$\frac{x_0 - X}{X} \times 100$$
 [%] (2-3)

で表される。



Fig.2-2 Schematic diagram of scanning system

従来の構成の場合、歪曲収差は、式(2-1)、(2-2)、(2-3)より、

(歪曲収差) =
$$\frac{\tan \theta - \theta}{\theta} \times 100$$
 [%] (2-4)

となる。

光スキャナが等角速度 ω でビームを走査する場合($\theta = \omega \cdot t$; $\omega = const.$)、像面に おける光ビーム走査速度は像高を時間で微分することにより得られるので、従来の 方式では、式(2-1)から

$$\frac{dx}{dt} = \frac{f \cdot \omega}{\cos^2 \theta} \tag{2-5}$$

で表される。走査速度変化は理想の走査速度 f·ω とのずれを百分率で表し、

(走査速度変化) =
$$\frac{\frac{dx_0}{dt} - f \cdot \omega}{f \cdot \omega} \times 100$$
 [%] (2-6)

とする。従来の構成の場合、式(2-5)、(2-6)より、

(走査速度変化) =
$$\left(\frac{1}{\cos^2 \theta} - 1\right) \times 100$$
 [%] (2-7)

である。光ビーム径は、レンズによる収差効果の少ない post-objective 形の走査光 学系を考え、Fig.2-2(a)において、集光レンズの中心から光スキャナ面の中心までの 距離をZ、レンズへの平行入射光ビーム径をD₀、走査角をθとすると、投影面上に おいて近似的に、

(光ビーム径) =
$$\frac{f}{f+Z} \times D_0 \times \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$$
 (2-8)

に拡がる。θ=0の場合、幾何光学上の計算では光ビーム径はゼロであるが、波動光 学の適用領域であり、2.4.4の式(2-25)で表される波動光学の回折限界値に集光され る。

post-objective 形の走査光学系を考えた場合、歪曲収差、走査速度変化、および 光ビーム径変化を模式的に表わすと、それぞれ Fig.2-3 のようになる。



Fig.2-3 Scanning distortion and variation a: Distortion, b: Scanning velocity distortion, c: Beam diameter variation

aで示される歪曲収差は基準位置に対する誤差を示すパラメータであり、bで示 す走査速度変化は単位時間での走査方向のサイズ変化、cで示す光ビーム径は縦方 向の変化を示すパラメータである。また、単レンズの pre-objective 形の走査光学系 においても、式(2-4)、(2-7)で表される偏差を有し、光ビーム径も一般的にレンズに よる球面収差のために大きな走査角において回折限界値まで集光するのは困難であ る。これらの走査偏差を補正するために、pre-objective 形で走査した光ビームを結 像および1/cos² θ の速度補正のための distortion 作用を兼ね備えた組合せレンズ系 が考えられている。一般に、このレンズ系は、像高が $f \theta$ で表されるために、 $f \theta レ$ ンズと呼ばれる。しかし、レンズ系は屈折率に波長分散があるため、波長の異なる レーザ光源に対しては同じレンズ系を適用できない。そこで、波長依存のない $f \theta$ 特 性を持つ走査・結像光学系を目指して、鏡による光学系を検討する。

2.3 鏡による走査歪補正法の考察

レンズ系による走査歪補正に対し、波長に依存しない「鏡」を使った補正法について考察する⁽³¹⁾。

以下の前提条件から出発する。

- (1) 投影面上で歪曲収差がない
- (2) 偏向点から投影面までの光路長が等しい

ここで楕円鏡の一方の焦点から出た光はすべて他方の焦点に集まり、その光路長 は等しい性質を利用して、以下のような構成で走査歪補正鏡を考える。偏向点が固 定で、投影点が一直線上を移動した場合を考え、楕円の2焦点をそれぞれ偏向点、 投影点とする。Fig.2-4に考え方の原理図を示す。

Fig.2-4 において、 F_1 を偏向点とし、 $F_{20} \sim F_{27}$ を含む直線(x軸)を投影面と考 える。ここで、単位走査角と単位像高を決め、単位像高だけ焦点 F_2 を移動し(F_{2i})、 $F_1 \geq F_{2i}$ を焦点とする楕円と、 F_1 から単位走査角 θ だけ走査された光の交点を P_i とする。このとき

$$\overline{F_1P_i} + \overline{P_iF}_{2i} = \ell \text{ (const.)}$$

$$F_1(0,a) \qquad a = const. \qquad (2-9)$$

を満足する P_i の接線が連続となる軌跡が求める走査歪補正鏡である。求める軌跡は Fig.2-4の楕円群の包絡線である。



Fig.2-4 Consideration of correcting method by the ellipse mirror.

この包絡線の軌跡は、

$$y = -\frac{x^{2}}{2(\ell - a)} + \frac{\ell + a}{2} \quad (y \ge 0)$$
$$y = \frac{x^{2}}{2(\ell + a)} - \frac{\ell - a}{2} \quad (y < 0) \quad (2-10)$$
$$(-\sqrt{\ell^{2} - a^{2}} \le x \le \sqrt{\ell^{2} - a^{2}})$$

となる。式(2-10)は(0,*a*)を焦点とする(すなわち、焦点と偏向点が一致した)放物 線である。ところが、焦点に偏向点を持つ放物面鏡では、焦点から出た光はすべて 放物面鏡で反射後には平行となり、投影面までの光路長は等しくなる。この場合、 走査速度変化は

(走査速度変化) =
$$\frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta} \times 100$$
 [%] (2-11)

となって、通常の式(2-7)で表される構成よりは改善される。さらに、偏向点を焦点から移動させると、走査特性が改善される傾向にあり、放物面鏡による結像特性も考慮に入れて、偏向点を焦点から移動させて検討を進める。

2.4 放物面鏡による光ビーム走査歪補正法

2.4.1 像高

放物面鏡による光ビーム走査歪補正系は、放物面鏡の焦点距離fに対して、光ス キャナの偏向位置を面頂点からkfの位置 $(0 < k \le 1)$ に、投影面(像面)を面頂点か らfの位置に設定する。ここでは簡略化のため走査光を含む2次元平面で考えるも のとすると、放物面鏡は放物線、投影面(像面)は直線となり、光スキャナの偏向 位置を点での設定になる。以上の構成をFig.2-5 に $x \cdot y$ 座標系で図示する。

Fig.2-5のように*x*·*y*座標系をとると、光スキャナ偏向点はS(0,*kf*)に、投影面は 直線 y = f、放物面鏡は $y = x^2/4f$ でそれぞれ表される。

走査ビームの走査角を θ として、投影面における像高 x_0 を求める。まず、放物面 鏡上の反射点 $P_1(x_{p_1}, y_{p_1})$ の座標を求める。

$$y = \frac{x^2}{4f} \tag{2-12}$$

 $y = x \cdot \cot \theta + k f$ (2-13) ただし、 0 < k ≤ 1

式(2-12)、(2-13)より

$$x_{p1} = 2f \cdot \left(-\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k} \right)$$
 (2-14)

また、P₁における接線の傾きを tan
$$\phi$$
 とすると、
tan $\phi = -\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k}$ (2-15)

となる。



Fig.2-5 Schematic diagram of the correcting method of beam scanning distortion using the parabolic mirror.

次に反射光線の傾きをφとすると、

$$\varphi = 90^{\circ} - (\theta - 2\phi) \tag{2-16}$$

であるから、投影点 $P_0(x_{p0}, f)$ の座標は

$$y = (x - x_{p1}) \cdot \tan \varphi + y_{p1}$$
 (2-17)

$$y = f \tag{2-18}$$

として、式(2-17)、(2-18)より

$$x_{p0} = x_{p1} + (f - y_{p1}) \cdot \tan(\theta - 2\phi)$$
 (2-19)

式(2-19)を、式(2-15)を用いて書き換えると、

$$x_{p0} = f \cdot \frac{\tan\theta \cdot (1 + \tan^2\phi)^2}{1 - \tan^2\phi + 2\tan\theta \cdot \tan\phi}$$
(2-20)

となる。次に、光ビーム径を*d*として、光ビーム端の投影点を求める。この場合、 偏向点は $S'\left(\frac{d}{2}\cos\theta, k\cdot f + \frac{d}{2}\sin\theta\right)$ 、 $S''\left(-\frac{d}{2}\cos\theta, k\cdot f - \frac{d}{2}\sin\theta\right)$ となる。Sからの 走査を求める式(2-12)~(2-20)の中で式(2-13)が

$$y = -\cos\theta \cdot \left(x \mp \frac{d}{2}\cos\theta\right) + k \cdot f \pm \frac{d}{2}\sin\theta \qquad (2-13)'$$

式(2-14)、(2-15)はそれぞれ

$$x_{p1} = 2f\left(-\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k \pm \frac{d}{2f \cdot \sin\theta}}\right)$$
(2-14)'

$$\tan \phi' = -\cot \theta + \sqrt{\cot^2 \theta + k \pm \frac{d}{2f \cdot \sin \theta}}$$
(2-15)

となる。したがって、投影点の座標は

$$x_{p0} = f \cdot \frac{\tan\theta \cdot (1 + \tan^2\phi')^2}{1 - \tan^2\phi' + 2\tan\theta \cdot \tan\phi'}$$
(2-21)

となる。

式(2-20)、(2-21)より、投影点のx座標、すなわち像高は、次式で表される。

$$x_{0} = f \cdot \frac{\tan \theta \cdot (1 + \tan^{2} \phi)^{2}}{1 - \tan^{2} \phi + 2 \tan \theta \cdot \tan \phi}$$

$$\hbar \hbar \tilde{h} \tilde{h} \tilde{h} \tilde{h} \tilde{h} \tilde{h} = -\cot \theta + \sqrt{\cot^{2} \theta + k} + \frac{d}{2f \cdot \sin \theta}$$
(2-22)

式(2-22)において、 dの値は Fig.2-5 の中の Sの位置に応じて、それぞれ

$$d = d \qquad (S = S')$$
$$d = 0 \qquad (S = S)$$
$$d = -d \qquad (S = S'')$$

である。偏向点*S'とS*"の投影点の差を幾何光学で求めた錯乱円径と定義して、 後述の2.4.4 で、像面でのビーム径を考察する。

2.4.2 歪曲収差

2.4.1 で求めた像高の歪曲収差を、理想像高 $X = f \cdot \theta$ を基準として、式(2-20)より 求める。 x_0 としては、式(2-22)でd=0とした値を用いる。式(2-20)より、例えば、 偏向位置のパラメータであるkを、k=2/3としたときの歪曲収差を、補正なしの場 合とともに Fig.2-6 に示す。

また、Fig.2-7 に、kを変化させた時、歪曲収差が±0.1%、±0.05%、±0.01%以内にある走査角の範囲を示す。Fig.2-7 より、歪曲収差が±0.1%、±0.05%、±0.01%以内にある、最大走査角と偏向位置は、それぞれ、(62°,0.625f)、(54°,0.645f)、(41°,0.665f)となる。

歪曲収差が小さく、かつ走査角を大きくとることができる範囲は、偏向位置が 0.5 $f \sim 0.8 f$ にある場合で、特に、0.6 $f \sim 0.7 f$ の範囲で改善マージンは大きいこ とを見出した。





2.4.3 走査速度変化

2.4.2 では基準位置に対する投影点の変移として歪曲収差を示したが、ここでは走 査中心部と走査端部における単位時間当たりの投影点の移動幅(走査速度)の変化 を求める。

投影面における光ビーム走査速度変化は、偏向角 θ が等角速度 ω で変化するとして($\theta = \omega \cdot t$)、式(2-22)を時間tで微分することにより求められる。

 $\frac{dx_0}{dt} = \frac{dx_0}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} =$

$$f \cdot \omega \cdot \frac{\frac{1 - \tan^4 \phi}{\cos \theta} + \frac{2}{\sin \theta} \left(1 - \frac{\cot \theta}{\sqrt{\cot^2 \theta + k}}\right) (3 \tan \phi - \tan^3 \phi + 3 \tan \theta \cdot \tan^2 \phi - \tan \theta)}{\cos^2 \phi \cdot \cos \theta \cdot (1 - \tan^2 \phi + 2 \tan \theta \cdot \tan \phi)^2}$$
(2-23)

式(2-23)を式(2-6)に代入して、偏向位置を*k*=2/3とした場合の像面走査速度変化を Fig.2-8 に示す。また、放物面鏡による補正が無い場合(式(2-7))も合わせて表示 する。走査角が 35°の時、補正無しの場合~50%の変化があるのに対して、0.02% 以下と大幅に改善される。



Fig.2-8 Scanning velocity distortion (k=2/3)

2. 4. 4 錯乱円と光ビーム径

ここでは像面での光ビームの拡がりについて記述する。S'とS"からの光線の投影面上の位置ずれを幾何光学的に求めた錯乱円径として定義する。すなわち、

(錯乱円径) =
$$f \cdot \left| \frac{\tan \theta \cdot (1 + \tan^2 \phi_1)^2}{1 - \tan^2 \phi_1 + 2 \tan \theta \cdot \tan \phi_1} - \frac{\tan \theta \cdot (1 + \tan^2 \phi_2)^2}{1 - \tan^2 \phi_2 + 2 \tan \theta \cdot \tan \phi_2} \right|$$
 (2-24)
ただし、 $\tan \phi_1 = -\cot \theta + \sqrt{\cot^2 \theta + k} + \frac{d}{2f \cdot \sin \theta}$
 $\tan \phi_2 = -\cot \theta + \sqrt{\cot^2 \theta + k} - \frac{d}{2f \cdot \sin \theta}$

である。k=2/3として、焦点距離 f=480 mm、光ビーム径を $d=0.5, 1.0, 3.0, 5.0 \text{ mm}^{*}$ の4種について求めた、走査角に対する錯乱円径の計算値を Fig.2-9 に示す。

光線追跡で求めた錯乱円径が十分小さい場合には、実際の光ビーム径は、波動光



Fig.2-9 Circle of confusion (f=480 mm, k=2/3)

学の回折限界で決まる。ガスレーザが最も安定に発振する基本モードでは、光軸に 垂直なビームの断面での光強度分布は中央部に集中するガウス分布となる。そこで、 ガウス分布の平行ビームが焦点距離fのレンズに入射をした際の収束ビーム径を 求める。焦点距離fが $\pi d_o^2/4\lambda$ より十分大きい場合には、最小収束光ビーム径 d_0 と 入射平行ビーム径Dの関係は波長 λ として、次式で表される。

 λ =632.8*nm*(He-Ne レーザ)とした時、 d_0 をパラメータとして、fとDの関係 を Fig.2-10 に示す。実際の像面における光ビーム径は、式(2-24)、(2-25)の大きな 値をとる方で決まる。



Fig.2-10 Beam diameter and focal length ($\lambda = 632.8 nm$)

2.5 実験検証

2.5.1 像高

焦点距離480mmの放物面鏡を用いて、偏向位置を放物面鏡の中心より320mmに、 また、投影面を焦点距離上に設定して、走査角が0°~27°までの像高の測定を 行なった。(走査角は製作した放物面鏡の走査方向の長さで制限された。)実験の 構成をFig.2-11に示す。

実験系は、レーザ光源 (He-Ne レーザ)、ビーム径を決めるコリメータレンズ、 光スキャナ、放物面鏡および投影面から構成される。走査中心付近のデータを取 得するために、放物面鏡への入射ビームは、走査方向に垂直な方向へ軸はずし角 ~5° で入射した。

実験結果を Fig.2-12 に示す。Fig.2-12 より、像高は式(2-20)を用いた計算結果 と非常に良い一致をみた。なお、走査角が-27°~0°も同様の結果を得た。



Fig.2-11 Schematic diagram of the experimental arrangement.

2.5.2 像面光ビーム径

2.5.1 と同様の系により、像面光ビーム径をナイフエッジ法⁽⁵⁸⁾⁻⁽⁵⁹⁾により測定した。 レーザは He-Ne レーザの波長 632.8nm を用いて、放物面鏡への入射ビームは、コ リメータを使ってビーム径1.3*mm^{\$}* と 2.7*mm^{\$}* の 2 種の平行光ビーム径(1/*e*² 幅)を 用いた。実験結果を Fig.2-13 に示す。測定結果から光ビームは全走査角において式 (2-25)で示した回折限界値まで収束されていることが分かる。これは、Fig.2-9 に示 した錯乱円径が回折限界値より十分小さいためである。

2.5.3 レイアウトに関する考察

放物面鏡による走査歪補正は光の反射を用いるため、本質的に反射光と光学系の レイアウトに伴う課題を有している。実験では走査中心付近のデータを取得するた めに、放物面鏡への入射ビームは走査方向に垂直な方向に軸はずし角~5°で入射 した。この結果、像面における走査光ビーム軌跡はわずかに円弧状となり、走査端 部での直線とのズレは~1mm であった。軌跡を円弧として近似すると、円弧の半径 は数 10m のオーダであり、走査幅に比べ十分大きいため、測定結果には軸はずし によるデータの顕著な差は見られなかった。しかしながら、実際にレーザ走査光学 系を用いた入出力機器においては、厳密性を要するため直線からの歪は問題となる。 したがって、実際に用いるには、次のような点を考慮しなければならない。

- (1)入射光と反射光が同一平面の場合には、反射光が光スキャナによって遮断されないようにする。このため、放物面鏡の中心部を用いない構成にする。または、ハーフミラーの使用により、入射光と反射光を分離することが考えられる。しかしながら、光利用効率の観点からは、いずれの方策もロスが大きい。
- (2) 軸はずしで用いる場合には、直線からのずれを補正する光学系を導入する必要がある。例えば、円弧状走査光に沿った円錐鏡や球面鏡による補正が考えられる。



Fig.2-12 Experimental results of image height



Fig.2-13 Experimental results of beam diameter.

