The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

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

頁

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　走査速度変化･････････････････････････････････････ 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　$f\theta$ 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

３．２．２　平面度誤差の補正･････････････････････････････････････ 37

３．２．３　回転数変動による走査誤差の補正・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　42
３．２．４　$f\theta$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・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

５．３．１　基本構成・・・

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。

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。

一方、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

（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。

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 $0.1\mu m$ 横 $10\mu m$ 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。

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 $0.1\mu m$ ×横 $10\mu m$ 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 $f\theta$ 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

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。

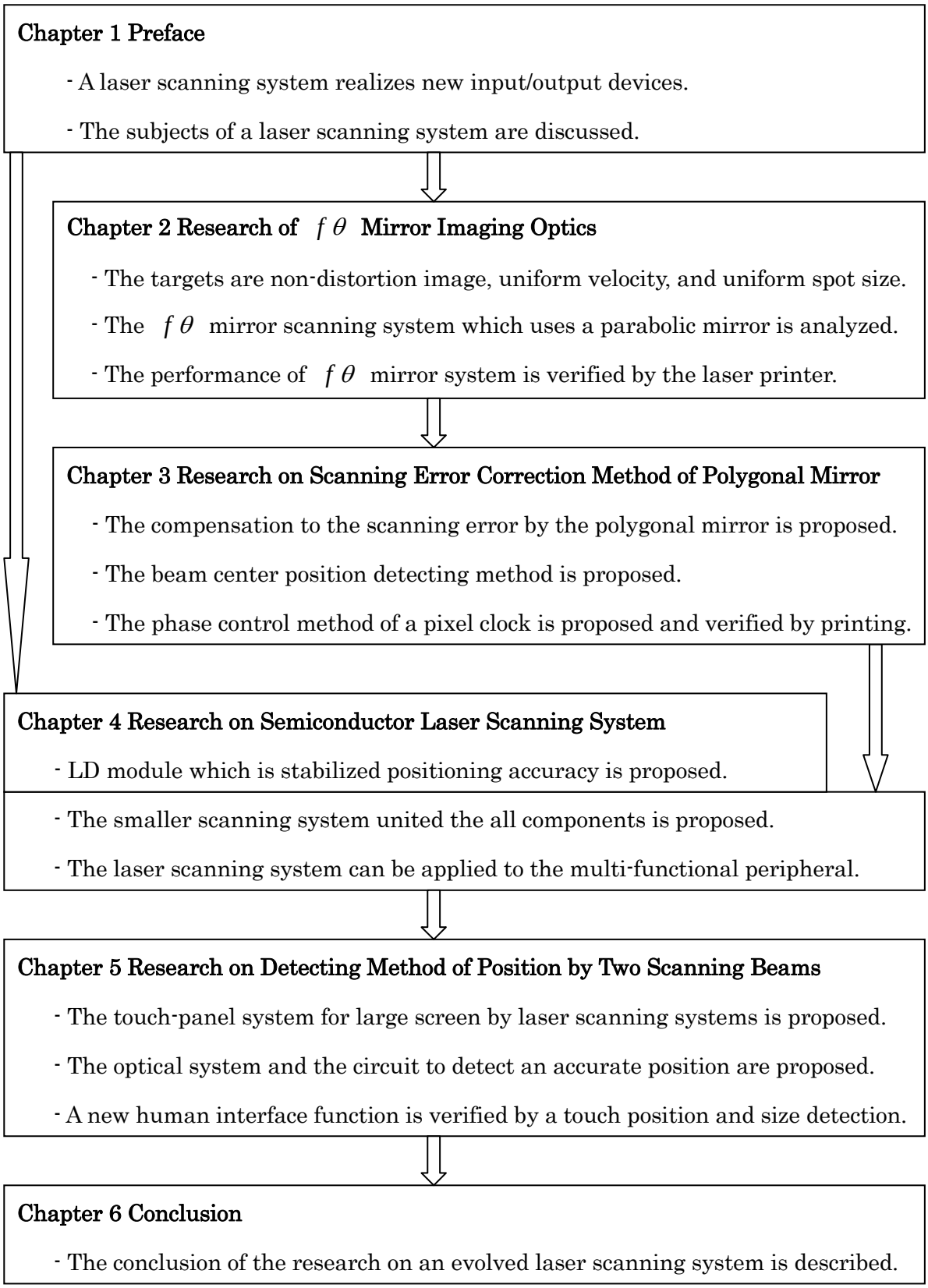


Fig.1-1 Flow chart of this doctoral thesis.

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。

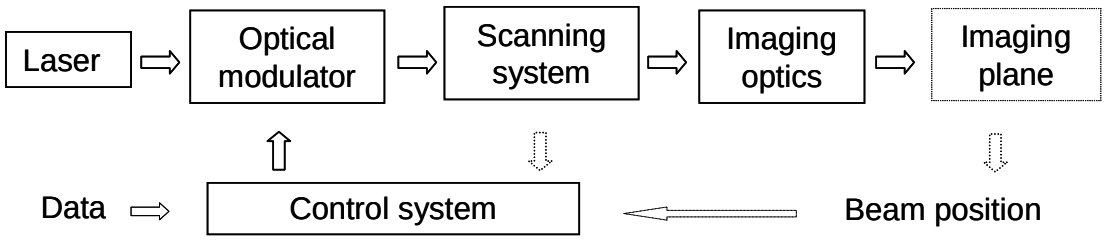


Fig.2-1 Flow chart according to function of a laser scanning system

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、

$$x_0 = f \cdot \tan\theta \qquad (2\text{-}1)$$

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、

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

で表される。

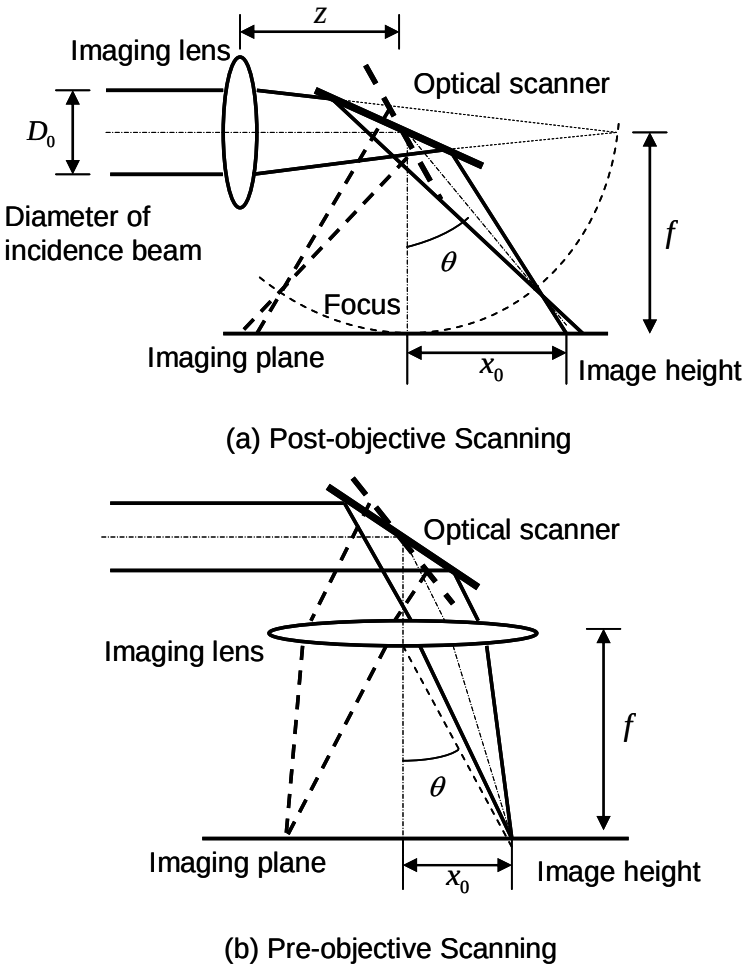


Fig.2-2 Schematic diagram of scanning system

従来の構成の場合、歪曲収差は、式(2-1)、(2-2)、(2-3)より、

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

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

$$\frac{dx}{dt} = \frac{f \cdot \omega}{\cos^2\theta} \qquad (2\text{-}5)$$

で表される。走査速度変化は理想の走査速度$f \cdot \omega$とのずれを百分率で表し、

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

とする。従来の構成の場合、式(2-5)、(2-6)より、

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

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D_0、走査角をθとすると、投影面上において近似的に、

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

に拡がる。$\theta = 0$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。

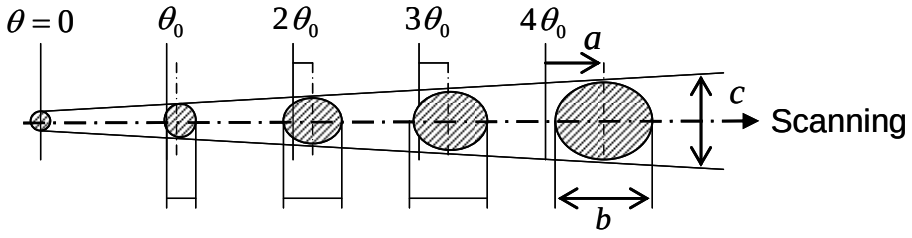


Fig.2-3 Scanning distortion and varistion

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$1/\cos^2\theta$ 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}～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 と 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

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

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

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。

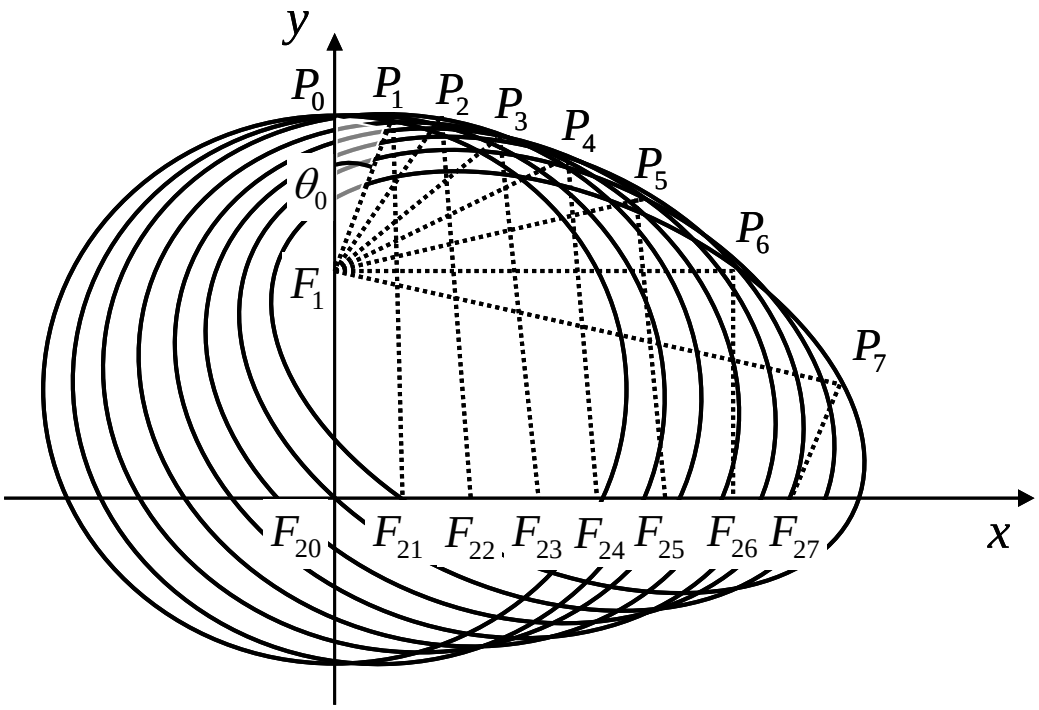


Fig.2-4 Consideration of correcting method by the ellipse mirror.

この包絡線の軌跡は、

$$y = -\frac{x^2}{2(\ell - a)} + \frac{\ell + a}{2} \quad (y \geqq 0)$$

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

$$(-\sqrt{\ell^2 - a^2} \leq x \leq \sqrt{\ell^2 - a^2})$$

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

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

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$(0 < k \leq 1)$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$x \cdot y$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$P_1(x_{p1}, y_{p1})$の座標を求める。

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

$$y = x \cdot \cot\theta + k\,f \tag{2-13}$$

ただし、$0 < k \leq 1$

式(2-12)、(2-13)より

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

また、P_1における接線の傾きを $\tan\phi$ とすると、

$$\tan\phi = -\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k} \tag{2-15}$$

となる。

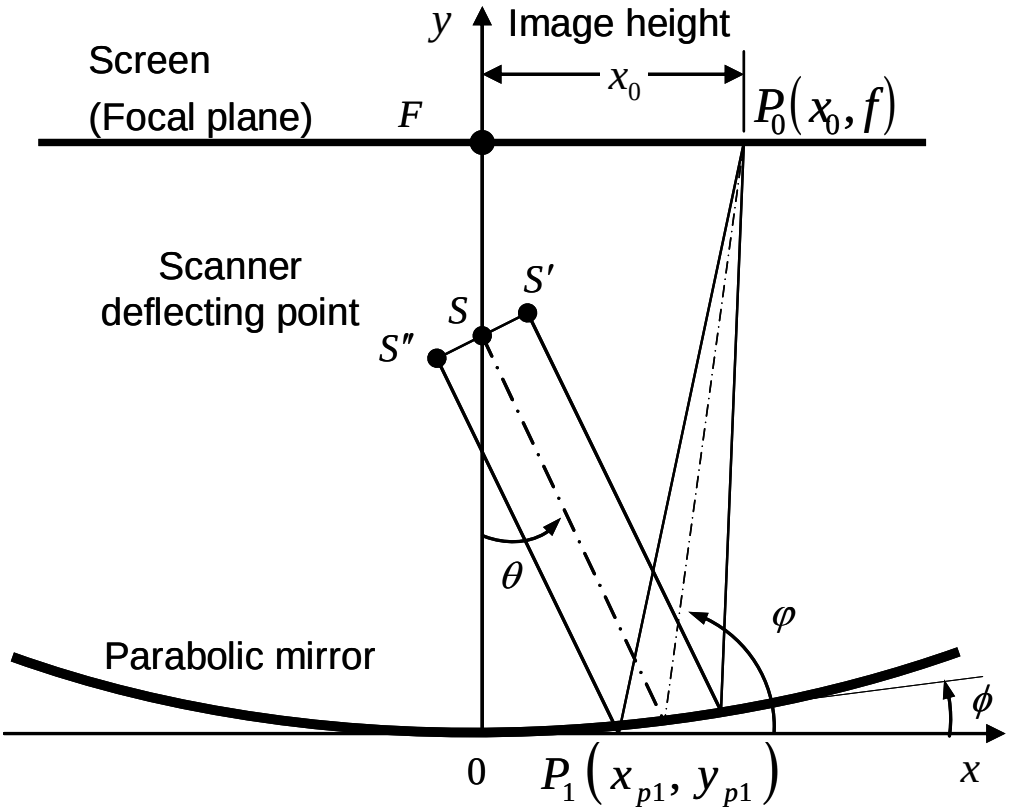


Fig.2-5 Schematic diagram of the correcting method of beam scanning distortion using the parabolic mirror.

