



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	正立等倍像を形成するレンズアレイの開発
Author(s)	山村, 明宏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14428号
Issue Date	2021-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14428
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81188
Type	doctoral thesis
File Information	Akihiro_Yamamura.pdf



博士論文

正立等倍像を形成するレンズアレイの開発

Development of lens array forming erected
and unit magnification image

山村 明宏

Akihiro Yamamura

北海道大学大学院工学院

応用物理学専攻固体量子物理工学講座

固体物理学研究室

Laboratory of Solid-State Physics,
Research Group of Solid-State Physics and Engineering,
Division of Applied Physics,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University

目次

第1章 序論

1.1	電子写真の原理.....	1
1.2	電子写真露光プロセスの技術.....	4
1.3	レンズアレイの光学特性と印刷画像特性.....	6
1.4	本論文の構成	9

第2章 ロッドレンズアレイの解析

2.1	ロッドレンズアレイの諸定数と結像特性	
2.1.1	屈折率分布係数.....	11
2.1.2	レンズ長.....	13
2.1.3	ロッドレンズの外径	17
2.2	ロッドレンズアレイのアライメント精度	
2.2.1	ロッドレンズ光学系の光線追跡	20
2.2.2	物体距離の変化.....	22
2.2.3	ロッドレンズの傾き	24
2.3	ロッドレンズ傾きの測定	
2.3.1	測定方法.....	28
2.3.2	測定結果.....	31
2.3.3	傾いたロッドレンズを含むアレイによる像の強度分布	32
2.4	考察	38

第3章 マイクロレンズアレイの検討

3.1	LED ヘッドの新規光学系の検討	40
3.2	正立等倍像を形成するマイクロレンズアレイの構成	44
3.3	マイクロレンズアレイのアライメント精度	47
3.4	結果と考察	48

第4章	結論.....	51
-----	---------	----

第1章 序論

1.1 電子写真の原理

電子写真と呼ばれる像形成方式には、感光性の絶縁体層の表面に静電気の潜像を形成するゼログラフィー (Xerography) と、光照射と強電場を組み合わせることで光導電性の絶縁材料の内部に分極像を形成する光エレクトレットと、露光されると導電性が増加し露光を中断してもしばらくの間この導電性が持続する光導電性物質を用いて導電性の潜像を形成する方式がある。本論文ではゼログラフィー方式の像形成方式を電子写真と呼ぶこととし、本章ではこの方式の像形成プロセスについて説明する。

電子写真の像形成プロセスは、帯電、露光、現像、転写、定着の5つのプロセスからなる。本研究のレンズアレイは露光プロセスで使用される。電子写真は他の写真技術と異なり、像形成プロセスに化学反応を含まず、像形成プロセスを経て最終的に得られる像そのものを構成する現像剤と現像剤を保持する媒体を除いて各プロセスで使用される要素部材は繰り返し使用することができる。本研究のレンズアレイの研究目的や課題を明確にするため、図 1.1 を用いて電子写真の5つのプロセスを像形成プロセスで行われる順に説明する。

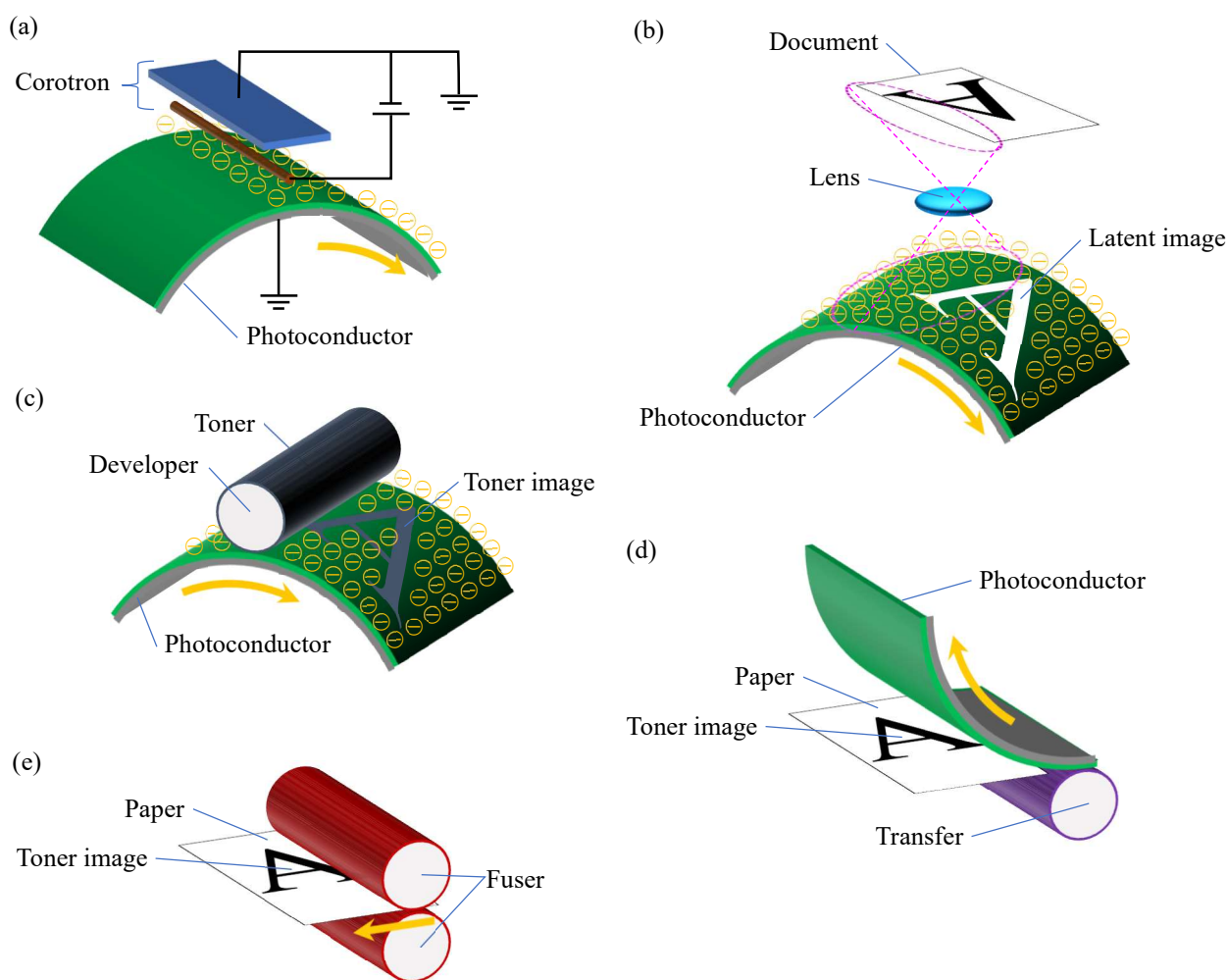


Fig. 1.1 (a) Charging process, (b) exposing process, (c) developing process, (d) transfer process, and (e) fusing process.

(a) 帯電

電子写真の帯電プロセスは感光体を一様に帯電させるプロセスで、光の強度分布を電気的な強度分布に変換し増幅するために必要である。図 1.1 (a)は帯電プロセスの概略図である。電子写真の感光体とは導電性の基材の上に光導電性の絶縁層を形成したもので、周囲の光線を遮光した暗箱の中で感光体をコロナ放電下に曝し電荷を感光体表面に散布することによって帯電プロセスが行われる。電子写真でコロナ放電を促す装置の1つとして、感光体と接地電極の間に高電圧を印可した導電線を感光体と平行になるように張ったコロトロンがある。感光体は今日ではほとんどが円筒形もしくはループ状のベルト形状となっており、感光体を回転させることで、感光体の一様に帯電した領域が、次の露光プロセスへ移動するようになっている。

(b) 露光

電子写真の露光プロセスは光の強度分布を電気的な強度分布に変換し静電気の潜像である静電潜像を形成する。図 1.1 (b)は露光プロセスの概略図である。周囲の光線を遮光した暗箱の中で感光体の帯電した領域を原稿の画像からの反射光もしくは透過光で露光し、感光体の光導電性の絶縁層に画像に応じた導電性の分布を形成し、感光体表面に静電気の像を形成する。感光体を回転させることで静電潜像が形成された領域が次の現像プロセスへ移動する。本研究のレンズアレイも含め、露光プロセスで用いられる技術や部材については次節で説明する。

(c) 現像

電子写真の現像プロセスは帯電した現像剤を感光体表面の静電潜像に付着させ、原稿の画像に応じた現像剤の像を感光体表面に形成する。図 1.1 (c)は現像プロセスの概略図である。電子写真では、トナーと呼ばれる像形成プロセスを経て得られる像を構成する着色微粒子を単独で現像剤として用いる方式と、キャリアと呼ばれる微粒子と混合して用いる方式があり、前者を1成分現像方式、後者を2成分現像方式と呼んでいる。現像剤を感光体表面の静電潜像の付近に供給する装置を現像器と呼び、1成分現像方式においては、トナーはトナーどうしや現像器を構成する部材との接触と摩擦によって帯電し、2成分現像方式においては、トナーとキャリアの接触と摩擦によって帯電する。感光体を回転させることで現像剤の像が形成された領域が次の転写プロセスへ移動する。

(d) 転写

電子写真の転写プロセスは現像プロセスで感光体表面に形成された現像剤の像を用紙等の媒体へ移動する。図 1.1 (d)は転写プロセスの概略図である。感光体表面に形成された現像剤の像は帯電していることから、感光体表面に近づけた媒体の感光体とは反対側の面をコロナ放電下に曝して一様に帯電させ、媒体と感光体との間に電場を形成し、電場中の帯電している現像剤の像に発生するクーロン力により、現像剤の像を媒体に移動する。現像剤の像を転写した媒体を移動することにより次の定着プロセスに移行する。

(e) 定着

電子写真の定着プロセスは媒体の表面にある現像剤の像を熱で溶融して媒体に融着させ、媒体が常温に冷却されることによって現像剤が固化して媒体表面に定着する。図 1.1 (e)は定着プロセスの概略図である。定着プロセスが機能するために、現像剤は一定温度以上で溶融状態になる樹脂等により構成され、定着プロセスを構成する装置は現像剤が溶融する温度に媒体の温度を制御する。

次に電子写真による像形成プロセスのカラー化について述べる。電子写真のカラー化は上述の像形成プロセスを複数回動作させるものであり、各回の像形成プロセスで異なる色のトナーからなる現像剤を使用し、

各色を用いて形成した画像を重ね合わせると元の画像に一致するように、色分割した画像を各回の像形成プロセスで形成する。カラー電子写真プロセスの代表的な方式は、4 サイクル方式、タンデム方式、感光体上重ね合わせ方式の3つであるが、いずれの方式においても、複数回行われる像形成プロセスの露光プロセスで使用される光の波長は同一で、露光プロセスで複数波長の光源を使用することはない。図 1.2 を用いてこれら3つのカラー電子写真プロセスを説明する。

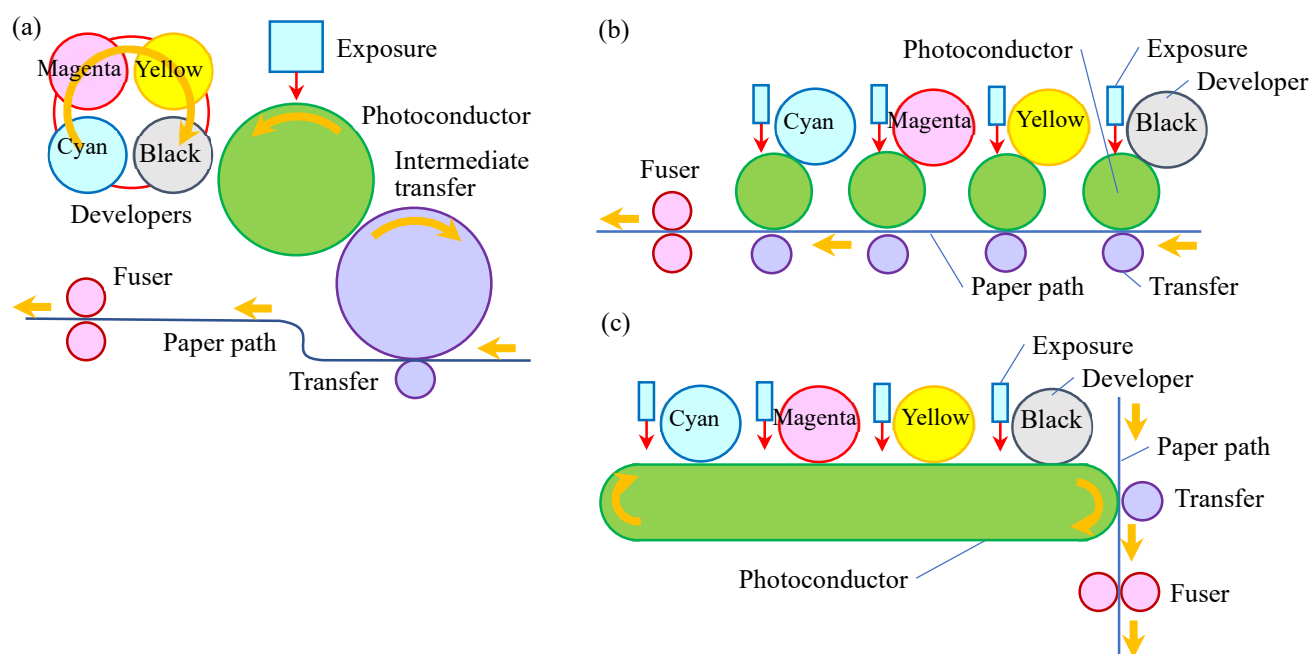


Fig. 1.2 (a) 4 cycle system, (b) tandem system, (c) image on image system.

図 1.2 (a)は4 サイクル方式のカラー電子写真プロセスの模式図である。4 サイクル方式は1つの感光体と露光装置と4つの現像器を用いて感光体上に1色ずつ像を形成し、4色の像を中間転写体上で重ね合わせ、用紙等の媒体に転写する。他の方式と比べて4色の像を重ね合わせることが容易にできて、露光装置と感光体がそれぞれ1つであるため、装置の小型化と低価格化に有利である。一方、帯電プロセスから転写プロセスを4回行うため、印刷速度の向上には限界がある。

図 1.2 (b)はタンデム方式のカラー電子写真プロセスの模式図である。タンデム方式は感光体と露光装置と現像器をそれぞれ4つずつ持っており、4色の画像形成を並行して行い、4色の像を用紙へ転写して重ね合わせる。4色の画像形成を並行して行うため印刷速度を高めることができる。一方、感光体と露光装置と現像器をそれぞれ4つずつ用いるため、小型化と低価格化が困難であり、4色の画像の重ね合わせに高い技術が要求される。

図 1.2 (c)は感光体上重ね合わせ方式のカラー電子写真プロセスの模式図である。感光体重ね合わせ方式は1つの感光体と4つの露光装置と現像器を用いて感光体上に4色の画像を重ね合わせて形成する。タンデム方式と同様に4色の画像形成を並行して行うので印刷速度を高めることができるが、露光装置と現像器をそれぞれ4つずつ用いるため、小型化と低価格化が困難であり、4色それぞれの潜像形成と画像の重ね合わせに高い技術が要求される。

タンデム方式と感光体上重ね合わせ方式では、使用するトナーの色の数に応じた複数の露光装置が必要となり、さらには4つ以上の露光装置と現像器を用いる装置もあるため、カラー電子写真装置を小型化するためには露光装置をコンパクトにする必要があり、次節で説明する露光プロセスに使われる露光装置のうち、本研究のレンズアレイを用いたLEDヘッドが有利である。

1.2 電子写真露光プロセスの技術

電子写真露光プロセスはアナログ方式とデジタル方式に大別され、本研究のレンズアレイはデジタル方式の1つであるLEDプリンタに用いられる。本節では電子写真の代表的な露光プロセスの方式と装置について述べる。始めに図1.3を用いてアナログ方式の電子写真露光プロセスに用いられる技術について述べる。

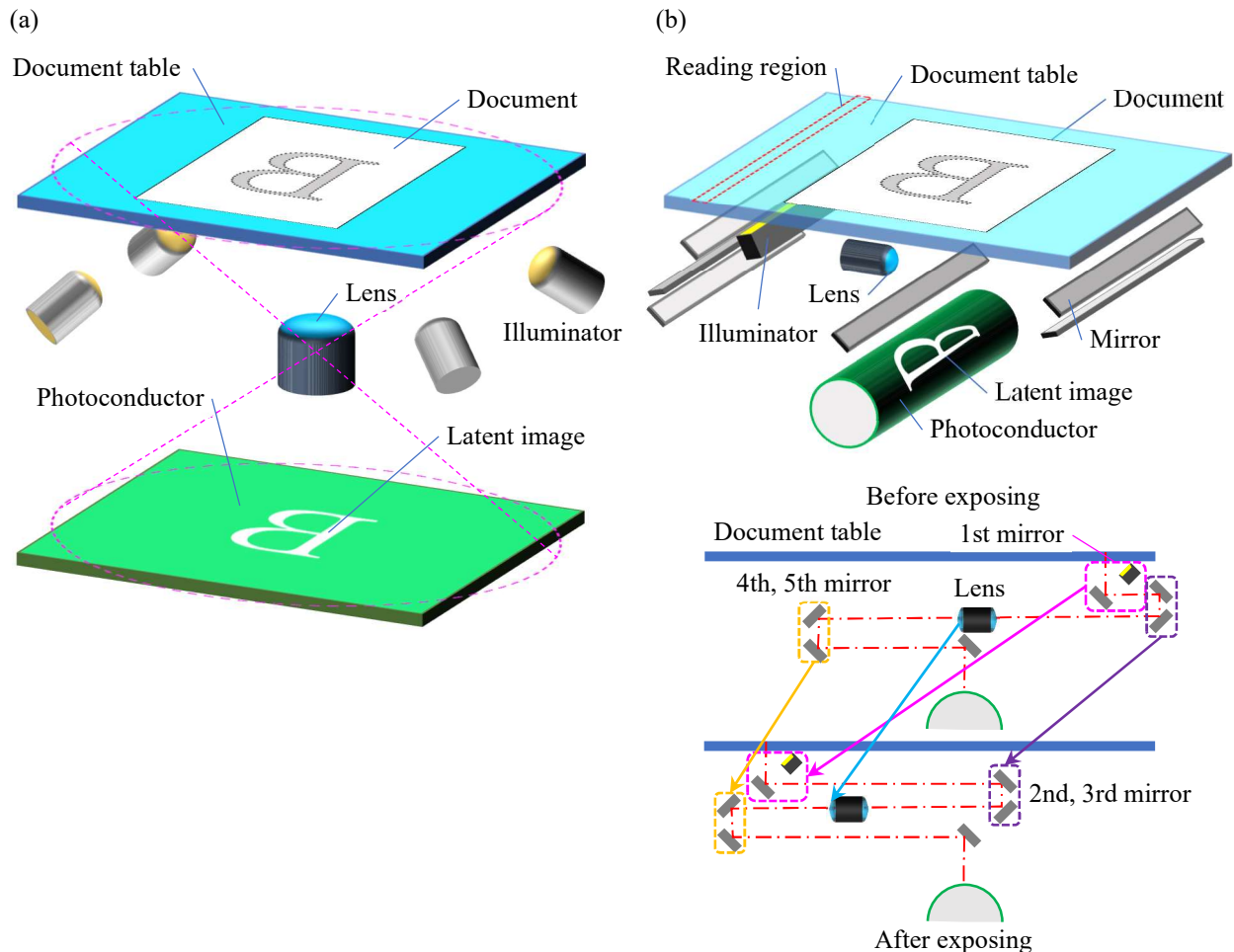


Fig. 1.3 Configurations of exposing process of analogue xerography.

図1.3(a)はアナログ方式の電子写真露光プロセスの1形態を示す概略図である。本形態では、ガラスの原稿台にセットされた原稿の像をプレート状の感光体表面にレンズで結像することにより露光する。黎明期の電子写真装置の露光プロセスはこの形態であり、露光プロセスそのものは短い時間で終了できる。しかし、原稿の周囲に光学系の収差が発生しやすく、像の光強度が低下しやすく、一般的な大きさの原稿の像を露光できるようにするためには、原稿台から感光体までの光路長を長くする必要があって小型化に不利であり、プレート状の感光体は次の現像プロセスに移行するのと、像形成プロセスを繰り返し行うのに複雑な機構が必要である。プレート状の感光体をループ状のベルト形状の感光体とすることで、次のプロセスへ移行しやすく、像形成プロセスを繰り返し行えるようにした装置も開発されている。

図1.3(b)はアナログ方式の電子写真露光プロセスの別の形態を示す概略図である。原稿画像の一度に読み取る領域を感光体表面の移動する方向に分割して帯状の読み取り領域とし、ミラーを用いて光学系を折りたたんでコンパクトにし、感光体表面を移動させながら、原稿画像上の読み取り領域を感光体表面と同じ方

向に移動することにより原稿画像全体を露光する。原稿台の読み取り領域の直下にある第1ミラーと照明部材が原稿台の一方の端部からもう一方の端部へ移動するとともに、読み取り領域からレンズまでの距離（物体距離）とレンズから感光体までの距離（結像距離）の両方が露光プロセスの間常に一定になるように第2～5ミラーとレンズが移動する。図 1.3 (a)の形態に比べて光学系をコンパクトにでき、円筒形の感光体を用いることで次の現像プロセスへ移行するのと画像形成プロセスを繰り返し行うことを容易にしている。また、光学系の収差と光強度の低下は、原稿画像の分割方向の端部には発生しなくなっている。しかし、帯状の原稿画像上の読み取り領域の端部には光学系の収差が発生しやすく、像の光強度が低下しやすい。

像形成の画像データを電子データに変換することによって画像データを保存できるだけでなく、画像の拡大、縮小、トリミング、変形、解像度の変更などサイズの変更や、カラー画像からモノクロへ変更、あるいはモノクロ画像の疑似カラーへの変更等、画像処理が容易となる。そして電子写真装置においても、印刷品質の向上やカラー化への対応、画像の拡大、縮小、トリミング等の画像の加工、コンピュータ端末やファクシミリ等の通信機器の出力装置として使用するなど、性能向上や多機能化を目的としたり、画像形成プロセスの高速化や装置の小型化の方法としたり、新規に開発される電子写真装置はアナログ方式からデジタル方式に置き変わってきた。しかしながら、電子写真露光プロセスの技術や装置はアナログ方式においても、高画質化、高速化、装置の小型化を課題として、様々な改良と新規技術の開発がなされてきたことは、デジタル方式の電子写真装置と同様であった。

次にデジタル方式の電子写真露光プロセスについて説明する。デジタル方式では原稿画像を垂直方向と水平方向それぞれに分割し、画素と呼ばれる原稿画像を構成する領域の最小単位1つ1つの色の有り無しもしくは画像濃度を識別して電子データとし、この電子データを元に画像を形成する。アナログ方式とデジタル方式との違いは、アナログ方式では照明装置から出射され原稿画像で反射または透過した光線がレンズによって感光体表面に結像されるのに対し、デジタル方式では画素の色の有り無しや画像濃度に応じて感光体表面の対応する領域を光線のビームで露光する。図 1.4 を用いてデジタル方式の電子写真装置で代表的な露光プロセスの装置であるレーザースキャナーとLEDヘッドの特徴について述べる。

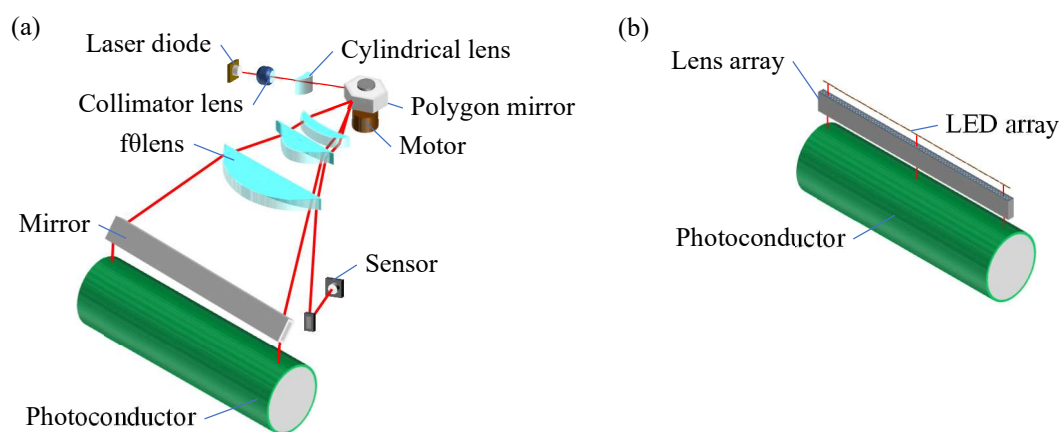


Fig. 1.4 (a) Laser scanner, and (b) LED print head.

