平板マイクロレンズの高精度芯合せ制御*

岡田 養二^{*1}, 上田 雄悟^{*2}, 植田 嘉昭^{*3}
中村 雅之^{*3}, 浜中 賢二郎^{*4}

High-Precision Alignment Servo of Planar Microlens Array

Yohji OKADA, Yugo UEDA, Yoshiaki UEDA,
Masayuki NAKAMURA and Kenjiro HAMANAKA

Optical fiber is commonly used for long-distance communication. For short-distances, parallel communication should be developed, but this requires a multiport connection. A planar microlens array (PML) has been developed and is considered adequate for such an application. However, alignment of the PML is very difficult and is an obstacle to wide application. This paper introduces a new technique for aligning two PMLs using many-to-one optics. Instead of aligning each lens, optical focuses of PML are projected to one image by using many-to-one optics which consist of optical neurons. This image is input to a microcomputer, and a vision servo is developed. Two vision algorithms are tested: one calculates the alignment error from the digitized image, while the other uses a layered neural network. The alignment capability is tested and discussed.

Key Words: Optical Servo, Neural Network, Positioning, Accurate alignment, Data Communication, Vision System

1 はじめに

長距離の通信手段として、光ファイバーが広く使われるようになってきた [1]。一方、短距離の並列光通信や画像処理、光コンピュータに、平板マイクロレンズ (PML) の使用が検討され、広い応用が期待されている [2]。しかし直径数十～数百 μm のレンズを、精度良く芯合わせする技術が確立されておらず、充分に応用されてはいない。

本論文では、イオン交換法を用いた分布屈折率平板マイクロレンズについて、その特性と応用を紹介すると共に [2][3]、PML の特性を利用した Many-to-One 光学系を使い [3]、2 枚の PML の高精度芯合わせサーボへ応用した。これは、今後拡大するであろう PML の応用に対して、組込のための重要な基礎技術である。この光学系で作られる画像を、CCD カメラによってコンピュータに取り込み、全自動芯合わせの基礎実験を行った。画像処理のアルゴリズムとしては、二値化画像から芯ずれを検出する方法と、階層型ニューラルネットワークの二種類を試みた [4][5]。

2 平板マイクロレンズ (PML) について

2.1 平板マイクロレンズの製作とその特性

平板マイクロレンズは、半導体工場で用いられるプレーナ技術を用いて作られる [2]。具体的には、ガラス基板に屈折率を高くするドーパントを選択的に拡散して、図 1 に示すようなレンズアレーを実現する。ドーパントを選択的に拡散するためには、あらかじめ所定の 1 個の陽イオンを含ませたガラス基板を、マスク処理しておく。このマスクの中の小さな穴を介して、高温の溶解塩と接触させることにより、ガラスの中の 1 個の陽イオンと、溶解塩の中の他の 1 個の陽イオンを交換するものである。イオン交換を行うと、ガラスの密度変化が生ずると共に、置き変わった

図1 平板マイクロレンズ

* 原稿受付 平成4年3月13日。

^{*1} 正員、茨城大学工学部 (〒316 日立市中成沢町 4-12-1)。^{*2} 茨城大学工学部。^{*3} 学生員、茨城大学大学院。^{*4} 日本板硝子筑波研究所 (〒300-26 つくば市東光台 5-4)。

イオンの電子分極率が異なるため、ガラスの屈折率を変化させることができる。

このイオン拡散は、非常に強い濃度依存性を持つ。拡散係数の濃度依存性は、平板マイクロレンズを低収差で作る上で、極めて重要な要因となっている。拡散係数が濃度依存性を持つことで、周辺部で急峻な屈折率分布が得られ、収差の小さく良好な平板マイクロレンズが作成できる [2]。表 1 に本方式で製作できた平板マイクロレンズの特性と、実験で使用するものを示す。平板マイクロレンズに、平行光をあてたときの光軌跡のシミュレーションを、図 2 に示す。レンズの直径は $200\mu\text{m}$ で、直径の 90% 以内の領域で小さな収差で光を集光している。

2.2 応用例

平板マイクロレンズは、マスクパターン通りに高精度のレンズアレーを作成できるので、光エレクトロニクスの分

表 1: 製作可能な平板マイクロレンズを使用したものの特性表

	Manufacturable Lens	Tested Lens
Baseplate Size	max $20\times 20\text{mm}$	$10\times 10\text{mm}$
Lens Pitch	$20\mu\text{m}-2\text{mm}$	$400\mu\text{m}$
Lens Diameter	$\phi 20\mu\text{m}-1.2\text{mm}$	$\phi 400\mu\text{m}$
Number of Lens	max 500×500	21×21
Focus	$0.02-5\text{mm}$	1mm