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

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

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

として、式(2-17)、(2-18)より

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

式(2-19)を、式(2-15)を用いて書き換えると、

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

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

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

（複合同順）

式(2-14)、(2-15)はそれぞれ

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

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

となる。したがって、投影点の座標は

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

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。

$$x_0 = f \cdot \frac{\tan\theta \cdot \left(1+\tan^2\phi\right)^2}{1-\tan^2\phi + 2\tan\theta\cdot\tan\phi}$$

$$\text{ただし、}\ \tan\phi = -\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k + \frac{d}{2f\cdot\sin\theta}} \qquad (2\text{-}22)$$

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°,0.625 f)、(54°,0.645 f)、(41°,0.665 f)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 ～0.8 f にある場合で、特に、0.6 f ～0.7 f の範囲で改善マージンは大きいことを見出した。

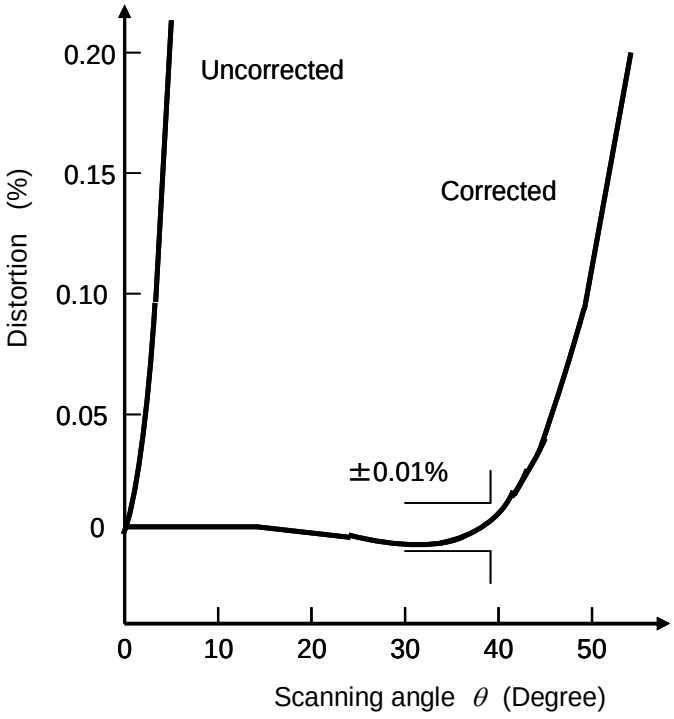


Fig.2-6 Distortion（ $k=2/3$ ）

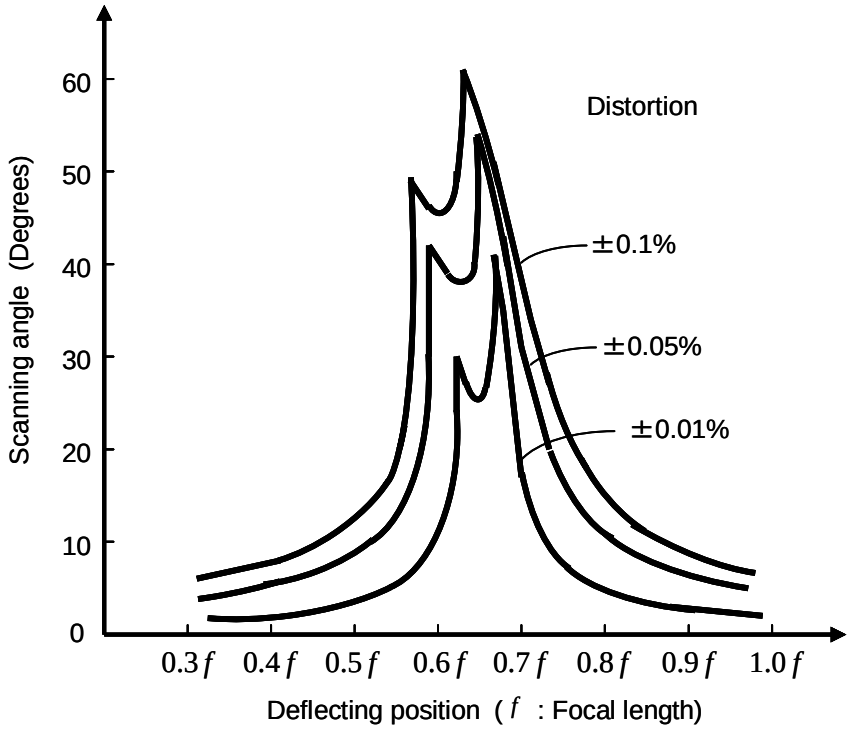


Fig.2-7 Range of distortion.

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。

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

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

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。

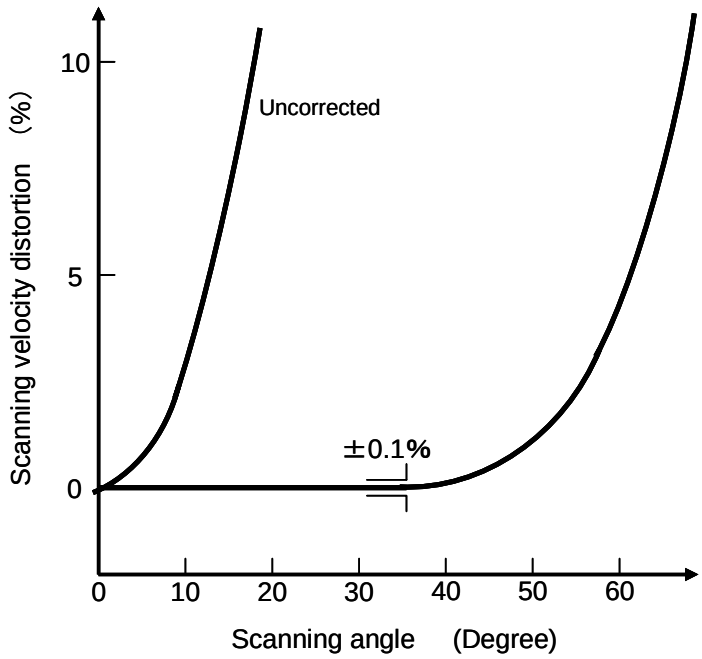


Fig.2-8 Scanning velocity distortion（ $k=2/3$ ）

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、

$$（錯乱円径）= f \cdot \left| \frac{\tan\theta \cdot \left(1+\tan^2\phi_1\right)^2}{1-\tan^2\phi_1 + 2\tan\theta\cdot\tan\phi_1} - \frac{\tan\theta \cdot \left(1+\tan^2\phi_2\right)^2}{1-\tan^2\phi_2 + 2\tan\theta\cdot\tan\phi_2} \right| \qquad (2\text{-}24)$$

ただし、$\tan\phi_1 = -\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k + \dfrac{d}{2f\cdot\sin\theta}}$

$$\tan\phi_2 = -\cot\theta + \sqrt{\cot^2\theta + k - \frac{d}{2f\cdot\sin\theta}}$$

である。$k=2/3$ として、焦点距離 $f=480\ mm$、光ビーム径を $d=0.5, 1.0, 3.0, 5.0\ mm^{\phi}$ 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

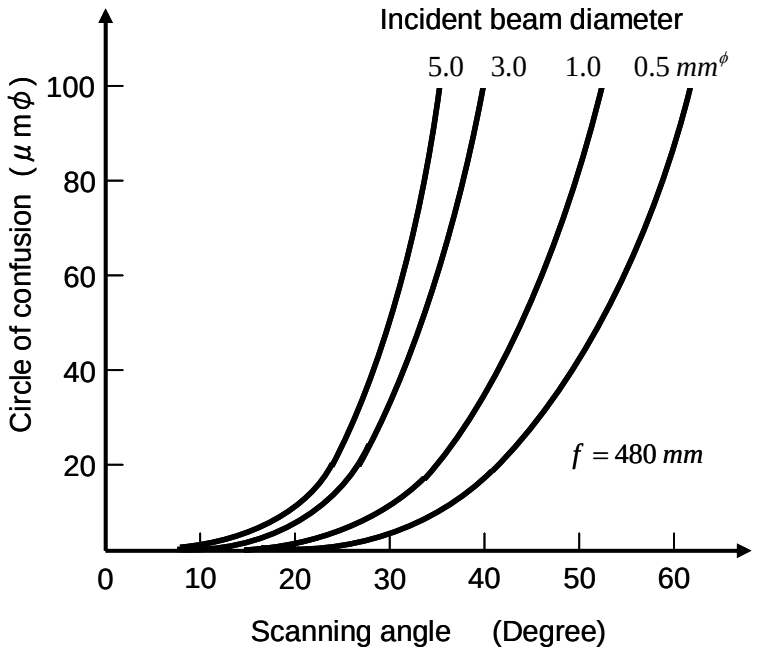


Fig.2-9 Circle of confusion（$f=480\ mm$, $k=2/3$）

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。

$$D = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f \cdot \lambda}{d_0} \qquad \text{ただし、} \ f >> \frac{\pi \cdot d_0^{\ 2}}{4\lambda} \qquad (2\text{-}25)$$

λ=632.8nm（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。

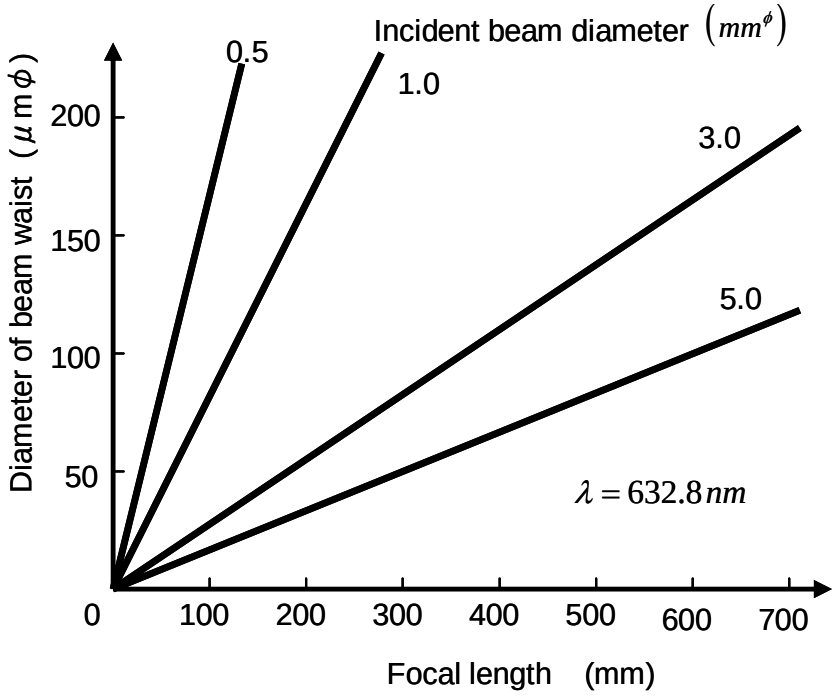


Fig.2-10 Beam diameter and focal length（λ=632.8nm）

２．５　　実験検証

２．５．１　像高

焦点距離 480 ㎜の放物面鏡を用いて、偏向位置を放物面鏡の中心より 320 ㎜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。

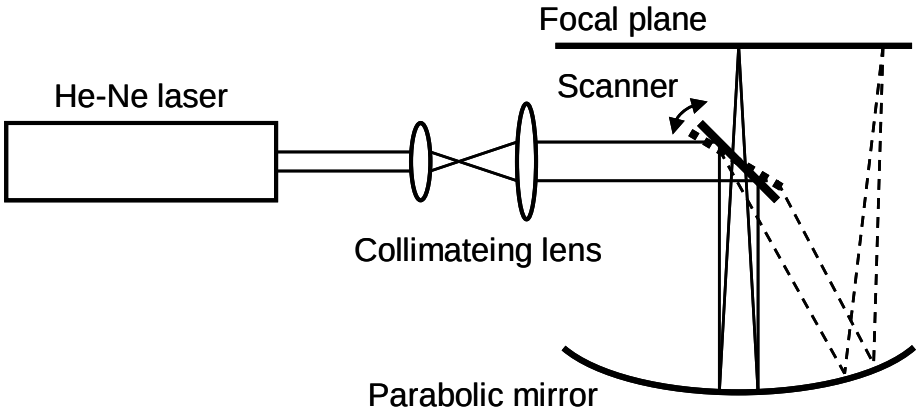


Fig.2-11 Schematic diagram of the experimental arrangement.

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$1.3mm^{\phi}$と$2.7mm^{\phi}$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。

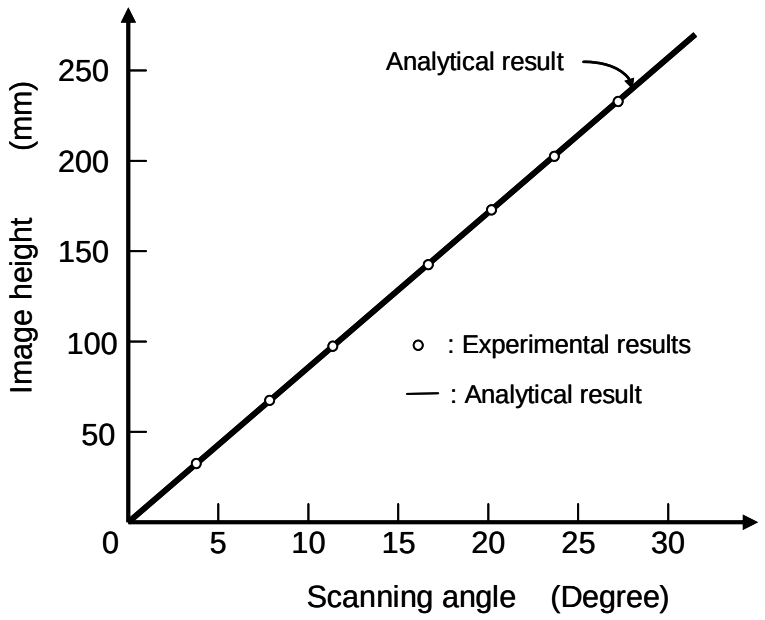


Fig.2-12 Experimental results of image height

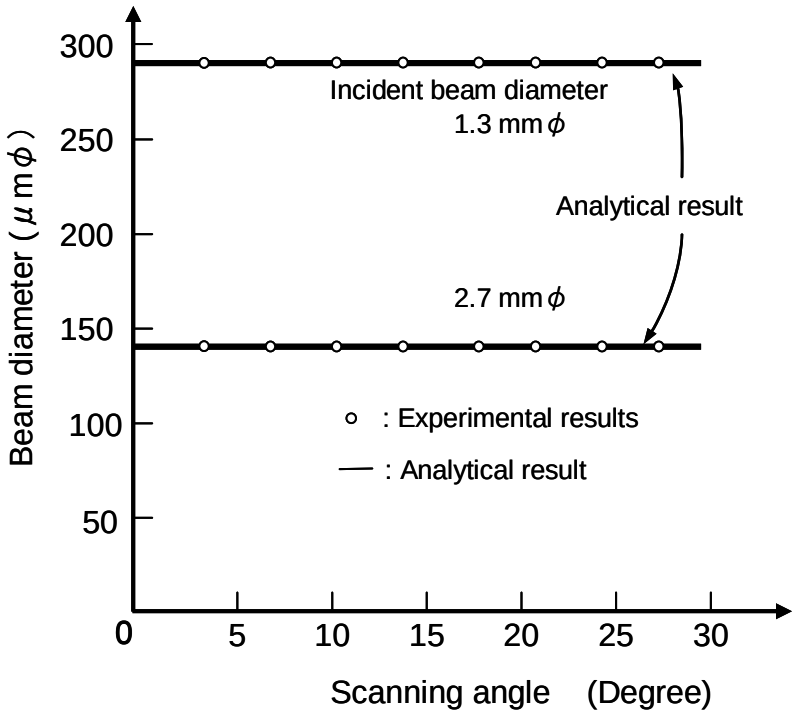


Fig.2-13 Experimental results of beam diameter.

