通信用光モジュール簡易組立法に関する検討*

水上雅人** 小薮国夫** 福井将樹*** 北山研一***

A Study of Simple Assembly Method for Compact Optical Modules
Used in Telecommunications Systems

Masato Mizukami, Kunio Koyabu, Masaki Fukui and Ken-ichi Kitayama

A new assembly method using guide-frames is described for easy construction of compact and practical free-space optical modules. Basic performances of this method are examined by assembling a two-dimensional optical fiber collimator, which is used to free-space optical telecommunications systems. Also, the method is applied to assemble a digital discrete correlator (DDC), which is a fundamental part of free-space optical computing systems. It is shown that a multistage optical system can be constructed simply by stacking the several optical functional blocks, and these compact modules do not need an optical bench, and they are one tenth of conventional optical system volume. It is demonstrated by experiments that our proposed assembly method can be utilized for these optical modules.

Key words: optical module assembly, free-space optical module, multistage optical system

1. 緒 言

フリースペース光学系は、高密度な配線が可能であり、配線パターンも可変であるという利点を持つため、次世代の光通信システムや、光情報処理システムのアーキテクチャとして研究されている¹⁾。フリースペース光学系は、導波路を用いず、自由空間で光を伝播させる方式(図1)であるため、それを構成する光デバイス個々について6軸の光軸調整を逐一行う必要があり、調芯作業が煩雑になっている。また個別に軸調整機構を必要とするため光学系が大型化している等の課題が存在し、結果として光学定盤上で構成された実験室レベルの状態である。今後実用的な光モジュールを指向した場合、組立方法の確立は重要となる。この組立方式に関しては、種々の方式が提案されている^{2) 3)}が、これらの方式では完全にコンパクトに脱定盤化が図られていないこと、また組立方法が各システムごとに個別対応である等の課題が存在している。

この問題に対して、本論文では(1)位置調整の高効率化のため、光部品の6軸調整を光ビームをモニタしながら能動的に行う部分と位置決めジグによる受動的な部分の2回に分ける、(2)光学系全体の小型化のため、光部品保持ホルダ部と調整機構部を分離し、調整後はホルダ部だけを残す、(3)光学系の設計変更に対する柔軟性のため、機能部品群ごとのブロック化を行い、ブロック端面の接触と簡単な調整だけで光学接続が得られるようにする等を基本コンセプトとした、コンパクトに光モジュールを構成でき、脱定盤化が図れる、実用的な光モジュール組立法の検討を行った。

Planar optical system using waveguides

Free-space optical system

Fig. 1 Scheme of planar optical system using waveguides and free-space optical system using 2-dimensional optical devices

具体的には、光部品の形状や寸法に影響されことなく高精度で任意の光部品を固定・保持出来るガイドフレーム部品を用い、単数または複数の光部品搭載ガイドフレームから機能ブロックを構成し、機能ブロックをハウジング枠によって機械的に固定して全体を一体構造とする、光モジュール簡易組立法を提案する。本手法を用いて二次元光入出力ブロックの試作を行い、組立法の精度に関する評価を行った結果と、有用性の検証のためにフリースペース型光コンピューティングシステム¹⁾において検討されている離散相関光学系⁴⁾のモジュール化に応用した結果を述べる。

* 原稿受付 平成6年12月8日

** 正会員 日本電信電話(株) 境界領域研究所(武蔵野市緑町3-9-11)

*** 日本電信電話(株) 光ネットワークシステム研究所(横須賀市武1-2356)

Fig. 2 Optical module configuration using the guide-frame assembly method

2. 光モジュール簡易組立法

2. 1 組立法の提案

我々が提案する光モジュール簡易組立法によるフリースペース光モジュールの構成を図2に示す。光部品が位置決め・固定されているガイドフレーム、光部品間の距離を規定するスペーサフレーム、全体光学系の位置決め・固定ジグの役割を果たすハウジングフレームから構成される。機能ブロックとは、ある光学的機能を持つ単位をまとめたものである。ここで、ガイドフレームはすべて同じ形状、寸法である。スペーサフレームの外形はガイドフレームと同じであるが、厚さは光学系の設計値から得られる光部品間の距離とガイドフレーム厚の和に設定する。ガイドフレーム及びスペーサフレームは、あらかじめ高精度に直交度、平行度等を出して加工した一つのブロック部材から切り出して製作し、同じ幾何公差にそろえている。