図 1.4 (a)はデジタル方式の電子写真露光プロセスの1つであるレーザースキャナーの概略図である。コリメータレンズやシリンドリカルレンズを用いて感光体表面にレーザーダイオードから出射されたレーザー光のビームを形成する。ポリゴンミラーをモーターで回転させ、レーザー光を反射させることにより、円筒形の感光体の軸方向にレーザー光を走査する。fθレンズは感光体表面に露光されるレーザー光のビーム径

が一定になるようにレーザー光のビームを整形する。同一のレーザー光源から出射されたレーザー光を走査するため隣接する画素間のビーム形状の均一性が高く、もう一方の露光装置である LED ヘッドと比較して印刷画像に筋や帯は発生しにくい。しかし、感光体の中心と端部で光路長が異なるため、光学系の収差によって感光体の中心付近と端部とでビーム形状が異なり印刷品質が低下する。また、レーザー光源から感光体までの光路長が長く、LED ヘッドと比較して小型化に不向きであり、複数の露光装置が必要なカラー電子写真装置では複雑な光学系となる。さらに、大きな用紙に印刷可能な電子写真装置では、レーザースキャナーを走査方向に複数配列することが必要となる。

図 1.4 (b)はデジタル方式の電子写真露光プロセスのもう 1 つの形態である LED ヘッドの概略図である。LED ヘッドは原稿画像の画素と同じ配列間隔で Light Emitting Diode (LED)を配列した LED アレイと、LED アレイの像を感光体表面に形成するレンズアレイからなる。レンズアレイには物体の正立等倍像を形成する屈折率分布型のロッドレンズを多数配列したロッドレンズアレイ (Gradient index array, GRIN array) が用いられ、LED アレイの正立等倍像が形成される。LED ヘッドは部品点数が少なく小型で電子写真装置の小型化に有利である。また、LED アレイの数を増やし、ロッドレンズアレイに配列するロッドレンズの数を増やすことで露光する領域を大きくすることができ、大きな用紙に印刷可能な電子写真装置にも向いている。さらに、感光体の中心と端部で LED アレイから感光体までの光路長が同じであるため、感光体の中心付近と端部で同じビーム形状が得られ、印刷画像の端部での画像劣化が発生しにくい。一方、隣接する画素間で異なる LED でビームを形成するため、レーザースキャナーと比較して隣接する画素間のビーム形状の均一性が低く、印刷画像に筋や帯が発生しやすい。

本研究のレンズアレイが用いられる LED ヘッドはコンパクトにできることから、特に複数の露光装置が必要なカラー電子写真装置の露光装置に用いられている。さらに、A3 サイズの用紙に印刷できる電子写真装置でも用紙の端部での画像劣化が少なく、光学系の構成は用紙の大きさにかかわらず同一にできる。一方で、ロッドレンズアレイを構成するロッドレンズのアライメント精度が低下すると、隣接する画素の間で形成されるビーム形状が異なってきて、印刷画像に筋や帯が発生する。本研究では、LED ヘッドのレンズアレイに最適なロッドレンズアレイの諸定数を明らかにするとともに、ロッドレンズアレイのアライメント不良と画像劣化の関係を解析し、どのようなアライメント不良が印刷画像に影響するのかを明らかにし、今後カラー電子写真装置の露光プロセスに LED ヘッドがより多く用いられるように対策を検討する。

1.3 レンズアレイの光学特性と印刷画像特性

LED プリンタには電子写真方式プリンタの光源として LED ヘッドが用いられている。LED ヘッドはロッドレンズアレイと LED アレイで構成され、ロッドレンズアレイによって LED アレイの正立等倍像が形成される。LED アレイの LED の配列方向を走査方向 (Scanning direction) と呼び、その垂直方向を副走査方向 (Sub-scanning direction) と呼んでいる。LED ヘッドの構成を図 1.5 (a) に示す。LED の配列間隔は、解像度 600dpi の LED プリンタでは約 $42\mu\text{m}$ で、解像度 1200dpi の LED プリンタでは約 $21\mu\text{m}$ である。一方、ロッドレンズアレイのロッドレンズの配列間隔は約 0.3mm であり、ロッドレンズの配列間隔は LED の配列間隔よりずっと大きく、ロッドレンズは LED と 1 対 1 に対応していない。従って、個々のロッドレンズの特性のばらつきやロッドレンズのアライメント不良は複数の LED の結像特性に影響し、印刷画像では複数の画素に亘ってその影響が現れる。

また、LED プリンタでは用紙の搬送方向が副走査方向で、1 枚の用紙に形成される画像を走査方向に長い短冊状に分割し、用紙の搬送のタイミングに合わせて順次分割された画像データを LED アレイの発光データに置き換えて LED アレイを発光している。LED プリンタの画像データの構成を図 1.5 (b) に示す。

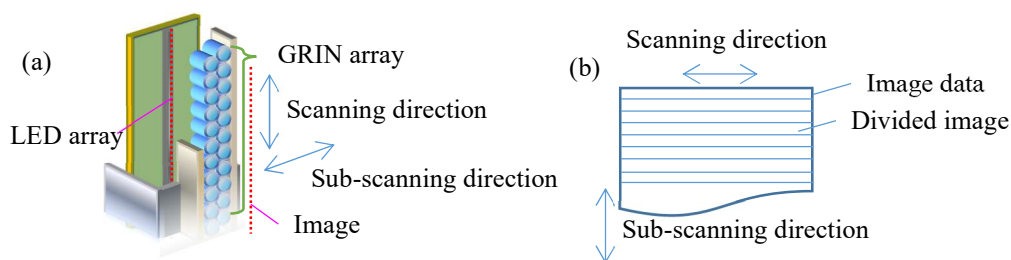


Fig. 1.5 (a) Configuration of LED print head. (b) Dividing direction of printing image of LED printer.

LED プリンタの印刷画像においては、LED ヘッドとそのロッドレンズアレイの走査方向の位置と印刷画像の走査方向の位置が常に同じ位置となるため、ロッドレンズアレイの結像特性に不均一な部分があると、印刷画像の走査方向の対応する位置の濃度が他と異なるため、筋や帯として視認される。LED ヘッドの光量補正と LED 像のコントラストについて図 1.6 を用いて説明する。図 1.6 (a)はロッドレンズアレイによる像の強度が不均一である場合の強度分布の模式図である。LED アレイの特定の LED の発光強度を印刷動作の間常に特定の割合強くあるいは弱く発光させることができるため、ロッドレンズアレイの結像特性のうち強度の不均一による印刷画像の筋や帯に関しては、特定の LED の発光強度を調整することによって視認できないようにすることが可能である。これを LED ヘッドの光量補正と呼ぶ。

一方、図 1.6 (b)はロッドレンズアレイによる像のコントラストが不均一である場合の強度分布の模式図である。LED ヘッドの走査方向でコントラストが低下している部分に対応する印刷画像の部分には、他の部分より濃度の濃い筋や帯が発生する。ロッドレンズアレイの結像特性のうちコントラストの不均一に関しては、コントラストの低下している部分の像の光強度に応じて LED アレイの LED の発光強度を調整しても LED 像のコントラストを変化させることができないため、補正することができない。LED プリンタではロッドレンズアレイの結像特性の不均一によって印刷画像に筋や帯が発生するので、画像品質を向上させるにはロッドレンズアレイのコントラストを均一にすることが必要である。

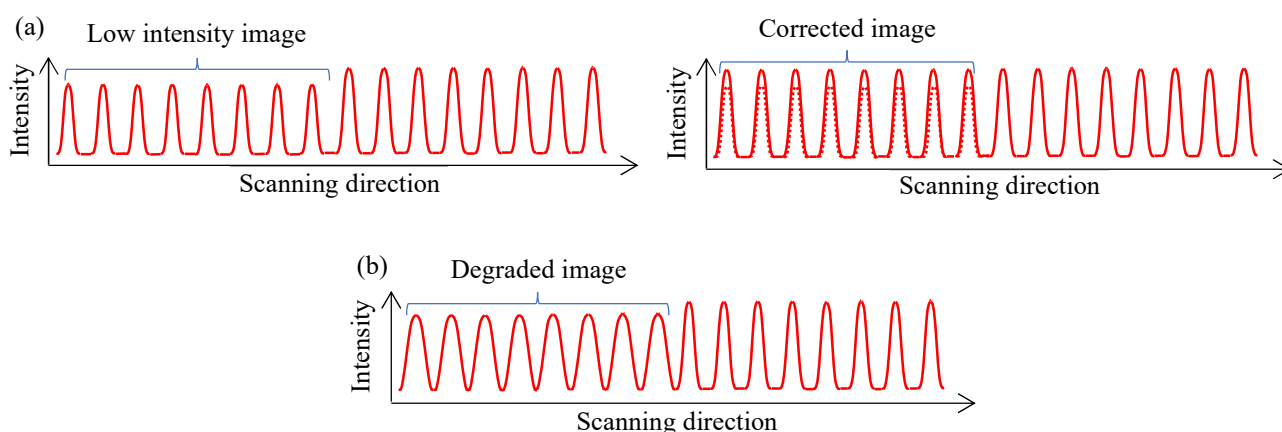


Fig. 1.6 (a) Uneven intensity of image and intensity adjustment. (b) Contrast fluctuation of image.

さらに、ロッドレンズアレイのアライメント不良による印刷画像の不良について図 1.7 を用いて説明する。図 1.7 (a)~(c)は本研究で詳細に解析するロッドレンズの傾きが発生している部分に対応する印刷画像である。(a)~(c)は LED の発光パターンが異なり、(a)は 2-by-2 パターン、(b)は 150lpi の縦線パターン (lpi は line pair per inch の略で、白線と黒線を 1 対とし 1 インチ約 25.4mm 当たりの白線と黒線の対の数で

パターンの細かさを表す)、(c)は 150lpi の横線パターンで、LED の発光パターンはそれぞれ(A)～(C)で示す。LED の発光パターンは方眼のマスキの 1 つ 1 つが LED を表し、1 が点灯している LED で 0 が消灯している LED を示している。図 1.7 の印刷画像は解像度 1200dpi の LED プリンタを用いて作成した。

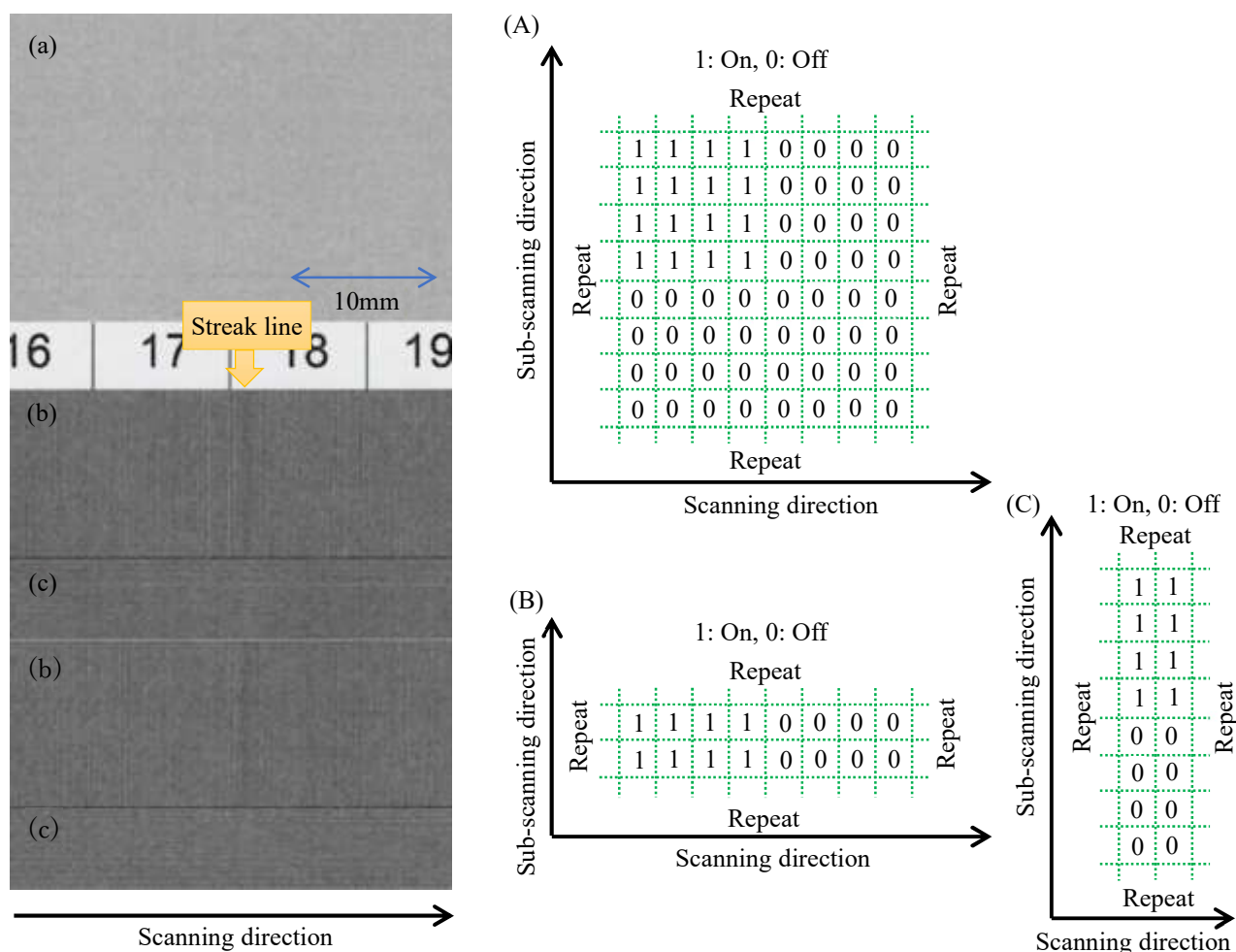


Fig. 1.7 (a) 2-by-2 print sample, (b) 150lpi vertical lines print sample, (c) 150lpi horizontal lines print sample, (A) 2-by-2 emitting pattern, (B) 150lpi vertical emitting pattern, (C) 150lpi horizontal emitting pattern.

図 1.7 の印刷画像を作成した LED ヘッドのロッドレンズアレイは印刷画像に対応する位置のロッドレンズが走査方向に傾いており、(b)は 150lpi の縦線パターンにおいて副走査方向（用紙の搬送方向）の筋が発生している。これは傾いているロッドレンズによる LED の像であるビーム形状が、走査方向に長い楕円形をしていることによって、発光パターンの非発光部分にまで光強度の分布が広がって濃度が濃くなっていると考えられる。一方、(c)の 150lpi の横線パターンでは、傾いているロッドレンズによる LED の像であるビーム形状が走査方向に長い楕円形をしていても隣接する発光部分と重なり合うため、印刷画像の濃度には影響しないと考えられる。さらに、2-by-2 パターンにおいては印刷画像の濃度が低いため、傾いているロッドレンズによる LED の像であるビーム形状が走査方向に長い楕円形をしていても、発光強度の弱い部分が印刷画像の濃度には影響しないと考えられる。

本研究ではロッドレンズアレイのアライメント不良による LED ヘッドの結像特性の変化を解析することにより、このような印刷画像不良の原因を明らかにし、ロッドレンズアレイでの対策を検討する。さらに、ロッドレンズアレイに変わる新たな LED ヘッドの光学系を検討する。

1.4 本論文の構成

本論文は4章からなり、第1章を序論とし上述のように本研究のレンズアレイが実装されるLEDヘッドが用いられる電子写真の原理と装置構成について述べ、LEDヘッドのレンズアレイが求められる特性と課題について記した。第2～4章の概要は以下の通りである。

第2章では現状においてLEDヘッドのレンズアレイとして用いられているロッドレンズアレイの特徴と問題点について述べる。第1節でロッドレンズアレイの諸定数と光学特性の関係について検証し、LEDヘッドのレンズアレイに最適な構成を明らかにする。第2節では、ロッドレンズアレイのアライメント不良が光学特性にどのような影響を与えるかを検証する。第3節はロッドレンズアレイのアライメント精度を測定し、アライメント精度を測定したロッドレンズアレイによる像を解析し、アライメント精度と結像特性の関係を明らかにする。

第3章ではロッドレンズアレイに変わる様々な方式について解説し、新方式として正立等倍像を形成するレンズアレイを、非球面レンズを配列したマイクロレンズアレイ(Micro lens array, MLA)によって構成することを検討する。

第4章で本論文全体の結論を述べる。

参考文献

1. R. Shaffert, "Electrophotography," Focal Press (1975).
2. E. Williams, "The physics and technology of xerographic processes," Wiley (1984)
3. H. Sakiyama, S. Nishida, and Y. Ohba, "Copy machine production technology," *J Soc Electrophotography*. **28**(2) 199-205 (1989).
4. Y. Nagase, T. Menjo, Y. Hattori, Y. Watanabe, and H. Matsushiro, "Innovations providing the progress of electrophotography," *J Imaging Soc Jpn*. **51**(2) 177-190 (2012).
5. M. Kimura, and S. Takezawa, "Current status and issues of print quality in monochrome laser printer," *J Imaging Soc Jpn*. **40**(3) 222-230 (2001).
6. K. Aizawa, and N. Nakajima, "Development of LED print head," OKI テクニカルレビュー **77** (2) 42-45 (2010)

第2章 ロッドレンズアレイの解析

2.1 ロッドレンズアレイの諸定数と結像特性

LED ヘッドは印刷する用紙の幅方向いっばいに LED アレイが配列され、その像をロッドレンズアレイによって形成するため、ロッドレンズアレイも用紙の幅方向と同じ長さが必要となる。LED ヘッドの LED アレイ及びロッドレンズアレイの走査方向の長さは、A4 サイズ及びレターサイズまでを印刷できる LED プリンタにおいては約 210mm であり、A3 サイズまで印刷できる LED プリンタにおいては約 300mm である。一方で、ロッドレンズアレイの焦点深度はそれほど深くはなく、LED アレイからロッドレンズアレイまでの距離の設計値に対する誤差を数 $10\mu\text{m}$ 程度に抑えなければならず、LED アレイが配列される基板とロッドレンズアレイは共に高い真直度で配置する必要がある。しかしながら、ロッドレンズアレイの焦点深度を深くすることができれば、LED アレイが配列される基板とロッドレンズアレイに要求される真直度はある程度緩和することができる。本節ではロッドレンズアレイの諸定数と結像特性の関係を検証しながら、コントラストを高め、かつ焦点深度を深くできる LED ヘッドに適したロッドレンズアレイの仕様について検討した文献 1 と 2 の内容について述べる。

2.1.1 屈折率分布係数

本研究では数式(2.1)に示される半径の 2 乗に比例する屈折率分布を持つロッドレンズについて検討する：

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{a}{2} r^2 \right), \quad (2.1)$$

ここで r はロッドレンズの光軸からの距離、 n_0 は軸上の屈折率、 a は屈折率分布係数である。文献 3 をもとにこの屈折率分布を持つロッドレンズの光線をマトリクス表記して光線追跡を行う。媒質中の光軸に近い領域を通る近軸光線を記述する微分方程式は数式(2.2)で与えられる：

$$n_0 \frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{dn}{dr}. \quad (2.2)$$

数式(2.1)より数式(2.2)は、

$$n_0 \frac{d^2 r}{dz^2} = -n_0 a r, \quad (2.3)$$

となり、数式(2.3)の解は b_1 、 b_2 を定数として数式(2.4)となる：

$$r = b_1 \cos \left\{ \sqrt{a} (z - b_2) \right\}. \quad (2.4)$$

半径の 2 乗に比例する屈折率分布を持つロッドレンズの光軸付近を透過する近軸光線の挙動は数式(2.4)で示される。図 2.1 に示す空間に配置されたロッドレンズの入射面におけるロッドレンズ光軸からの高さ r_{in} 、傾き α_{in} 、出射面における高さ r_{out} 、傾き α_{out} の光線を数式(2.5)のマトリクスで表記する：

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ \alpha_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{a} z_0) & (1/\sqrt{a}) \sin(\sqrt{a} z_0) \\ -\sqrt{a} \sin(\sqrt{a} z_0) & \cos(\sqrt{a} z_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{in} \\ \alpha_{in} \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

ここでレンズ長 z_0 はロッドレンズの光軸方向の長さである。ロッドレンズとの境界の外側での入射面に対する光線の傾きを α_0 、出射面に対する傾きを α_1 とすると、スネルの法則より近軸光線においては、境界での屈折角はロッドレンズの軸上屈折率 n_0 に比例すると近似して $\alpha_0 = n_0 \alpha_{in}$ 及び $\alpha_1 = n_0 \alpha_{out}$ より数式(2.6)が得られる。

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ \alpha_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{in} \\ \alpha_0 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

ただし、右辺の行列は数式(2.7)である。

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{a}z_0) & (1/n_0\sqrt{a})\sin(\sqrt{a}z_0) \\ -\sqrt{a}n_0\sin(\sqrt{a}z_0) & \cos(\sqrt{a}z_0) \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

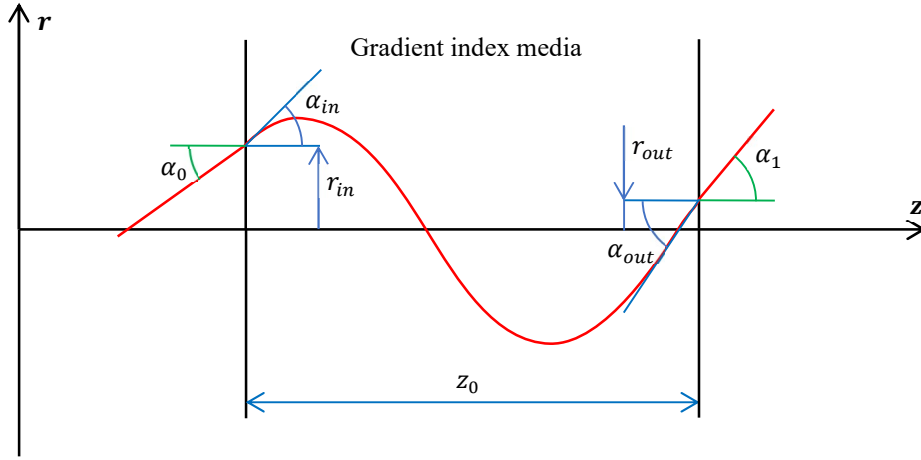


Fig. 2.1 Light ray inclinations at boundary surfaces of GRIN.