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、

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

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軸の交点をX_0、Z_0とすると、平面の方程式は、

$$\frac{x}{X_0}+\frac{z}{Z_0}=1 \qquad (2\text{-}27)$$

であり、式(2-26)、(2-27)より、

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

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、

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

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420mmの場合、円弧の半径は9638mm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㎜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$f\theta$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。

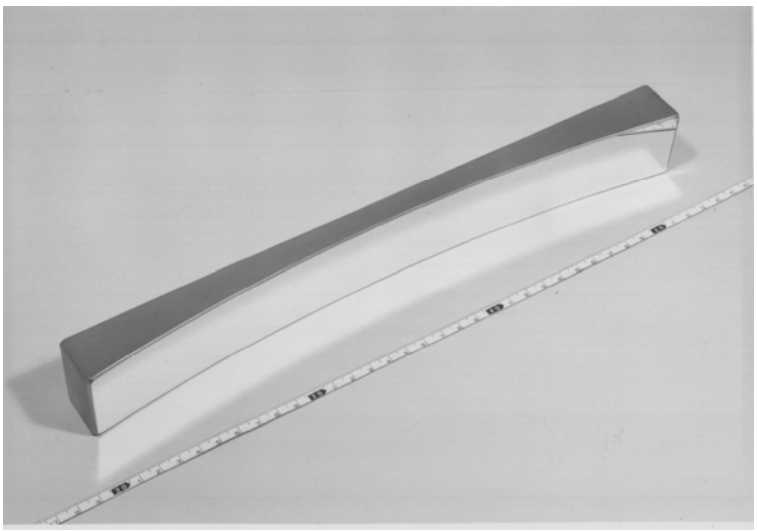


Fig.2-14 Parabolic mirror

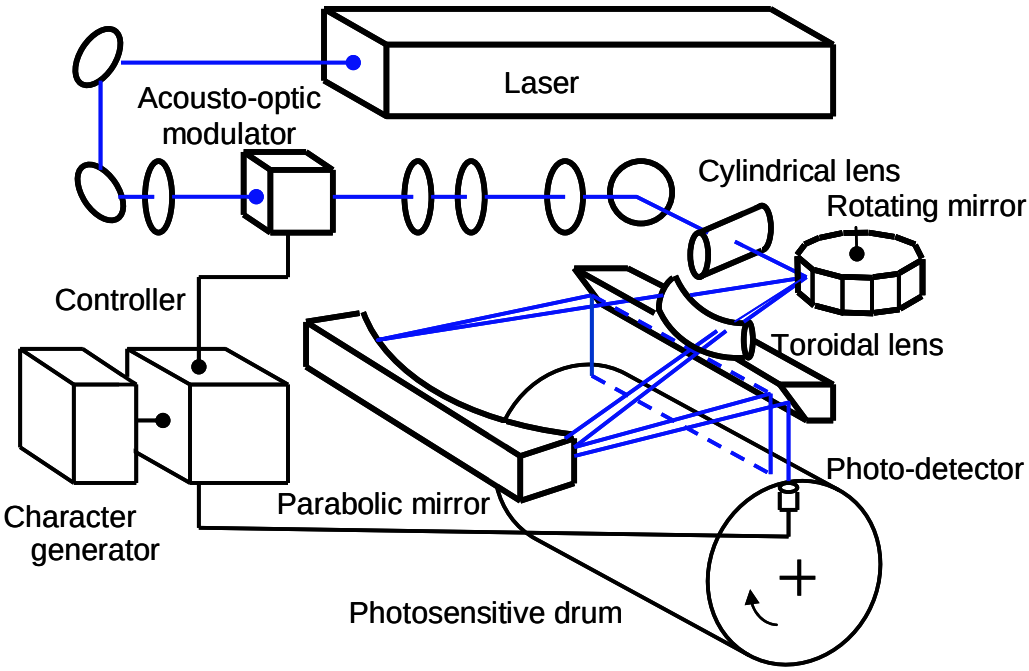


Fig.2-15 Laser printer scanning system with a parabolic mirror

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。

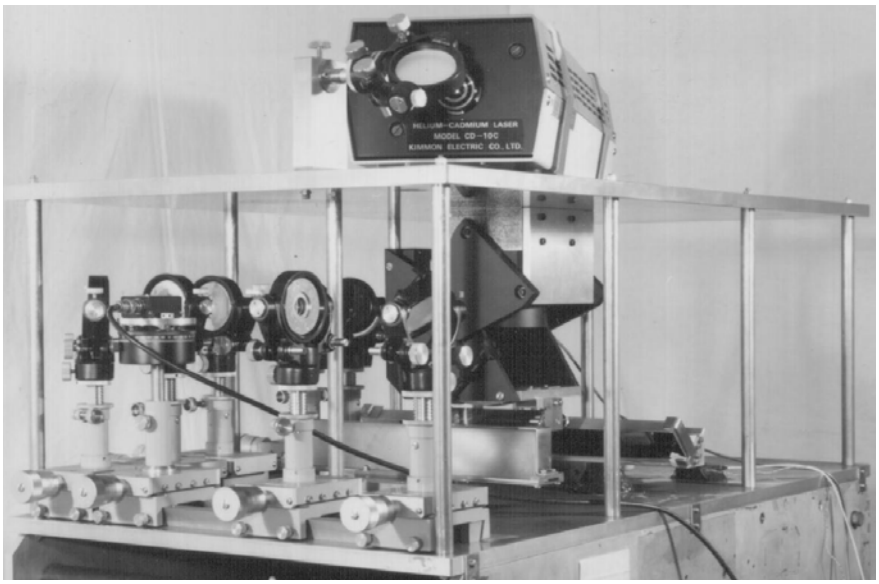


Fig.2-16 Proto-type of laser printer optical system

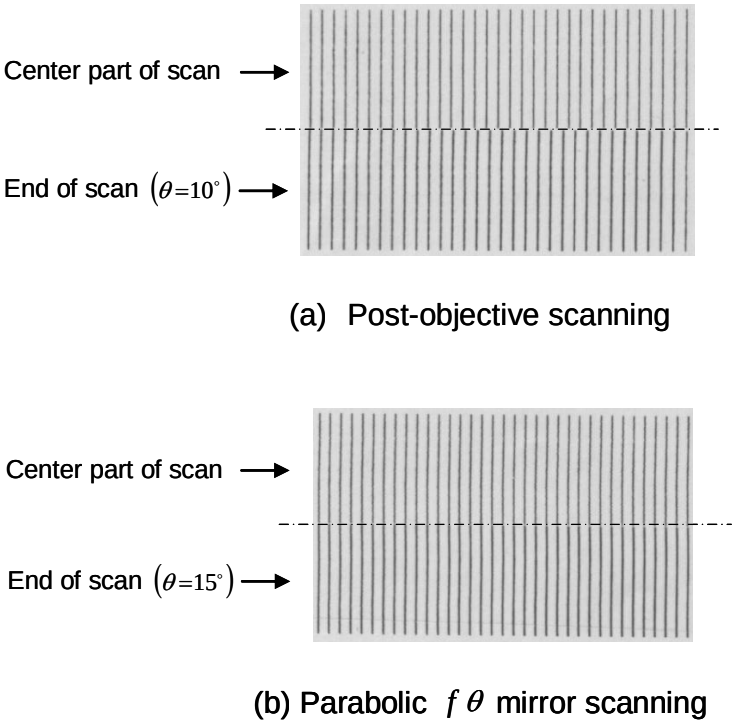


Fig.2-17 Printing samples

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 80μmφ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 ㎜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）

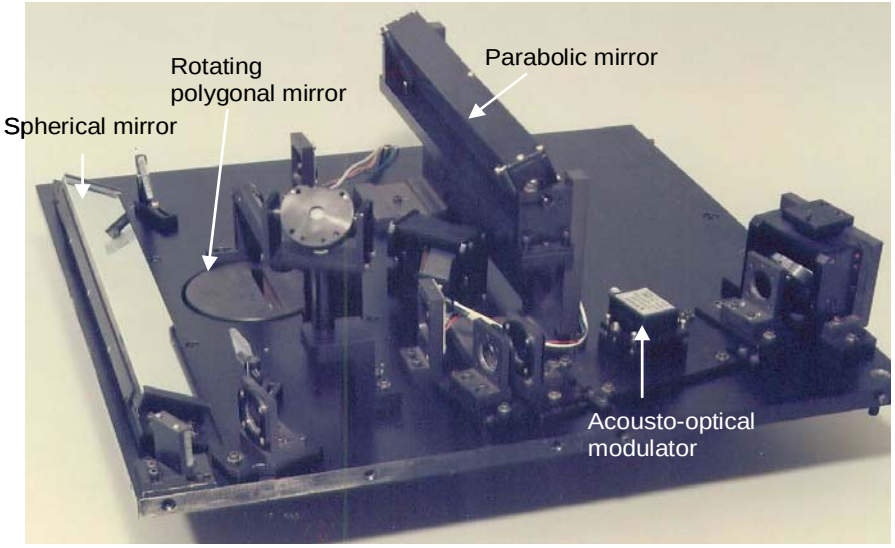


Fig.2-18 Scanning optical system $\left({}^{L}590\times{}^{V}560\times{}^{H}200\ mm\right)$

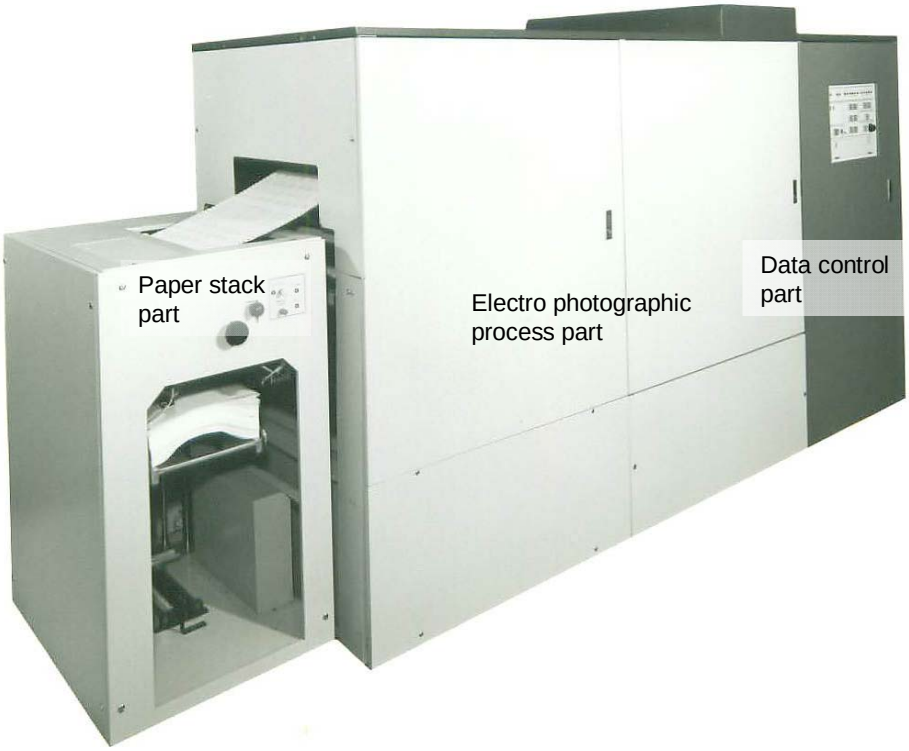


Fig.2-19 Laser printer equipment $\left({}^{L}3.29\times{}^{W}0.93\times{}^{H}1.5m\right)$

２．７　　むすび

従来の $f\theta$ 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 $f\theta$ 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、$f\theta$ 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、$f\theta$ 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。

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

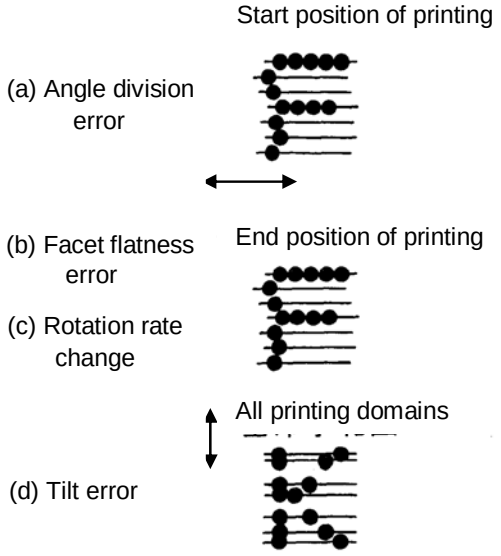


Fig.3-1 Scanning error resulting from a rotational polygon

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。

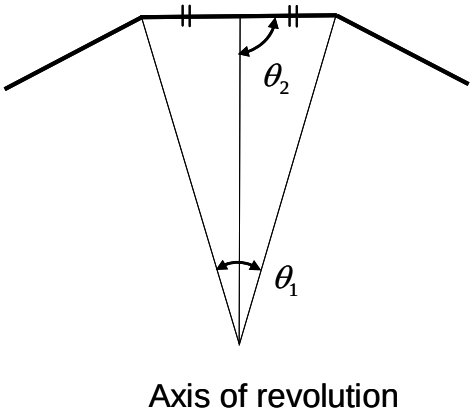


Fig.3-2 Angle division error of rotating polygonal mirror.

（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。

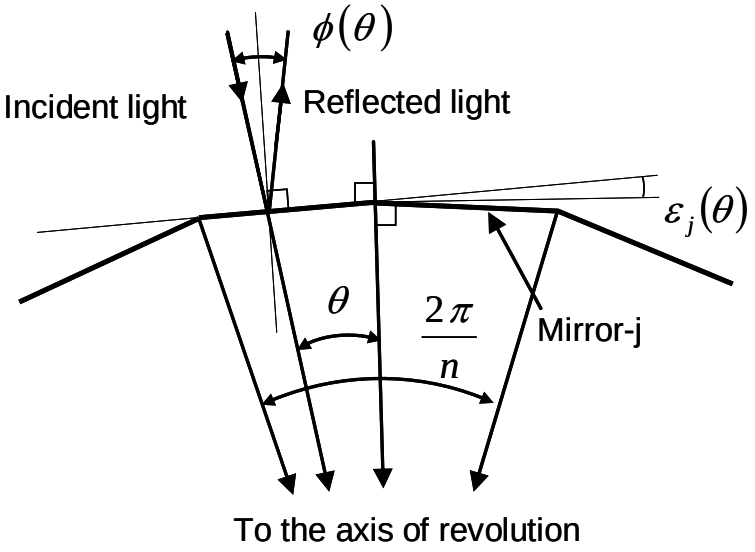


Fig.3-3 Flatness error of rotating polygonal mirror-j

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]。

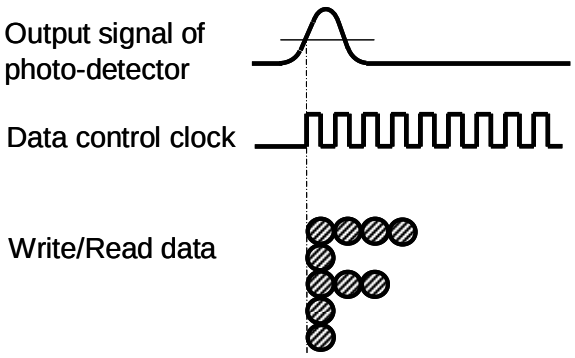


Fig.3-4 Data control clock.