本組立法では、ガイドフレームという基準ジグ部品にいったん光部品の光軸位置合わせ（光軸方向を除く5軸）を高精度に行っておくことで、その後の光軸位置合わせの基準を、ガイドフレーム部品に置き換えるのがポイントであり、これにより最終的な光モジュールの精度を確保する。光軸方向では焦点深度の関係から10~20 μm 程度の誤差が許容されるので部品の加工精度を信頼して積み重ねるのみで必要な精度は確保される。この方法により、組立工程の簡易化、モジュールのコンパクト化が図られる。さらにハウジングフレーム自体に光学ベンチの役割を持たせ、脱定盤を図ることが出来る。

Fig. 3 Assembly processes of the free-space optical modules

Fig. 4 Scheme of the positioning mechanism for transmissive optical parts such as single lens

2. 2 組立工程

図3に本提案の光モジュール組立法の手順を示す。後述する位置合わせ機構を用いて、まず光部品の光軸とガイドフレームの幾何学的中心を位置決めした後、市販のUV光学接着剤を用いて固定する。このアライメントはZ軸（光軸）方向を除く5軸に対して、光ビームを基準にして行う（能動的アライメント）（図3(a)）。次に光部品を搭載したガイドフレームとスペーサフレームを積み重ねて機能ブロックを組立てる。この時、光部品間の距離Zはスペーサフレームの厚さで決定される（受動的アライメント）（図3(b)）。最後に機能ブロックを位置決め治具の役割を果たすハウジングフレームに突き当てて固定し光モジュールが完成する（図3(c)）。この場合のZ軸方向のアライメントも受動的に行われる。

2. 3 光軸位置合わせ方法及び機構

ここでは、図3(a)の工程のガイドフレームへの光部品の光軸位置合わせ方法、及び機構について詳述する。フリースペース光学系で用いられる部品は、単レンズのような透過型の部品と、面発光レーザアレイ、二次元光ファイバアレイ等のように光が透過しない部品がある。以下に透過型、非透過型部品に分けて、その光軸位置合わせ方法及び機構を示す。

透過型部品の場合は、透過する一本の光ビームを基準にして位置合わせを行う。この基準光ビームはガイドフレーム中心、及びレンズ中心を通り、最終的なモジュールの光軸に一致することになる。位置合わせ機構を図4に示す。基準光軸を作るためのHe-Neレーザ、コリメータレンズ、ピンホールと、レンズを駆動するための6軸のパルスステージ（送り精度0.1 μm ）からなる。位置合わせの手順については以下の通りである。

- (1) ガイドフレームの幾何学的中心軸（ガイドフレーム面の法線方向の軸）とHe-Neレーザによる基準光軸を合わせる。そのためには使用するガイドフレームと同じ形状の部品を基準として用いる。中心位置にマークを付けたガラスを、その基準部品の中心と一致するようにセットする。基準光軸調整のため、このマーク付基準部品を位置決め用ステージを用いてZ方向にスライドさせた時にレーザ光軸が中心位置マークを外れないように、そのレーザビーム方向を調整する。この結果ステージのZ方向駆動軸と基準レーザ光軸とは平行になる。またステージ

Fig. 5 Scheme of the positioning mechanism for optical parts that optical beam cannot transmit

は、 z 方向精度誤差（真直度）は10mm移動で $0.5\mu\text{m}$ であるため、ここではレーザ光軸はガイドフレーム面法線方向と一致しているとみなす。