まず、回転放物面鏡に対して軸はずし角 γ で入射した場合を考える。3次元空間 において、焦点(0,0,f)の回転放物体の方程式は、

$$z = \frac{1}{4f} \cdot \left(x^2 - y^2\right)$$
 (2-26)

で表される。走査光はy軸に平行な平面上にあるとして、平面のx軸、z軸の交点 δX_0 、 Z_0 とすると、平面の方程式は、

$$\frac{x}{X_0} + \frac{z}{Z_0} = 1 \tag{2-27}$$

であり、式(2-26)、(2-27)より、

$$\left(x - 2f \cdot \frac{Z_0}{X_0}\right)^2 + y^2 = 4f \cdot Z_0 + 4f^2 \cdot \frac{Z_0^2}{X_0^2}$$
(2-28)

式(2-28)は、回転放物体と平面の交線の(x, y)平面への投影が円弧となることを示す。 ここで、走査光は近似的に焦点より走査されたとすると、 $X_0 = f \cdot \tan \gamma$ 、 $Z_0 = f$ より、式(2-28)は、

$$\left(x + \frac{2f}{\tan\gamma}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{2f}{\sin\gamma}\right)^2 \tag{2-29}$$

となり、このとき走査光は(x, y)平面に対して垂直に反射されるため、式(2-29)が求める投影光の近似軌跡となる。

軸はずし角 5°、焦点距離 420 mm の場合、円弧の半径は 9638 mm となり、印字幅 の 13.6 インチを想定すると、直線からのズレは最大 1.5 mm となる。ここで投影光軌 跡に沿った彎曲面鏡によって走査光を折り曲げ反射すると、彎曲補正が可能となる。 そこで、研磨が比較的容易な球面鏡を用いて彎曲補正を行なった。

試作レーザプリンタに曲率半径 10m の球面鏡を用いて、走査角±15°で印字実 験を行った結果、印字全幅 220mm で直線からのズレは印字線幅(0.1mm)以下と なり、彎曲が補正されたことを検証した。以上の結果、放物面鏡を用いた結像光学 系は、回折限界の集光特性を有する、高精度の*f* θ ミラーとして機能することを検 証した。Fig.2-14 に放物面鏡の外観写真を示す。



Fig.2-14 Parabolic mirror



Fig.2-15 Laser printer scanning system with a parabolic mirror

2.6 $f \theta$ ミラー搭載レーザプリンタによる検証

放物面鏡の $f \theta$ ミラー結像光学系をレーザプリンタへ搭載して各種の印字実験を 行い、その光学特性を検証した^{(9),(10)}。レーザ光源には Se-Te 感光体に感度がある波 長 441.6nm の He-Cd レーザを用い、レーザ光を ON/OFF する外部変調器には、超 音波の回折格子によって光を偏向変調する超音波光変調器を用いた。印字画素の変 調周波数は約 15MHz である。光の走査は、12 面体の回転多面鏡を用いて、10,000 行/分(6 行/inch)の高速を実現するために、33,000rpm の回転数を実現するエア ベアリングモータを採用した。多面鏡の各面倒れを補正するため、鏡面上で共焦点 の関係となるように、シリンドリカルレンズ(入射側)とトロイダルレンズ(出射 側)を配置⁽⁶⁸⁾した。 $f \theta$ ミラー結像光学系には、焦点距離 480mm の放物面鏡を用 いて、集光ビーム径が 240 画素/インチを満足するよう、コリメータ光学系を配した。 また、走査線軌跡の彎曲を補正する球面鏡の光学系も配置した。試作したレーザプ リンタの走査光学系の全体構成ブロック図を Fig.2-15 に、外観写真を Fig.2-16 に 示す。

印字結果を Fig.2-17 に Post-objective 型と共に示す。一定周期の縦線の印字を行い、走査角 15°の端部と走査角 0°の中央部で間隔が一定であることを検証した。



Fig.2-16 Proto-type of laser printer optical system



Fig.2-17 Printing samples

最終的に、実機のレーザプリンタ装置に搭載した走査光学系の写真を Fig.2-18 に、 プリンタ本体の外観写真を Fig.2-19 に示す。

レーザプリンタ装置の仕様は、10500 行/分(8 行/インチ)で、解像度は 320 ドット/インチである。各ドット径は 80 μ m ϕ で、1 ページ(15 インチ×11 イン チ)あたり、縦 3,200×横 4,080 ドットを印字する⁽¹⁰⁾。

試作機と同様に、最終的にレーザ光源には、Se-Te 感光体の感度から波長の短い He-Cd レーザ(λ=441.6nm)を採用した。短波長であることは、結像光学系にと っても回折限界の最小スポット径を小さくできるので優位である。

レーザ光の変調は、キャリア周波数 160MHz の音響光学型超音波光変調器⁽⁶⁰⁾⁻⁽⁶³⁾ を 40MHz で変調した。キャリア周波数は、変調周波数の 4 倍を採用して、各ドッ トに対する変調時間のばらつきを解消した。変調光の立上り立下り時間は~14ns、 変調効率は 60%を実現できた。

ビームの偏向走査は、回転数 38,400rpm のエアベアリングモータを使って、外接 直径 60 mm ϕ の 12 面鏡を回転させて行った。走査周波数は 7.68kHz で、面倒れ精 度は 5 秒以下と微小であったため、倒れ補正光学系⁽⁶⁴⁾⁻⁽⁶⁸⁾は不用であった。

結像系には、焦点距離 400mm の放物面鏡による $f \theta$ ミラーを用いて、走査角が 30°以下の全領域において 0.1%以下の位置決め精度の $f \theta$ 特性を実現した。放物面 鏡への走査ビームの入射は、光効率を高めるため、中心軸に対して、軸はずし角 5° (off-axis)で行った結果、像面での走査軌跡は直線から全体で 2mm 弱のズレを生じ た。このズレに対しては、半径 10m の球面鏡を用いて直線に補正した。この結果、 像面上の走査光軌跡の直線からのズレ量は、全走査領域で 1 画素以下に抑えること ができた。また、球面鏡による集光ビーム径の拡大率は、10%以下であり、影響は 無視できる。

レーザプリンタ装置の全体サイズは、長さ3.29m×幅0.93m×高さ1.5mである。 (Fig.2-19 参照)

30



Fig.2-18 Scanning optical system ($^{L}590 \times ^{V}560 \times ^{H}200 \text{ }mm$)



Fig.2-19 Laser printer equipment $({}^{L}3.29 \times {}^{W}0.93 \times {}^{H}1.5m)$
2.7 むすび

従来のfθレンズによる走査光学系では、波長分散特性のため、異なる波長のレ ーザ光源に対して同一の光学系配置を共有することができなかった。この課題に対 して、放物面鏡を使った全く新しいfθミラー走査・結像光学系を考案して、異な るレーザ光に対しても同一の配置で精度良く結像できることを検証した。具体的に は、放物面鏡を用いた走査・結像光学系の配置として、光スキャナの偏向位置を放 物面鏡の焦点距離0.6~0.7の位置に、また、投影面を焦点面上に設定することによ り、レーザ光走査に伴う走査速度偏差と集光ビーム径偏差の補正が高精度に可能で あることを見出した。

この $f\theta$ ミラー走査・結像光学系は、

(1) 歪曲収差が使用レーザ光の波長に無関係に高精度に補正可能

(2) 走査速度偏差が使用レーザ光の波長に無関係に高精度に補正可能

(3) 回折限界値まで光ビーム収束が可能

(4) 光学系の位置設定裕度が大

の利点があることを、光線追跡の光学シミュレーションで解析的に解明し、実験に より検証した。さらに、複数レンズを用いる補正光学系に比べて、放物面鏡のみで 補正系が構成できるために、以下の特徴が加わる。

(5) 構成が簡単で、光学系の設計・製作が容易

応用の視点で見ると、*f* θ ミラー走査・結像光学系を用いることで、遠赤外波長 域や紫外波長域など、適切な光学レンズ材料がない波長領域においても、高精度な 走査・結像光学系をシンプルな構成で実現できる。

結論として、放物面鏡を使った、レーザ波長に依存しない全く新しい走査・結像 光学系を考案し、*f θ* ミラー走査・結像光学系としてレーザプリンタに搭載して、 高い位置決め精度と高解像度な印字特性により、その有効性を検証した。

32

第3章 走査光ビーム信号制御による回転多面鏡の走査誤差補正法 に関する研究

3.1 まえがき

光ビームの走査手段として、高速で広角偏向が可能な回転多面鏡が広く用いられ る。回転多面鏡は、正多角柱型(または正多角錐型)の多面鏡をモータで高速回転 させ、光ビームの反射を利用して走査するため、鏡面の加工精度、モータ軸受け等 の組立精度や、モータの回転速度精度に関して、極めて高い精度が要求される⁽⁶⁹⁾。 しかし、実際の回転多面鏡の精度は必ずしも十分でなく、光学的あるいは電子回路 的な走査歪誤差の補正が不可欠である。

回転多面鏡に起因する走査誤差には、Fig.3-1 に示すように、走査方向に生じる誤差と、走査に垂直方向に生じる誤差がある⁽⁷⁰⁾。後者の走査に垂直方向に生じる誤差は、光学系による補正方法^{(64)⁻(68)}が確立されている。

一方、走査方向に生じる走査誤差については、走査開始地点で走査光を検出して 同期をとる方法⁽⁷¹⁾や、タイミング検出用の光ビームを別に設けて、位置をフィード バックする方法⁽⁸⁾など、電子制御的に補正する方法が提案されている。しかし、一 走査線上の画素数が従来の数倍となる数千以上ある高解像度の応用に対しては、よ



Fig.3-1 Scanning error resulting from a rotational polygon

り一層の精度向上が課題となっている。

回転多面鏡の主な工作誤差および変形の中で、走査方向に誤差を生じる要因には、 以下のものがある。

(1) 角度分割誤差

多面鏡の面数をnとすると、鏡面が 回転軸に対して作る角度 θ_1 は $2\pi/n$ 、 また、 θ_1 の2等分面が鏡面となす角 θ_2 は $\pi/2$ である(Fig.3・2参照)。角度分 割誤差は、 θ_1 および θ_2 の誤差であり、 走査光ビームに対して、 θ_1 は走査幅の 誤差、 θ_2 は走査位置のずれ、スタート タイミング変化をもたらす。





rotating polygonal mirror.

(2) 平面度誤差

各鏡面は完全な平面ではなく微視的には微小な凹凸が存在し、巨視的には研磨 によって外側に凸に彎曲している。また、厳密に言えば、光ビーム走査時には高 速回転による遠心力のために各鏡面は変形することも考慮しなければならない。



To the axis of revolution

Fig.3-3 Flatness error of rotating polygonal mirror-j

平面度誤差は、このような各鏡面の加工誤差および遠心力による変形誤差である

(Fig.3-3 参照)。ただし、高速回転時の各鏡面の変形については、その大きさが 各鏡面でほぼ均一であるため、この変形による画素位置ずれはきわめて小さいと 考えられるので無視できる。

(3) 回転数変動誤差

回転鏡を駆動するモータの特性で、長時間での緩やかな回転変動と、一回転内 の変動がある。長時間の変動は緩やかで局所的には無視できるが、一回転内の変 動は走査方向での画素位置ずれをもたらす。

本研究では、上述した回転多面鏡に起因する走査誤差に対して、まず、走査誤差 の特性を要因別に分析して、電子制御による新しい走査誤差の補正方法を考案し、 試作レーザプリンタに適用して印字実験によって有効性を検証した。

3.2 走査歪補正法の理論的導出⁽³⁵⁾

3.2.1 角度分割誤差の補正

一般に、角度分割誤差の補正は、走査光ビームの有効走査領域の直前に光検出器 を設置し、Fig.3-4に示すように光検出器の出力に同期してデータ制御クロックを発 生し、このクロックにしたがって1周期で1画素ずつデータを処理する方法が用い られる⁽⁷¹⁾。



Fig.3-4 Data control clock.

しかし、高解像度の走査でデータ制御のクロック周波数が高い場合には、鏡面反 射率のばらつきで、光ビーム位置の検出精度が低下して、角度分割誤差の高精度な 補正ができないケースが発生する。具体的には、走査光ビームを光検出器で検知す る場合、検知波形の立上りを一定のしきい値で検出していたため、光強度の変化に 対して、検知位置が振られてしまう現象である。Fig.3-5 で、補正前として示したよ うに、同期信号が変化する。

この課題に対しては、光検出器の出力波形が対称であることに着目して、走査光 ビームの位置検出精度を高める方法を検討した。その結果、従来のしきい値による 同期信号検出に対して、立上りと立下り両方のタイミングを検出して、この間の制 御クロック周期を基準クロックの倍とし、カウント数を半分にして、一定カウント 数で基準位置の同期信号を発することで、光波形の中心軸と等価な位置を検出する 方式を考案⁽³²⁾した(Fig.3-5 参照)。

本方式は、光検出器出力が変化しても、基準クロック周期の 1.5 倍以内の精度で 同期信号を出力できる。この結果、高精度・高解像のレーザ走査系に対し、光ビー ム位置検出精度を高めた検出方式を提案し、採用した。



Fig.3-5 Photo-detector output and synchronizes signal

3.2.2 平面度誤差の補正

平面度誤差は同一の研磨工程で生じるものであり、彎曲の形状は相似形に近いこ とが経験的に知られている。そこで、多くの回転多面鏡(試作機)について平面度 誤差を測定し、その補正方法について検討した。その結果、各鏡面に共通の走査誤 差関数を算出して、これに基づいて平面度誤差を高精度に補正できることを見出し た。以下、試作レーザプリンタに使用した回転多面鏡の測定結果を用いて、補正方 法の詳細を述べる。なお、受光平面上の画素位置は、*f* θ 光学系によって走査角に 比例するとした。

回転多面鏡および入射光、反射光を Fig.3-3 のようにとり、入射光は回転軸と交わる直線上にあって、受光平面はこれに垂直とする。鏡面数をn (nは正の整数)、入射光が鏡面に垂直な場合を基準にして、この状態からの回転角を θ ($-\frac{\pi}{n} \le \theta \le \frac{\pi}{n}$)、回転角 θ における鏡面 j (jは1 $\le j \le n$ なる整数)の反射角の誤差を $\varepsilon_j(\theta)$ とすると、光ビームの走査角すなわち入射角と反射角のなす角 $\phi(\theta)$ は、Fig.3-3 より、次式で表される。

$$\phi(\theta) = 2\left\{\theta + \varepsilon_{i}(\theta)\right\}$$
(3-1)

試作レーザプリンタに使用した回転多面鏡の各鏡面について、静止時の平面度誤 差は触針式表面あらさ計を用いて測定し、走査角誤差を試作レーザプリンタの画素 の大きさに換算した。なお、試作レーザプリンタの仕様は、3.4 の Table 3-1 に示す。

各鏡面の回転角を θ 、 θ の最大値を θ_m とすると、試作レーザプリンタの設計では、 $\theta/\theta_m \cong -0.8$ の位置で走査開始を検出している。したがって、平面度誤差の測定結果 (画素換算値)から $\theta/\theta_m \cong -0.8$ における走査角誤差を基準にして、この値との差 $\delta_i(\theta)$ を計算した。 $j=1\sim6$ についての計算結果を Fig.3-6 に示す。

Fig.3-6 を見ると、回転角に対する走査角誤差の変化の様子は各鏡面ごとにかなり 異なっている。このばらつきの性質を調査する目的で、各鏡面の走査角誤差をそれ ぞれ $\theta/\theta_m = 0.8$ における走査角誤差の値で規格化し、その平均値を求めた。規格化 した走査角誤差を $\delta_{nj}(\theta)$ 、全鏡面の走査角誤差の平均値を $\delta_m(\theta)$ として、これらの計 算結果を Fig.3-7 に示す。



Fig.3-6 Deviation of scanning angle error of each mirror from those at the starting point.



Fig.3-7 Normalized scanning angle error.

走査角誤差のデータから画素位置ずれの概略値を把握するため、ランダムな誤差 が正規分布をする場合について、走査角誤差と画素位置ずれの関係を調べる。鏡面 jの走査角誤差の平均値を $a_j \delta_m(\theta)$ 、分散を σ_j として、鏡面 jと鏡面(j+1)の間の走 査角の差の確率密度関数を計算すると、平均値 μ_i および分散 σ_i は、

$$\mu_t = \left(a_{j+1} - a_j\right) \cdot \delta_m(\theta) \tag{3-2}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_{j+1}^2} \tag{3-3}$$

となる。したがって、走査角誤差がある関数のまわりにばらついているとき、その 関数に対する走査角誤差補正を行なえば、補正誤差はランダムな誤差のみとなり、 その分散は高々2つの鏡面の走査誤差の分散のうち大きい方の√2倍である。

この結果から、走査誤差補正前後の画素位置ずれの概略値を把握することができる。Fig.3-6、Fig.3-7 にこの結果を適用すると、画素位置ずれの最大値は補正前が約±1 画素、補正後が約±0.5 画素となる。正確な値を求めるため、Fig.3-6 の走査角誤差の測定データをもとに、各鏡面について画素位置ずれ $\varepsilon_j(\theta)$ を数値計算した結果をFig.3-8 に示す。

Fig.3-8 では、式(3-2)、式(3-3)で与えられたように、画素位置ずれの平均値は



Fig.3-8 Error of pixel position.

Fig.3-7の関数に相似であり、分散はかなり大きくなっている。画素位置ずれの最大 値は約±0.96 画素である。

走査誤差の関数として Fig.3-7 の $\delta_m(\theta)$ を用いた場合について、補正誤差 $\varepsilon_{ci}(\theta)$ を数値計算した結果を Fig.3-9 に示す。平面度誤差補正後の画素位置ずれの最大値は約±0.47 画素であり、画素位置ずれは補正前の半分以下に補正される。したがって、許容できる画素位置ずれの大きさが一定のとき、平面度誤差を補正することにより、書込み・読み取りできる画素の数を約2倍に増加できる。



Fig.3-9 Error of pixel position correction with function $\delta_m(\theta)$



Fig.3-10 Error of pixel position correction with linear function.