図 2 平板マイクロレンズの光軌跡

図 3 LEDと光ファイバー接続への応用

野で広い応用が可能である。実用化になった例として、液晶シャッターアレイとの組み合わせがある。液晶シャッターは面の一部しか光を通さないで、マイクロレンズで光をそこに集め、通過効率を改善する。これは、カラー液晶ディスプレイの一部に採用されている。もう一つの例として、LEDをマルチモード光ファイバへ結合した場合の、結合度の改善を図 3 に示す。立軸はファイバを直接 LED に結んだ場合の、光の通過損失を 0dB としたもので、マイクロレンズを使うことで 3.3dB の改善を示している。

他の応用例としては、CCD との組み合わせ、光コンピュータへの応用などが考えられている [1][2]。

3 Many-to-One (光ニューロン) 光学系

以上述べてきたように、平板マイクロレンズは簡単に精度良く作れ、広い応用範囲が考えられているが、芯合わせが極めて困難であるという欠点を持つ。例えば図 3 の LED とファイバの結合には、2 枚の PML を貼り合わせたものを使用しているが、この貼り合わせを、顕微鏡の下で人手で行うには数時間を要し、しかも十分に満足いくものが作られていない。

3.1 実験装置

本研究では 2 枚の PML の貼り合わせを取り上げ、画像処理による全自動芯合わせを試みる。実験装置の構成を、図 4 に示す。He-Ne レーザから出た光は、ビームエキスパンダで平行光線に変えられ、2 枚の PML へ照射される。PML 1 と PML 2 を通過した光は、CCD カメラレンズによって受光部へ導かれ、ビデオ信号に変換されてコンピュータへ取り込まれる。コンピュータ内部で画像処理した後に、PML 2 を支持しているステージを駆動し、芯合わせサーボを行う。

図 4 実験装置の構成

今回取り上げたPMLは、大きさ $10 \times 10\text{mm}$ 、レンズピッチ $400\mu\text{m}$ 、レンズ径 $\phi 400\mu\text{m}$ 、レンズ数 21×21 、焦点距離 1mm のものである。貼り合わせを行うには、全てのレンズが $5\mu\text{m}$ 程度以内の芯合わせ精度を必要とする。

今までに、2枚のPMLを接着できる距離まで近づけて配置し、2枚の作る焦点を拡大してCCD上に投影し、その焦点の合い方から芯合わせを試みた。しかしCCDの分

図5 Many-to-One 光学系

解能から、十分な性能は得られなかった。また2つのレンズを作る、光干渉モアレによる芯合わせも試みたが、画像処理が困難で成功しなかった。今回、Many-to-One 光学系を使った光サーボを考え、精度良い芯合わせに応用する。

3.2 Many-to-One 光学系の特性

本方式は、PML 1とPML 2をその焦点距離の2倍離す必要がある。図5に、平行光を照射した系の概要を示す。平行レーザー光はPML 1に入り、その焦点を441個作る。第2のマイクロレンズPML 2とCCDカメラレンズが、Many-to-One 光学系を作る[3]。即ち、PML 2は441個の焦点像(Many)を平行光に変える。これがCCDカメラレンズにより一点(One)に集められ、1個の像Bになる。PML 1とPML 2の焦点のずれは、 F/f 倍されてCCD上に結像される(F, f : カメラレンズおよびPMLの焦点距離)。今回使用したレンズは、 $F = 12.5\text{mm}$, $f = 1\text{mm}$ で、12.5倍される。しかもPMLを通らない点線のレーザー光は、CCDの中央に集光されるため、この点Aを基準として芯合わせを行うことができる。441個の焦点を1点に集める