次に、図 2.2 のように光軸からの高さ r_0 の物体面上の点からロッドレンズの光軸と平行な光線が入射面に入射するとき、光線が到達する結像面上の点の光軸からの高さ r_1 としてロッドレンズが正立等倍の像を結ぶ時の物体距離 l_0 と結像距離 l_1 を求める。ロッドレンズの光軸方向における中心となる面上の点の光軸からの高さ r_c 、光線の傾きを α_c とすると、ロッドレンズの光軸方向における中心より物体空間側では、

$$\begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

の数式が成り立ち、ロッドレンズの光軸方向における中心より結像空間側では、

$$\begin{pmatrix} r_{out} \\ \alpha_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

の数式が成り立つ。ただし、行列は(2.10)である：

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{a}z_0/2) & (1/n_0\sqrt{a})\sin(\sqrt{a}z_0/2) \\ -\sqrt{a}n_0\sin(\sqrt{a}z_0/2) & \cos(\sqrt{a}z_0/2) \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

数式(2.8)と数式(2.9)はそれぞれ、

$$r_c = A'r_0, \quad \alpha_c = C'r_0, \quad (2.11)$$

$$r_{out} = A'r_c + B'\alpha_c, \quad \alpha_1 = C'r_c + D'\alpha_c, \quad (2.12)$$

となる。数式(2.12)は数式(2.11)と $D' = A'$ と $A'^2 - B'C' = 1$ より、

$$r_{out} = (1 + 2B'C')r_0, \quad \alpha_1 = 2A'C'r_0. \quad (2.13)$$

また図 2.2 より $r_1 = \alpha_1 l_1 + r_{out}$ であるから像の倍率 r_1/r_0 は、

$$r_1/r_0 = \{2A'C'l_1 r_0 + (1 + 2B'C')r_0\}/r_0 = 2A'C'l_1 + 2B'C' + 1. \quad (2.14)$$

このロッドレンズが正立等倍像を形成するとき数式(2.14)は 1 に等しい。結像距離 l_1 について整理すると、

$$2A'C'l_1 + 2B'C' + 1 = 1 \quad \therefore l_1 = -B'/A'. \quad (2.15)$$

また、正立等倍像を形成するとき、物体距離 l_0 と結像距離 l_1 とは等しい：

$$l_0 = l_1 = -\frac{1}{\sqrt{an_0}} \tan \frac{\sqrt{a}z_0}{2}. \quad (2.16)$$

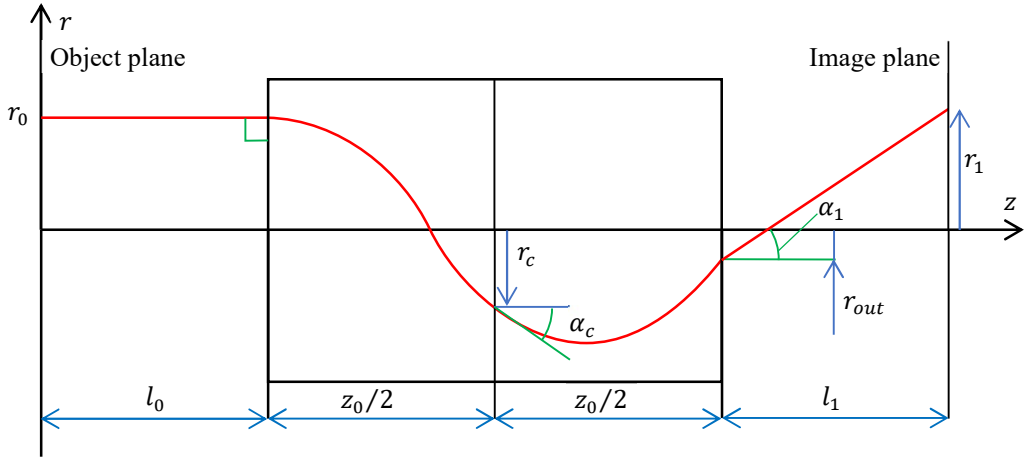


Fig. 2.2 Object distance l_0 and image distance l_1 of GRIN.

物体距離と結像距離は屈折率分布係数の平方根に反比例し、屈折率分布係数が高いほど物体距離と結像距離は短くなる。LED ヘッドではLED アレイとロッドレンズアレイとの面間隔と、ロッドレンズアレイからLED アレイの像までの距離を短くすることができて、コンパクトな光学系となる。

2.1.2 レンズ長

次にLED ヘッドに適したロッドレンズアレイのレンズ長 z_0 について数式(2.16)と文献をもとに検討する。数式(2.16)の l_1 が正の値となるレンズ長 z_0 において、ロッドレンズは正立等倍の実像を形成し、 l_1 が負の値となるレンズ長 z_0 においては正立等倍の虚像を形成する。 $n_0 = 1.5$ 、 $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ としてレンズ長 z_0 と結像距離 l_1 の関係をグラフに示すと図 2.1 (a)となる。つまり $z_0 \rightarrow \pi/\sqrt{a}$ とすると $l_1 \rightarrow +\infty$ となり、 $z_0 \rightarrow 2\pi/\sqrt{a}$ とすると $l_1 \rightarrow 0$ となる。よって m を正の整数として、

$$\frac{(2m-1)\pi}{\sqrt{a}} < z_0 < \frac{2m\pi}{\sqrt{a}}. \quad (2.17)$$

レンズ長 z_0 を数式(2.17)の範囲とするとロッドレンズは正立等倍の実像を形成する。

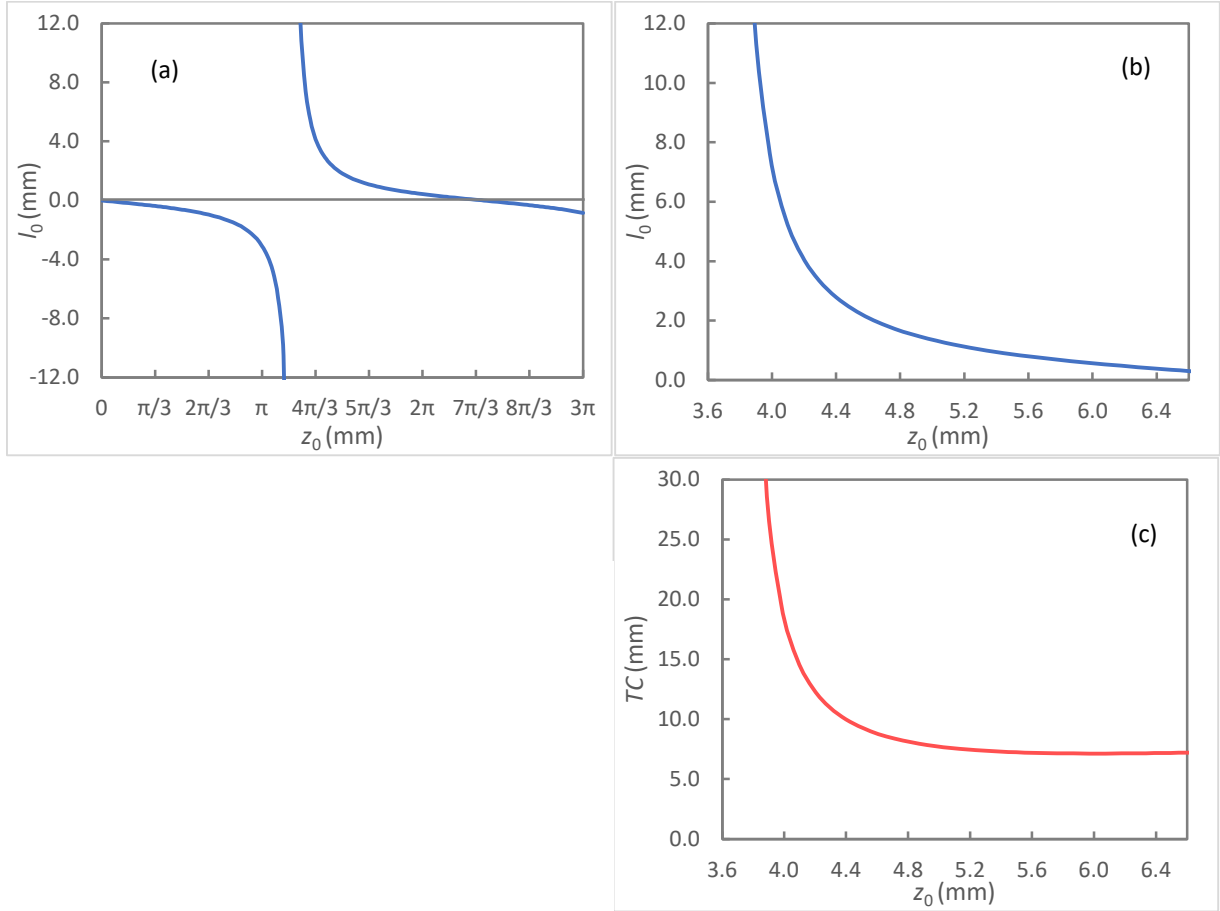


Fig. 2.3 Length z_0 and image distance l_1 of GRIN.

さらに、文献6においてロッドレンズを最も短くできることから $m = 1$ とし、実用的なレンズ長 z_0 の範囲を数式(2.18)としている：

$$\frac{7}{6} \frac{\pi}{\sqrt{a}} \leq z_0 \leq \frac{11}{6} \frac{\pi}{\sqrt{a}}. \quad (2.18)$$

数式(2.18)の範囲で $n_0 = 1.5$ 、 $\sqrt{a} = 0.84$ (mm^{-1})としてレンズ長 z_0 と結像距離 l_1 の関係をグラフに示すと図 2. 1 (b)が得られる。数式(2.18)の範囲ではレンズ長 z_0 を長くするほど結像距離 l_1 は短くなる。また、レンズ長 z_0 を $4\pi/(3\sqrt{a})$ より短くするとレンズ長 z_0 の変化に対し結像距離 l_1 の変化が大きく、 z_0 を $4\pi/(3\sqrt{a})$ より長くするとレンズ長 z_0 の変化に対し結像距離 l_1 の変化が小さい。電子写真方式である LED プリンタでは LED ヘッドの光学系の大きさは小さいほど良いものの、ロッドレンズアレイの結像距離は1~10 mm とするのがふつうである。それは感光体上に色のついた粉体である現像剤のトナーが残り、ロッドレンズアレイが感光体に対向して配置されるため、感光体からロッドレンズアレイ表面にトナーが付着するのを防ぐためである。また、レンズ長 z_0 の長さに対する LED アレイからロッドレンズアレイによる像までの距離である光路長 TC

は図 2.1 (b)となる。 $TC = 2l_1 + z_0$ であり、 $n_0 = 1.5$ 、 $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ として算出した。数式(2.18)の範囲ではロッドレンズアレイの光路長 TC は 10～数 10mm の範囲であり、レーザースキャナーの光路長と比べてとても短くできる。

次に、照明解析によって数式(2.18)の範囲の中でロッドレンズアレイのレンズ長 z_0 のさらに良好な値を求める。照明解析はレンズ設計解析ソフト CodeV を用いて行う。計算のモデルは図 2.4 に示す。図 2.4 (a)は計算モデルの中の光源、ロッドレンズアレイ、受光器の配置を示す。計算モデルの中で9本のロッドレンズを配列し、屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ は 0.42、0.63、0.84 (mm^{-1}) として、ロッドレンズの半径 R は 0.28 mm とする。図 2.4 (b)は計算に用いた光源の構成で、光源は3つの発光部からなり p_e の間隔で y 方向に配列される。発光部の大きさは y 方向に p_e で x 方向に $5 \times p_e$ である。印刷画像のパターンの細かさを示す 1 mm 当たりの白線と黒線の対の数である Lp と発光部の間隔 p_e との間には、数式(2.19)の関係がある。

$$p_e = 1/(2Lp). \quad (2.19)$$

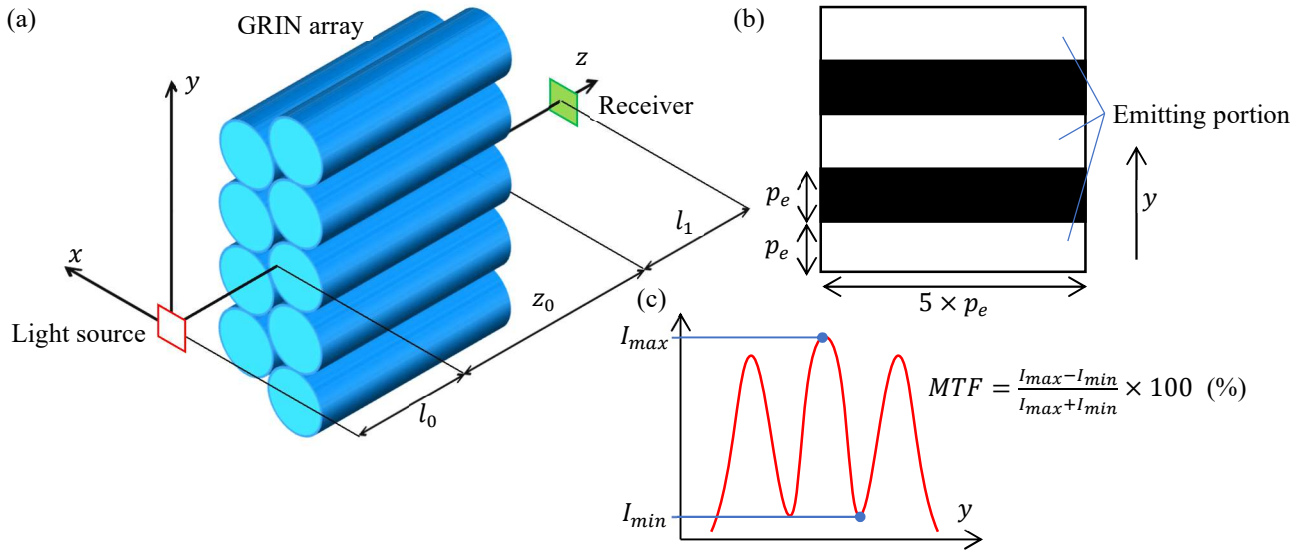


Fig. 2.4 (a) Configuration of calculation model, (b) model of light source, (c) definition of MTF.

図 2.4 (c)は像のコントラストの高さを示す MTF の定義である。グラフの縦軸は受光器での像の光強度を示し、横軸は受光器の y 方向を示す。 I_{max} は光強度の最大値で、 I_{min} は発光部の間の光強度である。MTF は数式(2.20)で定義され、0～100%の数値であり、大きいほどコントラストが高いことを示す。

$$MTF = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100(\%). \quad (2.20)$$

計算モデルのロッドレンズの長さ z_0 は表 2.1 のとおりである。本検討ではロッドレンズの長さ z_0 を周期長 P 単位で示し、周期長は $P = 2\pi/\sqrt{a}$ の関係が成り立つ。

Table 2.1 Length z_0 and cycle length P .

Index gradient constant (mm^{-1})	$\sqrt{a}$	0.42	0.63	0.84
$P = 2\pi/\sqrt{a}$ (mm)	P	14.96	9.97	7.48
Length z_0 (mm)	$13P/24$	8.1	5.4	4.1
	$7P/12$	8.7	5.8	4.4
	$2P/3$	10.0	6.6	5.0
	$3P/4$	11.2	7.5	5.6

図 2.5 に計算結果を示す。(a)はロッドレンズの長さ z_0 と結像距離 l_1 である。計算モデルにおいて物体距離 l_0 は結像距離 l_1 と等しい値で変位させ、MTF が最も高くなる結像距離 l_1 及び物体距離 l_0 を算出している。MTF は光源の線数 $Lp = 11.31$ (lp/mm)としており $p_e = 0.044$ (mm)で算出している。ロッドレンズの長さ z_0 が長いほど結像距離 l_1 は短く、屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ が大きいほど、結像距離 l_1 は短い。前述のとおり LED プリントにおいては結像増距離 l_1 は 1~10 mm 程度とするが、装置をコンパクトにするために 2.0mm 前後が好ましく、 $\sqrt{a} = 0.42$ (mm^{-1})では $z_0 = 2P/3$ 、 $\sqrt{a} = 0.63$ (mm^{-1})では $z_0 = 15P/24$ 、 $\sqrt{a} = 0.84$ (mm^{-1})では $z_0 = 7P/12$ が好ましい。しかし、屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ が小さいほどロッドレンズの長さ z_0 は長くなるため、装置をコンパクトに構成するためには屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ は大きい方が好ましい。

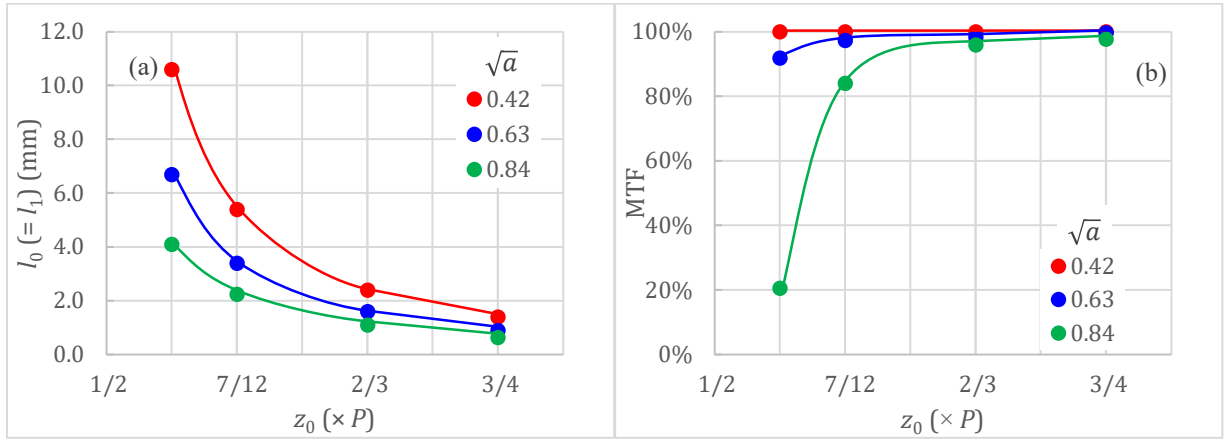


Fig. 2.5 (a) Length z_0 and image distance l_1 of GRIN, (b) length z_0 and MTF.

図 2.5 (b)はロッドレンズの長さ z_0 と MTF の関係を示すグラフである。結像距離 l_1 と物体距離 l_0 が等しい条件で両方を変化させながら MTF を算出し、グラフには最も高い値を示している。MTF は光源の線数 $Lp = 11.31$ (lp/mm)としており $p_e = 0.044$ (mm)で算出している。LED プリントにおいては線数 $Lp = 11.31$ (lp/mm)では 90%程度の MTF が必要である。ロッドレンズの長さ z_0 が長いほど MTF は高く、屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ が小さいほど、MTF は高い。図 2.5 (a)の計算結果から、屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ は大きいほどよく、ロッドレンズの長さ z_0 は $\sqrt{a} = 0.84$ (mm^{-1})では $z_0 = 7P/12$ が好ましい結果が得られたが、このとき MTF は 84.1%であり、もっと高い値が望ましい。

図 2.6 は図 2.5 を求めるために計算した結像距離 l_1 と MTF の関係である。いずれの屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ においても、ロッドレンズの長さ z_0 が短い方が結像距離 l_1 を変化させたときの MTF の変化が小さくなっており、ロッドレンズの長さ z_0 が短い方が焦点深度が深くなると言える。

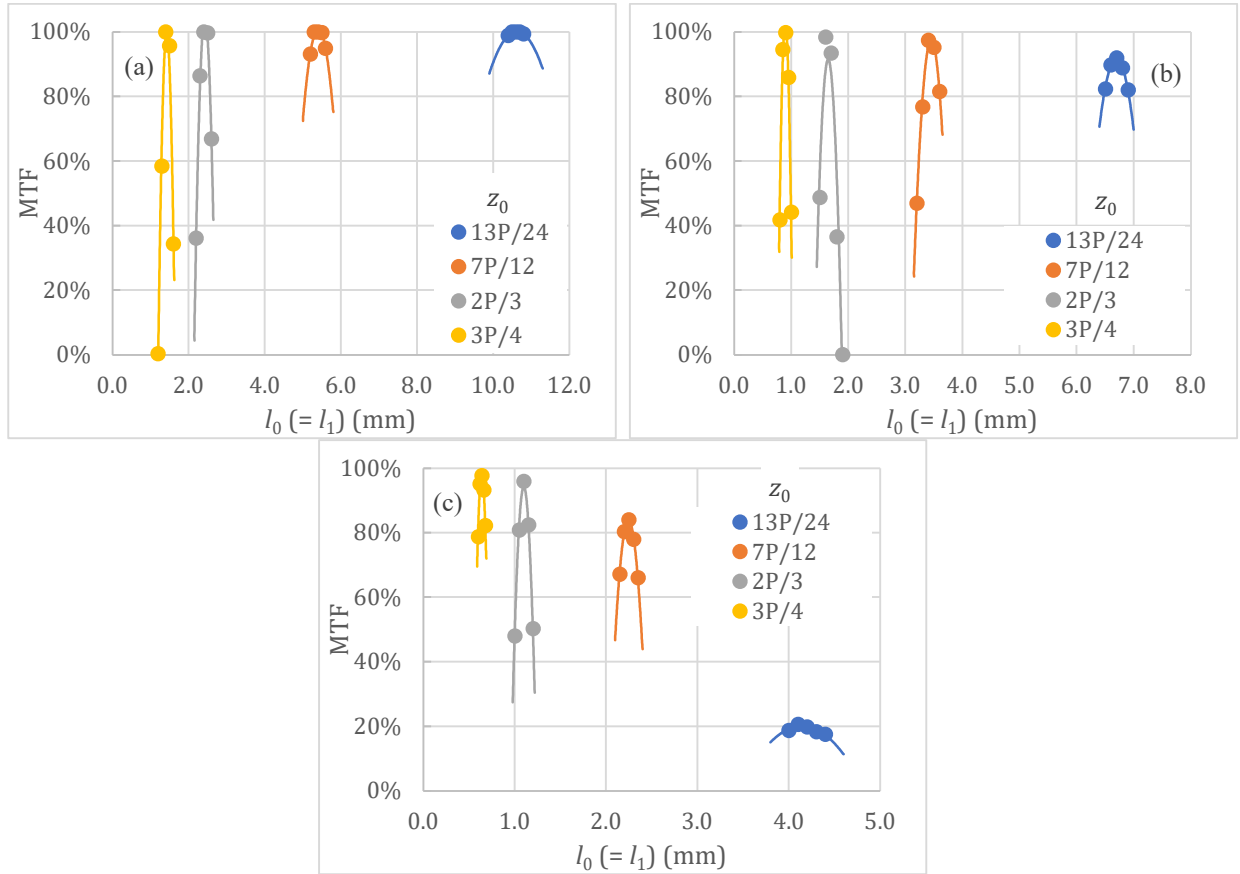


Fig. 2.6 Image distance l_1 and MTF, (a) Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.42 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$, (b) Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.63 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$, Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$.

2.1.3 ロッドレンズの外径

これまでの検討によって、屈折率分布係数は大きいほど好ましく、 $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ ではレンズ長は $z_0 = 7P/12$ が好ましいとの結果が得られた。しかし、MTFの値はもっと高い値が望ましく、焦点深度は深ければ深いほど良いことから、MTFが高く焦点深度が深くなる条件を求めるため、ロッドレンズの外径とMTFの関係を検証する。

ロッドレンズの半径 R とMTFの関係について、前述と同様にレンズ設計解析ソフトCodeVの照明解析を用いて行う。前述の図2.4の計算モデルを用いて計算する。屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ は0.42、0.63、0.84 (mm⁻¹)として、ロッドレンズの長さ z_0 は表2.2のとおりである。光源の線数 $Lp = 11.31 \text{ (lp/mm)}$ 、 $p_e = 0.044 \text{ (mm)}$ とする。結像距離 l_1 と物体距離 l_0 が等しい条件で両方を変化させながらMTFを算出し、最も高い値を求める。図2.7に計算結果を示す。いずれの屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ でもロッドレンズの半径 R が小さいほどMTFは高く、屈折率分布係数 $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ では、半径 $R \leq 0.25 \text{ (mm)}$ 以下でMTFは90%以上が得られる。

Table 2.2 Length z_0 and cycle length P .

Index gradient constant (mm ⁻¹)	$\sqrt{a}$	0.42	0.63	0.84
$P = 2\pi/\sqrt{a} \text{ (mm)}$	P	14.96	9.97	7.48
Length $z_0 \text{ (mm)}$	$7P/12$	8.7	5.8	4.4

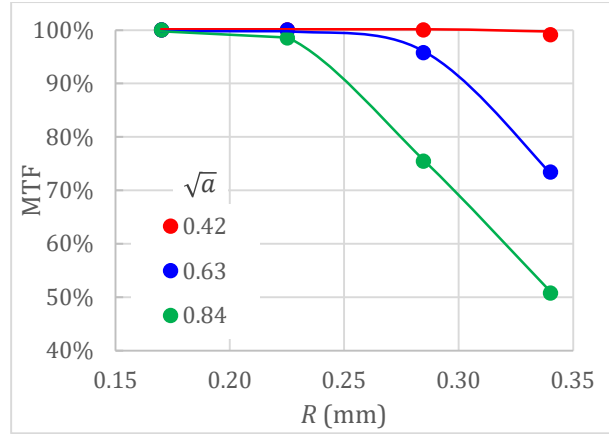


Fig. 2.7 Radius R and MTF.