ところで Fig.3-7 から分かるように、試作レーザプリンタに使用した回転多面鏡 は走査角誤差の分散がかなり大きいため、走査角誤差の補正関数の形が多少変わっ ても、補正誤差の大きさはほとんど変化しない。したがって、補正関数の形を実機 に組み込み易い形式とする。すなわち、Fig.3-7 の $\delta_m(\theta)$ は直線に近いので、これを 直線に置換して図式的に補正誤差の変化を調べると、補正誤差は約±0.5 画素となり、 補正精度の低下は十分小さいことがわかる。

走査誤差の関数として直線を用いた場合について、補正誤差 $\varepsilon_{c_j}(\theta)$ を数値計算し た結果を Fig.3-10 に示す。平面度誤差補正後の画素位置ずれの最大値は約±0.52 画 素であり、Fig.3-9 との差はわずかである。したがって、試作レーザプリンタでは補 正関数として直線を使用することが可能であると考える。

以下、走査角誤差のうちで補正関数 $f_c(\theta)$ に比例する部分について、その補正法を 検討する。走査角誤差の補正を無調整化できれば、コストの低減や補正精度の経年 変化除去などが可能となり、多くのメリットが得られる。そこで次に、走査角誤差 補正の無調整化について検討する。

情報書込み・読み取りを行う領域に関して、走査開始検出用の光検知器とほぼ対称な位置($\theta/\theta_m = 0.8$)に、走査終了検出用の光検知器を設置する。各鏡面により 走査された光ビームが両検知器を通過するのに要する時間を測定して、 $f_c(\theta)$ の比例 定数 d_j を求める。ここで、以降の議論で使用する言葉について定義する。走査開始 検出位置から走査終了検出位置までの走査角を有効走査角、有効走査角を走査する のに要する時間を走査時間、走査時間と走査周期の比を走査効率とする。

 $\theta/\theta_m \cong -0.8$ における時刻を0として、時刻*t*における鏡面*j*の走査角 $\phi_i(t)$ を

$$\phi_i(t) = \omega_0 \cdot t + d_i \cdot f_c(\omega_0 t) \tag{3-4}$$

として、有効走査角を ϕ_0 、鏡面jの走査時間を t_i とすると、式(3-4)より、

$$\phi_j(t) = \omega_0 \cdot t + \frac{\phi_0 - \omega_0 \cdot t_j}{f_c(\omega_0 t_j)} \cdot f_c(\omega_0 t)$$
(3-5)

となる。次に、走査角の補正目標値として鏡面Gを考える。鏡面Gの走査時間を t_G 、時刻tにおける走査角を $\phi_G(t)$ として、有効走査角に対応する画素数を N_0 (N_0 は正の整数)、鏡面jの走査角が走査開始位置からi番目($1 \le i \le N$)の画素に対応する時

刻をt_{ii}とすると、

$$\phi_G\left(\frac{i}{N_0} \cdot t_G\right) = \phi_j(t_{ji}) \tag{3-6}$$

より t_{ji} が求められる。 $f_c \{ \omega_0 \cdot (i/N_0) \cdot t_G \} \cong f_c (\omega_0 \cdot t_{ji})$ であるから、 t_{ji} は、

$$t_{ji} = \frac{i}{N_0} \cdot t_G + \frac{f_c \left\{ \omega_0 \left(i/N_0 \right) t_G \right\}}{f_c \left(\omega_0 t_G \right)} \cdot \left(t_j - t_G \right)$$
(3-7)

となる。式(3-7)から、鏡面 *j* の走査角を鏡面 *G* の走査角に一致させるためには、周 期が t_G/N_0 のクロック信号を基準にして、これに式(3-7)の第2項で与えられる補正 を加えればよい。補正量は $(t_j - t_G)$ に比例し、比例定数 $f_c \{\omega_0(i/N_0)t_G\}/f_c(\omega_0t_G)$ は走 査時間の測定値 t_j に関係しないので、あらかじめ 1 ≤ *i* ≤ N_0 なるすべての *i* の値に対 して計算して ROM 等に記憶させておくことができる。

回転数変動により、鏡面 jの走査時間 t_j が $(1+\varepsilon)$ ・ t_j に変化したとすると、式(3-7) において、 t_{ii} の変化 Δt_{ii} は

$$\Delta t_{ji} = \varepsilon \cdot t_j \cdot \frac{f_c \left\{ \omega_0 \left(i/N_0 \right) t_G \right\}}{f_c \left(\omega_0 t_G \right)}$$
(3-8)

となる。走査時間 t_j の変動はきわめて小さいので、各鏡面の Δt_{ji} の値はほぼ一定で あると考える。したがって、画素位置ずれに対する影響はきわめて小さく、回転数 変動による走査時間の変動は無視できることになる。

なお、回転多面鏡の回転数変動については、次節 3.2.3 で詳しく検討する。

3.2.3 回転数変動による走査誤差の補正

回転多面鏡の回転数変動は、一般に、一回転の周期に比べ2桁以上長い周期である。しかも、その変動の大きさは、一般に0.1%未満であり、変動の速さもきわめて 遅いが、厳密には、走査速度の変動、画素位置ずれ、走査時間の変動による平面度 誤差補正精度低下などをひきおこすので、これらについて検討する。

回転数の変動は正弦的であるとし、回転多面鏡の回転角速度 $\omega(t)$ を

$$\omega(t) = \omega_0 \cdot \{1 + d \cdot \sin(k \cdot \omega_0 t)\}$$
(3-9)

ただし*ω*₀,*d*,*k* は定数

とおく。 ω_0 は回転角速度の理想値であり、走査周期を t_0 とすると、

$$\omega_0 \cdot t_0 = \frac{2\pi}{n} \tag{3-10}$$

である。走査効率を η とすると、時刻tから $t+\eta t_0$ までの走査角 $\theta_{\eta t_0}(t)$ は、 d << 1, k << 1より

$$\theta_{\eta \cdot t_0}(t) = 2 \int_{t}^{t+\eta \cdot t_0} \omega(\tau) \cdot d\tau = 2 \cdot \eta \cdot t_0 \cdot \omega_0 \{1 + d \cdot \sin(k \cdot \omega_0 t)\}$$
(3-11)

となる。従って、走査角 $\theta_{\eta_{r_0}}(t)$ における画素数 N_0 とすると、任意の走査線間の走査 角 $\theta_{\eta_{r_0}}(t)$ の差を画素の大きさに換算した値 $\Delta \theta_{\eta_{r_0}}(t)$ は、mを任意の整数として、

$$\Delta \theta_{\eta \cdot t_0}(t) = \frac{\theta_{\eta \cdot t_0}(t) - \theta_{\eta \cdot t_0}(t - m \cdot t_0)}{2\eta \cdot \omega_0 \cdot t_0 / N_0} = N_0 \cdot d \cdot \left[\sin(k \cdot \omega_0 t) - \sin\{k \cdot \omega_0 \cdot (t - m t_0)\} \right]$$

$$\therefore \left| \Delta \theta_{\eta \cdot t_0}(t) \right| \le 2N_0 \cdot d \tag{3-12}$$

となり、 $m \ll n/(2\pi k)$ の時には、

$$\Delta \theta_{\eta \cdot t_0}(t) \cong N_0 \cdot d \cdot k \cdot \omega_0 \cdot m \cdot t_0 \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t)$$

$$\therefore \quad \left| \Delta \theta_{\eta \cdot t_0}(t) \right| \le N_0 \cdot d \cdot k \cdot \omega_0 \cdot m \cdot t_0$$
(3-13)

となる。

式(3-13)の近似条件 *m*<<191から *m*=1 とおいて、試作レーザプリンタでは、 $k < 10^{-2}$ 、 $d < 10^{-3}$ 、 $N_0 \cong 4400$ 、*n*=12であるから、画素位置ずれは 0.023 画素以下 となり、無視できることになる。また、回転数変動による走査角 $\theta_{\eta_{r_0}}(t)$ の変化は、 式(3-12)より 9 画素以下であり、走査角 $\theta_{\eta_{r_0}}(t)$ の変化の周期は、式(3-12)より、

 $k \cdot \omega_0 \cdot t_0 = 2\pi$

$$\therefore \quad m = \frac{2\pi}{k \cdot \omega_0 t_0} = \frac{n}{k} > 1200 \tag{3-14}$$

となる。すなわち、回転数変動による走査角 $\theta_{\eta_{t_0}}(t)$ の変化の大きさは、約 9 画素以下であり、その変化の1周期で1,200 回以上の走査が行われる。

すでに述べたように、平面度誤差の補正は、各鏡面による有効走査角の走査時間 を測定して、その値に応じてデータ制御クロックの周期を変化させ、画素位置を自 動的に常に目標値に一致させる。したがって、走査周期よりはるかに長周期の回転 数変動による画素位置ずれは、平面度誤差と同時に自動的に補正されることが明ら かになった。

3.2.4 f θ 光学系を用いない走査速度補正の考察

回転多面鏡により、光ビームは一定角速度で走査され、これを平面上で受光する 場合には、2.2 で述べたように受光平面上での走査速度は走査角の関数となる。こ のように等角速度で走査された光ビームを用いて、有効走査角全体にわたって一定 解像度(一定画素間隔)で情報書込み・読み取り等を行う方法には、次のようなも のがある。

(1) f θ 光学系を用いて、受光平面上での走査速度を一定にする。

(2) 走査された光ビームを受光平面上において一定距離間隔で検出し、この光検 出出力をもとに、書込み・読み取り等のデータを処理する。

第2章で述べたように、一般には $f\theta$ 光学系による補正法が広く用いられており、 3.2.2、3.2.3 では $f\theta$ 光学系を用いる場合の各種走査誤差の補正について検討してき た。しかし、ここでは、データ制御クロックの周期を変化させることにより、 $f\theta$ 光 学系を用いない場合に生じる走査速度歪の補正法について考察する。

走査速度が変化する光ビームを用いて、有効走査角全体にわたって一定解像度 (一定画素間隔)で情報書込み・読み取り等を行うためには、データ制御クロック の周期を、各画素位置における走査速度に応じて変化させれば良い。Fig.3-3 におい て、受光平面は入射光と垂直であるとし、回転角が0のときの鏡面と受光平面の間 の距離をfとする。このときの受光平面上の光ビーム位置を原点とし、走査角が $\phi_s(\theta)$ のときの光ビーム位置を ϕ_s の関数 $y(\phi_s)$ とあらわすと、回転多面鏡の内接円半 径をrとして、

$$y\{\phi_{S}(\theta)\} = f \cdot \left\{1 - \frac{r \cdot (1 - \cos \theta)}{f \cdot \cos \theta}\right\} \cdot \tan\{\phi_{S}(\theta)\}$$
(3-15)

となる。この式から、有効走査角内の各画素に対応する走査角を計算することがで きる。したがって、各画素に対応する時刻が計算でき、データ制御クロックの周期 が回転多面鏡の回転角*θ*の関数として得られる。これを平面度誤差の補正関数と合 成して、データ制御クロックの周期を変化させれば、 $f\theta$ 光学系を用いない場合の 走査速度歪も、平面度誤差補正と同時に、電子回路的に補正できる。すなわち、提 案した方式は、任意の走査系に対して適用できる拡張性を有している。しかし、電 子回路では、光ビームのスポット径の補正はできないため、実際のレーザプリンタ では、 $f\theta$ 光学系を用いた補正法を採用した。

3.3 補正回路の設計

3.3.1 平面度誤差の補正回路

平面度誤差を補正するためには、式(3-7)にしたがってデータ制御クロックの周期 を制御する必要がある。全画素数に比べて1桁以上高い周期の安定度、再現性を実 現するため、高安定度の基準クロック信号をもとにしてデータ制御クロックを作る。 平面度誤差補正回路のブロックダイヤグラムを Fig.3-11 に示す。

基準クロック信号(周期 T_{G})から互いに位相が T_{G}/k (kは正の整数)だけ異なるk 個のクロック信号を作り、データセレクタでこの中の一個を選択する。出力ゲート は、選択切替時の過渡出力および不要な選択信号(出力信号の周期を T_{G} より長くす るとき)を除去する。走査開始位置と走査終了位置に設置した光検出器により、光 ビームの走査時間を測定する。補正すべき鏡面の走査時間は走査が終了した時点で 得られるので、これをメモリに書き込み、多面鏡が1回転した時に記憶した測定値 を使用する。クロック信号の選択制御回路は、データ制御クロック出力を計数し、 この計数値とメモリから読み出した走査時間測定値から、データセレクタおよび出 力ゲートの制御信号を出力する。

本方式では、平面度誤差の補正誤差の他に、データ制御クロック周期での量子化 誤差を生じる。この量子化誤差を画素の大きさに換算した値を*e_q*とすると、これは 明らかに選択値切換えの直前に最大となり、

$$\left| e_{q} \right| < \frac{T_{G}/k}{T_{G}} = \frac{1}{k}$$
(3-16)

となる。

 e_q の符号がすべての鏡面に対して同一であれば、この量子化誤差による画素位置 ずれは、画素位置の目標値に対してすべて同一方向に生じるため、この誤差の影響 を半減させることができる。したがって、式(3-16)における走査時間の目標値 T_c は、 すべての鏡面の走査時間 t_j (j=1, 2, ..., n)の最大値よりも大きいか、または最小値よ り小さくする必要がある。このとき、回転数変動による各鏡面の走査時間の変動を 考慮する。

なお、Fig.3-11 の回路は、周期が T_G/k の基準クロック信号を、分周比を変えて 分周したのと同じ動作をする。式(3-16)で与えられる量子化誤差を小さくするため には、kを大きな値にしなければならない。このため、分周器を用いる方法では、 非常に高速の論理素子を必要とする。Fig.3-11の回路では、論理素子の動作速度は 出力信号の最高周波数によって決まり、kの値には直接依存しないため、容易に量 子化誤差を小さくすることができる利点も有する。

3.3.2 走査速度歪の補正回路

平面度誤差の補正と走査速度歪の補正の相違点は、データ制御クロック周期の関数形のみであるから、走査速度歪の補正回路のブロックダイヤグラムは、Fig.3-11と同一となる。Fig.3-11において、平面度誤差の補正関数と走査速度歪の補正関数を合成するとき、量子化誤差の増加を最小に押さえるため、2つの関数値を表現するためのビット数はできる限り大きくとり、関数を合成した後にこれをk段階に量子化した。



Fig.3-11 Block diagram of flatness error correction circuit.

3.4 走査歪補正法の実験的検証

以上に述べた平面度誤差および走査速度歪の補正方法を、高速高解像の試作レー ザプリンタに適用して印字実験による検証を行った。試作レーザプリンタ⁽¹⁰⁾の主要 仕様を Table 3-1 に示す。

なお、3.2.3 で定義した有効走査角に対応する受光平面上での走査領域の幅を、有 効走査幅と表す。また、試作レーザプリンタの光学系配置上の都合から、*f* θ 光学 系なしの場合には、結像光学系の焦点距離が*f* θ 光学系よりも長くなり、有効走査 幅は同一でも有効走査角は小さくなる。

平面度誤差補正回路の動作を確認するため、*f*θ光学系として放物面鏡を用いた 試作レーザプリンタで印字実験による検証を行った。平面度誤差補正回路の性能を Table 3-2 に示す。

平面度誤差の補正を行なわない場合、画素の位置ずれは走査終了位置で最大になる。走査終了付近 $\theta/\theta_m \cong 0.7$ における印字結果とその3倍拡大写真を Fig.3-12 に示す。なお、走査時間の目標値は各鏡面の走査時間の中で最も短いものに一致させた。

Fig.3-10 より、 $\theta/\theta_m \cong 0.7$ における補正誤差は、約±0.43 画素以下であり、平面 度誤差補正後の画素位置ずれは Table 3-2 より約±0.55 画素未満となるはずである。

Fig.3-12の印字結果では、補正前には±1 画素程度の画素位置ずれが見られるが、 補正後には画素位置ずれは約±0.5 画素以下になっており、平面度誤差は理論とおり 補正されている。また、Table 3-2 より全印字領域での平面度誤差補正後の画素位 置ずれは、約±0.65 画素未満となる。

次に、走査速度歪補正回路の動作を確認するため、*f*θ光学系を用いない試作レ ーザプリンタで、印字実験を行った。走査速度歪補正の量子化誤差は±0.06 画素未 満とした。また、平面度誤差の補正は走査速度歪の補正と独立に行い、その性能や その他の条件は Table 3-2 と同一とした。

47

走査速度は、式(3-15)より走査範囲の中央で最も遅く、走査範囲の両端で最も早 くなるので、印字領域の左端と中央における印字結果を Fig.3-13 に示す。なお、こ の時の走査角は 15.9°であるので、走査速度の比は、式(2-7)より sec² 15.9° ≅1.08 で ある。

Fig.3-13より、走査速度歪は理論通り補正されていることが検証できた。

Item	Specification
Printing speed	10,000 lpm (at 8 lpi)
Resolution	12.6×12.6 pels/mm
Printing width	344 mm (4,332 pels)
Number of facets	12
Effective scanning	$\pm 24.6^{\circ}$ (with $f \theta$ optics)
angle	$\pm 16.9^{\circ}$ (without $f \theta$ optics)

Table 3-1 Main specifications of the laser printer

Table 3-2 Specifications of scanning error correction circuit

Item	Specification
Facet to facet angular error	± 0.06 pels
Facet flatness error	±0.57 pels
Quantization error	±0.06 pels



Fig.3-12 Printing samples of facet flatness error correction



Without error correction

With error correction

Fig.3-13 Printing samples of scanning velocity error correction (without $f \theta$ optics. $\theta=15.9^{\circ}$)

3.5 むすび

回転多面鏡の鏡面の工作誤差により生じる走査誤差を補正する方法として、まず、 各鏡面の面形状を測定して誤差要因を分析し、次に、各鏡面に共通の走査誤差関数 を求め、これらに基づいてデータ制御クロック周期を補正する方法を考案した。