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。

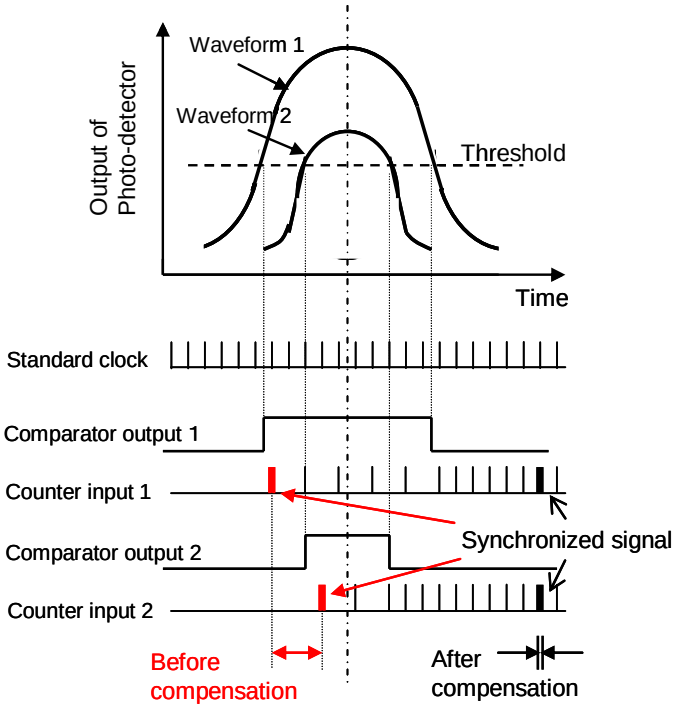


Fig.3-5 Photo-detector output and synchronizes signal

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、$f\theta$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$\theta$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。

$$\phi(\theta) = 2\left\{\theta + \varepsilon_j(\theta)\right\} \qquad (3\text{-}1)$$

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$\delta_j(\theta)$を計算した。$j$=1～6 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。

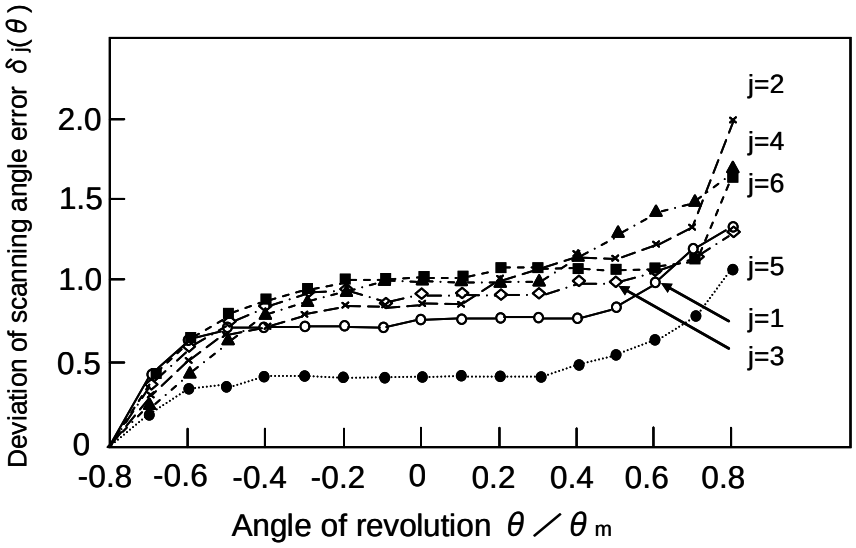


Fig.3-6 Deviation of scanning angle error of each mirror from those at the starting point.

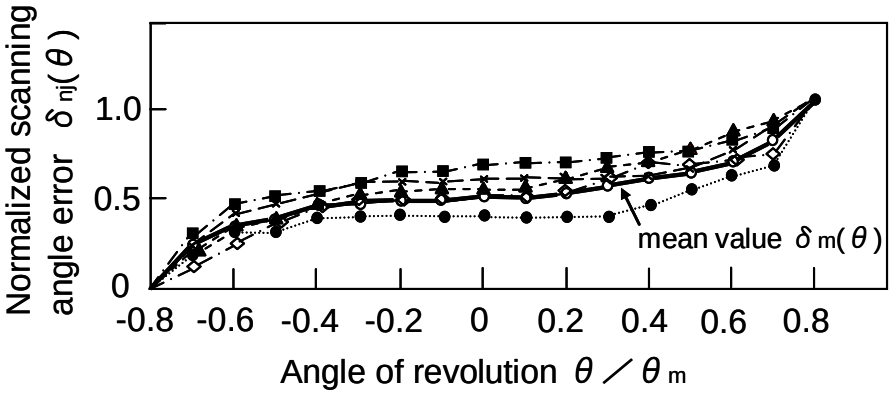


Fig.3-7 Normalized scanning angle error.

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_t および分散 σ_t は、

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

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_j^{\ 2} + \sigma_{j+1}^{\ 2}} \qquad (3\text{-}3)$$

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 $\sqrt{2}$ 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

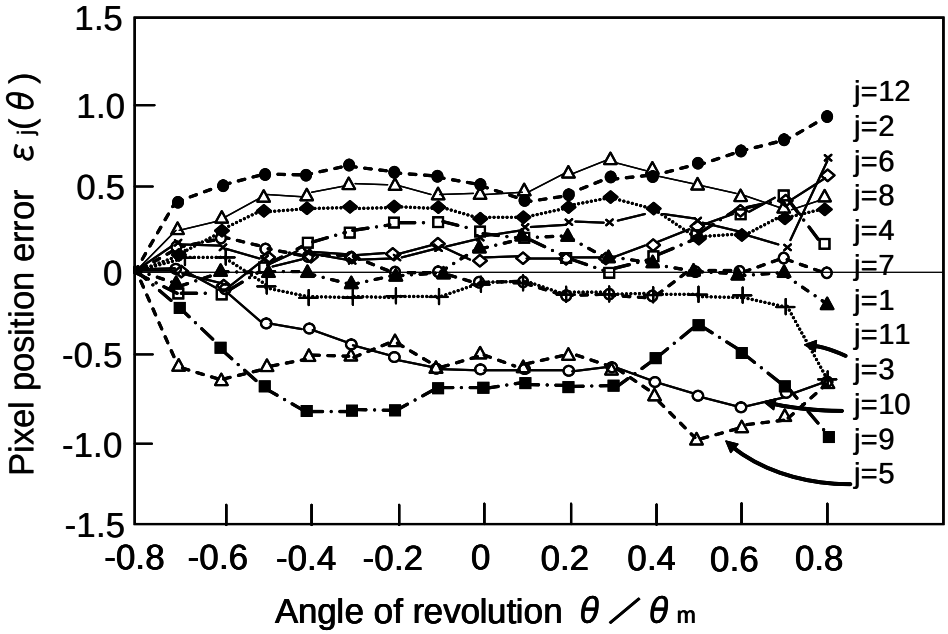


Fig.3-8 Error of pixel position.

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$\varepsilon_{cj}(\theta)$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。

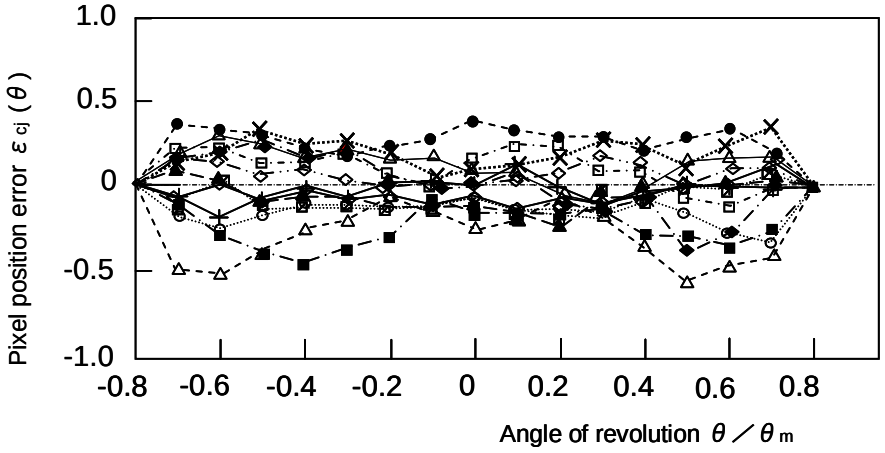


Fig.3-9 Error of pixel position correction with function $\delta_m(\theta)$

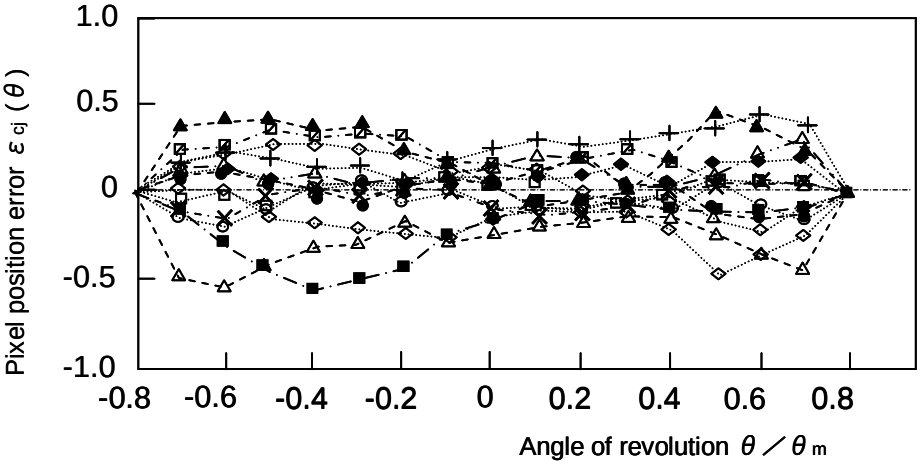


Fig.3-10 Error of pixel position correction with linear function.

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$\varepsilon_{cj}(\theta)$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$\phi_j(t)$を

$$\phi_j(t) = \omega_0 \cdot t + d_j \cdot f_c(\omega_0 t) \qquad (3\text{-}4)$$

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

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

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_{ji}とすると、

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

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、

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

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$f_c\{\omega_0(i/N_0)t_G\}/f_c(\omega_0 t_G)$は走査時間の測定値$t_j$に関係しないので、あらかじめ$1\le i\le N_0$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$(1+\varepsilon)\cdot t_j$に変化したとすると、式(3-7)において、t_{ji}の変化Δt_{ji}は

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

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

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

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、

$$\omega_0 \cdot t_0 = \frac{2\pi}{n} \qquad (3\text{-}10)$$

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$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$は、$d \ll 1,\quad k \ll 1$より

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

となる。従って、走査角$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$における画素数$N_0$とすると、任意の走査線間の走査角$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$の差を画素の大きさに換算した値$\Delta\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$は、$m$を任意の整数として、

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

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

となり、$m \ll n/(2\pi k)$の時には、

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

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

となる。

式(3-13)の近似条件$m \ll 191$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$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$の変化は、式(3-12)より9画素以下であり、走査角$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$の変化の周期は、式(3-12)より、

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

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

となる。すなわち、回転数変動による走査角$\theta_{\eta \cdot t_0}(t)$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　　$f\theta$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)　$f\theta$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、

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

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、

$$\left| e_q \right| < {T_G/k}\Big/{T_G} = \frac{1}{k} \qquad (3\text{-}16)$$

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_G は、すべての鏡面の走査時間 t_j ($j=1, 2, \cdots, n$)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。

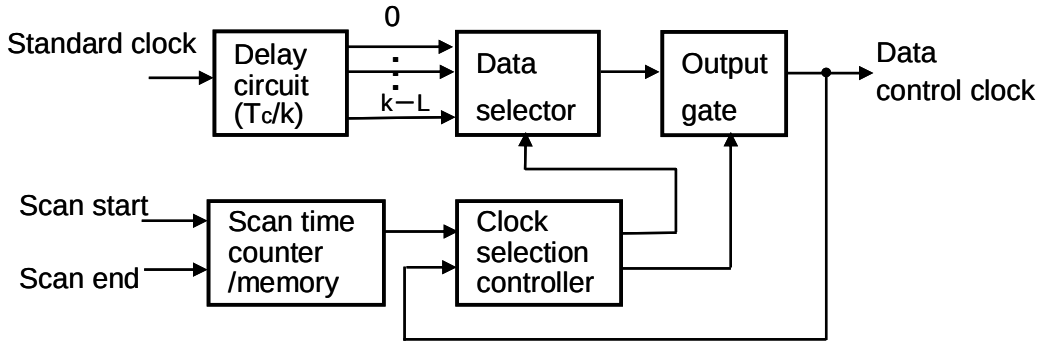


Fig.3-11 Block diagram of flatness error correction circuit.

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、$f\theta$光学系なしの場合には、結像光学系の焦点距離が$f\theta$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、$f\theta$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、$f\theta$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。

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 $\sec^2 15.9° \cong 1.08$ 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。

Table 3-1 Main specifications of the laser printer

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 angle	±24.6°（with $f\theta$ optics）
	±16.9°（without $f\theta$ optics）

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

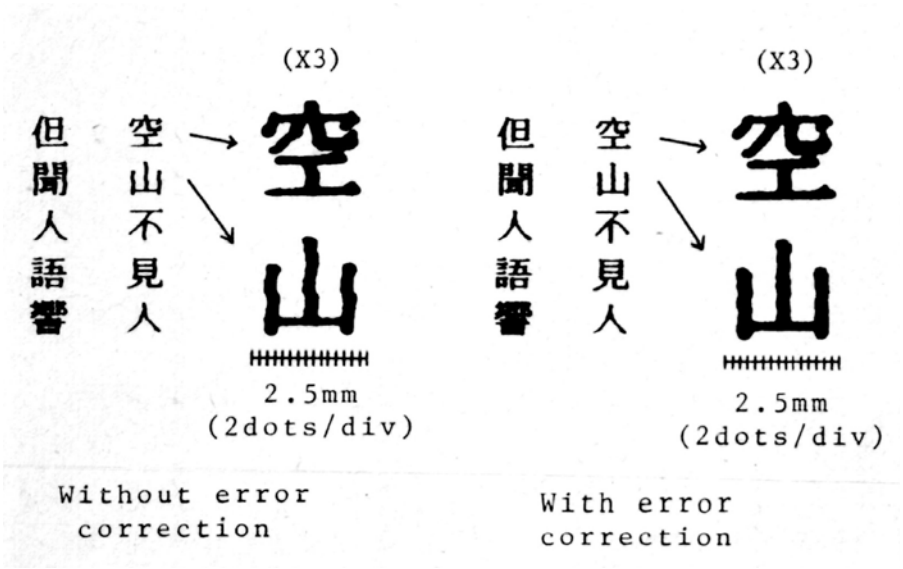


Fig.3-12 Printing samples of facet flatness error correction

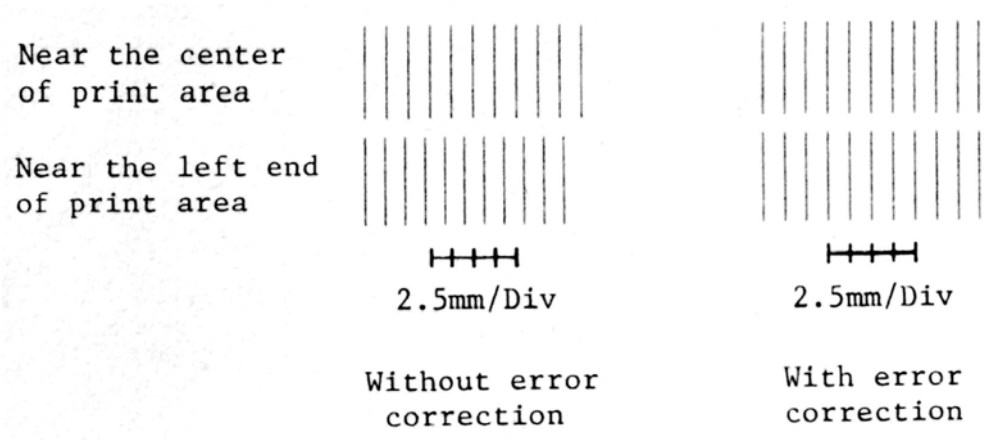


Fig.3-13 Printing samples of scanning velocity error correction

(without $f\theta$ optics. θ=15.9°)

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$0.1\mu m$ 、横 $10\mu m$ 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)。

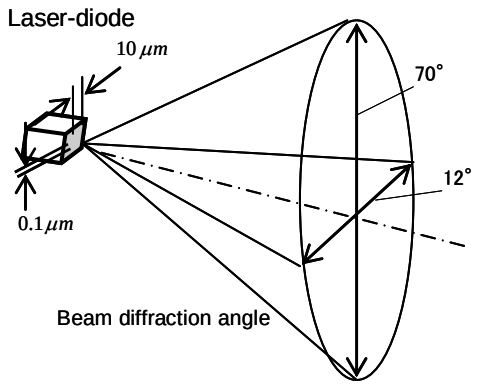


Fig.4-1 Laser diode (LD)