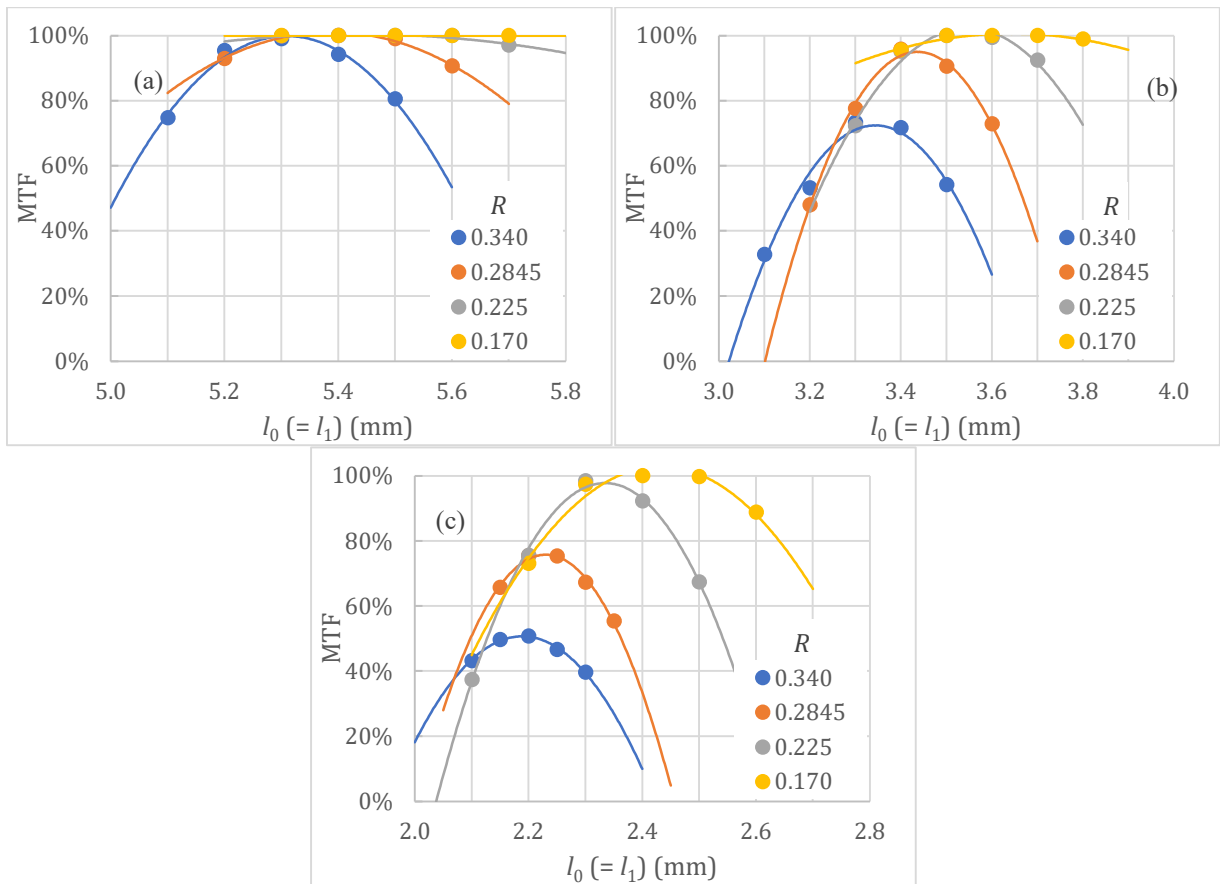


Fig. 2.8 Image distance l_1 and MTF, (a) Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.42 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$, (b) Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.63 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$, Index gradient constant $\sqrt{a} = 0.84 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$.

図 2.8 は図 2.7 を求めるために計算した結像距離 l_1 と MTF の関係である。いずれの屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ においても、ロッドレンズの半径 R が小さい方が結像距離 l_1 を変化させたときの MTF の変化が小さくなっており、ロッドレンズの半径 R が小さい方が焦点深度が深くなると言える。また、ロッドレンズの半径 R が小さい方が結像距離 l_1 は短くなる。以上の検討から、ロッドレンズの半径 R が小さい方が MTF が高く、焦点深度は深くできる。

次にロッドレンズの外径が小さい方が MTF が高く、焦点深度が深くなる理由を明確にするため、ロッド

レンズの像面湾曲を検証する。図 2.9 はロッドレンズの像面湾曲をレンズ設計解析ソフト CodeV を用いて求めたグラフである。計算で用いたロッドレンズの屈折率分布係数 $\sqrt{a}$ 、長さ z_0 、半径 R 、物体距離 l_0 、結像距離 l_1 の数值は表 2.3 の通りである。また、画角は表 2.4 のように設定した。計算結果のグラフは図 2.9 (a) がサジタル像面、(b)がタンジェンシャル（メリジオナル）像面についての結果である。像面湾曲はいずれも外側の画角で像面は手前に湾曲した釣鐘型をしている。つまり、ロッドレンズの光軸から離れた外側の画角では、像面はロッドレンズに近い手前に位置している。また、屈折率分係数 $\sqrt{a}$ が小さい方が像面の湾曲は小さく、屈折率分係数 $\sqrt{a}$ が小さい場合より屈折率分係数 $\sqrt{a}$ が大きい方が、外側の画角の像面は手前に位置している。

Table 2.3 GRIN Rod parameter.

Index gradient constant (mm^{-1})	$\sqrt{a}$	0.42	0.63	0.84
$P = 2\pi/\sqrt{a}$ (mm)	P	14.96	9.97	7.48
Length z_0 (mm)	$7P/12$	8.7	5.8	4.4
Object distance (mm)	l_0	5.5	3.6	2.4
Image distance (mm)	l_1	5.5	3.6	2.4
Radius (mm)	R	0.34	0.34	0.34

Table 2.4 Field of view.

Object No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y (mm)	0	0.085	0.170	0.255	0.34	0.425	0.510	0.595	0.680	0.765

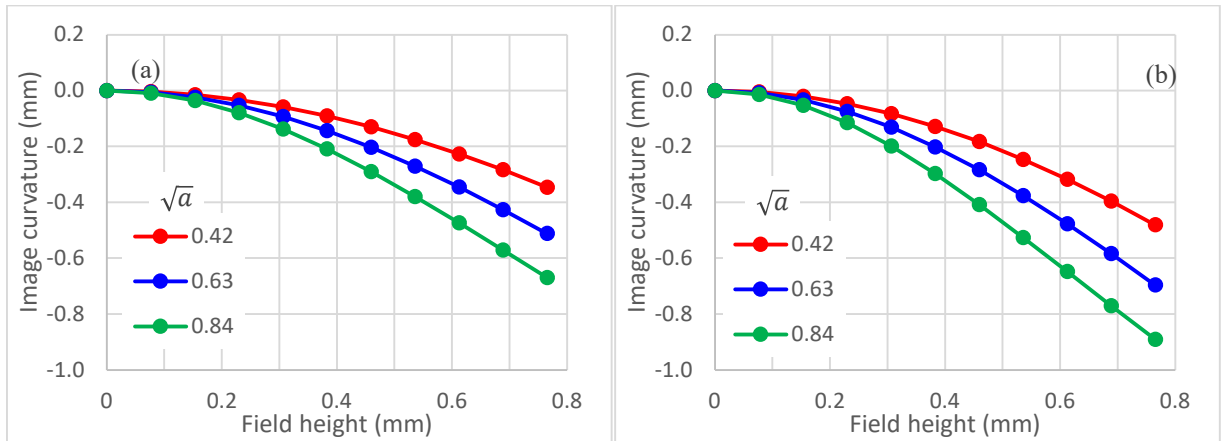


Fig. 2.9 Field curvature of GRIN rod, (a) sagittal, (b) tangential.

ロッドレンズがこのような像面湾曲の特性を示していることから、ロッドレンズの半径が小さいほど像の視野が小さく、ロッドレンズを配列したロッドレンズアレイでは、像面湾曲の大きい光軸から離れた部分を結像せず、像面湾曲の影響が小さくなっていると考えられる。そこで、文献4をもとにロッドレンズの半径 R と視野半径の関係を求める。図 2.10 はロッドレンズの光軸方向における中心で光軸から高さ $-R$ の点 r_c を通過する光線を示している。このときロッドレンズを出射する光線の角度 α_1 は視野角 α_m であり、光線の結像面上の点の光軸からの高さ r_1 は視野半径 r_m となっている。つまり、ロッドレンズの光軸方向における中心より

結像空間側の光線は数式(2.21)で表される：

$$\begin{pmatrix} r_m \\ \alpha_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -R \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

この数式を展開すると、

$$r_m = -A'R + C'l_1R, \quad \alpha_m = CR. \quad (2.22)$$

数式(2.10)と(2.16)より、

$$r_m = -R \cos\left(\frac{\sqrt{a}z_0}{2}\right) + R \sin\left(\frac{\sqrt{a}z_0}{2}\right) \tan\left(\frac{\sqrt{a}z_0}{2}\right) = -R \sec\left(\frac{\sqrt{a}z_0}{2}\right). \quad (2.23)$$

ロッドレンズの視野半径はロッドレンズの半径に比例し、半径を小さくするほど視野は狭くなる。

以上の検討から、ロッドレンズの外径を小さくすると、ロッドレンズの視野半径が狭まり、像面湾曲の大きい部分が結像されなくなることで、像のコントラストが高まり、MTFが高くなることが明らかになった。また、屈折率係数 $\sqrt{a}$ が小さい方が像面の湾曲が小さいため、像のコントラストが高まりMTFが高くなることが分かった。

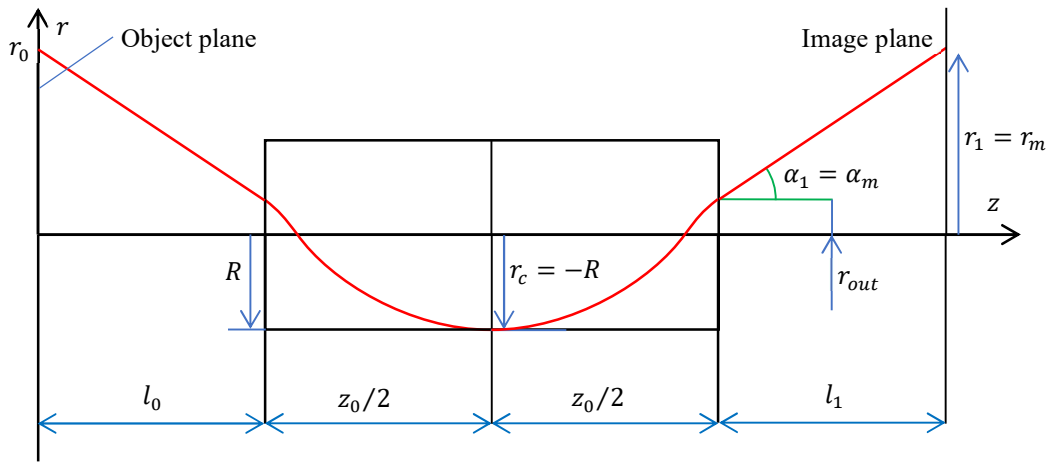


Fig. 2.10 Radius and field of view of GRIN.

2.2 ロッドレンズアレイのアライメント精度

2.2.1 ロッドレンズ光学系の光線追跡

アレイ中のロッドレンズのアライメント精度と結像状態を検証する上で、まずは光線マトリクスを用いて正立等倍像を形成するロッドレンズの光線追跡を行う。図 2.11 に示すようにロッドレンズの半径を R 、ロッドレンズの光軸と物体面との交点から物体までの高さを r_0 、結像までの高さを r_1 とする。光線の高さと傾きをロッドレンズの入射面において (r_{al}, α_{al}) 、出射面において (r_{bl}, α_{bl}) とし、添字 $l = 1, 2, 3$ はそれぞれ主光線、物体空間における上側周辺光線、物体空間における下側周辺光線を表す。

ロッドレンズの内部では光軸方向の中心で一点に集光する。集光する点のロッドレンズ光軸からの高さを r_c とする。主光線の傾きは r_c においてロッドレンズ光軸に平行であるから、主光線の高さと傾きは光線マトリクスを用いて数式(2.24)で示される：

$$\begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_0 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_c \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.24)$$

ここで、 r_c は数式(2.24)から求められる：

$$r_c = A' r_0. \quad (2.25)$$

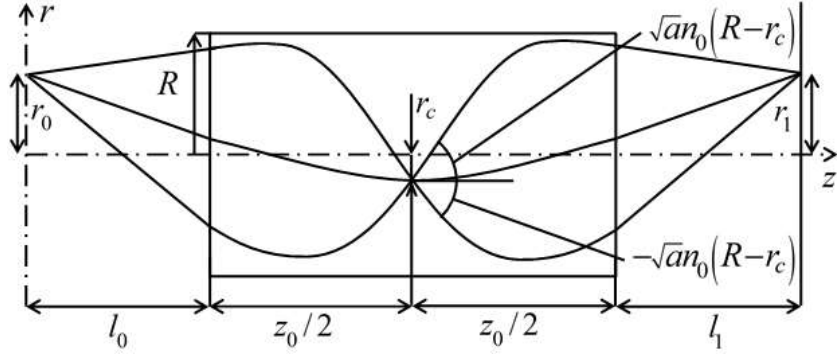


Fig. 2.11 Light ray coordinates and inclinations in GRIN rod.

ロッドレンズの入射面における主光線の高さとは数式(2.26)で表され、 (r_{a1}, α_{a1}) は数式(2.25)を用いて求められる：

$$\begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{a1} \\ \alpha_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_c \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.26)$$

$$\begin{pmatrix} r_{a1} & \alpha_{a1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'^2 r_0 & -A' C' r_0 \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

物体の高さが $r_0 = 0$ のとき、上側周辺光線と下側周辺光線のロッドレンズ中央での傾きは $\pm\sqrt{an_0}R$ となる。 r_c からロッドレンズの側面までの距離は $R - r_c$ なので、上側周辺光線と下側周辺光線のロッドレンズ中央での傾きは $\pm\sqrt{an_0}(R - r_c)$ とみなすことができる。上側周辺光線のロッドレンズ中央での傾きが $-\sqrt{an_0}(R - r_c)$ であるとすると、数式(2.25)から r_{a2} と α_{a3} はそれぞれ数式(2.29)と(2.30)になる。

$$\begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{a2} \\ \alpha_{a2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_c \\ -\sqrt{an_0}(R - r_c) \end{pmatrix}, \quad (2.28)$$

$$r_{a2} = D' (A' - B' \sqrt{an_0}) r_0 + B' \sqrt{an_0} R, \quad (2.29)$$

$$\alpha_{a2} = A' (D' \sqrt{an_0} - C') r_0 - A' \sqrt{an_0} R. \quad (2.30)$$

下側周辺光線のロッドレンズ中央での傾きは $\sqrt{an_0}(R - r_c)$ であるから、 (r_{a3}, α_{a3}) は数式(2.31)で表され、数式(2.25)から r_{a3} と α_{a3} はそれぞれ数式(2.32)と(2.33)になる。

$$\begin{pmatrix} r_c \\ \alpha_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{a3} \\ \alpha_{a3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_c \\ \sqrt{an_0}(R - r_c) \end{pmatrix}, \quad (2.31)$$

$$r_{a3} = D' (A' + B' \sqrt{an_0}) r_0 - B' \sqrt{an_0} R, \quad (2.32)$$

$$\alpha_{a3} = -A'(D'\sqrt{a}n_0 + C')r_0 + A'\sqrt{a}n_0R. \quad (2.33)$$

2.2.2 物体距離の変化

アレイ中のロッドレンズのアライメント精度には、ロッドレンズの配列方向に平行な方向の位置精度(配列間隔)である並進精度と、ロッドレンズの光軸方向の位置精度である物体距離精度と、ロッドレンズの傾き精度の3点が考えられる。そのうち、正立等倍像を形成するロッドレンズで像面湾曲や歪曲収差がないと仮定すれば、並進精度が低下してもアレイによる像のコントラストが低下することはない。従って、本研究においては、アレイ中のロッドレンズの物体距離と傾きの精度について検証する。

物体距離が変化したときの光線の位置と傾きを図 2.12 に示す。物体距離の変化は Δd とし、物体面から結像面までの距離は固定とする。このとき結像距離 l_1 はロッドレンズの出射面から結像面までの距離であるから $l_0 - \Delta d$ となる。物体側の主平面上の主光線、上側周辺光線及び下側周辺光線の高さをそれぞれ r_0' 、 r_0'' 、 r_0''' とし、傾きをそれぞれ α_{a1} 、 α_{a2} 、 α_{a3} とする。

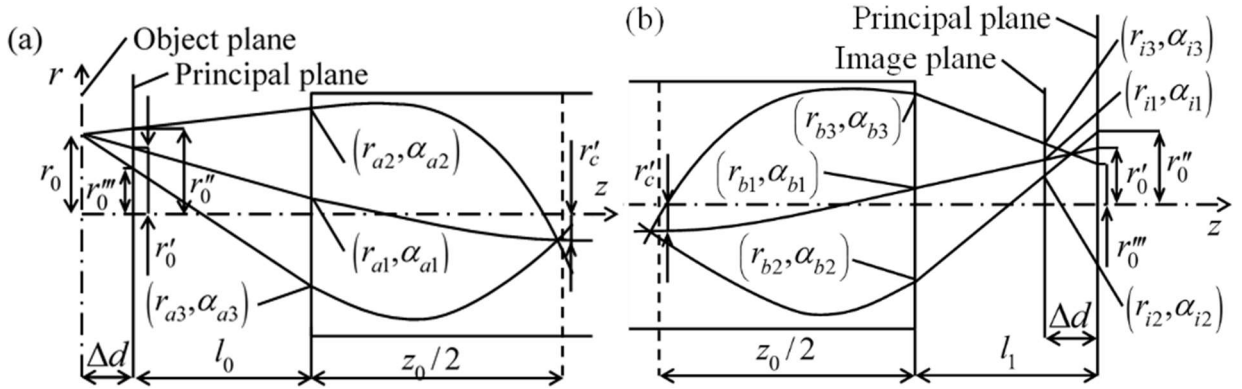


Fig. 2.12 Light ray coordinates and inclinations of GRIN rod which has a shifted object distance of Δd . Distance between object plane and image plane is fixed.

ここで r_0' と α_{a1} は光線マトリクスを用いて、それぞれ数式(2.34)と(2.35)となる。

$$r_0' = \frac{r_0}{1 + A'C'\Delta d}, \quad (2.34)$$

$$\alpha_{a1} = -\frac{A'C'r_0}{1 + A'C'\Delta d}. \quad (2.35)$$

また物体空間の主平面上の高さ r_0'' から傾き α_{a2} の光線が出射していると言えるので、光線マトリクスを用いて、それぞれ数式(2.36)と(2.37)となる。

$$r_0'' = \frac{A'\sqrt{a}\Delta d n_0 R + r_0}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta d n_0 - C')\Delta d}, \quad (2.36)$$

$$\alpha_{a2} = \frac{A'(D'\sqrt{a}\Delta d n_0 - C')(r_0 + A'\sqrt{a}\Delta d n_0 R)}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta d n_0 - C')\Delta d} - A'\sqrt{a}\Delta d n_0 R. \quad (2.37)$$

同様に物体空間の主平面上の高さ r_0''' から傾き α_{a3} の光線が出射していると言えるので、光線マトリクスを用

いて、それぞれ数式(2.38)と(2.39)となる。

$$r_0''' = \frac{r_0 - A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 + C')\Delta d}, \quad (2.38)$$

$$\alpha_{a3} = -\frac{A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 + C')(r_0 - A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R)}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 + C')\Delta d} + A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R. \quad (2.39)$$

結像面での主光線、上側及び下側周辺光線のロッドレンズの光軸からの高さをそれぞれ r_{i1} 、 r_{i2} 、 r_{i3} とする。結像空間にある主平面における主光線の高さは、物体空間にある主平面における高さに等しく、結像空間における主光線の傾きは $-\alpha_{a1}$ であるから、結像空間にある主平面における主光線の高さは数式(2.40)である。

$$r_{i1} = \frac{1 - A'C'\Delta d}{1 + A'C'\Delta d} r_0. \quad (2.40)$$

結像空間にある主平面における上側及び下側周辺光線の高さは、物体空間にある主平面における高さに等しく、結像空間における上側及び下側周辺光線の傾きはそれぞれ $-\alpha_{a2}$ 、 $-\alpha_{a3}$ であるから、結像空間にある主平面における上側及び下側周辺光線の高さはそれぞれ数式(2.41)と(2.42)である。

$$r_{i2} = \frac{\{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 + C')\Delta d\}(r_0 + A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R)}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 - C')\Delta d} + A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R, \quad (2.41)$$

$$r_{i3} = \frac{\{1 + A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 - C')\Delta d\}(r_0 - A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R)}{1 - A'(D'\sqrt{a}\Delta dn_0 - C')\Delta d} - A'\sqrt{a}\Delta dn_0 R. \quad (2.42)$$

物体距離が異なるロッドレンズを含むロッドレンズアレイの結像特性を検証するため、ロッドレンズを2列に配列したロッドレンズアレイにおいて、物体距離が異なるロッドレンズを透過する光線のうち、結像面での主光線の位置の変化とスポット径を計算する。図 2.13 は物体距離が l_0 のロッドレンズと物体距離が異なっているロッドレンズ($l_0 + \Delta d$)を配置した計算モデルの概略図で、(a)は正面図で(b)は側面図である。計算モデルには5つの物点を配置しX座標は $\{x_0\}$ 、Y座標は0である。ロッドレンズの配列間隔はX方向に R 、Y方向に $\sqrt{3}R$ である。

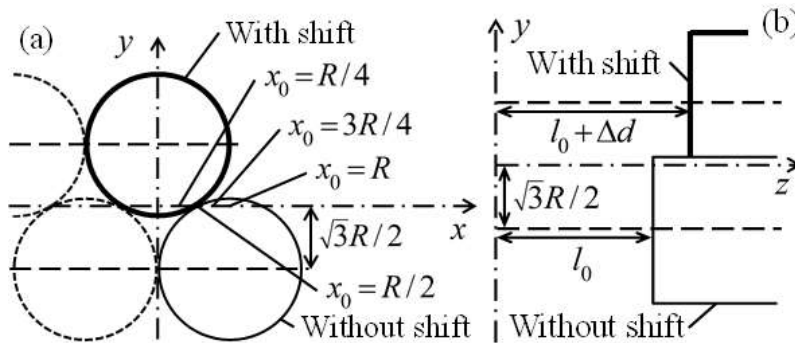


Fig. 2.13 Object distance shift in 2-row lens array. (a) Plane view, where incident surfaces of GRIN rods are shown with object-points and (b) side view.

表 2.5 の値を用いて物体距離が異なるロッドレンズを透過する主光線の結像面での位置を計算し図 2.14 (a)に示した。 Δx_{i1} は物体距離が変化したときの X 座標の変位である。また、物体距離が異なるロッドレンズを透過する光線による結像面上のスポット径の変化を図 2.14 (b)に示した。スポット径は X 方向の大きさと上側周辺光線の X 座標と下側周辺光線の X 座標の差である。

Table 2.5 GRIN rod parameters.

Axial refractive index	n_0	1.5
Index gradient constant	$\sqrt{a}$	0.84
Radius	R	0.2mm
Length	z_0	4.4mm
Object distance	l_0	2.8mm

物体距離の変化 Δd が大きくなると主光線の座標の変化 Δx_{i1} は小さくなる。物点がロッドレンズから離れるほど Δx_{i1} の絶対値は大きくなり $x_0 = R/2$ の物点で Δx_{i1} の絶対値は Δd のおよそ 10 分の 1 である。また、 Δd の絶対値が大きくなるとスポット径は増加し、スポット径の変化量は Δd のおよそ 3 分の 1 である。ところで、ロッドレンズの物体距離の変化量すなわちロッドレンズアレイ表面(入・出射面)の凹凸は、ロッドレンズアレイを作成する中で表面を研磨するため $1\mu\text{m}$ に満たないことが分かっており、すると主光線の位置の変化はその 10 分の 1 であり、スポット径の変化はその 3 分の 1 であるからいずれも $1\mu\text{m}$ 未満であり、次章で解析するロッドレンズの傾きによる結像面上の光線位置やスポット径の変化の方がずっと大きい。

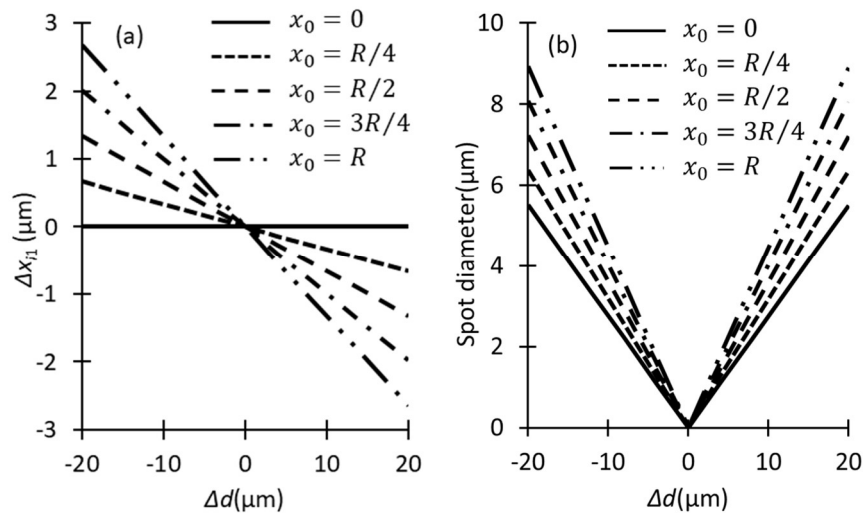


Fig. 2.14 (a) Chief ray shift and (b) spot diameter change which are caused by object distance shift.