具体的には、走査の開始側と終了側の2ヶ所に光検出器を設置して、光ビームの 走査時間を測定し、各鏡面の走査誤差振幅を算出することにより、走査誤差補正を 無調整化した。この走査誤差補正方法を試作レーザプリンタに適用して印字実験を 行い、印字画素の位置ずれを約1/2に補正できることを確認し、有効性を検証した。

また、 $f\theta$ 光学系を用いない場合の走査誤差も、上述した走査誤差補正と同時に 補正できることを提示し、試作レーザプリンタで $f\theta$ 光学系なしでの印字実験を行って、これを検証した。

さらに、提案した走査誤差の補正方法により、回転多面鏡の回転数変動も自動的 に補正されることを確認した。 第4章 半導体レーザ走査光学系のz軸方向位置の高精度化と 小型化に関する研究

4.1 まえがき

1980 年代に、常温で可視波長域の光を発する超小型・半導体レーザの実用化が なされ、レーザ走査光学系は大きく進展した。レーザプリンタ機能をベースとして、 読取・複写機能のデジタル化に加えて、通信機能を備えることで、今日の多機能周 辺装置(MFP)は、オフィスの中核機器として、幅広い活用がなされている。

半導体レーザは、超小型・軽量、直接変調可能、高効率で低消費電力駆動、さら に、高い信頼性、長寿命、低コストが期待できるなど、多くの特徴を有している。 しかしながら、半導体レーザ光は、縦0.1µm、横10µmの小さな発振導波路より 射出されるため、回折効果で大きく

拡がる。拡がり角は PN 接合面に垂直 方向で 30~70°、平行方向で 10~30° になる。

このため、レーザ走査光学系への 適用では、この発散ビームを平行(コ リメート)光ビームに変換するコリ メートレンズ系が不可欠であり、レ ンズ系には、開口数(NA)が大きく、 収差が少ない特性が要求される⁽⁷²⁾⁻⁽⁷⁶⁾。



Fig.4-1 Laser diode (LD)

さらに、光学系を構成する上では、コリメートレンズに対する半導体レーザ光源 の位置決め精度が厳しく、温度変化や機械的な振動で容易に結像特性が劣化すると いう課題があった。また、半導体レーザ波面のビームウェスト位置が PN 接合に垂 直な方向と水平方向で異なる非点収差と、駆動条件で波長変化も生じることも課題 であった。

一方、半導体レーザによって光源が画期的に小さくなったため、レーザプリンタ には、プリンタ装置の小型化と共に、プリンタ機能と複写機能を両立させる多機能 化が要望された。この多機能化を実現するには、半導体レーザ走査光学系は、電子 写真の露光プロセスを共有する複写光学系と、狭い露光空間で共存を実現しなけれ ばならない。ガスレーザ光学系に比べて、半導体レーザは直接変調が可能なため光 変調器は不要となるが、放物面鏡のfθミラーなど、実用化にはスペースを占有し た各機能デバイスの見直しが不可欠である⁽¹⁷⁾⁻⁽²⁰⁾。それには、走査光学系の機能は 変わらないため、各機能デバイス個々の小型化と、全体システムの小型化を実現す ることが課題である。

4.2 半導体レーザ光のコリメート化に関する研究

半導体レーザ光はガスレーザに比して、大きく発散しているため、レーザ走査光 学系に適用するには、レンズによるコリメート化が不可欠である。しかし、半導体 レーザとコリメートレンズの位置決めには高い精度が要求され、実用化に際しては、 温度変化や振動・衝撃に対しても、発散光を安定にコリメートする必要がある^{(77),(78)}。 ここでは、半導体レーザ光のコリメート化に伴う諸課題に対して、温度変化、振動・ 衝撃の実用化規格を満足できる方式を検討する。

4.2.1 LDモジュールの信頼性設計

半導体レーザの発散光を安定にコリメートするために、半導体レーザとコリメートレンズを一体化したLDモジュールを提案する。本LDモジュールの構築では、 半導体レーザとコリメートレンズを固定する、筐体の設計がポイントである。

半導体レーザの主な仕様は、中心波長 760nm、出力 5.5mW で、拡がり角は 70°×10°である。また、半導体レーザはパッケージに密閉されているので、コリメ ートレンズの設計は、パッケージのキャップ部を含む作動距離 WD(Working Distance:レーザ発光点とレンズ先端間の距離)と、出射するコリメートビーム径 を考慮して行った。出射ビーム径*d*_cは、収差のない理想的なレンズでは、正弦条 件から求めることができ、

$$d_c = 2f \cdot \min(\sin\theta, NA) \tag{4-1}$$

である。ただし、fは焦点距離、 2θ は $1/e^2$ 値のビーム拡がり角、 $\min(a, b)$ はa, bのうち小さな数とする。

次に、位置決め精度について検討する。コリメートレンズの焦点距離を f_1 、結像 レンズの焦点距離を f_2 、コリメートレンズと結像レンズの距離をaとする (Fig.4-2 参照)。理想的には、半導体レーザの発光位置がコリメートレンズの焦点にあれば、 結像レンズの焦点位置に光ビームは集光される。半導体レーザとコリメートレンズ 間の距離が+ Δ_1 変化した時の結像面上の集光位置のズレを Δ_2 とすると、

$$\Delta_2 = \frac{-f_2^2}{f_1 + f_2 - a + f_1^2 / \Delta_1} \cong -\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \cdot \Delta_1$$
(4-2)

となる。すなわち、半導体レーザの位置決め誤差は、結像面上では、コリメートレンズと結像レンズの焦点距離の比の約2乗倍に拡大される。

例えば、 f_1 =4.3*mm*, f_2 =270*mm*, a=50*mm* とすると、半導体レーザが光軸上で+ Δ_1 が1 μ m移動すると、結像面側では約4*mm*の焦点ずれを生じる。このため、コリメートレンズと半導体レーザの位置決めには、ミクロンオーダの精度が要求され、温度変化や機械的振動でも容易に結像特性が劣化する可能性がある。

そこで、半導体レーザとコリメートレンズを一体化する LD モジュールでは、筐 体材料の熱膨張係数を考慮し、温度変化に対して安定となる構造を検討した。レー ザプリンタ装置の規格となる温度範囲は 5℃~40℃である。この温度範囲では、光



Fig.4-2 Relationship of optical components

学系レンズの焦点距離変化は十分小さいと仮定した。長さ ℓ_3 のモジュール筐体の 両端を基点として、左端から ℓ_1 の位置に半導体レーザを、右端から ℓ_2 の位置にコ リメートレンズを配置し、それぞれのホルダ材料の熱膨張率を k_1, k_2, k_3 とすると、 温度変化によって生じる変化 Δ は、

 $\Delta = \ell_3 \cdot k_3 - \ell_1 \cdot k_1 - \ell_2 \cdot k_2 \tag{4-3}$

であり、Δが0になるよう筐体の材料を選択して、3種類のLDモジュールを製作 した。

温度特性の評価は、試作した LD モジュールを恒温槽に入れ、透明窓から出射す る平行ビームの拡がり角の変化を焦点距離300mmの集光レンズで集光位置の変化 として測定し、式(4-2)の関係から半導体レーザとコリメートレンズ間の距離に換算 した。3種類の素材と構造に対する温度特性の測定結果を Fig.4-3 に示す。入出力 機器の設置規格の温度範囲 5℃~40℃に対して、変化は見られるものの、いずれの 素材と構造においても 0.1um 以下の精度で実現できることを確認した。

実際のコリメートレンズでは、レーザのパッケージ窓(屈折率、厚み)の存在も 考慮して、収差検討を行い、レーザ出力と波面の安定度から、焦点距離 10.2 mm、 開口数(NA) 0.4 のレンズを採用した。



Fig.4-3 Temperature characteristic of LD module

Fig.4-3 における *No*.3の素材と構造によるLDモジュールを Fig.4-4 に、外観写 真を Fig.4-5 に示す。全体サイズは、32*φ*×41 *mm* である。

LD モジュールの組み立て調整では、 $x \cdot y$ 軸に対しては、 $10\mu m$ 以下、z 軸方向 に対して 0.5 μm 以下の精度で微調整ができるように専用調整冶具を製作して対処 した。調整冶具の外観写真を Fig.4-6 に示す。 $x \cdot y$ 軸方向の位置調整を半導体レー ザ側で、z 軸方向の調整をコリメートレンズ側で行う構造とした。

本LDモジュールの振動・衝撃に対する信頼性評価として、正弦波振動試験と衝撃試験を行った。

振動試験装置(明石製作所製 ASE・42型)は、加振力(最大350kg、連続200kg)、 周波数範囲 0~3kHz の性能を持っており、LD モジュールに加える加速度を入出 力機器の規格 1G より徐々に増加して、印加前と印加後の集光特性の変化を調査し た。その結果、入出力機器の設置規格の 10 倍を越える、10.8G(通信機器の設置 規格)の加速度をx 軸とz 軸方向に2時間にわたり加えた後も、集光特性に変化は なく、LD モジュールの間隔変化は認められなかった。





Fig.4-4 Components & parts of LD module

Fig.4-5 LD module

衝撃試験装置(吉田精機 KK 製 DST-300)は、ゴムブロック(鉄床)上への自 由落下型で最大加速度200Gの性能である。本衝撃試験装置を使って、入出力機器 の設置規格3Gを遥かに越える120G(通信機器の設置規格100G)をx軸とz軸 方向に3回加えた結果、LDモジュールの間隔変化は認められなかった。

以上の結果、製品適用における信頼性の評価規格を超える、5~50℃の温度変化、 加速度10G までの振動、100G までの衝撃に対して、LD モジュールは、安定に設 定が維持できることを検証した。

製作した LD モジュールの主な性能を以下に示す。

- (1) 光出力:3mW以上
- (2) 中心波長:760 nm
- (3) コリメートビーム径:縦8×横~2mm
- (4) 外形寸法: 32 φ×41 mm
- (5) 重さ:135g



Fig.4-6 Adjustment equipment of LD module

4. 2. 2 LD モジュール出射光の考察

LD モジュールから出射された平行光ビームは、PN 接合に垂直方向と水平方向 の広がり角が異なるため、コリメートレンズの NA が水平方向の広がり角よりも大 きい場合には、楕円形状の断面となる。レーザ走査では、集光した楕円ビームの短 径方向を主走査方向とすることで、結像面での走査光の*ON*/*OFF* 時の立上り/立 下り特性が急峻となり、記録幅の精度が改善される。

一方、半導体レーザが非点隔差(PN 接合に垂直方向と水平方向のビームウェス ト位置の間隔差)を持つ場合には、両方向のビームが厳密には平行光とならない。 半導体レーザ自身の改善を図ることが本質であるが、両方向の結像位置を一致する には、対症療法として非点隔差の補正を行う必要がある。

楕円形状補正には、シリンドリカルレンズ・ペアを用いる方法と、プリズムを用いる方法がある。ビームに非点隔差がある場合にはシリンドリカルレンズを用い、 無い場合にはプリズムを用いる(Fig.4-7 参照)。プリズム補正では、半導体レーザ は PN 接合面に平行方向に偏光しているため、ブリュスタ角のプリズムを用いると 反射損を少なくでき、ビーム径はプリズム材質の屈折率倍に拡大される。



Fig.4-7 Beam shaping method

また、半導体レーザの出力が十分高いか、感光体の感度が十分高い場合には、光 の効率を犠牲にして、ビームの長径方向をスリットでカットした整形法が採用でき る。因みに、半導体レーザに要求される出力 P(W)は、プリンタの仕様である記録 幅W(mm)、記録速度V(mm/s)と、感光体感度 $\xi(J/mm^2)$ 、光学系の全効率 $\eta = (走$ $査効率<math>\varepsilon$) × (光効率 ζ) で決まり、相互の関係は、式(4-4)で表される。

$$P = \frac{\xi \cdot W \cdot V}{\eta} \tag{4-4}$$

次に、半導体レーザの駆動条件について述べる。変調周波数 f_m は、プリンタの記録幅W(mm)、記録速度V(mm/s)、解像度 縦 δ_v (画素/mm)、横 δ_h (画素/mm)、 走査効率 ε として、

$$f_m = W \cdot V \cdot \delta_V \cdot \frac{\delta_h}{\varepsilon} \tag{4-5}$$

である。例えば、記録幅300mm、記録速度 500mm/s、縦横の解像度 10 画素/mm、 走査効率70 %とすると、変調周波数は 21MHz となる。したがって、変調周波数は、 高々数十 MHz であるため、変調周波数特性の限界について考慮する必要はない。

最後に、光波長と光出力を決めるしきい値電流は、周囲温度に依存して変化する ため、駆動時の温度変化は考慮しなければならない。光波長の変化は、感光体の感 度が緩やかに変化する範囲内のため感度は問題とならない。一方、しきい値電流 I_{th} は、周囲温度T (°K)として、

$$I_{th} \propto \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \qquad T_0 = const.$$
 (4-6)

と過敏に変化する。この対策として、パッケージ内蔵の光検出器を用いて、常時、 光出力をモニタし、結果をフィードバックして、温度変化に対しても安定な光出力 が得られるようにした。

4.3 走査光学系の小型化の研究

多機能周辺機器(MFP)の実現に向けては、電子写真プロセスの露光プロセスを、 複写投影光学系と共有共存するため、レーザ走査光学系は、設置スペースをできる だけ少なくする必要がある。このため、走査光学系の個々の機能デバイスについて、 小型化・省スペースの視点で仕様を見直し、小型化に向けた方式を検討する。

4.3.1 回転多面鏡の小型化の研究

広域を走査できる光走査系には、ガルバノミラーや回転多面鏡のメカニカル方式 が適している⁽⁷⁹⁾⁻⁽⁸²⁾。そこで、一層の小型化を実現するために、走査速度、解像点 数、走査角度、光損失をパラメータとして、メカニカル方式を比較検討した。

ガルバノミラーは、大幅な小型化が期待されたが、往復走査による印字実験を行 った結果、振動に弱く、偏向精度が低く、バラツキの再現性がないため、第3章で 述べた電子回路による走査補正を加えても十分な性能が得られないことが判った。

一方、回転多面鏡は、光損失も少なく、高解像走査が可能である。そこで、小型 化を実現するため、ベアリング間にモータを内蔵する方式を検討した。また、走査 光学系の全体を小型化することで、結像面までの距離が短くなり、回転多面鏡に厳 しかった要求精度についても緩和され、製造歩留まりの向上が期待できた。

多面体鏡の回転駆動部は、スピンドルのベアリング間にモータを内蔵して、小型



Fig.4-8 Arrangement of motor and bearing

化を図った(Fig.4-8参照)。10面体鏡を取り付けた全体構成図を Fig.4-9 に示す。

モータは小型の DC 直流タイプを用い、ノイズ発生の少ないブラシレスモータを 採用した。回転時のベアリング等からの油漏れによる鏡面汚れを保護するために、 ミラー取付下部に凹凸のラビリンスを設け、その外周にフェルトを埋め込んだ構成 とした。ベアリング間隔は65mmで、軸のたわみ、回転時の振動・騒音を小さくす るために、バネ圧 6.5kg のコイルスプリングを用いて定圧型の予圧を加えた。

回転多面鏡の倒れ精度を確保するために、多面鏡取付面の回転時の振れは1µm 以下を目標とした。この精度を確保するために、取り付け面を回転しながらラップ



Fig.4-9 Composition figure of a polygonal mirror



Fig.4-10 Tilt angle of polygonal mirror

加工するセルフ研磨を行い、振れを $0.5\mu m$ にできた。また、回転時バランスは 2gmmの目標に対して、0.5gmmであった。

回転多面鏡の総合の倒れ精度の実験結果を Fig.4-10 に示す。倒れ精度は動作時 全体で±2.3 秒以下と非常に良好な特性を示した。今回用いた多面体鏡は、ガラス 素材(硬質 BK 7)の内接円径 80 μm^{\$}、厚さ 10 mm の 10 面体で、反射面は金蒸着 を行い、反射率 93%以上、面倒れ±2″以下を実現した。本回転多面鏡の外観写真を Fig.4-11 に示す。

4.3.2 走査・結像レンズの小型化の研究

ガスレーザの場合は、光源のサイズが大きいため光学系全体のスペースが大きく なり、走査結像系に放物面鏡を用いるスペースも十分に確保できたが、半導体レー ザ走査光学系では、全体を小型化するために放物面鏡 *f* θ ミラーは不適切である。 小型化の観点から、走査偏向点の近くに設置可能な新たな結像機能デバイスを実現 することが課題となった。そのため、走査偏向点の近傍に設置可能な*f* θ レンズに ついて検討した。



Fig.4-11 Photograph of polygonal mirror

まず、新たなfθレンズの構成として、球面形状レンズで、平凸1枚、凹凸2枚 構成、凸凹凸、凹凹凸3枚構成など、回転多面鏡との一体化が可能な小型化形状を 条件に設計した。

本設計では、回転多面鏡の回転に伴う偏向点移動を考慮して、評価関数Φに、メ リディオナル方向とサジタル方向の像面彎曲特性と、*f* θ 歪曲収差を用い、収差を 目標値に近づけることとし、収差の最小値を得るよう最適化した。

その評価関数を次式に示す。

(評価関数Φ) =
$$\sum \left\{ (重 \lambda) \times \{ (収 差) - (目 標値) \}^2 \right\} =$$

 $w_1 \cdot (\Delta M - \Delta M_0)^2 + w_2 \cdot (\Delta S - \Delta S_0)^2 + w_3 \cdot (\Delta SA - \Delta SA_0)^2 + w_4 \cdot (\Delta Y - \Delta Y_0)^2 + \cdot \cdot$
(4·7)

例として、凹凹凸3枚組構成の レンズ設計について示す

(Fig.4-12 参照)。回転多面鏡側
 より、屈折面を1~6とし、各屈
 折面の曲率半径をr₁~r₆、第1~
 第3レンズの屈折率をn₁~n₃、光
 軸上の中心厚、間隔をd₁~d₆、走
 査角0°のときの第1屈折面と回
 転多面鏡の距離(光軸上)をd₀₀とする。