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 $f\theta$ 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、

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

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 $+\Delta_1$ 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、

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

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 $+\Delta_1$ が１μm 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

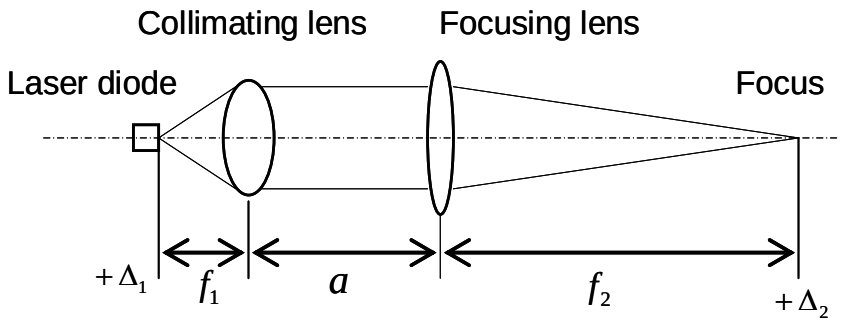


Fig.4-2 Relationship of optical components

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、

$$\Delta = \ell_3 \cdot k_3 - \ell_1 \cdot k_1 - \ell_2 \cdot k_2 \qquad (4\text{-}3)$$

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 0.1μm 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。

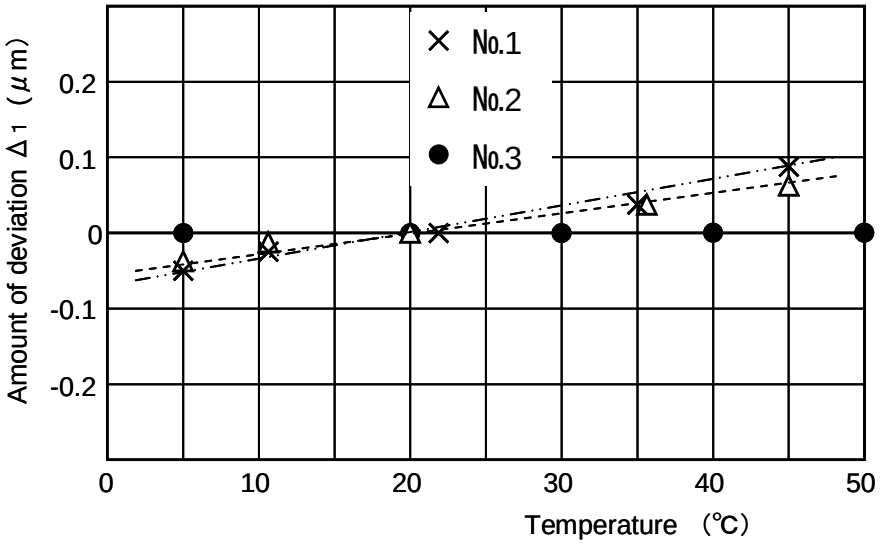


Fig.4-3 Temperature characteristic of LD module

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、$32\phi \times 41\,mm$ 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、10μm 以下、z 軸方向に対して 0.5μm 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$350\,kg$ 、連続$200\,kg$ ）、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。

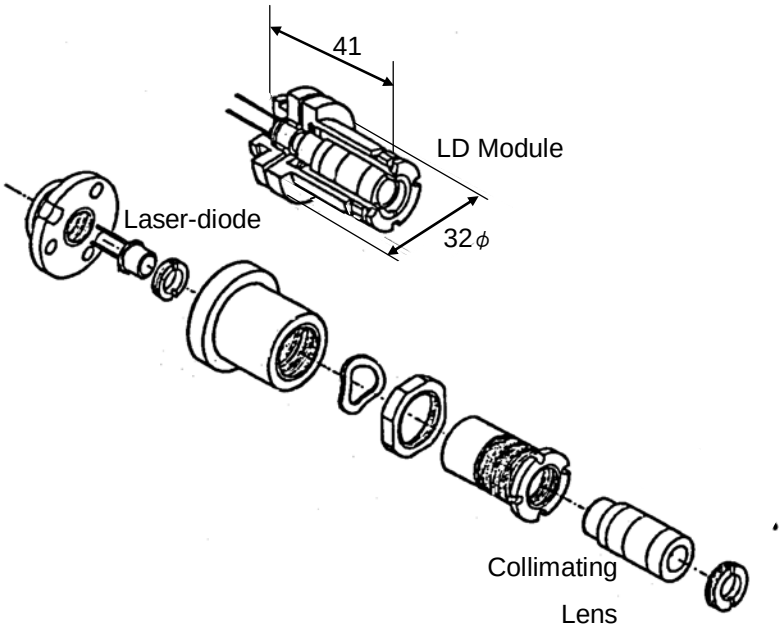


Fig.4-4 Components & parts of LD module

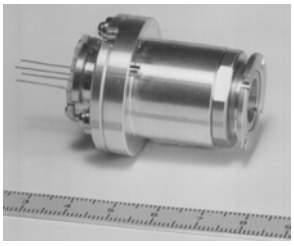


Fig.4-5 LD module

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：3 mW 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：32φ×41 mm

（５）重さ：135 g

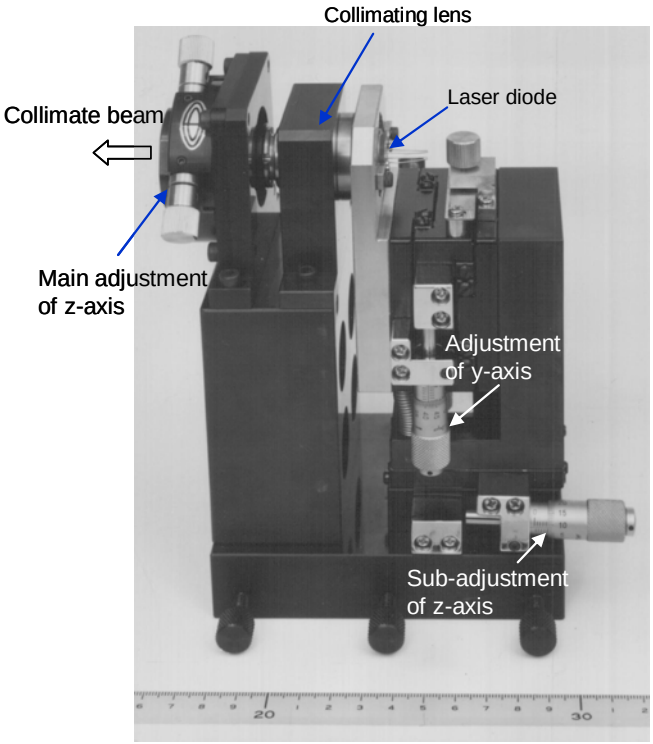


Fig.4-6 Adjustment equipment of LD module

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。

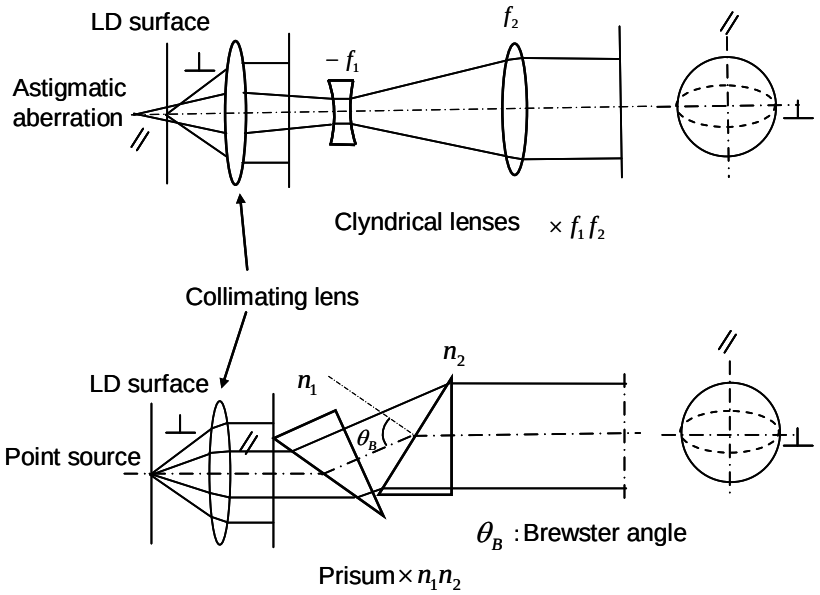


Fig.4-7 Beam shaping method

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η=（走査効率ε）×（光効率ζ）で決まり、相互の関係は、式(4-4)で表される。

$$P = \frac{\xi \cdot W \cdot V}{\eta} \qquad (4\text{-}4)$$

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／㎜）、横δ_h（画素／㎜）、走査効率εとして、

$$f_m = W \cdot V \cdot \delta v \cdot \frac{\delta_h}{\varepsilon} \qquad (4\text{-}5)$$

である。例えば、記録幅$300\,mm$、記録速度$500\,mm/s$、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$21\,MHz$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、

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

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。

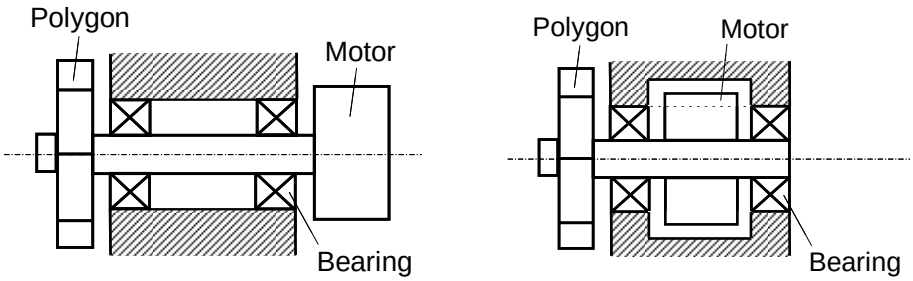
４．３．１　　回転多面鏡の小型化の研究

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



(a) Outside equipment　　(b) Built-in type

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

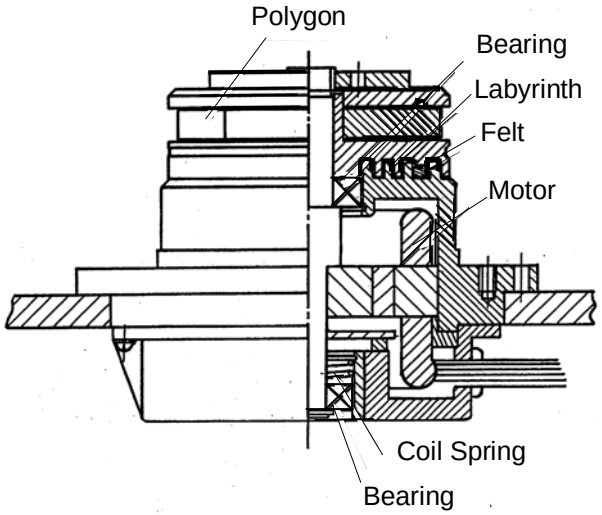


Fig.4-9 Composition figure of a polygonal mirror

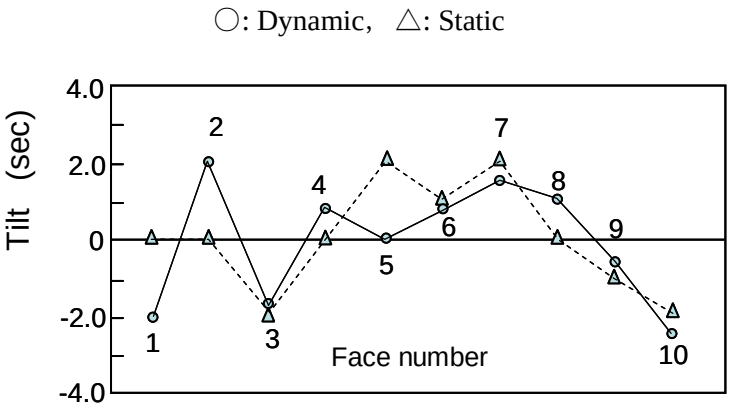


Fig.4-10 Tilt angle of polygonal mirror

加工するセルフ研磨を行い、振れを 0.5μm にできた。また、回転時バランスは 2$g\,mm$ の目標に対して、 0.5$g\,mm$ 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 BK７）の内接円径 80μm^{ϕ}、厚さ 10mm 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 $f\theta$ 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 $f\theta$ レンズについて検討した。

Fig.4-11 Photograph of polygonal mirror

まず、新たな $f\theta$ 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、$f\theta$ 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。

$$（評価関数\Phi）= \sum\left\{(重み)\times\left\{(収差)-(目標値)\right\}^2\right\}=$$

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

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 r_1 ～ r_6、第 1 ～ 第 3 レンズの屈折率を n_1 ～ n_3、光軸上の中心厚、間隔を d_1 ～ d_6、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 d_{00} とする。

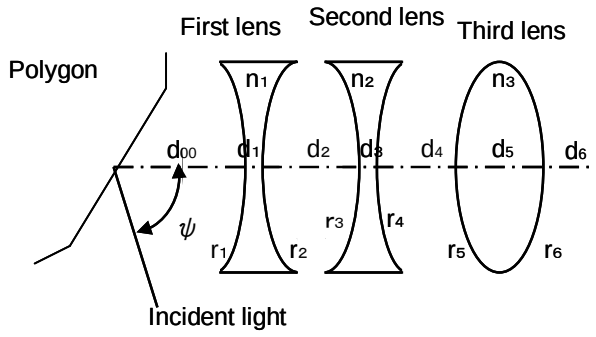


Fig.4-12 Lens parameters

この凹凹凸 3 枚構成の $f\theta$ レンズを、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 40 mm 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 μm 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。

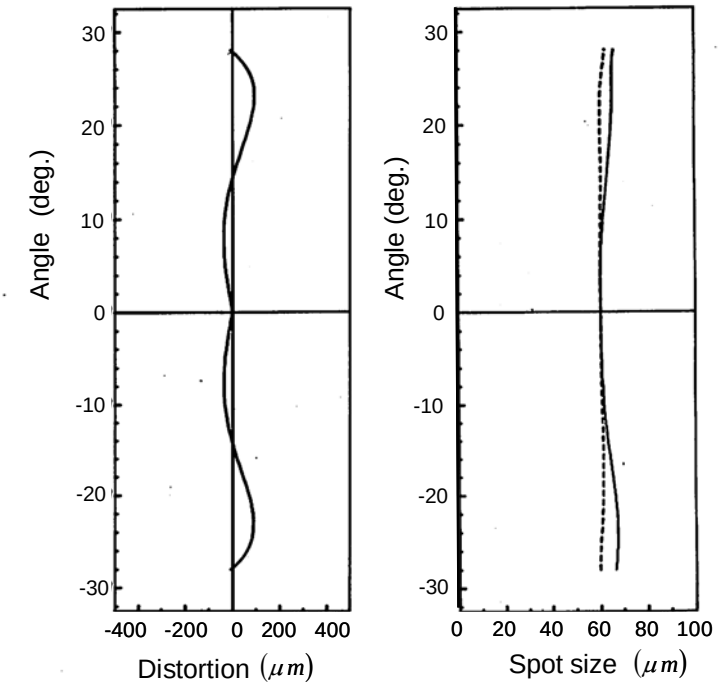


Fig.4-13 Aberration curves of $f\theta$ lens

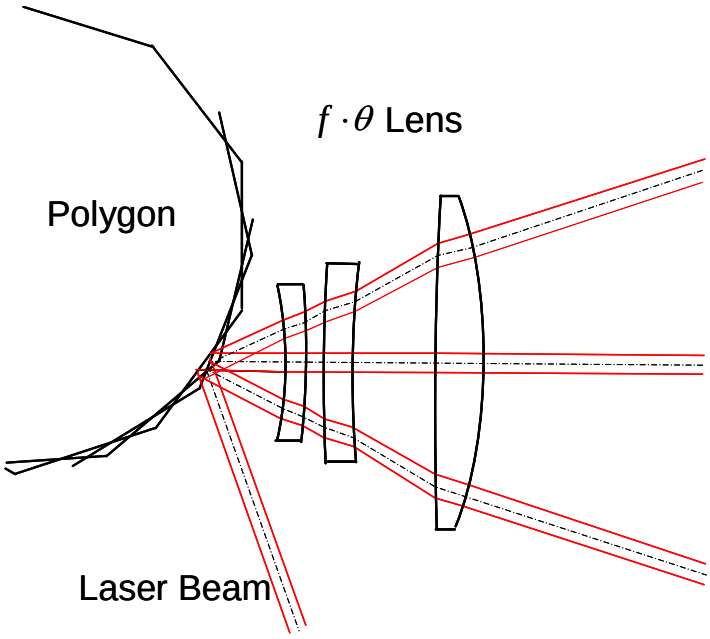


Fig.4-14 Composition of the $f\theta$ lens

本凹凹凸 $f\theta$ 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 $63\mu m\left(1/e^2\right)$ 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。