図6 CCD画像の3次元輝度表示

と、焦点がぼけてしまう。PMLが精度良く作れるのであれば、4隅の数個のレンズの芯合わせを行えば良い。この目的で遮光板を使う。

3.3 芯合わせ実験結果

ここでは、Many-to-One 光学系によって作られる、2つの焦点を使って芯合わせが可能かどうかの判定を行った。

図6にCCD上の焦点画像の例と、その光輝度の3次元グラフィックを示す。(a)は最も芯の合ったと思われる状態で、平行光によるスポットと、Many-to-One 光学系のスポットが一致している。(b)はそれよりも、 $\delta x = 10\mu\text{m}$ ずらしたもので、x方向にずれた2つのスポットが現れている。y方向にずれた場合は、Many-to-One スポットもy方向にずれ、方向を検出できる。(c)は回転方向を $\delta\theta_z = 0.05\text{deg}$ 移動させ、かつ観測し易いようにx方向にも $\delta x = 10\mu\text{m}$ 動かしたものである。スポットが広がっている様子がわかる。これは回転によって、中心に近いレンズはずれが小さいが、端のレンズはずれが大きいためである。遮光版を挿入することにより、(d)のように4つに分かれたピークが現れ、回転誤差を検出することができる。使用したカメラでは、 $1\mu\text{m}$ のずれがCCDの1ビットずれに相当し、十分な検出精度を持っていた。

4 画像の2値化処理による自動芯合せ

本実験で使用したコンピュータにはCCDカメラが取り付けられ、ビデオ信号に変換した画像を、データとして取り込むことができる。画像は、 512×512 素子で256階調(8bit)の数値データとなる。最初に画像の2値化を行い、通常の画像処理により芯合わせサーボを試みた。これらのプログラムは、パソコン上のTurbo Pascalを使って作成した。

4.1 自動芯合わせプログラム

まず、PLM1とPML2を、通常の光学的な測定でなるべく平行に、かつ芯が合っているように移動ステージに取り付ける。この方法で、レンズの平行度は良好に取り付けられるが、芯合わせ精度は $100\mu\text{m}$ 程度が限界である。zステージを動かして、レンズを焦点距離の2倍離し、次の画像処理プログラムを動作させる。

1. 取り込んだ画像と、xまたはy軸を移動して取込んだ画像を2値化し、2つの画像に共通なスポットから点Aをさがす。
2. 2値化画像の面積を小さくするように、x、y軸を移動し、x、y方向を大まかに合わせる。

3. 2.と同じ方法で、 θ_z 方向を大まかに合わせる。

4. 遮光板を挿入し、スポットAの 45° 方向にある4個のスポットの距離が小さくなるように θ_z を移動し、 θ_z 方向を正確に合わせる。

5. スポットのx、y方向各々の距離を小さくするように移動し、正確に合わせる。

この後に接着剤を付け、z方向を移動させ、2枚のPMLを接着する。

4.2 芯合わせ実験結果

図7が、上述の方法による平板マイクロレンズの高精度芯合わせを行った、評価写真である。y方向と θ_z 方向の誤

図7 貼り合わせ結果の評価

図8 三層型ニューラルネットワーク

差は、ほぼ零である。しかし、x方向の誤差は約 $10\mu\text{m}$ であった。最終目標は $5\mu\text{m}$ 以下であるが、市販の移動台を使ったためz軸移動精度が悪く、かつレーザ光軸とz移動軸を正確には合わせられず、これより少し大きい誤差となった。しかし、大量生産の見込みが立ち、PML貼合わせ専用の装置を作成すれば、充分精度のよい芯合わせができるものと確信する。

5 ニューラルネットワークによる自動芯合せの試み

実用上は、上述の手法で充分な芯合わせができる。しかし閾値の設定などにより、全自動化は困難な条件がある。最近、神経細胞を模したニューラルネットワークの研究が進み、画像処理に大きな威力を発揮している[4]。本研究のような、焦点画像よりサーボ信号を作り出す研究は、著者の知る限り見あたらない。そこで、3層型階層型ネットワークのバックプロパゲーション学習則を使い、Many-to-One画像から芯合わせサーボ信号を作ることを試みた。

5.1 階層ネットワークの学習則

画像データを入力層、レンズの芯合わせ誤差を出力層とする、3層ネットワークの構成を、図8に示す。各ニューロンの入力 u_i^n および出力 X_i^n は、シグモイド関数を使って、次のように表せる。

$$u_i^n = \sum W_{j,i}^{n-1,n} X_j^{n-1} + h_i^n \quad (1)$$

$$X_i^n = f(u_i^n) \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x/a)} \quad (3)$$

このニューロンのダイナミカルモデルを、図9に示す。これは、通常の階層型ニューラルネットワークである。ここで使った記号は、以下の通りである。

図9 ニューロンのダイナミカルモデル

- t : 学習回数
- $E(t)$: ネットワークの出力と教師信号との二乗誤差
- X_i^n : n層i番目のニューロン出力値
- $W_{j,i}^{n-1,n}$: n-1層j番からn層i番への結合係数
- u_i^n : n層i番ニューロンの入力値
- h_i^n : n層i番ニューロンのバイアス値
- $f(x)$: シグモイド関数
- a : シグモイド関数の係数(=1.5)
- η : 学習係数(=0.266)
- α : 慣性係数(=0.9)