この凹凹凸3枚構成の $f \theta \nu \nu x x \delta x$ 、モンテカルロ法を用いた光学シミュレーションによって評価関数の式(4-7)を使って最適設計することで、いくつかの知見を得た。屈折率に関しては、 n_1 、 n_2 は小さく n_3 が大きい程、良好なレンズ設計が可能である。また、レンズの厚みは収差補正には関係しない。同様に d_{00} は収差補正には関係しないが、レンズサイズに影響を与え、小型化のためにできるだけ短くする。

設計条件として、像高 $f\theta$ の係数f'=270.1、最大走査角(画角)27.26°、光軸に 対する回転多面鏡への入射角70°、回転多面鏡の内径を40mmとした。設計した $f\theta$ レンズの歪曲収差と像面における集光ビーム径(走査中心を $60\mu m$ とする)の計 算結果をFig.4-13に示す。また、光線追跡図をFig.4-14に示す。



Fig.4-13 Aberration curves of $f \theta$ lens



Fig.4-14 Composition of the $f \theta$ lens

本凹凹凸 f θ レンズは、全走査角 27.3°にわたり、歪曲収差±0.12%以下、像面彎曲 ±0.7mm 以下であり、均一な走査結像特性である。

実際にLDビームを用いて集光した結果を Fig.4-15 に示す。実験で用いたLD は、波長 756nm 、コリメートビーム径 5mm (5mm 幅スリットで整形した)であ り、サジタル方向、メリディオナル方向共、同一コリメートビーム径を入射した。 Fig.4-15 より、走査幅 260mm の全域にわたり、約 63µm(1/e²)の一定ビーム径 を得た。像面におけるビーム径は、スリット幅によって任意に設定可能であるが、 ここで得られた結果より、B4 幅に相当する走査幅に対して、解像度 400 ドット/ インチ以上が実現可能となった。



Fig.4-15 Experimental results of beam spot sizes

3.3 走査光学系の小型化の提案

LD モジュール、 $f \theta \nu \nu x$ と、回転多面鏡を一体化した、小型の走査光学系ユ ニットを提案する。この一体化は、回転多面鏡に位置合わせをした筐体を介して行 った。筐体は加工性と量産性を考慮し、アルミニウムの鋳物で製作した。この筐体 に LD モジュール取り付け穴と、 $f \theta \nu \nu x$ 取り付けネジ穴を配置し、予め調整し た LD モジュールと $f \theta \nu \nu x$ をそれぞれ挿入固定、ネジ込みで取付けた。この結 果、光軸の設定が簡略化でき、調整と、その後の取扱いやメンテナンスも容易であ る。構成図. を Fig.4-16 に、外観を Fig.4-17 に示す。本走査光学系ユニットのサイ ズは、^W142×^L165×^H131 mm と小型で、重量は 3.2kg である。

MFP 用のレーザ走査光学系の課題に対して、走査光学系を回転多面鏡の筐体で 一体化する構造を提案する。この実現に対しては、走査光学系の設置スペースをで きるだけ少なくするために、新たに作動距離の短い*f θ レンズ*を設計した。本光学 系は設置スペースが極めて少ないため、通常の複写機(アナログ)に搭載でき、複 写機能とプリンタ機能が両立することを検証した。



Fig.4-16 Laser diode scanning unit

本走査光学系ユニットの特性調査のために、電子写真プロセスによる印字実験を 行ない、画数の多い漢字も高解像で印刷できることを確認した(Fig.4-18 参照)。

また、プリンタ試作機の概観を Fig.4-19 に示す。本試作機は、通常の複写機を 改造して、複写用の原稿台も備えており、複写機とプリンタの複合機としての機能 を有している。

3つの構成要素と走査光学系ユニット全体の主な仕様を Table 4-1 に示す。

Item	Specification
LD module	Output power : >3 mW
	Wavelength: 760 nm
	Focal length : 269.7 mm
$f \cdot \theta$ lens	Distortion : $-35 \sim 93 \mu m$
	Field Curvature : $-1.25{\sim}0.85$ mm
Polygon mirror	Number of facets : 10
	Revolutional velocity : 6899.5 rpm
	Scanning width : 257 mm
Scanning system	Resolution : 10 pels/mm
	Size : $^{W}142 \times {}^{L}165 \times {}^{H}131 mm$

Table 4-1 LD scanning unit specifications



Fig.4-17 Photograph of laser-diode scanning unit

桂溪畦稽系経跡繋罫茎荆蛍計詣警軽頸鶏芸迎鲸劇些蚁激隙桁傑欠決潔穴結血決月件倹倦健兼券剣喧圈堅嫌建憲懸
金烧烧烧壶之带亚耳碧旧夏目;鲜臀缸清纱。 个日子口口,应该源文理较被言諺限平個古呼固姑孤己庫弧戸故枯湖
学花便推革人队训现相示方无辜具计也
狐糊袴股胡孤虎跨跨站雇服鼓五旦件
好孔孝宏工巧巷幸広庚康弘恒慌打, 口 大宁 之子, 16十三 1 三, 7甲皇硬稿穗紅紘狡綱耕考肯肱腔骨航荒行衡調
言時 死酸 金礦 編 閉路 項 香 高 鴻 評 一只 一 土 小 川 川 に 口 」 ロ リ 、
屋 期拥观道独目渔此仕叉晚峰
比以相优成相优强三亿人效为 一 一 一 一 一 一 一 回回家饭屋被打了一 一 一 回回家饭屋放了小花屋 自转则连转而睡言
際剤在材非財份吸吸堺備有些1/台 1/2 / 1/2 / 2 / / / / / / / / / / / / /
傘参山惨撒散栈燦珊産算纂
补私糸紙紫肢脂至視詞詩試出去。 4. 工具 主人 古 古五 三十 日子 康亮磁示而耳自蒔辞汐鹿式識鴫竺軸宗零
上此為生態完美現漆庭原生 (二十二) 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
して私人妖主忿地修大見大川口 1/2 2 1 主 1/1/2 1 1 2 2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2
守手朱殊狩珠種腫趣酒首備為
十徒戎柔汁渋獣縦重銃叔夙宿 — — — — 一 一 一 一 一 一 一 一 一 面 的 写準 潤盾純 巡 遵 辟 順 処 初 所 著 睹 當 庶
緒署書裏義諸助叙女序徐架圖》 □ 只 □ (1) □ 」 「」 「」 「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」」「」」」「」」」」
油自己有前的为少人的 动物的
用逻辑说底照此看明熙任称单大4 丁 丁 三 7 三 7 年 4 2 读任如 昭本接温观也代本地表如田田发如此发生的
状畳穰蒸讓醸錠縣埴飾拭植殖陶織、
辛進針震人仁刃塵壬尋甚尽腎訊迅陣転 《水炊睡粋翠衰遂醉錐錘随瑞髓崇嵩数枢趨難据杉椙
旁顧從經際援力世漸前是凍制熱辨征性成改。Ⅰ→ ⇒ 三百百萬件生感精聖声製西誠誓請浙醒青静斉税脆隻席惜戚斥昔
HWEE MUZTEL TEMMAN VERY HAVAN TE TEMAN VERY HAVAN TE TEMPERATURE TE TE TE THE TEMPERATURE TE TE THE TEMPERATURE TE TE TE THE TEMPERATURE TE

Fig.4-18 Printing sample


(a) Loading LD scanning system unit



(b) Total system Fig.4-19 Multi-Functional Peripheral system

4.3.4 集光ビーム径の最適化の検討

光学系の設計は、プリンタの性能と密接に関連するため、解像度を決める集光ビーム径の最適設計について検討する⁽⁸³⁾⁻⁽⁸⁵⁾。

ビーム分布がガウス分布である場合には、理想的な走査レンズの焦点距離 f、コ リメートビーム径 d_c、光波長 λ を用いて、集光ビーム径 d は、波動光学での回折 限界値に集光され、

$$d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f \cdot \lambda}{d_c} \tag{4-8}$$

ただし、ビーム径は1/e² 値全幅で定義する。

と求められる。

半導体レーザから出射されるビームは、ほぼガウス分布に近似できる。また、拡 がり角が大きなため、レンズホルダー等でケラレと呼ばれるビームの周辺部がカッ トされる現象が発生する。この場合には、トランケートされたガウス分布で近似し、 集光ビーム径は、式(4-8)の係数 4/π がトランケート状態に応じた変数となる。

実際の記録ドット径は、解像度(アドレス点数)が同じであっても、電子写真プ ロセスに依存して変わる。記録ドット径に対する集光ビーム径は、解像度から求め られるピッチサイズに対して、電子写真の正現像プロセスでは大きく、負現像プロ セスでは小さくなることが報告されている。

そこで、プリンタ試作機(正現像プロセス)を使って、集光ビームの最適化条件 を探るため、副走査方向ビーム径を変化させて印字実験を行った。主走査方向のビ ーム径は55 μ m(1/ e^2)で一定とし、副走査方向ビーム径は、 $f \theta \nu \nu$ ズに入射する コリメートビーム径を変化させて、138,150,170,190,210,230 μ m とした。印字サ ンプルでは、走査ビーム径が190 μ m以上に印字線幅の細りが目立った。

一方、150µm以下でビームが細くなると、印字線幅が太り、線間にトナー飛散 が多くなることが判明した。以上の結果、本印字実験からは、~170µmが最適ビ ーム径として求められる。

次に、最適副走査ビーム径を解析で求める(36)。前提条件として、

- (1) ビーム分布はガウス分布
- (2) 感光体の露光エネルギーは、重ね合わせの原理が適用できる
- (3) 走査ビームは1走査中は、常時点灯か常時消灯のいずれかである と仮定する。感光体上の点(x, y)における露光エネルギー密度 E(x, y)は、次式で表 わされる。

$$E(x, y) = \frac{2P_0}{\pi \cdot \omega^2} \int \exp\left[\frac{-2\{(s-1) \cdot p - y\}^2}{\omega^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{-2\{v \cdot t - v \cdot (s-1)t_1 - x\}^2}{\omega^2}\right] \cdot f(t) dt$$
(4-9)

ただし、 P_0 :レーザパワー、f(t):変調パラメータ、v:走査速度、p:走査ピッチ、 s:走査回数、 ω :ガウスビーム半径、 t_1 :一走査に要する時間

計算結果では、連続露光された走査線上の露光エネルギーが最大 *E*_{max} となり、走 査ピッチの中間で最小 *E*_{min} となる(Fig.4-20 参照)。未露光の走査線上の露光エネル ギーを *E*_{bot} として、最適ビーム径を得るために、評価関数 *A*, *B* を以下に定義する。

$$A = \frac{E_{\max} - E_{bot}}{(E_{\max} + E_{\min})/2}$$
(4-10)

$$B = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{(E_{\max} + E_{\min})/2}$$
(4-11)



Fig.4-20 Distribution of exposed energy

Aは2値レベルを得る評価、Bは露光部の平坦性の評価を表わす。

Fig.4-21 に計算結果を示す。A が大で、B が小であることが望ましい。そこで、 新たに総合評価関数として、 g=A-B を導入した結果、 d/p=1.64 で最大値を得ることが判明した。

本結果を、先の印字実験に適用すると、解像度 240 ドット/インチでの最適走査 ビーム径は 173µm となり、最良の印字結果を与えるビーム径の実験結果と良く一 致した。以上より、集光ビーム径の設計基準として用いるための総合評価関数の有 効性が実証できた。

4.4 広域走査光学系の提案

本節では、走査光学系ユニットをベースに機能を拡張したダブルLDビーム走査 光学系⁽¹⁷⁾を提案する。この系では、半導体レーザとコリメートレンズを一体化し たLDモジュールを2ヶと、fθレンズ2ヶを、1ヶの回転多面鏡と一体化(Fig.4-22 参照)して、調整・設定の簡略化を図り、走査幅を約2倍にした小型走査光学系を 実現する⁽²⁰⁾。



Fig.4-21 Merit function for beam spot diameter optimization



Fig.4-22 Double LD beam scanning system



Fig.4-23 Experimental proto type

ダブル LD ビーム走査光学系は、2 色印字プリンタや約 2 倍の走査幅となる広域高 解像プリンタの走査光源として活用できる。例えば、広域走査光学系では、光軸変 換用の平板ミラーを 2 枚配して、像面上での走査光軌跡がつながるように傾きを調 整する。2 つの軌跡がつながるように、左右走査のオーバーラップ領域を設け、継 ぎ目処理を行う方式とした。試作した走査光学系の外観写真を Fig.4-23 に、ブロ ック図を Fig.4-24 に示す。

 $f \theta \nu \nu \varkappa$ は焦点距離 351mm、走査角±21°以内で、像面彎曲が、-0.5~+0.2 mm と平面結像性が良く、歪曲収差が、0~0.065%と、等速走査性能の良好な小型レ ンズを実現した。像面でのビーム径は、Fig.4-25 に示すように、全走査幅 515mm にわたって、約 80 μ m が得られた。回転多面鏡は 12 面体で、倒れ精度は±2.5 秒以 内(像面の位置精度は±8.5µm)である。

本ダブル LD ビーム走査光学系は、全走査幅を1組の光学系で走査する方式に比べて、*f θ レンズ*の焦点距離が半分となることから、下記の特長を有している。

- (1) 光学系がスペースをとらず、小型になる。
- (2) 広域化への対応が容易である。
- (3) 1組のレンズに比べ、レンズ収差が小さくなり、高解像化に有利である。
- (4) 露光エネルギーが倍増し、高速化・省電力化への対応が容易である。
- (5) ポリゴンの倒れ精度が緩和される。

これらの特長を活かして、2ビームの継ぎ目を問題としない応用には、直ちに適 用できる。一方、継ぎ目の連続性を問う用途では、例えば、オーバーラップ領域を 設けて、漸次、左右の光量を変化させるなどの対策が必要である。



Fig.4-24 System configuration of double LD beam scanning system



Fig.4-25 Beam spot diameters

4.5 むすび

半導体レーザは、0.1×10µmの極めて小さな導波路から出射される発散光のため、 コリメートレンズに対する位置決め精度が厳しく、温度変化や機械的振動で容易に 結像特性が劣化するという課題があった。温度特性に対しては、レンズ系の温度係 数を筐体材料の膨張係数で相殺し、振動・衝撃に対しては筐体の強度と共振周波数 を高めて、半導体レーザとコリメートレンズを一体化して安定な位置決めを実現す る LD モジュールを考案した。

MFPの実現では、電子写真プロセスの複写光学系とレーザ走査光学系の露光を 狭い空間で両立させることが課題であった。走査光学系の設置スペースをできるだ け少なくするために、個々の機能デバイスの仕様を小型化の視点で見直し、新たに 作動距離の短い*f* θ レンズを設計して、LD モジュールとともに、回転多面鏡の筐体 を使って一体化する構造を提案した。本光学系は設置スペースが極めて少ないため、 通常の複写機(アナログ)に搭載でき、複写機能とプリンタ機能が両立することを 検証した。

3つの構成要素と走査光学系ユニット全体の主な仕様は、Table 4-1 に示した。

本技術は、現在も引き続き製品に適用されている。提案した半導体レーザ走査光 学系は、機能の拡張に柔軟に対応できるため、高解像度で、フルカラー機能を持つ MFP への道を拓いた。

第5章 複数の走査光ビーム位置の高精度検出法に関する研究

5.1 まえがき

小型レーザ走査光学系の新たな応用展開として、複数のレーザ走査光学系を用い て高精度な走査位置の検出が要求される、タッチした機材のサイズ検出機能を有す る大画面・高精細タッチパネルを提案する。

タッチパネルは、画面の情報に直接タッチして入力するので、場所をとらず、操 作が簡便で判りやすいため、PDA(情報携帯端末)やノート PC などのモバイル環 境で、また、切符販売機、銀行やコンビニの ATM (Automated Teller Machine)な ど、各種端末の操作で多用されている。このように従来のタッチパネルは、数イン チ〜20 インチクラスの画面サイズに対して実現されてきた⁽²¹⁾。

一方、FPD では、大画面化、高精細化の進展と共に、画像表現のリアリティ度が 急激に向上しており、電子プレゼンテーションなどの場面での活用が増え、タッチ 入力のニーズが拡大している。既に、いくつかの方式が提案され、使用されている が、未だ大画面ディスプレイに最適なタッチ入力方式は確立されていない。

大画面に適したタッチ入力方式は、以下の条件を満たす必要がある。

- (1) 入力手段を選ばない方式であること
- (2) 画面輝度や画質低下がないこと
- (3) 高精度の検出が可能なこと
- (4) 構成が単純で製作が容易なこと

従来のタッチ入力方式の特徴と課題の比較を Table 5-1 に示す。抵抗膜方式や静 電結合方式は、表示画面上に 10%以上の透過ロスを生じる透明膜を重ねるため、画 質が低下する。空間伝搬型の超音波方式は特殊な機材を使用する必要がある。また、 表面弾性波では、大型化は減衰が大きく、表面キズ等の影響も受けやすい。光マト リクス方式では、画面輝度は低下しないが、高解像化や大型化に対しては発光受光 対の数と演算処理が増大する。2 個の光走査ユニットで扇状の検出面を構成し、指 示機材(指や特殊な反射ペン)からの反射光を検出する光走査方式は、単純な構成

で、検出領域の大きさ制限が少ないという特徴がある。

大画面 FPD でのタッチ入力機能が要望されているが、最も普及している抵抗膜方 式では大画面化が困難であり、しかも、高精細でタッチサイズの検出機能を持つタ ッチパネルは未だ実現されていない。

そこで、光走査方式を用いた新しい方式のタッチパネルを提案する。小型レーザ 走査光学系を FPD 筐体枠の一辺2ヶ所に設置し、表示画面上を走査した光を三角 測量の原理で検出する方式で、画面をタッチした指示機材からの反射を検出するの ではではなく、指示機材以外からの反射光を検出する方式である。