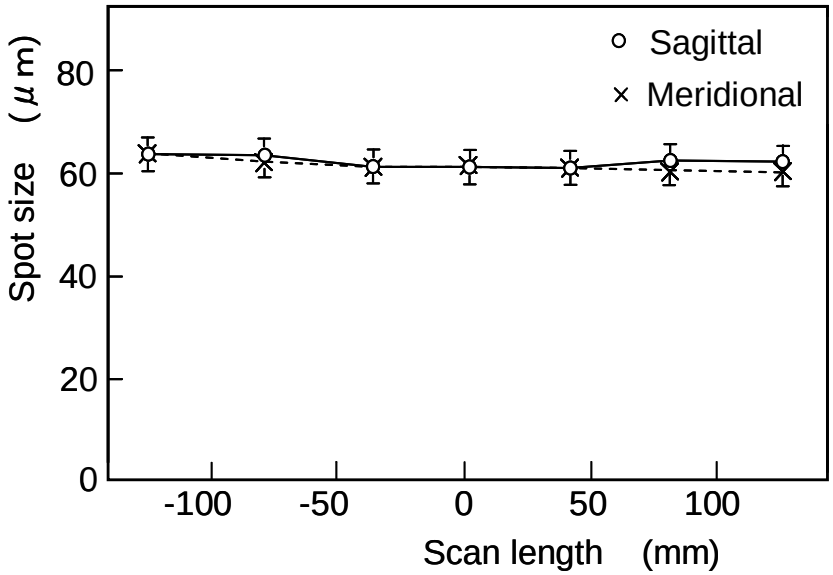


Fig.4-15 Experimental results of beam spot sizes

４．３．３　走査光学系の小型化の提案

LD モジュール、$f\theta$ レンズと、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、$f\theta$ レンズ取り付けネジ穴を配置し、予め調整した LD モジュールと $f\theta$ レンズ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、$^{W}142\times{}^{L}165\times{}^{H}131\,mm$ 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 $f\theta$ 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。

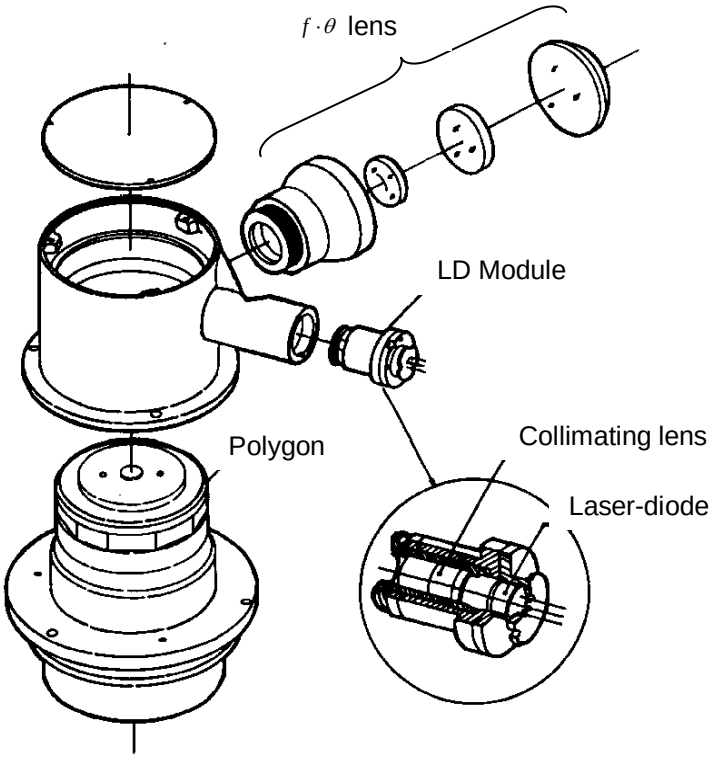


Fig.4-16 Laser diode scanning unit

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。

Table 4-1　LD scanning unit specifications

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

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

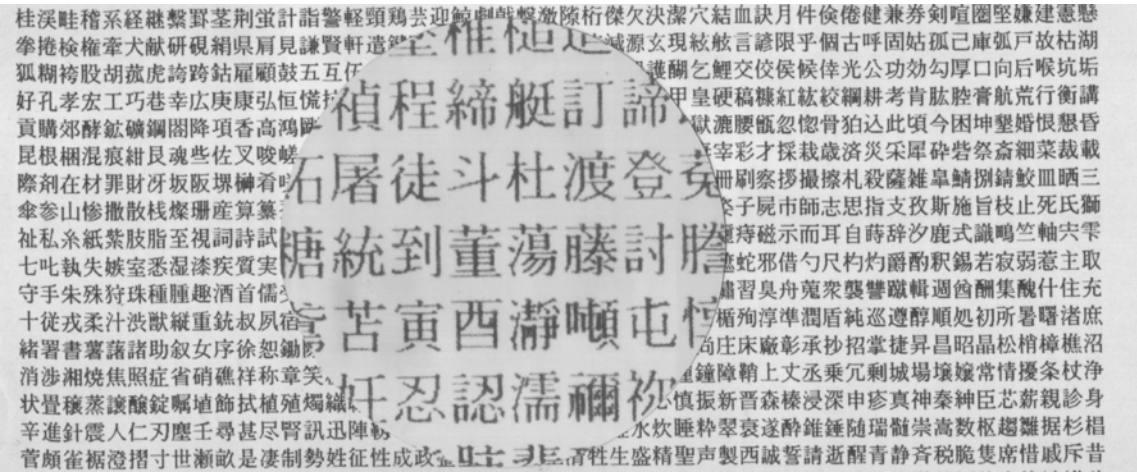
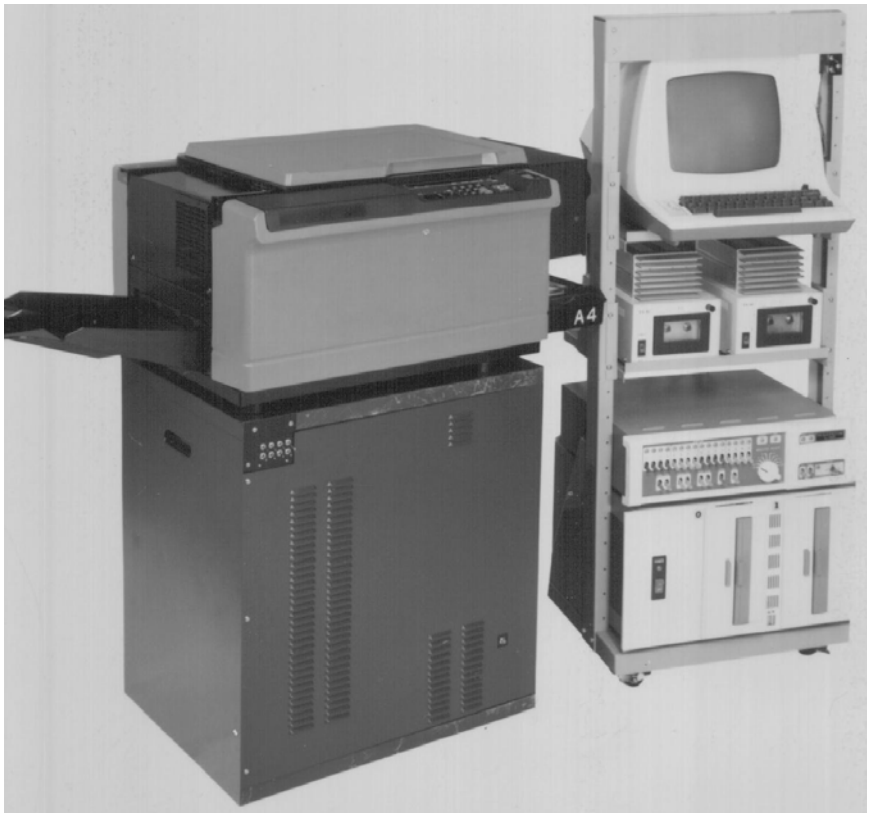


Fig.4-18 Printing sample

(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、

$$d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f \cdot \lambda}{d_c} \qquad (4\text{-}8)$$

ただし、ビーム径は $1/e^2$ 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 $4/\pi$ 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 $55\mu m$（$1/e^2$）で一定とし、副走査方向ビーム径は、$f\theta$ レンズに入射するコリメートビーム径を変化させて、$138, 150, 170, 190, 210, 230\ \mu m$ とした。印字サンプルでは、走査ビーム径が $190\mu m$ 以上に印字線幅の細りが目立った。

一方、$150\mu m$ 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、～ $170\mu m$ 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。

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

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。

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

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

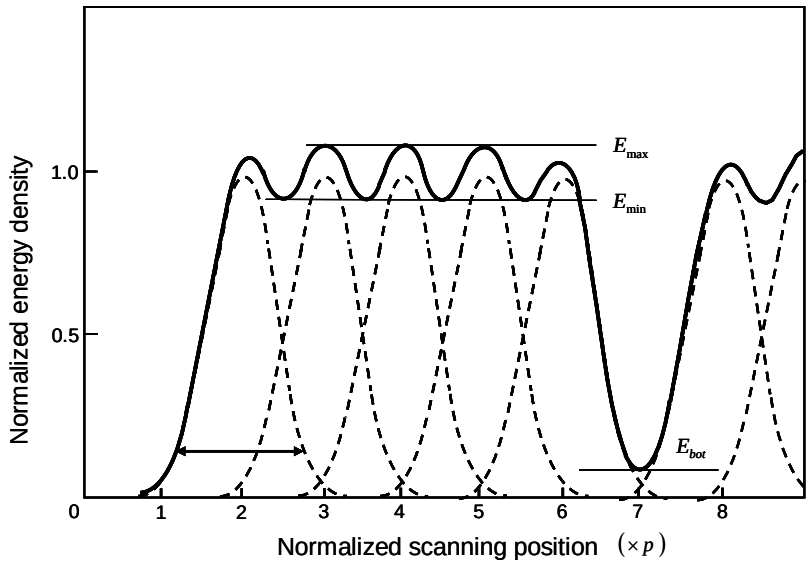


Fig.4-20 Distribution of exposed energy

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、$f\theta$ 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]。

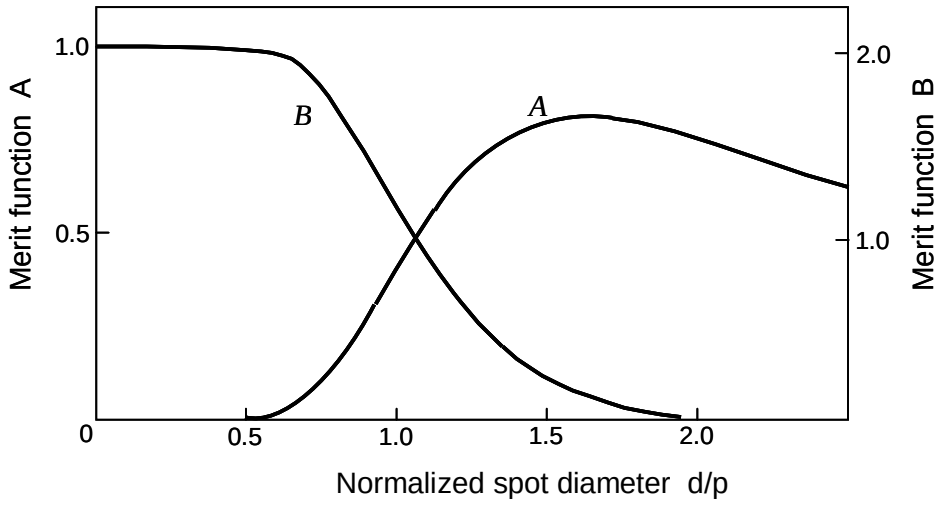


Fig.4-21 Merit function for beam spot diameter optimization

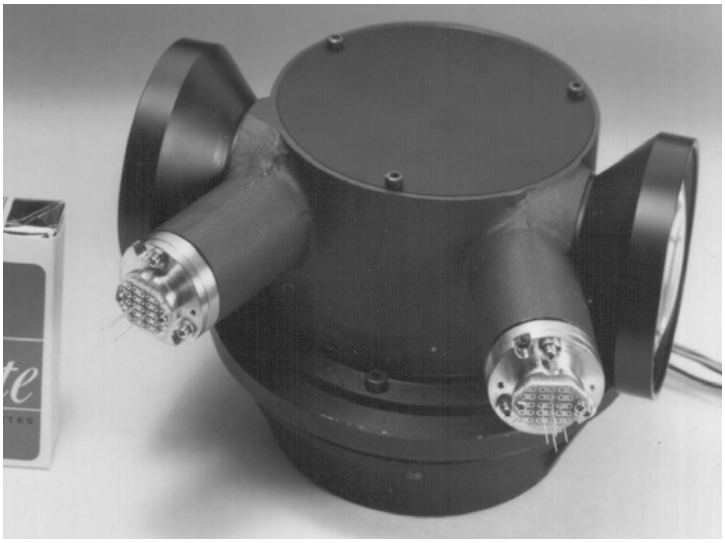


Fig.4-22 Double LD beam scanning system

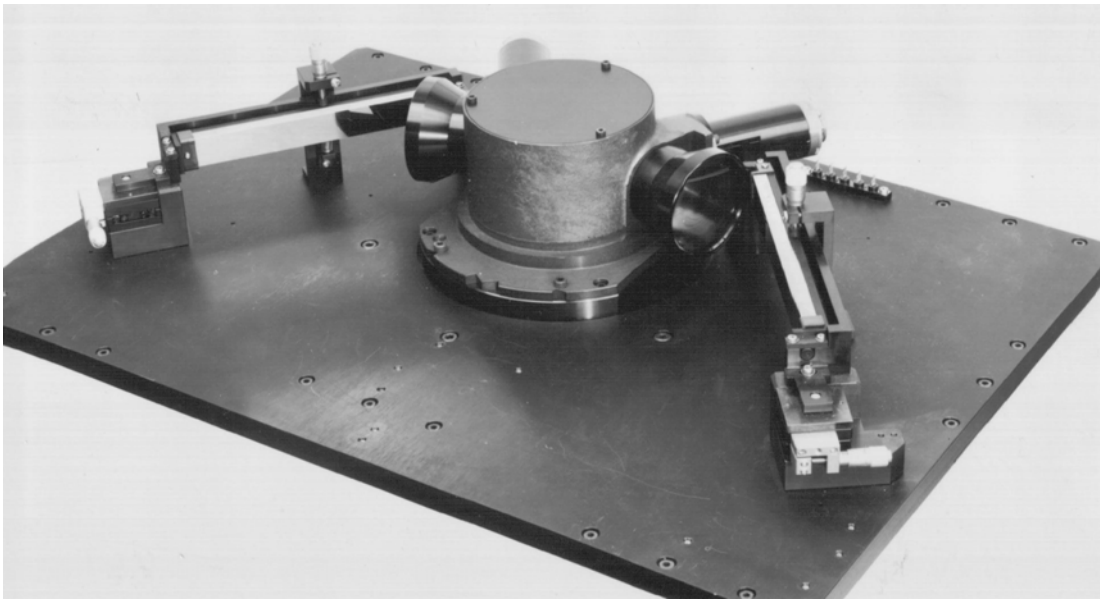


Fig.4-23 Experimental proto type

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。

$f\theta$ レンズは焦点距離 351mm、走査角±21°以内で、像面彎曲が、-0.5～+0.2 ㎜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 80μｍ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、$f\theta$ 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。