2.2.3 ロッドレンズの傾き

次にアレイ中で傾いて配列されているロッドレンズの結像特性を解析するため、物体と傾いたロッドレンズによって形成されている像との間の光線の位置と傾きを算出する。傾いたロッドレンズの物体空間が図 2.15 (a)に、結像空間が図 2.15 (b)に示されている。ロッドレンズの傾きは以下のように定義する；ロッドレンズは入射面と Z 軸の交点で γ (単位：ラジアン)回転される。ロッドレンズの光軸と物体面との交点から Z 軸と物体面との交点までの距離は $-\Delta d$ とする。ここで、数式(2.43)の近似が成り立つとする：

$$\cos\gamma = \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + \Delta d^2}} \cong 1, \quad \sin\gamma = \frac{\Delta d}{\sqrt{l_0^2 + \Delta d^2}} \cong \frac{\Delta d}{l_0}. \quad (2.43)$$

物体空間の主平面における物体の高さ r_0 と光軸に平行な方向の物体から主平面までの距離をそれぞれ r_0' と z_0' とする。 $\Delta d^2 \cong 0$ と数式(2.43)から、 r_0' と z_0' はそれぞれ数式(2.44)と(2.45)になる。

$$r_0' = (r_0 + \Delta d) \cos\gamma \cong r_0 + \Delta d, \quad (2.44)$$

$$z_0' = (r_0 + \Delta d) \sin\gamma \cong \frac{r_0}{l_0} \Delta d. \quad (2.45)$$

結像空間にある主平面における主光線の高さ r_0'' 、上側周辺光線の高さ r_0''' 、下側周辺光線の高さ r_0''' はそれぞれ数式(2.46)、(2.47)、(2.48)となる。

$$r_0' = \frac{l_0 (r_0 + \Delta d)}{l_0 - A' C' \Delta d r_0}, \quad (2.46)$$

$$r_0'' = \frac{l_0 r_0 + (l_0 + A' \sqrt{a n_0} R r_0) \Delta d}{l_0 + A' (D' \sqrt{a n_0} - C') \Delta d r_0}, \quad (2.47)$$

$$r_0''' = \frac{l_0 r_0 + (l_0 - A' \sqrt{a n_0} R r_0) \Delta d}{l_0 - A' (D' \sqrt{a n_0} + C') \Delta d r_0}. \quad (2.48)$$

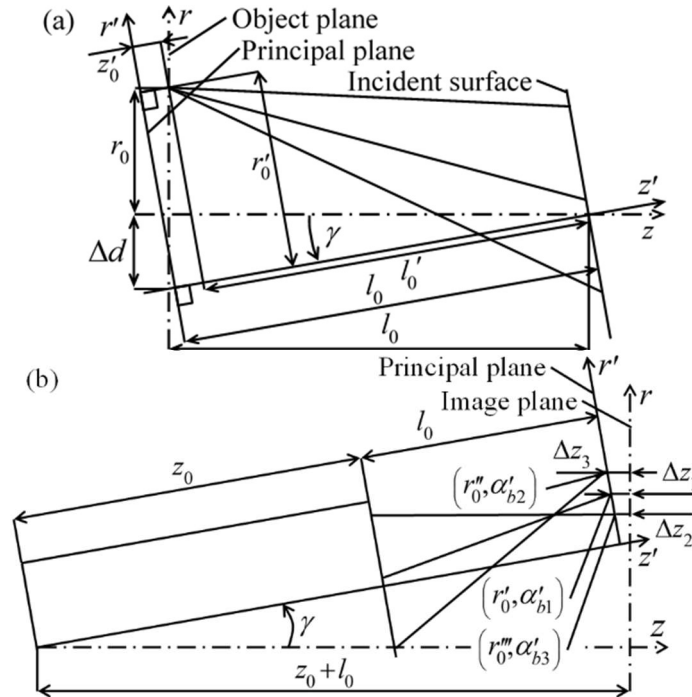


Fig. 2.15 Configuration of calculation model of tilted GRIN rod. (a) Object plane and incident surface of tilted GRIN rod. (b) Exit surface of tilted GRIN rod and image plane.

さらに、結像面における主光線の高さ r_{i1} 、上側周辺光線の高さ r_{i2} 、下側周辺光線の高さ r_{i3} は数式(2.49)、(2.50)、(2.51)である。

$$r_{i1} = \frac{z_0 + l_0}{l_0} \Delta d + r'_0 + A' C' \frac{\Delta d}{l_0} (r'_0)^2, \quad (2.49)$$

$$r_{i2} = \frac{z_0 + l_0}{l_0} \Delta d + \left(1 + \frac{A' \sqrt{a} \Delta d n_0 R}{l_0}\right) r''_0 + \frac{A' (D' \sqrt{a} n_0 + C') \Delta d}{l_0} (r''_0)^2, \quad (2.50)$$

$$r_{i3} = \frac{z_0 + l_0}{l_0} \Delta d + \left(1 + \frac{A' \sqrt{a} \Delta d n_0 R}{l_0}\right) r'''_0 - \frac{A' (D' \sqrt{a} n_0 - C') \Delta d}{l_0} (r'''_0)^2. \quad (2.51)$$

これらの数式を用いてロッドレンズが傾いた時の結像面上における主光線の位置の変化とスポット径の変化を算出する。図 2.16 は 2 列のロッドレンズアレイと物点の構成で、(a)は平面図、(b)は側面図である。計算では 5 つの物点を配置し、X 座標は $\{x_0\}$ 、Y 座標は 0 であり、傾いたロッドレンズの中心軸から物点までの Y 方向の距離は $\sqrt{3}R/2$ となっている。ロッドレンズは X 方向・Y 方向ともに Δd 傾いている。

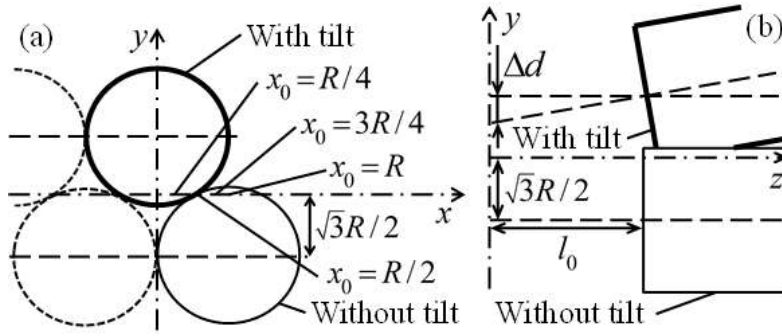


Fig. 2.16 Configuration of tilted GRIN Rod in 2-row lens array. (a) Plane view: incident surfaces of GRIN rods are shown in object space. (b) Side view.

ロッドレンズの傾きによる結像面上での主光線の位置の変化を図 2.17 (a)に示す。計算には表 2.5 の値を用いている。ここで Δx_{i1} は傾いていないロッドレンズの結像面上での主光線の X 座標に対する変化で表している。図 2.17 (b)はロッドレンズの傾きによる結像面上でのスポット径で、上側周辺光線と下側周辺光線の X 座標の差である。

主光線の位置の変化は 5 つの物点で違いがほとんど見られず、グラフは 1 本の直線に一致している。主光線の位置の変化 Δx_{i1} は傾き Δd に比例し、 Δx_{i1} の変化量は Δd の変化量の数倍である。一方、スポット径はロッドレンズから離れている物点ほど大きく、 $x_0 = R/2$ のスポット径は Δd の変化量のおよそ 100 分の 1 である。また、数式(2.50)と(2.51)から $x_0 = 0$ のスポット径は $2AD\sqrt{a}\Delta d^3 n_0/l_0$ であり、 Δd の 3 乗に比例する。図 2.17 (b)でグラフが曲線となっているのはこのためである。

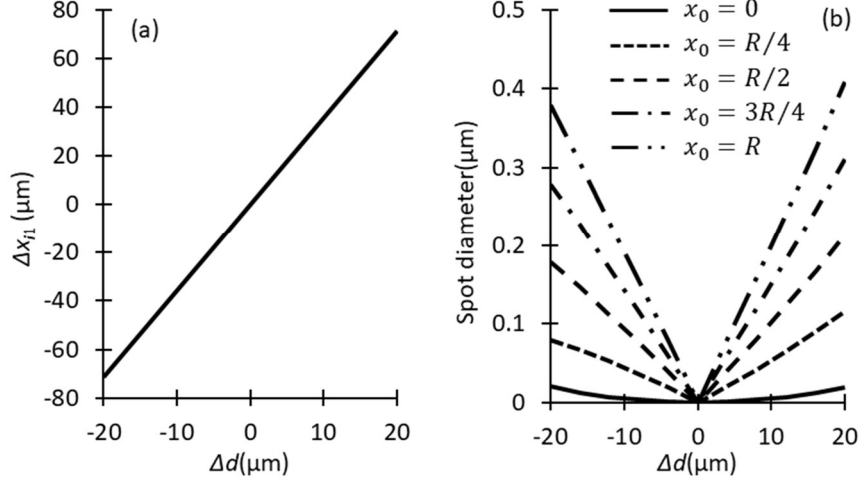


Fig. 2.17 (a) Chief ray shift and (b) spot diameter change of tilted GRIN rod on image plane.

次に、1本の傾いたロッドレンズを含むロッドレンズアレイによる像の強度分布を算出する。図 2.18 は計算に用いたモデルの概略図である。計算モデルは1本の傾いたロッドレンズを含むロッドレンズと点光源からなる。傾いたロッドレンズは $(x, y) = (0, \sqrt{3}R/2)$ に位置している。ここで物体面上でX軸とY軸の両方に対し45度の方向を t 方向とし、1本のロッドレンズは t 方向に Δd 傾いている。ロッドレンズはX軸方向に $R/2$ 間隔で、Y軸方向に $\sqrt{3}R$ 間隔で配列されている。計算には表 2.5 の値を用いる。なお、点光源の強度分布は数式(2.52)で示されるガウス分布であると仮定する。

$$I_e(r) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad a = 2\sigma\sqrt{2\ln 2}, \quad (2.52)$$

ここで、 a は強度分布の半値全幅で、 $a = 10\mu\text{m}$ とする。強度分布の計算において、ロッドレンズの視野 r_m は数式(2.53)で与えられる：

$$r_m = -R \sec \frac{\sqrt{a}z_0}{2}. \quad (2.53)$$

r_m を考慮し計算モデルには9つのロッドレンズを配列している。1本のロッドレンズの強度分布は数式(2.54)で与えられる：

$$I(t) = I_0 \sqrt{1 - (t/r_m)^2}, \quad (2.54)$$

ここで、 I_0 は結像面におけるロッドレンズの光軸上の強度である。傾いたロッドレンズによる像は結像面上における位置が変化だけで、傾いていないロッドレンズと同様に強度が数式(2.54)の通りに低下する。

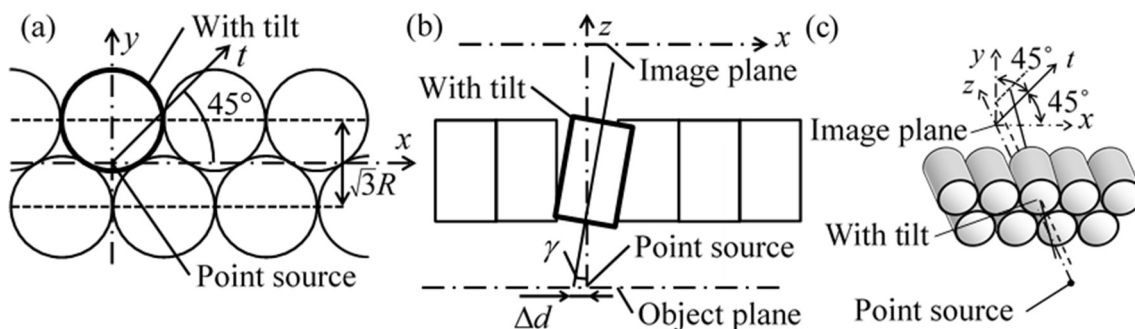


Fig. 2.18 Configuration of calculation model of lens array which has a tilted GRIN rod. Tilt of GRIN rod is inclined to t direction. (a) Plane view: incident surfaces of GRIN rods are shown in object space. (b) Side view. (c) Perspective view.

傾いたロッドレンズを含むアレイによる像の結像面上の t 方向における強度分布を図 2.19 に示す。強度の値は、傾いていないロッドレンズで構成されるアレイによる像の強度分布における最大値との比で示している。実線は 1 本のロッドレンズの傾きを (a) $2\ \mu\text{m}$ (傾き γ は 0.04°)、(b) $3\ \mu\text{m}$ 、(c) $4\ \mu\text{m}$ 、(d) $5\ \mu\text{m}$ としたときの強度分布である。5 線は傾いていないロッドレンズで構成されるアレイによる像の強度分布を示す。

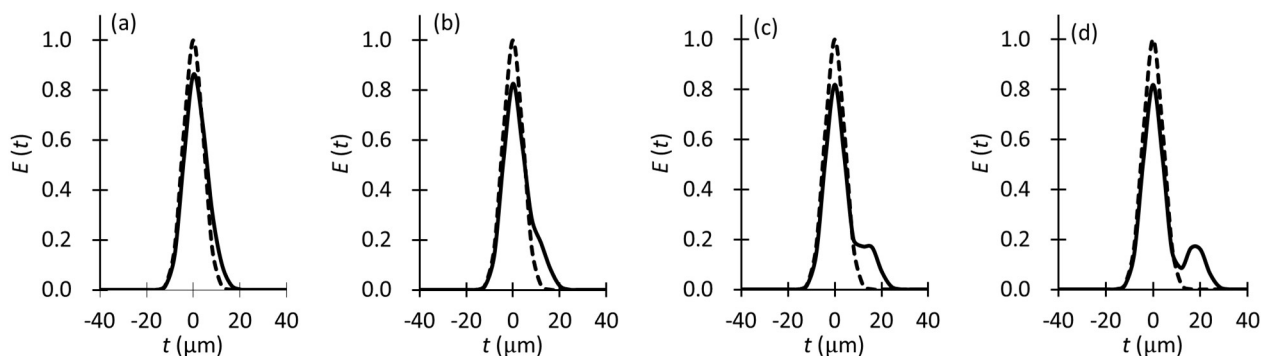


Fig. 2.19 Intensity distributions with lens array which has a tilted GRIN rod in t direction in image space. Solid curve indicates intensity including tilted GRIN rod. Broken curve indicates intensity without the tilt of GRIN rod. GRIN rod tilts are (a) $2\ \mu\text{m}$, (b) $3\ \mu\text{m}$, (c) $4\ \mu\text{m}$, and (d) $5\ \mu\text{m}$.

ロッドレンズの傾きが大きくなるほど強度分布の最大値は減少し、強度分布の最大値の右側が広がる。図 2.19 (d) のロッドレンズの傾き $5\ \mu\text{m}$ では像の強度分布が 2 つのピークを持つ。このとき、ロッドレンズの傾きの値は光源の FWHM の値の半分になっている。ロッドレンズの傾きが光源の FWHM の値の半分以上のとき、像の強度分布は 2 つのピークを持つ。

2.3 ロッドレンズ傾きの測定

2.3.1 測定方法

本研究ではアレイを構成するロッドレンズの傾きを文献 13 において提案されている方法で測定する。配列検査機 (GRIN array tester; GAT) はアレイを構成するロッドレンズの傾きを測定し、直動ステージ (linear motion stage; LMS)、レーザー光源 (laser sources)、受光機 (photodetector) から構成される。図 2.20 (a) は配列検査機の概略図である。直動ステージによって被検体となるロッドレンズアレイをロッドレンズの配列方向に搬送する。受光機はフォトディテクター (phototransistor) とスリット (slit) からなり、ロッドレンズに入射したレーザー光線を受光する。X 方向をロッドレンズの配列方向、Z 方向をロッドレンズの光軸方向、X

方向とZ方向の両方に直行する方向をY方向とする。図 2.20 (b)に直動ステージとレーザー光源と受光機の配置を示し、直動ステージによって搬送されるロッドレンズアレイの手前を Near side、奥を Far side とする。

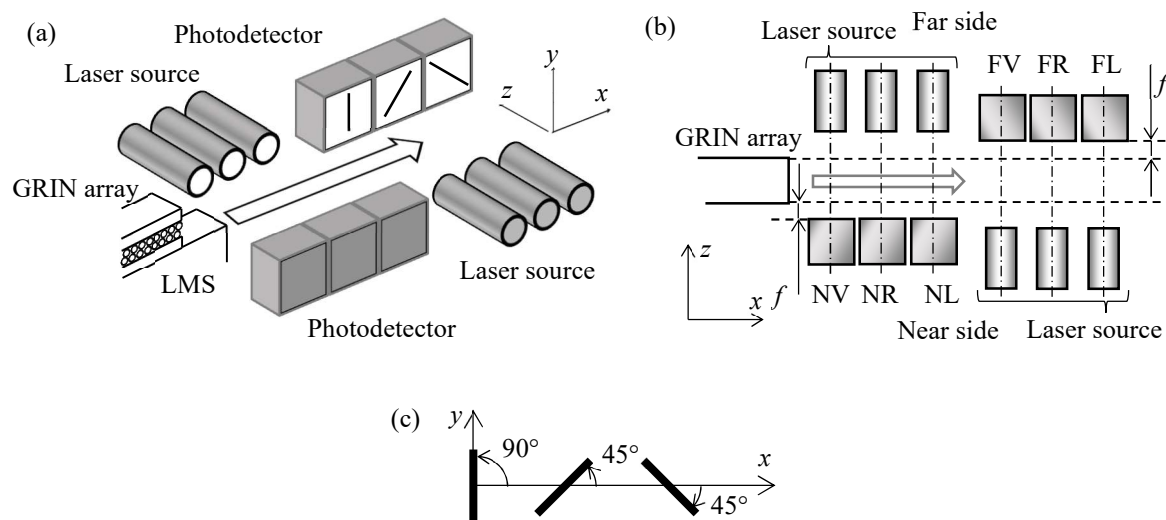


Fig. 2.20 (a) Configuration of GAT, (b) arrangement of photodetectors and laser sources, and (c) slit angle configuration.

配列検査機には6対のレーザー光源と受光機が配置されている。それぞれのレーザー光源と受光機の位置とスリットの角度を表 2.6 に示す。スリットの角度はロッドレンズの配列方向であるX方向に対する角度で示している。NV、NR、NL で示されているレーザー光源と受光機の対は受光機が Near Side に配置され、レーザー光源が Far Side に配置される。FV、FR、FL で示されているレーザー光源と受光機の対は受光機が Far Side に配置され、レーザー光源が Near Side に配置される。ロッドレンズアレイから受光機までの距離はロッドレンズの焦点距離に等しく、レーザー光源はレーザー光線が受光機の入射点に正確に入射するように配置される。

レーザー光源と受光機の対にあるスリットの向きについて図 2.20 (c)に示す。NV と FV で示されているレーザー光源と受光機の対にあるスリットはX方向に対して垂直になっている。NR と FR で示されているレーザー光源と受光機の対にあるスリットはX方向に対して右へ45度傾いていて、NL と FL で示されているレーザー光源と受光機の対にあるスリットはX方向に対して左へ45度傾いている。文献 13 に記載の測定装置に対して、本研究の配列検査機は45度のスリットを持つレーザー光源と受光機の対が追加されており、Y方向の位置精度が2倍向上している。

Table 2.6 Photodetectors, slits and laser sources in the GAT.

Photodetector		Slit	Laser source
Sym.	Location	Angle (°)	Location
NV	Near side	90	Far side
FV	Far side	90	Near side
NR	Near side	45	Far side
FR	Far side	45	Near side
NL	Near side	-45	Far side
FL	Far side	-45	Near side

直動ステージによって被検体であるロッドレンズアレイ搬送されるとともに NV のレーザー光源から発せられたレーザー光線がロッドレンズを透過して NV の受光機に入射する。レーザー光線の直径は 5mm で波長は 760nm である。図 2.21 は NV の受光機に入射したレーザー光線の強度分布を示し、水平方向は配列検査機の X 軸で、垂直方向はレーザー光線の強度を示す。レーザー光源と受光機の対にあるスリットの幅は 5 μ m である。レーザー光源は強度分布の半値全幅(The full width at half maximum, FWHM) が 30 μ m のレーザービームを出射する。本研究ではロッドレンズを 2 列に配列したロッドレンズアレイを扱い、ロッドレンズの直径は 0.56mm で、長さは 4.4mm である。

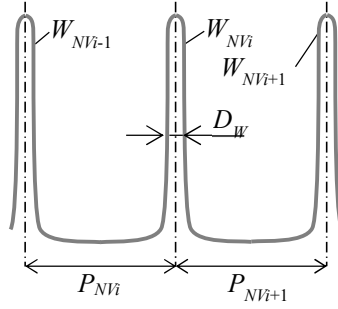


Fig. 2.21 Intensity distribution of laser light on photodetector in NV.

レーザー光源と受光機の対にあるスリットの直前をロッドレンズの光軸が通過したとき、強度はピークに達する。ピークの間隔 P_{NVi-1} , P_{NVi} , P_{NVi+1} ... はレーザー光源と受光機の対 NV で測定された図 2.22 (a) のロッドレンズの Near side 側の面の配列間隔である。同様に、図 2.22 (b) のロッドレンズの Far side 側の面の配列間隔は、レーザー光源と受光機の対 FV で測定される。本研究で測定されたロッドレンズアレイの P_{NVi} と P_{FVi} の平均値は 0.283mm である。図 2.22 (c) に示した通り、ロッドレンズの X 軸方向の傾き D_{xi} は数式(2.55)から算出される：

$$D_{xi} = P_{FVi} - P_{NVi}. \quad (2.55)$$

直動ステージの位置精度によって決まるロッドレンズの傾きの測定精度は 1 μ m である。

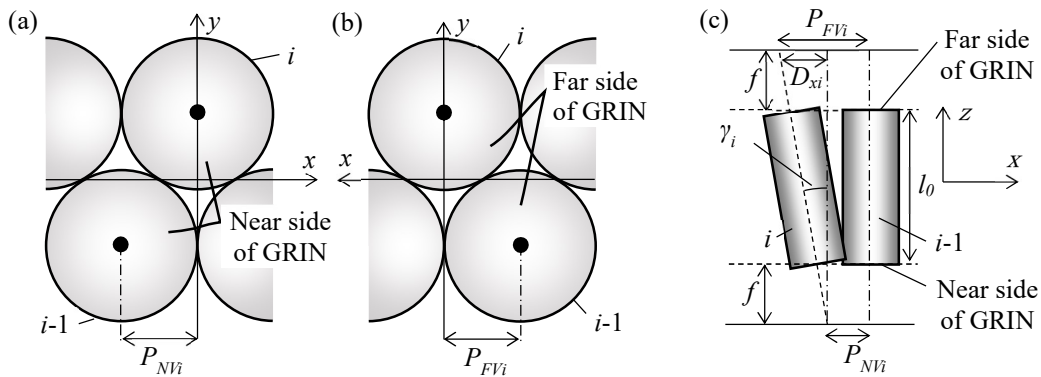


Fig. 2.22 (a) arrangement interval of near-side surface, (b) arrangement interval of far-side surface, and (c) GRIN tilt.

図 2.23 (a) はレーザー光源と受光機の対 NR のスリットを示す。ロッドレンズが配列検査機の Y 軸方向に傾いているとレーザー光線は Y 軸方向に曲げられ、スリットの y_i に入射する。NR のスリットは 45 度傾いて

いるので、図 2.23 (b)に示したように受光機で測定される強度のピークの位置は $x_i - y_i$ となる。図 2.23 (c)に示したレーザー光源と受光機の対 NL のスリットにおいては、ロッドレンズが配列検査機の Y 軸方向に傾いているとレーザー光線は Y 軸方向に曲げられ、スリットの y_i に入射する。NL のスリットは NR とは逆向きに 45 度傾いているので、図 2.23 (d)に示したように受光機で測定される強度のピークの位置は $x_i + y_i$ となる。

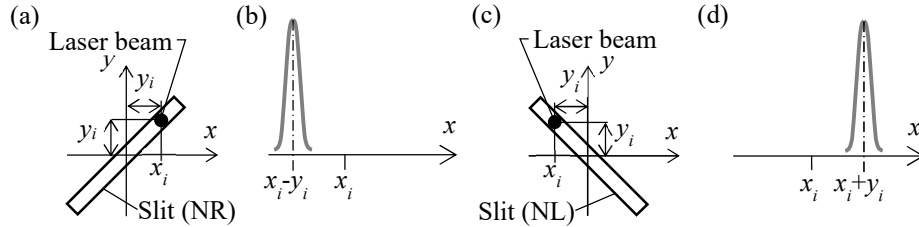


Fig. 2.23 (a) Position of laser beam in NR, (b) position of NR waveform, (c) position of laser beam in NL, and (d) position of NL waveform.