本方式では、2 つの走査ビーム位置のそれぞれを高精度に検出する光学系が課題 である。この課題に対して、複数の走査光ビームの混信を防ぐために再帰性光学系 による分離と、ビーム整形機能を有する複合機能部品による検出光学系に着目し、 信号処理系で S/N の向上を図って、タッチ位置とサイズを同時に検出できる方式を 検討する。(ここで述べる「タッチサイズ」は、走査ビームがタッチした指示機材を 横切る「幅」として定義する。)

Technology	Detection method and the feature	Subject
	- Conductive films separated by the spacer	- Illumination down
Resistance film	- Potential division in the X, Y direction	- Size restriction
(Overlaid type)	Feature : Accurate at analog detection	- Durability
	- Matrix driven in the X, Y direction	- Illumination down
Electrostatic coupling	- Electrostatic change with a human body	- Size restriction
(Overlaid type)	Feature : Matrix detection	- Limited means
	- Ultrasonic wave detection at two places.	- Special pen with
Ultrasonic	- Position determined by triangulation	light and ultrasonic
(Space propagation)	Feature : No influence to a display,	- Battery
	Time lag detection of light and ultrasonic	-Azimuth difference
	- Matrix detection of surface acoustic wave	- Outskirts area
Ultrasonic	- Time lag detection of ultrasonic	- Size restriction
(Surface matrix)	Feature : Pressure sensing is possible	- Surface flatness
	- LED/PD matrix	- Number of matrix
Light	- Interception detection of light	- Contiguity error
(LED matrix)	Feature : No influence to a display	-Azimuth difference
	- Reflected light detection from object	- Weak reflection
Light	- Position determined by triangulation	- Special pen
(Laser scanning)	Feature : No influence to a display	-Azimuth difference

5.2 位置検出の原理

5.2.1 原理構成(46)

光走査方式のタッチ位置座標の検出について、Fig.5-1 に原理構成図を示す。本方 式では、原点*O*と基準長 *L* だけ離れた 2 ヶ所(図では *x* 軸上)から光を走査し、 タッチした物によって形成される「影」領域の走査角度を計測して、三角測量の原 理でタッチ位置を求める。

5.2.2 タッチ座標とサイズの検出

タッチ位置を通る2つの走査光線は式(5-1)、(5-2)で表される。

$$y = x \cdot \tan \alpha$$
(5-1)
$$y = (x - L) \cdot \tan(\pi - \beta)$$
(5-2)

 $タッチ位置の中心座標(x_0, y_0)は、走査角度と、基準長 <math>L$ から求められる。



Fig.5-1 Principle of a triangulation method

$$x_0 = L \cdot \frac{\tan \beta_0}{\tan \alpha_0 + \tan \beta_0} \tag{5-3}$$

$$y_0 = L \cdot \frac{\tan \alpha_0 \cdot \tan \beta_0}{\tan \alpha_0 + \tan \beta_0}$$
(5-4)

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \tag{5-5}$$

$$\beta_0 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \tag{5-6}$$

ただし、*L*:基準長、α:第一走査光の走査角、β:第二走査光の走査角である。 添字は、タッチした物の中央:0、検出開始:1、検出終了:2を表す。

また、タッチサイズは、2 つの走査光が遮断された区間の走査角度と、中心座標から円形近似で求めた。2 つの半径 r_1 と r_2 を平均して、タッチ物の半径サイズ r_0 とした。

$$r_{1} = |x_{0} \cdot \sin \alpha_{1} - y_{0} \cdot \cos \alpha_{1}|$$

$$r_{2} = |(x_{0} - L) \cdot \sin \beta_{1} + y_{0} \cdot \cos \beta_{1}|$$
(5-7)
(5-8)

$$r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2} \tag{5-9}$$

走査角は、走査ビームの角速度 $\omega(rad / sec)$ と、光検出器の光量変化(遮断)から検出された時間t(sec)の積で求められる。

タッチ位置精度とタッチサイズの精度は、回転ミラーの回転変動や面精度に起因 する走査ビームの走査速度変動と、光検出波形の立上り/立下り時間に依存する。こ の立上り/立下り時間は、走査光ビーム径に比例するため、入力エリア内でビーム 径をできるだけ細く、かつ一定になるように最適化設計することが不可欠である。

走査光ビーム径 d(z)は、ガウスビーム分布と仮定すると、次式で表される。

$$d(z) = d_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$
(5.10)
$$\frac{z_0}{z_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_0^2}{\lambda}$$
(5.11)

25 インチ PDP では、式 (5-10)の入力検出の表示エリアでの光路長(z)は 350 mm 域なので、走査ビームのウェスト径 d_0 を 1mm、レーザ波長 λ を 655 nm とすると、 表示エリア内でのビーム径は 1.04 mm となり、ほぼ一定であることが分かる。この 結果、ビーム径を制限するアパーチャが 1.0 mm 以上であれば、回折によるビーム広 がりは、ほとんど無視できる。

5.3 走査光検出光学系の研究

5.3.1 基本構成

走査光学系によるタッチ入力システムを 25 インチ *SXGA* 高精細 PDP、42 イン チ*VGA* 型大画面 PDP と、80 インチ型大画面投射ディスプレイに対して、検討し た。以下の記載では、最も厳しい精度要求となった 25 インチ *SXGA* 高精細 PDP を例にとり、具体的な検討を記す⁽⁴⁸⁾。

表示画面サイズは、500×400mm(対角約700mm、表示画素ピッチ0.39mm)で ある。25インチPDPの上辺の2コーナに光走査ユニットを配置して、表示画面全 体を一定角速度のレーザビームで走査する。表示画面の残り3辺の周辺部に再帰性 光学系を配置して、走査ビームを入射方向へ戻して、光源と光学的に等価な位置で 走査光の光量変化を検出する構成である(Fig.5-2参照)。

5.3.2 再帰性光学系の構成に関する検討

再帰性光学系は、一般的に、高精度・高効率のバルク型コーナキューブが知られ ている。コーナキューブは、90度の頂角を持つ3面が直角に交わって形成されるコ ーナを持ち、入射したビームを形状や偏光面を維持したまま、入射方向へ反射する 機能を持っている。この系では、入射光と戻り光を、偏光ビームスプリッタとλ/4 板を用いた偏光分離光学系で、高効率に分離できる(Fig.5-3参照)。しかし、バル ク型の光学部品を表示画面の周辺部に隙間なく設置するため、設置スペースを必要 とすることと、高精度な光学部品(コーナキューブ)を多数必要とするため、実用 化は難しい。



Fig.5-2 Composition of touch panel system



Fig.5-3 Polarization separation optical system

そこで、簡易型の再帰性反射シートとして、道路標識などで夜間の視認性を向上 させる目的で多用されている、プリズム型レトロミラー、微小ビーズを使ったビー ズ型レトロミラーと、微小な簡易型コーナキューブ群をシート上に敷き詰めたコー ナ型レトロミラーの適用可能性を検討した。Fig.5-4 に、25 インチ PDP を想定した 入力パネルの最大入射角(52 度)までの、各シートの入射角に対する再帰特性を示 す。プリズム型と微小ビーズを敷き詰めたレトロミラーは、ビーズ形状の球形や屈 折率の均質化が不十分なため、戻り光の広がりが大きく、夜間の道路などでの視認 性向上には機能するものの、タッチ入力のように、周囲が明るい場所では、再帰特 性は十分ではなかった。



Fig.5-4 Characteristics of retro-reflectors



Fig.5-5 Detection optical system of retro-reflector.

この結果、最も良い再帰特性を示した簡易型の微小コーナキューブ(300µm[¢]) を敷き詰めた再帰性反射シートを用いて、検出光学系を検討した。

この再帰性シートでは、成形された個々のコーナキューブの頂角の特性から、出 射ビーム(再帰光)は、1.5 度の広がりを持つことと、偏光特性を保持しないこと も分かった。このため、高精度な偏光分離光学系(偏光ビームスプリッタと λ/4 板) を用いても機能しない。そこで、戻り光の広がりを利用して、走査光と戻り光を空 間的に分離するシンプルな検出系を考案した(Fig.5-5 参照)。

具体的には、穴あき(アパーチャ)ミラーを用いて、出射光は穴の中を通し、戻 り光は広がり分を効率的に反射させる、部品点数を減らしたシンプルな空間分離型 の光学系を使って、複雑な偏光分離型光学系と同等の検出系を実現できた。

5.3.3 光走査光学系ユニットの設計と製作

波長 655nm の赤色半導体レーザ(LD)光を、非球面コリメータレンズ(CL)で平行 ビームとし、式(5-10)、式(5-11)で求めた設計値に従って、1.0*mm^{\$}の*アパーチャ(開 ロ)によって整形し、ポリゴンミラーで PDP 表示画面上を走査する。走査光学系 ユニットは、幅 16 mmの板上に形成した。外観写真を Fig.5-6 に示す。

最長となる PDP の対角点で走査ビーム径を実測した結果、アパーチャによるフレネル回折の影響を若干受けるが、ピーク値の 13.5%でのビーム径は1.0mm[#]であり、画面全体で同じビーム形状を維持できていることを確認した。



Fig.5-6 Optical system of scanning beam detection

再帰性反射シートにより、再びポリゴンミラーに戻された走査光は、アパーチャ (穴あき)ミラーの鏡面部で受光部側に反射された後、レンズで集光され、光検知 器(PD)で検出される。

ポリゴンミラーは、走査角を確保するため、幅 11mmの4面体ミラーを採用した。 走査光の表示画面に垂直方向の振れは±0.5mm以下を目標仕様とし、ポリゴンの面 倒れは目標仕様 30 秒以下としたが、10 秒以下を実現した。また、検出精度を高め るため、小型DCブラシレスモータ(¢14)を開発した。このモータは、PLL(Phase Locked Loop)による回転サーボ制御によって 1 回転中の回転変動(回転ジッタ 0.05%以下)を抑え、1/100°以下の角度分解能を実現した。さらに、レーザ安全性 については、可視レーザ光が入っても目に障害を起こさない、JIS 規格クラスII以 下が条件であるが、より安全な規格のクラス I を満足するレベルで実現できた。

5.3.4 信号処理による検出動作の安定化

光走査ユニットで受光された信号は、走査開始基準信号と、タッチを検出する再 帰走査光の信号を含んでいる。それぞれの信号出力レベルには 2.8 倍以上の差があ るため、分岐処理をして異なる閾値を適用しデジタル化した。Fig.5-7 に信号処理の タイミングチャートを示す。

Fig.5-8 に回路機能ブロック図を示す。PD の受光電流信号は、IV 変換で電圧に 変換され、次に、ローパスフィルタを通過し、走査開始信号とタッチ検出信号の検 出に分岐して、それぞれ異なる閾値のコンパレータでデジタル信号に変換する。タ ッチ検出に利用するコンパレータ閾値は、非検出領域の走査時(*T*₁時刻)でのボ トムレベル電圧 *V*₀ を AD コンバータでモニタし、一定値 *V*₁ を加え DA コンバータ により設定する。これにより電圧変動の影響を解消し、安定な検出動作を実現した。







Fig.5-8 Block diagram of circuit function

タッチ検出信号は、走査開始信号を起点とする遮断開始時刻(T_3)と遮断時間(T_2)を基準クロックでカウントして求める。また、走査開始信号から走査周期(T_4)を カウントし、以下の換算により回転周期を補正した。

$$T_{N}' = T_{N} \cdot \frac{T_{0}}{T_{4}}$$
 (5-12)
 $T_{N}' : 補正カウント値$
 $T_{N} : Timer Nの計測カウント値$
 $T_{0} : 補正用周期カウント値$

補正されたカウント値 T_N' は PC に転送され、表示座標系での走査角度 θ_N に変換される。

$$\theta_N = \omega \cdot \Delta t \cdot T_N \tag{5-13}$$

 ω :走査角速度, Δt :基準クロック時間(sec)

検出した走査角度から 5.2.2 節の計算式に従って、タッチ位置座標 (x_0, y_0) とタッ チサイズ半径 r_0 を算出する。



Fig.5-9 Coordinate conversion method

最後に、タッチ位置の計測座標(x,y)とディスプレイ上の表示座標(X,Y)を、 一致させる処理を行う。Fig.5-9 は、タッチパネルの計測座標系とディスプレイの表 示座標系の概念を示す。計測した座標系(x,y)と表示の座標系(X,Y)は、回転と 平行移動を伴ってずれた状態にあると想定し、式(5-14)を使って変換する。マトリ クス内の $m_0 \sim m_3$ は回転、 m_4, m_5 は平行移動の係数である。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 \\ m_2 & m_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}$$
(5-14)

計測座標系と表示座標系を一致させるため、表示画面に座標値が既知のマーカ(図では4点)を表示し、これを直径 $2mm^{\phi}$ の入力ペンで指示して計測した検出座標値の連立方程式から各線形変換係数を算出した。また、計測座標値の単位は、(x,y)[mm]に対して、画面表示系の単位は、(X,Y)[ドット]であるため、この単位系の変換も合わせて行った。

5.4 タッチパネル動作実験による検証

5.4.1 検出特性の評価

タッチ位置とタッチサイズの検出精度を評価した。タッチ位置の評価として、直径 2mm[#]の入力ペンを使って、表示画面上の 12 箇所で、5 秒間の連続データで検出 ばらつきを測定した。検出は毎秒 200 回、各箇所で 1000 点のデータを取得した。

最も精度が低下した表示画面の対角付近でのタッチ位置誤差について、Fig.5-10 に電気ノイズと光学ノイズ(迷光)対策前と、Fig.5-11にそれぞれの対策後の検出 結果を示す。PDP表示からのノイズ対策と走査光学系相互と外部照明の迷光対策に よって、Fig.5-11より、タッチ位置の精度は、従来比で1桁以上改善し、±0.2mm 以下を実現した。

また、タッチ物のサイズ検出評価は、直径 2.5 mm[®] から 100 mm[®] の円柱を用いて、 同様の計測を行った。Fig.5-12 に示す結果より、タッチサイズの分解能は ±1.0 mm 以内を確認した。タッチサイズ検出では、小さなサイズほど、より小さく検出され る傾向にあり、これは検出波形の閾値が少し低く設定されていたと考えられる。



Fig.5-10 Detection error of touch position

(In noisy condition)





(After the measure against a noise)



Fig.5-12 Detection error of touch size

Table	$5^{-}2$	Touch	panel	specit	fications
Table	0 1	TOROIL	panoi	opcon	lications

Item	Specification		
Panel size	H 920×V 518 mm	H 500×V 400 mm	
Display pixel size	1.08 mm	0.39 mm	
Positioning error	±1.5 mm ±0.2 mm		
Resolution	2.5 mm	1 mm	
Sampling rate	200 pps		
Interface	RS232C		
Laser safety	IEC Class 1(λ = 780nm) IEC Class 1(λ = 655nr		

5.4.2 誤入力の防止機能の考察

光走査方式タッチパネルでは、複数個所の同時入力は誤検出を生じるため入力で きない。そこで、複数個の入力が検出された場合は、その段階で「誤検出」と判定 する機能を付加した。すなわち、1 つの走査終了までに複数の遮断の有無をチェッ クして、複数点を検出した場合は、検出した計測時間の情報をすべて「0」とする フラグを出力するようにした。この結果、複数のタッチ位置は計測されず、「誤入力」 を無くすことができた。

今回開発した入力システムを、42 インチ VGA と 25 インチ SXGA の PDP に装着したタッチパネルの仕様を Table 5-2 に示す。

5.5 新しい描画インタフェース機能の提案と検証

開発した入力システムでは、高精度に「タッチ位置」を検出すると同時に、「タ ッチサイズ」を検出する機能を付加している。タッチ位置でタッチした物のサイズ を円形近似して表示する機能を設けて、サイズの異なるタッチ物を使って確認した。 Fig.5-13 は、開発した入力システムの外観図で、25 インチ SXGA型 PDP の上部 2 ヶ所に走査光学系ユニットを内蔵させている。

表示画面には、大きさの異なる3種類のタッチ物で、それぞれ表示画面の3ヶ所 を指し示して、タッチ位置とタッチサイズを検出した結果を表示している。写真画 で実験を表現するため、一連の動作画面の最終画面に、キャプチャした「タッチ物 と手の部分」を合成して示した。

次に、サイズ検出機能を生かして、リアルタイムで変化するタッチサイズの軌 跡を描画する機能のアプリケーション・ソフトウエアを作製した。11 色から 1 色を 選択して、選択した色で、リアルタイムで検出したタッチ位置とタッチサイズの軌 跡が連続的に残るようにした。



Fig.5-13 Photograph of the touch-size detection



Fig.5-14 Photograph of the size-detection operation

従来のタッチパネルの入力速度は、毎秒 30~60 ポイントであり、表示画面上の 大きな面積を持つ「ボタン」などの位置を指し示す機能には対応できるが、円や円 弧を描いた場合は、検出速度が十分でないため、角形で入力されるなど、人間の自 然な動きには追従できなかった。

開発したタッチ入力方式では、毎秒 200 ポイントの高速入力を実現することで、 高精彩画面上での滑らかな動きの入力に対応できるようにしている。Fig.5-14 に、 太さの異なる筆や棒を使って曲線波形を描いて軌跡を表示した例を示す。写真で動 きデータを表現するため、動画の最終画面に3つの筆の部分を合成している。人間 の自然な動作に違和感なく追従できていることを確認した。

また、Fig.5-14の延長にある実験として、いろいろな太さの筆を使って、多彩な 表現ができることも確認した。例えば、細い線や太さが変化する一筆書きや、塗り つぶしも容易である。さらに、大きなタッチサイズを検出した時(例えば、直径 60mm 以上)には、「消しゴム」と判断して、タッチ入力したところを消去する(背 景色と同じ色で表示する)機能を付加した。実際に、「白板消し」を使って、描いた 絵(左)を消している動作(右)を Fig.5-15 に示す。入力する物自身を識別しない で、大きさを識別するため、人間の指で書いて手のひらで消すような操作も可能で