使用したコンピュータの計算速度とメモリの制限から、今回はx方向のみに限定した。したがって、図8の入力層は、縦(y方向)に10個、横(x方向)に40個のCCD素子、合計400個で構成されている。また、中間層は40個、出力層は1個とした。

まず、入力画像と教師信号を取らなければならない。Many-to-One画像のA点を中央に移動し、B点が左端の画像の教師信号を0、中央(最も芯が合っている状態)を0.5、右端を1とし、これを含めた中間の画像45個のデータを収集し、ネットワークの学習を行った。学習則は、通常の誤差逆伝播アルゴリズム(最急降下法)と、次に示す慣性項付きの学習則(モーメント法)の双方を試みた[4][5]。

$$\Delta W_{j,i}^{n-1,n}(t) = -\eta \frac{\partial E(t)}{\partial W_{j,i}^{n-1,n}(t)} + \alpha \Delta W_{j,i}^{n-1,n}(t-1) \quad (4)$$

ここで、 η は、学習の速さを決める係数で、大きすぎると発散する。また、 α は、前回の修正を記憶しており、学習の振動を抑え、ローカルミニマムに落ち込むことを防ぐ慣性係数である。これらは、正の実数でなければならない。 $\alpha = 0$ のとき、従来の誤差逆伝播法(最急降下法)となる。

図10 完成したネットワークの試験結果

図11 ネットワークの誤差の収束

5.2 学習の結果

慣性項付き学習則の結果、図10に示すように、スポットBの位置と比例する良好な出力が得られた。ここで○は教師点を、●はそれ以外の試験点を表す。縦軸はネットワークの出力で、横軸は図6のCCD画像から目測で測ったスポットの横位置である。図11には、自乗平均誤差の収束の様子を示す。横軸は学習回数で、45個の学習点を全て学習し終わるのを、学習回数1回とした。350回の学習で、完全に収束している。

これに対して通常の誤差逆伝播学習則では、うまく行かなかった。学習の条件をいろいろ変えても、スポットBの位置と出力値にはどこかにうねりが現れ、いくら学習を繰り返しても比例した出力は得られなかった。この理由は、ローカルミニマムに陥ったのではないかと考えられる。慣性項付き学習則では、割合簡単に図10のような結果が得られ、この目的に高い適応能力を示した。

この計算は、80386 & 387 を使ったパソコンで、Turbo Pascal でプログラムし、学習に約一日かかる。メモリの関係もあり、x方向しかテストしなかったが、より高速なコンピュータを使えば、 x, y, θ_z 三方向の誤差を同時に検出できるプログラムが作れるものと考えられる。

6 結論

平板マイクロレンズの製法、応用例を紹介すると共に、2枚のレンズの芯合わせを試みた。これをパーソナルコンピュータの画像処理で、2種類の芯合わせを試み、次の結論を得た。

1. 2枚のPMLの芯合わせに、Many-to-One 光学系（光ニューロン）が有効であることがわかった。
2. Many-to-One 画像の2値化による画像処理は、レンズの芯合せ誤差を簡単に検出でき、 x, y, θ_z 三方向の同時芯合わせに成功した。しかし、閾値の設定など、全自動化の困難な問題がある。
3. Many-to-One 画像を入力とする階層型ニューラルネットワークに、慣性項付きの誤差逆伝播アルゴリズム（モーメント法）を適用し、芯合わせのための誤差信号を作ることを試みた。その結果、少なくともx方向には良好な結果を得た。

本研究の遂行には、茨城大学近藤良助教授の貴重な助言があったことを付記し、感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 谷田貝豊彦 他4：光コンピューター，サイエンス社，(1989)，p25
- [2] 及川正尋，他，Jpn. J. Appl. Opt. 20(1)，L51 (1981)，& 20(4)，L296 (1981)，p1
- [3] K. Hamanaka et. al.，Applied Optics，Vol. 29，No. 28，(1990)，p4064
- [4] 麻生英樹，ニューラルネットワーク情報処理理論，産業図書 (1989)，p1
- [5] 浅川和雄，他5，階層ニューラルネットワークの機能と学習の高速化，SICE 夏期セミナー'91 資料，p21