ここで、ロッドレンズの Near side 側の面の Y 位置は数式(2.56)で与えられる：

$$y_{Ni} = (P_{NRi} - P_{NLi}) / 2. \quad (2.56)$$

同じように、Far side 側の面の Y 位置は数式(2.57)で与えられる：

$$y_{Fi} = (P_{FRi} - P_{FLi}) / 2. \quad (2.57)$$

これらを用いてロッドレンズの Y 方向の傾きは数式(2.58)となる：

$$D_{yi} = y_{Fi} - y_{Ni}. \quad (2.58)$$

2.3.2 測定結果

ロッドレンズアレイのロッドレンズの傾きを測定した結果を図 2.24 に示す。4 つのグラフはそれぞれ異なるロッドレンズアレイ(a)-(d)の測定結果を示す。ロッドレンズアレイ(a)-(d)はそれぞれ 219mm の長さでおよそ 800 本のロッドレンズで構成されているが、それぞれのグラフは測定結果の一部を示し、グラフの横軸に一方の端部から数えて何本目のロッドレンズかを示す。ロッドレンズアレイ(a)について 9 本のロッドレンズの傾きを測定した結果を図 2.24 (a)に示す。図 2.24 (a)は傾き D_x が $0 \mu\text{m}$ の 722 本目のロッドレンズを中心に測定値を示している。 D_x は 723 本目のロッドレンズで $2 \mu\text{m}$ で、傾き D_y は 722 本目のロッドレンズで $2 \mu\text{m}$ である。

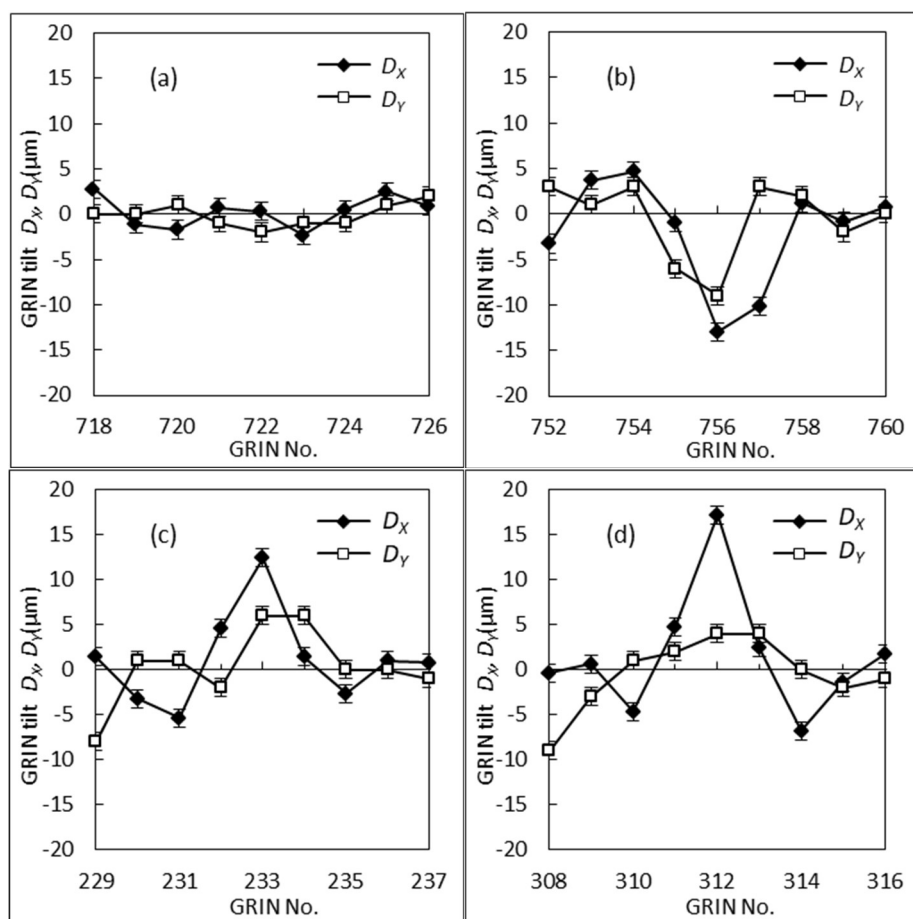


Fig. 2.24 Measured values of the GRIN tilts D_x and D_y .

図 2.24 (b)-(d)はロッドレンズアレイ(b)-(d)のロッドレンズの傾きの測定結果で、それぞれのロッドレンズアレイの傾き D_x の最大値を中心に9本のロッドレンズの測定結果を示している。測定結果を図 2.14 (b)に示したロッドレンズアレイ(b)では、傾き D_x の絶対値の最大値は756本目の13 μm で、757本目は同じ方向に10 μm 傾いている。傾き D_y の絶対値の最大値は756本目の9 μm である。測定結果を図 2.14 (c)に示したロッドレンズアレイ(c)では、傾き D_x の絶対値の最大値は233本目の12 μm で、傾き D_y の絶対値の最大値は233本目の6 μm である。測定結果を図 2.14 (d)に示したロッドレンズアレイ(d)では、傾き D_x の絶対値の最大値は312本目の17 μm で、傾き D_y の絶対値の最大値は312本目の4 μm である。4本のロッドレンズアレイ(a)-(d)の中で傾き D_x の絶対値の最大値はロッドレンズアレイ(d)の17 μm で、傾き D_y の絶対値の最大値はロッドレンズアレイ(b)の9 μm である。ロッドレンズアレイ(b)は傾き D_x の絶対値の最大値はロッドレンズアレイ(c)と同程度であるが、隣のロッドレンズも同じ方向に傾いている。傾きが最大となったロッドレンズの周りのロッドレンズも5 μm 程度は傾いていて、1本のロッドレンズだけが傾いているのではないことが分かった。また、傾き D_y の絶対値の最大値は D_x よりも小さい値となった。これは、ロッドレンズがX方向に配列され、Y方向にはサイドプレートと呼ばれるフレームにより押さえられているためである。

2.3.3 傾いたロッドレンズを含むアレイによる像の強度分布

このセクションでは傾いたロッドレンズを含むロッドレンズアレイによる像の強度分布を測定し、ロッドレンズの傾きが像の強度分布に与える影響を詳細に分析する。まず、アレイを構成している複数のロッドレンズで像が形成されるときの特徴について解説する。LEDアレイのLEDの配列間隔に比べ、ロッドレンズ

アレイのロッドレンズの配列間隔は大きい、つまり LED ヘッドの光学系は光源の LED とロッドレンズアレイが 1 対 1 に対応していない。また、ロッドレンズの画角(Field of view)はロッドレンズの配列間隔より大きい。すなわち、1 個の LED は複数のロッドレンズによって像が形成され、結像面では複数のロッドレンズによる像が重なり合って 1 個の LED の像が形成される。ロッドレンズの画角と配列間隔について図 2.25 (a) に示す。本研究で用いるロッドレンズアレイでは、1 個の LED の像は 7 本のロッドレンズによって像が形成され、結像面では 7 本のロッドレンズの像が重なり合って 1 個の LED 像が形成されている。さらに、傾いたロッドレンズと正しく配列されたロッドレンズの像について図 2.25 (b) に示す。ロッドレンズアレイのロッドレンズが傾いている場合、7 本のロッドレンズによる像のうち、傾いているロッドレンズによる像はその他のロッドレンズによる像とは重なり合わない。そのため、ロッドレンズアレイに傾いているロッドレンズがあると、像のコントラストが低下する。

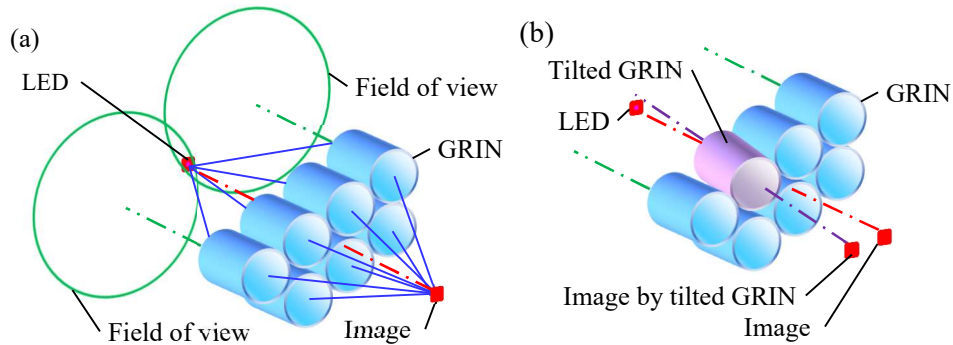


Fig. 2.25 (a) Fields of view of GRIN (b) Images by a tilted GRIN and accurately arranged GRINs.

ロッドレンズの傾きが像の強度分布に与える影響を詳細に分析するため、図 2.24 (a)-(d)にロッドレンズの傾きの測定値を示したロッドレンズ(a)-(d)の各位置での LED の像の強度分布を測定する。さらに測定結果を傾きの方向と大きさから計算した結果と比較する。測定するロッドレンズアレイ、LED アレイ、対物レンズと CCD カメラの構成について図 2.26 に示す。ロッドレンズアレイのロッドレンズの配列方向と、LED アレイの LED の配列方向はともに X 方向で、互いに平行になるように配置する。また、LED アレイからロッドレンズアレイまで間隔と、ロッドレンズアレイから対物レンズの被写体面までの間隔が等しくなるように配置する。さらに、測定位置に最も近い LED だけを点灯させて強度分布を測定する。この装置構成を用いてロッドレンズアレイ(a)-(d)の 722 本目、756 本目、233 本目と 312 本目付近の LED の像の強度分布を得る。光源の LED の発光部は一辺が $10.5 \mu\text{m}$ の正方形である。

像の強度分布を計算で算出するとき、数式(2.59)の強度分布を光源とする。

$$I_e(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\sqrt{x^4 + y^4}}{2\sigma^2}\right), \quad a = 2\sigma\sqrt{2\ln 2}, \quad (2.59)$$

強度分布の FWHM は $a = 10.5 \mu\text{m}$ とする。光源の LED の強度分布を図 2.27 の実線で、数式(2.59)の強度分布を破線で示す。2 つの強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。強度の値が 0.65 以上及び 0.20 以下で数式(2.59)の強度分布は測定値より広がっているが、それらの値の間ではほぼ一致している。

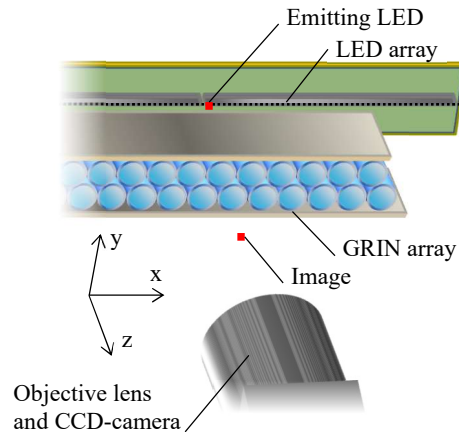


Fig. 2.26 Configuration of measurement of image intensity.

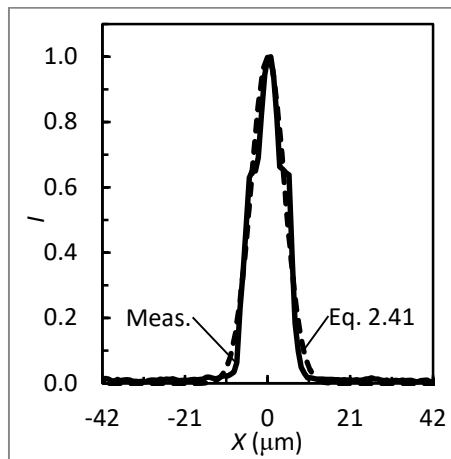


Fig. 2.27 Intensity distribution of the LED. The solid curve indicates the measured distribution, and the dotted curve indicates Eq. (2.59) with an FWHM of $a = 10.5\mu\text{m}$.

図 2.24 (a)-(d)に傾きの測定値を示したロッドレンズアレイ(a)-(d)の一部による光源のLEDの像を測定した強度分布を図 2.28 (a)-(d)に示す。強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。図 2.28 (b)の強度分布にはピークの左にサブピークがあり、右側の盛り上がりはわずかで、強度の値が 0.8 以下の領域が図の中心から左下に向かって広がっている。これらは 2 本のロッドレンズが同方向に連続して傾いていることによる。図 2.28 (c)の強度分布はピークの左側が強度の値が 0.8 程度の盛り上がりがあり、右側に 0.6 程度の盛り上がりがあり、ピークの左側の強度が右側よりやや大きくなっている。図 2.28 (d)の強度分布はピークの右側と左側の値がほぼ同じになっている。4 つの強度分布の中で図 2.28 (b)が最も幅が広く、(c)と(d)は同程度である。一方、ロッドレンズの傾きの程度が最も小さいロッドレンズアレイ(a)の強度分布は 4 つの強度分布の中で最も広がりが小さく、X 方向にも Y 方向にも強度分布は左右対称であり、ロッドレンズの傾きの程度と強度分布の広がりには相関がみられる。

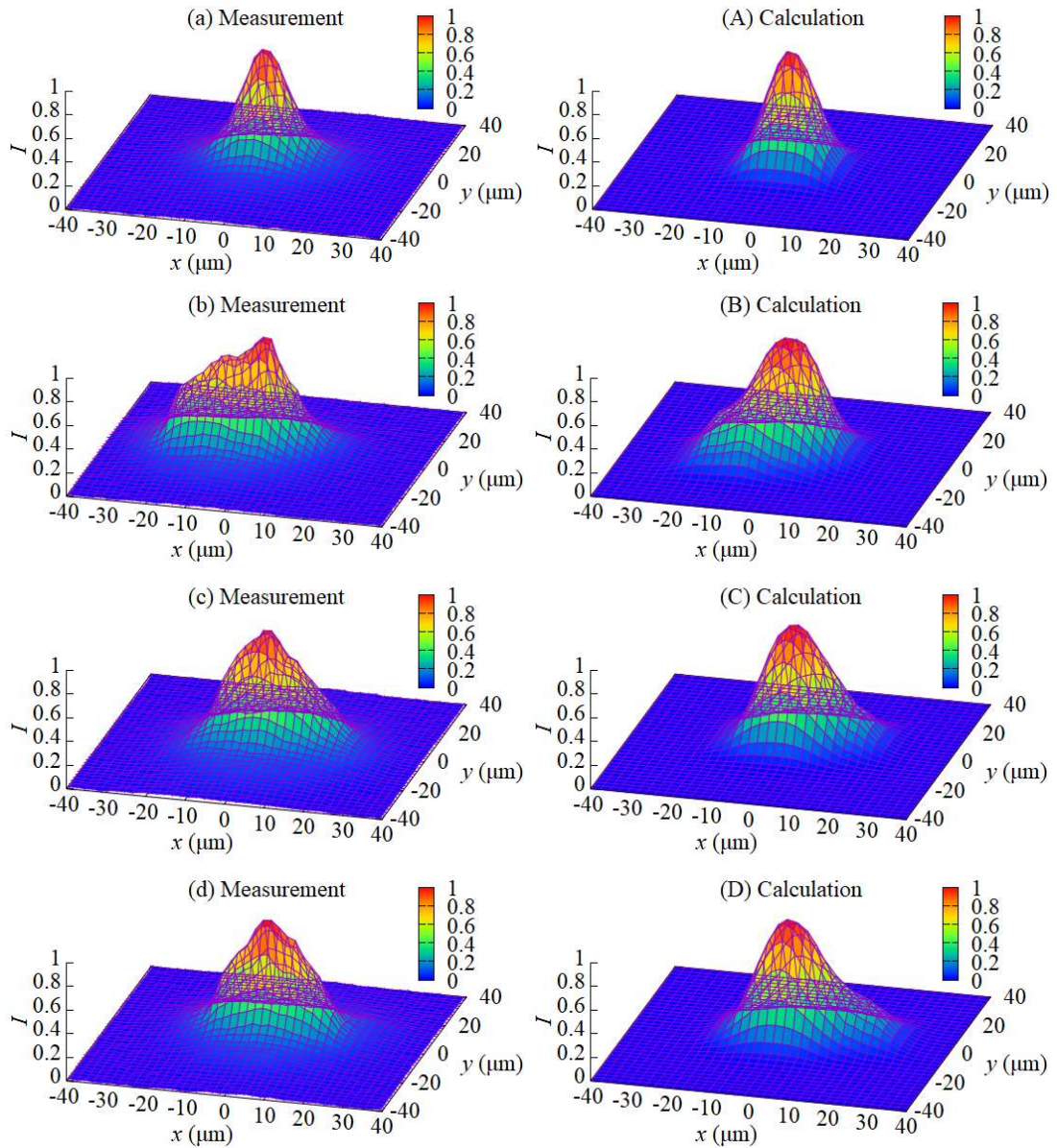


Fig. 2.28 Isometric plots of intensity distribution for images obtained using GRIN arrays: measured distributions are shown in lowercase letters (a)-(d), whereas calculated distributions are shown in uppercase letters (A)-(D).

さらに、結像面のX方向を横軸にY方向を縦軸とした強度分布を図 2.29 に示す。ロッドレンズアレイ(a)-(d)に対する測定値は図 2.29 (a)-(d)である。これらの強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。図 2.29 (b)の強度分布では強度の値が 0.8 以下の領域がピークの左下に向かって広がっている。図 2.29 (c)と (d)の強度分布は、(a)に比べてピークの左側と右側とに強度の低い領域が広がり X 方向の幅が広がっている。図 2.29 (c)の強度分布ではピークの左側が右側よりわずかではあるが明るいのに対し、図 2.29 (d)の強度分布ではピークの右側と左側がほぼ同じ値になっている。ロッドレンズの傾きの測定結果では、傾き D_x はロッドレンズアレイ(c)に比べて(d)のほうが大きかったが、強度分布に大きな差はみられない。

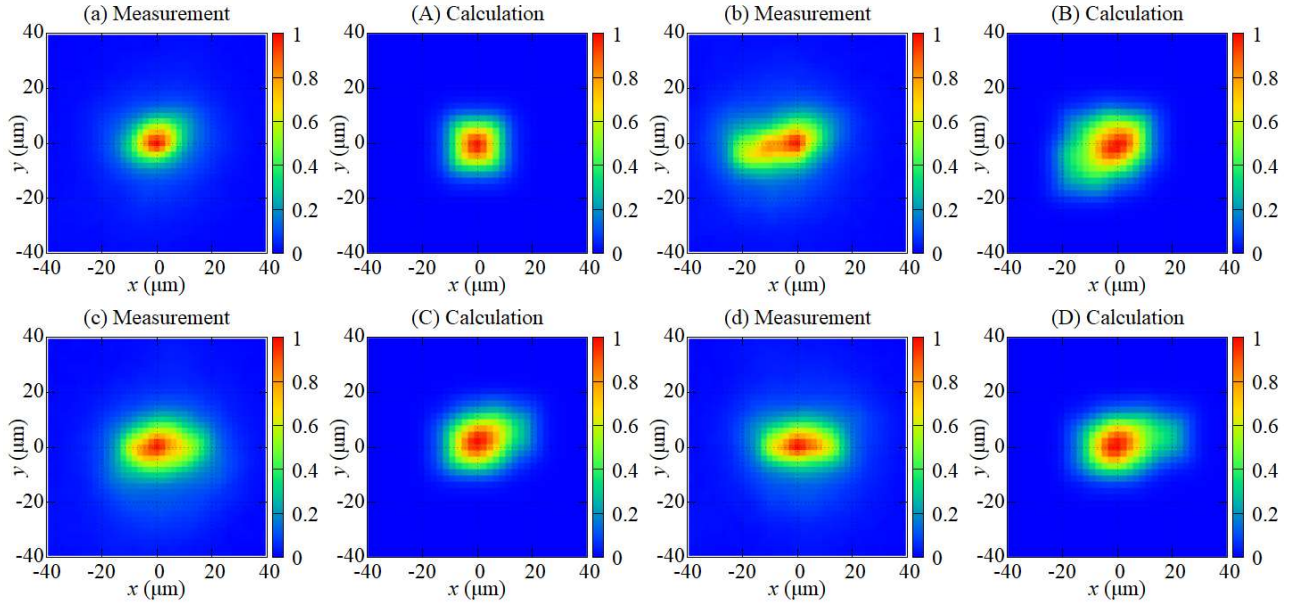


Fig. 2.29 Intensity distribution of the image obtained using GRIN array: measured distributions are shown in lowercase letters (a)-(d), whereas calculated distributions are shown in uppercase letters (A)-(D).

表 2.7 の値とロッドレンズの傾きの測定値を用いてロッドレンズアレイ(a)-(d)による像の強度分布を 2.2.3 の方法で算出した。角が丸い矩形の発光部を再現するため、光源の強度分布に数式(2.41)を用い、図 2.24 (a)に示したロッドレンズアレイ(a)の 722 本目とその周辺のロッドレンズ傾きの測定結果をもとに算出した像の強度分布が測定結果に一致するように、FWHM の値を $a = 14 \mu\text{m}$ とした。

Table 2.7 GRIN parameters.