- (2)部品寸法に合わせて加工した円形穴を持つガイドフレーム上に単レンズを接触させずに設置し、この単レンズを位置決め用ステージを用いて駆動する。
- (3)レンズなしの時のCCD面での基準光軸のスポット画像の中心とレンズを通ったあとのCCD面でのスポット画像中心の距離の差を減少させるようにパルスステージを用いて、レンズを5軸方向（光軸回りの回転を除く）に駆動する。
- (4) Z 方向にレンズを移動させた時、レンズを通ったあとのCCD面でのスポットが画像処理の分解能を超えて判別できない状況で光軸が一致した判断とする。

次に面発光レーザアレイなど、非透過型部品の位置合わせ機構を図5に示す。これら部品はフォトリソグラフィ技術により製作されることで、個々の部分の位置精度はミクロンオーダーで加工されていることを利用する。ガイドフレーム中心位置と光部品の仮想中心位置（例えばアレイ全体の中心位置）とを以下の方法で合わせる。この中心位置は、全体光学系の中心位置と一致することになる。光部品及びフレーム部品の両端面の平行度が高精度に加工されているので、ハウジングフレームに突き当てて積み重ねた時、仮想中心位置は全体の光軸と一致することになる。位置合わせの手順を以下に示す。

- (1)ガイドフレームにあらかじめ位置決めマーク（+）3点を、この3点の中心がガイドフレームの中心と一致するように設定しておく。
- (2)ガイドフレーム上のマーク位置座標P1と、アレイ部品の最外端の位置にある部分の外形形状の画像処理により得られる座標P2を用いて、P1に対するP2の相対座標P3を算出する。
- (3)ガイドフレーム上マークの設計データ、アレイ部品の設計データを基にガイドフレームに部品を取り付けたときの設計座標値P4に一致するように、パルスステージを用いて部品を位置決める。
- (4)以上の作業を設定したしきい値以下に位置決め誤差を押さえるように3点分繰返す。

ここで位置決め機構自体の変形等による精度への影響については高剛性の位置決め機構の使用や、対象光部品が微小・軽量であることから問題無いと考えられる。また接着剤凝固収縮によるずれは、接着剤の使用量が微量であること、さらに凝固収縮率の小さい材料の使用により問題は無いと考えられる。

Fig. 6 Configuration of optical I/O port block

Table 1 Configuration of optical I/O port block

2-D optical fiber array	
Size	7.0×7.0×20 mm
Array number	8×8
Array pitch	250 μm
Pitch error (Av.)	3 μm
Planar microlens array	
Size	4.5×4.5×1.8 mm
array pitch	250 μm
Focal length	0.600 mm
Guide-frame and Spacer-frame	
Size (Guide-frame)	20×20×1 mm
(Spacer-frame)	20×20×2.34 mm
Right-angle tolerance	0.05°
Parallelism	3 μm
Geometrical tolerance	5 μm

Fig. 7 Photograph of optical I/O port block

3. 二次元光入出力ブロックによる簡易組立方法の評価

3.1 試作、及び精度評価実験

フリースペース光モジュールを構成する機能ブロック組立の精度評価のため、二次元光ファイバアレイ⁵⁾と平板マイクロレンズアレイ⁶⁾からなる光入出力ブロック⁷⁾の試作を行った。光入出力ブロックは、光源からの光を光ファイバアレイを通して入射し、出射光を平板マイクロレンズアレイでコリメートする部品である。その部品の構成を図6に示す。試作に用いた部品仕様（設計値）を表1に示す。スペーサフレーム幅は平板マイクロレンズアレイの厚さとその焦点距離の和により決定している。試作した二次元光入出力ブロックの外観を図7に示す。