Fig.5-15 Additional function of an eraser

ある。

以上の結果、25 インチ SXGA型 PDP 上で、ペンや筆、指で書き込み、「白板消 し」や「手のひら」を使って消すといった一連の作業を自然にできるインタフェー スを実現した。換言すれば、リアルタイムのサイズ検出によって、連続的に表示サ イズを変更する機能が効果的に動作することを確認した。また、このタッチサイズ 判定機能を、軌跡として残すのではなく、入力制限手段に使うなど、新たな機能を 付加することも可能である。

さらに、本方式はタッチする手段を限定しないため、指し棒だけでなく、先端が 柔らかで太さの異なる筆を使って、線の太さを自由に変えて描画できる。特に、本 方式に適した筆を検討して、いくつか試作して評価したところ、「腰」が強い細い繊 維素材を束にして、筆先から筆元にかけて太さを変化させた構造が良く、意図する 自然な筆運びで良好に表現できることを確認した。(Fig.5-16、Fig.5-17)

本方式では、光は表示ガラス面上を走査して位置を検出するので、厳密に言えば、 タッチ検出位置と表示位置で「視差」の影響を受けるが、操作者は表示画面を見て いるため、実用的には全く問題にならなかった。また、毛筆による入力は、ディス プレイ表示面を指示棒で傷つけたり、指紋で汚したりしないため、ディスプレイ本 来の表示性能を良好に維持する利点がある。さらに、ユーザの立場からは、墨や絵 の具を使わないで電子的に描画するため、墨や絵の具で衣服や周囲を汚す心配もな い。このため、幼児を始めとした教育現場や、高齢者やリハビリ医療の現場での活 用も期待できる。このように、サイズ検出機能を付加することで、今までに無い自 然で直感的なヒューマンインタフェースを提供できることが分かった。

また、大画面 42 インチ PDP に搭載した例を Fig.5-18 に、80 インチ背面投射型 パネルに搭載した例を Fig.5-19 に示す。大画面に対して、従来のタッチ機能による インターフェースの応用に対しても、有効であることが検証できた。



Fig.5-16 Photograph of Calligraphy practice



Fig.5-17 Drawing pictures on electronic canvas



Fig.5-18 Touch panel apparatus on 42 inch PDP



Fig.5-19 Touch panel apparatus on 80 inch back projection LCD

5.5 むすび

小型レーザ走査光学系の技術を大画面・高精細の FPD に適用して、新しいヒュ ーマンインタフェースを有する光走査型タッチパネルを提案した。

従来の抵抗膜方式によるタッチパネルは大型化が困難であり、光学方式も、マト リクス型では素子対数の増大を招き、走査型では特殊なペンを必要とするなど、大 画面 FPD の簡便なタッチパネルは未だ実現されていない。そこで、半導体レーザ 走査光学系でシンプルな戻り光の検出光学系を考案して、タッチ位置だけでなく、 タッチサイズもリアルタイムで検出する方式を提案した。2 つの走査ビーム位置の それぞれを高精度に検出する光学系が課題であるが、複数の走査光ビームの混信を 防ぐために再帰性光学系による分離と、ビーム整形機能を有する複合機能部品によ る検出光学系を考案し、信号処理系で S/Nの向上を図って、タッチ位置とサイズを 同時に検出できるようにした。特に、25 インチ SXGA型 PDP の筐体に実装可能な 小型・高精度の光走査ユニットを開発し、電気ノイズと光学的クロストークへの対 策を施すことで、全表示画面領域に対して、毎秒 200 ポイントのサンプリングで、 ±0.2mm 以下の位置精度、最小検出サイズ 2mm と、100mm サイズに至る検出精 度 ±0.2mm を確認した。

本方式を大画面・高解像度 PDP に搭載して、リアルタイムで検出したタッチサ イズ情報を活用することで、連続的な筆運びや絵画表現など、新しいヒューマンイ ンタフェース機能を検証した。

今後、これらの機能を生かし、電子会議システム、教育現場や医療現場(高齢者、 リハビリなど)において、衣服や周囲を汚さないクリーンな電子黒板や電子キャン バスへの適用など、大画面を活かした新たなアプリケーションへの展開が期待でき る。

第6章 結 言

IT の進展とともに、人に優しく、自然なかたちで、使い勝手の良いヒューマンイ ンタフェースを実現して欲しいという要望・ニーズは、ますます強くなっている。 一方、シーズの研究開発では、情報の入出力機器で、幅広い知見を総合的に組み合 わせ、人に優しい、新しいヒューマンインタフェースを提供することが責務となっ ている。

本研究では、ヒューマンインタフェースの鍵を握る入出力機器の重要性に鑑み、 特に、レーザ走査光学系におけるビーム走査位置の高精度化を図った。具体的には、 収差設計、加工誤差、温度環境と、複合検出系の課題に取り組み、新しいレーザ走 査光学系の提案のもと、新規の高精細レーザプリンタや、新規の大画面タッチパネ ルを実現し、人に優しいヒューマンインタフェースの実用化を図った。

個々の課題対処にあたって、課題となる要因分析を行い、その解決を図ると共に 実用化への提案を行った。また、提案では、小型化など、普及を図ることから、光 学理論、電子回路による制御技術、メカトロニクス技術を総合的に活用した。その ため、試作と実験による検証とならざるを得なく、工作精度は重要な因子となった。 例えば、光学シミュレーションを駆使して、それぞれの課題解決を図る光学系を実 現し、機構を小型化して要求精度を緩和し、制御回路で残存誤差を補正する手法で、 新しい機能の入出力機器(ex. 高速・高解像度レーザプリンタ、小型 MFP、大画 面タッチパネル装置)の実現を図り、ヒューマンインタフェースを向上させた。

以下に、本研究で得られた具体的な成果を記す。

第2章「レーザ波長に依存しない $f\theta$ ミラー結像光学系の研究」では、異なる波 長に対して光学系配置を共有するため、波長依存性のない放物面鏡を使った新しい $f\theta$ ミラー結像光学系を考案し、実機へ搭載して高精度な位置特性を検証した。

従来のレンズを使った走査光学系では、レンズの屈折率に波長分散があるため、 波長の異なるガズレーザ光源に対して、同一の光学系配置を適用することができず、 光源が変わるとその都度、光学系全体の大幅な変更を余儀なくされるという課題が

ある。この課題に対して、レーザ波長に依存しない、反射による新しい走査光学系 を検討した結果、走査角に比例して結像位置が決まる $f \theta$ ミラー光学系の条件を見 出した。具体的には、放物面鏡を使って偏向点を焦点距離の約 2/3 に設定すること で、波面収差が少なく回折限界の結像性能を持ち、かつ、走査位置の歪曲収差が走 査角±40°の広い範囲で±0.01%以下の高精度な $f \theta$ 特性を示すことを見出した。考案 した $f \theta$ ミラー結像光学系をレーザプリンタ試作機に搭載して、He-Ne レーザ(波 長 632.8nm)と He-Cd レーザ(波長 441.6nm)を使って、正確な位置決めと高解像 度な印字結果が得られることを検証した。

本成果は、遠赤外域や紫外域など、適切な光学レンズ材料のない領域においても、 高精度な走査・結像光学系をシンプルな構成で実現できる道を拓いた。

第3章「走査光ビーム信号制御による回転多面鏡の走査誤差補正法に関する研 究」では、回転多面鏡の製造誤差によって生じる走査歪を、走査光ビームの信号制 御で補正する手法を見出した。

回転多面鏡の製作には、非常に高い加工精度が要求され、完全な形状を得ること はできないため、面間の分割角度誤差、面ごとの反射率誤差、平面精度誤差などの 僅かな製造誤差が残存し、高解像度での印字品質を劣化させるという課題があった。 分割角度誤差と反射率誤差は、スタート検知信号の中心位置を自動的に算出する方 式を提案し、また、平面度誤差は、走査全域での光ビームの走査時間を計測して、 鏡面毎に相関があることを見出して、走査時間の分割数が一定となるようにクロッ クの位相を操作する手法を提案した。

クロック信号を制御する手法は、走査速度が1/cos² θ で変化する走査系や、sin 関数的に変化する走査系に対しても、既知の関数に応じた位相変化を設定することで 補正が可能であり、さまざまな走査系へ適用できる。

第4章「半導体レーザ走査光学系のz軸方向位置の高精度化と小型化に関する研究」では、発散光源の課題に対してLDモジュール化を提案し、MFPの課題に対して、走査光学系を回転多面鏡の筐体で一体化する構造を提案した。

半導体レーザは、縦0.1μm 横10μm の極めて小さな導波路から出射される発散

光のため、コリメートレンズに対する位置決め精度が厳しく、温度変化や機械的振 動で容易に結像特性が劣化するという課題がある。温度特性に対しては、レンズ系 の温度係数を筐体材料の膨張係数で相殺し、振動に対しては筐体の共振周波数を高 めて、半導体レーザとコリメートレンズを一体化した LD モジュールを考案した。 MFP の実現に対しては、電子写真プロセスの複写光学系とレーザ走査光学系の露 光を狭い空間で両立させることが課題である。走査光学系の設置スペースをできる だけ少なくするために、新たに作動距離の短い*f θ レンズを*設計し、LD モジュール とともに、回転多面鏡の筐体に一体化する構造を提案した。本光学系は設置スペー スが極めて少ないため、通常の複写機(アナログ)に搭載でき、複写機能とプリン 夕機能が両立することを検証した。

本技術は、現在も引き続き製品に適用されている。

第5章「複数の走査光ビーム位置の高精度検出法に関する研究」では、複数の走 査光ビームの位置検出精度を高める提案を行い、新しいヒューマンインタフェース を有するタッチパネルへの応用展開を実現した。

小型レーザ走査光学系を FPD 筐体枠の一辺2ヶ所に設置し、表示画面上を走査し た光を三角測量の原理で検出する方式では、複数ビームの走査位置を高精度に検出 する光学系が課題である。この課題に対して、複数の走査光ビームの混信を防ぐ再 帰性光学系と、ビーム整形機能を有する複合機能部品による検出光学系に着目し、 信号処理系で S/N の向上を図って、高精度な走査位置の検出を可能とした。この結 果、タッチ位置と同時に、サイズの検出を可能にした。

本方式を搭載した大画面 FPD では、走査レーザ光の高精度な位置検出が可能なため、手や毛筆を使ってリアルタイムでサイズ変化を入力できるなど、新しいヒューマンインタフェース機能を検証した。

第6章「結言」では、本研究のまとめを行った。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導ならびに多大 なるご助言をいただきました、大阪大学大学院工学研究科 佐藤武彦教授に、衷心 より感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、大阪大学大学院工学研究科 座古勝教授、藤本公三 教授、上西啓介准教授には、数々のご助言と、ご指導をいただきました。ここに深 く感謝申し上げます。

本研究を行う機会を与えてくださり、ご支援をいただきました、株式会社富士通 研究所 村野和雄社長、林弘常務、吉川誠一常務、森田修三常務、内山隆取締役、 R&D戦略室、関係各部門の皆さまに感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、レーザプリンタ光学系の研究開発の遂行においては、 山田博氏、高橋英男氏、堀江政勝氏、清田耕平氏、小関稔氏、および当時の直属の 上司である松田忠氏には、終始ご指導、ご鞭撻と有益なご助言を賜りました。ここ に厚く御礼申し上げます。

また、研究室において、一緒に多くの議論をし、実験、試作、評価を共に行った 株式会社富士通研究所 新海知久氏、伊丹敏氏、櫻井文夫氏、森原隆氏には、心か ら感謝申し上げます。

また、研究成果を実用化するにあたり、終始ご指導、ご鞭撻を賜りました、当時 の富士通株式会社周辺装置事業部 福島俊夫氏、伯耆陽治氏をはじめプリンタ事業 部門の方々に深く御礼申し上げます。

さらに、タッチパネルの研究開発遂行においては、株式会社富士通研究所の当時 の上司である 小川清也氏、米納和成氏に、励ましとご指導ご鞭撻を賜りました。 厚く御礼申し上げます。

また、研究部において、共に議論し、実験、試作、評価にご協力いただいた株式 会社富士通研究所の 飯田安津夫氏、中澤文彦氏、佐野聡氏、山口伸康氏に感謝申 し上げます。

また、研究段階から実用化まで一貫してご協力いただいた株式会社富士通ゼネラ ル 岸俊行氏を始めとする映像グループの方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- R. F. Borelli, R. B. Bayless and E. R. Truax : "A Nonimpact Page Printing System", Computer, pp.49-57, (1975).
- (2) 堀江、近藤、高橋: "誘電ドラムを用いた高速ノンインパクトプリンタ",電子情報通信学会,情報全大,255,(1977).
- (3) 立石,池田,小谷: "LED プリンタ",信学技報. IE80-71, (1980.10).
- (4) C. Warren: "Medium and high-speed printers", EDN-April/1982, p.133~144, (1982).
- R. W. Wohlford : "Nonimpact Printer Uses Laser and Electrophotographic Technologies", Proc. Electro-Optical System Design Conference (EOSDC), pp.537-539, (1975).
- (6) 北村: "レーザビームプリンタ LBP2000D", 昭51 電気四学会連大, 182, (1976).
- (7) J. M. Fleischer, M. R. Latta and M. E. Rabedeau : "Laser Optical System of the IBM 3800 Printer", IBM J. Res. Develop., vol.9, p.479-483, (1977).
- (8) W. Meye : "Optical Character Generation for High-speed Non-impact Printer", J. Photographic Science, vol.25, (1977).
- (9) T. Matsuda, F. Abe and H. Takahashi : "Laser Printer Scanning System with a Parabolic Mirror", Appl. Optics, vol.17, No.6, p878-, (1978).
- (10) F. Abe, T. Mikami, T. Matsuda and H. Takahashi : "High Speed Laser Printer with High Resolution", LASER'79 Opto-electronics Conf.,(July 1979).
- (11) 黄海, 増井, 瀬川: "FACOM F6715D ラインプリンタ装置",画像電子学会
 予稿, 80-04-3, (1980).
- (12) 黄海: "レーザプリンタ", FUJITSU, vol.33, No.3, (1982).
- (13) 北村: "レーザビームプリンタ LBP-10", テレビジョン学会技術報告, vol.3, No.13, p.9, (1979).
- (14) 片岡, 斉藤, 安西: "2 色印刷半導体レーザプリンタの光学系", 応物 1980 秋, 18a-H-6, (1980).

- (15) 伊藤, 森元, 辻: "電磁ミラー走査による半導体レーザプリンタ", 第 60 回画 像電子学会, 予稿 (81-07), P.7~11, (1981).
- (16) 市川:"半導体レーザ型プリンタ", 信学技報, vol.82, No.129, IE-82-50, p.7~14, (1982).
- (17) 安部, 桜井, 伊丹, 松田: "ダブル LD ビーム走査光学系", 昭 57, 信学総全 大, 予稿 5-84, (1982).
- (18) 片岡, 斉藤, 山下, 梶原, 相木: "半導体レーザアレイの高速および多色レー ザプリンタへの応用", 昭 57, 信学総全大, 予稿 5-85, (1982).
- (19) 有本, 斉藤, 橋本, 立野, 岡田: "多機能型半導体レーザビームプリンタ(I)",
 昭 57 信学総全大, 予稿 5-86, (1982).
- (20) F. Abe, S. Itami, T. Satoh, T. Matsuda : "Double winged LD beam scanning system for computer graphics", SPIE, vol.457, pp.92-99, (1984).
- (21) 三谷監修: "タッチパネルの技術と開発",シーエムシー出版, (2004).
- (22) 福本,速水: "レーザ画像機器-走査型レーザ記録装置の発展-",応用物理, Vol.42, No.11, pp.1052-1066, (1973).
- (23) L. Beiser : "Laser Scanning Systems", Laser Application, Vol.2, pp.53-159, (1974).
- (24) V. J. Fowler : "Laser Scanning Techniques", Proc. SPIE, vol.53, pp.30-43, (1974).
- (25) A. D. Berg : "Optical Design Problems in Laser Scanning and Recording Systems", SPIE, vol.69, pp.14-20, (1975).
- (26) "Laser Scanning Components and Techniques", SPIE, vol.84, (1976).
- (27) J. C. Urbach, T. S. Fisli and G. K. Starkweather : "Laser Scanning for Electronic Printing", Proc. of IEEE, vol.70,, No.6, p.597~618, (1982).
- (28) K. G. Hernqvist and R. Carbonetta : "Lasers for Information Scan and Control", SPIE, vol.53, pp.3-8, (1974).
- (29) 龍岡: "レーザによる画像の記録と再生、光画像記録に伴う技術的諸問題:光 源-光学系",昭51 電気四学会連合大会,186(1),(1976).
- (30) J. D. Hawkins, W. A. Shull, T. B. Reynolds and M. W. Dowley : "Low Power,
Low Cost Blue Lasers : A Glimpse at the Future of He-Cd Laser Technology", CLEOS '76, (1976).