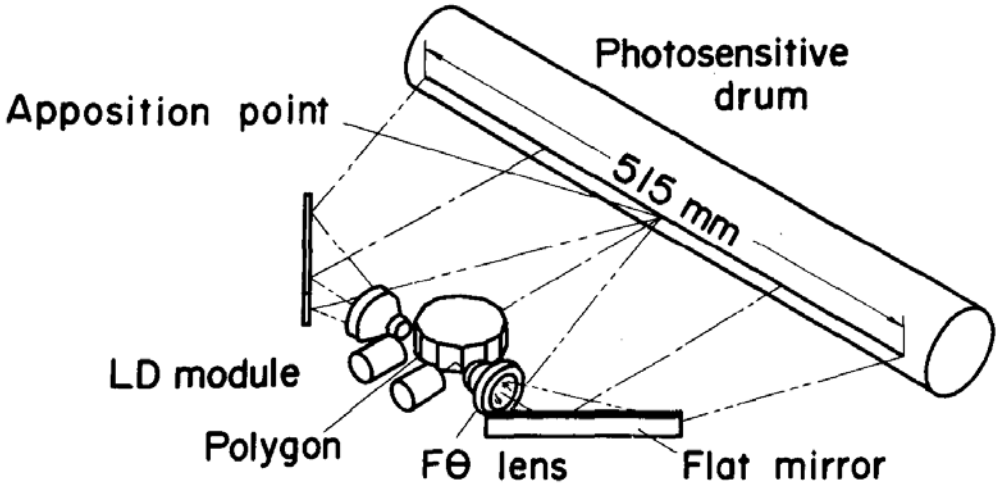


Fig.4-24 System configuration of double LD beam scanning system

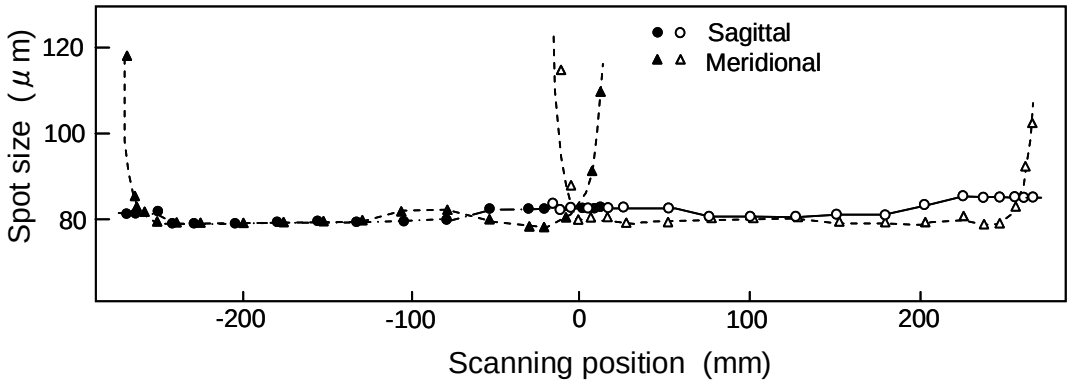


Fig.4-25 Beam spot diameters

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 $f\theta$ 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。）

Table 5-1 Comparison of touch-panel technologies

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

$$y = x \cdot \tan\alpha \qquad (5\text{-}1)$$

$$y = (x - L) \cdot \tan(\pi - \beta) \qquad (5\text{-}2)$$

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

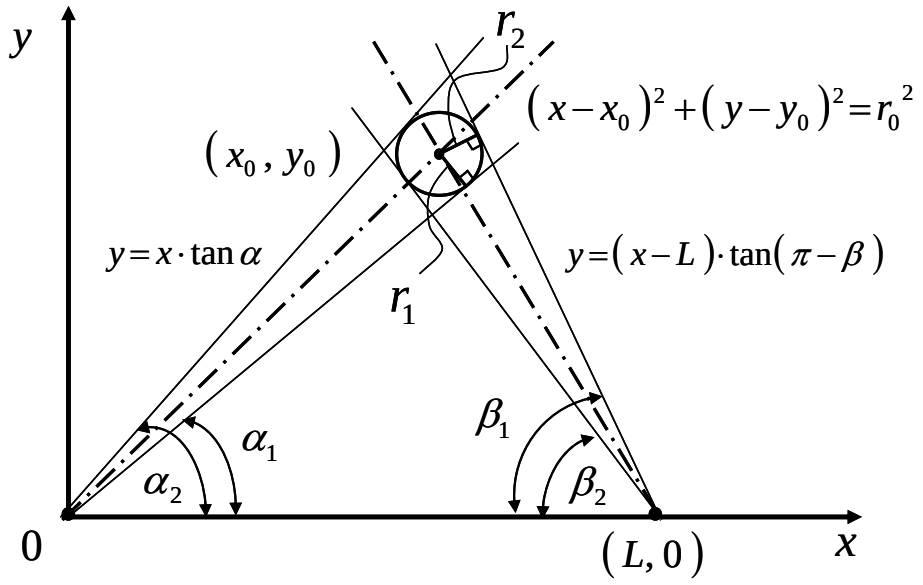


Fig.5-1 Principle of a triangulation method

$$x_0 = L \cdot \frac{\tan\beta_0}{\tan\alpha_0 + \tan\beta_0} \qquad (5\text{-}3)$$

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

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \qquad (5\text{-}5)$$

$$\beta_0 = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \qquad (5\text{-}6)$$

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。

$$r_1 = \left| x_0 \cdot \sin\alpha_1 - y_0 \cdot \cos\alpha_1 \right| \qquad (5\text{-}7)$$

$$r_2 = \left| (x_0 - L) \cdot \sin\beta_1 + y_0 \cdot \cos\beta_1 \right| \qquad (5\text{-}8)$$

$$r_0 = \frac{r_1 + r_2}{2} \qquad (5\text{-}9)$$

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。

$$d(z) = d_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \qquad (5\text{-}10)$$

ただし、 $$z_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{{d_0}^2}{\lambda} \qquad (5\text{-}11)$$

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 350mm 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 655nm とすると、表示エリア内でのビーム径は1.04mm 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1.0mm 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。

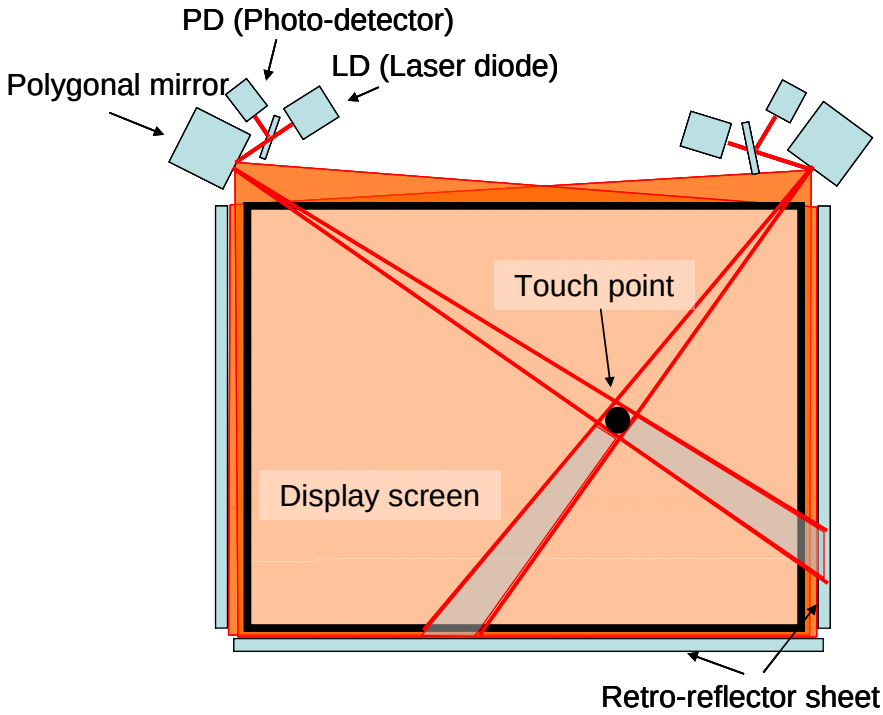


Fig.5-2 Composition of touch panel system

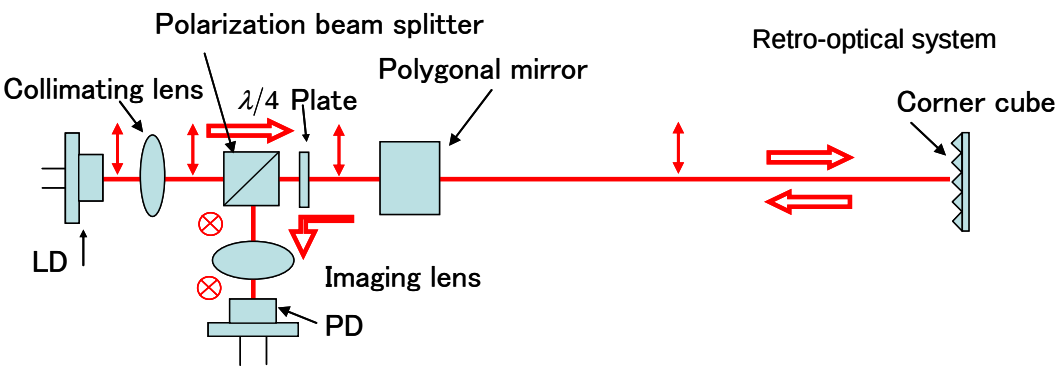


Fig.5-3 Polarization separation optical system

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。

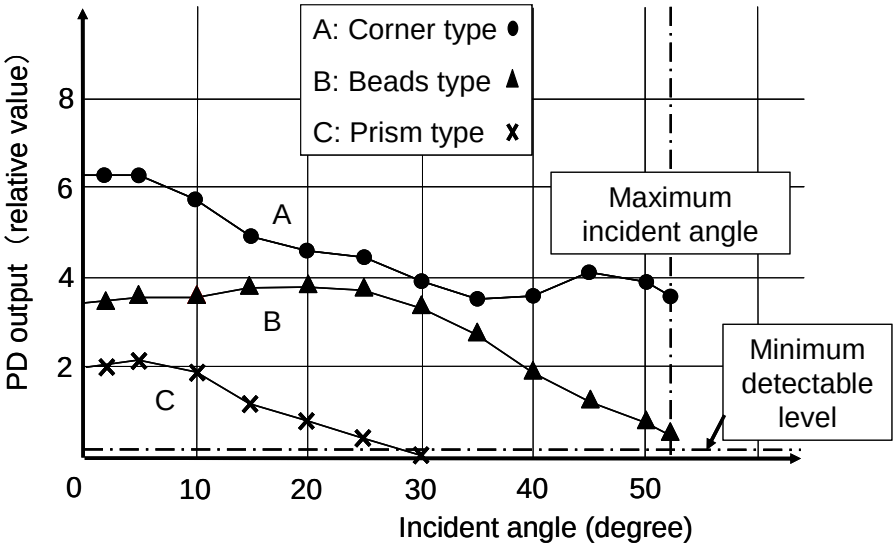


Fig.5-4 Characteristics of retro-reflectors

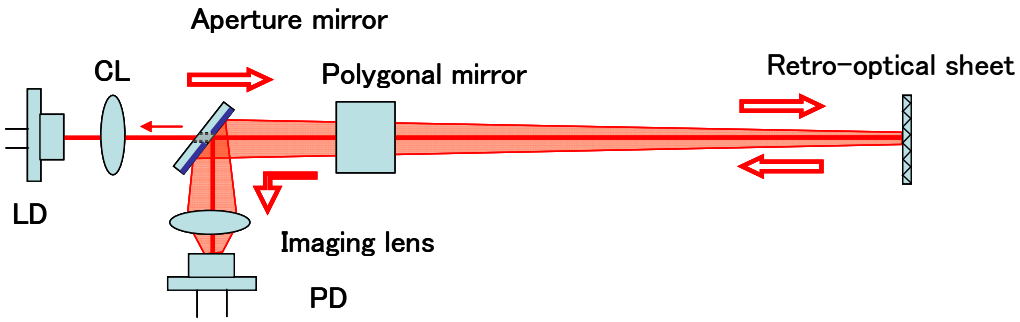


Fig.5-5 Detection optical system of retro-reflector.

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（$300\mu m^{\phi}$）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 $\lambda/4$ 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、$1.0\,mm^{\phi}$ のアパーチャ（開口）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 ㎜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 $1.0\,mm^{\phi}$ 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。

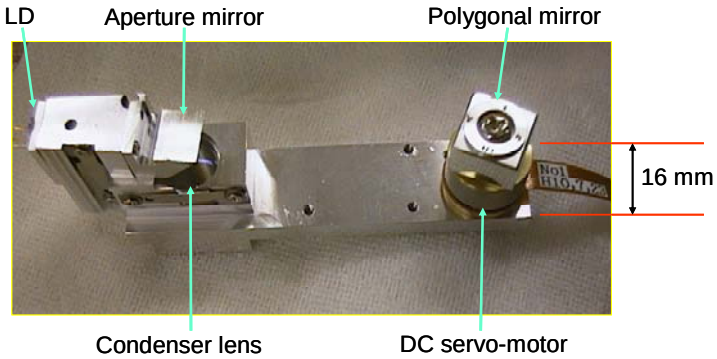


Fig.5-6 Optical system of scanning beam detection

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（ϕ14）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。