試作した二次元光入出力ブロックに、波長850nmの半導体レーザ光源からの光を入射したときの光スポットの状態を図8に示す。

Fig. 8 Photographs of observed optical beam spots

Fig. 9 Map of positioning error of optical beam spot

手作業により実際に光を通してながら調芯して組み立てた場合の例⁷⁾と同程度の結果が得られた。

次に光スポットの 8×8 面(64CH)からサンプルした 4×4 面(16CH)での位置ずれを測定した結果を図9に示す。本測定は平板マイクロレンズから出る光スポットを出射端でCCDによりモニタし、その基準位置からのずれ量を計測し、 $250\mu\text{m}$ ピッチの基準格子上にプロットしたものである。本測定の結果、全体の位置ずれ誤差について平均 $10\mu\text{m}$ 程度の精度が得られた。

3. 2 考 察

以上の実験結果は、従来の光を通してながら手作業で調芯しながら組み立てた例⁷⁾と同程度であった。

ここで、光部品搭載ガイドフレームを単純に積み重ねたときのモデルをもとに計算すると、両端面の平行度誤差から平板マイクロレンズ受光面での光軸角度ずれは 0.017° が見込まれ、これはファイバからの光軸ずれに換算すると $0.15\mu\text{m}$ 程度となる。組立誤差がミクロンオーダーであることから、この角度ずれの影響は無視できる。そこで、測定により得られた位置ずれ量は(1)部品精度による誤差(ファイバアレイ、レンズアレイ、ガイドフレーム、スペーサフレーム自体の誤差)と、(2)組立誤差(ガイドフレームへの位置決め誤差、全体固定時位置合わせ誤差)に起因することとなる。この $10\mu\text{m}$ の誤差中、 $3\mu\text{m}$ はファイバアレイの配列ピッチ誤差(測定値)であり、 $2\mu\text{m}$ はそれぞれファイバアレイ、レンズアレイのガイドフレームへの位置決め誤差によるものである。残りの $5\mu\text{m}$ は、レンズアレイやガイドフレーム、スペーサフレーム等の加工誤差により、それぞれの部品にばらつきが存在することに起因すると考えられる。そこで、部品自体の精度をあらかじめ評価し、光部品アライメント時に、その情報をフィードバックすることや、またガイドフレーム等の部品精度を向上する等を行えば、全体としての精度向上が可能となると考えられる。

Fig. 10 Optical system configuration of the DDC

(a) Components of DDC module

(b) Assembled DDC module

Fig. 11 Photographs of DDC module

4. フリースペース光モジュールへの応用

ここで、我々が提案した組立法を用いて、光コンピューティングシステムの一部として検討されている離散相関光学系⁹⁾(Digital discrete correlator: DDC)のモジュール化を検討し、試作を行った。ここでは、多段フリースペース光モジュールが幾つかの機能ブロックの積み重ねという簡単な工程で構成可能なことを検証する。本試作に用いた離散相関光学系の構成を図10に示す。この光学系では、各レンズを通した演算の結果、入力イメージP2が、 Δx だけシフトしてP3面で観測される。本光学系では、位置合わせ精度が設計値($30\mu\text{m}$ 以下)を満足していれば、入力イメージと同サイズの出力パターンがP3のフォトマスク上に投影される。試作した離散相関光学モジュールを図11に示す。このモジュールに用いた部品の仕様は表2の通りである。

従来の光学定盤上に構成されたシステムと比較して、脱定盤化されたモジュールが、体積に関して $1/10$ 以下にコンパクトに構成できている。次に本試作モジュールにより、基本的な機能の確

Table 2 Specifications of the components of the DDC module

Lenses	
L1,L2,L5	
Lens diameter	30.0 mm
Focal length (Front)	19.24 mm
(Back)	17.70 mm
L3,L4	
Size	9.6×9.6×1.8 mm
Array size	8×8
Array pitch	250 μ m
Focal length	0.600 mm
Guide-frame and Spacer-frame	
Size (Guide-frame)	35 × 35 × 2 mm
(Spacer-frame)	35 × 35 mm
Right-angle tolerance	0.05°
Parallelism	3 μ m
Geometrical tolerance	5 μ m