Index gradient constant	$\sqrt{a}$	0.84 mm^{-1}
Radius	R	0.28 mm
Length	z_0	4.4 mm

ロッドレンズの最大画角 r_m はロッドレンズの半径 R をもちいて数式(2.53)で与えられ、ロッドレンズによる像の強度分布は数式(2.54)を x, y で書き直した数式(2.60)で与えられる。

$$r_m = -R \sec \frac{\sqrt{a} z_0}{2}, \quad (2.53)$$

$$I_g(x, y) = I_0 \sqrt{1 - \left(\sqrt{x^2 + y^2} / r_m \right)^2}. \quad (2.60)$$

図 2.24 (a)-(d)に示したロッドレンズアレイ(a)-(d)のロッドレンズの傾きの測定値を用いて算出した強度分布を図 2.28 (A)-(D)に示す。強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。図 2.28 (A)のピークの外側の強度は図 2.28 (a)より小さくなっている。これは、ロッドレンズによる像の計算に収差や湾曲など像のコントラストを低下させる要因を加味していないためである。強度分布はX方向とY方向いずれに対しても対称の分布となっている。これはロッドレンズアレイ(a)でロッドレンズの傾きの測定値が小さかったことと矛盾しない。図 2.28 (B)の強度分布にはピークの左に強度 0.4 程度の盛り上がりがある。図 2.28 (b)でピ

ークの左側にあるサブピークは計算では表れていない。図 2.28 (C)と(D)の強度分布ではピークの周辺にサブピークはみられず、測定した強度分布である図 2.28 (c)と(d)とは一致しない。計算で求めた図 2.28 (C)と(D)の強度分布はその広がり程度が測定した強度分布である図 2.28 (c)と(d)とは大まかに一致するものの、測定した強度分布で見られたサブピークや盛り上がりは一致しない。

さらに、計算で算出した強度分布を結像面の X 方向を横軸に Y 方向を縦軸として、ロッドレンズアレイ (a)-(d) に対する計算値を図 2.29 (A)-(D) に示す。これらの強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。図 2.29 (B) の強度分布では強度の値が 0.5 以下の領域がピークの左下に向かって広がっているが、測定結果の図 2.29 (b) と分布の広がりと比較して、計算結果はマイナス Y 方向へ広がっていて、強度の値がやや異なる。また、計算の強度分布である図 2.29 (C) は測定した強度分布である図 2.29 (c) と比べてピークの右側への広がりがやや大きい。さらに、計算の強度分布である図 2.19 (d) は測定した強度分布である図 2.29 (D) と比べてピークの右側への広がりがやや大きく、図 2.19 (C) と (D) を比べると (D) の強度分布のほうがピークの右側への広がりが大きくなっていて、測定の結果とは異なっている。

次に、ロッドレンズアレイ (a)-(d) による像の強度分布の測定結果と計算結果について、X 軸上の分布を図 2.20 (a)-(d) に測定結果を実線で計算結果を破線で示す。これらの強度分布はそれぞれの最大値で規格化されている。ロッドレンズアレイ (a) について測定結果と計算結果を比較した図 2.20 (a) の強度の値 0.4 以上において 2 つの波形はほぼ一致しており、FWHM は一致している。強度の値 0.2 以下においては測定値のほうが計算値よりも値が大きく分布が広がっている。これは、計算においてロッドレンズの収差や像の湾曲が加味されていないためと考えられる。ロッドレンズアレイ (b) について測定結果と計算結果を比較した図 2.20 (b) において、測定した強度分布はピークの左側で 2 つのサブピークを持つのに対し、計算した強度分布はなだらかに減少し測定した強度分布より値が小さい。これは、図 2.19 (b) と (B) を比較すると、計算した強度分布である (B) の方がマイナス Y 方向に分布が広がっているため、X 軸上の輝度分布は測定結果より計算結果の方が値が小さくなると思われる。ロッドレンズアレイ (c) について測定結果と計算結果を比較した図 2.20 (c) において、測定した強度分布ではピークの右側に 2 か所の盛り上がりがみられるのに対し、計算の強度分布ではなだらかに減少しており、詳細な強度分布は一致していないが、大まかには一致しているといえる。ロッドレンズアレイ (d) について測定結果と計算結果を比較した図 2.20 (d) において、測定した強度分布ではピークの右側に 2 か所の盛り上がりがみられるのに対し、計算の強度分布では盛り上がりは 1 か所で、輝度の値は計算の盛り上がりの方が小さくなっており、詳細な強度分布は一致していないが大まかに一致している。

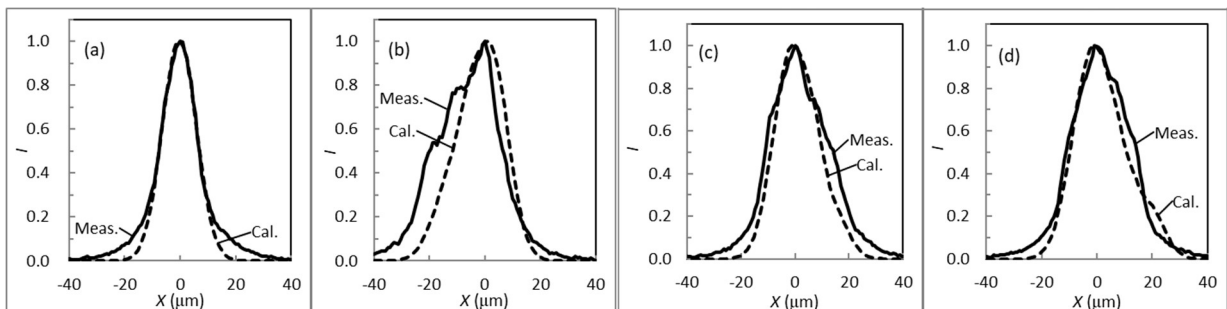


Fig. 2.30 Intensity distributions around the tilted GRIN: solid curves indicate measured luminance distributions, whereas dotted curves indicate calculated luminance distributions.

2.4 考察

ロッドレンズアレイのアライメント精度には、ロッドレンズの配列間隔精度と、物体距離精度と、傾き精度の3点が考えられる。そのうち、配列間隔精度はロッドレンズが正立等倍像を形成することから無視できるので、物体距離精度と傾き精度のどちらの影響が大きいかを光線マトリクスにより解析した。その結果、主光線の結像面上での位置の変化は、物体距離の変化の0.1倍であったのに対して、傾きの数倍であった。また、スポット径の変化は、物体距離の変化のおよそ半分で、傾きの変化の5分の1であった。すなわち、ロッドレンズアレイのロッドレンズの配列精度の中では傾きの方が大きく、像の位置の変化が大きく、スポット径の変化はあまり大きくなく、傾いたロッドレンズによる像は結像面上で平行移動することが明らかになった。さらに、この結果から、ロッドレンズアレイによる像の強度分布を算出したところ、傾きが大きいくほどピーク強度が低下し、強度分布はブロードになり、傾きが5 μm 程度でサブピークが現れることが分かった。像の強度分布の解析によって、ロッドレンズアレイでは、1つ1つのロッドレンズの像が重なり合ってアレイによる像が形成されてので、ロッドレンズが大きく傾いていると、そのロッドレンズによる像が重なり合わないため、ロッドレンズアレイによる像のコントラストが低下することが明確になった。

次に、ロッドレンズアレイのロッドレンズの配列間隔の表裏での差を計測することでロッドレンズの傾きを測定し、測定結果を盛り込んだ計算モデルによる像の強度分布と、カメラで測定したロッドレンズアレイによる像の強度分布を比較したところ、サブピークの有無や強度など、詳細な強度分布は一致しなかったが、強度分布の裾野がどの方向へどの程度広がっているか、大まかな分布については一致し、ロッドレンズ傾きの測定結果が実物とほぼ一致していることが確認できた。

今後は、本研究によって明らかになった、ロッドレンズアレイによる像のコントラストが低下する原因であるロッドレンズの傾きを低減する方法を検討していきたい。また、LEDプリンタで印刷品質が低下するのはコントラストの均一性が低下することが原因であるから、焦点深度の深いロッドレンズアレイと浅いロッドレンズアレイとでロッドレンズ傾きによるコントラストの低下の程度が異なるのかを比較することで、ある程度傾きを持ったロッドレンズが含まれているロッドレンズアレイでも、ロッドレンズアレイ像のコントラストの均一性が低下しないロッドレンズアレイの仕様を検討したい。

参考文献

1. A. Yamamura, "Simulating resolution of gradient index array using illumination analysis," in *The 24th International Conference on Digital Printing Technologies, NIP24 and Digital Fabrication 2008 Technical Program and Proceedings*, 216-218, The Society for Imaging Science and Technology, Springfield, VA, (2008).
2. A. Yamamura, "Lens array, exposure device, and image forming apparatus," Jap. Pat. 4864509 (2011).
3. M. Sakamoto, H. Uejima, M. Furukawa, T. Yamada, and M. Tooyama, "Application for multi-aperture system of light-focusing fiber optics," *Electrophotogr. Jpn.* **12**(1), 12-21 (1973) (in Japanese).
4. Kitano, "4-2 Gradient-Index lens," *Imaging* (The Imaging Society of Japan), No.25, 19-25 (1979) (in Japanese).
5. Y. Ogura, "Application of gradient index fiber array to copying machine," *Jpn. J. Opt.* **10**(2), 111-117 (1980) (in Japanese).
6. Y. Ogura, "Analysis of brightness and application of gradient index fiber array," *Ricoh Technical Report* No.2 (1979), 18-27 (in Japanese).
7. A. Yamamura, K. Oka, and N. Nishiguchi, "Alignment accuracy of gradient-index rod lens in an array," *Opt. Eng.* **58**(8), 085102 (2019) [doi:10.1117/1.OE.58.8.085102]
8. J. D. Rees, "Non-Gaussian imaging properties of GRIN fiber lens arrays," *Appl. Opt.* **21**(6), 1009-1012 (1982) [doi: 10.1364/ao.21.001009].
9. K. Matsushita and M. Toyama, "Unevenness of illuminance caused by gradient-index fiber arrays," *Appl. Opt.* **19**(7), 1070-1075 (1980) [doi: 10.1364/ao.19.001070].
10. F. P. Kapron, "Geometrical optics of parabolic index-gradient cylindrical lenses," *J. Opt. Soc. Am.* **60**(11), 1433-1436 (1970) [doi: 10.1364/josa.60.001433]
11. A. Yamamura, "Exposure unit, image forming unit, and image forming apparatus," U. S. Pat. 10001720 (2018).
12. A. Yamamura, K. Oka, and N. Nishiguchi, "Evaluation of gradient-index array alignment," *Opt. Rev.* Published online, (2021) [doi: 10.1007/s10043-020-00635-3]
13. T. Takagi, and H. Hashimoto, "Method and apparatus for evaluating lens array arrangement," Jap. Laid-open Pat. 2007-101416 (2007).

第3章 マイクロレンズアレイの検討

3.1 LED ヘッドの新規光学系の検討

本章では、本研究でロッドレンズアレイに変わる新方式として正立等倍像を形成する MLA の検討を進めることに至った経緯について述べる。LED プリンタで LED アレイの像を形成する光学系として検討する方式について、レンズアレイ／単レンズ、等倍／拡大／縮小、ミラーのあり／なし、均一屈折率材質／屈折率分布材質の観点から整理し図 3.1 にまとめた。図 3.1 のコリメート光学系、拡大レンズアレイとプロジェクター光学系の3種に関しては光学系を設計し、それぞれの光学系の結像性能だけでなく、光学系全体の大きさ、部品点数、製造容易性等の観点から総合的に判断し、正立等倍像を形成する非球面レンズをアレイに配列した MLA(正立等倍 MLA 方式)の検討を進めることに決定した。

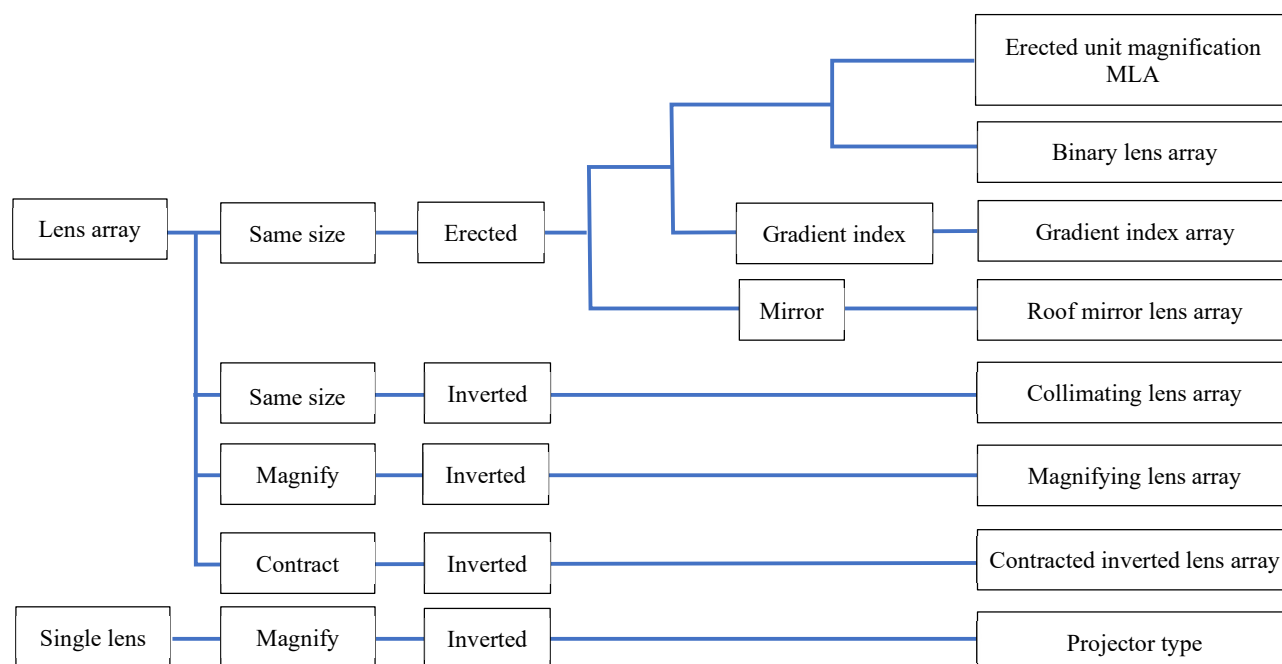


Fig. 3.1 Examination of new optical system for LED print head.

本章では、始めに、光学系を設計し比較検討したコリメートレンズアレイ、拡大レンズアレイとプロジェクター方式の3方式について解説し、次に、他社で開発された方式について、その特徴と正立等倍 MLA 方式に対する比較と正立等倍 MLA 方式を選択した理由について説明する。最後に正立等倍 MLA 方式を選択し開発するに至った経緯について補足する。

(a) コリメートレンズアレイ

文献1に記載の本方式について構成を図 3.2 に示す。図 3.2 (a)は走査方向の断面図で、(b)は副走査方向の断面図である。本方式は、走査方向に関しては正立等倍の像を形成し、副走査方向に関しては倒立等倍の像を形成するレンズ系を走査方向に多数、副走査方向に2列配列する方式である。レンズは光軸方向に2枚配置され、レンズ面は両面ともに走査方向と副走査方向とで断面形状の異なるアナモルフィック非球面で構成する。副走査方向においては、2枚のレンズの間で光線が平行になるコリメートの構成である。

本方式は、LED アレイからレンズアレイまでの距離が僅かに設計値からずれると、正方形の LED 発光部

の像が、走査方向と副走査方向で像の大きさが異なる長方形のドットとなり、印刷画像に濃度ムラが発生するため、正立等倍 MLA 方式の方が優位性があると判断した。また、アナモルフィック非球面であるレンズ面を形成することも難易度が高いと予想される。

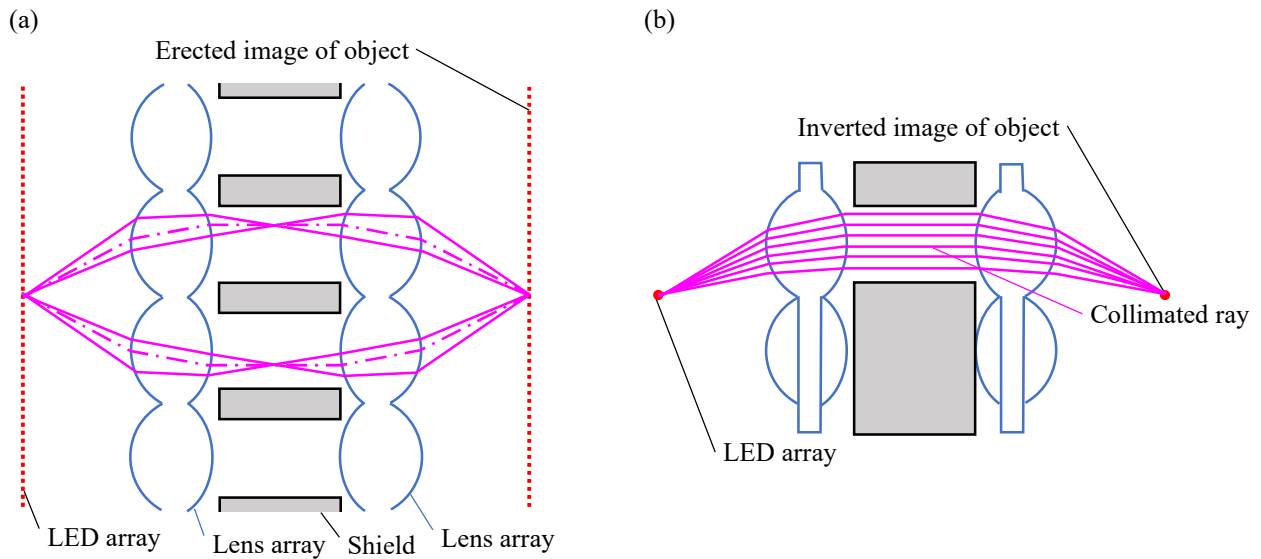


Fig. 3.2 Configuration of collimate lens array (a) Cross section of scanning direction. (b) Cross section of sub-scanning direction.

(b) 拡大レンズアレイ

文献2に記載の本方式について構成を図 3.3 に示す。図 3.3 (a) 1 対のレンズと LED アレイの概略図で、(b)は側面図である。本方式では、拡大倒立像を形成するレンズを走査方向に配列する。レンズの数と LED アレイの数は同数で設計例では 13 個である。従来 26 個の LED アレイを配列しているのに対して、LED アレイの数を半減し、レンズアレイは 1 枚だけ使用することで部品点数の削減を狙う。

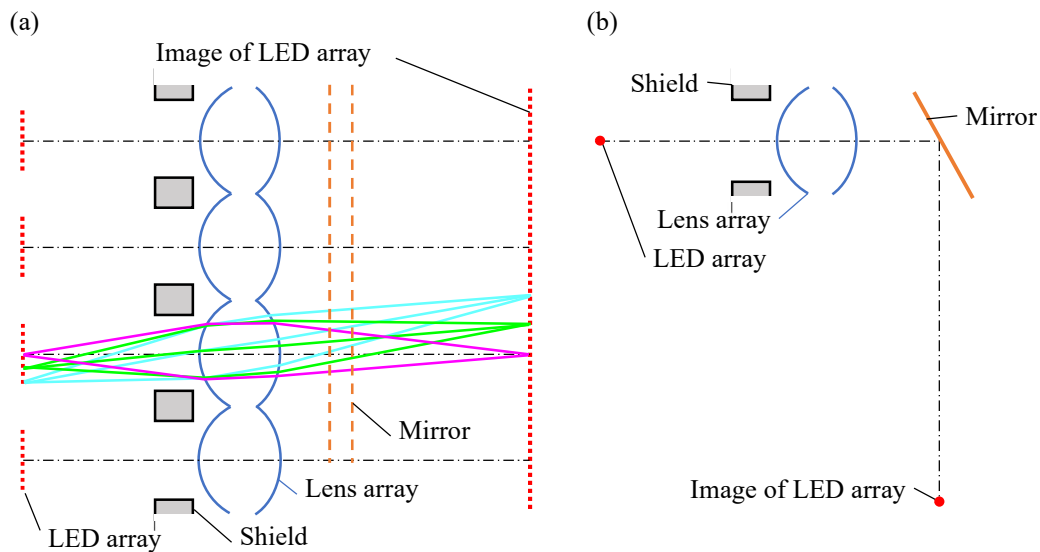


Fig. 3.3 Configuration of magnifying lens array (a) A pair of LED array and magnifying lens. (b) Side view.

本方式の設計例では、LED アレイから像までの距離が 99mm と長くなり、従来と同サイズの LED プリンタに搭載するためにはミラーを追加することが避けられない。ミラーを配置するには高い位置精度と角度精度が要求されるため、ミラーの位置と角度の調整が必要になることから、正立等倍 MLA 方式の方が優位性があると判断した。

(c) プロジェクター方式

文献 3 に記載の本方式について構成を図 3.4 に示す。本方式では、レンズアレイではなく単レンズを用いて、LED アレイを 8 倍に拡大する。LED アレイの配列間隔は 4800dpi 相当の $5.25\mu\text{m}$ 間隔で配列し、8 倍に拡大することにより 600dpi の $42\mu\text{m}$ 間隔の LED アレイの像を形成する。

本方式の設計例では、LED アレイから像面までの距離が 400mm と長くなり、3つのレンズのうちの1つは直径 43mm と大きくなるため、従来の LED プリンタと同じ大きさの装置に実装することが不可能であり、正立等倍 MLA 方式の方が優位性があると判断した。

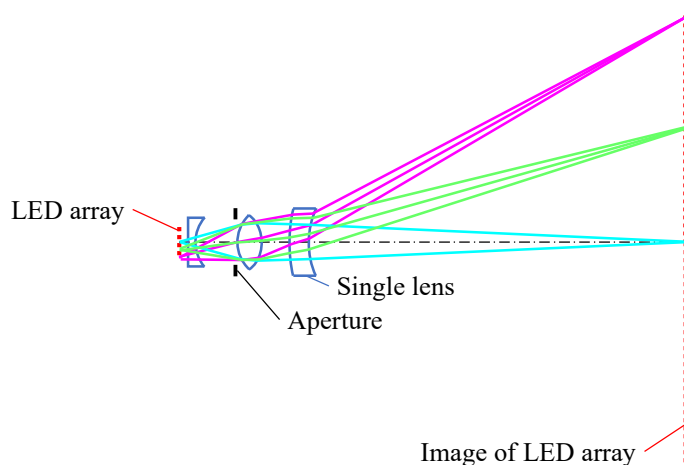


Fig. 3.4 Optical system of projector.

(d) バイナリーレンズアレイ

本方式は富士通株式会社により提案され文献 4 に記載されている。図 3.5 に構成を示す。フレネルレンズを階段状の形状で近似したバイナリレンズを片面に形成し、反対側の面に開口が形成されたレンズアレイを 2 枚用いている。1 枚のレンズは物体の倒立縮小像を形成し、2 枚のレンズアレイで物体の正立等倍像を形成する。

本方式はバイナリレンズを製造することが困難であること、遮光部材が平面であるため、ゴースト光やフレア光の低減が難しいと予想し、正立等倍 MLA 方式の方が優位性があると判断した。

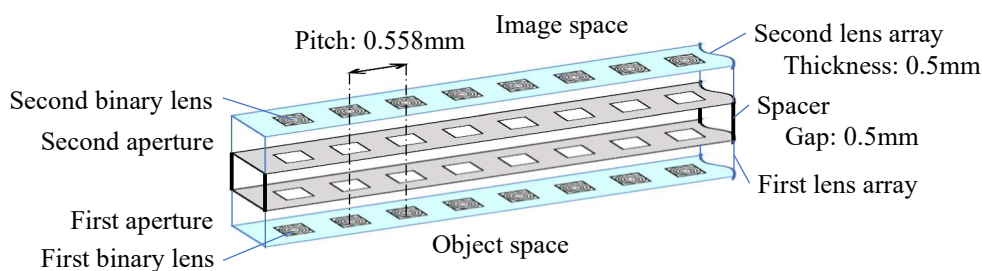


Fig. 3.5 Configuration of binary lens array.

(e) ルーフミラーレンズアレイ

本方式は株式会社リコーにより開発され文献5に記載されている。図 3.6 に構成を示す。光軸方向にレンズは1枚であるが、2枚のミラーで光路が折り返されていることにより、光線が1枚のレンズを2回透過することによって、走査方向に正立等倍像を形成し、副走査方向には倒立像を形成する。本章で説明している技術の中でドキュメントスキャナーの読み取りユニットのレンズアレイとして、唯一製品化され上市されている技術である。さらに文献6では、2枚のミラーと1枚のレンズを一体に形成したルーフプリズムレンズアレイが後継の技術として提案されている。

本方式は2枚のミラー面を持つことから、ミラーの角度を精度よく形成することが困難であると予想し、正立等倍 MLA 方式の方が優位性があると判断した。

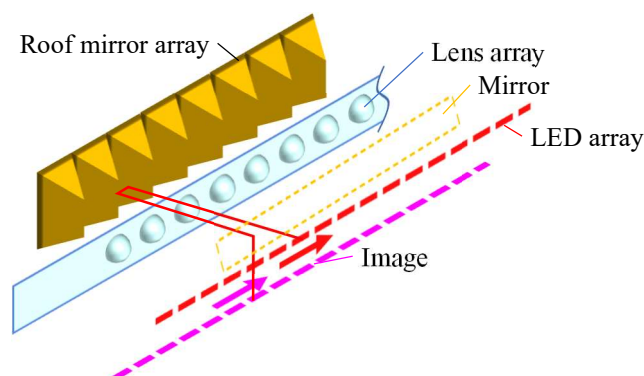


Fig. 3.6 Configuration of roof-mirror lens array.

(f) 縮小倒立レンズアレイ

本方式はセイコーエプソン株式会社により提案され文献7、8に記載されている。図 3.7 に構成を示す。本方式は1枚のレンズと有機ELアレイが1対1で対応して形成され、1枚のレンズで有機ELアレイの縮小倒立像を形成する。アレイ中の有機ELの配列間隔と有機ELアレイとレンズの配列間隔は共に印刷画素の配列間隔より大きく形成され、レンズにより0.7倍に縮小することで必要な印刷画素の間隔としている。

本方式においては、レンズアレイのレンズの中心と有機ELアレイの位置合わせが困難であることが予想され、熱膨張によりレンズアレイをプラスチックで形成することが困難であると予想されるため、新方式の候補から除外した。

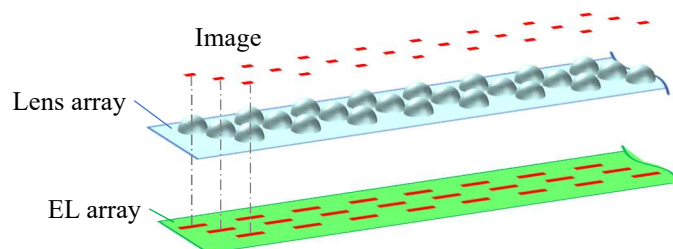


Fig. 3.7 Configuration of inverted and reduced image lens array.