- (31) 安部,松田: "放物面鏡による光ビーム走査偏差補正法",光学,vol.6, No.2, pp.67-74, (1977).
- (32) 三上, 安部, 松田: "レーザプリンタ文字配列方式(Ⅱ)", 信学情全大, 予 254, (1977).
- (33) 三上, 安部, 松田: "走査レーザ光制御方式", 信学総全大, 予 2293, (1979).
- (34) T. Mikami, F. Abe and T. Matsuda : "A Correction Method for Laser Scanning Errors in High Speed Laser Printers", FSTJ, Vol.18, No.4, pp.579-594. (1982).
- (35) 松田,三上,安部: "回転多面鏡の光ビーム走査誤差の補正法",電子情報通信学会論文誌,vol.J66-C, No.2, pp.137-144, (1983).
- (36) T. Mikami, F. Abe and T. Matsuda : "Ultra-High Resolution UV Laser Scanning System", FSTJ, Vol.20, No.2, pp.125-151, (1984).
- (37) R. N. Hall et al. : "Coherent Light Emission from Ga-As Junctions", Phys. Rev. Lett., vol.9, p.366, (1962).
- (38) M. I. Nathan et al. : "Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n junctions", Appl. Phys. Lett., vol.1, p.62. (1962).
- (39) T. M. Quist et al : "Semiconductor Maser of GaAs", Appl. Phys. Lett., vol.1, p.91, (1962).
- (40) T. Kajimura, T. Kuroda, S. Yamashita, M.Nakamura and J.Umeda : "Transverse-mode stabilized GaAlAs visible diode lasers", Appl. Opt., vol.18, no.11, p.1812, (1979).
- (41) 伊藤, 杉野, 和田, 清水, 寺本: "GaAlAs 可視半導体レーザ", 電気学会, 電子材料研究会, EFM-80-5, (1980).
- (42) 伏木: "広範な応用を目指して発表が相次ぐ可視光半導体レーザ", 日経エレ, 1980.2.18, No.232, p.96, (1980).
- (43) 安部,高木,桜井,伊丹,松田: "可視 SML レーザの光学特性",信学半材 全大,予稿 359,(1981)

- (44) 矢野, 土方: "波長 683nm の室温連続発振に成功した GaAlAs 可視半導体レーザ" 日経エレ, 1982.9.13, No.299, p.207, (1982).
- (45) 立野, 相木: "情報機器用半導体レーザ光源", 信学技報, vol.82, No.129, p.15, (1982).
- (46) 佐野, 中沢, 山口, 岩本, 飯田, 山岸, 安部: "サイズ検出機能付き大画面用タッチパネルの開発", 電子情報通信学会, 信学技報 MVE98-85, p.55-61, (1998).
- (47) 山口, 安部, 飯田, 中澤, 岩本, 佐野: "3 次元空間インタフェース", Human Interface, vol.13, No.2, (1998).
- (48) 安部: "3 次元空間インタフェースの開発",日本機械学会講習会,No.98-27,
 pp.45-50, (1998).
- (49) 安部, 佐野, 中澤, 佐藤: "動的サイズ検出の高精細化タッチパネルの開発", ヒューマンインタフェース学会論文誌, (投稿査読中), (2007).
- (50) E. D. Hartfield : "Recorders: Flat vs cylindrical", Laser Focus, vol.9, No.4, pp.47-49, (1973).
- (51) M. J. Buzawa and R. E. Hopkins: "Optics and Laser Scanning", Proc. SPIE, vol.53, pp.9-14, (1974).
- (52) 例えば「松原, "走査光学系", 特開昭 51-9463, 有本、"f ·θ レンズ", 特開昭
 54-41149. 丸山, 石井: "平凸レンズ", 特開昭 55-7727.
- (53) 立岡, 箕浦:"情報処理端末装置", 特開昭 53-137631.
- (54) 松居: "メカニカル素子による光偏向技術 (回路系)", 応用物理, vol.46, p.599, (1979).
- (55) S. Minami and K. Minoura : "Optical Lens System for Laser-beam Printer", SPIE, vol.193, p.202, (1979).
- (56) 箕浦,南: "アークサインレンズ",応物 1981 春,予稿 31a-R-8, (1981).
- (57) 箕浦,南,立岡:"レーザプリンタ用走査レンズの最適設計法",応物 1981 春, 予稿 31a-R-9, (1981).
- (58) J. A. Arnaud, W. M. Hubbard, G. D. Mandeville, B. Claviere, E. A. Franke and J. M. Franke : "Technique for Fast Measurement of Gaussian Laser Beam Parameters", Appl. Optics, vol.10, No.12, p.2775, (1971).

- (59) 州崎,橘:"ナイフエッジを用いた集束レーザビームの測定",電子情報通信
 学会誌,vol.57-C, No.6, pp.211-212, (1974).
- (60) C. J. Palermo, R. Montgomery and E. Young : "Application of Acousto-Optics to Laser Recording", SPIE, vol.53, pp.44-53, (1974).
- (61) W. K. Klein and B. D. Cook : "Unified Approach to Ultrasonic Light Diffraction", IEEE, Trans. on Sonics and Ultrasonics, SU-14, p.123, (1967).
- (62) E. I. Gordon : "A Review of Acousto-optical Deflection and Modulation Devices", Proc. IEEE, vol.54, pp.1391-1401, (1966).
- (63) 安部,松田,堀江: "超音波光変調器による同時多点偏向",昭 51 電子情報通信学会全国大会,799,(1976).
- (64) 種田, 竜岡, 愛甲: "高精細度レーザディスプレイにおける走査線ピッチむらの光学的補正方式", テレビジョン学会全大, 12-3, (1972).
- (65) 有村: "多面回転鏡ファクシミリ走査における走査線ピッチむら修正方式", 画像電子学会誌, Vol.5, No.3, pp.107-113, (1976).
- (66) 有村: "多面回転鏡ファクシミリ走査機構",研究実用化報告, vol.26, No.3, p.1027, (1977).
- (67) 塚本,伊藤,高橋,武井,永井: "走査機構と光学系",画像電子学会誌,vol.8,
 No.3, p.147, (1979).
- (68) T. Fisli: "High Efficiency Symmetrical Scanning Optics", Opt.& Laser Tech., vol.14, p.98~100, (1982).
- (69) 南, 土岐, 小倉, 池永, 内藤: "レーザスキャナー用多面鏡の超精密切削加工", シャープ技報, vol.21, p.41~46, (1981).
- (70) 有村: "多面回転鏡ファクシミリ走査における光偏向角誤差修正方式",画像
 電子学会誌, Vol.6, No.1, pp.10-15, (1977).
- (71) 高橋, 堀, 奥原: "光学式プリンタの同期方式", 特開昭 50-2826.
- (72) H. Kogelnik : "Imaging of Optical Modes", B.S.T.J., p.455, (1965).
- (73) D. Botez : "Near and Far-Field Analytical Approximations for the Fundamental Mode in Symmetric Waveguide DH Lasers", RCA Review, vol.39, p.577~603, (1978).

- (74)田中,福光:"半導体レーザ出射光の界分布",信学技報,OQE81-18, p.19~24, (1981).
- (75) R. Rhyins : "Lenses for low-order modes", Laser Focus, June 1974, p.55~61, (1974).
- (76) 吉田,朝倉: "レーザビーム光学系の結像特性",画像技術,1976年1月号, pp.9-20, (1976).
- (77) 例えば、「後藤, ビデオディスク用集光レンズ", 特開昭 54-127339」
- (78) R. C. Miller, R. H. Willens, H. A. Watson, L. D'asano and M. Feldman : "A Gallium Arsenide Laser Facsimile Printer", B.S.T.J., vol.58, No.9, p.1909~1998, (1979).
- (79) J. B. Merry and L. Bademian : "Acousto-Optic Laser Scanning", SPIE, vol.169, p.56~59, (1979).
- (80) C.J.Kramer : "Holographic Laser Scanners for Non-impact Printing", Laser Focus, June 1981.,p.709, (1981).
- (81) P. J. Brosens and E. P. Grenda : "Application of Galvanometers to Laser Scanning", SPIE, vol.53, (1974).
- (82) R. Sherman : "Specifying a Rotating Scanner", Laser Focus, July (1979).
- (83) I. H. Mallender : "Resolution, Intensity and Power in Diffraction Limited Laser System", SPIE, vol.84, pp.132-137, (1976).
- (84) 森原,安部,松田:"走査ピッチとレーザビーム径",昭 57 信学全大,予稿 5-83, (1982).
- (85) H. Sonnenberg : "Optimum Laser-Scanning Prameters and Latitudes in Laser Xerography", Appl. Opt., vol.21, No.10, p.1745~1751, (1982).

本論文に関する発表論文リスト

[学術論文]

- 安部文隆,松田忠: "放物面鏡による光ビーム走査偏差補正法",日本光学会誌, vol.6, No.2, pp.67-74, (1977).
- Tadashi Matsuda, Fumitaka Abe, and Hideo Takahashi : "Laser printer scanning system with a parabolic mirror", Applied Optics, vol.17, No.6, pp.878-884, (1978).
- 松田忠,三上知久,安部文隆: "回転多面鏡の光ビーム走査誤差の補正法",電子情報通信学会論文誌, vol.J66-C, No.2, pp.137-144, (1983).
- 4. Fumitaka Abe, Satoshi Itami, Tohru Satoh, Tadashi Matsuda : "Double winged LD beam scanning system for computer graphics", SPIE, vol.457, pp.92-99, (1984).

[国際会議発表]

- 1. Tadashi Matsuda, Fumitaka Abe, and Hideo Takahashi : "Laser printer scanning system with a parabolic mirror", Proc. of CLEA '77, (1977).
- 2. Fumitaka Abe and Tadashi Matsuda : "High Speed laser printer with high resolution", LASER '79 Opto-electronics Conf. Proc., pp.374-378, (1979).
- 3. Tomohisa Mikami, Fumitaka Abe, Tohru Satoh and Tadashi Matsuda : "An ultra-high precision UV laser scanning system", ICALEO(International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics) '83 Conf. Proc., vol.39, pp.37-44, (1983).
- Fumitaka Abe, Satoshi Itami, Tohru. Satoh, Tadashi Matsuda : "Double winged LD beam scanning system for computer graphics", The International Society for Optical Engineering, Advanced in Display Technology IV, Jan.24-27, (1984).

[その他の発表と論文]

- Fumitaka Abe and Tadashi Matsuda : "The Correcting Method of Beam Scanning Distortion Using the Parabolic Mirror", FSTJ (Fujitsu Scientific & Technical Journal), Vol.14, No.3, pp.91-106, (1978).
- Tomohisa Mikami, Fumitaka Abe and Tadashi Matsuda : "A Correction Method for Laser Scanning Errors in High Speed Laser Printers", FSTJ (Fujitsu Scientific & Technical Journal), Vol.18, No.4, pp.579-594. (1982).
- Tomohisa Mikami, Fumitaka Abe and Tadashi Matsuda : "Ultra-High Resolution UV Laser Scanning System", FSTJ (Fujitsu Scientific & Technical Journal), Vol.20, No.2, pp.125-151, (1984).
- 4. 安部文隆,松田忠,堀江政勝: "超音波光変調器による同時多点偏向",1976 年 度電子通信学会(総全大),4-99,(1976).
- 5. 安部文隆, 松田忠: "レーザプリンタ文字配列方式(I) 走査光学系-", 1977 年度電子情報通信学会(総全大), 253, (1977).
- E上知久,安部文隆,松田忠: "レーザプリンタ文字配列方式(Ⅱ)-変調制御系-",1977年度電子情報通信学会(総全大),254,(1977).
- 三上知久,安部文隆,松田忠: "走査レーザ光制御方式",1979 年度電子情報通 信学会(総全大),2293,(1979).
- 8. 安部文隆, 桜井文夫, 伊丹敏, 松田忠: "ダブル LD ビーム走査光学系", 1982
 年度電子情報通信学会(総全大), 5-84, (1982).
- 9. 森原隆, 安部文隆, 松田忠: "走査ピッチとレーザビーム径", 1982 年度電子情報通信学会(総全大), 5-83, (1982).
- 10. 伊丹敏, 安部文隆, 小笠原正, 佐藤透: "ダブル LD ビーム広域高解像走査光学系", 1983 年度電子情報通信学会(情報シス部門全大), 1-182, (1983).
- 11. 安部文隆: "レーザプリンタの光学系の開発動向と実際",日本工業技術センター, No.717, PP.6-15, (1982).
- 12. 佐野聡, 中沢文彦, 山口伸康, 岩本康秀, 飯田安津夫, 山岸文雄, 安部文隆:"サ イズ検出機能付き大画面用タッチパネルの開発", 電子情報通信学会, 信学技報 MVE98-85, p.55-61, (1998).

- 13. 佐野聡,高根沢敦夫,中沢文彦,佐脇一平,安部文隆:"電子プレゼンテーション 用光ポインタの開発",計測自動制御学会,第 10 回ヒューマン・インタフェー ス・シンポジウム論文集, pp.493-498, (1994).
- 14. 山口伸康, 安部文隆, 飯田安津夫, 中澤文彦, 岩本康秀, 佐野聡: "3 次元空間インタフェース", Human Interface, vol.13, No.2, (1998).
- 15. 安部文隆: "3 次元空間インタフェースの開発", 日本機械学会講習会, No.98-27, pp.45-50, (1998).

[一般解説論文、入出力技術・記憶技術に関連する発表]

- 1. 安部文隆, 近藤正雄:"研究開発最前線", 雑誌 FUJITSU, vol.58, No.3, pp.170-175, (2007).
- Fumitaka Abe and Masao Kondo : "Research and Development at Fujitsu Laboratories", FSTJ (Fujitsu Scientific & Technical Journal), vol.43, No.4, pp.377-383, (2007).
- 3. 安部文隆: "コンパクトスキャナの概要と技術動向",月刊ディスプレイ,1998 年9月号.
- 4. 安部文隆, 井藤隆志: "モバイルスキャナ「RapidScan RS-10」のデザイン戦略", 発明, vol.95, pp.83~88, (1998).
- Fumitaka Abe, Tsutomu Oshima and Shigeru Fujii: "Mobile Image Scanner", FSTJ (Fujitsu Scientific & Technical Journal), vol.34, No.1, pp.125-132, (1998).
- 6. 野田嗣男, 千葉広隆, 安部文隆: "モバイルアプライアンス", 雑誌 FUJITSU, vol.52, No.4, pp268-272, (2001).
- 7. 吉田茂,安部文隆: "濃淡画像の多階調型ブロック符号化",画像電子学会, 8-02-05, pp.25-30, (1986).
- 8. 鈴木祥治, 穂刈守, 森雅博, 安部文隆: "フィルタ切換型カラースキャナ", 1987 年度電子情報通信学会(総全大), (1987).
- 9. 津田光弘, 中村盛吉, 森雅博, 安部文隆: "試作カラースキャナの色分解特性", 1987 年度電子情報通信学会(総全大), (1987).

- Michio Miura, Fumitaka Abe and Ippei Sawaki : "Imaging optical system using a pair of replicated binary micro lens Arrays", Optoelectronics '98, SPIE, (1998)
- 11. 佐脇一平, 安部文隆, 三浦道雄, 石川芳朗: "マイクロバイナリレンズアレイを 用いたカラー結像光学系", 日本光学会, 光学連合シンポジウム 96, (1996).
- 12.佐脇一平, 安部文隆: "バイナリレンズを用いたイメージ結像光学系", 月刊オプ トロニクス, (1996).
- 13.安部文隆, 佐脇一平, 三浦道雄, 石川芳朗: "薄型マイクロレンズアレイ結像系の 開発", 映像情報「インダストリアル」, 産業開発機構, (1996).
- 14.佐脇一平,安部文隆,三浦道雄,石川芳朗: "軸外し光学系によるバイナリレンズ アレイ結像系高コントラスト化",日本光学会,光学連合シンポジウム東京 '95, (1995).
- 15. 三浦道雄, 安部文隆, 佐脇一平, 石川芳朗: "バイナリレンズアレイを用いた結像 光学系", 応用物理学会, 第 56 回学術講演会, (1995).
- 16. Masaharu Moritsugu, Shigeru Arai, Akio Futamata, Fumitaka Abe and Kohichi Ogawa : "New Optical Head for Magneto-Optic Library Units", Proc. of Optical Data Storage Topical Meeting, Proc. of SPIE, vol.1078, pp.131-137, (1989).
- 17. 安部文隆, 荒井茂, 二俣彰男, 工藤良介, 小川紘一: "固定型光磁気ディスク装置 用ヘッドの開発", Proc. Optical Memory Symp., pp.73-74, (1988).
- 二侯彰男,市原順一,安部文隆,工藤良介,小川紘一:"固定型光磁気ディスク装置用バイアス磁界発生コイルの設計", Proc. Optical Memory Symp., pp.75-76, (1988).
- Fumitaka Abe, Masaharu Moritsugu, Akio Futamata, Kohichi Ogawa and Ryosuke Kudou : "Fast access rewritable magneto-optical disk library", Proc. of ICAM'89, pp.569-573, (1989).
- 20. Haruhiko Izumi, Masakazu Taguchi, Toshikatsu Narumi, Kazunori.Naitou, Fumitaka Abe and Hiroshi Inoue : "Overwrite Characteristics of magneto-Optical Disks by Magnetic field Modulation", SPIE Vol.1316,

Optical Data Storage (1990).

- 21. Akio Futamata, Masaharu Moritugu, Fumitaka Abe and Kohichi Ogawa;
 "Optimization of Magneto-Optic Head", IEEE, Topical Meeting on Optical Data Storage, pp.78-82, (1990).
- 22. 安部文隆: "固定型光磁気ディスク装置",昭和 63 年度 光ディスク懇談会資料集, p.477-486, (1989).
- 23. 安部文隆, 荒井茂, 二俣彰男, 工藤良介, 小川紘一: "固定型光磁気ディスク用 光学ヘッドの開発", 光メモリシンポジウム'88 論文集, p.73-76, (1988).

本論文に関する主要特許リスト(最終登録分のみ)

※括弧内は、出願年月日/登録年月日

- 1. 「光走査装置」,特許 1045354 号 (19761012/19810528).
- 2. 「超音波光偏向器」,特許1179152号(19750514/19831130).
- 3. 「光ビーム測定装置」,特許1459501号 (19800506/19880928).
- 4. 「走査光ビーム同期制御方式」,特許1430781号(19770401/19880324).
- 5. 「走査光ビーム同期制御方式」,特許 1242699 号 (19770401/19841214).
- 6. 「タイミング信号発生方式」,特許 1279451 号 (19781016/19850829).
- 7. 「刻時信号発生方式」,特許1300970号(19790410/19860214).
- 7往復走査における印字位置制御方式」,特許1422571号(19810330/ 19880129).
- 9. 「光走査装置」,新案 1699274 号 (19860213/19871012).
- 「光学式位置検出装置付き情報表示装置」,特許 3846981 号 (19970902/20060901).
- 11. 「光走査型タッチパネル」,特許 3966592 号 (19971218/20070608).
- 12. 「光走査型タッチパネル」,特許 3786767 号 (19970902/20060331).