認実験を行った結果を図12に示す。この実験ではフォトマスクP3面での出力イメージをCCDカメラで観測した。図12 (a) は、図10のP2面における100 μ mの正方形ピクセルパターンからなる文字Nの入力イメージである。図12 (b) は1つの点光源入力の場合に観測された出力イメージである。図12 (c) は2つの点光源入力の場合に観測された出力イメージである。図12 (b), (c) の両方の場合においても図12 (a) の入力イメージのピクセルサイズ(100 μ m)と同じ大きさに分割された出力イメージが得られた。さらに、図12 (c) の場合にシフトした出力イメージが確認できた。

この結果から設定した精度で組み立てられていることが確認でき、我々の提案した組立法は離散相関光学モジュール組立に適用可能であり、光モジュールを簡易かつコンパクトに構成できることが示された。

5. 結 論

脱定盤化を目指した、簡易でかつコンパクトに光学系を構成できる光モジュール組立法を提案した。これに基づきフリースペース光学モジュールに適用した。この結果をまとめると以下のよう

- (1) フリースペース光学系に用いられる二次元光入出力ブロックを試作した。全体の位置ずれ量評価の結果、本手法の簡易光学系構成法により従来例と同程度の精度(10 μ m)が得られた。
- (2) 光コンピューティングシステムの一部として検討されている離散相関光学モジュールを試作した。その結果、脱定盤化された、コンパクトなモジュールが従来の1/10以下のサイズで構成できることが示された。また、試作モジュールを用いて実験を行った結果、本光学モジュールの機能確認に必要な精度で組立が可能であることが確認できた。

Fig. 12 Experimental result of the discrete correlation (a)input image 'N' at P1 plane, (b)output image (1 input light source) at P3 plane, (c) output image (2 input light sources) at P3 plane

- (3) これらの結果から、本組立法はフリースペース光モジュール組立に有用であるとの見通しを得た。本組立法により光学系が多段化する場合、従来個別対応であった煩雑な調芯作業を軽減できることが期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご討論、ご助力賜りました境界領域研究所、大平文和氏、及び光ネットワークシステム研究所、松本隆男氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Fukui, and K. Kitayama : Image Logic Algebra and Its Optical Implimentations, Appl. Opt., 31, (1992) 581.
- 2) F. B. McCormick, F. A. P. Tooley, J. L. Brubaker, J. M. Sasian, T. J. Cloonan, A. L. Lentine, R. L. Morrison, R. J. Crisci, S. L. Walker, S. J. Hinterlong, and M. J. Herron : Optomechanics of a Free-space Photonic Switching fabric: the system, proc. SPIE, 1533, (1991) 91.
- 3) S. Kawai, S. Araki, H. Kurita, T. Numai, K. Kasahara and K. Kubota : Multistage Optical Interconnection Network Using VSTEPs and Microoptics, Proc. MOC/GRIN'93, (1993) 328.
- 4) M. Fukui and K. Kitayama : Experiments of Fundamental Operations of Image Logic Algebra Using Discrete Digital Correlation, Proc. Topical Meeting of the Int. Commission for Optics, (1994) 7P-1.
- 5) 小薮国夫, 大平文和, 山本剛, 松尾慎治 : 高密度二次元光フェイバレーの試作, 電子情報通信学会春季大会 C-307 (1993).
- 6) Y. Ikeda, E. Okuda, and M. Oikawa: Graded-index Optical Waveguides and Planar Microlens Arrays and their Applications, Proc. EFOC/ LAN'87, (1987) 103.
- 7) K. Koyabu, F. Ohira, T. Yamamoto, and S. Matsuo : Novel High-density Collimator Module, OFC/IOOC'93, (1993) 2.