方式検討においては、光学系全体の大きさが現状のロッドレンズアレイの方式に比べて格段に大きくなってしまう方式は除外した。また、LEDアレイの像を拡大する方式については、LEDアレイを配置するときの位置の誤差が拡大され、LEDアレイを配置するときの高い位置精度が要求されるため、等倍像を形成する方

式の方が優位性が高いと判断した。さらに、ミラーを配置する方式についてもミラーの形成及び配置に高い精度が要求されるため除外した。正立等倍像を形成する光学系を採用することで、これまで LED ヘッドに使用していたものと同じ LED アレイが使えるため、LED アレイを駆動する駆動回路等もそのまま使用でき、LED プリンタの装置や部材だけでなく、LED ヘッドを測定・検査する装置についてもそのまま使用できる。さらに、光路がミラーによって折り返される光学系とはせず、光路が折り返されることがない光学系とすることで、LED アレイを配列した回路基板(Chip on board, COB)も同一のものを使用することができ、LED アレイを COB に配列するチップ・ボンダーや LED アレイと駆動回路を接続するワイヤーを取り付けるワイヤー・ボンダーも同様の装置が使用できる。以上の検討により、正立等倍像を形成する非球面レンズをアレイに配列した MLA(正立等倍 MLA 方式)の検討を進めることにした。

3.2 正立等倍像を形成するマイクロレンズアレイの構成

本章では、ロッドレンズアレイに替わる LED アレイの像を形成する手段として、正立等倍像を形成するマイクロレンズアレイ(Micro lens array, MLA)を検討する。始めに図 3.8 を用いて MLA の構成について説明する。MLA は 2 点のレンズアレイ(Lens array)と 2 点の遮光部材で構成される。レンズアレイの全てのレンズは LED アレイの光線を透過する素材で一体に形成される。レンズアレイの一方のレンズ面を R1 面、もう一方のレンズ面を R2 面、2 点のレンズアレイのうち、物体側のレンズアレイをレンズアレイ A、結像側をレンズアレイ B としたとき、レンズアレイ A の R1 面が光源の LED アレイに対向し、R2 面がレンズアレイ B の R2 面に対向し、R1 面が結像面に対向している。レンズアレイにはレンズが 2 列に配列される。COB とレンズアレイ A の間に遮光部材が配置され、レンズアレイ A と B の間に遮光部材が配置される。COB 側の遮光部材を遮光部材 A (Shielding plate A, SP-A)、レンズアレイ A と B の間の遮光部材を遮光部材 B (Shielding plate B, SP-B)とする。遮光部材 A と B はともに、レンズアレイのレンズと同様の配列間隔で 2 列の開口が形成される。

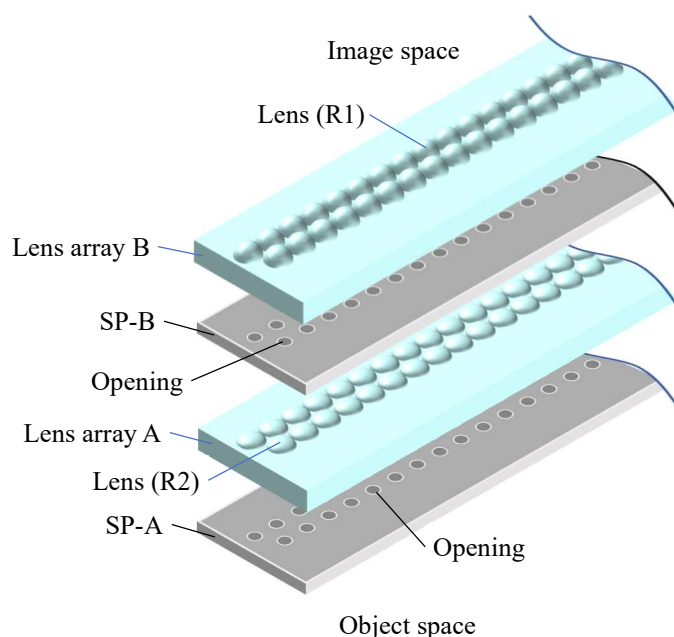


Fig. 3.8 Configuration of MLA

次に、図 3.9 を用いて MLA のレンズの構成について説明する。図 3.2 は左端を物体面(Object plane, OP)、右端を結像面(Image plane, IP)とし、物体距離 l_o と結像距離 l_i は等しい。2 枚のレンズのうち物体側をレンズ A、結像側をレンズ B、2 枚のレンズの間を中間面(Intermediate plane, IP)とすると、物体のレンズ A による縮小等立像が中間面に形成され、縮小等立像のレンズ B による拡大倒立像が結像面に形成され、拡大倒立像は物体の正立等倍像になっている。結像面上の各位置からの主光線を物体面まで示すと図 3.9 の赤線のようになり、レンズ A と B の間では主光線が互いに平行であるテレセントリックの構成になっている。レンズ A と B の間の主光線が平行であることから、レンズ A と B の焦点距離は図 3.9 の f である。

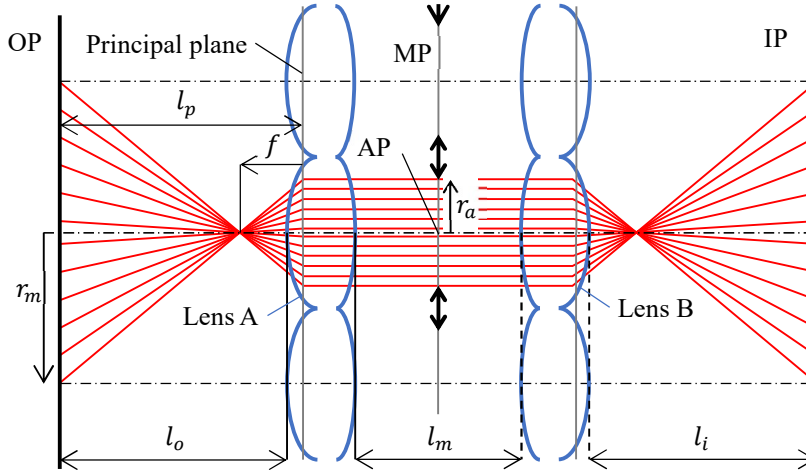


Fig. 3.9 Configuration of lenses of MLA

中間面には 2 枚の遮光部材のうちの遮光部材 B の開口(Aperture, AP)が配置されるため、開口の外側の光線が遮光されることから、レンズ A の視野は図 3.9 に r_m で示され、数式(3.1)が成り立つ：

$$r_m = \frac{l_p - f}{f} r_a, \quad (3.1)$$

ここで、 r_a は遮光部材 B の開口半径、 l_p は物体面からレンズ A の主平面の距離である。MLA がレンズの配列方向において途切れることなく物体面の像を結像面に形成するためには、レンズ A の視野がレンズの配列間隔以上でなければならない。つまり数式(3.2) でなければならない：

$$r_m \geq \sqrt{\left(\frac{P_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{P_y}{4}\right)^2}, \quad (3.2)$$

ここで P_x 、 P_y はそれぞれ X 方向、Y 方向のレンズの配列間隔である。本研究のレンズアレイのレンズの視野は隣り合うレンズの視野が重なり合い図 3.10 のようになっており、LED アレイの全ての LED が 2 つのレンズの視野に含まれるようになっている。結像位置や像のコントラストなど、個々のレンズのわずかな結像特性の違いにより、個々のレンズにより形成される像の輝度分布に微妙な違いが存在するが、2 つのレンズの視野が重なることにより、これら像の輝度分布が重なって平均化され、輝度分布の違いが低減し、LED ヘッドの像の強度分布のレンズ配列間隔の変化が低減され、LED プリンタの印刷画像の品質が向上する。

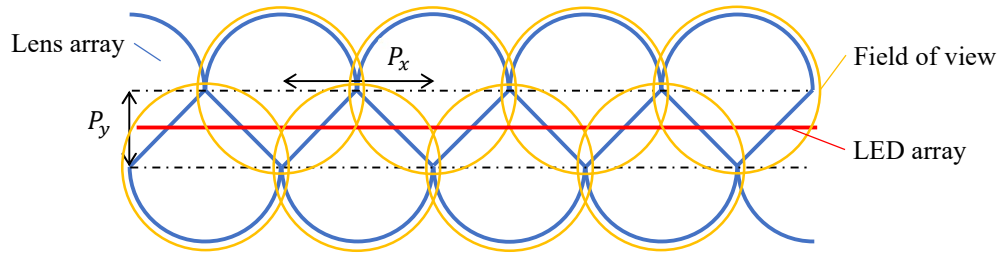


Fig. 3.10 Field of view and lens pitch of MLA.

本研究の MLA は 2 枚のレンズに同一形状のレンズを使用することで、Lens A で形成される像の倍率は $-r_a/r_m$ 、Lens B で形成される像の倍率は $-r_m/r_a$ となり、2 つのレンズで形成される像の物体に対する倍率は 1 となる。本研究で開発した MLA の構成は表 3. 1、レンズ面の構成は表 3. 2 の通りである。ここでレンズアレイのレンズ面 R1 及び R2 の中心からの距離 r における高さ z はともに回転対称多項式非球面であり、数式(3.3)で表される：

$$z(r) = \frac{r^2/R}{1 + \sqrt{1 + (r/R)^2}} + ar^4 + br^6 + cr^8, \quad (3.3)$$

ここで、 R は曲率半径、 a は 4 次の非球面係数、 b は 6 次の非球面係数、 c は 8 次の非球面係数である。

Table 3.1 Configuration of MLA.

Surface gap			Lens/aperture pitch		Thickness			Aperture	
l_o	l_m	l_i	P_x	P_y	Lens A, B	SP-A	SP-B	SP-A	r_a
3.3mm	2.2	3.3	1.2	0.38	1.3	1.0	1.0	0.35	0.4

Table 3.2 Configuration of lens array.

	Lens surface R1				Lens surface R2			
	R	a	b	c	R	a	b	c
Lens A	0.9504mm	-0.3626	0.7646	-1.1253	-0.9597	0.3219	0.3761	0.1313
Lens B	-0.9504mm	0.3626	-0.7646	1.1253	0.9597	-0.3219	-0.3761	-0.1313

次に MLA の遮光部材の構成について図 3. 11 を用いて説明する。MLA には遮光部材 A と遮光部材 B の 2 つの遮光部材が用いられる。光線を遮光する素材を用いて全ての開口を一体に形成する。物体空間には遮光部材 A が配置され、レンズ A の視野を制限する視野絞りとなっていて、レンズ A の視野の外側からレンズ A に入射する光線を遮光している。レンズ A の視野の外側からレンズ A に入射する光線を図 3. 11 に紫色の線で示す。中間面の遮光部材 B はレンズ B の視野絞りとなっていて、レンズ B と光軸を共有するレンズの隣のレンズからの光線を遮光するために配置される。

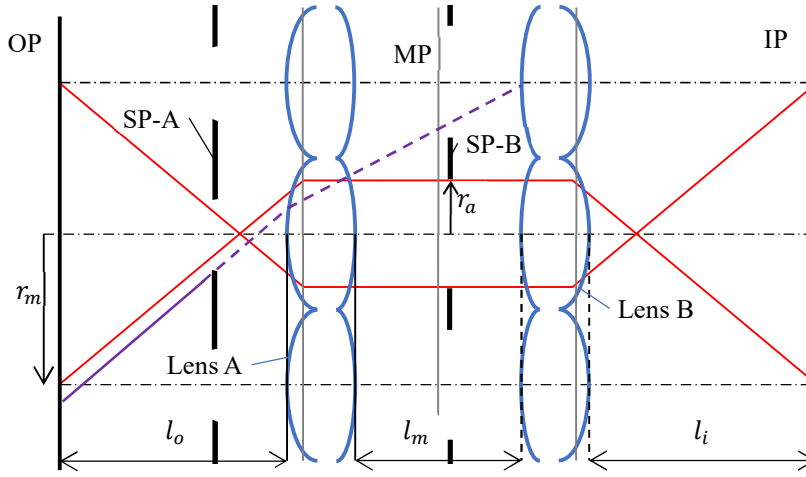


Fig. 3.11 Configuration of shielding plates.

3.3 マイクロレンズアレイのアライメント精度

本研究の MLA について、レンズアレイのレンズのアライメント精度と結像特性について解析する。図 3.12 はレンズアレイ B の配列間隔に誤差がある MLA のモデルである。レンズアレイ A のレンズをレンズ A₁、A₂、レンズアレイ B のレンズをレンズ B₁、B₂ とし、レンズ A₁ と B₁ の光軸が一致し、レンズ A₂ とレンズ B₂ の光軸が一致しているとする。この解析においては 1 列のレンズアレイを考え、レンズアレイのレンズ配列間隔を P_x として、レンズ B₁ の配列間隔 P_x が図の下方方向に Δd ずれているとする。

注目する任意の物体のレンズ A₁ からの距離を h_o 、中間像面 MP 上のレンズ A₁ の像の距離を h_m 、レンズ配列 P_x に誤差がない場合のレンズ A₁ から像までの距離を h_i 、レンズ B₁ から中間像面 MP 上のレンズ A₁ の像までの距離を h'_m 、レンズ B₁ から像までの距離を h'_i とする。 h'_m は数式(3.4)である：

$$h'_m = h_m + \Delta d. \quad (3.4)$$

レンズ A の倍率を m とすると、

$$h'_m = mh_o + \Delta d. \quad (3.5)$$

また、 h'_i はレンズ B の倍率が $1/m$ であることから、数式(3.6)となる：

$$h'_i = h'_m / m. \quad (3.6)$$

一方、配列間隔に誤差がある場合と誤差がない場合のレンズ A₁ から像までの距離の差を Δh_i とすると：

$$\Delta h_i = h'_i + \Delta d - h_i. \quad (3.7)$$

数式(3.5)と数式(3.6)と $h_i = h_o$ より Δh_i は数式(3.8)となる：

$$\Delta h_i = \frac{1+m}{m} \Delta d. \quad (3.8)$$

さらに、倍率 m を r_a と r_m で表すと Δh_i は数式(3.9)となる：

$$\Delta h_i = \frac{r_m + r_a}{r_a} \Delta d. \quad (3.9)$$

本研究の MLA においては、数式(3.9)の Δd の左側の分数は 3.304 となる。つまり、レンズアレイのレンズ配列間隔の設計値からの誤差を Δd と考えると、レンズ配列間隔の設計値からの誤差の 3.304 倍の像の位置のずれが発生する。

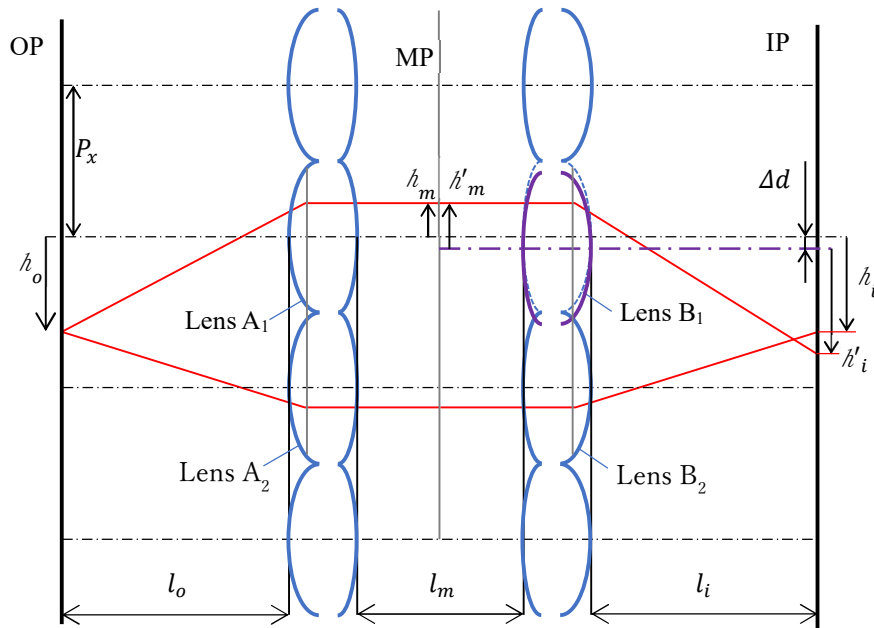


Fig. 3.12 Configuration of lenses of MLA

3.4 結果と考察

本研究で正立等倍像を形成する MLA を開発する途上において、レンズアレイの個々のレンズの結像位置や像のコントラストなど、ごくわずかな結像特性の違いが現れることが予想され、この結像特性の違いによって、レンズアレイによる像のコントラストがレンズ配列間隔周期で低下し、LED プリンタの印刷画像にレンズ配列間隔周期の筋や帯が発生することが考えられた。しかし、3.2 節に記載したように、レンズアレイのレンズの配列間隔については、X 方向の配列間隔に対して Y 方向の配列間隔を小さくし、各部材が形成可能な範囲で最も小さくし、さらにレンズの視野については最も大きくなるようにレンズ面形状を設計することで、隣り合うレンズの視野が重なり合うようにして、レンズアレイの個々のレンズの結像特性の違いを低減し、レンズアレイによる像のコントラストがレンズ配列間隔周期で低下しないようにした。それに加えて、3.3 節に記載したレンズアレイのレンズ配列間隔の誤差により、隣り合うレンズによる像に位置のずれが発生し、2つのレンズによる像が重なり合わずにレンズアレイによる像のコントラストが低下したり、レンズ配列間隔周期で変動したりすることを見込んで、レンズアレイの形成においてレンズ配列の誤差を低減し解消する必要があることを明らかにした。さらに、ロッドレンズアレイは製造ロットによって屈折率分布の値がわずかに異なり結像距離が異なるため、感光体までの距離を調整する必要があったが、本研究の MLA においては、各部材の面間隔を決定する部材をレンズ面形状と同等の精度で形成し精度よく組み立てることで結像距離は変わることはなく、調整不要の構成とした。

これまでの検討により正立等倍像を形成する MLA による LED アレイの像は十分なコントラストとその均一性が得られる。正立等倍像を形成する MLA ではレンズアレイの全てのレンズを一体に形成することによりアライメント精度を高めることができるため、2 章で解析した従来の方式であるロッドレンズアレイや、3.1 節で説明したその他の新規の方式に比べて優位性がある。

参考文献

1. A. Yamamura, "Lens unit, LED head, exposure device, image forming device, and scanning device," US. Pat. 8675281 (2012).
2. A. Yamamura, "Exposure Device, Image Forming Apparatus and Image Reading Apparatus," US. Laid-open Pat. 2009/0225147 (2009).
3. A. Yamamura, "Exposure device and image forming apparatus," Jap. Pat. 5096091 (2012).
4. I. Sawaki, and F. Abe, "バイナリレンズを用いたイメージ結像光学系," 回折光学素子入門, オプトロニクス社, p. 131-137 (1998)
5. T. Miyashita, and K. Fujita, "Roof Mirror Lens Array (RMLA)," OPTRONICS No. 1, p.102-110 (1997).
6. K. Fujita, H. Inoue, S. Misawa, I. Maeda, and A. Sakurai, "Roof Prism Lens Array (RPLA)," Ricoh Technical Report No.28, p. 116 (1999)
7. ビジネス機械・情報システム産業協会講演資料 (2010)
8. K. Tsujino, "Light shielding member, a line head and an image forming apparatus using the line head," US. Pat. 7705869 (2010)
9. A. Yamamura, "Lens unit, LED head, exposure device and image forming unit," Jap. Laid-open Pat. 2020-30369 (2020).
10. A. Yamamura, "Lens array, light emitting diode head, exposure device, image forming apparatus, and image reading apparatus," U. S. Pat. 7933070 (2011).
11. A. Yamamura, "Lens unit, light emitting diode head, exposure device, image forming apparatus, and image reading apparatus," U. S. Pat. 7885006 (2010).
12. A. Yamamura, "Exposure device, LED head, image formation apparatus, and reading apparatus," U. S. Pat. 9128408 (2013).

第4章 結論

ロッドレンズは長さ、物体距離と結像距離を適宜調節するだけで、正立・倒立、拡大・等倍・縮小、様々な結像特性が得られる光学素子であり、正立等倍像を形成するロッドレンズをアレイに配置したロッドレンズアレイは、高い真直度で装置に実装し物体距離と結像距離を調整すれば、高いコントラストで明るい像を形成できるデバイスとして、第3章に掲載したルーフミラーレンズアレイ及びルーフプリズムレンズアレイを例外として、LEDプリンタとドキュメントスキャナーでは独占して使用されてきた。しかし、近年LEDプリンタの技術が成熟してきて、印刷画像の品質向上や、各部材が安価に製造できることが求められている。

第2章での検討により、ロッドレンズアレイにより形成される像のコントラスト低下には、ロッドレンズのアライメント精度のうち、ロッドレンズの傾きの影響が大きいことが明らかになり、ロッドレンズアレイの傾き精度を高めることが必要であることが明らかとなった。また、ロッドレンズの傾きがロッドレンズアレイにより形成される像のコントラストを低下させるのは、ロッドレンズアレイの1つ1つのロッドレンズで形成される像が重なり合うことで、ロッドレンズアレイの像が形成されるからであることが明確になった。今後は、ロッドレンズアレイの配列精度を高め、ロッドレンズアレイによる像のコントラストを高めることで、LEDプリンタの印刷画質を向上させることはもちろん、ロッドレンズの傾きがある程度大きくても、コントラストの均一性が低下しないような、ロッドレンズアレイの仕様や、ロッドレンズアレイの使いこなしを検討する。

第3章では、ロッドレンズアレイに替わる新規のレンズアレイとして、正立等倍像を形成するマイクロレンズアレイについて検討した。ロッドレンズアレイでは、正立等倍像を形成できるようにした素子をアレイに配列することで、アライメント精度に不十分な構成となっているため、個々のレンズは正立等倍の像を形成することはできないが、そのレンズを一体に形成したレンズアレイを組み合わせることで、十分なアライメント精度が得られるような構成とした。また、コリメートレンズアレイ・拡大レンズアレイ・プロジェクタ光学系を並行して検討し、さらに、他社で検討されてきた方式と比較することで、完成度の高い技術が実現できるようにした。MLAを開発する途上においては、MLAを構成するレンズのわずかな結像特性の違いが明らかになり、レンズアレイによる像のコントラストがレンズ配列間隔周期で低下する原因となっていることを突き止め、レンズ配列間隔の精度とレンズ視野を大きくすることで、像のコントラストの不均一を改良することができた。さらに、ロッドレンズアレイにおいては製造ロットによって屈折率分布の値がわずかに異なることにより結像距離が異なるため、LEDヘッドに実装したのちに感光体までの距離を調整する必要があったが、本研究のMLAにおいては、面間隔を決定する部材をレンズ面形状と同等の精度で形成することで精度よく組み立てることができ、結像距離は変わることはなく、感光体までの距離の調整が不要な構成を検討した。

これまでのMLAの検討ではLEDアレイの像は十分なコントラストとその均一性が得られることは確認できた。レンズアレイにおいては、レンズ面形状の精度が結像特性に与える影響を明らかにし、レンズ面形状の要求精度を明らかにする。また、LEDヘッドから感光体までの距離を調整不要にできる各部材寸法の要求精度を明らかにする。さらに、MLAのLEDヘッドへの実装方法を改善し、レンズアレイの製造技術の向上や検査方法の検討によって、MLAの生産技術の向上を図りたい。

謝辞

本研究の研究方針から詳細に至るまでご指導いただきました北海道大学大学院工学研究院の西口規彦特任教授、岡和彦客員教授に感謝を申し上げます。また、在学中に執筆した論文につきまして助言をいただいた北海道大学大学院工学研究院の馬場直志名誉教授に心よりお礼申し上げます。業務で得た知見から論文を執筆したいと考えていた折、博士後期課程へ進学のを与えていただいた株式会社沖データと沖電気工業株式会社の遠藤浩元執行役員、株式会社沖データ生産統括本部小泉真澄元LED統轄工場長に感謝を申し上げます。居住地であり勤務地である群馬から札幌へ、在学中多い時で月に1度ほどのスクーリングにお力添えをいただきました株式会社沖データ人事総務部樺沢豊部長にお礼を申し上げます。本研究を理解し後押ししてくださいました沖電気工業株式会社コンポーネント&プラットフォーム事業本部鈴木貴人チームマネージャー、株式会社沖データ技術開発本部山口辰巳部長と町山賢一チームリーダーに感謝申し上げます。また、光学特性評価や3次元形状測定で様々な助言を与えてくれたコンポーネント設計部設計チームメンバーの木田学武氏、中道蓮氏にお礼を申し上げます。最後に、週末や長期休暇中の論文執筆を温かく見守ってくれた妻の千鶴と長男の遼史に感謝申し上げます。