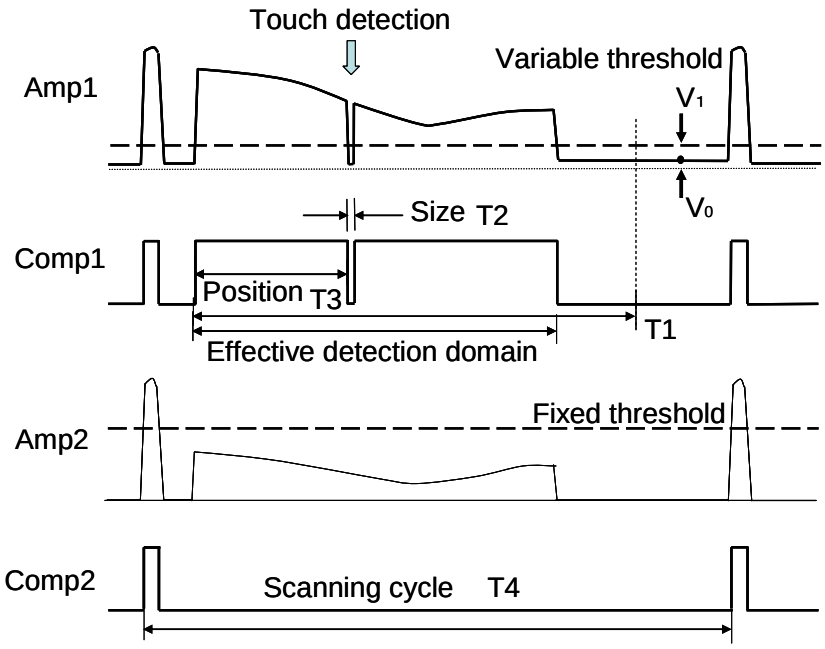


Fig. 5-7 Signal processing timing chart

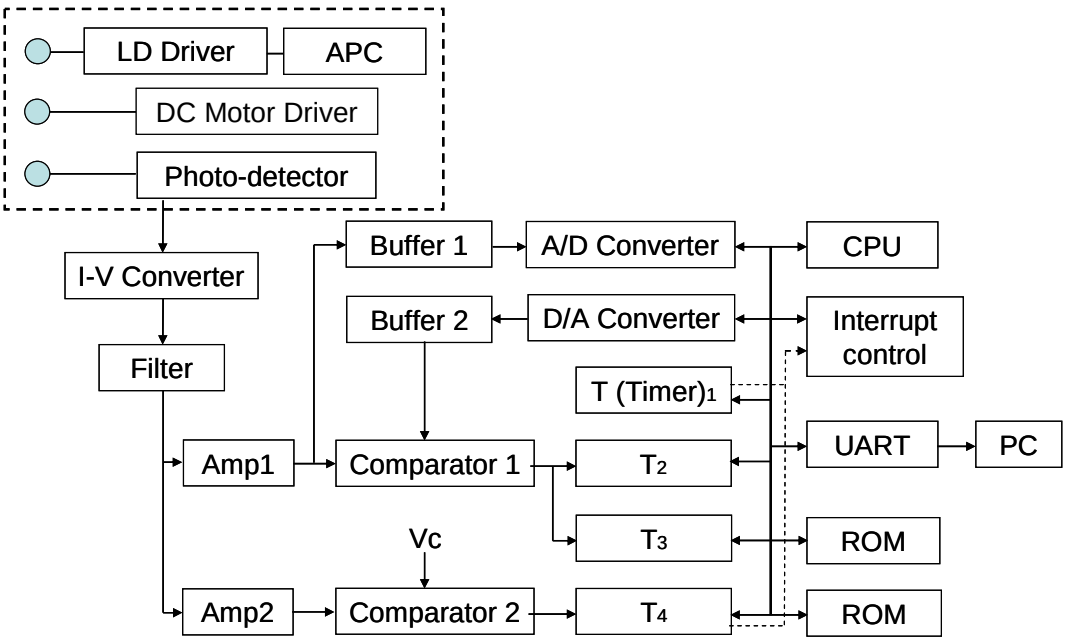


Fig.5-8 Block diagram of circuit function

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。

$$T_N{}' = T_N \cdot \frac{T_0}{T_4} \qquad (5\text{-}12)$$

$T_N{}'$ ：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。

$$\theta_N = \omega \cdot \Delta t \cdot T_N{}' \qquad (5\text{-}13)$$

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。

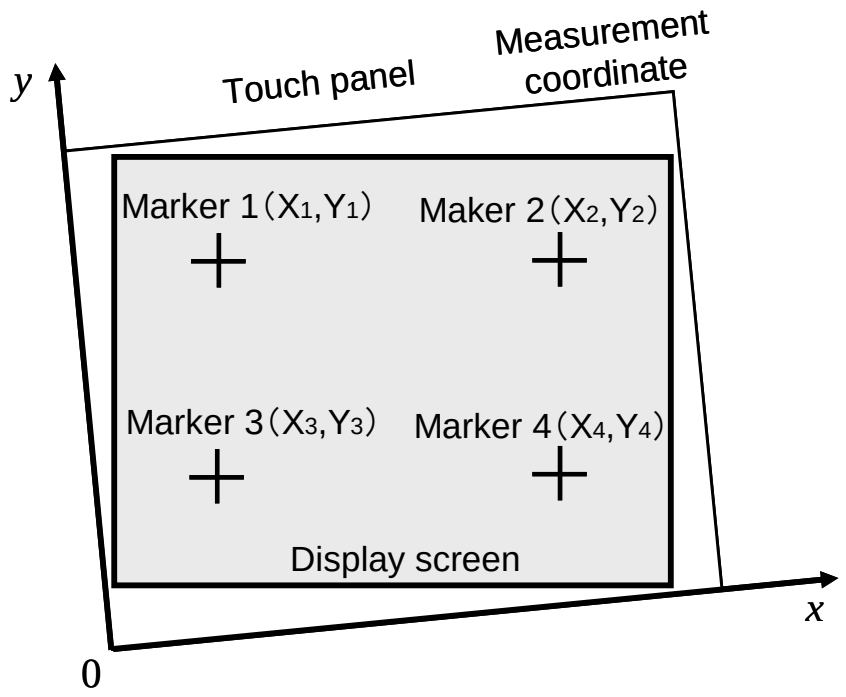


Fig.5-9 Coordinate conversion method

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。

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

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 $2mm^{\phi}$ 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、 $\pm 0.2mm$ 以下を実現した。

また、タッチ物のサイズ検出評価は、直径 $2.5mm^{\phi}$ から $100mm^{\phi}$ 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 $\pm 1.0mm$ 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。

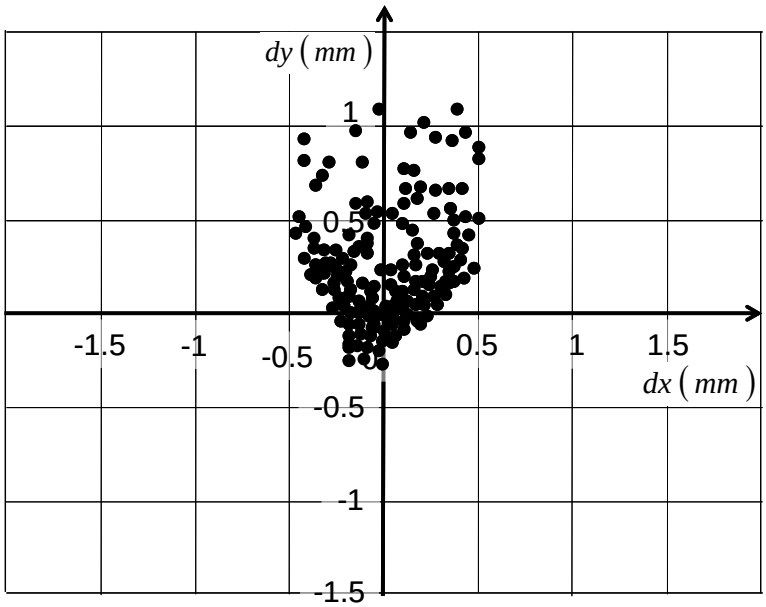


Fig.5-10 Detection error of touch position

(In noisy condition)

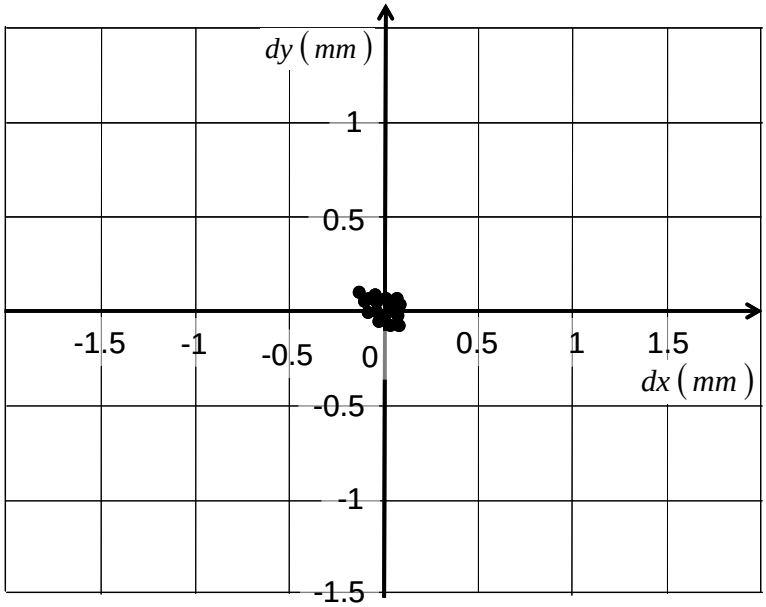


Fig.5-11 Detection error of touch position

(After the measure against a noise)

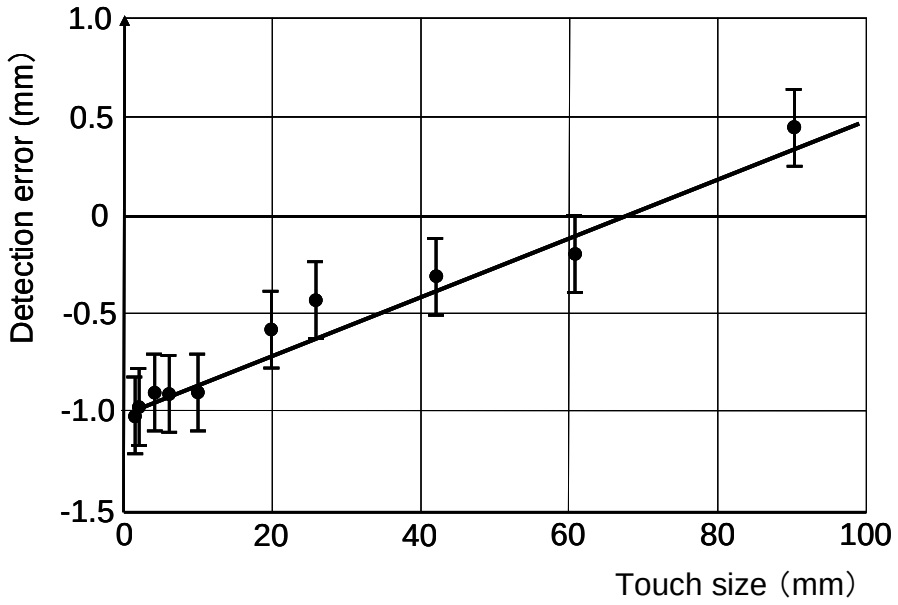


Fig.5-12 Detection error of touch size

Table 5-2 Touch panel specifications

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 = 655nm）

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。

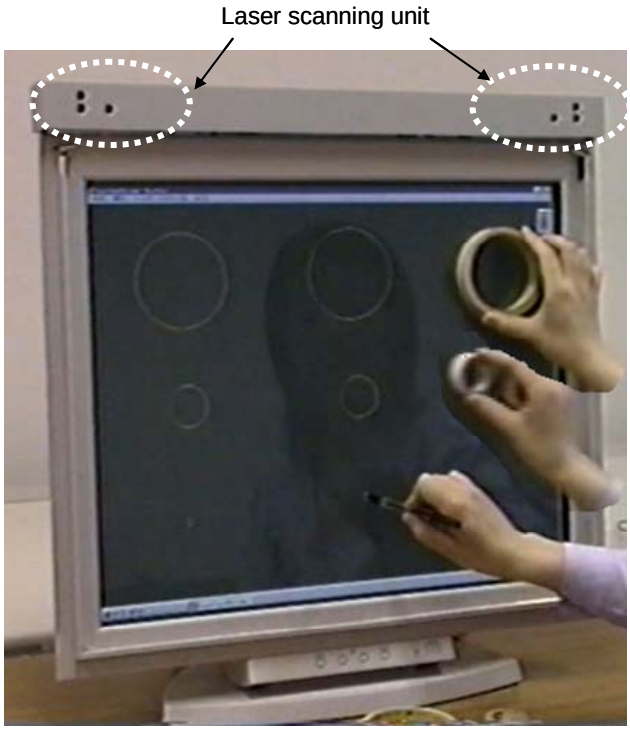


Fig.5-13 Photograph of the touch-size detection

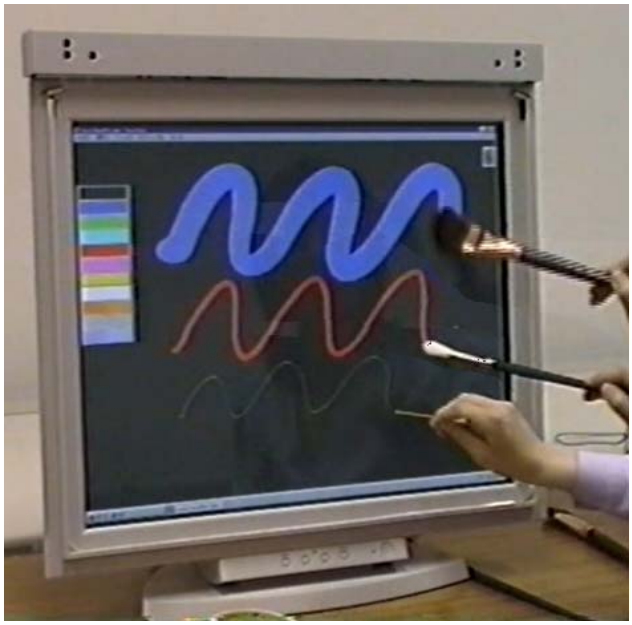


Fig.5-14 Photograph of the size-detection operation

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

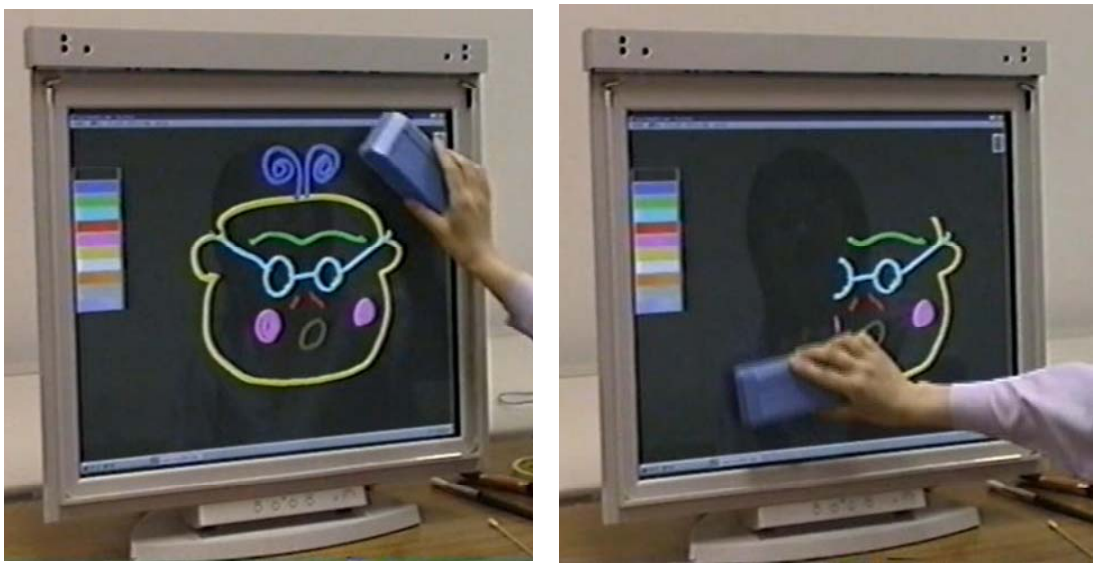


Fig.5-15 Additional function of an eraser

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、$\pm 0.2\,mm$ 以下の位置精度、最小検出サイズ $2\,mm$ と、$100\,mm$ サイズに至る検出精度 $\pm 0.2\,mm$ 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 $1/\cos^2\theta$ 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 $0.1\mu m$ 横 $10\mu m$ 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 $f\theta$ 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、複写機能とプリンタ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

(1) 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).

(5) 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、”$f\cdot\theta$ 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］

1. 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).
2. 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).
3. 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).
4. 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]

1. 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).
2. 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).
3. 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).
6. 三上知久, 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).
7. 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).
2. 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).
5. 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).

10. 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).
18. 二俣彰男, 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).
19. 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).
8. 「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).
10. 「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).